



UNIVERZITET U NIŠU
TEHNOLOŠKI FAKULTET LESKOVAC



Aleksandra B. Perović

**OPTIMIZACIJA PROCESA DESTILACIJE ETARSKOG
ULJA LAVANDE I NJEGOVA PRIMENA U
ALGINATNIM PREMAZIMA ZA PRODUŽENJE ROKA
TRAJANJA MINIMALNO PRERAĐENOG VOĆA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Leskovac, 2026.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF TECHNOLOGY IN LESKOVAC



Aleksandra B. Perović

**OPTIMIZATION OF THE LAVENDER ESSENTIAL OIL
DISTILLATION PROCESS AND ITS APPLICATION IN
ALGINATE COATINGS TO EXTENDING THE SHELF
LIFE OF MINIMALLY PROCESSED FRUIT**

DOCTORAL DISSERTATION

Leskovac, 2026.

MENTOR:

prof. dr Ivana Karabegović, redovni profesor
Univerzitet u Nišu
Tehnološki fakultet u Leskovcu

ČLANOVI KOMISIJE:

akademik Vlada Veljković
Srpska akademija nauka i umetnosti
Ogranak SANU u Nišu

prof. dr Bojana Danilović, redovni profesor
Univerzitet u Nišu
Tehnološki fakultet u Leskovcu

prof. dr Dragan Cvetković, redovni profesor
Univerzitet u Nišu
Tehnološki fakultet u Leskovcu

prof. dr Miljana Krstić, vanredni profesor
Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj
Mitrovici
Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici

Datum odbrane: 25.09.2026.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:

prof. dr Ivana Karabegović, redovni profesor
Tehnološki fakultet u Leskovcu, Univerzitet u Nišu

Naslov:

Optimizacija procesa destilacije etarskog ulja lavande i njegova primena u alginatnim premazima za produženje roka trajanja minimalno prerađenog voća

Rezime:

Etarsko ulje lavande izolovano je primenom konvencionalne, sekvencijalne ultrazvučne, mikrotalasne i sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije. Ispitivan je uticaj različitih metoda mlevenja biljnog materijala, dodatka soli, surfaktanta i vodene faze destilacionog ostatka (VFHD) iz prethodnog ciklusa kao dela destilacionog medijuma u narednim hidrodestilacijama na prinos i kvalitet etarskog ulja. Optimalni uslovi za postizanje maksimalnog prinosa od 2,28 ml/100 g suvih cvetova su odnos cveta i vode 1:10 g/ml, zapremina destilacionog suda 2000 ml, brzina destilacije 7,5 ml/min. U etarskom ulju izolovanom pri optimalnim uslovima identifikovano je ukupno 47 jedinjenja. Etarsko ulje ima umerenu antioksidativnu i antimikrobnu aktivnost. Primena alginatnog premaza u kombinaciji sa etarskim uljem lavande, pozitivno utiče na očuvanje vizuelnih, olfaktornih, gustativnih karakteristika, na parametre kvaliteta: gubitak težine, pH, titraciona kiselost, sadržaj malondialdehida, mikrobiološku i oksidativnu stabilnost i na opštu prihvatljivost sveže sečenih jabuka tokom skladištenja. Dodatak VFHD u premaz ima nepovoljan efekat na sve parametre ocenjivane u okviru senzorne analize.

Naučna oblast:	Tehnološko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Prehrambena tehnologija i biotehnologija
Ključne reči:	Lavanda, <i>Lavandula angustifolia</i> Mill., etarsko ulje, hidrodestilacija, ultrazvuk, mikrotalasi, optimizacija, jestivi premazi, minimalno prerađeno voće
UDK:	664.853 : 66.011 : 582.929.4 (043.3)
CERIF klasifikacija:	T430 Tehnologija hrane i pića
Tip licence kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral
Supervisor:

prof. dr Ivana Karabegović, full profesor
Faculty of Technology in Leskovac, University of Niš

Title:

Optimization of the lavender essential oil distillation process and its application in alginate coatings for extending the shelf life of minimally processed fruit

Abstract:

Lavender essential oil was isolated using conventional hydrodistillation, sequential ultrasound-assisted hydrodistillation, microwave-assisted hydrodistillation, and sequential ultrasound–microwave hydrodistillation. The influence of different methods of grinding plant material, the addition of salt, surfactant and water phase of the distillation residue (VFHD) from the previous cycle as parts of the distillation medium in subsequent hydrodistillations, was evaluated in terms of yield and essential oil quality. The optimal conditions for achieving a maximum yield of 2,28 ml/100 g dried flowers are the ratio of the flower to water 1:10 g/ml, the volume of the distillation vessel 2000 ml, the distillation speed 7,5 ml/min. A total of 47 compounds were identified in the essential oil isolated under optimal conditions. The essential oil has moderate antioxidant and antimicrobial activity. The application of alginate coating in combination with lavender essential oil has a positive effect on the preservation of visual, olfactory and gustatory characteristics, on quality parameters: weight loss, pH, titration acidity, malondialdehyde content, microbiological and oxidative stability and on the overall general acceptability of freshly cut apples during storage. The addition of VFHD to the coating has an unfavorable effect on all parameters evaluated within the sensory analysis.

Scientific Field:	Technological engineering
Scientific Discipline:	Food technology and biotechnology
Key Words:	Lavender, <i>Lavandula angustifolia</i> Mill., essential oil, hydrodistillation, ultrasound, microwaves, optimization, edible coatings, minimally processed fruit
UDC:	664.853 : 66.011 : 582.929.4 (043.3)
CERIF Classification:	T430 Food and drink technology
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

Zahvalnica

Ova doktorska disertacija rezultat je istraživanja urađenih u kompaniji DCP Hemigal u Leskovcu, u laboratorijama Tehnološkog fakulteta u Leskovcu, Univerziteta u Nišu i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, kao i u fabrici Nevena Color u Leskovcu.

Želela bih da se zahvalim svima koji su doprineli izradi ove doktorske disertacije i bili sa mnom na ovom putu. Pre svih, posebnu zahvalnost dugujem osnivaču i generalnom direktoru kompanije DCP Hemigal, Živoradu Deniću i Igoru Deniću, bez čije ideje i podrške u svakom smislu ovaj rad ne bi ugledao svetlo dana. Hvala im što su verovali u mene i pružili mi priliku da se školujem i napredujem u naučnom smislu.

Neizmernu zahvalnost dugujem i akademiku Vladi Veljkoviću i mentorki prof. dr Ivani Karabegović na prenetom znanju, dragocenim savetima, izdvojenom vremenu, podršci i smernicama tokom izrade ove disertacije. Hvala za bezgraničnu veru u mene, ogromno strpljenje, pomoć i trud da ovaj rad bude na ovako visokom nivou.

Veliku zahvalnost dugujem i saradnicama u eksperimentalnom radu i izradi disertacije, prof. dr Ani Veličković, prof. dr Jeleni Avramović i prof. dr Miljani Krstić na interesovanju za moju doktorsku disertaciju, pomoći u laboratoriji i tokom pisanja diskusije i tumačenja dobijenih rezultata, kao i za sve korisne savete i sugestije da ova disertacija bude što kvalitetnija.

Članovima komisije, prof. dr Bojani Danilović i prof. dr Draganu Cvetkoviću, se zahvaljujem za sve savete i sugestije prilikom pisanja ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svim kolegama iz DCP Hemigala na pomoći, dostupnosti, kolegijalnosti i saradnji tokom svih ovih godina.

Veliku zahvalnost dugujem i Dragani Cvetković iz firme Nevena Color i kolegama iz laboratorije Tehnološkog fakulteta za pomoć, dostupnost i podršku u svakom trenutku tokom izrade ove disertacije.

Ogromnu zahvalnost dugujem mojim roditeljima na neizmernoj ljubavi, podršci i na tome što su me naučili da cenim prave vrednosti i ne odustajem od svog cilja ma kako naporno bilo.

Najveću zahvalnost dugujem mojoj porodici, na ljubavi, podršci i razumevanju. U životu je uspeh lep samo onda kada ima sa kim da se подели, zato posebno hvala mom suprugu Milošu i sinovima Luki i Stefanu što su uvek pored mene, što mi pružaju neizmernu ljubav, motivaciju i radost i predstavljaju moj najjači oslonac i podstrek za nove uspehe.

Mojim sinovima, Luki i Stefanu.

“Neka vam ovaj rad bude dokaz da nijedan cilj nije nedostižan i da je u životu sve moguće - samo ako dovoljno snažno verujete i ne odustajete. Granice ne postoje tamo gde počinje vaša vera. Sve je moguće onome ko se usudi da sanja i ko ima hrabrosti da te snove prati.”

“Da uvek verujete u sebe onoliko koliko ja verujem u vas.”

Aleksandra Perović

LISTA OZNAKA I SKRAĆENICA

OZNAKE

Latinične oznake

Oznaka	Naziv veličine	Jedinica
a^*	parametar boje	-
A	konstanta koja predstavlja odnos konstante brzine ekstrakcije i konstante kapaciteta ekstrakcije	-
Ab	apsorbanca slepe probe	-
Ak	apsorbanca kontrole	-
Au	apsorbanca uzorka	-
b	koeficijent brze destilacije	-
b^*	parametar boje	-
D	efektivni koeficijent difuzije	m^2/s
e	Ojlerov broj	—
EC_{50}	koncentracija ulja potrebna za neutralizaciju 50% DPPH radikala	$\mu g/ml$
f_w	frakcija etarskog ulja koja se može isprati	%
k	koeficijent spore destilacije	min^{-1}
k_2	konstanta brzine drugog reda	-
k_d	konstanta brzine difuzije	min^{-1}
k_w	konstanta brzine ispiranja	min^{-1}
m_0	težina uzorka početnog dana	g
m_t	težina uzorka nakon određenog vremena skladištenja	g
L	debljina čestica	m
L^*	sjajnost / svetlina	-
q	prinos etarskog ulja nakon vremena t	ml/100 g
q	sadržaj etarskog ulja u originalnom biljnom materijalu	ml/100 g
t	vreme	s

Oznaka	Naziv veličine	Jedinica
X_1	odnos vode i cveta u jednačini 6.6	g/ml
X_2	zapremina destilacionog suda u jednačini 6.6	ml
X_3	brzina destilacije u jednačini 6.6	ml/min
Y	prinos etarskog ulja u jednačini 6.6	ml/100 g suvih cvetova

Grčka slova

Oznaka	Naziv veličine	Jedinica
α_w	maksimalna brzina destilacije za ispiranje	ml/min
α_d	maksimalna brzina destilacije za difuziju	ml/min
τ_w	vreme za koje brzina destilacije za ispiranje dostiže maksimum	min
τ_d	vreme za koje brzina destilacije za difuziju dostiže maksimum	min

Matematičke konstante

Oznaka	Naziv
π	matematička konstanta
e	Ojlerov broj

SKRAĆENICE

CLSI	Institut za kliničke i laboratorijske standarde (<i>eng. Clinical & Laboratory Standards Institute</i>)
DPPH	2,2-difenil-1-pikrilhidrazil
EFSA	Evropska agencija za bezbednost hrane (<i>eng. European Food Safety Authority</i>)
FAO	Organizacija za hranu i poljoprivredu (<i>engl. Food and Agriculture Organization</i>)
FDA	Uprava za hranu i lekove (<i>eng. Food and Drug Administration</i>)
FID	Plameno-jonizujući detektor
G	α -L-guluronska kiselina
GC/FID	Gasna hromatografija/plameno jonizujuća detekcija (<i>eng. Gas Chromatography with Flame Ionization Detection</i>)

GC/MS	Gasna hromatografija/masena spektroskopija (<i>eng. Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>)
GRAS	Opšte priznato kao bezbedno (<i>eng. Generally Recognized As Safe</i>)
HD	Hidrodestilacija
IFPA	Međunarodno udruženje za sveže sečene proizvode (<i>engl. International Fresh-Cut Produce Association</i>)
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (<i>eng. International Organization for Standardization</i>)
LEO	Etarsko ulje lavande (<i>eng. Lavender essential oil</i>)
M	β -D-manuronska kiselina
MAHD	Mikrotalasna hidrodestilacija (<i>eng. Microwave-Assisted Hydrodistillation</i>)
MIC	Minimalna inhibitorna koncentracija (<i>eng. Minimum Inhibitory Concentration</i>)
MPV	Minimalno prerađeno voće
SD	Destilacija vodenom parom (<i>eng. Steam Distillation</i>)
SHSD	Simultana hidro- i parna destilacija
SUMAHD	Sekvencijalna mikrotalasno-ultrazvučna hidrodestilacija (<i>eng. Sequential Ultrasonic-Microwave assisted hydrodistillation</i>)
USDA	Ministarstvo poljoprivrede Sjedinjenih Država (<i>eng. United States Department of Agriculture</i>)
UV	Ultravioletno zračenje (<i>eng. Ultraviolet Radiation</i>)
VFHD	Vodena faza destilacionog ostatka
WHO	Svetska zdravstvena organizacija (<i>eng. World Health Organization</i>)

Sadržaj

1. UVOD	1
2. ETARSKA ULJA.....	4
2.1 Hemijski sastav etarskih ulja.....	5
2.2 Fizičko-hemijske karakteristike etarskih ulja.....	6
2.3 Čuvanje etarskih ulja	7
3. POSTUPCI IZOLACIJE BIOAKTIVNIH KOMPONENTI IZ BILJNOG MATERIJALA	8
3.1 Predtretman biljnog materijala.....	8
3.2 Klasični postupci izolacije bioaktivnih jedinjenja iz biljnog materijala.....	9
3.2.1 Hidrodestilacija	9
3.2.1.1 Kinetika hidrodestilacije etarskog ulja lavande	12
3.3 Savremeni postupci hidrodestilacije	16
3.3.1 Ultrazvučna hidrodestilacija	16
3.3.2 Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija.....	17
3.3.3 Mikrotalasna hidrodestilacija.....	18
3.3.4 Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija.....	20
3.4 Mehanizam i kinetika hidrodestilacije etarskog ulja	21
3.4.1 Mehanizam hidrodestilacije etarskog ulja lavande	21
3.4.2 Modelovanje kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande.....	21
4. LAVANDA – <i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	27
4.1 Botaničke karakteristike lavande.....	28
4.2 Sadržaj aktivnih komponenti	30
4.3 Primena lavande.....	30
5. UPOTREBA JESTIVIH PREMAZA KOD	32
5.1 Minimalno prerađeno voće i povrće.....	32
5.2 Jestivi premazi.....	39
5.2.1 Karakteristike jestivih premaza.....	41
5.2.2 Vrste jestivih premaza.....	43
5.2.2.1 Jestivi premazi na bazi polisaharida	44
5.2.2.2 Jestivi premazi na bazi proteina.....	48
5.2.2.3 Jestivi premazi na bazi lipida.....	50
5.2.2.4 Jestivi premazi na bazi agroindustrijskog otpada	51
5.2.2.5 Kompozitni jestivi premazi	51
5.2.3 Metode nanošenja jestivih premaza	52
5.2.3.1 Potapanje (umakanje).....	52
5.2.3.2 Premazivanje.....	53

5.2.3.3	Raspršivanje.....	54
5.2.3.4	Nanošenje premaza u fluidizovanom sloju.....	55
5.2.3.5	Nanošenje premaza u rotirajućem bubnju.....	57
5.2.3.6	Elektroraspršivanje	58
5.2.5	Aktivna pakovanja	59
5.2.5.1	Etarska ulja u jestivim premazima.....	63
5.2.4	Migracija bioaktivnih jedinjenja iz materijala za pakovanje u hranu	65
5.2.6	Potencijal primene jestivih premaza	65
6.	EKSPERIMENTALNI DEO	67
6.1	Materijal	67
6.1.1	Sadržaj vlage.....	67
6.1.2	Predtretman biljnog materijala.....	67
6.1.2.1	Suvo mlevenje i prosejavanje	68
6.1.2.2	Mokro mlevenje	68
6.2	Izolovanje bioaktivnih komponenti.....	68
6.2.1	Konvencionalna hidrodestilacija.....	68
6.2.2	Mikrotalasna hidrodestilacija.....	69
6.2.3	Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija.....	70
6.3	Karakterizacija bioaktivnih komponenti	73
6.3.1	Određivanje fizičko-hemijskih karakteristika etarskog ulja lavande	73
6.3.2	Gasna hromatografija-masena spektrometrija (GC/MS) i gasna hromatografija-plamenojonizujuća detekcija (GC/FID) etarskog ulja lavande.....	73
6.3.3	Određivanje antioksidativne aktivnosti DPPH metodom	74
6.3.4	Određivanje antimikrobne aktivnosti.....	74
6.4	Jestivi premazi.....	75
6.4.1	Priprema alginatnog premaza	75
6.4.2	Nanošenje jestivog premaza na sveže sečenu jabuku	75
6.4.3	Određivanje indeksa potamnjenja.....	76
6.4.4	Senzorna analiza sveže sečene jabuke sa jestivim premazom	76
6.4.5	Određivanje gubitka mase sveže sečene jabuke sa jestivim premazom	77
6.4.6	Merenje pH vrednosti i titracione kiselosti sveže sečene jabuke sa jestivim premazom	77
6.4.7	Određivanje sadržaja malondialdehida	78
6.4.8	Mikrobiološka analiza sveže sečene jabuke sa jestivim premazom	78
6.5	Statistička obrada i optimizacija podataka	78
6.5.1	Statistička analiza eksperimentalnih podataka.....	79
6.5.2	Statistička optimizacija procesa hidrodestilacije	79
6.6	Modelovanje kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande	80
7.	REZULTATI I DISKUSIJA	81
7.1	Konvencionalna hidrodestilacija	81
7.1.1	Predtretman biljnog materijala i modifikacija destilacione vode	81
7.1.1.1	Uticaj mlevenja na prinos etarskog ulja lavande	81
7.1.1.2	Uticaj vrste i koncentracije soli na prinos etarskog ulja lavande.....	83

7.1.1.3	Uticaj surfaktanta na prinos etarskog ulja lavande	85
7.1.1.4	Uticaj VFHD na prinos etarskog ulja lavande	86
7.1.2	Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima	87
7.1.2.1	Uticaj zapremine destilacionog suda na prinos etarskog ulja	87
7.1.2.2	Uticaj brzine destilacije na prinos etarskog ulja	89
7.1.2.3	Uticaj odnosa cvet-voda na prinos etarskog ulja	90
7.1.3	Hemijski sastav etarskog ulja dobijenog različitim vrstama predtretmana	92
7.1.4	Optimizacija hidrodestilacije etarskog ulja lavande	96
7.1.5	Kinetika hidrodestilacije etarskog ulja lavande	102
7.1.5.1	Mehanizam hidrodestilacije etarskog ulja lavande	103
7.1.5.2	Oblik kinetičkih krivih.....	103
7.1.5.3	Evaluacija kinetičkih modela konvencionalne hidrodestilacije.....	110
7.1.5.4	Izbor kinetičkog modela za inženjersku primenu	115
7.1.5.5	Mehanističko tumačenje kinetike konvencionalne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I.....	117
7.1.6.	Uticaj mlevenja i prosejavanja cveta i modifikacije destilacionog medijuma na kinetiku hidrodestilacije.....	122
7.1.6.1	Uticaj mlevenja na kinetiku hidrodestilacije.....	122
7.1.6.2	Uticaj vrste i koncentracije rastvora soli na kinetiku hidrodestilacije	123
7.1.6.3	Uticaj VFHD na kinetiku hidrodestilacije	124
7.2	Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija.....	125
7.2.1	Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima	125
7.2.2	Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom.....	127
7.2.3	Kinetika sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije etarskog ulja lavande.....	129
7.2.3.1	Mehanizam sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije etarskog ulja lavande.	130
7.2.3.2	Oblik kinetičkih krivih kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije.....	132
7.2.3.3	Evaluacija kinetičkih modela sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije.....	132
7.2.3.4	Izbor kinetičkog modela za inženjersku primenu	134
7.2.3.5	Mehanističko tumačenje kinetike sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I	135
7.3	Mikrotalasna hidrodestilacija.....	137
7.3.1	Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima	137
7.3.2	Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog mikrotalasnom hidrodestilacijom	141
7.3.3	Kinetika mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande	145
7.3.3.1	Mehanizam mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande	145
7.3.3.2	Oblik kinetičkih krivih kod mikrotalasne hidrodestilacije.....	147
7.3.3.3	Evaluacija kinetičkih modela mikrotalasne hidrodestilacije.....	147
7.3.3.4	Izbor kinetičkog modela mikrotalasne hidrodestilacije	149
7.3.3.5	Mehanističko tumačenje kinetike mikrotalasne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I.....	151
7.4	Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija.....	154
7.4.1	Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima	154
7.4.2	Hemijski sastav etarskog ulja dobijenog sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom.....	158

7.4.3 Kinetika sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande	162
7.4.3.1 Mehanizam sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande	162
7.4.3.2 Oblik kinetičkih krivih kod sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije	164
7.4.3.3 Evaluacija kinetičkih modela sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije	164
7.4.3.4 Izbor kinetičkog modela sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije	166
7.4.3.5 Mehanističko tumačenje kinetike sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I	168
7.5 Poređenje konvencionalne, sekvencijalne ultrazvučne, mikrotalasne i sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije	170
7.5.1 Poređenje maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande različitih metoda hidrodestilacije	170
7.5.2 Uticaj metoda ekstrakcije na hemijski profil etarskog ulja lavande	174
7.5.3 Upporedna analiza kinetičkih modela prema <i>MRPD</i> , <i>AICc</i> i R^2 za četiri ekstrakcione metode	176
7.6 Karakterizacija etarskog ulja lavande dobijenog pri optimalnim uslovima	178
7.6.1 Fizičko-hemijske karakteristike etarskog ulja lavande	178
7.6.2 Hemijski sastav etarskog ulja lavande	179
7.6.3 Antioksidativna aktivnost određena DPPH metodom	181
7.6.4 Antimikrobna aktivnost	182
7.7 Primena etarskog ulja lavande u alginatnim premazima za produženje roka trajanja sveže sečene jabuke	184
7.7.1 Fizičko-hemijske karakteristike sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom skladištenja	184
7.7.1.1 Gubitak mase sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja	185
7.7.1.2 Promena boje sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja	187
7.7.1.3 pH i titraciona kiselost sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja	192
7.7.1.4 Sadržaj malondialdehida sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja	196
7.7.2 Mikrobiološka stabilnost sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom skladištenja	199
7.7.3 Senzorne karakteristike sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom skladištenja	204
8. ZAKLJUČAK	210
9. LITERATURA	215
10. PRILOG	271

1. UVOD

Minimalno prerađeno voće (MPV) predstavlja sveže voće koje je podvrgnuto postupcima minimalne obrade (pranje, ljuštenje, sečenje na komade različitih veličina i slično) da bi se dobio potpuno jestiv proizvod spreman za upotrebu (Qi i sar. 2011, Rojas-Graü i sar. 2007a). Industrija MPV proizvoda beleži dvocifrene stope rasta kao odgovor na rastuću potražnju potrošača za prehrambenim proizvodima koji pružaju zdravstvene benefite, a istovremeno štede vreme i novac. MPV karakterišu visok kvalitet, očuvan sadržaj vitamina, bioaktivnih jedinjenja, minerala i vlakana (Artés i Allende 2005). Međutim, minimalna obrada olakšava mikrobnu kontaminaciju, gubitak vode, omekšavanje, tamnjenje rezane površine, pa takav proizvod ima ograničen rok trajanja (Ghavidel i sar. 2013). Skladištenje MPV na niskoj temperaturi je široko rasprostranjena metoda čuvanja u cilju produženja roka trajanja i održavanja kvaliteta. Druge metode uključuju upotrebu različitih materijala za pakovanje u modifikovanoj atmosferi i primenu konzervanasa (Yousuf i Quadri 2020).

Globalni rast populacije i sve veća potražnja za svežom i bezbednom hranom učinio je očuvanje hrane područjem velike važnosti. Široko rasprostranjena upotreba plastike u ambalaži za hranu izaziva značajnu zabrinutost u pogledu zagađenja životne sredine. Ovo važno pitanje životne sredine, dodatno pojačano potražnjom potrošača za sigurnijim i održivim alternativama, podstiče pomak ka inovativnim tehnikama očuvanja hrane (Ncube i sar. 2020, Wang i sar. 2021). Jestivi premazi i filmovi pojavljuju se kao direktan odgovor na ovu potrebu, nudeći održivo i ekološki prihvatljivo rešenje koje ima potencijal da redefiniše standarde očuvanja hrane (Nunes i sar. 2023). Ovi premazi i filmovi se obično karakterišu kao tanki slojevi sastavljeni od hemijskih ili bioloških supstanci koje se nanose na površinu proizvoda, pri čemu uspostavljaju polupropusnu barijeru između prehrambenog proizvoda i spoljašnje sredine, ublažavaju kretanje vlage, gasova i rastvora, te odlažu kvarenje i održavaju svežinu (Aayush i sar. 2022).

Raznovrsna lepeza ekološki prihvatljivih i prirodnih materijala može se koristiti u formulaciji jestivih premaza. To uključuje polisaharide (hitozan, alginat, celulozu, pektin i skrob), proteine (želatin, protein soje i kazein), lipide (pčelinji vosak, karnauba vosak i biljna ulja) i njihove kompozite. Ovi materijali su bezbedni, biorazgradivi i uglavnom se dobijaju iz obnovljivih izvora (Aayush i sar. 2022, Oduro 2021, Yadav i sar. 2024). Proteklih nekoliko godina istraživanja u oblasti jestivih biorazgradivih filmova i premaza fokusirana su na

poboljšanje njihovih mehaničkih i funkcionalnih karakteristika, pri čemu je dodavanje ekstrakata ili etarskih ulja, u slobodnom stanju ili inkorporirana u nanočestice, od posebnog značaja za prehrambenu industriju (Juric i sar. 2024). Etarska ulja se uglavnom koriste zbog svojih antibakterijskih, antifungalnih i antivirusnih svojstava. Pokazalo se da su efikasna protiv patogena i bakterija koje kvare hranu. Ona su odlična alternativa hemijskim konzervansima, a osim kod MPV premazi sa etarskim uljima koriste se i za konzervisanje drugih prehrambenih proizvoda (Ghasemi i sar. 2023). Prednost ugradnje etarskih ulja u jestive premaze i filmove, za razliku od njihove direktne primene, je u tome što usporava brzinu difuzije antimikrobnih jedinjenja i omogućava duže vreme otpuštanja. Obzirom da efikasne doze etarskog ulja u slučaju direktne upotrebe mogu premašiti prihvatljive senzorne granice, jedan od najboljih pristupa za smanjenje nepoželjnih organoleptičkih uticaja, a zadržavanje bioloških aktivnosti i poželjnih efekata, je da se etarska ulja primenjuju kao dodatak jestivim premazima ili filmovima (Yousuf i sar. 2021).

Lavanda ima komercijalnu vrednost zbog svog svežeg ili osušenog cveta i ekstrakcije etarskog ulja. Etarsko ulje lavande je poznato po sedativnom, spazmolitičkom, antivirusnom, antidepresivnom i antimigrenskom dejstvu (Lesage-Meessen i sar. 2015, López i sar. 2017). Ima primenu u hemijskoj, kozmetičkoj i prehrambenoj industriji. Iscrpljeni ostaci biljnog materijala nakon destilacije i vodena faza destilacionog ostatka (VFHD), nekada nus-proizvodi destilacije etarskog ulja, postali su vredni resursi, usklađeni sa konceptom „nultog otpada“ (Crisan i sar. 2023). Iako navedeni nus-proizvodi poseduju vredna bioaktivna jedinjenja, sa dokazanom antimikrobnom i antioksidativnom aktivnošću (Prusinovska i sar. 2016), sa potencijalnom primenom u prehrambenoj industriji, ovaj materijal je i dalje nedovoljno istražen (Smigielski i sar. 2013).

Izolovanje etarskog ulja tradicionalno podrazumeva primenu hidrodestilacije i destilacije vodenom parom (Aprotosoae i sar. 2017), mada se može koristiti i ekstrakcija rastvaračem (Barbieri i Borsotto 2018). Kako potražnja za prirodnim proizvodima i ekološki prihvatljivim tehnikama ekstrakcije neprestano raste, u fokusu istraživanja su inovativne metode čija prednost je poboljšanje efikasnosti, prinosa i kvaliteta dobijenih proizvoda. Najčešće korišćene inovativne tehnike za ekstrakciju etarskih ulja uključuju ekstrakciju superkritičnim CO₂, ultrazvučnu, mikrotalasnu i turbohidrodestilaciju (Périno-Issartier i sar. 2013).

Opšti cilj doktorske disertacije bio je optimizacija procesa destilacije etarskog ulja lavande radi dobijanja ulja visokog kvaliteta i biološke aktivnosti i njegova primena u alginatnim

premazima za unapređenje mikrobiološke, oksidativne i senzorne stabilnosti i produženje roka trajanja minimalno prerađenog voća.

Glavni ciljevi doktorske disertacije su:

- Ispitivanje uticaja predtretmana biljnog materijala (mlevenje i prosejavanje), modifikacije destilacione vode dodatkom soli, surfaktanta i VFHD i operativnih parametara (zapremina destilacionog suda, odnos vode i cveta i brzina zagrevanja) na prinos, sastav i kinetiku hidrodestilacije etarskog ulja lavande,
- Istraživanje uticaja primene ultrazvuka (amplituda i vreme trajanja), mikrotalasa (snaga i vreme trajanja i zapremina destilacionog suda), kao i kombinacije ultrazvuka i mikrotalasa (snaga i vreme trajanja i zapremina destilacionog suda) na prinos, sastav i kinetiku hidrodestilacije etarskog ulja lavande,
- Optimizacija postupka hidrodestilacije i izbor optimalnih uslova u cilju postizanja maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande korišćenjem metode odzivnih površina,
- Određivanje fizičko-hemijskih karakteristika, kao i antioksidativne i antimikrobne aktivnosti etarskog ulja dobijenog pod optimalnim uslovima hidrodestilacije,
- Priprema i karakterizacija alginatnih premaza sa dodatkom različitih koncentracija etarskog ulja lavande i VFHD zaostalog nakon dobijanja etarskog ulja,
- Praćenje mikrobiološke i oksidativne stabilnosti sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima sa dodatkom različitih koncentracija etarskog ulja lavande i VFHD tokom skladištenja na +4 °C,
- Analiza senzornih karakteristika uzoraka sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima sa dodatkom različitih koncentracija etarskog ulja lavande i VFHD tokom skladištenja na +4 °C,
- Utvrđivanje potencijala primene alginatnih premaza sa etarskim uljem lavande i VFHD u cilju produženja roka trajanja sveže sečene jabuke.

2. ETARSKA ULJA

Etarska ulja su proizvodi sekundarnog metabolizma biljaka i predstavljaju lako isparljive, aromatične supstance koje zadržavaju karakterističan miris i osobine biljke iz koje su dobijene (Başer i Buchbauer 2024). Nazivaju se i eterična ili esencijalna ulja. Dobro se rastvaraju u alkoholu i organskim rastvaračima, slabo u vodi, a na vazduhu brzo isparavaju bez ostavljanja masnog traga (Başer i Buchbauer 2024, Kitić 2002).

Korišćenje etarskih ulja poznato je još od davnina. Stari narodi Indije, Persije, Egipta i Arabije koristili su ih iz mirisnih biljaka, a kasnije su ta znanja preuzeli Grci i Rimljani. Razvoj organizovane proizvodnje započeo je u Južnoj Francuskoj oko 16. veka, dok je krajem 19. veka, razvojem organske hemije, počela industrijska proizvodnja pojedinih mirisnih komponenti (Gašić 1985).

Etarska ulja su složene smeše isparljivih jedinjenja, uglavnom mono- i seskviterpena i fenilpropanoida. Najčešće se izdvajaju destilacijom vodenom parom, dok se kod agruma dobijaju presovanjem. Nakon izolacije mogu se dodatno obrađivati radi izdvajanja pojedinih komponenti (Başer i Buchbauer 2024, Kovačević 2004). U biljkama mogu biti smeštena na površini (u žlezdama) (ulja nane, lavande i ulja smeštena u perikarpu plodova *Citrus* vrste) ili ispod površine, u različitim tkivima: ispod kore drveta (cimet, beli bor), u pukotinama drveta (sandalovo drvo, kedrovo drvo), u suvim cvetovima i pupoljcima (kamilica, karanfilić), u semenu i plodovima (kim, anis, peršun, oraščić), u korenu raznih vrsta biljaka (đumbir, iris), između palisadnog i čvrstog tkiva (eukaliptus) (Denny 2001). Etarska ulja su uglavnom produkti viših biljaka. Ove biljke su raspoređene u preko pedeset familija, a najpoznatije su aromatične biljke familija *Asteraceae*, *Lamiaceae*, *Apiaceae*, *Rutaceae* i *Lauraceae*. Mogu se nalaziti u različitim organima iste biljke, pri čemu njihov sastav može biti sličan ili znatno različit (Kovačević 2004). Njihova biološka uloga je da štite biljku od mikroorganizama, insekata i biljojeda, učestvuju u prilagođavanju na stresne uslove i privlače oprašivače. Neka jedinjenja mogu inhibirati klijanje drugih biljaka ili delovati kao prirodni insekticidi i antimikrobni agensi (Bakkali i sar. 2008, Kovačević 2004, Naeem i Khan 2025).

Količina i sastav etarskog ulja zavise od biljne vrste, genetskih osobina, ekoloških uslova, lokaliteta, vremena berbe i načina izolacije. Ista biljka sa različitih staništa može davati ulja

različitog sastava, što se označava pojmom hemotip. Sadržaj ulja u biljnom materijalu može varirati od 0,1% do 10% (Başer i Buchbauer 2024, Zeljković i Maksimović 2015).

Danas je poznato mnogo etarskih ulja, od kojih se oko 300 komercijalno koristi u prehrambenoj, farmaceutskoj, kozmetičkoj i hemijskoj industriji, kao i u poljoprivredi i proizvodnji parfema, lekova i konzervanasa (Bakkali i sar. 2008, Chemat i sar. 2007, Naeem i Khan 2025). Imaju brojna biološka dejstva: antiseptičko, antiinflamatorno, antioksidativno, spazmolitičko i mukolitičko. Pokazuju snažno antimikrobno delovanje protiv bakterija, gljiva i virusa, zbog čega su značajna kao prirodna alternativa sintetičkim konzervansima i antimikrobnim sredstvima. Takođe se ispituje njihova primena u prevenciji i terapiji različitih hroničnih oboljenja (Pisseri i sar. 2008).

2.1 Hemijski sastav etarskih ulja

Hemijski sastav etarskih ulja zavisi od genetskih osobina biljke, ali u velikoj meri i od spoljašnjih uslova kao što su klima, tip zemljišta, lokalitet, vreme berbe i način izolacije (Smith i sar. 2005). Osim toga, značajni su i razvojni stadijum biljke kao i način obrade biljnog materijala (sušenje, usitnjavanje, ekstrakcija). Navedeni faktori mogu uticati na količinu etarskog ulja i njegov hemijski sastav, a svaka obrada sirovine može dovesti do delimičnog gubitka ulja ili promene njegovih komponenti (Kovačević 2004, Naeem i Khan 2025).

Etarska ulja su smeše organskih jedinjenja koja najčešće sadrže ugljenik, vodonik i kiseonik i dele se u dve osnovne grupe. Prvu grupu čine ugljovodonici, uglavnom terpeni (mono-, seskvi- i diterpeni), dok drugu grupu čine oksigenovana jedinjenja kao što su alkoholi, aldehidi, ketoni, estri, fenoli i oksidi, a ređe kiseline, laktoni i jedinjenja sa sumporom ili azotom (Başer i Buchbauer 2024, Kovačević 2004, Naeem i Khan 2025). Najzastupljenija grupa jedinjenja u etarskim uljima su terpeni, među kojima su česti limonen, pinen, kamfen i kariofilen. Estri daju prijatan, često voćni miris i imaju fungicidno dejstvo, dok su aldehidi karakteristični za ulja citrusa i odgovorni za mirisne note limuna. Ketoni mogu biti toksični ili netoksični, u zavisnosti od vrste, dok fenoli doprinose intenzivnom i prepoznatljivom mirisu etarskih ulja (Başer i Buchbauer 2024). Sastav etarskih ulja može biti vrlo jednostavan ili veoma složen. Neka ulja sadrže samo nekoliko komponenti, dok druga mogu imati veliki broj različitih jedinjenja u svom sastavu (Başer i Buchbauer 2024, Meireles 2008, Smith i sar. 2005).

Istraživanja su pokazala da etarska ulja imaju važnu fiziološku i ekološku ulogu u biljci. Ona učestvuju u metabolizmu i pomažu biljci da se prilagodi promenama u životnoj sredini. Promene u količini i sastavu ulja omogućavaju biljci bolju otpornost na stresne uslove, smanjenje gubitka vode i regulaciju temperature, a njihov miris privlači insekte oprašivače (Başer i Buchbauer 2024). Pojedine komponente etarskih ulja mogu delovati privlačno ili odbojno na druge organizme, čime utiču na odnose biljke sa biljkama, životinjama, mikroorganizmima i čovekom. Neke biljke ispoljavaju i alelopatičko dejstvo, odnosno sprečavaju klijanje i rast drugih biljaka u svojoj blizini. Ovaj efekat povezan je sa delovanjem određenih monoterpena, poput kamfora i 1,8-cineola, koji su identifikovani u okolini žalfije, pelina i eukaliptusa (Başer i Buchbauer 2024, Naeem i Khan 2025).

2.2 Fizičko-hemijske karakteristike etarskih ulja

Na sobnoj temperaturi etarska ulja su uglavnom tečna, ređe viskozna ili polučvrsta. Lako su pokretljiva, bistra i bezbojna ili blago obojena. Njihovi sastojci lako isparavaju već na nižim temperaturama, što im daje karakterističan miris. Etarska ulja su lipofilna – dobro se rastvaraju u mastima, masnim uljima, etanolu i nepolarnim organskim rastvaračima, dok se u vodi uglavnom ne rastvaraju. Pošto su smeše različitih jedinjenja, nemaju jedinstvenu tačku ključanja, već isparavaju u temperaturnom opsegu od oko 150 do 350 °C (Başer i Buchbauer 2024, Kovačević 2004, Naeem i Khan 2025). Ulja dobijena hidrodestilacijom često sadrže ostatke vode, što može smanjiti njihov kvalitet, pa se pre analize suše bezvodnim natrijum-sulfatom (Naeem i Khan 2025).

Kvalitet etarskih ulja procenjuje se određivanjem njihovih fizičko-hemijskih osobina. Dobro osušeno ulje treba da bude bistro i providno, a njegova boja zavisi od biljne sirovine. Takođe se ispituje stepen čistoće, odnosno prisustvo nečistoća kao što su voda, masti, mineralna ulja, etanol, oksidacioni proizvodi ili strani estri. Važan parametar je i rastvorljivost u vodenim rastvorima etanola, koja se izražava količinom alkohola potrebnom za rastvaranje određene zapremine ulja. Određuju se i relativna gustina na 20 °C, indeks refrakcije pomoću refraktometra i optička rotacija polarimetrom. Određuju se i hemijski pokazatelji kvaliteta, estarski i kiselinjski broj (Başer i Buchbauer 2024, Skala i sar. 1999).

2.3 Čuvanje etarskih ulja

Etarska ulja su lako isparljiva i mogu dugo zadržati svoja svojstva ako se pravilno čuvaju. Najbolje ih je skladištiti u dobro zatvorenim, do vrha napunjenim tamnim staklenim ili metalnim bocama, bez prisustva vazduha, na hladnom i tamnom mestu. U takvim uslovima mogu ostati stabilna godinama. Međutim, nakon otvaranja boce njihov rok trajanja se skraćuje, jer pri svakom otvaranju dolazi do gubitka isparljivih sastojaka. Takođe, veća količina vazduha u boci ubrzava oksidaciju, što dovodi do postepenog propadanja etarskog ulja (Başer i Buchbauer 2024, Marković 2011).

3. POSTUPCI IZOLACIJE BIOAKTIVNIH KOMPONENTI IZ BILJNOG MATERIJALA

Za izdvajanje različitih biološki aktivnih supstanci iz biljaka, kao što su terpeni, vitamini, karotenoidi i masne kiseline, primenjuje se veliki broj metoda. Prilikom izbora odgovarajuće tehnike potrebno je voditi računa o tome koliko je postupak selektivan prema željenim jedinjenjima, kao i o mogućnosti njihovog oštećenja ili razgradnje tokom ekstrakcije. Najvažniji kriterijumi su vrsta biljne sirovine, ukupni prinos, produktivnost i selektivnost procesa. Prinos, produktivnost i vrsta sirovine utiču na ekonomsku isplativost, dok selektivnost određuje kvalitet i čistoću dobijenog proizvoda (Ranjha i sar. 2023).

3.1 Predtretman biljnog materijala

Za izolovanje etarskog ulja iz biljnog materijala ključna je efikasna priprema biljnog materijala. Najčešće korišćene metode predtretmana su fizičke i hemijske, dok se biološke retko koriste. Predtretmanom se razbijaju strukture koje sadrže etarsko ulje u cilju njegovog lakšeg oslobađanja. U fizičke metode spada mlevenje (Filly i sar. 2016), ultrazvučna obrada (sonikacija) (Chekoual i sar. 2018a) i impulsno električno polje (Hadri i sar. 2023). Mlevenjem se smanjuje veličina čestica čime se oštećuju strukture koje sadrže etarsko ulje i narušava integritet ćelijskog zida. Primena ultrazvuka zasniva se na fenomenu kavitacije, kojom se poboljšava penetracija rastvarača u biljni materijal i intenzivira difuzija ciljanih jedinjenja, čime se značajno ubrzava proces ekstrakcije etarskog ulja (Chekoual i sar. 2018a). Impulsno električno polje izaziva elektroporaciju biljnih ćelija, podstičući oslobađanje etarskog ulja i poboljšavajući prenos mase (Hadri i sar. 2023). Hemijski predtretman podrazumeva upotrebu kiselina, rastvora alkalija, soli ili površinski aktivnih materija u cilju poboljšanja efikasnosti izolovanja i prinosa etarskog ulja. Surfaktanti poboljšavaju rastvorljivost hidrofobnih molekula, dok soli utiču na promenu ravnoteže para-tečnost. Eksperimentalno je utvrđen pozitivan efekat KCl, Na₂SO₄ i MgSO₄, dok K₂SO₄, NaCl i MgCl₂ imaju negativan efekat na prinos etarskog ulja lavande (Yu i sar. 2013). NaCl i surfaktanti poput Tween 40 povećavaju prinos etarskog ulja lavande i smanjuju potrošnju energije u poređenju sa konvencionalnom metodom (Filly i sar. 2016). Biološke metode

uključuju korišćenje hidrolitičkih enzima (npr. celulazu, pektinazu) kako bi se razbili ćelijski zidovi i povećao prinos etarskog ulja (Rashed i sar. 2017).

3.2 Klasični postupci izolacije bioaktivnih jedinjenja iz biljnog materijala

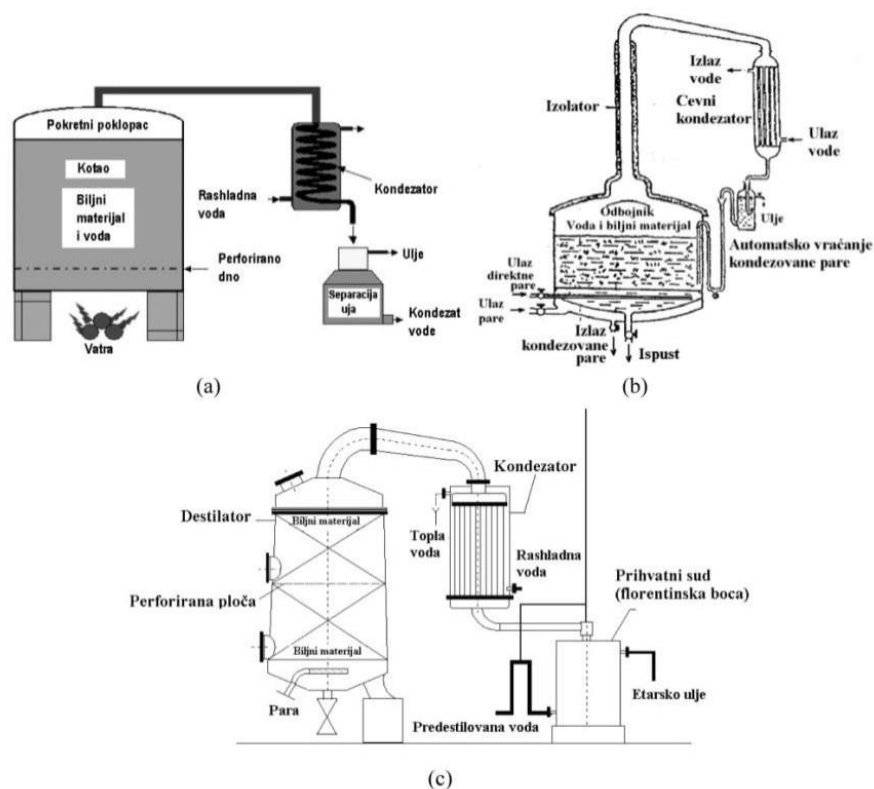
3.2.1 Hidrodestilacija

Hidrodestilacija je metoda koja se koristi za izdvajanje, prečišćavanje ili razdvajanje supstanci koje se ne mešaju ili se slabo mešaju sa vodom. Ovaj proces se zasniva na Daltonovom zakonu, prema kome je ukupni pritisak pare smeše jednak zbiru parcijalnih pritisaka pojedinačnih komponenti. Smeša ključa na temperaturi pri kojoj zbir tih pritisaka dostigne atmosferski pritisak, a ta temperatura je niža od tačke ključanja svake komponente posebno. Para koja nastaje sadrži vodu i isparljive biljne komponente, a nakon kondenzacije razdvaja se na vodenu i uljnu fazu. Etarska ulja se tradicionalno dobijaju hidrodestilacijom pri atmosferskom ili sniženom pritisku. Ova metoda je ekonomski povoljna jer omogućava preradu velikih količina lekovitog i aromatičnog biljnog materijala (Handa 2008). Dobijeno etarsko ulje sadrži raznovrsnu i složenu mešavinu raznih jedinjenja, uključujući monoterpe, seskviterpe, oksigenisane derivate i fenilpropanoide. Vodeni destilacioni ostatak se sastoji od neisparljivih, vodorastvorljivih jedinjenja kao što su polifenoli, proteini, enzimi, aminokiseline, polisaharidi, alkaloidi, alkoholna jedinjenja i vitamini. Takođe sadrže rezidualnu frakciju etarskih ulja, obično manju od 1 g/l. Čvrsti ostaci se prvenstveno sastoje od kondenzovanih polifenola i nerastvorljivih lignoceluloznih materijala, koji obuhvataju hemicelulozu, celulozu i lignin. Ove prepoznatljive karakteristike otvaraju mnoge mogućnosti za korišćenje etarskih ulja, VFHD i čvrstih ostataka u različitim primenama. Suštinske vrednosti VFHD i čvrstih ostataka predstavljaju potencijal za dalje istraživanje i korišćenje onoga što se obično zanemaruje kao otpad (Perović i sar. 2025b).

U zavisnosti od načina izvođenja, razlikuju se vodena, vodeno-parna i parna hidrodestilacija, kao što je prikazano na slici 3.1 (Skala i sar. 1999).

Kod vodene hidrodestilacije biljni materijal se potapa u vodu i zagreva do ključanja, pri čemu su biljni delovi stalno u kontaktu sa vodom (slika 3.1a) (Handa 2008). Isparljiva ulja se delimično rastvaraju unutar žlezda, putem osmoze prodiru kroz nabubrele membrane dolazeći na

spoljašnju površinu a zatim isparavaju i bivaju nošena prolazećom parom. Takođe, vrela voda prodire u biljno tkivo i razbija žlezde koje sadrže ulje, čime se olakšava oslobađanje etarskog ulja (Perović i sar. 2025b). Nastale pare se kondenzuju, a dobijeni destilat se sakuplja, pri čemu se ulje odvaja od vodene faze (Handa 2008). Čvrsti ostaci koji zaostaju nakon destilacije se sakupljaju nakon završetka celog procesa. Često se odbacuju kao otpad uprkos tome što sadrže tragove etarskih ulja i vrednih neisparljivih jedinjenja (Perović i sar. 2025b). Zbog kretanja materijala u ključaloj vodi, ova metoda je pogodna za sitno usitnjene ili praškaste sirovine koje bi u kontaktu sa parom mogle da se zgrudvaju i otežaju prolazak pare. Oprema za ovu metodu je jednostavna, jeftina i pogodna za rad u terenskim uslovima. Nedostatak vodene hidrodestilacije je to što ekstrakcija često nije potpuna, jer neke komponente teško isparavaju ili zahtevaju veliku količinu pare, što smanjuje ekonomičnost procesa (Handa 2008). Zbog nižeg prinosa i slabijeg kvaliteta ulja, ova metoda se najčešće koristi kod manjih proizvođača i u ruralnim sredinama. Primjenjuje se, na primer, za dobijanje ulja lavande, majčine dušice i ruže. Tokom procesa može doći i do hemijskih promena, kao što je razgradnja estara (saponifikacija), posebno ako metalni delovi opreme deluju kao katalizatori (Skala i sar. 1999).



Slika 3.1 Šema postrojenja za (a) vodenu hidrodestilaciju, (b) vodeno-parnu hidrodestilaciju i (c) parnu destilaciju (Skala i sar. 1999)

Kod vodeno-parne hidrodestilacije biljni materijal se nalazi u vodi, dok se vodena para proizvedena u posebnom parnom kotlu istovremeno uvodi direktno u mešavinu biljnog materijala i vode (slika 3.1b). Na ovaj način postiže se intenzivnije zagrevanje i mešanje, što omogućava brže izdvajanje etarskog ulja, skraćuje trajanje procesa i povećava prinos (Stanković i sar. 1994a, 1994b). Vodena para prolazi kroz suspenziju od donjeg ka gornjem delu, zatim se hladi u kondenzatoru, a dobijeni destilat odlazi u razdvajač gde se etarsko ulje odvaja od vodene faze. Najefikasnijim su se pokazali uređaji zapremine do oko 0,3 m³, jer su jednostavni za rukovanje, ne zahtevaju mnogo radne snage i mogu koristiti različite vrste goriva (čvrsto, tečno ili gasovito). Kod većih uređaja, posebno onih zapremine veće od 1 m³, teže je kontrolisati kretanje i delovanje pare kroz deblji sloj biljnog materijala (Skala i sar. 1999). Pored toga, destilatori velikog kapaciteta zahtevaju posebne generatore pare sa velikim kapacitetom proizvodnje, što značajno povećava potrošnju energije i samim tim troškove proizvodnje etarskog ulja (Stanković i sar. 1994a, 1994b).

Destilacija vodenom parom je najčešće korišćena metoda za dobijanje etarskih ulja. U ovom postupku para se proizvodi u posebnom parnom kotlu, a zatim se dovodi u destilacioni sud gde se biljni materijal nalazi iznad perforiranog dna ili u korpi. Para prolazi kroz biljni materijal, nosi sa sobom isparljive komponente ulja, a zatim se zajedno sa njima hladi i kondenzuje u kondenzatoru. U prijemnom sudu dolazi do razdvajanja vode i etarskog ulja (slika 3.1c) (Stanković i sar. 1994a, 1994b). Ova metoda se primenjuje kada biljna sirovina sadrži veći procenat etarskog ulja i kada su njegove komponente stabilne na temperaturama destilacije. Ne preporučuje se za materijale sa vrlo malim sadržajem ulja (manje od 0,1%) niti za one koji sadrže sastojke rastvorljive u vodi (Skala i sar. 1999). Prednosti parne destilacije su jednostavna kontrola količine pare, veći prinos, manja mogućnost hidrolize, polimerizacije i toplotne degradacije sastojaka, kao i bolja ponovljivost kvaliteta ulja. Proces je brži od destilacije vodom i energetski efikasniji, a uz kontrolu refluksa smanjuju se gubici polarnih komponenti. Nedostaci ove metode su duže trajanje u slučajevima kada ulja imaju visoku tačku ključanja i zahtevaju veću količinu pare. Takođe, biljni materijal tokom procesa postaje vlažan, što može usporiti destilaciju jer deo energije odlazi na isparavanje prisutne vode. Pored toga, ova metoda zahteva veća početna ulaganja u opremu u poređenju sa nekim drugim postupcima (Handa 2008).

Efikasnost izdvajanja etarskog ulja tokom destilacije zavisi od brzine njegovog prolaska kroz ćelijske membrane, mogućnosti hidrolize pojedinih sastojaka i njihove toplotne stabilnosti na temperaturi procesa. Zbog povišene temperature i prisustva vode, tokom hidrodestilacije

moгу nastati različite promene u sastavu ulja. I kada nema hemijskih reakcija, najisparljivije komponente mogu se izgubiti isparavanjem, deo sastojaka može preći u vodenu fazu, a razgradnja neisparljivih biljnih materija može uticati na promenu mirisa ulja (Skala i sar. 1999).

Hidrodestilacija obuhvata tri glavna fizičko-hemijska procesa (Handa 2008):

- 1) hidrodifuziju, tj. difuziju etarskog ulja i vruće vode kroz biljne membrane,
- 2) hidrolizu, tj. hemijsku reakciju između vode i određenih sastojaka etarskog ulja (estara) koji formiraju kiseline i alkohole,
- 3) termičko razlaganje, tj. razgradnju sastojaka etarskog ulja na visokim temperaturama.

Povišenje temperature uglavnom ubrzava difuziju i rastvorljivost ulja. Na temperaturi ključanja, deo ulja iz sekretornih struktura se rastvara u vodi i prenosi kroz nabubrele ćelijske membrane na njihovu površinu. Istovremeno može doći do hidrolize estara, pri čemu nastaju alkoholi i kiseline, što predstavlja jedan od nedostataka ove metode. Intenzitet hidrolize zavisi od dužine kontakta ulja i vode, pa je poželjno destilaciju izvoditi što kraće i na što nižoj temperaturi. Za postizanje većeg prinosa preporučuje se primena nižih temperatura, dovoljne količine vode (kod vodene i vodeno-parne destilacije), izbegavanje preteranog usitnjavanja biljnog materijala i povećanje brzine zagrevanja. Previše sitan materijal može dovesti do stvaranja kanala kroz masu biljke, što smanjuje kontakt sa parom i efikasnost procesa.

Destilacija se može izvoditi pri atmosferskom, sniženom ili povišenom pritisku. Smanjenje pritiska povećava količinu pare i ubrzava ekstrakciju, ali zahteva veću površinu za kondenzaciju. Prednost rada pod sniženim pritiskom je mogućnost destilacije na nižim temperaturama (oko 50 °C), čime se smanjuju termička i hidrolitička degradacija sastojaka. Destilacija pod povišenim pritiskom se uglavnom ne preporučuje za aromatične biljke, ali se može koristiti za povećanje prinosa teško isparljivih ulja i skraćanje trajanja procesa (Başer i Buchbauer 2024, Milojević 2008, Naeem i Khan 2025).

3.2.1.1 Kinetika hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Iako su brojne studije istraživale uticaj operativnih uslova na prinos i sastav etarskog ulja lavande (Binello i sar. 2014, Danila i sar. 2018, González-Rivera i sar. 2023, Filly i sar. 2016, Kiran Babu i sar. 2016, Rashed i sar. 2017, Stanojević i sar. 2011), relativno mali broj njih se fokusirao na kinetiku procesa hidrodestilacije, uprkos njegovoj ključnoj ulozi u optimizaciji i

skaliranju ovog procesa. Tabela 3.1 pruža pregled istraživanja koja se bave kinetikom ekstrakcije etarskog ulja lavande korišćenjem različitih tehnika hidrodestilacije.

Proces hidrodestilacije etarskog ulja lavande obuhvata dva istovremena procesa: brzu fazu ispiranja, u kojoj etarsko ulje brzo isparava iz oštećenih uljnih žlezda blizu površine, i sporiju fazu difuzije, tokom koje etarsko ulje migrira iz netaknutih žlezda ka površini (Perović i sar. 2021, 2025a, Stanojević i sar. 2011). Za modelovanje ovog procesa, Perović i saradnici (2021) su koristili fenomenološki pristup, pretpostavljajući da obe faze prate kinetiku prvog reda. Bez obzira na odnos cveta i vode, više od 60% etarskog ulja lavande ekstrahuje se tokom brze faze, pri čemu se ovaj procenat može povećati do 80% u prvih sat vremena, kada je odnos cveta i vode 1:10 g/ml. Veći odnos cveta i vode poboljšava difuziju smanjenjem viskoznosti i omogućavanjem boljeg kontakta između čvrste i tečne faze, ali takođe može poboljšati rastvaranje hidrofilnih komponenti, što dovodi do smanjenja ukupnog prinosa etarskog ulja lavande. U najnovijem istraživanju, Perović i saradnici (2025a) validirali su ovaj model za hidrodestilaciju etarskog ulja lavande iz suvog cveta, prethodno tretiranog suvim i mokrim mlevenjem, kao i korišćenjem rastvora soli ili mešavine VFHD i vode. S druge strane, Stanojević i saradnici (2021) primenili su Ponomarjev model, tj. linearni difuzioni model, za opisivanje hidrodestilacije etarskog ulja lavande, bez uzimanja u obzir odnosa između cveta i vode.

Nekoliko istraživačkih timova razvilo je modele za tradicionalnu parnu destilaciju (Kasel i sar. 2009) i simultanu hidro- i parnu destilaciju, sa i bez primene ugljen dioksida (El-Haraf i sar. 2022). Kasel i saradnici (2009) su razvili kinetički model koristeći Fikov zakon difuzije za ekstrakciju rastvorljivih komponenti iz svežih listova *Lavandula dentata*. Model je pretpostavio početne ujednačene koncentracije rastvorljivih komponenti u česticama, s efektivnim koeficijentom difuzije kao jedinim podesivim parametrom. El-Haraf i saradnici (2022) su analizirali tri modela (prvog reda, sigmoidni i model adsorpcije) pod ravnotežnim uslovima. Model prvog reda najbolje je opisao vodeno-parnu destilaciju, pokazujući da je približno 80% etarskog ulja ekstrahovano iz cvetova lavande u prvih deset minuta faze ispiranja.

Tabela 3.1 Pregled istraživanja kinetike ekstrakcije etarskog ulja lavande korišćenjem različitih tehnika hidrodestilacije

Tehnika ekstrakcije, biljni materijal	Procesni uslovi / odnos cveta i vode, g/ml	Model	Jednačina	Parametri	R^2	MRPD, %	Referenca
HD, cvetovi	Voda / 1:10 Voda+VFHD / 1:10	Ponomarjev	$\frac{q}{q_\infty} = b + k \cdot t$	$b = 0,79, k = 4,34 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1a}$ $b = 0,86, k = 4,06 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1b}$			Stanojević i sar. (2011)
HD, cvetovi	Voda / 1:10	Fenomenološki prvog reda	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - f_w \cdot e^{-k_w \cdot t} - (1 - f_w) \cdot e^{-k_d \cdot t}$	$q_\infty = 5,94 \text{ mL}/100 \text{ g}, f_w = 0,889, k_w = 62,24 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 5,43 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$		3.6	Perović i sar. (2021)
	Voda / 1:15			$q_\infty = 4,92 \text{ mL}/100 \text{ g}, f_w = 0,765, k_w = 68,00 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 10,27 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$		11.6	
	Voda / 1:20			$q_\infty = 4,68 \text{ mL}/100 \text{ g}, f_w = 0,639, k_w = 71,14 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 14,79 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$		1.8	
	Voda / 1:25			$q_\infty = 4,32 \text{ mL}/100 \text{ g}, f_w = 0,495, k_w = 75,00 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 17,66 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$		13.4	
HD, suvi cvetovi	Voda / 1:10 Celi cvetovi (kontrola) Mokro mleveni	Fenomenološki prvog reda	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - f_w \cdot e^{-k_w \cdot t} - (1 - f_w) \cdot e^{-k_d \cdot t}$	$f_w = 0,631, k_w = 80,3 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 17,9 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ $f_w = 0,752, k_w = 70,7 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ $f_w = 0,786, k_w = 71,3 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$	0,999 0,980 0,992	$\pm 1,5$ $\pm 11,6$ $\pm 4,4$	Perović i sar. (2025a)
	Suvo mleveni cvetovi (neprosejani) neposredno pre HD			$f_w = 0,805, k_w = 98,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$	0,983	$\pm 4,1$	
	Suvo mleveni i prosejani cvetovi neposredno pre HD			$f_w = 0,812, k_w = 98,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$	0,961	$\pm 5,9$	
	Suvo mleveni, prosejani cvetovi, čuvani u papirnoj kesi na suvom i tamnom mestu do HD			$f_w = 0,820, k_w = 47,7 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$	>0,97	$\pm 5-13$	
	Rastvori soli (KCl: 3%, 5%, NaCl: 5%, 10%) / 1:10, celi cvetovi			$f_w = 0,810, k_w = 60,2 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}, k_d = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$	>0,98	$\pm 8-18$	
	Mešavina VFHD i vode / 1:10, celi cvetovi						

Nastavak **tabele 3.1**

Tehnika ekstrakcije, biljni materijal	Procesni uslovi / odnos cveta i vode, g/ml	Model	Jednačina	Parametri	R^2	MRPD, %	Referenca
SD, listovi	-	Kinetički model baziran na Fikovom zakonu difuzije	$\frac{q}{q_\infty} = \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \left[1 - e^{-(2m+1)^2 \pi^2 D t / L^2} \right] / (2m+1)^2}{\sum_{m=0}^{\infty} 1 / (2m+1)^2}$	$D = 3,32 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			Cassel i sar. (2009)
SHSD, cvetovi	100 °C, 0,97 l/h protok destilata / 1:10	Prvog reda	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - e^{-k_d t}$	$q_\infty = 1,20 \text{ mL/100 g}$, $k_d = 0,04 \text{ min}^{-1}$	0,980		El-Kharraf i sar. (2022)
		Sigmoidni	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - (1 - f_w) \cdot e^{-k_d t}$	$q_\infty = 1,20 \text{ mL/100 g}$, $f_w = 0,13$, $k_d = 0,04 \text{ min}^{-1}$	0,50		
		Model adsorpcije	$\frac{q}{q_\infty} = \frac{t}{A + t}$	$q_\infty = 1,20 \text{ mL/100 g}$, $A = 12,1$	0,750		

Simboli: A – konstanta koja predstavlja odnos konstante brzine ekstrakcije i konstante kapaciteta ekstrakcije, b – koeficijent brze destilacije (ispiranja); D – efektivni koeficijent difuzije; f_w – frakcija etarskog ulja lavande koja se može ispirati, k – koeficijent spore destilacije (difuzije), k_d – konstanta brzine difuzije, k_w – konstanta brzine ispiranja, L – debljina čestica, q – prinos etarskog ulja lavande nakon vremena t , q_∞ – sadržaj etarskog ulja u originalnom biljnom materijalu

Skraćenice: HD – hidrodestilacija; SD – parna destilacija; i SHSD – simultana hidro- i parna destilacija.

3.3 Savremeni postupci hidrodestilacije

Upotreba nekonvencionalnih tehnika dobijanja etarskih ulja koje se oslanjaju na upotrebu mikrotalasa i ultrazvuka, predstavlja efikasnu alternativu klasičnim metodama, omogućavajući intenzivniji prenos mase i očuvanje hemijskog sastava etarskih ulja.

3.3.1 Ultrazvučna hidrodestilacija

Ultrazvučna hidrodestilacija je tehnika koja kombinuje konvencionalnu hidrodestilaciju sa primenom ultrazvučnih talasa kako bi se poboljšalo izolovanje isparljivih etarskih ulja iz biljnih materijala (Wang i sar. 2017). Principi ultrazvučne hidrodestilacije uključuju interakciju između ultrazvučnih talasa, biljnog materijala i rastvarača (obično vode) koji se koristi za izolovanje etarskih ulja. Ultrazvučni talasi stvaraju naizmenične regione visokog i niskog pritiska u suspenziji rastvarač i biljni materijal. Ovaj fenomen je poznat kao kavitacija. Mikroskopski mehurići se formiraju i brzo kolabiraju unutar tečnosti, stvarajući lokalizovane regione visoke temperature i pritiska. Takođe, kolaps mehurića na ili blizu ćelijskih zidova formira mikromlazeve koji izazivaju razbijanje ćelija, poboljšavajući prodiranje rastvarača u biljno tkivo, oslobađanje isparljivih jedinjenja iz biljnog materijala i prenos mase između biljne matrice i rastvarača (Jadhav i sar. 2023, Marić i sar. 2018, Vinatoru i sar. 1997, Wang i sar. 2017). Prednosti ultrazvučnog zagrevanja u odnosu na konvencionalne metode zagrevanja su niska potrošnja energije, skraćeno vreme tretmana, manja upotreba rastvarača, povećana bezbednost operatera i povećan prinos. U ekološkom smislu to je netermalna tehnologija (Marić i sar. 2018). Pozitivan efekat ultrazvuka na ekstrakcioni proces ogleda se u (Veličković 2007):

- intenzivnijem prenosu mase usled pucanja kavitacionih mehura na ili u blizini zidova biljnih ćelija ili na graničnoj površini što dovodi do formiranja mikročestica, odnosno stvaranja velike kontaktne površine,
- razaranju biljnih ćelija koje dovodi do oslobađanja njihovog sadržaja usled oštećenja ćelijskog zida i membrane. Takođe, usitnjavanjem biljnog materijala povećava se kontaktna površina,
- poboljšanoj penetraciji rastvarača u nerazorene biljne ćelije, čime se povećava prinos, jer kolaps kavitacionog mehura u blizini ćelijskog zida stvara ultrazvučni mlaz koji potiskuje rastvarač ka zidu i unutrašnjosti ćelije,

- kapilarnim efektima, tj. prodiranju tečnosti u kapilarama.

Postoje određena ograničenja primene ultrazvuka, koja se ogledaju prvenstveno u činjenici da je ključanje vodene suspenzije (na 100 °C) isključivo ultrazvučnim uticajem teško postići. Zbog toga je neophodno primeniti spoljašnje zagrevanje malom snagom mikrotalasa (Wang i sar. 2018) ili konvencionalnim plaštom (Liu i sar. 2019) kako bi se suspenzija dovela do tačke ključanja. Kavitacija može olakšati rupturu ćelija i povećati brzinu prenosa mase, ali prekomerno ključanje i nestabilno ponašanje mehurića na povišenim temperaturama, može imati negativne posledice (Vinatoru 2001). Međutim, empirijski rezultati postignuti ultrazvučnom hidrodestilacijom uz eksterno zagrevanje su u suprotnosti sa ovim navodom (Liu i sar. 2019, Wang i sar. 2018). Poređenjem prinosa etarskog ulja i trajanja ekstrakcije iz plodova belog i crnog bibera, uočava se da ultrazvučna hidrodestilacija nadmašuje konvencionalnu hidrodestilaciju, ali pokazuje manju efikasnost u odnosu na mikrotalasnu hidrodestilaciju i ultrazvučno-mikrotalasnu hidrodestilaciju (Wang i sar. 2018). Takođe, ultrazvučnom hidrodestilacijom postiže se veći prinos etarskog ulja iz semena *Iberis amara* nego konvencionalnom hidrodestilacijom i parnom destilacijom (Liu i sar. 2019). Kako bi se optimizovao proces ultrazvučne hidrodestilacije, a da se pritom ne razgrade ekstrahovana jedinjenja, važno je pažljivo razmotriti interakciju između temperature, kavitacije i svojstava vode i biljnog materijala

3.3.2 Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija

Predtretman ultrazvukom pre hidrodestilacije je inovativan pristup koji sve više nalazi primenu u industriji (Chekoual i sar. 2018a, 2018b, 2021, Périno-Issartier i sar. 2013, Sharifzadeh i sar. 2022). Upotreba ultrazvuka u kombinaciji sa hidrodestilacijom omogućava izolovanje etarskog ulja za tri puta kraće vreme, bez gubitka kvaliteta ili prinosa finalnog proizvoda. Potrošnja energije je manja (do 40%), što ujedno ovu metodu čini ekološki prihvatljivijom od konvencionalnih metoda (Jacotet-Navarro i sar. 2016, Li i sar. 2013). Međutim, potrebna su konkretna istraživanja kako bi se utvrdili optimalni parametri hidrodestilacije za različite biljne materijale i uporedila efikasnost sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije sa alternativnim tehnikama hidrodestilacije (Jadhav i sar. 2023). Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija može se koristiti za izolovanje etarskog ulja iz različitih lekovitih biljaka (Chen i sar. 2020, Nora i Borges 2017). Jadhav i saradnici (2020) su izolovali etarsko ulje iz kore *Cinnamomum cassia* koristeći sekvencijalnu ultrazvučnu hidrodestilaciju i zaključili da je ova metoda pouzdana u pogledu kvaliteta i prinosa etarskog ulja.

Takođe, sugerisali su da je sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija pogodna za izolovanje etarskog ulja iz kore *C. cassia* bez izazivanja bilo kakvih promena u sastavu etarskog ulja. U studiji koju su izveli Damyeh i saradnici (2016) procenjen je efekat sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije na izolovanje etarskog ulja iz *Prangos ferulacea* i *Satureja macrosiphonia* i došlo se do zaključka da ultrazvučna obrada skraćuje proces izolovanja i poboljšava antioksidativnu aktivnost etarskog ulja iz *P. ferulacea*. Kumoro i saradnici (2021) i Chen i saradnici (2021) su koristili prethodnu obradu ultrazvučnom sondom, a zatim konvencionalnu hidrodestilaciju za izolovanje etarskih ulja iz kore cimeta (*Cinnamomum cassia*) i listova trave citronele. Otkrili su da je nakon ultrazvučne obrade prinos etarskog ulja kore cimeta (*Cinnamomum cassia*) povećan za 56,94%, vreme ekstrakcije kraće i potrošnja energije manja, dok je u slučaju etarskog ulja listova citronele prinos povećan za 27%, a vreme ekstrakcije i potrošnja energije takođe bili znatno manji. Slično tome, Chen i saradnici (2022) su izolovali etarsko ulje iz listova perile koristeći sekvencijalnu ultrazvučnu hidrodestilaciju. Prinos je bio povećan za 0,69% nakon ultrazvučne obrade.

3.3.3 Mikrotalasna hidrodestilacija

Savremene tehnike hidrodestilacije razvijene su sa ciljem povećanja prinosa etarskog ulja, smanjenja vremena izolacije i racionalnije potrošnje energije. Pored konvencionalnih postupaka, sve veću primenu imaju metode zasnovane na primeni mikrotalasne energije, među kojima su najznačajnije mikrotalasna hidrodestilacija (MAHD) i sekvencijalna ultrazvučno–mikrotalasna hidrodestilacija (SUMAHD) (Bendahou 2008, Kirkinci i sar. 2024, Zill-e-Huma 2010).

Iako su elektromagnetni talasi poznati još od kraja XIX veka, njihova intenzivnija primena započela je tokom razvoja radarske tehnologije u Drugom svetskom ratu, dok su u hemijskim istraživanjima počeli da se koriste početkom 1980-ih godina (Kappe i Stadler 2005, Lidström i sar. 2001). Danas mikrotalasi imaju široku primenu u domaćinstvima, prehrambenoj industriji, medicini, hemijskoj tehnologiji i komunikacionim sistemima. Za industrijske, medicinske i naučne svrhe definisane su standardne frekvencije, pri čemu se u laboratorijskoj i industrijskoj praksi najčešće koristi frekvencija od 2,45 GHz. Energija mikrotalasnog fotona na ovoj frekvenciji nije dovoljna za raskidanje hemijskih veza ili direktno iniciranje hemijskih reakcija, pa su sve promene u sistemu posledica zagrevanja materijala koji apsorbuje mikrotalasnu energiju i pretvara je u toplotu (Kappe i Stadler 2005, Kirkinci i sar. 2024). Osnovna razlika između konvencionalnog i mikrotalasnog zagrevanja ogleda se u mehanizmu prenosa energije. Kod konvencionalnog zagrevanja toplota se

prenosi sa površine ka unutrašnjosti materijala putem kondukcije, konvekcije i zračenja, dok mikrotalasi prodiru kroz materijal i izazivaju zapreminsko zagrevanje putem direktne interakcije elektromagnetnog polja sa molekulima. Ovaj proces zasniva se na dva mehanizma: jonskoj provodljivosti i dipolnoj rotaciji. Kao posledica, dolazi do brzog i relativno uniformnog zagrevanja celokupne zapremine materijala (Eskilsson i Björklund 2000, Thostenson i Chou 1999). Specifičnosti mikrotalasnog zagrevanja uključuju i pojavu pregrevanja tečnosti, odnosno zagrevanje iznad tačke ključanja bez vidljivog ključanja (Kappe i Stadler 2005, Kirkinci i sar. 2024, Perreux i Loupy 2001). Takođe, zbog mogućnosti trenutnog uključivanja i isključivanja izvora energije, proces je lakše kontrolisati i automatizovati (Hayes 2002). Međutim, mogu se javiti i negativni efekti, kao što su formiranje lokalnih zona veoma visoke temperature i neravnomerno zagrevanje (Jones i sar. 2006, Kappe i Stadler 2005). Ove pojave su povezane sa stvaranjem stojećih talasa i nehomogenom raspodelom elektromagnetnog polja, kao i sa promenama dielektričnih i toplotnih osobina materijala tokom zagrevanja. Zbog toga konstrukcija i dizajn reaktorskog prostora imaju značajnu ulogu u efikasnosti procesa (Jones i sar. 2006).

U poređenju sa konvencionalnim tehnikama, mikrotalasno zagrevanje ima niz prednosti: znatno veću brzinu zagrevanja, selektivno zagrevanje komponenti koje efikasno apsorbuju mikrotalase, odsustvo direktnog kontakta sa izvorom toplote, jednostavniju kontrolu procesa, manju zapreminu opreme i smanjenu količinu otpada (Chou i sar. 2009, Hayes 2002, Jones i sar. 2006).

Mikrotalasna hidrodestilacija zasniva se na interakciji mikrotalasne energije sa vodom i biljnim materijalom. Usled brzog zagrevanja dolazi do isparavanja intracelularne vode i isparljivih komponenti, pri čemu se unutar ćelije stvara para koja povećava pritisak. Povećani unutrašnji pritisak dovodi do razaranja ćelijskih zidova i sekretornih struktura koje sadrže etarsko ulje, čime se olakšava njegovo oslobađanje. Istovremeno se uspostavlja gradijent prenosa mase koji omogućava kretanje isparljivih jedinjenja iz biljne matrice u okolni prostor. Nastala smeša vodene pare i isparljivih komponenti zatim se kondenzuje, a faze se razdvajaju na uobičajen način. Prednosti ove metode uključuju značajno skraćanje vremena ekstrakcije, manju potrošnju vode i energije, kao i bolje očuvanje termolabilnih i osetljivih komponenti, što doprinosi dobijanju etarskih ulja visokog kvaliteta. Sa druge strane, nedostaci su složenija i skuplja oprema, mogućnost lokalnog pregrevanja i degradacija pojedinih sastojaka, kao i potencijalno neravnomerno zagrevanje materijala (Drinić i sar. 2021, Ghazanfari i sar. 2020, Gonzalez-Rivera i sar. 2016, Karakaya i sar. 2014, Liu i sar. 2019, Moradi i sar. 2018).

Eksperimentalna istraživanja pokazala su da se primenom mikrotalasne hidrodestilacije kod biljaka poput lavande i timijana može dobiti ista količina i kvalitet etarskog ulja uz znatno kraće vreme izolacije i manju potrošnju energije (Golmakani 2008a, Sahraoui 2008). Pored toga, antioksidativna aktivnost nekih etarskih ulja dobijenih mikrotalasnom hidrodestilacijom je veća od aktivnosti etarskih ulja dobijenih konvencionalnom hidrodestilacijom (Moradi i sar. 2018, Mollaei i sar. 2019, Hundie i sar. 2023). Procesi zasnovani na mikrotalasima i difuziji pare omogućavaju bržu ekstrakciju i često bolji kvalitet proizvoda u poređenju sa klasičnom destilacijom vodenom parom (Farhat i sar. 2009).

3.3.4 Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija

Mikrotalasno i ultrazvučno zračenje ubrzavaju hidrodestilaciju i dovode do povećanja prinosa etarskog ulja. Ali, i pored prednosti koje imaju, prilikom mikrotalasne hidrodestilacije dolazi do neravnomernog zagrevanja, a termički efekat ultrazvučne hidrodestilacije je relativno slab, što ograničava širu primenu (Jones i sar. 2006, Kappe i Stadler 2005, Vinatoru 2001, Wang i sar. 2018). Međutim, ultrazvuk i mikrotalasi se mogu kombinovati sekvencijalno (uzastopno) kako bi se iskoristile njihove prednosti. Ultrazvučno oscilovanje kompenzuje neravnomerno zagrevanje mikrotalasima, dok mikrotalasi efikasno neutrališu ograničenu moć zagrevanja ultrazvukom. Drugim rečima, ultrazvučna kavitacija dezintegriše biljno tkivo kako bi olakšala difuziju hemijskih sastojaka, dok visoka temperatura koju generišu mikrotalasi ubrzava njihovu izolaciju. Ova kombinacija se koristi u procesima ekstrakcije rastvaračem i hidrodestilaciji, posebno za dobijanje važnih jedinjenja iz biljnih materijala (Karimi i sar. 2020, Li i sar. 2019a, Yu i sar. 2017). Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija koristi sekvencijalni pristup tako što se biljni materijal najpre tretira ultrazvukom kao predtretmanom, nakon čega sledi mikrotalasna hidrodestilacija. Tretman izazvan kavitacijom razbija ćelijske zidove i poboljšava difuziju jedinjenja. Nakon toga, mikrotalasna energija se koristi za ekstrakciju jedinjenja iz prethodno tretiranog biljnog materijala. Sekvencijalna priroda ove metode omogućava kontrolisan i optimizovan proces ekstrakcije, koristeći prednosti dve tehnike. Takođe je moguće prvo koristiti mikrotalasno zračenje, a zatim ultrazvuk, kao i ponoviti niz koraka dva puta. Tehnike zasnovane na ultrazvuku i mikrotalasima imaju za cilj da povećaju prinos etarskog ulja i efikasnost hidrodestilacije, ali sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija koristi specifične snage svakog izvora energije sekvencijalno. Sekvencijalni pristup može ponuditi

veću fleksibilnost u optimizaciji procesa hidrodestilacije prilagođavanjem uslova tretmana u svakom koraku (Perović i sar. 2024).

Sharifzadeh i saradnici (2022) su uporedili izolaciju etarskog ulja iz nadzemnih delova *L. coronopifolia* Poir primenom sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije i mikrotalasne hidrodestilacije u pogledu prinosa, hemijskog sastava, bioloških svojstava i uticaja na životnu sredinu. Najveći prinos od 1,15%, dobijen pod optimalnim uslovima bio je veći u kraćem vremenu za 82% u poređenju sa mikrotalasnom hidrodestilacijom. Takođe, etarsko ulje dobijeno sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom imalo je bolja antioksidativna i antimikrobna svojstva nego ono dobijeno mikrotalasnom hidrodestilacijom.

3.4 Mehanizam i kinetika hidrodestilacije etarskog ulja

3.4.1 Mehanizam hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Tokom hidrodestilacije izdvajanje etarskog ulja odvija se u više sukcesivnih faza:

- *Faza ispiranja* – brzo oslobađanje etarskog ulja sa površine biljnog materijala i žlezda koje su direktno dostupne vodenoj pari,
- *Faza difuzije* – sporije oslobađanje etarskog ulja koje je skladišteno u unutrašnjim ćelijskim strukturama, gde prenos mase zavisi od difuzionih gradijenata, i
- *Stacionarna faza* – kada se dostiže maksimalni prinos i brzina destilacije postaje zanemarljiva.

3.4.2 Modelovanje kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Za modelovanje kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande do sada je korišćeno pet modela, prikazanih u tabeli 3.2. Zapravo, modeli II, III i IV predstavljaju varijacije izvedene iz osnovnog Modela I.

MODEL I opisuje ekstrakciju etarskog ulja iz biljnog materijala kroz dva istovremena procesa: ispiranje i difuziju. Pretpostavka ovog modela je da brzina destilacije etarskog ulja varira s vremenom, što je opisano eksponencijalnom funkcijom. Takođe, ovaj model uzima u obzir

maksimalne brzine destilacije etarskog ulja u određenim vremenskim tačkama (Marković i sar. 2018).

MODEL II, razvijen od strane Sovove i Aleksovskog (2006), je model sa tri parametra koji pretpostavlja dva istovremena procesa: brzu destilaciju, odnosno ispiranje etarskog ulja iz puknutih žlezda na spoljašnjoj površini čestica cveta, i sporiju difuziju etarskog ulja iz netaknutih žlezda unutar unutrašnjosti čestica.

MODEL III, koji su predložili Milojević i saradnici (2008), pretpostavlja trenutnu, početnu destilaciju etarskog ulja, nakon čega sledi difuzija etarskog ulja iz čestica cveta na spoljašnju površinu.

MODEL IV zasniva se na pretpostavci o kinetici pseudo-prvog reda u odnosu na preostalu količinu etarskog ulja u cvetovima lavande (Spiro i sar. 1992).

MODEL V je model zasnovan na zakonu brzine drugog reda, prvobitno razvijen za modeliranje kinetike ispiranja jedinjenja rastvorljivih u vodi iz biljnih materijala (Amenaghawon i sar. 2014). Ovaj model opisuje brzo povećanje količine etarskog ulja na početku procesa, a potom postepeno opadanje prema kraju procesa.

Kinetički model I se zasniva na dvofaznom modelu kinetike prenosa koji posebno razlikuje fazu ispiranja i fazu difuzije. Ovaj model je najkompleksniji, ali i naučno najrelevantniji jer odražava stvarnu fizičko-hemijsku prirodu procesa. U prvoj fazi dominiraju konvektivni prenos i dezintegracija površinskih žlezda koje nose etarsko ulje, dok u drugoj fazi difuzija postaje ograničavajući faktor. Kinetički model je izveden za uređaj za šaržnu destilaciju, u kome je biljni materijal uronjen u vodu. Suspenzija vode i biljnog materijala se zagreva ili električnim grejačem ili mikrotalasnim zračenjem, nastala para koja sadrži etarsko ulje se kondenzuje u kondenzatoru, a zatim se dobijeni kondenzat gravitaciono razdvaja na etarsko ulje i hidrosol. Pretpostavka je da se ekstrakcija etarskog ulja iz biljnog materijala odvija kroz dva istovremena procesa. Ovaj pristup je zasnovan na činjenici da se veći deo etarskog ulja nalazi na spoljnim površinama biljnih čestica, dok je ostatak etarskog ulja ravnomerno raspoređen unutar biljnih čestica. Etarsko ulje, koje se nalazi na površini biljnih čestica, se izdvaja brзом destilacijom, nazvanom „ispiranje“. Preostala količina etarskog ulja se ekstrahuje difuzionim procesom koji se odvijaju unutar biljnih čestica.

Tabela 3.2 Matematički modeli kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Model	Jednačina*	Parametri	Referenca
Model I	$q_w = \begin{cases} \frac{\alpha_w}{k_w} \cdot e^{-k_w \tau_w} (e^{k_w t} - 1), t < \tau_w \\ \frac{\alpha_w}{k_w} \cdot \left[2 - e^{-k_w \tau_w} - e^{-k_w (t - \tau_w)} \right], t \geq \tau_w \end{cases}$ $q_d = \begin{cases} \frac{\alpha_d}{k_d} \cdot e^{-k_d \tau_d} (e^{k_d t} - 1), t < \tau_d \\ \frac{\alpha_d}{k_d} \cdot \left[2 - e^{-k_d \tau_d} - e^{-k_d (t - \tau_d)} \right], t \geq \tau_d \end{cases}$	$\tau_w, \tau_d, \alpha_w, \alpha_d, k_w, k_d$	Marković i sar. (2018)
Model II	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - f_w \cdot e^{-k_w t} - (1 - f_w) \cdot e^{-k_d t}$	k_w, k_d, f_w	Sovová i Aleksovski (2006)
Model III	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - (1 - f_w) \cdot e^{-k_d t}$	k_d, f_w	Milojević i sar. (2008)
Model IV	$\frac{q}{q_\infty} = 1 - e^{-k_d t}$	k_d	Spiro i sar. (1992)
Model V	$\frac{q}{q_\infty} = \frac{t}{\frac{1}{k_2} + t}$	k_2	Amenaghawon i sar. (2014)

* k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w i α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju koje se dešavaju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$, f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem, k_2 – konstanta brzine drugog reda, q_∞ – ukupna količina etarskog ulja izdvojenog na kraju destilacije, i q_w i q_d – količine etarskog ulja izdvojene iz biljnog materijala ispiranjem i difuzijom.

Prvi difuzioni proces, nazvan „neometana difuzija“, uključuje prenos etarskog ulja kroz razorene biljne organe. Svaki mehanizam destilacije se odvija sopstvenom brzinom, koja dostiže maksimalnu vrednost nakon određenog vremenskog perioda od početka procesa destilacije. Model I se zasniva na nekoliko pretpostavki:

- biljne čestice su izotropne i jednake veličine, oblika i početnog sadržaja etarskog ulja,
- etarsko ulje je pseudo-jednokomponentni sistem,
- količina etarskog ulja koja se može ekstrahovati odgovara količini etarskog ulja izolovanog dok sistem nije dostigao ravnotežu,
- ukupna količina izolovanog etarskog ulja u bilo kom trenutku tokom destilacije (q) izražava se u g/100 g i jednaka je zbiru količina etarskih ulja izolovanih iz biljnih čestica ispiranjem i difuzijom, q_w i q_d , redom:

(3.1)

- e. Brzine destilacije etarskog ulja za faze ispiranja i difuzije predstavljaju eksponencijalne funkcije sa vremenom, redom:

$$— \alpha \quad | \quad | \quad (3.2)$$

$$— \alpha \quad | \quad | \quad (3.3)$$

gde su k_w i k_d konstante brzine destilacije, α_w , α_d maksimalne brine destilacije za ispiranje i difuziju koje su izmerene pri $t=\tau_w$ i $t=\tau_d$, redom. Preliminarnim testiranjem je pokazano da je za hidrodestilaciju parametar τ_w bio veoma mali, tj. blizu nule, pa je za hidrodestilaciju pretpostavljeno da je $\tau_w = 0$,

- f. ne postoji otpor prenosu mase etarskog ulja sa spoljašnjih površina biljnih čestica,
 g. vodena faza i etarsko ulje su potpuno nemešljivi,
 h. količina etarskog ulja izdvojena u separatoru, podeljena sa količinom biljnog materijala, jednaka je prinosu etarskog ulja iz biljnog materijala u uređaju za destilaciju sa vremenskim kašnjenjem.

Na osnovu jednačina 3.1 – 3.3 može se izvesti:

$$\left\{ \begin{array}{l} — () \\ — [()] \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} — () \\ — [()] \end{array} \right. \quad (3.5)$$

gde su q_w i q_d su ukupne količine etarskog ulja izolovane ispiranjem i difuzijom, redom.

$$— () \quad (3.6)$$

$$— () \quad (3.7)$$

Ukupna količina etarskog ulja izolovanog na kraju destilacije, q_∞ , može se izračunati iz sledeće jednačine:

$$(3.8)$$

Ukoliko je , što znači da brzine ispiranja i difuzije dostižu maksimum pri $t = 0$, a difuzija je karakterisana konstantom k_d , pa se na osnovu prethodnih jednačina može izračunati količina etarskog ulja (q) izolovana za vreme t :

$$[] \quad (3.9)$$

gde je / i / . Očigledno je da je:

(3.10)

Jednačine 3.9 i 3.10 predstavljaju kinetički model II. Često se koristi za modelovanje hidrodestilacije i superkritične ekstrakcije.

Iz jednačine 3.9 mogu se izvesti još dva jednostavnija kinetička modela, nazvana model III i model IV, uz pretpostavku trenutnog ispiranja, nakon čega sledi difuzija ($k_w \rightarrow \infty$) i difuzija bez ispiranja ($k_w \rightarrow \infty$ i $f_w = 0$), što je predstavljeno sledećim jednačinama, redom:

$$\left[\begin{pmatrix} \frac{1}{k_w} \end{pmatrix} \right] \quad (3.11)$$

$$\left(\begin{pmatrix} \frac{1}{k_w} \end{pmatrix} \right) \quad (3.12)$$

Model III najčešće daje dobru aproksimaciju kada se radi o biljnom materijalu homogenije strukture, gde površinski lokalizovano etarsko ulje čini manji deo ukupnog prinosa. Kod lavande, ovaj model može dobro opisati kinetiku ako je materijal prethodno usitnjen ili tretiran (npr. ultrazvukom), čime se smanjuje značaj početne faze ispiranja.

Model IV zasniva se na pretpostavci o kinetici pseudo-prvog reda u odnosu na preostalu količinu etarskog ulja u biljnom materijalu. Model je vrlo jednostavan, sa samo jednim parametrom i zbog toga se često koristi za inicijalnu procenu kinetike ili poređenje između različitih metoda destilacije. Međutim, on ne može da reprodukuje inicijalni brzi porast prinosa koji je tipičan za destilaciju etarskog ulja lavande jer zanemaruje dvofazni karakter oslobađanja. Ipak, u slučajevima gde dominira difuzioni transport (npr. u kasnijim fazama procesa), može davati dobru aproksimaciju.

Pored pomenutih kinetičkih modela, za opisivanje kinetike procesa ekstrakcije etarskog ulja iz biljnih sirovina ponekad se koristi zakon brzine drugog reda (model V):

$$- \frac{dq}{dt} = k_2 (q_\infty - q)^2 \quad (3.13)$$

gde je k_2 konstanta brzine drugog reda. Nakon sređivanja jednačine 3.13 dobija se:

$$\frac{1}{q_\infty - q} = \frac{1}{q_\infty} + k_2 t \quad (3.14)$$

gde $1/(q_\infty k_2)$ odgovara vremenu kada je $q = q_\infty/2$.

Ovaj model ima empirijsku osnovu i ne proizilazi direktno iz teorije prenosa mase. Predstavlja matematičku interpolaciju između eksperimentalnih podataka i vremena, gde k_2 služi kao parametar proporcionalnosti brzine destilacije. Model se koristi kada eksperimentalni podaci ne pokazuju jasno definisane kinetičke faze, ili kada proces obuhvata kompleksne mehanizme (npr. mikrotalasno ili ultrazvučno zagrevanje), koje je teško teorijski opisati. Prednost je njegova fleksibilnost i dobra statistička prilagodljivost (Marković i sar. 2018).

Kod izolovanja etarskog ulja lavande, usled kompleksne morfologije žlezdanih struktura i izražene dvofazne kinetike, model I najtačnije opisuje stvarni mehanizam oslobađanja etarskog ulja. On omogućava odvojeno praćenje faze ispiranja i difuzije, što je naročito važno jer etarsko ulje lavande sadrži i lako isparljive komponente (monoterpene) i teže isparljive komponente (seskviterpene). Model II se pokazuje kao odlična praktična alternativa, jer postiže visoku korelaciju sa eksperimentalnim podacima uz manju složenost. Modeli III-V su korisni za brzu procenu kinetike, posebno kod procesa sa modifikovanim termičkim uslovima (npr. mikrotalasna hidrodestilacija).

4. LAVANDA – *Lavandula angustifolia* Mill.

Rod *Lavandula*, član porodice *Lamiaceae*, obuhvata približno 39 vrsta, koje pretežno uspevaju u planinskim regionima koji okružuju zapadni Mediteran, atlantska ostrva, severnu Afriku i jugozapadnu Aziju (Passalacqua i sar. 2017). Vrste *Lavandula*, posebno *Lavandula angustifolia* Mill. (ranije *L. officinalis*), poznatije kao lavanda, široko se gaje širom sveta, uključujući i regione kao što je Srbija (Aćimović i sar. 2022, Golijan 2017). Lavanda je cenjena zbog svoje dekorativne privlačnosti i aromatičnosti. Ova žbunasta biljka sa vitkim sivim listovima i cvetovima promenljive boje (Lis-Balchin 2002), ima komercijalnu vrednost zbog svojih svežih ili osušenih cvetova i etarskog ulja. Etarsko ulje lavande (LEO) je poznato po sedativnom, spazmolitičkom, antivirusnom, antidepressivnom i antimigrenskom dejstvu (Lesage-Meessen i sar. 2015, López i sar. 2017). Nalazi široku upotrebu u kozmetici, aromaterapiji i prehrambenoj industriji.

Godišnje se proizvede oko 1500 tona etarskog ulja od različitih vrsta i hibrida *Lavandule* (Wells i sar. 2018). Godišnja globalna proizvodnja etarskog ulja lavande se procenjuje na 200–500 tona (Lesage-Meessen i sar. 2015, Muntean i sar. 2016), ali su tačni podaci o trgovini nedostupni. Proizvodnja je globalna, pod uticajem klime, lokacije, poljoprivrede i potražnje, sa ključnim centrima u Bugarskoj, Francuskoj, Ujedinjenom Kraljevstvu i Španiji (Giray 2018). Bugarska je pretekla Francusku kao vodeći proizvođač etarskog ulja lavande, sa 3700 ha i godišnjim prinosom do 100 tona (Lesage-Meessen i sar. 2015). Sveži cvetovi lavande sadrže 0,50–6,25% etarskog ulja, čiji sadržaj varira tokom sušenja (Aprotosoae i sar. 2017, Crisan i sar. 2023). Suve cvasti imaju sadržaj etarskog ulja između 0,50% i 9,62% (Aprotosoae i sar. 2017), dok je propisani minimalni prinos po Evropskoj farmakopeji 1,30% (European Pharmacopoeia 10.0). U zavisnosti od različitih faktora, lavanda daje približno 8–30 kg/ha etarskog ulja (Flanagan 2020). Globalno tržište je značajno poraslo, sa kombinovanom godišnjom stopom rasta od 5,4% od 2017. do 2022. godine, dostižući 109,4 miliona dolara u 2023. Sa povećanjem svesti o prednostima etarskog ulja lavande, očekuje se da će se tržište stalno širiti i predviđa se da će dostići oko 201,6 miliona dolara do 2033. godine (Persistence Market Research 2023).

Izolovanje etarskog ulja prvenstveno uključuje hidrodestilaciju i destilaciju vodenom parom (Aprotosoae i sar. 2017), mada se može koristiti i ekstrakcija rastvaračem (Barbieri i Borsotto 2018). Kako potražnja za prirodnim proizvodima i održivim tehnikama ekstrakcije i dalje raste, naučnici su istraživali inovativne metode za poboljšanje efikasnosti, prinosa i kvaliteta ekstrakcije

etarskog ulja. Njihovo unapređenje primenom ultrazvučnog i mikrotalasnog zračenja ili njihove kombinacije, upotrebom alternativnih rastvarača poput jonskih tečnosti ili eutektičkih rastvarača, kao i primenom enzima u fazi predtretmana, predstavlja veoma atraktivan pristup sa održivog i ekonomskog stanovišta. Inovativne tehnike koje se smatraju obećavajućim alternativama tradicionalnim metodama za ekstrakciju etarskog ulja lavande uključuju superkritičnu ekstrakciju CO₂, ultrazvuk, mikrotalasnu i turbohidrodestilaciju (THD) (Périno-Issartier i sar. 2013). Primenom navedenih metoda uočava se ubrzavanje procesa ekstrakcije, uz nekoliko dodatnih prednosti, uključujući skraćeno vreme ekstrakcije, povećan prinos etarskog ulja i poboljšani kvalitet proizvoda.

4.1 Botaničke karakteristike lavande

Rod *Lavandula*, član porodice *Lamiaceae*, obuhvata 39 vrsta, 79 infraspecifičnih taksona, brojne hibride i oko 400 registrovanih sorti (Passalackua i sar. 2017, Salehi i sar. 2018). *L. angustifolia*, opšte poznata kao prava lavanda, ima veliki ekonomski značaj zbog svoje medicinske i dekorativne upotrebe (Despinasse i sar. 2020). Vodi poreklo iz planinskih mediteranskih regiona, uspeva na suvim, toplim livadama, na stenovitim padinama, na nadmorskim visinama iznad 1500 m. Ovaj višegodišnji grm, koji dostiže 40–60 cm u širinu, odlikuje se jednostavnim, sivim listovima prekrivenim zvezdastim dlačicama, sa glavičastim i pelatastim trihomima koji su najzastupljeniji na cvetnoj čašici (Hassiotis i sar. 2014, Passalackua i sar. 2017). Listovi su izduženo kopljasti, sivozeleni, dlakavi. Cvast je cimozna u obliku lažnog klasa (dihazijum) (Kišgeci i sar. 1987). Cvetovi su sakupljeni u dihazijske koji grade prividne pršljenove na vrhu izdanaka, zigomorfni su, sa plavoljubičastim kruničnim listovima. Čašica je cevasta, s pet režnjeva od kojih je jedan izrazito duži od ostalih. Krunični listići su srasli u dvousnatu kruničnu cev, ljubičaste boje. Svi delovi cveta su prekriveni grandularnim trihomama (Kovačević 2004). Slika 4.1 prikazuje cvet, a slika 4.2 žbun lavande. Lavanda uspeva u toplim, sunčanim uslovima, toleriše niske temperature tokom mirovanja i suše, osim u početnoj fazi razvoja. Nije posebno zahtevna za zemljište, najbolje uspeva na lakim, rastresitim i krečnjačkim zemljištima (Kovačević 2004).

**Slika 4.1** Cvet lavande**Slika 4.2** Žbun lavande

Razmnožava se vegetativnim metodama (deljenje starijih izdanaka i ukorenjavanje reznica) i generativnim metodama (direktna setva semena ili razmnožavanje rasada sa razmakom od 30–40 cm). U prvoj godini prihranjivanje je ključno, i neophodno je redovno okopavanje jer je lavanda osetljiva na korov. Berba počinje druge godine u fazi cvetanja, ponavljajući se svake godine tokom 12–15 produktivnih godina, sa ukupnom produktivnošću koja se postiže u drugoj i trećoj godini nakon uspostavljanja (Giannoulis i sar. 2020). Trajanje cvetanja varira geografski, u istočnoj Evropi je 15–20 dana, a u hladnijim regionima 25–30 dana (Muntean i sar. 2016). Lavanda se takođe može uzgajati in vitro, proizvodeći etarsko ulje sa pojačanim antimikrobnim i antioksidativnim aktivnostima (Andrys i sar. 2017). Za etarsko ulje, cvetni vrhovi se beru u potpunim ili određenim fazama (50–75% cvetanja) (Détár i sar. 2021). Beru se cvasti lavande sa stabljikama do 15 cm dužine, a berba suvog cveta počinje kada se otvore prvi cvetovi. Za seme, cveće se bere u fazi plodonošenja. Berba, poželjno od 10 do 12 časova, može da obuhvati izdanke i listove, pri čemu se prinosi etarskog ulja kreću oko 5,5 t/ha, sa prinosom suvih cvetova i semena od oko 1.000 kg/ha, odnosno 300–400 kg/ha (Muntean i sar. 2016).

4.2 Sadržaj aktivnih komponenti

Sadržaj etarskog ulja u cvetnim granama lavande kreće se od 0,5 do 1,5%, dok hibridne sorte sadrže više, oko 0,9–3,0%. Najveća količina ulja nalazi se u čašičnim listovima, gde su smeštene sekretorne žlezde. Glavne komponente etarskog ulja lavande su linalilacetat i linalol. Udeo estara u pravoj lavandi iznosi 30–60%, dok hibridna lavanda sadrži znatno manji procenat, oko 7–16% (Kišgeci 1987). Etarsko ulje lavande predstavlja složenu smešu sa više od 100 različitih jedinjenja. Pored dominantnih komponenti, sadrži i brojne druge alkohole, terpene i njihove derivate, aldehide, ketone, okside, laktonska jedinjenja, seskviterpene i masne kiseline. Među značajnijim sastojcima nalaze se 1,8-cineol, kamfor, α - i β -pinen, limonen, α -terpineol, borneol, kao i različiti laktoni i seskviterpeni poput kariofilena. Količina pojedinih komponenti i njihov međusobni odnos zavise od više faktora, kao što su sorta biljke, klimatski i zemljišni uslovi, nadmorska visina, vreme berbe i način destilacije. Da bi se očuvao kvalitet, etarsko ulje lavande treba skladištiti na hladnom i tamnom mestu, u potpuno punim i dobro zatvorenim tamnim posudama (Leung i Foster 1996).

4.3 Primena lavande

Lavanda ima raznovrsnu primenu, od tradicionalne upotrebe u uređenju pejzaža (Bader 2012), proizvodnji meda (Constatinescu i sar. 2022), seoskom turizmu (Giry i sar. 2019) i fitoremedijaciji (Angelova i sar. 2015) do novih uloga u bioherbicidima (Cavalieti i Caporali 2010), proizvodnji vlakana i štavljenju kože (Sirvaityte i sar. 2011). Ona vezuje teške metale bez kontaminiranja etarskog ulja (Angelova i sar. 2015), obnavlja degradirano zemljište i štiti biljne kulture od gljivica (Stupar i sar. 2014). Lavanda ima značajan potencijal za razvoj medicinskih i farmaceutskih proizvoda (Wells i sar. 2018). Tradicionalno, pomaže kod nesanice, leči rane i migrene (Cavanagh i Wilkinson 2002) i lokalno se primenjuje za ublažavanje bolova, dezinfekciju i kao fungicid. Cvet i etarsko ulje lavande koriste se i u kupkama, gde deluju kao blago sredstvo za poboljšanje cirkulacije i imaju značajnu primenu u kozmetičkim preparatima. Pored toga, lavanda se koristi i kao prirodno sredstvo za odbijanje insekata, naročito moljaca (Kovačević 2004).

Etarsko ulje lavande inhibira biljne patogene (Lukošiūtė i sar. 2020), odbija insekte (Prusinowska i Śmigielski 2014) i pomaže u suzbijanju štetočina u skladištenom žitu (Radu i sar. 2020). Dosta se koristi u parfimeriji, kozmetici, proizvodima za ličnu higijenu i u domaćinstvu

(Cavanagh i Wilkinson 2002, Lesage-Meessen i sar. 2015). Koristi se kao korigens arome hrane i pića i ima potencijal za konzervaciju mesa, antimikrobno pakovanje i poboljšanje svojstava jestivih premaza i filmova (Jamróz i sar. 2018, Radu i sar. 2020, Skendi i sar. 2022, Vasileva i sar. 2018). Etarsko ulje lavande pokazuje antimikrobne, antioksidativne, antiinflamatorne i citotoksične efekte na određene ćelije raka (Cavanagh i Wilkinson 2002, Prusinowska i Śmigielski 2014, Rashad i sar. 2022, Wells i sar. 2018, Woronuk i sar. 2011). Pored koristi za centralni nervni sistem, poseduje antispazmolitičke, cirkulatorne i ergogene efekte (Cavanagh i Wilkinson 2002, Prusinowska i Śmigielski 2014). Ima veliku primenu u aromaterapiji, masažama i akupunkturi (Bakkali i sar. 2008, Basch i sar. 2009). Etarsko ulje lavande koristi se kao sredstvo za poboljšanje mirisa i ukusa u pojedinim farmaceutskim preparatima. Kod poremećaja periferne cirkulacije primenjuje se spolja, u obliku preparata za utrljavanje, pri čemu deluje blago lokalno anestetički. Zbog svojih protivupalnih i antibakterijskih svojstava, primenjuje se kod infekcija disajnih puteva, poremećaja digestivnog sistema (upale creva, dijareja, parazitske infekcije), oboljenja urogenitalnog sistema, kao i kod problema u usnoj duplji i na koži, poput rana, opekotina, iritacija i infekcija. Takođe ublažava različite bolove, uključujući glavobolju i reumatske bolove u mišićima. Ulje lavande je efikasno i kao dezodorans za ličnu upotrebu i osvežavanje prostora (Kovačević 2004).

Infuz od cvetova koristi se interno za ublažavanje nervne napetosti, umora i nesanice, kao i kod probavnih tegoba poput lošeg varenja, nadutosti i grčeva. U obliku obloga pomaže kod opekotina i rana zahvaljujući snažnom antiseptičkom dejstvu i sposobnosti da podstakne regeneraciju tkiva, pri čemu ne izaziva peckanje kao alkohol (Kovačević 2004).

Nekada smatrani otpadom, čvrsti ostaci nakon destilacije i VFHD u poslednje vreme su veoma važni resursi koji podržavaju koncept „nultog otpada“ (Crişan i sar. 2023). Koriste kao đubriva i biogoriva (Lesage-Meessen i sar. 2015). Čvrsti ostaci nakon destilacije sadrže lignin (22%), hemicelulozu (13%) i celulozu (38%) (Kaloustian i sar. 2000), sadrže veliki udeo ugljenika (oko 50%), pa se tradicionalno koriste za obogaćivanje zemljišta, iako se preko 40% odbacuje. U poslednje vreme vrše se istraživanja koja proučavaju njihov potencijal za biokonverziju, mikrobni uzgoj i mogućnost primene kao izvora polisaharida za kozmetiku (Marovska i sar. 2022a) i etanol (Khan i Verma 2020). VFHD lavande, bogat organskim jedinjenjima sa antimikrobnim i antioksidativnim svojstvima (Prusinowska i sar. 2016), koristi se u kozmetici, mada je njegov puni potencijal nedovoljno istražen (Śmigielski i sar. 2016).

5. UPOTREBA JESTIVIH PREMAZA KOD MINIMALNO PRERAĐENOG VOĆA I POVRĆA

5.1 Minimalno prerađeno voće i povrće

Globalni rast populacije značajno je povećao potražnju za hranom, energijom i drugim vitalnim resursima, među kojima bezbednost hrane ostaje najvažnija zbog sve većeg jaza između proizvodnje i potrošnje (Tilman i sar. 2011, Tiwari i sar. 2024, Scholz i sar. 2025). Prema analizama Organizacije za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (FAO, *engl.* Food and Agriculture Organization), globalna proizvodnja hrane mora se povećati za 60% do 2050. godine kako bi se zadovoljile očekivane potrebe (Lan i sar. 2023). Međutim, procenjuje se da se godišnje gubi ili baca 1,3 milijarde tona hrane, ili skoro jedna trećina ukupne proizvodnje, pre svega usled neadekvatnih uslova skladištenja i transporta, nepravilnog rukovanja lako kvarljivim namirnicama i neusklađenosti između proizvodnje, prerade i potrošnje (Osei-Kwarteng i sar. 2024, Szymkowiak i sar. 2020). Takvi uslovi ubrzavaju mikrobnu kontaminaciju i kvarenje, ali i smanjuju nutritivnu vrednost prehrambenih proizvoda (Meijer i sar. 2021). Sve ovo dovodi do značajnog smanjenja bezbednosti hrane, roka trajanja i ukupnog kvaliteta, predstavljajući kritične izazove za javno zdravlje i održive prehrambene sisteme (Yadav i sar. 2025). Najduži vremenski period koji sveži ili sečeni proizvodi mogu da se skladište bez promena kvaliteta poznat je kao rok trajanja. Tokom ovog vremena, propisani kvalitet datog proizvoda se mora održati pod tipičnim uslovima distribucije i skladištenja (Parmar i sar. 2023).

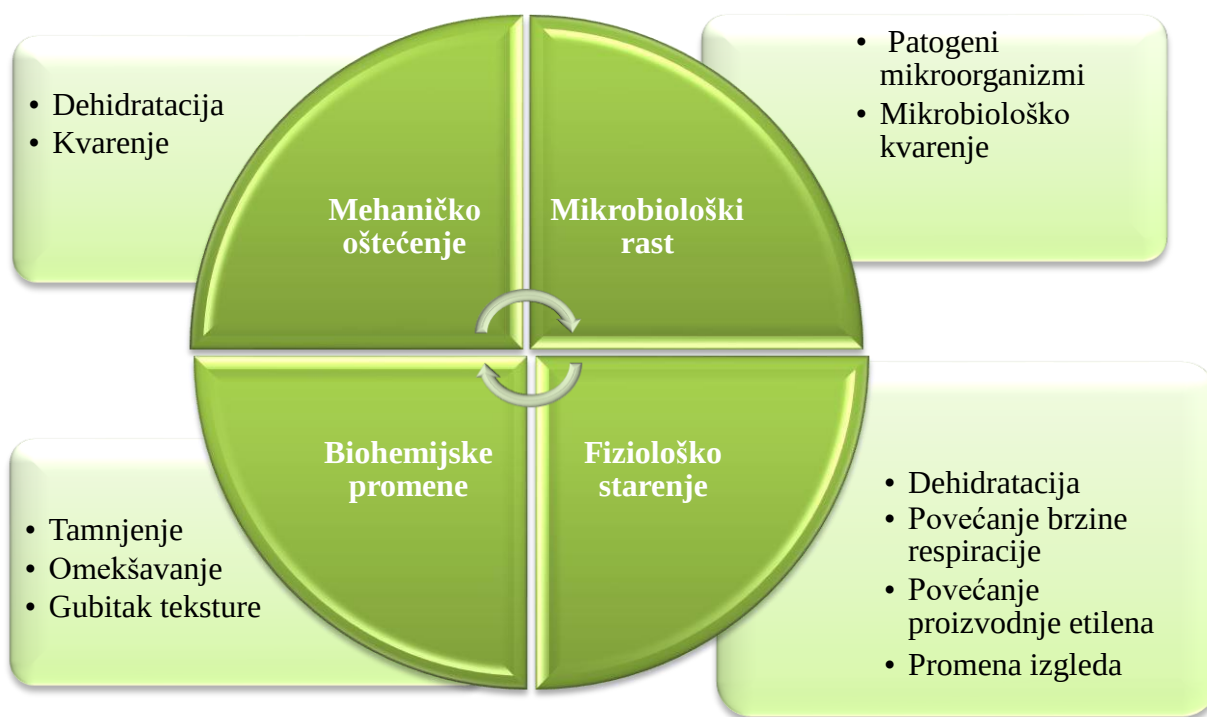
Sveže voće i povrće je poslednjih godina u žiži interesovanja nutricionista i zdravstvenih stručnjaka zbog svojih nutritivnih i funkcionalnih komponenti koje poboljšavaju zdravlje i opšte stanje organizma (Perera i Smith 2013, Qi i sar. 2011, Teixeira i sar. 2022). Sveže voće i povrće čine deo dobro uravnotežene ishrane i izvor su ugljenih hidrata, vlakana, vitamina, minerala i polifenola (Art s i Allende 2005, Sucheta i sar. 2020). Konzumiranje voća i povrća preporučuju Svetska zdravstvena organizacija (WHO, *eng.* World Health Organization), Organizacija za hranu i poljoprivredu (FAO, *eng.* Food and Agriculture Organization), Ministarstvo poljoprivrede Sjedinjenih Država (USDA, *eng.* U.S. Department of Agriculture) i Evropska agencija za bezbednost hrane (EFSA, *eng.* European Food Safety Authority), kako bi se smanjio rizik od kardiovaskularnih i onkoloških bolesti (Allende i sar. 2006, Art s i Allende 2005, Niemira i Fan 2014, Su i Arab 2006).

Zdravstvene institucije Evropske unije sprovode kampanje koje preporučuju dnevnu konzumaciju najmanje 5 porcija svežeg voća i povrća, dok Svetska zdravstvena organizacija preporučuje minimum 400 g voća i povrća po glavi stanovnika (Lafarga i sar. 2019). Ove kampanje su snažno podržane sve većim dokazima o direktnoj povezanosti ishrane bogate voćem sa smanjenjem rizika od mnogih bolesti (Siroli i sar. 2015). Sveže voće i povrće pripada kategoriji lako kvarljivih proizvoda, a na njihov rok trajanja utiče niz različitih faktora, uključujući genetske faktore, uslove okoline tokom rasta i berbe, kao i način rukovanja, transporta i skladištenja. Svaka vrsta voća ima različite biološke karakteristike i može različito reagovati na dati skup uslova, pa se strategije održavanja kvaliteta moraju prilagoditi svakoj vrsti, sorti i primenjenom postupku (Yadav i sar. 2025). Najčešći načini produženja trajanja lako kvarljivih proizvoda, uključujući voće i povrće, zasnivaju se na primeni postupaka koji usporavaju fiziološke procese, mikrobiološki rast i degradaciju kvaliteta. Metode prerade koje se primenjuju u slučaju voća i povrća su sušenje, zamrzavanje, kišljenje, fermentacija, drugi vidovi prerade voća i povrća, uključujući i minimalnu preradu (Perera i Smith 2013). Minimalna prerada voća i povrća postala je jedan od najbrže rastućih segmenata prehrambene industrije kao rezultat pojave novog profila potrošača definisanog kao „bogat novcem, siromašan vremenom“ (Ali i sar. 2017, De Corato 2019). Ovakav način života povećava potražnju za praktičnim i kvalitetnim proizvodima koji osim što štede vreme i trud, nude i prednosti svežih proizvoda, podstičući rast tržišta minimalno prerađenog voća i povrća (Denoya i sar. 2017). Minimalno prerađena hrana prisutna je na tržištu još od 1930-ih godina. Međutim, uspon ovog tržišta počeo je 1950-ih u Sjedinjenim Državama, kao rezultat novih prehrambenih navika, poput pojave brze hrane, koja je podrazumevala jednostavnu i efikasnu pripremu obroka (Souza i sar. 2020). U novije vreme, segment minimalno prerađene hrane je porastao zbog promena u prehrambenim navikama širom sveta. Prema izveštajima istraživanja kompanije *Global Market Insights* globalno tržište prerađenog voća i povrća procenjeno je na 377,3 milijarde dolara u 2024. godini, a očekuje se da dostigne 698,6 milijardi dolara do 2034. godine, uz prosečnu godišnju stopu rasta od 6,3%. Ovakav trend rasta u velikoj meri je posledica globalnih promena u prehrambenim navikama, budući da su savremeni potrošači sve više usmereni ka zdravijoj i uravnoteženijoj ishrani, što podstiče interesovanje za proizvode biljnog porekla, uključujući i prerađeno voće i povrće, koje predstavlja jednostavne, praktične i korisne prehrambene proizvode bogate vitaminima, mineralima, vlaknima i antioksidansima. Ove karakteristike čine ih naročito privlačnim potrošačima koji preferiraju nutritivno vredne, ali istovremeno jednostavne proizvode pogodne za svakodnevnu upotrebu (Global Market Insights Inc. 2024). Potrošači se danas sve više odlučuju za

visokokvalitetne, prirodne, hranljive, bezbedne i praktične proizvode. Globalizacija i savremeni način života su faktori direktno povezani sa potražnjom za minimalno prerađenim proizvodima. Pored toga, demografske i socioekonomske promene, kao što su smanjenje prosečnog broja članova domaćinstva i povećan broj pojedinaca koji žive sami, kao i radne obaveze i ubrzan način života koji ostavljaju manje vremena za tradicionalnu pripremu obroka kod kuće, dovode do veće potražnje za praktičnim prehrambenim proizvodima koji su jednostavni za upotrebu, čime se dodatno podstiče rast ovog sektora (Gomes i sar. 2023). Takođe, upotreba minimalno prerađenog voća i povrća omogućava potrošaču da smanji otpad, jer se kući nosi samo jestivi deo proizvoda, čime se smanjuje količina organskog otpada u domaćinstvu (Melo i Quintas 2023).

Drugi termini koji se koriste za minimalno prerađene proizvode su blago prerađeni, delimično prerađeni, sveže prerađeni, sveže sečeni i prethodno pripremljeni (engl. *fresh-cut, ready to eat, ready to use*) (Perera i Smith 2013). Međunarodno udruženje za sveže sečene proizvode (IFPA engl. International Fresh-Cut Produce Association) definiše sveže sečene proizvode kao voće ili povrće koje je oljušteno ili sečeno u proizvod koji je 100% upotrebljiv i upakovan tako da potrošačima pruži visoku nutritivnu vrednost, praktičnost i dobar ukus, uz očuvanje svežine. Sveže sečeno voće i povrće predstavlja minimalno obrađene proizvode koji treba da budu u sirovom stanju, bez prethodnog zamrzavanja ili termičke obrade, i spremni za konzumaciju ili pripremu (Oliveira i sar. 2015). Minimalno prerađeni proizvodi su proizvodi koji su pretrpeli fizičke promene, ali zadržavaju svežinu i prirodna svojstva originalnog voća. Ove namirnice se podvrgavaju jediničnim operacijama, koje uključuju selekciju, čišćenje, pranje, ljuštenje, sečenje, usitnjavanje, gnječenje, dezinfekciju i na kraju pakovanje. Svi ovi koraci utiču na rok trajanja i kvalitet pripremljenog proizvoda (Artés i Allende 2005, Barry-Ryan i O'Beirne 1999, Ghavidel i sar. 2013, McCarthy i Mathews 1994, Qi i sar. 2011, Teixeira i sar. 2022). U ovu grupu proizvoda spadaju salate od različitih vrsta sečenog voća i povrća (Perera i Baldwin 2001). Obzirom da se tokom proizvodnje ne podvrgavaju tehnikama pasterizacije ili blanširanja koje bi mogle smanjiti mikrobiološke rizike, ova hrana može biti potencijalno sredstvo za prenos patogenih bakterija, virusa, toksina ili mikroorganizama koji formiraju spore (Oliveira i sar. 2015). Kao rezultat toga, sveže sečeno voće mora se skladištiti, distribuirati i prodavati u uslovima snižene temperature kako bi se obezbedio zadovoljavajući rok trajanja, koji pri odgovarajućim uslovima čuvanja može biti od 7 do 20 dana. Međutim, treba imati u vidu da produženo čuvanje na niskim temperaturama može pogodovati razvoju psihrofilnih mikroorganizama (Melo i Quintas 2023).

Uprkos svojoj popularnosti, proizvodnja minimalno prerađenih proizvoda je ograničena zbog kraćeg roka trajanja u poređenju sa nedeljama ili mesecima za prerađenu sirovinu (Sanz i sar. 2002). Smanjenje roka trajanja nakon minimalne prerade je posledica ubrzane transpiracije, respiracije, enzimskog i neenzimskog potamnjenja, proizvodnje etilena i mikrobne kontaminacije (Ramos i sar. 2013). Minimalna prerada svežeg voća i povrća ima dve svrhe. Prvo, važno je da proizvod ostane svež, ali pogodan za upotrebu, a da se pritom ne izgubi njegov nutritivni kvalitet. Drugo, proizvod treba da ima rok trajanja dovoljan da distribucija i prodaja bude izvodljiva unutar regiona potrošnje. Mikrobiološki, senzorni i nutritivni rok trajanja minimalno prerađenog povrća ili voća treba da bude najmanje 4-7 dana, ali poželjno je i duže (Perera i Smith 2013). Minimalna prerada zahteva visok nivo higijene i dezinfekcije, oštre noževe i poznavanje fiziologije same biljke. Ove namirnice karakteriše to što su živa tkiva, sa sečenim površinama. Kako se spoljašnja zaštita gubi, tkiva koja obično nisu izložena atmosferi sada su izložena vazduhu, mikroorganizmima i daljim oštećenjima od rukovanja. Sadržaj ćelija, posebno rastvorljivi šećeri, prekrivaju površinu tkiva i obezbeđuju hranljive materije, čime stvaraju dobru podlogu za rast mikroorganizama. Kao odgovor na sečenje, dolazi do aktiviranja metaboličkih puteva karakterističnih u uslovima narušavanja strukture plodova, povećane brzine respiracije i povećanja proizvodnje etilena u roku od nekoliko minuta, što uslovljava tamnjenje, promenu ukusa i teksture, smanjenje nutritivne vrednosti i skraćanje roka trajanja proizvoda (Perera i Smith 2013). Aktivnost respiracije minimalno prerađenih proizvoda povećava se 1,2–7,0 puta, ili čak i više u odnosu na neobrađene proizvode, u zavisnosti od proizvoda, stepena sečenja i temperature, pri čemu je brzina respiracije direktno proporcionalna brzini kvarenja proizvoda (Qi i sar. 2011, Teixeira i sar. 2022). Povećana sinteza etilena ubrzava sazrevanje, pa plodovi omekšavaju i gube svežinu (Philosoph-Hadas i sar. 1991), dok respiracija troši rezerve energije. Druge posledice sečenja su hemijske i fizičke prirode, kao što su reakcije oksidativnog potamnjenja, oksidacija lipida ili povećan gubitak vode (Brecht, 1995). Najčešći faktori koji utiču na rok trajanja i bezbednost minimalno prerađenog voća i povrća su sumirani na slici 5.1 (Artés i Allende 2005).



Slika 5.1 Faktori koji utiču na bezbednost i rok trajanja minimalno prerađenog voća i povrća

Kako bi se sprečile takve promene u kvalitetu proizvoda, sveže sečeno voće ili povrće mora se konzervisati upotrebom konzervanasa i/ili aditiva, fizičkim metodama ili primenom aktivnih i drugih vrsta pakovanja. Primena hemijskih konzervansa, kao što su sorbinska, benzoeva kiselina ili sulfiti, može biti korisna u produženju roka trajanja, ali je njihova upotreba mora biti strogo kontrolisana. Pokazalo se da bezbedniji aditivi, kao što su limunska i askorbinska kiselina sami ili u kombinaciji sa drugim tretmanima i uslovima, poboljšavaju rok trajanja svežeg voća i povrća (Butt i Abbott 2000, Dong i sar. 2000, Soliva-Fortuny i sar. 2002, 2004). Sredstva za dezinfekciju, antioksidansi, sredstva protiv potamnjenja su aditivi koji se koriste za konzervisanje sveže sečenog voća ili povrća. Tečni hlor i hipohlorit u koncentracijama od 50–200 ppm (vreme kontakta manje od 5 minuta) se trenutno najviše koriste za dezinfekciju. Međutim, zbog regulatornih ograničenja, upotreba hlora za tretman prehrambenih proizvoda spremnih za jelo je zabranjena u nekim zemljama poput Holandije, Belgije i Švajcarske (Niemira i Fan 2014, Sucheta i sar. 2020). Limunska, askorbinska i druge organske kiseline poznate su po smanjenju pH vrednosti i površinske mikroflore u sveže sečenom voću ili povrću i vodeći su opšte priznati antioksidansi za sveže proizvode. Koriste se za produženje roka trajanja salata od voća i povrća (Shapiro i Holder 1960), sveže sečenih jabuka

(Aguayo i sar. 2010), sveže sečenog manga (Chiumarell i sar. 2011), kineskog vodenog kestena (Jiang i sar. 2004) i drugih minimalno prerađenih proizvoda na bazi voća i povrća. Umesto dodavanja konzervansa sveže sečenim proizvodima rasprostranjena je upotreba ultraljubičastog zračenja kao tehnike konzervisanja, pakovanje u modifikovanoj atmosferi i primena jestivih premaza kako bi se poboljšao rok trajanja sveže sečenog voća (Sucheta i sar. 2020). Pranje svežeg voća i povrća pre sečenja je važno za kontrolu broja mikroorganizama, samim tim i za bezbednost proizvoda i rok trajanja (Hurst 1995). Rok trajanja svežeg voća i povrća igra vitalnu ulogu u marketingu proizvoda. Zbog toga je najvažniji aspekt integrisani pristup, gde se pravilno upravlja sirovinama, obezbeđuje se pravilno rukovanje, prerada, pakovanje i distribucija, kako bi se omogućilo produženje roka trajanja. Jedinične operacije poput ljuštenja i sečenja zahtevaju stalnu modernizaciju i optimizaciju kako bi što bolje očuvao kvalitet proizvoda.

Među namirnicama koje su prethodno upakovane i „spremne za jelo“, sveže sečene jabuke imaju važnu ekonomsku vrednost na tržištu zbog svoje niske cene, praktičnosti i popularnosti (Özdemir i Gökmen 2019). Jabuka (*Malus domestica*) je važno i jedno od najčešće konzumiranih voća u svetu zbog svojih zdravstvenih koristi. Jabuke sadrže značajnu količinu minerala, dijetetskih vlakana i polifenola koji su povezani sa prevencijom bolesti, kao što su koronarne bolesti. Polifenoli su posebno povezani sa ukusom i bojom proizvoda od jabuke. Oni mogu da variraju u zavisnosti od vrste jabuke, a kao najzastupljeniji navode se flavan-3-oli (katehin, epikatehin), flavanoli (kvercetin), dihidrohalkoni, hidroksicinaminske kiseline (hlorigenska kiselina) i antocijanini (Özdemir i Gökmen 2019). Jabuke se mogu gajiti samo na određenim mestima na svetu u određeno doba godine. Shodno tome, da bi se obezbedilo snabdevanje potrošača širom sveta tokom cele godine, važno je da se one mogu transportovati na velike udaljenosti i skladištiti duže vreme pre prodaje. Idealno bi bilo da jabuke zadrže svoje karakteristike i kvalitet godinu dana ili duže u normalnim uslovima, kako bi se smanjili troškovi i povećala održivost snabdevanja hranom. Međutim, kvalitet jabuka ima tendenciju da se pogoršava tokom skladištenja (Aayush i sar. 2022, Sucheta i sar. 2020, Yousuf i Quadri 2020). Jedan od načina produžetka roka trajanja jabuke je premazivanje zaštitnim i antimikrobnim sredstvima koja su bezbedna za konzumaciju (Salehi 2017). Jestivi premazi na bazi alginata mogu poboljšati kvalitet jabuka, sprečiti gubitak težine i povećati njihov rok trajanja (Rojas-Graü i sar. 2007a). Jestivi premazi na bazi gume arabike menjaju okruženje oko ploda, služeći kao selektivno propustljiva barijera za O₂ i CO₂, smanjujući reakcije oksidacije i brzinu respiracije. Neki od najvažnijih mehanizama kvarenja jabuka kojima se treba pozabaviti prilikom odabira efikasnih metoda za povećanje njihovog roka trajanja, kvaliteta i bezbednosti su sledeći:

Mikrobno kvarenje – Sveže voće i povrće predstavljaju pogodno okruženje za razvoj mikroorganizama zbog visokog sadržaja vode, dostupnih hranljivih materija i relativno niskog pH, što omogućava rast različitih grupa mikroorganizama (Aayush i sar. 2022, Erkmen i Bozoglu 2016, Sucheta i sar. 2020, Yousuf i Quadri 2020, Zhao i sar. 2022). Mikrobno kvarenje ovih namirnica predstavlja kompleksan proces koji uključuje interakciju fizičko-hemijskih osobina ploda, mikroflora i spoljašnjih uslova sredine (Barth i sar. 2009). Mikroorganizmi dospevaju na voće i povrće u različitim fazama – tokom rasta, berbe, transporta i skladištenja, pri čemu su izvori kontaminacije zemljište, voda, vazduh i ljudski faktor (Quadri i sar. 2015). Mehanička oštećenja tkiva ploda imaju značajnu ulogu jer omogućavaju lakši prodor mikroorganizama u unutrašnjost i ubrzavaju proces kvarenja (Zhao i sar. 2022). Najčešći uzročnici mikrobiološkog kvarenja su bakterije, kvasci i plesni, pri čemu se u voću dominantno javljaju kvasci zbog sposobnosti rasta pri niskim pH vrednostima i visokim koncentracijama šećera (Deák 1996). Pored njih, značajnu ulogu imaju i bakterije mlečne i sirćetne kiseline, kao i različite vrste Gram-pozitivnih i Gram-negativnih bakterija (Barth i sar. 2009). Proces kvarenja najčešće uključuje razgradnju ugljenih hidrata, pri čemu mikroorganizmi fermentišu šećere i proizvode alkohol, ugljen-dioksid i organske kiseline, što dovodi do promena ukusa, mirisa i teksture ploda (Erkmen i Bozoglu 2016). Jabuka je posebno podložna mikrobiološkom kvarenju zbog visokog sadržaja vode i šećera, kao i relativno niske kiselosti koja pogoduje razvoju kvasaca i plesni (Erkmen i Bozoglu 2016). Kora jabuka sadrži značajne količine pektina i drugih polisaharida koji mogu poslužiti kao hranljiva podloga za mikrobe. Mikroorganizmi su prirodno prisutni na površini zdravih plodova, ali ostaju neaktivni sve do faze zrenja, jer ih inhibiraju prirodne barijere i antifungalne supstance u kori, poput fenolnih i flavonoidnih jedinjenja. Kako sazrevanje napreduje, dolazi do slabljenja ćelijskih zidova i smanjenja koncentracije ovih zaštitnih jedinjenja, čime se povećava podložnost ploda infekciji (Yousuf i Quadri 2020). Površina jabuke predstavlja prirodno stanište raznovrsne mikroflora koja uključuje kvasce rodova *Saccharomyces*, *Candida* i druge (Heard 1999). Kod sveže i minimalno prerađene jabuke, mikrobiološki rast predstavlja glavni faktor ograničenja roka trajanja, posebno nakon sečenja, kada dolazi do narušavanja prirodne zaštitne barijere ploda (Beuchat 2002). U takvim uslovima mikroorganizmi se brzo razmnožavaju i dovode do pojave neprijatnog mirisa, ukusa i promene boje. Pored mikroorganizama kvarenja, sveže sečeno voće može biti i izvor patogena koji se prenose hranom, kao što su *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. i *Listeria monocytogenes* (Yousuf i Quadri 2020).

Enzimске reakcije – Enzimsko kvarenje predstavlja jedan od dominantnih uzroka degradacije kvaliteta svežeg voća i povrća nakon berbe, pri čemu dolazi do promena boje, teksture i nutritivne vrednosti proizvoda (Sui i sar. 2023, Wang i sar. 2024). Ove promene su posledica aktivnosti endogenih enzima koji ostaju aktivni i nakon berbe, a njihova aktivnost se intenzivira usled stresa, oštećenja tkiva i izloženosti kiseoniku (Yuan i sar. 2025). Najznačajniji oblik enzimskog kvarenja je potamnjenje, koje nastaje oksidacijom fenolnih jedinjenja pod dejstvom enzima polifenol-oksidade i peroksidade (Sui i sar. 2023, Wang i sar. 2024). Polifenol-oksida katalizuje oksidaciju fenolnih jedinjenja, koji se zatim spontano polimerizuju u tamne pigmente (melanine), što dovodi do karakterističnog smeđeg obojenja tkiva (Arnold i Gramza-Michałowska 2022, Sui i sar. 2023). Ovaj proces ne utiče samo na vizuelni kvalitet već i na smanjenje sadržaja bioaktivnih jedinjenja i antioksidativne aktivnosti proizvoda (Arnold i Gramza-Michałowska 2022). Pored polifenol-oksidade, značajnu ulogu ima i peroksida, koja koristi vodonik-peroksid kao kofaktor i dodatno doprinosi oksidativnim reakcijama i razvoju tamnih pigmenata (Wang i sar. 2024). Sinergističko delovanje ova dva enzima ubrzava proces kvarenja, posebno kod minimalno prerađenog voća i povrća. Oksidativni enzimi kao što je lipoksigenaza učestvuju u razgradnji lipida i stvaranju isparljivih jedinjenja (aldehida i ketona), što dovodi do pojave nepoželjnih mirisa i ukusa (Sui i sar. 2023). Kod jabuke, enzimsko potamnjenje predstavlja najizraženiji oblik enzimskog kvarenja, posebno kod sveže sečenih proizvoda, gde dolazi do brze oksidacije fenolnih jedinjenja i gubitka kvaliteta već u ranim fazama skladištenja (Arnold i Gramza-Michałowska 2022, Fan 2022). Intenzitet ovih reakcija zavisi od sorte, sadržaja fenolnih jedinjenja i aktivnosti enzima polifenol-oksidade (Arnold i Gramza-Michałowska 2022). Na brzinu enzimskih reakcija utiču brojni faktori, među kojima su najvažniji temperatura, pH vrednost, dostupnost kiseonika i stepen oštećenja tkiva (Yuan i sar. 2025). Smanjenje temperature i ograničavanje kontakta sa kiseonikom predstavljaju ključne strategije za usporavanje enzimskog kvarenja (Sui i sar. 2023).

5.2 Jestivi premazi

Industrija minimalno prerađenog voća beleži dvocifrene stope rasta kao odgovor na rastuću potražnju potrošača ka prehrambenim proizvodima koji pružaju zdravstvene benefite, a istovremeno štede vreme i novac (Global Market Insights Inc. 2024). Minimalno prerađeno voće karakterišu visok kvalitet, očuvan sadržaj vitamina, bioaktivnih jedinjenja, minerala i vlakana (Artés i Allende

2005). Međutim, minimalna obrada olakšava mikrobnu kontaminaciju, gubitak vode, omekšavanje, tamnjenje rezane površine, pa takav proizvod ima ograničen rok trajanja (Ghavidel i sar. 2013). Faktori kao što su nepravilno rukovanje, sklonost kvarenju, fiziološka aktivnost voća i povrća mogu doprineti njihovom ograničenom roku trajanja (Singh i Mirza 2018, Yadav i sar. 2024), dok snižavanje temperature skladištenja i kontrola brzine respiracije, proizvodnje etilena, gubitka vlage i rasta mikroorganizama mogu pomoći u produžetku roka trajanja svežih ili sečenih proizvoda (Yadav i sar. 2025). Globalni rast populacije i sve veća potražnja za svežom i bezbednom hranom učinio je očuvanje hrane područjem velike važnosti. Razvoj efikasnih sistema pakovanja koji obezbeđuju sveobuhvatnu zaštitu i stabilnost prehrambenih proizvoda je od ključne važnosti na globalnom nivou (Feng i sar. 2025b). Konvencionalni materijali kao što su plastika, staklo, metal i drvo ostaju u širokoj upotrebi, ali se suočavaju sa ograničenjima u pogledu održivosti, funkcionalnosti i uticaja na životnu sredinu (Díaz-Montes i sar. 2021). Ovo važno pitanje životne sredine, dodatno pojačano potražnjom potrošača za sigurnijim i održivim alternativama, podstiče pomak ka inovativnim tehnikama očuvanja hrane. Razvoj jestivih premaza i filmova obećava da će redefinisati standarde očuvanja stabilnosti hrane nudeći održivo, ekološki prihvatljivo rešenje (Yadav i sar. 2024, Yousuf i sar. 2021). Prema SCOPUS-u, istraživanja jestivih premaza datiraju još iz 1953. godine, sa značajnim povećanjem broja publikacija primećenim od početka 2000-ih (Yadav i sar. 2025). Sve veća potražnja za praktičnom, vizuelno privlačnom i nutritivno vrednom hranom takođe je dovela do pomeranja sa tradicionalnih termičkih tretmana ka alternativnim, inovativnim tehnikama koje su u skladu sa ekološki održivim metodama proizvodnje. Međutim, uprkos značajnom napretku u razvoju novih tehnologija konzervisanja hrane, tehničke, ekonomske i regulatorne barijere i dalje ometaju njihovu široku komercijalnu primenu (Rajkovic i sar. 2010). U tom kontekstu, jestivi premazi su se pojavili kao obećavajuće rešenje za unapređenje bezbednosti hrane, produženje roka trajanja uz prihvatljivu cenu (Aayush i sar. 2022, Özdemir i Gökmen 2019, Mahela i sar. 2020). Jestivi premazi nude održivu, biorazgradivu alternativu konvencionalnim materijalima za pakovanje i bezbedni su za direktnu konzumaciju sa hranom (Puscaselu i sar. 2020). Karakterišu se kao tanki slojevi sastavljeni od hemijskih ili bioloških supstanci koji se nanose na površinu proizvoda. Formiranjem zaštitne multifunkcionalne polupropusne barijere između prehrambenog proizvoda i spoljašnje sredine, ovi premazi smanjuju mogućnost kontakta površine sa mikrobnim kontaminantima, redukuju oksidativne procese, gubitak vlage i razmenu gasova, odlažući kvarenje i održavajući svežinu proizvoda (Chawla i sar. 2021, Vargas i sar. 2008, Yousuf i sar. 2021, Zhao i sar. 2022). Sastavljeni

od polimernih matrica polisaharidne, proteinske ili lipidne strukture, u nekim slučajevima kombinovanih sa bioaktivnim agensima, jestivi premazi pružaju antimikrobna, antioksidativna i funkcionalna svojstva proizvoda, pomažu u održavanju kritičnih parametara kvaliteta kao što su ukus, tekstura, boja i zadržavanje hranljivih materija (Saha i sar. 2017). Dizajnirani su tako da imaju razne funkcionalne osobine koje sprečavaju kvarenje voća tokom skladištenja i distribucije, zaštitu od mehaničkih sila, kontrolu transporta pare i tečnosti i služe kao barijere za UV i vidljivu svetlost (Özdemir i Gökmen 2019, Aayush i sar. 2022). Međutim, određivanje kompatibilnosti između polimerne matrice i aktivnih jedinjenja ostaje kritičan izazov koji zahteva opsežna i kontinuirana istraživanja. Takođe, formulacija jestivih premaza mora biti prilagođena specifičnim načinima kvarenja svakog tipa prehrambenog proizvoda, jer njihova funkcionalnost zavisi od jedinstvenog sastava i procesa razgradnje hrane. Na primer, jestivi premazi mogu da minimiziraju gubitak težine, smanje brzinu respiracije ili suzbiju proizvodnju etilena u voću (Saha i sar. 2017). U drugim slučajevima, smanjenjem propustljivosti kiseonika proizvodi se štite od oksidacije (Zambrano-Zaragoza i sar. 2018). Međutim, u situacijama kada osnovna svojstva jestivih premaza nisu dovoljna za dugoročnu zaštitu u polimernu matricu se ugrađuju antimikrobni, antioksidativni i drugi funkcionalni dodaci kako bi se poboljšala barijerna svojstva i ukupne performance premaza. Jestivi premazi mogu da deluju kao nosači za bioaktivna jedinjenja, uključujući vitamine, antioksidante i antimikrobna sredstva, doprinoseći unapređenju nutritivnih vrednosti i mikrobiološke bezbednosti prehrambenih proizvoda (Quirós-Sauceda i sar. 2014). Njihova sposobnost da poboljšaju senzorna svojstva učinila ih je obećavajućom inovacijom u održivom pakovanju hrane (Aschemann-Witzel i sar. 2015, Cheng i sar. 2024). Ranije su se premazi nanosili isključivo na celo voće ili povrće, ali zbog njihove efikasnosti, jednostavnosti primene i ekološke prihvatljivosti, primena je proširena i na sveže sečene proizvode (Durango i sar. 2008). Pošto su namenjeni za konzumiranje, supstance koje se koriste za izradu jestivih filmova i premaza moraju biti bezbedne za upotrebu u ishrani (GRAS *engl.* Generally Recognized as Safe) i odobrene od strane Uprave za hranu i lekove (FDA) u Sjedinjenim Državama ili ekvivalentnim propisima regulatornim telima u drugim zemljama.

5.2.1 Karakteristike jestivih premaza

Najvažnija karakteristika jestivih premaza i filmova je da deluju kao zaštitne barijere protiv spoljašnjih faktora kao što su gubitak vlage, razmena gasova, oksidacija i mikrobna kontaminacija,

što može produžiti rok trajanja, očuvati kvalitet i smanjiti bacanje hrane (Khalid i sar. 2022). Pored toga, oni pružaju strukturni integritet tokom skladištenja i rukovanja i mogu služiti kao nosači funkcionalnih agenasa, uključujući antimikrobna sredstva, antioksidante, arome i boje (Castro-Muñoz 2021b, Díaz-Monte, Galus i sar. 2015). Materijali koji se koriste za jestive premaze i filmove su biorazgradivi i kompostibilni, pri razgradnji u prirodnim uslovima uglavnom ostavljaju minimalne ostatke, uglavnom ugljen-dioksid i vodu, dok se u anaerobnim uslovima može formirati i metan (Mellinas i sar. 2016, Taneja i sar. 2023). Da bi se jestivi premaz uspešno primenio u cilju očuvanja kvaliteta i produženja roka trajanja svežeg i sveže sečenog voća i povrća, mora ispunjavati određene zahteve (Aayush i sar. 2022, Usman i sar. 2025, Yousuf i Quadri 2020). Pre svega, potrebno je da može da formira tanak i ujednačen sloj na površini proizvoda, bez lepljivosti pri rukovanju, kao i da bude vodootporan kako bi ostao stabilan tokom skladištenja. Takođe, treba da smanji propustljivost vodene pare i time ograniči gubitak vlage, ali i da omogući adekvatnu razmenu gasova — bez prekomerne potrošnje kiseonika ili nakupljanja ugljen-dioksida, jer je za održavanje aerobnog disanja neophodno najmanje 1–3% kiseonika.

Premaz, osim što obezbeđuje barijernu zaštitu, ne sme narušiti izgled proizvoda, već bi trebalo da ga poboljša, istovremeno štiteći od mehaničkih oštećenja tokom skladištenja, transporta i rukovanja. Njegova formulacija može sadržati bioaktivne komponente, poput antioksidanasa, antimikrobnih supstanci, vitamina, boja i aroma, ali mora ostati stabilna, bezbedna i netoksična, kao i bez mirisa i ukusa, kako bi se očuvala senzorna svojstva svežeg proizvoda. Uspešno formiranje tankog i homogenog sloja u velikoj meri zavisi od kvasivosti materijala, koja utiče na adheziju, debljinu, ujednačenost i propustljivost premaza, a određena je međusobnim interakcijama između faza vazduh–fluid, vazduh–čvrsta materija i čvrsta materija–fluid. Ovaj odnos se izražava kontaktnim uglom, pri čemu vrednosti manje od 90° omogućavaju ravnomerno razlivanje premaza po površini, dok veći uglovi dovode do formiranja kapljica (Aayush i sar. 2022). Optička svojstva jestivih premaza, poput boje, sjaja i neprozirnosti, imaju važnu ulogu u formiranju kvaliteta finalnog proizvoda, jer direktno utiču na njegov vizuelni utisak. Neprozirnost zavisi od sastava premaza, odnosno prisustva komponenti koje rasipaju svetlost, kao što su biopolimeri, uljne kapljice ili nanočestice, pa premazi mogu biti providni ili neprozirni u zavisnosti od njihove koncentracije i strukture (Lima i sar. 2010). Površinski izgled, sjajan ili mat, određen je načinom refleksije svetlosti, glatke površine reflektuju svetlost ogledalski i daju sjaj, dok hrapave dovode do njenog difuznog rasipanja i mat efekta. Pored toga, značajna je i sposobnost premaza da apsorbuje svetlost, posebno UV zračenje koje može izazvati hemijsku degradaciju tokom skladištenja, zbog čega je kontrola

sastava i mikrostrukture ključna za postizanje željenih optičkih karakteristika (Aayush i sar. 2022). Tokom čuvanja sveže sečenog voća i povrća dolazi do promena boje, izraženih kroz parametre L^* , a^* i b^* i indeks potamnjenja, koje zavise od vrste sirovine, uslova skladištenja, dostupnosti kiseonika, pH vrednosti, kao i sadržaja enzima i fenolnih jedinjenja (Chiabrando i Giacalone 2015). Parametar L^* (sjajnost/svetlina) označava osvetljenost na skali od 0 do 100, pri čemu veće vrednosti ukazuju na veću osvetljenost. Ovaj parametar ima opseg od crne ($L = 0$) do bele boje ($L = 100$). Parametar a^* ima pozitivne vrednosti za crvenu boju i negativne vrednosti za zelenu, dok parametar b^* ima pozitivne vrednosti za žutu boju i negativne vrednosti za plavu (Gross 1987). Barijerna svojstva jestivih premaza imaju ključnu ulogu u regulaciji prenosa tečnosti i gasova između proizvoda i spoljašnje sredine. Posebno je značajna propustljivost vodene pare, koja predstavlja jedno od najčešće proučavanih svojstava premaza za voće i povrće, jer sadržaj vlage direktno utiče na kvalitet, rok trajanja i bezbednost proizvoda. Uopšteno, propustljivost vodene pare se smanjuje sa povećanjem debljine premaza i udela lipida u njegovom sastavu (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020).

5.2.2 Vrste jestivih premaza

Jestivi premazi se, prema vrsti polimerne matrice, dele na one na bazi polisaharida, proteina, lipida, agroindustrijskog otpada i kompozitnih materijala (Aayush i sar. 2022, Oduro 2021, Yadav i sar. 2024, Yousuf i Quadri 2020). Polisaharidi i proteini, koji mogu biti biljnog, životinjskog ili mikrobnog porekla, uglavnom su hidrofilni i imaju ograničenu otpornost na prolazak vode, pa se zbog toga u premaze često uključuju lipidi (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020). Kombinovanjem više komponenti nastaju kompozitni premazi sa unapređenim funkcionalnim karakteristikama, jer objedinjuju prednosti različitih sastojaka (Aayush i sar. 2022, Oduro 2021). Njihova svojstva mogu se dodatno prilagoditi primenom aditiva kao što su plastifikatori, emulgatori, sredstva za umrežavanje i različite čestice ili vlakna, dok se funkcionalnost unapređuje i dodatkom bioaktivnih jedinjenja, poput antimikrobnih i antioksidativnih supstanci, vitamina, boja i aroma (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020). Zahvaljujući tome, jestivi premazi se često koriste i kao nosači prirodnih jedinjenja sa antioksidativnim i antibakterijskim dejstvom, čime doprinose očuvanju kvaliteta i produženju roka trajanja svežih proizvoda (Maizura i sar. 2007, Wu i sar. 2012).

5.2.2.1 Jestivi premazi na bazi polisaharida

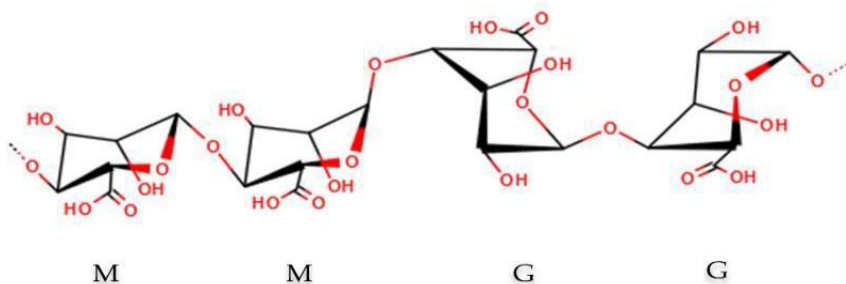
Polisaharidi predstavljaju organska jedinjenja u kojima su jedinice monosaharida povezane glikozidnim vezama. Ove jedinice mogu se sastojati od ostataka šećera vezanih glikozidnim ili kovalentnim vezama za druge strukture kao što su peptidi, aminokiseline ili lipidi (Mohammed i sar. 2021, Yadav i sar. 2024). Zbog svoje biokompatibilnosti, netoksičnosti i biorazgradivosti, polimeri na bazi polisaharida se često koriste u izradi jestivih premaza (Cruz-Monterrosa i sar. 2023). Ovi makromolekuli se prvenstveno izoluju iz prirodnih izvora, uključujući mikroorganizme (kao što su gljivice i bakterije), životinje, biljke i alge (Darge i sar. 2019, Yousuf i Quadi 2020). U izradi jestivih premaza najčešće se koriste celuloza, škrob, alginat, pektin, hitozan, pululan i karagenan (Aayush i sar. 2022, Ghavidel i sar. 2013, Yadav i sar. 2024). Kada se koriste kao materijali za premaze, jedinjenja na bazi polisaharida nude nekoliko prednosti u očuvanju kvaliteta hrane. Tu spada produženje roka trajanja, smanjenje brzine respiracije i minimiziranje gubitka težine. Pored toga, pomažu u očuvanju rastvorljivih suvih materija, vitamina i bioaktivnih jedinjenja kao što su flavonoidi, antocijanini i fenoli. Polisaharidni premazi su takođe efikasni u inhibiranju rasta mikroorganizama poput bakterija i gljivica, poboljšavajući aktivnost antioksidativnih enzima (kao što su katalaza i superoksid dismutaza), odlažući potamnivanje i smanjujući gubitke kvaliteta hrane (Cruz-Monterrosa i sar. 2023). Međutim, primena ovih premaza ima određena ograničenja, kao što su mala mehanička čvrstoća, loša termička stabilnost i visoke tačke topljenja, što ometa njihovu širu primenu (Martins i sar. 2022, Yadav i sar. 2024). Ovi problemi se mogu rešiti ugradnjom aktivnih agenasa, koji ne samo da produžavaju rok trajanja već i poboljšavaju ukupna funkcionalna svojstva formulisanih jestivih premaza (Cruz-Monterrosa i sar. 2023). Sa druge strane, barijera koju ovi premazi pružaju vlazi je obično loša zbog hidrofilne prirode polisaharida i zbog toga mogu biti pogodni za hranu sa niskim sadržajem vlage. Premazi na bazi polisaharida selektivno dozvoljavaju prenos gasova, posebno kiseonika i ugljen dioksida. Obzirom da ne sprečavaju u potpunosti prenos gasova, već ga minimiziraju, aerobna respiracija se nastavlja veoma malom brzinom, dok istovremeno može doći do aktivacije anaerobnih metaboličkih procesa u plodu. Ovo smanjenje brzine respiracije proizvoda odlaže nepovoljne procese u plodu i povećava rok trajanja. Ako aerobna respiracija potpuno prestane, voće i povrće nastavlja samo anaerobne procese i dolazi do nakupljanja proizvoda metaboličkih procesa. Akumulacija ovih jedinjenja utiče na kvalitet voća i povrća i dovodi do neželjenih promena (Yadav i sar. 2024).

HITOZAN – Hitozan je prirodni polisaharid koji nastaje deacetilacijom hitina i predstavlja jedan od najzastupljenijih biopolimera u prirodi, pri čemu se najčešće dobija iz oklopa rakova i drugih organizama (Muñoz-Tebar i sar. 2023). Netoksičan je, biorazgradiv i biokompatibilan (Oduro 2021). Jedna od njegovih najvažnijih karakteristika je izražena antimikrobna aktivnost protiv bakterija i gljivica, što ga čini posebno pogodnim za produženje roka trajanja svežeg voća i povrća (Muñoz-Tebar i sar. 2023). Mehanizam delovanja zasniva se na interakciji pozitivno naelektrisanih amino grupa hitozana sa negativno naelektrisanim komponentama ćelijskih membrana mikroorganizama, što dovodi do narušavanja njihove strukture i inhibicije rasta (Wu i sar. 2024). Pored antimikrobnog dejstva, hitozan poseduje i antioksidativna svojstva, zahvaljujući sposobnosti vezivanja slobodnih radikala i usporavanja oksidativnih procesa, čime doprinosi očuvanju kvaliteta proizvoda tokom skladištenja (Muñoz-Tebar i sar. 2023). Formira tanke, providne i fleksibilne filmove sa dobrim mehaničkim svojstvima i sposobnošću regulacije razmene gasova, što dodatno utiče na usporavanje respiracije i gubitka vlage kod plodova (Alvares i sar. 2013, Muñoz-Tebar i sar. 2023, Zhang i sar. 2024). Antimikrobna aktivnost hitozanskih premaza i filmova može se dodatno poboljšati uključivanjem drugih prirodnih antimikrobnih sredstava, kao što su etarska ulja ili ekstrakti (Aayush i sar. 2022). Jestivi premazi od hitozana su cenjeni zbog svojih konzervirajućih efekata. Pokazano je da inhibira koliformne bakterije, kvasac, plesni i psihotropne bakterije na sveže sečenom brokoliju skladištenom na nižim temperaturama (Moreira i sar. 2011). Dodatkom bioaktivnih jedinjenja iz čajevca, ruzmarina, polena i propolisa poboljšava se antimikrobna aktivnost hitozana protiv *E. coli* i *L. monocytogenes* primenjenih na sveže sečen brokoli (Alvares i sar. 2013).

SKROB – Skrob je jedan od najznačajnijih prirodnih polisaharida koji se široko koristi za izradu jestivih filmova i premaza zbog svoje dostupnosti, niske cene, biodegradabilnosti i netoksičnosti (Dai i sar. 2024, Oduro 2021, Santhosh i sar. 2024). Dobija se iz različitih biljnih izvora, kao što su kukuruz, krompir i pšenica, i sastoji se od amiloze i amilopektina, koji određuju njegova funkcionalna svojstva u formiranju filmova (Aayush i sar. 2022, Oduro 2021, Santhosh i sar. 2024). Od skroba se dobijaju premazi koji su bistri, bezbojni i bez ukusa (Aayush i sar. 2022). Ovi premazi efikasno deluju kao barijera koja reguliše razmenu gasova i smanjuje gubitak vlage, čime doprinose očuvanju kvaliteta svežeg voća i povrća tokom skladištenja (Dai i sar. 2024). Međutim, skrob kao samostalan materijal ima određena ograničenja, pre svega izraženu hidrofilnost, što dovodi do slabije otpornosti na vodenu paru i lošijih mehaničkih svojstava u poređenju sa sintetičkim materijalima (Dai i sar. 2024, Santhosh i sar. 2024). Zbog toga se u praksi često kombinuje sa drugim biopolimerima, lipidima ili aktivnim komponentama kako bi se poboljšala

njegova funkcionalnost i stabilnost (Santhosh i sar. 2024). Savremeni pristupi uključuju modifikaciju skroba i inkorporiranje bioaktivnih jedinjenja, poput antioksidanasa i antimikrobnih supstanci, čime se dobijaju aktivni premazi koji dodatno doprinose očuvanju bezbednosti i kvaliteta hrane (Dai i sar. 2024, Santhosh i sar. 2024). Ovakvi sistemi omogućavaju kontrolisano oslobađanje funkcionalnih komponenti i unapređenje barijernih i mehaničkih svojstava premaza. Zbog svojih ekoloških i funkcionalnih karakteristika, skrob se smatra jednim od najperspektivnijih materijala za razvoj održivih jestivih premaza i predstavlja značajnu alternativu konvencionalnim ambalažnim materijalima u savremenoj prehrambenoj industriji (Dai i sar. 2024, Santhosh i sar. 2024).

ALGINAT – Alginat je prirodni anjonski polisaharid koji se dobija iz smeđih algi, pre svega rodova *Laminaria*, *Macrocystis* i *Ascophyllum*, i široko se koristi u prehrambenoj industriji zbog svoje biokompatibilnosti, netoksičnosti i sposobnosti formiranja gelova i filmova (Senturk Parreidt i sar. 2019, Sharma i Singh 2025). Predstavljaju nizove prirodnih nerazgranatih polisaharida sastavljenih od ostataka β -D-manuronske (M) i α -L-guluronske (G) kiseline povezane 1 $\rightarrow$ 4 glikozidnim vezama (slika 5.2). Alginatni lanci podeljeni su na blokove i to homopolimerne (MMMMM i GGGGG) i heteropolimerne (MGMGMG, MMGGMM, itd). Molekulska masa alginata, zavisno od izvora ekstrakcije i starosti alge, može da varira u granicama od 32 do 400 kDa, sa različitim odnosima M/G jedinica i lančanim strukturama (Donati i Paoletti 2009).



Slika 5.2 Hemijska struktura manuronske (M) i guluronske (G) kiseline povezane 1 $\rightarrow$ 4 glikozidnom vezom i jedan od mogućih struktura u lancu (Volić 2022)

Alginati poseduju sposobnost jonotropnog umrežavanja vodenih rastvora mehanizmom prema kome se karboksilne kiseline G-blokova vezuju za divalentne katjone ($\text{Cd}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+}$), formirajući na taj način 3D mrežu. Što je veći broj G-blokova, veći je afinitet alginata prema katjonima. Za formiranje stabilnih veza, potrebno je najmanje od 8 do 20 susednih G ostataka u lancu (Donati i Paoletti 2009).

Zahvaljujući sposobnosti formiranja tankih i polupropusnih filmova, alginatni premazi efikasno regulišu razmenu gasova i smanjuju gubitak vlage, čime doprinose očuvanju svežine i kvaliteta voća i povrća tokom skladištenja (Li i sar. 2024, Sharma i Singh 2025). Ovi premazi deluju kao fizička barijera koja usporava oksidativne procese i razvoj mikroorganizama, čime se značajno produžava rok trajanja proizvoda (Kalita i sar. 2025). Posebna prednost alginata je mogućnost jednostavnog geliranja u prisustvu kalcijumovih jona, što omogućava formiranje stabilnog zaštitnog sloja direktno na površini ploda, bez potrebe za složenim tehnološkim postupcima (Parreidt i sar. 2018). Reološka svojstva i funkcionalne karakteristike alginata kao nosača aktivnih supstanci zavise od njihove molekulske mase, koncentracije i odnosa guluronskih (G) i manuronskih (M) jedinica, pri čemu veći udeo G jedinica dovodi do formiranja rigidnije i krte matrice (Sosnik 2014). Čvrstina gela takođe zavisi od koncentracije kalcijuma, pri niskim koncentracijama gelovi se ponašaju kao viskozne tiksotropne tečnosti, dok veća koncentracija kalcijuma omogućava formiranje stabilnih i trajnih mreža. Osim toga, čvrstina gelova zavisi od vremena geliranja, jer je potrebno da kalcijum difunduje iz površinskog sloja ka unutrašnjosti matrice (Martins i sar. 2017). Koncentracija kalcijuma utiče i na poroznost, bubrenje i biodegradabilnost gela (Manojlović 2008). Zbog relativno slabih barijernih svojstava prema vodenoj pari i ograničene mehaničke otpornosti, alginat se često kombinuje sa drugim biopolimerima ili aktivnim komponentama kako bi se poboljšala njegova funkcionalnost (Giannakas i sar. 2023, Aziz i Salama 2022). Savremena istraživanja usmerena su na razvoj kompozitnih i aktivnih alginatnih premaza koji sadrže bioaktivne supstance, poput antimikrobnih agenasa ili nanočestica, čime se postiže dodatna zaštita i produženje roka trajanja proizvoda (Li i sar. 2024, Yu i sar. 2026). Zbog svojih funkcionalnih svojstava, ekološke prihvatljivosti i široke mogućnosti modifikacije, alginat se smatra jednim od najznačajnijih polisaharida za razvoj savremenih jestivih premaza i održivih sistema pakovanja hrane (Kalita i sar. 2025, Sharma i Singh 2025).

PULULAN – Pululan je egzopolisaharid koji se dobija iz gljivica *Aureobasidium pullulans*. Rastvorljiv je u vodi i netoksičan. Zbog svojih superiornih svojstava stvaranja filma i lepljenja ima veliki potencijal u proizvodnji jestivih premaza (Kizildag 2023, Al-Hassan i sar. 2012). Jestivi premazi od pululana u kombinaciji sa hitooligosaharidom koji ima antibakterijska svojstva i glutationom koji je takođe moćno redukciono sredstvo čine ih efikasnim u produžavanju roka trajanja raznih prehrambenih proizvoda (Oduro 2021).

5.2.2.2 *Jestivi premazi na bazi proteina*

Proteini, sastavljeni od biopolimernih lanaca aminokiselina, igraju vitalnu ulogu u biološkim sistemima, služeći kao strukturne komponente, hormoni, enzimi, gradivni elementi, biohemijski katalizatori (Jeevanandam i sar. 2019). Klasifikuju se u dva glavna tipa: globularni i fibrilarni proteini (Hassan i sar. 2018). Globularni proteini su rastvorljivi u vodi i obavljaju različite biološke funkcije zbog svojih kompaktnih, sfernih struktura stabilizovanih različitim vezama. U ovu grupu spadaju proteini biljnog porekla kao što su pšenični gluten, sojin protein, protein kikirikija, kukuruzni zein, protein semena pamuka. Nasuprot tome, fibrilarni proteini su nerastvorljivi u vodi, formirajući jaka strukturna vlakna u životinjskim tkivima putem vodoničnih veza. U ovu grupu spadaju kazein, surutka, kolagen, želatin i keratin (Aayush i sar. 2022, Pranoto i sar. 2005, Yadav i sar. 2024, Yousuf i Quadri 2020). Svojstva proteina zavise od sastava aminokiselina i rasporeda duž polimernog lanca (Pranoto i sar. 2005). Funkcionalna svojstva jestivih premaza na bazi proteina u velikoj meri zavise od specifične proteinske matrice koja se koristi. Međutim, hidrofilna priroda većine proteina čini ove premaze manje efikasnim u sprečavanju prenosa vlage u poređenju sa drugim materijalima (Purewal i sar. 2024, Yadav i sar. 2024). Usled prisustva visoko uređenih i jakih intermolekularnih veza molekuli proteina su kompaktno raspoređeni (Purewal i sar. 2024). Jestivi premazi na bazi proteina obično pokazuju manju mehaničku čvrstoću u poređenju sa sintetičkim materijalima, što ih čini podložnijim fizičkim oštećenjima (Milani i sar. 2020, Ananey-Obiri i sar. 2018). Ograničenja jestivih premaza na bazi proteina, posebno njihova manja mehanička čvrstoća i osetljivost na fizička oštećenja, prevazilaze se kombinacijom strukturnih modifikacija, dodataka i tehnoloških tretmana, koji unapređuju njihova funkcionalna svojstva. Jedan od najvažnijih pristupa je umrežavanje proteinskih molekula, kojim se formiraju jače intermolekulske veze i kompaktnija mreža, što dovodi do povećanja zatezne čvrstoće i otpornosti premaza (Zhang i sar. 2023). Ovaj proces se može ostvariti hemijski, enzimski (npr. transglutaminazom) ili fizički (toplotom, UV zračenjem), pri čemu se smanjuje pokretljivost lanaca i povećava stabilnost materijala. Drugi čest pristup je formiranje kompozitnih premaza, gde se proteini kombinuju sa polisaharidima (npr. skrob, alginat, hitozan) ili lipidima, čime se postiže sinergijski efekat i poboljšavaju mehanička i barijerna svojstva (Shah i sar. 2023). Fleksibilnost premaza se može povećati dodatkom plastifikatora poput glicerola ili sorbitola. Pored toga, uključivanje bioaktivnih komponenti, nanočestica ili biljnih ekstrakata može dodatno ojačati strukturu i unaprediti ukupne performanse premaza (Günel-Köroğlu i Capanoglu 2024). Jestivi premazi na bazi proteina služe kao

odlične barijere za kiseonik, ugljen-dioksid i lipide, čime se poboljšava očuvanje prehrambenih proizvoda. Molekuli proteina poseduju jaku sposobnost da kapsuliraju i nose aktivne sastojke. Kao rezultat toga, jestivi premazi na bazi proteina mogu efikasno da nose antimikrobna i antioksidativna jedinjenja, koja igraju ključnu ulogu u produženju roka trajanja hrane (Milani i sar. 2020, Yadav i sar. 2024). Protein se nanosi u obliku rastvora ili disperzije i nakon nanošenja, rastvarač ili nosač isparava, ostavljajući sloj proteina preko voća (Aayush i sar. 2022).

KUKURUZNI ZEIN Kukuruz je glavni izvor zeina, prolaminskog (rezervnog) proteina i hidrofobne je prirode (Oduro 2021). Zbog termičke stabilnosti i sposobnosti formiranja gasne barijere, koristi se u pakovanju hrane. Jestivi filmovi i premazi na bazi kukuruznog zeina daju providan žućkast, sjajan i elastičan izgled voća i povrća i pokazuju izuzetna konzervišuća svojstva u pakovanju hrane (Barkhordari i sar. 2021, Cui i sar. 2020). Odlikuju se boljim barijernim svojstvima prema vlazi u poređenju sa drugim vrstama filmova (Oduro 2021). Pokazano je da jestivi premazi na bazi zeina poboljšavaju očuvanje kvaliteta svežeg voća tokom skladištenja. Kod sveže sečene papaje primena zein premaza u kombinaciji sa askorbinskom kiselinom dovela je do manjeg gubitka mase, zadržavanja čvrstoće i boje ploda, usporene promene senzornih osobina i inhibicije rasta mikroorganizama tokom skladištenja (Beulah i Sucharitha 2025).

ŽELATIN – Želatin je prirodni biopolimer dobijen delimičnom hidrolizom kolagena iz životinjskih tkiva, najčešće kože i kostiju. Zbog svoje sposobnosti da formira filmove, kao i zbog biodegradabilnosti i netoksičnosti, široko se primenjuje u izradi jestivih premaza i filmova u prehrambenoj industriji (Lu i sar. 2022, Ramos i sar. 2016). Premazi na bazi želatina odlikuju se dobrom transparentnošću, fleksibilnošću i odličnim barijernim svojstvima prema kiseoniku, što ih čini pogodnim za usporavanje oksidativnih procesa i produženje roka trajanja hrane (Ramos i sar. 2016). Međutim, osnovni nedostaci ovih filmova su visoka hidrofilnost i slaba otpornost na vlagu, što dovodi do ograničene mehaničke stabilnosti i veće propustljivosti za vodenu paru (Lu i sar. 2022). U cilju poboljšanja funkcionalnih svojstava želatinskih filmova, često se primenjuju različite modifikacije, kao što su kombinovanje sa drugim biopolimerima ili dodavanje aktivnih supstanci (antimikrobnih i antioksidativnih agenasa). Ovakvi kompozitni sistemi mogu značajno poboljšati mehaničku čvrstoću, smanjiti propustljivost za vodenu paru i unaprediti zaštitna svojstva premaza (Lu i sar. 2022, Liu i sar. 2022).

5.2.2.3 Jestivi premazi na bazi lipida

Lipidi se definišu kao molekuli koji su nerastvorljivi u polarnim rastvaračima, kao što je voda, ali su rastvorljivi u organskim rastvaračima (Ye i sar. 2021). Oni su kategorisani na osnovu fizičkog stanja, polariteta, biološke funkcije ili strukturne složenosti. Jednostavni lipidi se sastoje od alkohola i masnih kiselina. Složeni lipidi, kao što su fosfolipidi, glikolipidi i sfingolipidi, poseduju složenije strukture i hidrolizom daju izvedene lipide poput sterola i slobodnih masnih kiselina (Akoh 2017, Gropper i sar. 2013).

Lipidi se, kao jestivi premazi za hranu, koriste već dugo vremena. Voskiranje voća i premazivanje slatkiša materijalima na bazi lipida su samo neki primeri primene lipida koji se koriste kao premazi za hranu (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020). U formulacijama jestivih premaza koriste se prirodne masti i ulja, mono-, di- i trigliceridi, etarska ulja, smole, emulgatori i površinski aktivne supstance (Milani i sar. 2022, Yadav i sar. 2024). Najčešće korišćeni lipidi za premazivanje su voskovi, acilgliceroli ili masne kiseline. Karnauba vosak i pčelinji vosak su prirodni voskovi koji se često koriste za formulisanje premaza za sveže sečeno voće i povrće. Ostali lipidi koji se koriste u formulaciji premaza za sveže sečeno voće i povrće su suncokretovo ulje, ulje semena šipka, etarska ulja (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020). Ovi materijali na bazi lipida poseduju odlična barijerna svojstva za vlagu, hidrofobnost i poboljšanu mehaničku čvrstoću, što doprinosi poboljšanom kvalitetu hrane i produženom roku trajanja (Wu i sar. 2024, Devi i sar. 2024, Yadav i sar. 2024). Jestivi premazi na bazi lipida funkcionišu tako što formiraju hidrofobnu barijeru između hrane i spoljašnje sredine, čime ograničavaju gubitak vlage i razmenu gasova (Aayush i sar. 2022, Shevkani 2024, Yousuf i Quadri 2020). Ovakvo barijerno dejstvo efikasno smanjuje rast mikroorganizama, enzimsko potamnjenje i oksidaciju lipida, produžavajući na taj način rok upotrebe prehrambenih proizvoda (Shevkani 2024). Premazivanje premazima na bazi lipida takođe smanjuje brzinu respiracije voća i povrća i poboljšava izgled dodavanjem sjaja površini (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020). Lipidi se mogu koristiti i kao nosači za hidrofobne bioaktivne agense koji treba da se ugrade u premaze ili filmove (Aayush i sar. 2022, Yousuf i Quadri 2020).

Međutim, premazi na bazi lipida imaju određene nedostatke, uključujući podložnost užglosti usled oksidacije lipida i neželjene boje, što može uticati na prihvatanje od strane potrošača (Tripathi i sar. 2021, Yadav i sar. 2024). Problem sa lipidnim premazima je i što formiraju debeli sloj preko površine, neprozirni su, poseduju manju fleksibilnost i zbog hidrofobne prirode postoji mogućnost da uslove lepljenje na presečenim površinama sveže sečenog voća i povrća. Ovi faktori ograničavaju

upotrebu premaza na bazi lipida kod sveže sečenog voća i povrća (Aayush i sar. 2022, Yadav i sar. 2024, Yousuf i Quadri 2020). Da bi se prevazišla ova ograničenja u lipidnu matricu se često ugrađuju funkcionalni aditivi, kao što su antioksidansi, antimikrobna sredstva ili prirodni pigmenti (Tripathi i sar. 2021).

5.2.2.4 Jestivi premazi na bazi agroindustrijskog otpada

Jestivi premazi na bazi agroindustrijskog otpada dobijaju se od ostataka koje proizvodi poljoprivredna industrija (Yadav i sar. 2024). Ovi otpadni materijali sadrže razne hranljive supstance, bioaktivna jedinjenja i materijale sa dobrim sposobnostima formiranja premaza (Carnaval i sar. 2024, Yadav i sar. 2024). Upotreba agroindustrijskog otpada kao sirovine za izolovanje bioproizvoda koji se dalje koriste za proizvodnju premaza i filmova predstavlja pristup usklađen sa principima cirkularne ekonomije (Klai i sar. 2021). Različiti ostaci hrane, kao što su pokožice, kore, semenke, komine, ljuske, slama, mogu se koristiti za proizvodnju biorazgradivih filmova i premaza za konzervisanje voća i povrća. Ovi biljni ostaci su bogati proteinima i polisaharidima koji služe kao primarni materijali za izradu jestivih premaza i filmova. Sadrže i bioaktivna jedinjenja, kao što su fenoli, koja nude antioksidativna, antiinflamatorna i druga korisna svojstva. Međutim, zbog varijabilnosti u sastavu agroindustrijskog otpada, prilikom njegove primene u ambalaži za hranu potrebno je izvršiti detaljnu analizu njihovog sastava, bezbednosti i higijene (Yadav i sar. 2024).

5.2.2.5 Kompozitni jestivi premazi

Prilikom prvih primena jestivih premaza u prehrambenoj industriji korišćena je samo jedna polimerna matrica, ali ovakvi premazi često nisu bili dovoljno efikasni u pružanju zaštite od kontaminanata, faktora okoline i produžetku roka trajanja (Nunes i sar. 2023). Kako bi se rešili ovi nedostaci, kombinacija različitih polimernih matrica pojavila se kao obećavajući pristup unapređenju tehnologije jestivih premaza. Jestivi premazi na bazi kompozita formulišu se integracijom dve ili više polimernih komponenti, pri čemu se radi poboljšanja performansi uzimaju u obzir njihovi sinergijski efekti. Kompozitni premazi mogu koristiti polimere iz iste kategorije ili različitih tipova, kao što su bi- ili tripolimerni sistemi. Nedavne studije su istraživale upotrebu i homogenih i heterogenih polimernih matrica u formulaciji jestivih premaza na bazi kompozitnih materijala (Kumar i sar. 2022, Yadav i sar. 2024). Nanošenje heterogenih premaza na sveže sečeno voće i

povrće može se izvršiti ili nanošenjem smeše za premazivanje (emulzija, suspenzija, disperzija ili rastvor) ili premazivanjem različitih slojeva sukcesivno. Višeslojni premazi pokazuju poboljšana barijerna svojstva zahvaljujući formiranju ujednačenih slojeva duž cele površine voća (Yousuf i Quadri 2020).

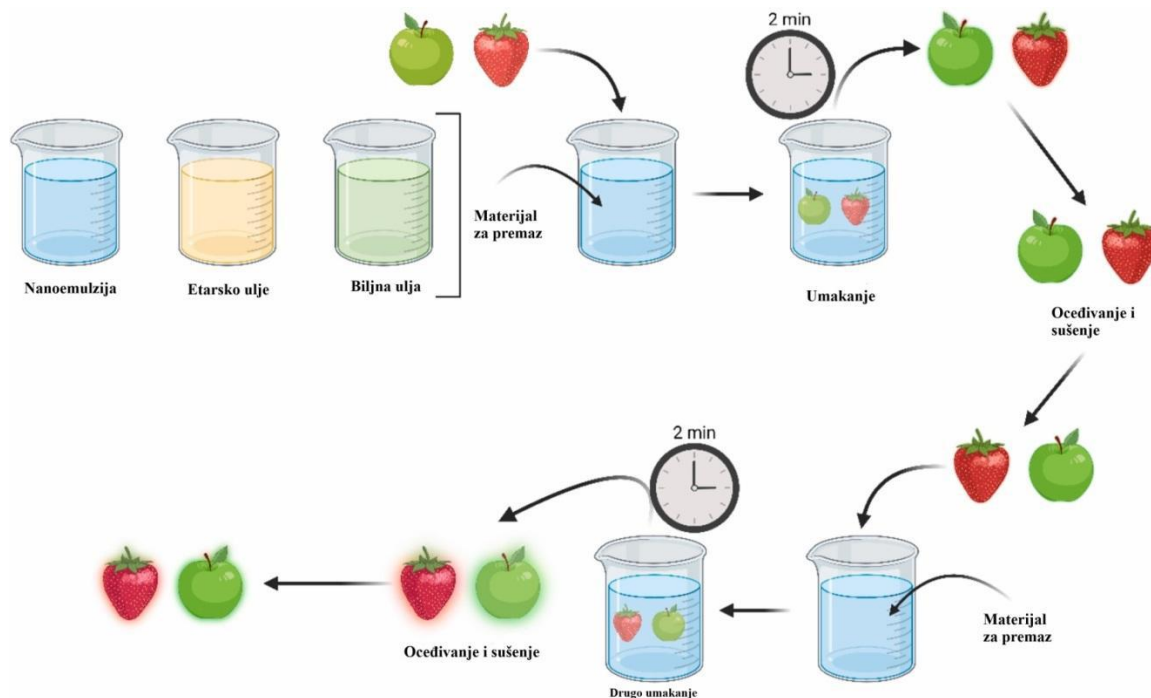
5.2.3 Metode nanošenja jestivih premaza

Metoda nanošenja ima ključnu ulogu u efikasnosti jestivih premaza, jer direktno utiče na ujednačenost, integritet i prijanjanje premaza, a samim tim i na očuvanje kvaliteta i produženje roka trajanja prehrambenih proizvoda. Izbor metode nanošenja premaza zavisi od više faktora, uključujući morfologiju prehrambenog proizvoda (veličinu, oblik i teksturu površine), željenu debljinu premaza, kao i fizičko-hemijske karakteristike formulacije za premazivanje, poput viskoznosti, gustine i površinskog napona (Aljabary i sar. 2025, Iñiguez-Moreno 2026, Shiekh i sar. 2021). Premazi se najčešće nanose na površine prehrambenih namirnica umakanjem (potapanjem), raspršivanjem (prskanjem), elektroraspršivanjem, premazivanjem, primenom različite opreme i uslova (Aayush i sar. 2022, Shiekh i sar. 2021). Neke od ovih metoda se uglavnom koriste u malim razmerama i u laboratorijskim uslovima, dok su druge pogodnije za komercijalnu proizvodnju velikih razmera (Bremenkamp i Gallagher 2025).

5.2.3.1 Potapanje (umakanje)

Potapanje (umakanje) je popularna metoda nanošenja premaza na prehrambene proizvode zbog svoje jednostavnosti i efikasnosti pokrivanja (Miteluţ i sar. 2021). Voće ili povrće se potapa u materijal za premazivanje (u obliku rastvora, suspenzije ili disperzije) u trajanju od 30 sekundi do 5 minuta, ocedi i ostavi da se osuši, što ovaj metod čini idealnim za proizvode nepravilnog oblika i neravnih površina poput voća i povrća (Iñiguez-Moreno 2026, Pellegrino i sar. 2024, Perez-Vazquez i sar. 2023, Senturk Parreidt i sar. 2019). Sušenje se izvodi na sobnoj temperaturi (sušenje na vazduhu) ili primenom specijalizovanih uređaja za sušenje (Aayush i sar. 2022, Senturk Parreidt i sar. 2019). Deblji i trajniji premazi se mogu postići dvostrukim potapanjem sa delimičnim sušenjem između dva potapanja (slika 5.3) (Liyanapathirana i sar. 2023). Debljina premaza zavisi od vremena potapanja, brzine izvlačenja, broja ciklusa potapanja, gustine, viskoziteta, površinskog napona i uslova sušenja (Cisneros-Zevallos i Krochta 2003, Rahman i sar. 2020, Tang i Yan 2017).

Za potapanje poroznih ili neravnih površina primenjuje se vakuum koji olakšava prodiranje premaza pod pritiskom kako bi se poboljšalo prijanjanje na površinu proizvoda (Atanasova i sar. 2023). Umakanje se može izvršiti i elektrostatički, čime se smanjuje otpad i obezbeđuje konzistentnost privlačenjem materijala za premaz na površinu proizvoda (Wang i sar. 2023).

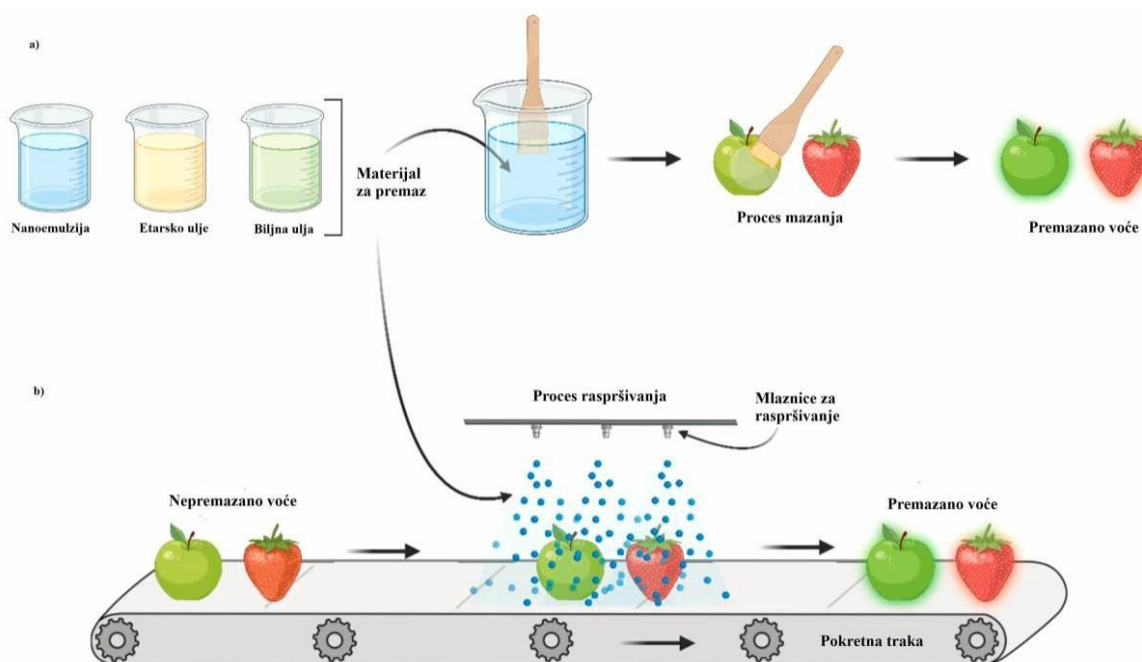


Slika 5.3 Postupak dvostrukog umakanja voća sa delimičnim sušenjem između dva umakanja (Aljabary i sar. 2025)

5.2.3.2 Premazivanje

Nanošenje premaza premazivanjem je tradicionalna i jednostavna metoda za nanošenje jestivih premaza koja ima najveću primenu u malim ili „zanatskim“ uslovima. Tehnikom premazivanja se rastvor za premaz ručno ili mehanički nanosi na površinu voća ili povrća četkom, omogućavajući preciznu kontrolu nad nanošenjem i ravnomernu raspodelu premaza (slika 5.4a) (Dhall 2013, Patil i sar. 2023). Ova metoda spada u grupu kontaktnih tehnika nanošenja, gde je kvalitet premaza u velikoj meri uslovljen interakcijom između rastvora i površine hrane (Galus i sar. 2020, Matloob i sar. 2023). Rastvor premaza se prvo priprema do željenog viskoziteta, nakon čega se uzima odgovarajuća količina rastvora, nanosi na površinu proizvoda četkom, ravnomerno raspoređuje mehaničkim pokretima i na kraju ostavlja da se osuši i formira kontinuirani zaštitni sloj. Za razliku od metoda kao što su potapanje ili prskanje, gde se sloj formira spontano, kod nanošenja

četkom operater aktivno kontroliše raspodelu premaza, što može biti prednost kod specifičnih proizvoda ili lokalne aplikacije (Suhag i sar. 2020). Debljina i izgled premaza zavise od viskoziteta, gustine premaza i vremena sušenja premaza (Cisneros-Zevallos i sar. 2003). Ova metoda je pogodna za veće proizvode sa glatkim površinama, kao što su jabuke ili kruške (Fallik i sar. 2021). Premazivanje je moguće izvršiti korišćenjem različitih vrsta četkica ili materijala. Za osetljivo voće se koriste meke četke čime se minimiziraju mehanička oštećenja tokom nanošenja (Dhillon i sar. 2024). Nanošenje premaza ovom tehnikom omogućava ciljano nanošenje, što ga čini korisnim za nanošenje dekorativnih premaza ili fokusiranje na područja sklona gubitku vlage ili mikrobnjoj kontaminaciji (Dhingra i sar. 2022, Galus i sar. 2020, Matloob i sar. 2023). Nanošenje premazivanjem je dugotrajan postupak pa je skalabilnost na industrijske uslove ograničena (Aljabary i sar. 2025).



Slika 5.4 Nanošenje premaza metodom a) premazivanja i b) raspršivanja pomoću sistema mlaznica (Aljabary i sar. 2025)

5.2.3.3 *aspršivanje*

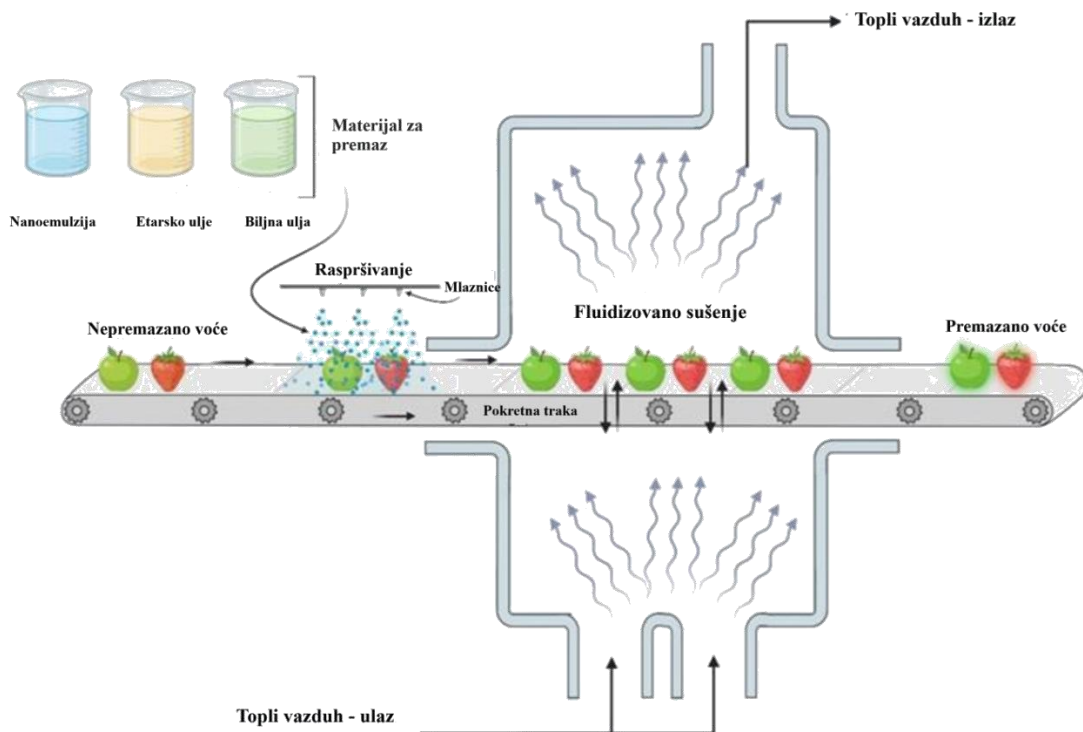
Raspršivanje je još jedna često korišćena tehnika za nanošenje jestivih premaza na voće i povrće (Andriani i sar. 2023, Darmawati sar. 2019). Nanošenjem jestivih premaza raspršivanjem smanjuje se neravnomerno pokrivanje i nakupljanje viška materijala, a metoda je jednostavna i

skalabilna pa se često primenjuje u industrijskim uslovima (slika 5.4b) (Aljabary i sar. 2025). Ovom metodom rastvor za premaz se raspršuje u obliku sitnih kapljica (prečnika oko 20 μm) na površinu proizvoda, omogućavajući na taj način kontrolisano nanošenje uz minimalan gubitak materijala (Andriani i sar. 2023, Iñiguez-Moreno 2026). Za istu količinu tečnog rastvora, kapljice imaju veću kontaktnu površinu, pa se na taj način pokriva veća površina proizvoda (Suhag i sar. 2020). Raspršivanjem je moguće formirati jedan ili više slojeva premaza oko voća ili povrća. Kako bi se dobili premazi željene debljine i karakteristika neophodno je optimizovati tip mlaznice, protok rastvora, pritisak i udaljenost prskalice (Aayush i sar. 2022, Andrade i sar. 2012, Darmawati i sar. 2019). Osnovne tehnike raspršivanja zasnivaju se na korišćenju jednostavnih mlaznica za ravnomernu raspodelu premaza, što ih čini pogodnim za proizvode sa glatkim površinama poput jabuka i paradajza (Raghav i sar. 2016). Na osnovu formiranja kapljica, ova metoda se može podeliti na raspršivanje vazdušnim raspršivanjem i raspršivanje pod pritiskom. Kod raspršivanja vazdušnim raspršivanjem, vazduh velike brzine se koristi za pretvaranje tečnosti u kapljice, a kod raspršivanja pod pritiskom, visok pritisak se koristi za pretvaranje tečnosti u kapljice (Suhag i sar. 2020). Upotrebom kontrolisanog pritiska omogućava se podešavanje intenziteta raspršivanja i veličine kapljica i na taj način optimizuje proces za različite vrste premaza i proizvoda (Li i sar. 2022). Za precizniju primenu, koristi se kombinovanje rastvora za premaz sa komprimovanim vazduhom, čime se dobija finija disperzija i poboljšano pokrivanje, posebno za plodove nepravilnog oblika (Aljabary i sar. 2025). Elektrostatičko raspršivanje, koristi električno naelektrisanje za privlačenje čestica premaza na površinu proizvoda, obezbeđujući ravnomerno nanošenje i smanjujući gubitke, što ovu tehniku čini idealnom u slučaju premaza sa visokom cenom koštanja (Mehta i sar. 2023). Za velika industrijska postrojenja koja se odlikuju velikim kapacitetom proizvodnje koriste se automatizovani transportni sistemi sa višestrukim mlaznicama koji omogućavaju ravnomerno raspršivanje (Kwon i sar. 2022). Nedostatak metode je što se za raspršivanje ne mogu primeniti vrlo viskozni biopolimeri (Suhag i sar. 2020).

5.2.3.4 nanošenje premaza u fluidizovanom sloju

Tokom poslednjih nekoliko decenija razvijene su tehnike primene premaza u fluidizovanom sloju za potrebe farmaceutske, hemijske i prehrambene industrije (Aayush i sar. 2022). Ova tehnika potiče iz 1950-ih godina (Dawange i sar. 2018) i zasniva se na suspendovanju čvrstih čestica u struji vazduha ili gasa, što omogućava nanošenje tankog i ravnomernog sloja premaza na male i suve

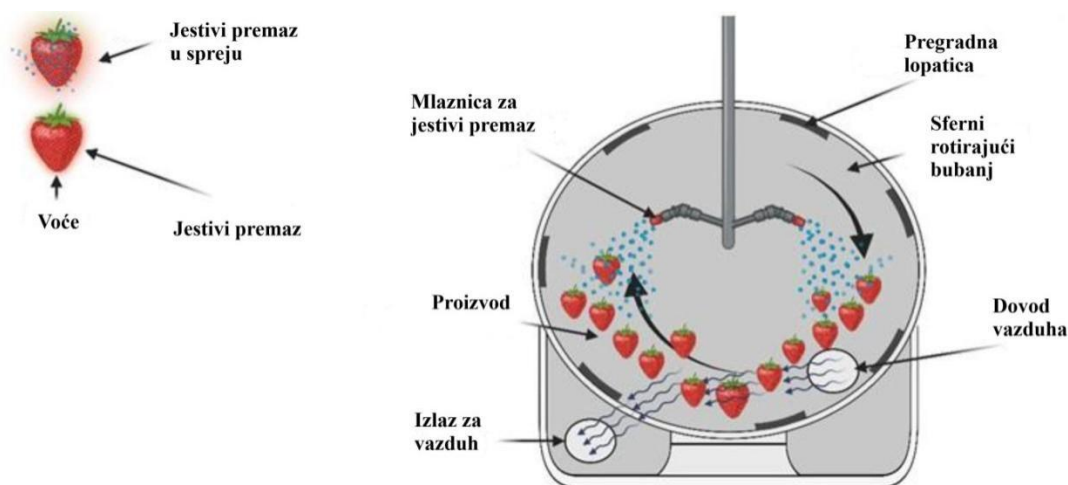
proizvode. Prvobitno je primenjivana u farmaceutskoj industriji za premazivanje osušenih čestica lekova (Aayush i sar. 2022), dok je u prehrambenoj industriji njeno usvajanje bilo sporije zbog relativno visokih troškova. Premazivanje fluidizovanim slojem je jedna od potencijalnih metoda enkapsulacije u kojoj se čestični čvrsti materijal zarobljava prskanjem rastvora za premaz direktno u fluidizovane čestice (Duangkhamchan i sar. 2018). Ova metoda pomaže u nanošenju tankog sloja premaza na površinu suvog prehrambenog proizvoda male veličine kao što su pšenica ili orasi. Rastvor za premaz se prska pomoću mlaznica, formira ljusku na prehrambenom proizvodu, koja se polako pretvara u premaz, a nakon toga se vrši sušenje (slika 5.5). Metoda je skuplja od drugih metoda premazivanja (Chawla i sar. 2021). Ovaj postupak zahteva veću zapreminu rastvora za premazivanje u poređenju sa drugim tehnikama (Dewettinck i sar. 1998). Nanošenjem premaza u fluidizovanom sloju smanjuje se mogućnost aglomeracije premaza i omogućava smanjena brzina oslobađanja aktivnih jedinjenja (Lipin i Lipin 2021). Za prehrambenu industriju najpogodniji je sistem fluidizovanja pomoću vertikalnog strujanja vazduha kroz raspodelnu ploču na vrhu ili dnu uređaja (Lipin 2022, Wu i sar. 2024). Nedostaci metode se ogledaju u gubitku rastvora zbog zadržavanja na bočnim zidovima uređaja i prevremenog isparavanja (Duangkhamchan i sar. 2018).



Slika 5.5 Nanošenje jestivog premaza u fluidizovanom sloju, gde se voće i povrće prska materijalom za premaz i suši vrućim vazduhom kako bi se postigao ravnomerni sloj (Aljabary i sar. 2025)

5.2.3.5 Nanošenje premaza u rotirajućem bubnju

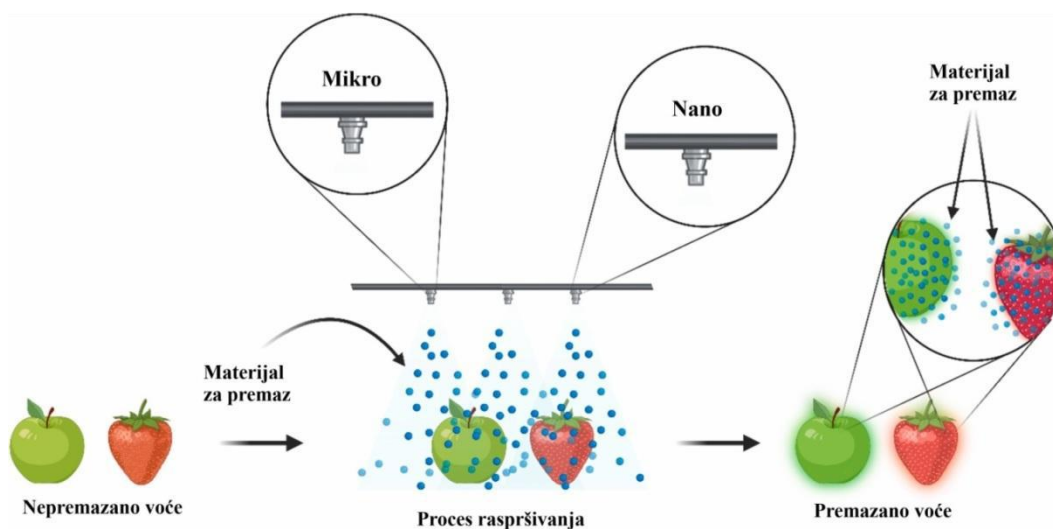
Nanošenje premaza u rotirajućem bubnju predstavlja jednu od industrijski značajnih metoda, posebno kada se radi o plodovima manjeg prečnika ili proizvodima koji mogu podneti blago mehaničko mešanje (Suhag i sar. 2020, Matloob i sar. 2023). Ovaj način nanošenja premaza se obično koristi za sferne ili ovalne prehrambene i konditorske proizvode (Aljabary i sar. 2025). Metoda podrazumeva stavljanje proizvoda koji se tretira u bubanj, a zatim se pomoću mnoštva mlaznica dodaje rastvor za premaz i bubanj se okreće (slika 5.6) (Aayush i sar. 2022, Aljabary i sar. 2025, Suhag i sar. 2020). Tokom rotacije, čestice se kreću u tzv. kaskadnom režimu, gde gravitacija uzrokuje njihovo padanje i ponovno izlaganje spreju, čime se postiže relativno ujednačeno nanošenje (Aminahmadi i sar. 2025). Ovakvim načinom nanošenja omogućava se da rastvor za premaz formira tanak, ravnomerni film na površini prehrambenog proizvoda (Aayush i sar. 2022, Aljabary i sar. 2025, Suhag i sar. 2020). Brzina rotacije bubnja utiče na raspodelu supstance za oblaganje proizvoda. Nakon nanošenja premaza, obloženi proizvodi prolaze kroz ciklus sušenja, tokom kojeg se cirkulacijom ambijentalnog ili toplog vazduha olakšava sušenje i formiranje suvog sloja premaza. Proces sušenja je neophodan kako bi se dobio stabilni i ujednačeni premaz na prehrambenim proizvodima (Aayush i sar. 2022, Aljabary i sar. 2025). U savremenoj praksi koriste se cilindrični bubnjevi, konusni ili bikonusni bubnjevi, kao i perforirani bubnjevi (sa integrisanim sušenjem vazduhom). Konstrukcija bubnja, kao i prisustvo unutrašnjih pregrada utiču na efikasnost mešanja, vreme zadržavanja i uniformnost premaza (Aminahmadi i sar. 2025).



Slika 5.6 Nanošenje jestivog premaza u rotirajućem bubnju sa cirkulacijom vazduha (Aljabary i sar. 2025)

5.2.3.6 lektoraspršivanje

Elektroaspršivanje je napredna tehnika premazivanja koja koristi električno polje za atomizaciju rastvora premaza u nano ili mikro kapljice veličine manje od 1 μm (slika 5.7) (Cakmak i sar. 2019, Dhiman i sar. 2022, Khan i sar. 2014a). Kod elektroaspršivanja, rastvor premaza prolazi kroz kapilaru na koju se primenjuje visok napon (obično 1–30 kV). Pod uticajem električnog polja dolazi do deformacije kapljice na vrhu mlaznice, raspada mlaza u mikro- ili nano-kapljice a zatim kretanja naelektrisanih kapljica ka površini hrane. Ove kapljice se međusobno odbijaju zbog istog naelektrisanja čime se sprečava njihovo spajanje i omogućava formiranje vrlo finog i homogenog sloja premaza (Alehosseini i sar. 2018, Khan i sar. 2014a). Veličina kapljica, brzina taloženja i debljina premaza tokom procesa elektroaspršivanja zavise od brzine protoka, provodljivosti i viskoziteta rastvora koji se koristi za premaz (Peretto i sar. 2017). Ovom metodom se zbog elektrostatičkih interakcija naelektrisanih kapljica postiže ujednačeno nanošenje premaza sa kontrolisanom debljinom, što je čini veoma efikasnom za formulacije na bazi nanoemulzija (Dhiman i sar. 2022, Mahalakshmi i sar. 2020). Elektroaspršivanje se koristi za nanošenje lipidnih i emulzionih premaza na voće (npr. jabuke), smanjenje oksidacije i enzimskog potamnjenja, kontrolu gubitka vlage i gasne razmene (Khan i sar. 2014b). Ovako dobijeni premazi su posebno pogodni za ugradnju bioaktivnih jedinjenja, jer fine kapljice obezbeđuju ravnomernu raspodelu, poboljšavajući funkcionalna svojstva poput antimikrobne i antioksidativne aktivnosti (Aljabary i sar. 2025, Munteanu i sar. 2021).



Slika 5.7 Nanošenje premaza metodom elektroaspršivanja (Aljabary i sar. 2025)

5.2.5 Aktivna pakovanja

Pakovanje hrane ima za cilj očuvanje njenog kvaliteta i bezbednosti od trenutka proizvodnje do upotrebe od strane potrošača. Materijal za pakovanje treba da bude bezbedan za ljudsko zdravlje, da održava kvalitet hrane tokom skladištenja i da pruža fizičku, hemijsku i biološku zaštitu od uticaja spoljašnje sredine, uključujući vazduh, vlagu, mikroorganizme, insekte i mehanička oštećenja, uz mogućnost kasnijeg recikliranja (Conte i sar. 2013, Ruban 2009, Stoleru i Brebu 2021). Danas se za proizvodnju ambalaže najčešće koriste papir, plastika, staklo i metal. Konvencionalne plastike, kao što su polietilen tereftalat (PET), polivinil-hlorid (PVC), polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) i poliamid (PA), dobijaju se iz nafte. Iako ove plastike imaju dobre mehaničke i fizičke osobine, one su nerazgradive i predstavljaju značajan problem u upravljanju otpadom (Agriopoulou i sar. 2020).

Rastuća potražnja za minimalno prerađenom hranom, globalizacija, moderna logistika i stroži zdravstveni propisi doveli su do razvoja aktivnog pakovanja koje predstavlja inovativnu tehnologiju gde proizvod i ambalaža sinergijski deluju kako bi poboljšali bezbednost hrane, senzorna svojstva i rok trajanja hrane (Rodriguez i sar. 2024, Suppakul i sar. 2003). Da bi se poboljšale performanse materijala za pakovanje voća i povrća, produžio njihov rok trajanja i očuvala bezbednost i senzorna svojstva, u jestive premaze često se dodaju bioaktivni agensi (Aayush i sar. 2022, Özdemir i Gökmen 2019, Saha i sar. 2017). Prema propisima Evropske unije (1935/2004/EC i 450/2009/EC), aktivno pakovanje je dizajnirano da sadrži komponente koje oslobađaju ili apsorbuju supstance u hranu ili iz hrane, ili iz okoline oko proizvoda. Kroz različite fizičke, hemijske ili biološke mehanizme delovanja, postižu se kontrolisane interakcije između pakovanja i hrane (Costa i sar. 2016, Yildirim i sar. 2018). Najčešće se kao aktivni sastojci dodaju antimikrobni agensi, sredstva za uklanjanje etilena i apsorberi ili emiteri ugljen-dioksida (Costa i sar. 2016). Ambalaža sa antimikrobnim agensima, organskim ili neorganskim jedinjenjima, enzimima, etarskim uljima ili biljnim ekstraktima, može uticati na mikrofloru ili atmosferu oko hrane, inhibirajući ili usporavajući rast mikroorganizama koji izazivaju kvarenje (Costa i sar. 2016, Yildirim i sar. 2018). Prirodni antimikrobni agensi iz začinskog i lekovitog bilja često se koriste u aktivnom pakovanju kao prirodni odbrambeni mehanizam protiv bakterijskih i gljivičnih infekcija (Han i sar. 2018). Među ovim supstancama nalaze se eugenol (iz karanfilića), timol i karvakrol (iz timijana i origana), vanilin (iz vanile), alicin (iz belog luka) i cinamaldehyd (iz cimeta) (Rajkovic i sar. 2010).

Usled čestih promena u potrošačkim navikama i zakonskim regulativama, broj antimikrobnih supstanci koje se mogu koristiti u aktivnom pakovanju hrane je veliki i često se menja. Postoji jasna tendencija zamene sintetičkih hemijskih sredstava prirodnim supstancama, kao i prelaska na biorazgradivu ambalažu (Stoleru i Brebu 2021). Prirodne supstance koje se primenjuju u aktivnim pakovanjima uključuju različite biopolimere, etarska ulja i njihova bioaktivna jedinjenja, prirodne ekstrakte i njihove bioaktivne komponente, nanočestice metala, enzime, bakteriofage i probiotike (Becerril 2020, Durango i sar. 2008, Feng i sar. 2025a, Feng i sar. 2025c, Gao i sar. 2024a, Gao i sar. 2024b, Ju i sar. 2019). Pregled ovih aktivnih dodataka u jestivim premazima i njihov uticaj na kvalitet i očuvanje voća prikazan je u Tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Vrste premaza, primenjeni aktivni dodaci i njihovi efekti na kvalitet i očuvanje voća

Materijal za premaz	Aktivni dodatak / koncentracija	Proizvod	Efekat	Referenca
Skrob	-	Cela jagoda	Rok trajanja produžen 15 dana	Garcia i sar. 2011
Skrob	Etarsko ulje timijana	Celi mango	Rok trajanja produžen do 10 dana	Cai i sar. 2020
Hitozan	Askorbinska kiselina / 1% v/v	Cela jagoda	Rok trajanja produžen 15 dana	Saleem i sar. 2020
Hitozan	Kafeinska i hlorogenska kiselina / 1% v/v	Cela kajsija	Inhibitorski efekat na rast <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> i <i>B. subtilis</i>	Li i sar. 2022
Hitozan	-	Sveže sečene jagode	Poboljšanje kvaliteta, inhibiranje rasta mikroorganizama i produžen rok trajanja	Campaniello i sar. 2008
Hitozan	Etarsko ulje limuna / odnos hitozan:etarsko ulje limuna= 1:3	Cela jagoda	Inhibirana pojava sive plesni tokom skladištenja	Perdones i sar. 2016
Hitozan	Etarsko ulje mente / 1,25; 2,5 i 5 µl/ml	Celo grožđe	Inhibirana gljivična infekcija grožđa izazvana mikroorganizmima <i>Aspergillus niger</i> , <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Penicillium expansum</i> i <i>Rhizopus stoloniferi</i> . Bolje očuvanje originalnog kvaliteta.	Guerra i sar 2016
Alginat	Etarsko ulje timijana / 1% (<i>Thymus vulgaris</i>) i origana (<i>Origanum vulgare</i>)	Sveže sečena papaja	Rok trajanja produžen 12 dana	Tabbasum i Khan 2020
Alginat	Etarsko ulje limunske trave / 0,1% v/v	Sveže sečena jabuka	Inaktivacija <i>E. coli</i>	Salvia-Trujillo i sar. 2015
Alginat	Etarsko ulje limunske trave / 0,3%	Sveže sečeni ananas	Smanjenje broja kvasaca i plesni	Azarakshsh i sar. 2014
Alginat	Etarsko ulje cimeta i ruzmarina / 0,3%	Sveže sečena jabuka	Smanjenje gubitak težine i sačuvana boja, redukovana aktivnost polifenol oksidaze i peroksidaze	Chiabrando i Giacalone 2015
Alginat	Etarsko ulje karanfilića / 1%	Sveže sečena jabuka	Usporen rast mikroorganizama i odloženo oksidativno potamnjivanje	Pandey i sar. 2023
Alginat	Etarsko ulje lavande / 1%	Celo grožđe	Smanjenje rasta mikroorganizama i održavanje kvaliteta tokom 9 dana skladištenja na +4°C	Gul i sar. 2023
Alginat	Etarsko ulje pomorandže	Sveže sečeni kivi	Inhibiranje rasta plesni	Chiabrando i Giacalone, 2019
Alginat	Etarsko ulje timijana / 0,5 µl/ml	Sveže sečena jabuka	Inhibiranje rasta mikroorganizama i respiracija, smanjenje gubitak mase i tamnjenje	Sarengaowa i sar. 2018
Alginat	Etarsko ulje cimeta / 0,3% v/v	Sveže sečena jabuka	Smanjenje gubitak mase i aktivnost peroksidaze, zadržana boja tokom skladištenja	Chiabrando i Giacalone, 2014
Alginat	Etarsko ulje limunske trave / 0,1%, 0,5% i 1%	Sveže sečena jabuka	Smanjena brzina respiracije i proizvodnja etilena, smanjeno potamnjivanje i održavanje čvrstoća	Salvia-Trujillo i sar. 2015

Nastavak **tabele 5.2**

Materijal za premaz	Aktivni dodatak /koncentracija	Proizvod	Postignuti efekat	Referenca
Ksantan guma	α -tokoferol / 2 g/l	Sveže sečena jabuka	Smanjeno potamnjanje i promena čvrstoće	Zambrano-Zaragoza i sar. 2014
Aloe vera gel	Cistein / 0,5%	Sveže sečena jabuka	Odloženo potamnjanje i smanjen broj mikroorganizama	Song i sar. 2013
Aloe vera gel	Etarsko ulje limuna 1% i hidroksipropilmetilceluloza 0,1%	Sveže sečena fudži jabuka	Smanjene promene boje	Farina i sar. 2020
Sojin protein	Ferulinska kiselina 4g/l, pH 7.0	Sveže sečena jabuka	Rok trajanja produžen 7 dana	Alves i sar. 2017
Karboksimetilceluloza	Askorbinska kiselina / 2%	Sveže sečena jabuka	Smanjena promena boje, gubitak težine i gubitak čvrstih materija	Saba i Sogvar 2016
Izolat proteina surutke	Glicerol 4%v/v / Trehaloza 3% v/v	Sveže sečena jabuka	Produžen rok trajanja i usporen proces starenja	Feng i sar. 2018
Hitozan:pululan (50:50)	Ekstrakt kore nara / 0,02 g/ml	Celi mango	Smanjen gubitak mase, održan pH i antioksidativna aktivnost tokom 18 dana skladištenja na +4°C	Kumar i sar. 2021
Zein/hitozan (7:1)	Etarsko ulje timijana / 3% w/v	Cele jagode	Usporen rast mikroorganizama i produžen rok trajanja	Pavlátková i sar. 2023
Hitozan / alginat	Etarsko ulje karanfilića / lavande	Celo stono grožđe	Antifungalni efekat prema <i>Botrytis cinerea</i>	Sangsuwan i Sutthasupa 2019
Alginat (2%) i gelan (0,5%)	N-acetil cistein (1%) i glicerol (1,5%) za alginat / N-acetil cistein (1%) i glicerol (0,63%) za alginat	Sveže sečena jabuka	Smanjeno potamnjanje	Rojas-Graü i sar. 2007b
Alginat i gelan	-	Sveže sečeni ananas	Produžen rok trajanja na 10 dana	Azarakhsh i sar. 2012
Izolat proteina surutke, sojinih proteina, karagenan i alginat	-	Sveže sečena jabuka	Produžen rok trajanja	Ghavidel i sar. 2013
Kompozitni premaz na bazi proteina surutke i hidroksipropil metilceluloze	-	Sveže sečena jabuka	Smanjeno enzimsko potamnjanje	Pérez-Gago i sar. 2005
Prirodni vosak	Elaginska kiselina	Cela jabuka	Smanjena promena boje, gubitak težine i gubitak čvrstih materija, jaka antifungalna barijera protiv <i>Colletotrichum gloesporioides</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> and <i>Penicillium expansum</i> , produžen rok trajanja 7 dana	Ochoa i sar. 2011

5.2.5.1 *Etarska ulja u jestivim premazima*

U poslednjih nekoliko godina sve više istraživanja usmereno je na ugradnju etarskih ulja u jestive premaze za primenu na svežem i sveže sečenom voću i povrću (Chaudhari i sar. 2023, Ghasemi i sar. 2023, Sun i sar. 2022, Zhang i sar. 2021). Etarska ulja se uglavnom koriste zbog svojih antibakterijskih, antifungalnih i insekticidnih dejstava (Ghasemi i sar. 2023, Pandey i sar. 2022, Yousuf i sar. 2021). Iako poseduju antimikrobno dejstvo protiv raznih mikroorganizama, njihova primena u hrani i dalje predstavlja izazov zbog složenosti njihove prirode, zakonske regulative i uticaja na senzorne karakteristike. Prilikom formulisanja jestivog premaza sa dodatkom antimikrobnog agensa mora se obratiti pažnja na karakteristike voća i povrća na koje se premaz primenjuje, prirodu premaza, efikasnost etarskog ulja dodatog u premaz i ograničenje trajanja etarskog ulja. Sve ovo ukazuje na značaj i neophodnost preliminarnih istraživanja (Gupta i sar. 2022, Perumal i sar. 2022, Yousuf i sar. 2021). Za sada se komercijalno koristi samo 300 vrsta etarskih ulja od skoro 3000 poznatih (Yousuf i sar. 2021). Jedan od razloga ugradnje etarskih ulja u jestive premaze je i taj što njihova direktna primena na sečenom voću ili povrću često nije prikladna, jer efektivne koncentracije potrebne za antimikrobno delovanje mogu narušiti senzorna svojstva, posebno ukus i ukupni kvalitet proizvoda (Chaudhari i sar. 2023, Perumal i sar. 2022). Primenljivost etarskih ulja kao konzervansa ograničena je njihovom aromom, isparljivošću, rastvorljivošću i interakcijama sa prehrambenim proizvodom na koji se koriste (Cloete i sar. 2023, Das i sar. 2021, Perumal i sar. 2022, Yousuf i sar. 2021). Ipak, etarska ulja se ponekad ciljano dodaju jestivim premazima kako bi se modifikovali ukus, aroma i miris proizvoda (Perumal i sar. 2022, Yousuf i sar. 2021). U tom slučaju se preporučuje upotreba etarskih ulja čiji je ukus dobro usklađen sa aromom proizvoda (Donsì i sar. 2015). Usled svojih jakih antimikrobnih i antioksidativnih karakteristika, etarska ulja origana, karanfilića i timijana su najčešće korišćena etarska ulja u jestivim premazima. Ova ulja su bogata bioaktivnim jedinjenjima (karvakrol, timol i eugenol) i dokazano je da smanjuju rast mikroorganizama koji izazivaju kvarenje (Sateriale 2022, Kumar 2022).

Potencijal biološki aktivnih jedinjenja, gde spadaju i etarska ulja, za ispoljavanje niza pozitivnih efekata na zdravlje ljudi može umanjiti njihova velika osetljivost, odnosno degradacija pod uticajem spoljašnjih faktora (svetlost, temperatura ili O₂). Na taj način može doći do pogoršanja senzornih svojstava krajnjeg proizvoda, pa čak i do opasnosti po zdravlje korisnika. Kako bi se bioaktivna jedinjenja zaštitila i osigurao njihov potpuni potencijal može se primeniti inkapsulacija koja čak može i da maskira senzorna svojstva koja nisu po ukusu potrošača (Asbahani i sar. 2015,

Bakry i sar. 2015, Perumal i sar. 2022). Prednosti inkapsulacije etarskih ulja prikazane su na slici 5.8. Tehnike izrade mikrokapsula u prehrambenoj industriji su dosta izazovnije u odnosu na farmaceutsku ili kozmetičku industriju, zbog složenosti matrica koje se koriste i zahteva koji se moraju poštovati u proizvodnji hrane (do Amaral i sar. 2019). S obzirom da se ovi proizvodi unose oralno moraju se formulisati tako da se odupru nepovoljnim uslovima gastro-intestinalnog trakta. Zaštita koju obezbeđuje materijal za inkapsulaciju se smanjuje i gubi tokom vremena usled dejstva prisutnih enzima, temperature, pH vrednosti sredine i sve to dovodi do kontrolisanog oslobađanja bioaktivne supstance na specifično ciljanom mestu (Silva i sar. 2014). Međutim, inkapsulacija značajno povećava troškove proizvodnje i na taj način ograničava ekonomsku održivost metode.



Slika 5.8 Prednosti inkapsulacije etarskih ulja

Za inkapsulaciju etarskih ulja koristi se nekoliko različitih tipova nosača i to: jezgro/rezervoar, multi-membrana, nesferični rezervoar, matrica i emulzija. Veličina mikrokapsula može da varira od nekoliko submikrona do nekoliko milimetara što zavisi od materijala za inkapsulaciju i oblika nosača (Maes i sar. 2019). Za inkapsulaciju etarskih ulja koja sadrže lako isparljive i termolabilne komponente najčešće se koriste emulzifikacija, sprej-sušenje, ekstruzija, liofilizacija, kompleksna koacervacija, *in situ* polimerizacija, inkapsulacija na bazi superkritičnih fluida i koaksijalni elektrosprej sistem (Bakry i sar. 2015, Đorđević i sar. 2015). Kao materijal za inkapsulaciju etarskih ulja koriste se polisaharidi (alginat, hitozan, pektin, skrob i njegovi derivati), proteini (kazein, proteini surutke i soje) i lipidi (fosfatidilholin). U cilju postizanja višeg stepena

inkapsulacije, produženog otpuštanja, kao i adekvatne mehaničke i termičke zaštite tokom skladištenja vrši se kombinacija dva ili više polimera (Vishwakarma i sar. 2016).

5.2.4 Migracija bioaktivnih jedinjenja iz materijala za pakovanje u hranu

Za očuvanje kvaliteta hrane i produženje njenog roka trajanja koriste se različiti jestivi premazi i pakovanja. Tokom životnog ciklusa proizvoda, kontakt hrane sa ambalažom može dovesti do migracije supstanci iz ambalaže u hranu, uključujući antioksidanse, antimikrobne agense i plastifikatore. Ova migracija može predstavljati zdravstveni rizik, naročito za osetljive grupe stanovništva. Čak i kada su same supstance bezbedne, njihova prekomerna migracija može premašiti zakonske granice, zbog čega je neophodno sprovođenje rigoroznih ispitivanja (Zhang i sar. 2025). Brzina i obim migracije zavise od vrste, debljine i poroznosti materijala, kao i od hemijskih osobina, veličine molekula, polariteta i strukture migrirajućih jedinjenja. Temperature i vreme skladištenja dodatno ubrzavaju kretanje molekula, povećavajući migraciju (Palanisamy i sar. 2025, Pilevar i sar. 2019). Stepen migracije takođe zavisi od kontaktne površine i zapremine proizvoda, veća površina kontakta podstiče intenzivniju difuziju. Fizičko-hemijska svojstva hrane, kao što su njeno stanje i sastav, utiču na interakciju sa migrirajućim supstancama (Vilarinho i sar. 2019). Ključni faktori koji utiču na migraciju bioaktivnih jedinjenja iz ambalaže uključuju fluktuacije temperature, lokalizovano topljenje i barijerna svojstva materijala. Pored toga, molekulska težina migrirajućih supstanci i pH hrane značajno utiču na difuziju, što zahteva pažljiv izbor ambalaže i kontrolisano skladištenje kako bi se rizici migracije minimizirali (Zhang i sar. 2025).

5.2.6 Potencijal primene jestivih premaza

Regulativa koja se odnosi na jestive premaze je kompleksna i predstavlja značajnu prepreku njihovoj široj primeni. Neophodna su obimna istraživanja, testiranja i dokumentacija kako bi se potvrdilo da su premazi netoksični, da ne narušavaju nutritivnu vrednost hrane i da uspešno ostvaruju svoju funkciju, poput produženja roka trajanja ili unapređenja bezbednosti. Institucije kao što su Američka agencija za hranu i lekove i Evropska agencija za bezbednost hrane, zajedno sa nacionalnim telima, uspostavile su stroge smernice radi zaštite potrošača i očuvanja kvaliteta prehrambenih proizvoda (Khalid i sar. 2022). Postupak regulatornog odobravanja je dugotrajan i skup, a razlike u zakonodavstvu među državama dodatno otežavaju plasman proizvoda na

međunarodnom tržištu, što ukazuje na potrebu harmonizacije propisa (Werner i sar. 2017). U Evropskoj uniji premazi koji dolaze u direktan kontakt sa hranom nisu u potpunosti obuhvaćeni jedinstvenim zakonodavstvom, pa se primenjuju nacionalni propisi koji se često razlikuju ili su međusobno neusklađeni. Delimično rešenje predstavlja Kodeks prakse, koji objedinjuje elemente uredbe (EC) br. 1935/2004, direktive 2002/72/EC o plastici sa njenim izmenama i Rezolucije Saveta Evrope (ResAP(2004)1) o premazima za kontakt sa hranom. Njegova primena omogućava standardizovan pristup dokazivanju usklađenosti sa uredbom (EC) br. 1935/2004 i olakšava ispunjavanje zakonskih obaveza prehrambene industrije (Dainelli 2015). Na međunarodnom nivou, Kodeks Alimentarijus postavlja smernice za bezbednost hrane i utiče na nacionalne propise i trgovinu (Veggeland i sar. 2005).

Pored regulatornih izazova, uspeh jestivih premaza na tržištu u velikoj meri zavisi od prihvatanja od strane potrošača (Verbeke 2005). Iako imaju brojne ekološke i funkcionalne prednosti, stavovi i percepcija potrošača mogu ograničiti njihovu primenu, jer često postoji psihološka barijera prema konzumiranju dodatnog sloja koji tradicionalno nije deo hrane (Meijer i sar. 2021). Prevazilaženje ovih prepreka zahteva aktivno uključivanje potrošača kroz testove ukusa, pilot-programe i transparentno informisanje o bezbednosti, prednostima i ekološkom značaju jestivih premaza (Blind 2010, Kysar 2004).

6. EKSPERIMENTALNI DEO

6.1 Materijal

U eksperimentalnom delu ovog rada korišćeni su suvi nadzemni delovi lavande (*Lavandula angustifolia* Mill.) kupljeni sa farme sa područja Starčeva, ubrani 2021. godine. Jabuke sorte Greni smit su kupljene u lokalnoj prodavnici i skladištene na +4 °C pre obrade.

Kalijum-hlorid, natrijum-hlorid, bezvodni natrijum-sulfat, askorbinska kiselina, kalcijum hlorid, natrijum-hipohlorit, dietiletar i trihlorsirćetna kiselina su nabavljeni od Centrohem-a (Stara Pazova, Srbija). Tween 40, natrijum alginat, DPPH•, metanol, 2-tiobarbiturna kiselina, N-acetil cistein i standardni rastvori *n*-alkana C₈-C₂₀ i C₂₁-C₄₀ su nabavljeni od Sigma-Aldrich (Darmstadt, Nemačka). Glicerol i natrijum-hidroksid su nabavljeni od Zorka pharma (Šabac, Srbija). Helijum, vodonik, azot i vazduh su nabavljeni od Messer Tehnogas ad (Beograd, Srbija). Sabouraud maltozni bujon i agar (SMB i SMA), Willson blair agar, hranljivi bujon, agar i pepton su od proizvođača Torlak (Beograd, Srbija), Agar Listeria prema Ottaviani i Agosti nabavljen je od kompanije Sigma-Aldrich (Darmstadt, Nemačka), a Cromogenic *E. coli* agar od kompanije Titan biotech LTD (Rajasthan, Indija). Mikroorganizmi *Bacillus subtilis* ATCC 6633, *Staphilococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus cereus* ATCC 11778, *Listeria monocitogenes* ATCC15313, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Proteus vulgaris* ATCC 8427, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603, *Candida albicans* ATCC 2091 su deo kolekcije mikroorganizama Tehnološkog fakulteta u Leskovcu.

6.1.1 Sadržaj vlage

Sadržaj vlage cvetova lavande i ploda jabuke je određen sušenjem u peći na 105 °C do konstantne mase i iznosio je $7,9 \pm 0,01\%$ i $75,1 \pm 0,65\%$, redom.

6.1.2 Predtretman biljnog materijala

Predtretman biljnog materijala (cvet lavande) je vršen suvim mlevenjem, prosejavanjem i mokrim mlevenjem. Pregled uslova predtretmana cveta lavande je dat u tabeli 6.1.

6.1.2.1 Suvo mlevenje i prosejavanje

Za suvo mlevenje cvetova lavande korišćen je električni mlin (Mahlkoenig, Hamburg, Nemačka). Približno 100 g cvetova je mleveno oko 20 sekundi, nakon čega je mlin isključen kako bi se sprečilo pregrevanje biljnog materijala i otresao prah koji je prilepljen na zidove mlina. Mlevenje je ponovljeno još jednom. Dobijeni cvetni prah je prosejan kroz sito veličine 1,0 mm da bi se dobila frakcija veličine do 1,0 mm, dok su veće čestice ponovo mlevene u istom mlinu i ponovo prosejane da bi se dobila frakcija iste veličine. Finalni prah je ručno pomešan da bi se obezbedila uniformnost. Biljni materijal je mleven neposredno pre hidrodestilacije i korišćen sa ili bez prosejavanja, ili je samleven i prosejan čuvan u papirnoj kesi na suvom i tamnom mestu, na sobnoj temperaturi.

6.1.2.2 Mokro mlevenje

Za mokro mlevenje cvetova lavande korišćen je blender (Nutribullet, model NB-101B, Kina). Masa cvetova, koja odgovara zapremini destilacionog suda i odgovarajućem zapreminsko-masenom odnosu cveta i vode, suspendovana je u približno polovini potrebne količine vode u posudi blendera i mlevena 20 sekundi. Dobijena suspenzija je zatim prebačena u odgovarajući sud za destilaciju. Posuda blendera je isprana više puta vodom, a voda od ispiranja, sa preostalim česticama cveta, je takođe dodata u destilacioni sud, obezbeđujući da ukupna zapremina zadovoljava željeni zapreminsko-maseni odnos cveta i vode.

6.2 Izolovanje bioaktivnih komponenti

Za izolovanje etarskog ulja korišćene su četiri različite tehnike: konvencionalna hidrodestilacija, sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija, mikrotalasna hidrodestilacija i sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija. Pregled primenjenih uslova različitih tehnika hidrodestilacije etarskog ulja dat je u tabeli 6.1.

6.2.1 Konvencionalna hidrodestilacija

Za potrebe dobijanja etarskog ulja metodom klasične hidrodestilacije korišćeni su: celi cvetovi, suvo mleveni i prosejani (<1,0 mm) cvetovi, čuvani u papirnoj kesi na suvom i tamnom

mestu, na sobnoj temperaturi; suvo mleveni cvetovi prosejani ($< 1,0$ mm) neposredno pre destilacije; neprosejani, suvo mleveni cvetovi neposredno pre destilacije; i mokro mleveni cvetovi. Biljni materijal je podvrgnut hidrodestilaciji po Klevendžeru, u sudu zapremine 250, 500, 1000 i 2000 ml, pri različitim odnosima cveta i destilovane vode od 1:10, 1:15 i 1:20 g/ml. Zagrevanje je vršeno pomoću električne grejne obloge, na temperaturi ključanja, u trajanju od 240 minuta, pri različitim brzinama hidrodestilacije (pozicije termostata 1, 2 i 3 na grejnoj oblozi). Radi praćenja kinetike hidrodestilacije, prinos etarskog ulja meren je sa vremenom, odnosno nakon 5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240 minuta. Vreme je mereno od momenta kada je prva kap hidrolata dospela u separator aparata. Za svaku kombinaciju operativnih uslova određivana je brzina zagrevanja merenjem brzine destilacije hidrolata, tj. merenjem zapremine hidrolata sakupljenog za određeno vreme. Svi eksperimenti su izvedeni dva puta. Prinos etarskog ulja izražen je u ml etarskog ulja u 100 g suvih cvetova. Dobijeno etarsko ulje je sušeno bezvodnim natrijum-sulfatom, filtrirano i čuvano na temperaturi $+4$ °C u dobro zatvorenim, tamnim bočicama do dalje analize.

Konvencionalna hidrodestilacija etarskog ulja iz celih cvetova je takođe izvođena sa dodatkom soli NaCl (5% i 10%) i KCl (3% i 5%), surfaktanta Tween 40 (5% i 10%) i VFHD iz prethodnih hidrodestilacija kao dela destilacionog medijuma u narednim hidrodestilacijama (ukupno 5 ciklusa). Rastvori soli i surfakanta su pripremani rastvaranjem odmerene količine soli i surfakanta u određenoj zapremini destilovane vode i korišćeni kao destilacioni medijum. VFHD iz prethodne destilacije je mešana sa svežom destilovanom vodom i ova mešavina korišćena kao destilacioni medijum u narednoj destilaciji uz održavanje željenog odnosa biljnog materijala i tečnosti.

6.2.2 Mikrotalasna hidrodestilacija

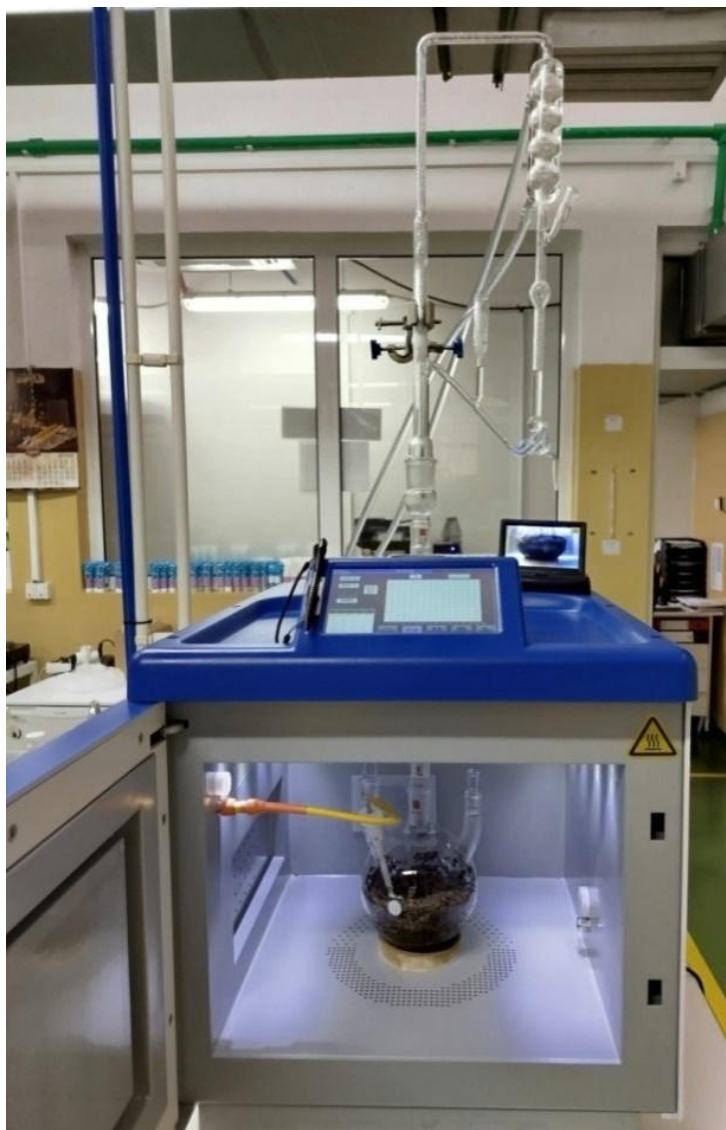
Za mikrotalasnu hidrodestilaciju je korišćen uređaj Uwave-2000, sa varijabilnom snagom mikrotalasa (0–1000 W) i konstantnom frekvencijom od 2450 MHz (slika 6.2). Uređaj radi sa zapreminama sudova od 50 ml do 2000 ml, pri čemu podešavanje operativnih parametara zavisi od zapremine suda koji se koristi. Temperatura reakcione smeše se meri na dva načina: pomoću infracrvenog senzora, koji meri temperaturu do 300 °C, sa preciznošću ± 1 °C, i pomoću PT-100 elektrode koja meri temperaturu do 250 °C, sa preciznošću ± 1 °C. Uređaj je opremljen brzim ventilatorom sa toplim vazduhom kapaciteta 3 m³/min. Zahvaljujući LCD ekranu moguće je u realnom vremenu pratiti procesne parametre i krive promene temperature i snage sa vremenom.

Osušeni biljni materijal podvrgnut je mikrotalasnoj hidrodestilaciji u uređaju Uwave-2000 u sudovima zapremina 500 ml i 1000 ml koji su povezani sa aparaturom po Klevendžeru, pri odnosu biljnog materijala i vode 1:10 g/ml, pri različitim snagama mikrotalasa (250 W, 300 W i 400 W za sud zapremine 500 ml i 400 W, 500 W i 600 W za sud zapremine 1000 ml), u trajanju od 90 minuta. Dalji postupak bio je istovetan sa prethodno opisanim kod konvencionalne hidrodestilacije.

6.2.3 Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija

Osušeni biljni materijal podvrgnut je dejstvu ultrazvuka u uređaju Uwave-2000 u destilacionim sudovima zapremine 500 ml i 1000 ml, pri odnosu biljnog materijala i vode 1:10 g/ml, pri amplitudi 80% u trajanju od 30 minuta.

Nakon završenog predtretmana ultrazvukom nastavljena je mikrotalasna hidrodestilacija u istom uređaju pri različitim snagama mikrotalasa (250 W, 300 W i 400 W za sud zapremine 500 ml i 400 W, 500 W i 600 W za sud zapremine 1000 ml), u trajanju od 90 min. Dalji postupak sproveden je na isti način kao kod konvencionalne hidrodestilacije.



Slika 6.2 Izgled uređaja Uwave-2000

Tabela 6.1 Pregled uslova predtretmana cveta lavande i konvencionalne, sekvencijalne ultrazvučne, mikrotalasne i sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja po Klevendžeru

Tip hidrodestilacije	Uslovi predtretmana hidrodestilacije etarskog ulja					Intenzitet zagrevanja
	Predtretman	Aditivi	Zapremina suda, ml	Biljni materijal / voda, g/ml	Vreme uzorkovanja, min	
Konvencionalna	Bez predtretmana	Bez aditiva	250, 500 i 1000 2000	1:10 (masa cveta 35 g) 1:10, 1:15 i 1:20 (masa cveta: 90; 76,8 i 63,5; redom)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	1, 2 i 3 ^a
	Bez predtretmana	NaCl (5 ili 10%) i KCl (3 ili 5%)	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
	Bez predtretmana	Surfaktant Tween 40 (5 ili 10%)	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
	Bez predtretmana	VFHD 267 ml	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
	Suvo mlevenje, sejanje (< 1,0 mm) i čuvanje u papirnoj kesi na suvom i tamnom mestu na sobnoj temperaturi do destilacije	Bez aditiva	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
	Suvo mlevenje i sejanje (< 1,0 mm) neposredno pre destilacije	Bez aditiva	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
	Suvo mlevenje neposredno pre destilacije	Bez aditiva	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
	Mokro mlevenje	Bez aditiva	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3
Sekvencijalna ultrazvučna	Ultrazvuk (suspencija cveta u vodi, amplituda od 60 ili 80% i trajanje 30 ili 45 min)	Bez aditiva	1000	1:10 (masa cveta 35 g)	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 i 240	3

Nastavak **tabele 6.1**

Tip hidrodestilacije	Uslovi predtretmana hidrodestilacije etarskog ulja					
	Predtretman	Aditivi	Zapremina suda (ml)	Biljni materijal / voda (g/ml)	Vreme (min)	Intenzitet zagrevanja
Mikrotalasna	Bez predtretmana	Bez aditiva	500	1:10 (masa cveta g)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 i 90	250, 300 i 400 W ^b
			1000	1:10 (masa cveta 35 g)		400, 500 i 600 W
Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna	Ultrazvuk (suspencija cveta u vodi, amplituda od 80% i trajanje 30 min)	Bez aditiva	500	1:10 (masa cveta g)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 i 90	250, 300 i 400 W ^b
			1000	1:10 (masa cveta 35 g)		400, 500 i 600 W

^a Položaj regulatora snage grejača.^b Ulazna mikrotalasna snaga.

6.3 Karakterizacija bioaktivnih komponenti

6.3.1 Određivanje fizičko-hemijskih karakteristika etarskog ulja lavande

Gustina i indeks prelamanja mereni su piknometrom i refraktometrom (Kruess, Hamburg, Nemačka), redom, na 20 °C.

6.3.2 Gasna hromatografija-masena spektrometrija (GC/MS) i gasna hromatografija-plamenojonizujuća detekcija (GC/FID) etarskog ulja lavande

GC/MS analiza je izvršena na gasnom hromatografu (Agilent Technologies 7890B Gas Chromatograph, USA) kuplovanom sa inertnim selektivnim 5977A masenim detektorom iste kompanije. Etarsko ulje je rastvoreno u dietiletru (20 µg/ml). Jedan µl pripremljenog rastvora unešen je u injektor zagrejan na temperaturi od 220 °C. Komponente su razdvojene na nepolarnoj silika kapilarnoj koloni HP-5MS (sa stacionarnom fazom na bazi 5% difenil- i 95% dimetil-polisiloksana; dužine 30 m, prečnika 0,25 mm i debljine filma 0,25 µm; Agilent Technologies, SAD). Kao noseći gas korišćen je helijum čistoće 99,999 %, pri konstantnoj brzini protoka od 1 ml/min. Temperatura pećnice je linearno povećavana od 60 °C do 246 °C brzinom od 3 °C/min. Ukupno vreme trajanja analize je bilo 62 min. Eluat je MSD transfer linijom temperature 250 °C prenešen do kvadrupolnog masenog spektrometra sa elektronskom jonizacijom (temperature jonskog izvora i kvadrupolnog masenog analizatora su bile 230 °C i 150 °C, respektivno a energija elektrona 70 eV) i analiziran u Scan modu, u opsegu m/z od 41-415 Da.

GC/FID analiza je izvršena pod identičnim eksperimentalnim uslovima kao i GC/MS analiza. Temperatura plameno-jonizujućeg detektora (FID) je bila podešena na 300 °C (Cvetkovic i sar. 2022).

Obrada podataka

Obrada podataka je izvršena pomoću MSD ChemStation Data Analysis (revizija F.01.00.1903) u kombinaciji sa AMDIS (Automatic Mass Spectral Deconvolution and Identification System, verzija 2.70) i NIST MS Search (verzija 2.0g) softverima (Agilent Technologies, SAD). Za nedvosmislenu identifikaciju komponenata smeše korišćeni su retencioni indeksi određeni eksperimentalno, pomoću serije homologih *n*-alkana C₈-C₂₀ i C₂₁-C₄₀ kao standarda. Identifikacija komponenti je zasnovana na

poređenju njihovih retencionih indeksa (RI^{exp}) sa literaturno dostupnim vrednostima (RI^{lit}) i na poređenju njihovih masenih spektara sa spektrima iz Willey, NIST i RTLPEST biblioteka. Sadržaj (%) pojedinačnih komponenti određen je metodom normalizacije površine, bez korekcija.

6.3.3 Određivanje antioksidativne aktivnosti DPPH metodom

Antioksidativna aktivnost etarskog ulja lavande je određena korišćenjem DPPH (2,2-difenil-1-pikrilhidrazil) testa prema (Radi i sar. 2024), sa manjim izmenama. Testiran je opseg koncentracija etarskog ulja lavande od 12,5 $\mu\text{L}/\text{mL}$ do 400 $\mu\text{L}/\text{mL}$ (šest koncentracija). Tačno 100 μL svake koncentracije uzorka ulja pomešano je sa 3,9 mL rastvora DPPH• (0,06 mmol/dm³). Nakon inkubacije u mraku tokom 30 min, merena je apsorbanca reakcione smeše na talasnoj dužini od 517 nm, a dobijena vrednost predstavljala je apsorbancu uzorka (Au). Istovremeno je pripremljena slepa proba (blank), gde je umesto rastvora DPPH• u rastvore ulja određenih koncentracija dodat metanol (Ab), dok je kontrola sadržala samo rastvor DPPH• (Ak). Njihova apsorbanca takođe je merena na 517 nm. Na osnovu izmerenih vrednosti apsorbance izračunat je procenat neutralisanja DPPH radikala (jednačina 6.1).

$$\text{Kapacitet neutralisanja DPPH radikala (\%)} = 100 - [(Au - Ab) 100 / Ak] \quad (6.1)$$

Dobijeni rezultati su zatim iskorišćeni za konstrukciju krive koja prikazuje zavisnost procenta neutralizacije DPPH radikala od koncentracije etarskog ulja lavande, na osnovu koje je određena EC_{50} vrednost, odnosno koncentracija neophodna za neutralizaciju 50% DPPH radikala. Metanolni rastvor butilovanog hidroksitoluena (BHT) u koncentracijama od 10 do 250 $\mu\text{g}/\text{mL}$ korišćen je kao referentni standard ($EC_{50} = 88,8 \mu\text{g}/\text{mL}$). Svi eksperimenti su izvedeni tri puta.

6.3.4 Određivanje antimikrobne aktivnosti

Antimikrobna aktivnost etarskog ulja lavande je određena primenom metode minimalne inhibitorne koncentracije (MIC). Ova aktivnost je testirana protiv četiri gram-pozitivna soja bakterija (*Bacillus subtilis* ATCC 6633, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus cereus* ATCC 11778 i *Listeria monocitogenes* ATCC15313), četiri gram-negativna soja bakterija (*Escherichia coli* ATCC 25922, *Proteus vulgaris* ATCC 8427, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 i *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603) i jednog kvasca (*Candida albicans* ATCC 2091), u skladu sa

smernicama Instituta za kliničke i laboratorijske standarde (CLSI 2015). Za ovaj test korišćeno je etarsko ulje lavande u koncentracijama od 200 mg/ml do 0,036 mg/ml. Mikrotitratske ploče su inkubirane na 37°C, a vrednosti MIC su određene korišćenjem čitača mikroploča EZ Read 400 Elisa (Biochrom, UK).

6.4 Jestivi premazi

6.4.1 Priprema alginatnog premaza

Alginatni premaz pripremljen je po modifikovanoj metodi Cofelice i saradnika (2019). Rastvor natrijum-alginata (1% m/v) pripremljen je rastvaranjem u destilovanoj vodi pri 70 °C uz neprekidno mešanje do dobijanja bistrog rastvora. Nakon hlađenja na sobnu temperaturu, dodat je glicerol (1,5% v/v) kao plastifikator, a mešanje nastavljeno do potpune homogenizacije. U slučaju korišćenja VFHD lavande, odgovarajući deo destilovane vode zamenjen je VFHD u procentualnom udelu od 25% odnosno 50% (v/v u odnosu na ukupnu zapreminu), pri čemu je alginat rastvaran u mešavini vode i VFHD pod istim temperaturnim i procesnim uslovima. Etarsko ulje lavande dodato je u koncentracijama od 0,1% i 0,2% (v/v), dok je kontrolni uzorak sadržao samo alginat i glicerol. Homogenizacija svih formulacija sprovedena je tokom 3 min pri 12500 o/min korišćenjem laboratorijskog homogenizatora (HG-15A, Witeg, Nemačka).

6.4.2 Nanošenje jestivog premaza na sveže sečenu jabuku

Jabuke su oprane destilovanom vodom, dezinfikovane uranjanjem u rastvor natrijum hipohlorita od 200 ppm na 2 minuta, isprane i osušene pre sečenja. Nakon toga su pomoću sterilnog noža sečene na komade približno sličnih dimenzija koji su potapani u 2% rastvor kalcijum hlorida i 2% rastvor askorbinske kiseline, redom, po 2 minuta. Nakon toga, uzorci su potapani u odgovarajuće premaze na 3–5 minuta, ocedeni i ostavljeni na rešetku za ceđenje viška premaza. Tretirani komadi jabuka su zatim spakovani u sterilne petri šolje sa poklopcem, izmereni i označeni prema korišćenom premazu i vremenu skladištenja (0, 2, 5, 7, 9, 12, 14 dana). Zbog poređenja, pripremljen je i kontrolni uzorak bez premaza, kao i uzorak samo sa alginatnim premazom bez dodatka etarskog

ulja ili VFHD (oznaka „k+a“). Svi uzorci su pripremljeni u triplicatu i čuvani na +4 °C tokom cele studije (Zhang i sar. 2024a).

6.4.3 Određivanje indeksa potamnjenja

Promene boje sveže sečene jabuke tokom 14 dana skladištenja na +4 °C praćene su pomoću CIELAB, odnosno merenjem parametara L^* , a^* i b^* spektrofotometrom (Modern instruments, model XD-2328, Shanghai, China). Parametar L^* (sjajnost/svetlina) označava osvetljenost na skali od 0 do 100, pri čemu veće vrednosti ukazuju na veću osvetljenost. Ovaj parametar ima opseg od crne ($L = 0$) do bele boje ($L = 100$). Parametar a^* ima pozitivne vrednosti za crvenu boju i negativne vrednosti za zelenu, dok parametar b^* ima pozitivne vrednosti za žutu boju i negativne vrednosti za plavu. Za voće, odnos a^*/b^* je prilično koristan, jer je odnos negativan za zeleno voće, približno 0 za žuto voće i pozitivan za narandžasto do crveno voće (Gross 1987). Pre određivanja parametara boje spektrofotometar je kalibrisan belom kalibracionom pločom (Demircan i Velioglu 2024). Indeks potamnjenja (BI) definisan je kao čistoća smeđe boje i obično se koristi kao indikator stepena potamnjenja u prehrambenim proizvodima koji sadrže šećer (Buera 1986). Računa se pomoću sledeće formule (Pilon i sar. 2013):

$$\left(\frac{L^* - 50}{90} \right)^2 + \left(\frac{a^*}{50} \right)^2 + \left(\frac{b^*}{50} \right)^2 = BI \quad (6.2)$$

$$BI = \frac{1}{\left(\frac{L^* - 50}{90} \right)^2 + \left(\frac{a^*}{50} \right)^2 + \left(\frac{b^*}{50} \right)^2} \quad (6.3)$$

6.4.4 Senzorna analiza sveže sečene jabuke sa jestivim premazom

Senzorna analiza sprovedena je nakon 1, 3, 7 i 10 dana skladištenja u cilju procene promene kvaliteta uzoraka tokom vremena. Ispitivanje je realizovano primenom hedonske skale od 5 poena (Mikus i sar. 2025), sa panelom od 11 neobučenih ocenjivača, koji su činili istraživači, nastavno osoblje i saradnici Laboratorije za prehrambenu tehnologiju Tehnološkog fakulteta u Leskovcu, starosti između 25 i 55 godina. Iako ocenjivači nisu bili profesionalno trenirani panelisti, svi su bili upoznati sa karakteristikama ispitivanog proizvoda i ciljevima istraživanja, te su posedovali sposobnost razlikovanja senzorno uočljivih razlika između analiziranih uzoraka. Ocena je obuhvatila sledeće kvalitativne parametre: boju, miris, ukus i ukupnu prihvatljivost proizvoda. Senzorna analiza sprovedena je u prostoriji sa kontrolisanim uslovima, koja je obezbeđivala neutralno osvetljenje, stabilnu temperaturu (25 °C), adekvatnu ventilaciju, čistoću i minimalan nivo buke. Uzorci su

pripremani na identičan način, servirani na odgovarajućoj temperaturi i posluženi u posudama obeleženim trocifrenim šiframa radi obezbeđivanja objektivnosti ocenjivanja. Između ocenjivanja pojedinačnih uzoraka, učesnici su koristili vodu kao sredstvo za čišćenje nepca i pravili kratke pauze. Uzorci sa prosečnom ocenom 3 smatrani su umereno prihvatljivim, odnosno predstavljali su granicu prihvatljivosti, dok su uzorci sa nižim ocenama okarakterisani kao proizvodi sa izraženim senzornim nedostacima (Moreira i sar. 2015).

6.4.5 Određivanje gubitka mase sveže sečene jabuke sa jestivim premazom

Masa uzoraka sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom 14 dana skladištenja na +4 °C određena je merenjem mase uzoraka korišćenjem analitičke vage (E plorer, Ohaus, Švajcarska). Merenje je izvršeno odmah nakon pripreme uzoraka (dan 0), a zatim nakon 1, 3, 7, 10 i 14 dana skladištenja. Razlika u masi, izražena kao procenat početne mase uzorka, predstavlja gubitak mase tokom skladištenja i izračunata je prema sledećoj formuli:

$$\left(\frac{m_0 - m_t}{m_0} \right) \cdot 100 \quad (6.4)$$

gde je: m_0 – težina uzorka jabuke početnog dana; m_t – težina uzorka jabuke nakon određenog vremena skladištenja na +4 °C.

6.4.6 Merenje pH vrednosti i titracione kiselosti sveže sečene jabuke sa jestivim premazom

Uzorci sveže sečene jabuke za analizu su homogenizovani u mlinu (Heinner HCG-150SS, Bucharest, Romania), a zatim je 10 g mlevene jabuke pomešano sa 100 ml destilovane vode i dobijena smeša je filtrirana. Aktuelni aciditet, odnosno pH vrednost tako dobijenog filtriranog rastvora je izmeren pomoću pH metra (Violab pH 50, Giorgio Bormac, Italija).

U cilju određivanja titracione kiselosti (% T.A.) izvršena je titracija ovog filtriranog rastvora sa 0,1 mol/dm³ NaOH do postizanja pH vrednosti 8,2. Titraciona kiselost izračunata je pomoću formule:

$$\frac{V_{NaOH} \cdot M_{NaOH}}{W} \cdot E \quad (6.5)$$

gde je: V_{NaOH} – zapremina utrošenog NaOH koncentracije 0,1 mol/dm³, M_{NaOH} – molarna masa NaOH, E - ekvivalentna težina jabučne kiseline, W – težina uzorka.

6.4.7 Određivanje sadržaja malondialdehida

Određivanje sadržaja malondialdehida (mg/kg) je izvršeno prema modifikovanoj metodi koju su prethodno opisali Dordevic i saradnici (2024). Uzorak od 3 g sečene jabuke je izmeren, homogenizovan mešanjem sa 15 ml 10% trihlorsirćetne kiseline i centrifugiran na 7000 o/min tokom 20 minuta u centrifugi (Biobase, TH16B, Šandong, Kina). Zapremina od 1 ml supernatanta je pomešana sa 3 ml 0,5% rastvora 2-tiobarbiturne kiseline i zagrevana 10 minuta na 95 °C. Uzorci su ohlađeni vodom, a apsorbancija je merena na 532 nm. Smeša od 1 ml 10% trihlorsirćetne kiseline i 3 ml 0,5% 2-tiobarbiturne kiseline je korišćena kao slepa proba. Korišćenjem kalibracione krive standardnog rastvora malondialdehida određuje se koncentracija u uzorku.

6.4.8 Mikrobiološka analiza sveže sečene jabuke sa jestivim premazom

Za mikrobiološku analizu, 25 g uzorka jabuke dodato je u 225 ml sterilnog fiziološkog rastvora sa peptom (NaCl 0,8 g/l i pepton 1 g/l) i temeljno homogenizovano. Alikvot od 1 ml odgovarajućeg razblaženja prenet je u sterilnu Petrijevu posudu i preleven odgovarajućim selektivnim hranljivim medijumom. Ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija i psihrofilnih bakterija određen je na hranljivom agaru, uz inkubaciju 48 h na 30 °C, odnosno 5 dana na 7 °C, redom. Broj kvasaca i plesni određen je na Sabouraud maltoznom agaru nakon inkubacije 72 h na temperaturi od 25 °C. Nakon inkubacije, izrasle kolonije su prebrojane, a dobijeni rezultati izraženi su kao decimalni logaritam i predstavljeni kao log CFU/g. Određivanje prisustva *Listeria* spp., *E. coli* i *Salmonella* spp. izvršeno je zasejavanjem osnovnog razblaženja na podloge Agar *Listeria* prema Ottaviani i Agosti, Cromogenic *E. coli* agar i Wilson Blair agar, redom. Svi eksperimenti su izvedeni u tri ponavljanja.

6.5 Statistička obrada i optimizacija podataka

Za pouzdanu interpretaciju i unapređenje procesa izdvajanja etarskog ulja primenjene su odgovarajuće metode statističke analize i optimizacije.

6.5.1 Statistička analiza eksperimentalnih podataka

Analiza podataka je sprovedena jednosmernom ANOVA-om praćenom Tukeyjevim HSD testom. Za varijable koje nisu zadovoljavale pretpostavku normalnosti primenjeni su Kruskal–Volisov test i post-hoc Dunnov test. U svim analizama korišćen je nivo značajnosti $p < 0,05$.

6.5.2 Statistička optimizacija procesa hidrodestilacije

Optimizacija prinosa etarskog ulja lavande iz celih cvetova izvedena je istorijskim eksperimentalnim dizajnom sa tri faktora: odnos vode i cveta, zapremina destilacionog suda i brzina destilacije (zagrevanja). Prvi i treći faktor ispitani su na tri nivoa, a drugi na četiri nivoa. Svi eksperimenti izvedeni su u duplikatu i nasumičnim redosledom. Faktori i nivoi prikazani su u tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Procesni faktori i odgovarajući nivoi za statističku optimizaciju

Procesni faktori	Oznaka	Aktuelni nivoi
Odnos vode i cveta (ml/g)	X_1	10, 15 i 20
Zapremina destilacionog suda (ml)	X_2	250, 500, 1000 i 2000
Brzina destilacije (ml/min)	X_3	od 0,6 to 8,0

Kombinovanjem istorijskog eksperimentalnog dizajna i metode odzivnih površina razvijen je linearni model koji povezuje prinos etarskog ulja lavande (Y) sa odnosom vode i cveta (X_1), zapreminom destilacionog suda (X_2) i brzinom destilacije (X_3):

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (6.6)$$

gde su b_0 i b_i ($i = 1, 2, 3$) odsečak i koeficijenti linearne regresije, redom. Statistička značajnost modela, pojedinačnih procesnih faktora i uspešnost predviđanja modelom procenjeni su analizom varijanse (ANOVA).

Linearni model je korišćen za određivanje optimalnih vrednosti faktora procesa koje obezbeđuju maksimalan prinos etarskog ulja lavande. Analiza eksperimentalnih podataka sprovedena je pomoću softvera Design-Expert 7.0 (Stat-Ease Inc., Minneapolis, Minnesota). Performanse modela procenjene su pomoću više statističkih kriterijuma, uključujući koeficijente determinacije (R^2 , R_{adj}^2 i R_{pred}^2), stepen neprilagođenosti modela, adekvatna preciznost ($Adeq.Prec.$) i srednje relativno procentualno odstupanje ($MRPD$).

6.6 Modelovanje kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Za modelovanje kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande korišćeno je pet najčešće primenjivanih modela, prikazanih u tabeli 3.2. Parametri za svaki od korišćenih kinetičkih modela izračunati su na osnovu eksperimentalnih vrednosti prinosa etarskog ulja, korišćenjem nelinearne regresije i softvera R-Project, verzija 4.4.1 (R Foundation for Statistical Computing, Beč, Austrija).

Srednje relativno procentualno odstupanje (*MRPD*) između predviđenih i stvarnih vrednosti prinosa etarskog ulja i koeficijent determinacije (*R*) korišćeni su za procenu adekvatnosti modela:

$$MRPD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|q_i - q_{m,i}|}{q_i} \quad (6.7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \quad (6.8)$$

gde je: $\bar{q}$ – srednja vrednost eksperimentalnih podataka, q_i – eksperimentalna vrednost i $q_{m,i}$ – vrednost predviđena matematičkim modelom.

Za odabir najboljeg modela među pet razmatranih korišćen je Akaikeov informacioni kriterijum (AIC), koji omogućava poređenje modela zasnovanih na istom skupu podataka, ali s različitim brojem parametara. AIC ne daje apsolutnu vrednost kvaliteta modela, već procenjuje grešku predviđanja i relativni kvalitet svakog modela u poređenju sa drugim modelima. AIC je definisan prema sledećoj formuli:

$$AIC = 2\log(L) + 2K \quad (6.9)$$

gde je: L – maksimalna vrednost funkcije verovatnoće, a K – broj parametara modela.

Ako istraživanje uključuje mali broj podataka, tj. $n/K < 40$, preporučuje se korišćenje korigovanog AIC broja:

$$AICc = AIC + \frac{2K(K+1)}{n-K-1} \quad (6.10)$$

gde je: n – veličina skupa podataka.

7. REZULTATI I DISKUSIJA

7.1 Konvencionalna hidrodestilacija

7.1.1 Predtretman biljnog materijala i modifikacija destilacione vode

Biljni materijal za hidrodestilaciju etarskog ulja lavande pripreman je primenom različitih metoda predtretmana: suvo i mokro mlevenje i prosejavanje nakon suvog mlevenja. Tako obrađen materijal korišćen je neposredno po pripremi ili čuvan u papirnim kesama, na suvom i tamnom mestu, do izvođenja destilacije. Pored toga, u okviru sekvencijalnih hidrodestilacija biljni materijal je podvrgavan ultrazvučnom predtretmanu neposredno pre izvođenja konvencionalne ili mikrotalasne hidrodestilacije.

U cilju ispitivanja uticaja predtretmana na prinos etarskog ulja, korišćeni su sledeći uzorci cvetova lavande:

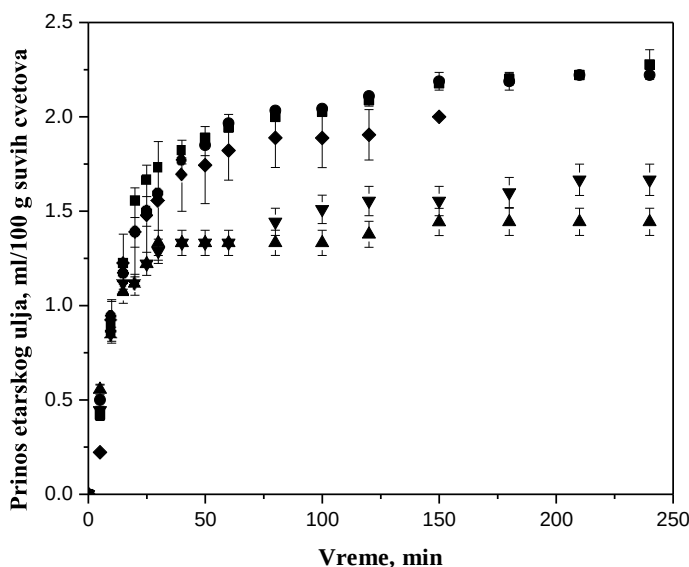
- celi (nemleveni),
- mokro mleveni,
- suvo mleveni (neprosejani) neposredno pre destilacije,
- suvo mleveni i prosejani (<1,0 mm) neposredno pre destilacije,
- suvo mleveni i prosejani (<1,0 mm), čuvani do destilacije, i
- cvetovi tretirani ultrazvukom neposredno pre destilacije (opisano u poglavlju 6.1.2.3).

Destilaciona voda je modifikovana dodatkom soli, surfaktanta i VFHD. Ranije studije ukazuju na pozitivan uticaj soli NaCl i KCl (Chekoual i sar. 2018a, Filly i sar. 2016, Hadri i sar. 2023, Yu i sar. 2013), surfaktanta Tween 40 (Filly i sar. 2016) i VFHD (Stanojević i sar. 2011) na ekstrakciju etarskog ulja iz cveta lavande. Na osnovu ovih saznanja, u ovom istraživanju destilovanoj vodi su dodavane pomenute soli i surfaktant ili je deo sveže destilovane vode zamenjen sa VFHD, kako bi se procenio njihov uticaj na prinos etarskog ulja hidrodestilacijom.

7.1.1.1 Uticaj mlevenja na prinos etarskog ulja lavande

Slika 7.1 pokazuje uticaj vrste mlevenja i prosejavanja na prinos etarskog ulja u destilacionom sudu zapremine 1000 ml, pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml i brzini destilacije

7,0 ml/min. Rezultati pokazuju da prinos etarskog ulja, nezavisno od vrste mlevenja i prosejavanja, raste tokom hidrodestilacije, što ukazuje na efikasniju ekstrakciju pri dužem trajanju. Uočavaju se dve faze procesa: početno brzo „ispiranje“ etarskog ulja sa površine cvetnih čestica i kasnija sporija difuzija etarskog ulja iz unutrašnjosti cvetnih čestica ka spoljašnjoj površini. Ovaj mehanizam istovremenog ispiranja i difuzije karakterističan je za hidrodestilaciju etarskih ulja (Milojević i sar. 2013, Perović i sar. 2024). Podaci sugerišu da se značajan deo etarskog ulja ekstrahuje tokom faze ispiranja zbog strukturnih karakteristika cveta lavande.



Slika 7.1 Uticaj vrste mlevenja i primene prosejavanja suvo samlevenih cvetova lavande na hidrodestilaciju etarskog ulja: celi (nemleveni) – ●, suvo mleveni, prosejani, upakovani u papirnu kesu i čuvani na suvom, tamnom mestu do hidrodestilacije – ▲, suvo mleveni i prosejani neposredno pre hidrodestilacije – ▼, suvo mleveni, neprosejani, neposredno pre hidrodestilacije – ■, i mokro mleveni – ◆ (količina cveta 35 g, odnos količine cveta i vode 1:10 g/ml, zapremina destilacionog suda 1000 ml, brzina destilacije 6,95 ml/min i sito prečnika 1,0 mm)

Tabela 7.1 prikazuje maksimalne prinose etarskog ulja u zavisnosti od primenjenog predtretmana. Hidrodestilacijom celih (nemlevenih) cvetova, mokro mlevenih cvetova i suvih (neprosejanih) cvetova neposredno pre destilacije dobijen je prinos od oko 2,2 ml/100 g suvih cvetova. Nasuprot tome, suvo mleveni i prosejani cvetovi čuvani do destilacije dali su prinos od 1,44 ml/100 g suvih cvetova, dok je suvo mleveni i prosejani materijal neposredno pre destilacije dao 1,65 ml/100 g suvih cvetova. Ovi rezultati ukazuju da suvo mlevenje i prosejavanje smanjuju maksimalni prinos etarskog ulja za 26–35% u poređenju sa celim ili mokro mlevenim cvetovima. Sličan negativan efekat mlevenja ranije je potvrđen i kod turbohidrodestilacije (Filly i sar. 2016), što

se objašnjava gubicima etarskog ulja tokom samog procesa mlevenja i prosejavanja. Smanjenje prinosa može se povezati sa lokalizacijom sekretornih žlezda (trihoma), u kojima se sintetišu i skladište etarska ulja, a koje se nalaze pretežno na površini cvetova. Ovakav raspored olakšava ekstrakciju etarskog ulja tokom hidrodestilacije. Labri i sar. (2022) su pokazali da kod biljaka sa sekretornim mestima blizu površine, kao što su *Lavandula stoechas* i *Carum carvi*, stepen mlevenja nema značajan uticaj na efikasnost ekstrakcije. Na osnovu ovih rezultata preporučuje se upotreba celih cvetova lavande za hidrodestilaciju etarskog ulja. Takav pristup ne samo da eliminiše dodatne troškove i gubitke povezane sa mlevenjem i prosejavanjem, već i skraćuje ukupno vreme procesa proizvodnje.

Tabela 7.1 Uticaj predtretmana mlevenjem na prinos etarskog ulja lavande

Predtretman	Maksimalni prinos etarskog ulja, ml/100 g suvih cvetova	Poređenje sa celim cvetovima, %
Bez predtretmana (celi cvetovi)	2,22 ± 0,00	100,0
Mokro mlevenje	2,20 ± 0,01	99,1
Suvo mlevenje (bez prosejavanja) neposredno pre hidrodestilacije	2,22 ± 0,02	100,0
Suvo mlevenje i prosejavanje neposredno pre hidrodestilacije	1,64 ± 0,03	73,9
Suvo mlevenje, prosejavanje i čuvanje u papirnoj kesi na suvom i tamnom mestu pre hidrodestilacije	1,44 ± 0,00	64,9

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija. Procesni uslovi: destilacioni sud 1000 ml, količina cveta 35 g, odnos cveta i vode 1:10 g/ml i brzina destilacije 7,00 ± 0,17 ml/min.

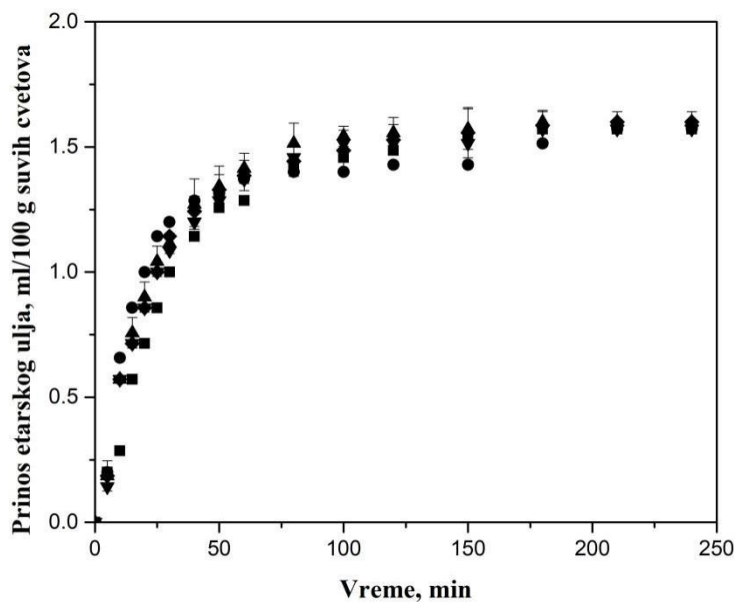
7.1.1.2 Uticaj vrste i koncentracije soli na prinos etarskog ulja lavande

Poznato je da određene neorganske soli mogu izazvati tzv. efekat „isoljavanja“, čime se povećava efikasnost hidrodestilacije etarskih ulja usled porasta polariteta rastvarača (Yang i sar. 2022). Na taj način olakšava se izdvajanje hidrofilnih jedinjenja iz vodene faze. Istovremeno, prisustvo soli može narušiti integritet sekretornih žlezda u kojima se skladišti etarsko ulje, što pogoduje njegovom oslobađanju tokom procesa. Dodatno, dodavanje soli podiže tačku ključanja rastvora, čime se ubrzava prenos mase i toplote tokom hidrodestilacije (Suryanti i sar. 2023). Međutim, rezultati ovog istraživanja (slika 7.2 i tabela 7.2) pokazuju da NaCl i KCl, primenjeni u

koncentracijama od 3–10%, nisu značajno uticali na maksimalni prinos etarskog ulja dobijenog hidrodestilacijom celih cvetova lavande, koji je u proseku iznosio $1,59 \pm 0,02$ ml/100 g suvih cvetova.

U ispitivanom sistemu hidrodestilacije celih cvetova lavande, dodatak NaCl ili KCl (3–10%) ne utiče na maksimalni prinos etarskog ulja niti na raspodelu etarskog ulja između isparljive i difuzione frakcije ($f_w \approx 0,82$), kako je pokazano u odeljku 7.1.6.2. Za dati biljni materijal, vrednost parametra f_w određuje raspodelu kinetičkih doprinosa, ali ne menja ukupnu količinu dostupnog ulja. Budući da se f_w ne menja u prisustvu soli, jasno je da ekstrakcioni potencijal biljnog matriksa ostaje neizmenjen, što objašnjava odsustvo promene maksimalnog prinosa. Ovi rezultati ukazuju da je pri izabranim procesnim uslovima ograničavajući korak pretežno povezan sa oslobađanjem ulja iz sekretornih struktura i transportom kroz biljni matriks, dok je doprinos rastvorljivosti ulja u vodenoj fazi, na koji primarno utiče efekat „isoljavanja“, sekundarnog značaja. Dodatno, s obzirom na to da je brzina destilacije održavana praktično konstantnom u svim tretmanima, potencijalni efekat povišenja tačke ključanja slanog rastvora nije rezultovao povećanjem ukupnog izdvajanja, već se reflektuje isključivo na kinetičke parametre procesa. Naime, prisustvo soli dovodi do smanjenja konstante brzine ispiranja (k_w) i istovremenog povećanja konstante difuzione faze (k_d), što ukazuje na redistribuciju kinetičkih doprinosa između brze i spore faze bez promene ukupnog prinosa. Takvo ponašanje potvrđuje da dodatak soli menja dinamiku prenosa mase, ali ne i termodinamički dostupnu količinu etarskog ulja. Ovi rezultati sugerišu da je u ispitivanom sistemu limitirajući korak vezan za strukturu biljnog matriksa, dok je efekat rastvorljivosti u vodenoj fazi sekundarnog značaja.

Za razliku od rezultata koje navode Yang i sar. (2022) i Suryanti i sar. (2023), gde je uočeno povećanje efikasnosti ekstrakcije etarskog ulja u prisustvu soli, u tim sistemima korišćeni su drugačiji matriksi (sveži listovi) i tehnike (mikrotalasna hidrodestilacija), pri čemu je dolazilo do intenzivnijeg unutrašnjeg zagrevanja i brže destabilizacije ćelijskih struktura. U takvim uslovima efekat „isoljavanja“ je mogao postati kinetički i termodinamički relevantan. U slučaju konvencionalne hidrodestilacije celih cvetova lavande, proces je dominantno matriks-kontrolisan, pa fazna raspodela ulje–voda nema presudan uticaj na konačni prinos.



Slika 7.2 Uticaj vrste i koncentracije soli na hidrodestilaciju etarskog ulja iz celih cvetova lavande: kontrola (voda, bez soli) – ●; NaCl: 5% – ▲ i 10% – ▼; i KCl: 3% – ■ i 5% – ◆ (destilacioni sud: 1000 ml, količina cveta: 35 g, odnos cveta i vode: 1:10 g/ml i brzina destilacije: $6,46 \pm 0,12$ ml/min)

Tabela 7.2 Uticaj vrste i koncentracije soli na prinos etarskog ulja lavande

Predtretman	Brzina destilacije, ml/min	Maksimalni prinos etarskog ulja, ml/100 g suvih cvetova
Voda	$6,68 \pm 0,82$	$1,92 \pm 0,38$
KCl, 3%	$6,63 \pm 0,00$	$1,57 \pm 0,00$
KCl, 5%	$6,37 \pm 0,11$	$1,60 \pm 0,04$
NaCl, 5%	$6,44 \pm 0,06$	$1,60 \pm 0,04$
NaCl, 10%	$6,53 \pm 0,00$	$1,57 \pm 0,00$

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost $\pm$ standardna devijacija; Procesni uslovi: destilacioni sud 1000 ml, količina cveta 35 g, odnos cveta i vode 1:10 g/ml i brzina destilacije $6,46 \pm 0,12$ ml/min.

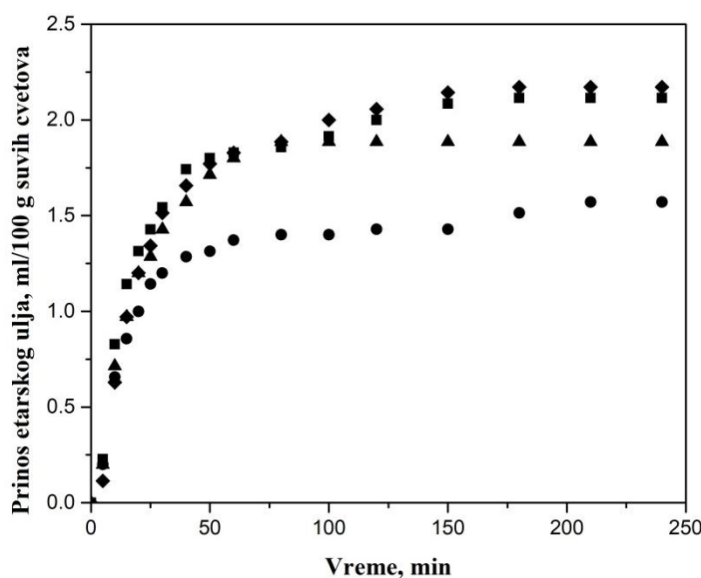
7.1.1.3 Uticaj surfaktanta na prinos etarskog ulja lavande

Prethodna istraživanja pokazala su da dodatak 10% Tween 40 pri hidrodestilaciji povećava prinos etarskog ulja iz cvetova lavande (*L. hybrida* L.) za oko 7% u poređenju sa konvencionalnom metodom (Filly i sar. 2016). Ovaj efekat objašnjava se smanjenjem površinskog napona između etarskog ulja prisutnog na površini cvetova i VFHD. Pored toga, molekuli surfaktanta omogućavaju veću rastvorljivost hidrofobnih jedinjenja u vodi (Baydar i sar. 2005). Međutim, u ovom istraživanju, dodatak Tween 40 destilovanoj vodi u koncentracijama od 5% i 10% (pri odnosu cveta i vode

1:10 g/ml u destilacionom sudu 1000 ml) doveo je, odmah po početku ključanja, do intenzivnog penušanja i sifoniranja suspenzije u Klevendžerov aparat. Zbog toga su eksperimenti morali biti prekinuti.

7.1.1.4 Uticaj VFHD na prinos etarskog ulja lavande

Slika 7.3 i tabela 7.3 prikazuju uticaj upotrebe mešavine VFHD iz prethodne hidrodestilacije i sveže destilovane vode na maksimalni prinos etarskog ulja lavande. Prinos etarskog ulja je porastao sa $1,58 \pm 0,02$ ml/100 g suvih cvetova u prvoj šarži, kada je korišćena samo destilovana voda, na približno $2,04 \pm 0,10$ ml/100 g suvih cvetova u narednim šaržama (četvrta i peta), što predstavlja značajno povećanje od 29%. Ovo poboljšanje se pripisuje prisustvu dodatnih hidrofilnih jedinjenja u smeši VFHD – voda, prenetih iz prethodnih ciklusa hidrodestilacije (Stanojević i sar. 2011).



Slika 7.3 Uticaj kombinovanja VFHD i vode na prinos etarskog ulja iz celih cvetova lavande u pet uzastopnih šarži: prva šarža (voda) – o, druga šarža – ●, treća šarža – ▲, četvrta šarža – ■, peta šarža – ◆ (zapremina destilacionog suda: 1000 ml, količina cveta: 35 g, zapremina VFHD: 267 ± 3 ml, odnos cveta i vode: 1:10 g/ml, i brzina destilacije: $6,57 \pm 0,14$ ml/min)

Uočeni efekti mogu se objasniti različitim mehanizmima u okviru dve glavne faze hidrodestilacije: ispiranja i difuzije. Ispiranje podrazumeva brzo izdvajanje etarskog ulja sa površine cvetova, dostupnog vodenoj pari i neosetljivog na dodatak VFHD. Nasuprot tome, difuzija etarskog ulja iz unutrašnjih žlezda ka površini, zavisi od prodiranja vode u biljno tkivo i oslobađanja etarskog

ulja iz unutrašnjih struktura. VFHD, bogata prethodno ekstrahovanim hidrofilnim jedinjenjima, može unaprediti ovaj proces promenom osmotskog pritiska između biljnog tkiva i spoljašnjeg rastvora ili povećanjem polariteta rastvora (Trujillo-Echeverria i sar. 2020, Wu i sar. 2020, Zhang i sar. 2024b). Na taj način olakšava se razgradnja zidova žlezda i povećava dostupnost preostalog etarskog ulja. Pored toga, VFHD može delovati kao „prezasićeni“ rastvarač, čime se poboljšava rastvorljivost preostalih jedinjenja iz cvetova lavande.

Tabela 7.3 Uticaj kombinovanja VFHD i vode na maksimalni prinos etarskog ulja

Broj šarže	Maksimalni prinos etarskog ulja, ml/100 g suvih cvetova	Povećanje prinosa, %
I šarža (voda)	1,57 ± 0,00	100,0
II šarža	1,89 ± 0,00	120,4
III šarža	1,89 ± 0,00	120,4
IV šarža	2,11 ± 0,00	134,4
V šarža	2,17 ± 0,00	138,2
	2,14 ± 0,04 ^a	128,4

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija; ^a Srednja vrednost za IV i V šaržu.

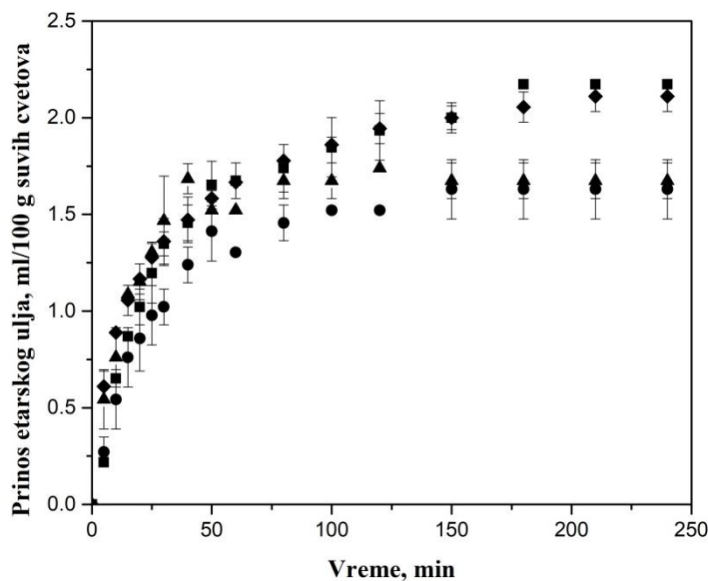
7.1.2 Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima

Proces hidrodestilacije etarskog ulja lavande odlikuje se visokom osetljivošću na promene operativnih uslova, pri čemu se zapremina destilacionog suda, odnos cveta i vode, kao i brzina zagrevanja i destilacije izdvajaju kao ključni parametri koji određuju kinetiku oslobađanja isparljivih jedinjenja, ukupni prinos i efikasnost ekstrakcije. Razumevanje njihovog pojedinačnog i međusobnog uticaja predstavlja osnovu za optimizaciju procesa, budući da ovi faktori direktno oblikuju termodinamičke i transportne mehanizme tokom destilacije, kvalitet dobijenog etarskog ulja i ukupnu energetska efikasnost. U skladu s tim, slike 7.4, 7.5 i 7.6 prikazuju zavisnost prinosa etarskog ulja lavande od navedenih operativnih parametara.

7.1.2.1 Uticaj zapremine destilacionog suda na prinos etarskog ulja

Slika 7.4 prikazuje promene u prinosu etarskog ulja lavande tokom vremena pri različitim zapreminama destilacionog suda (250 ml, 500 ml, 1000 ml i 2000 ml), uz konstantnu brzinu

destilacije ($2,51 \pm 0,23$ ml/min) i odnos cveta i vode 1:10 g/ml. Uočava se da maksimalni prinos etarskog ulja raste s povećanjem zapremine destilacionog suda. Tabela 7.4 detaljno prikazuje uticaj zapremine destilacionog suda na maksimalni prinos etarskog ulja u ovim uslovima. Povećana zapremina destilacionog suda omogućava unos većih količina biljnog materijala i vode, čime se povećava kapacitet generisanja pare i efikasnost ekstrakcije. Veći destilacioni sud takođe obezbeđuje veće koncentracije etarskog ulja u parnoj fazi i, posledično, veći prinos nakon kondenzacije. Statistička analiza pokazuje da zapremina pare značajno utiče na prinos etarskog ulja iz nadzemnih delova *Lavandula stoechas* i *Carum carvi* (Labri i sar. 2022). Pored toga, veći destilacioni sud doprinosi ravnomernijoj raspodeli toplote kroz suspenziju, smanjujući rizik od lokalnog pregrevanja koje može izazvati razgradnju etarskih ulja i smanjenje prinosa.



Slika 7.4 Uticaj zapremine destilacionog suda na hidrodestilaciju etarskog ulja iz celih cvetova lavande: 250 ml – ●, 500 ml – ▲, 1000 ml – ■ i 2000 ml – ◆ (odnos cveta i vode: 1:10 g/ml; brzina destilacije $2,51 \pm 0,23$ ml/min)

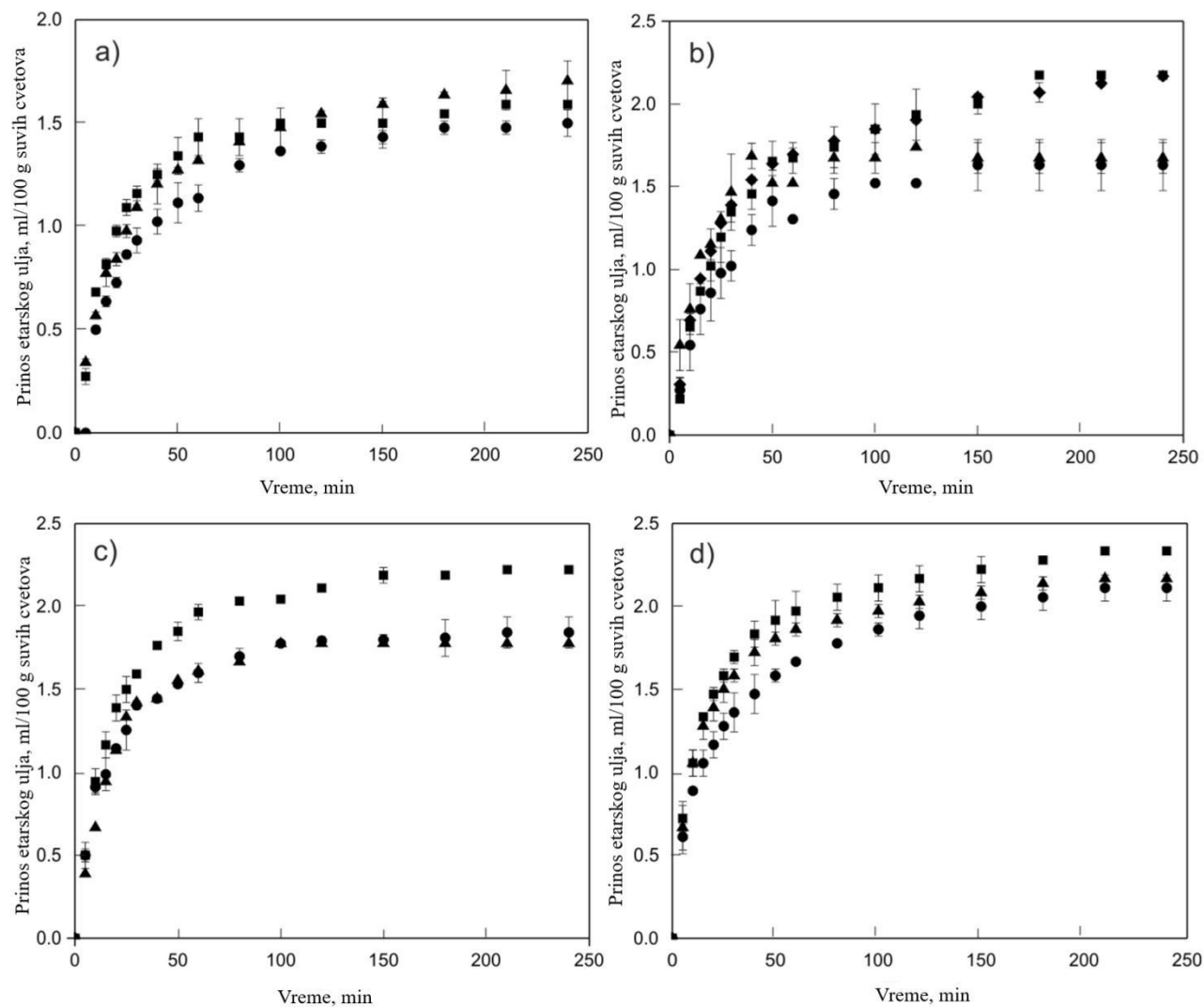
Tabela 7.4 Uticaj zapremine destilacionog suda na maksimalni prinos etarskog ulja iz celih cvetova lavande pri odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml

Zapremina destilacionog suda, ml	Brzina destilacije, ml/min	Prinos etarskog ulja lavande, ml/100 g suvih cvetova	Poređenje sa destilacionim sudom od 2000 ml, %
250	$2,75 \pm 0,17$	$1,59 \pm 0,23$	76,1
500	$2,94 \pm 0,04$	$1,67 \pm 0,07$	79,9
1000	$2,25 \pm 0,26$	$1,84 \pm 0,07$	88,0
2000	$2,31 \pm 0,01$	$2,09 \pm 0,06$	100,0

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost $\pm$ standardna devijacija

7.1.2.2 Uticaj brzine destilacije na prinos etarskog ulja

Slika 7.5 prikazuje varijacije u prinosu etarskog ulja lavande tokom hidrodestilacije pri različitim brzinama destilacije od $2,31 \pm 0,01$ ml/min do $7,33 \pm 0,03$ ml/min, korišćenjem destilacionih sudova zapremine 250 ml, 500 ml, 1000 ml i 2000 ml i pri odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml.



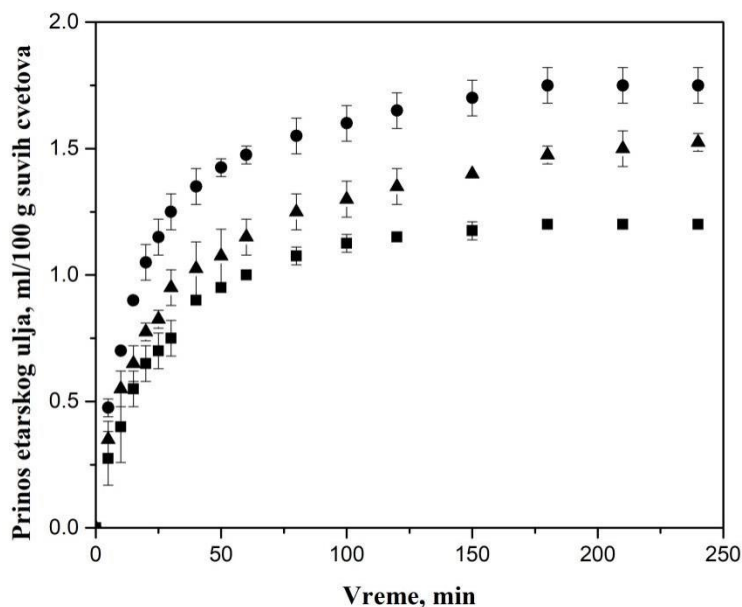
Slika 7.5 Uticaj brzine destilacije na hidrodestilaciju etarskog ulja iz celih cvetova lavande u destilacionim sudovima različitih zapremina: (a) 250 ml, (b) 500 ml, (c) 1000 ml i (d) 2000 ml (odnos cveta i vode 1:10 g/ml; najmanja brzina – ●, srednja brzina – ▲, najveća brzina – ■)

Rezultati pokazuju da brzina zagrevanja značajno utiče na dinamiku i prinos ekstrakcije. Povećanje brzine zagrevanja ubrzava destilaciju i povećava prinos etarskog ulja, jer brži porast

temperature pospešuje isparavanje etarskog ulja, razgradnju ćelijskih zidova i prelazak isparljivih jedinjenja u parnu fazu. Time se proces hidrodestilacije skraćuje, smanjuje rizik od termičke degradacije i smanjuje mogućnost reapsorpcije etarskog ulja u biljni materijal. Nasuprot tome, slabije zagrevanje dovodi do sporije početne destilacije etarskog ulja usled nedovoljnog unosa energije potrebnog za oslobađanje isparljivih jedinjenja iz biljnog materijala. Sličan efekat je zabeležen i tokom hidrodestilacije etarskog ulja eukaliptusa, gde produženo trajanje procesa praćeno manjom efikasnošću ekstrakcije dovodi do smanjenja ukupne produktivnosti (Lainez-Cerón i sar. 2021). Preterano visoka brzina zagrevanja, iako nije primećeno u ovom opsegu uslova, može dovesti do brzog ključanja vode i potencijalno izazvati gubitak najisparljivijih frakcija i termičku degradaciju, menjajući hemijski sastav i smanjujući kvalitet etarskog ulja, što se nije desilo u primenjenim opsezima procesnih faktora ove studije. Stoga je optimizacija brzine zagrevanja ključna ne samo za maksimiziranje prinosa, već i za očuvanje kvaliteta etarskog ulja.

7.1.2.3 Uticaj odnosa cvet-voda na prinos etarskog ulja

Slika 7.6 prikazuje varijacije u prinosu etarskog ulja lavande pri različitim odnosima cveta i vode (1:10 – 1:20 g/ml), korišćenjem destilacionog suda od 2000 ml i pri brzini destilacije od $7,78 \pm 0,48$ ml/min. Niži odnos cveta i vode ubrzava početnu brzinu destilacije i povećava prinos, jer koncentrovanija suspenzija olakšava isparavanje etarskog ulja. Suprotno tome, viši odnos obezbeđuje veću zapreminu vode koja potpomaže isparavanje etarskog ulja, ali preterano razblaživanje smanjuje njegovu koncentraciju u parnoj fazi i time ukupan prinos (Stanojević i sar. 2011). Premalo vode, s druge strane, može da izazove nepotpunu ekstrakciju zbog nedovoljnog potapanja biljnog materijala, kao i rizik od zagorevanja, što dovodi do gubitka etarskog ulja i nepoželjnih aroma (Perović i sar. 2025b).



Slika 7.6 Varijacije prinosa etarskog ulja lavande u procesu hidrodestilacije iz celih cvetova u sudu za destilaciju od 2000 ml pri različitim odnosima cveta i vode: 1:10 g/ml – ●, 1:15 g/ml – ▲ i 1:20 g/ml – ■ (brzina destilacije: 2,3 – 3,0 ml/min)

Tabela 7.5 prikazuje uticaj odnosa cveta i vode i brzine destilacije na maksimalni prinos etarskog ulja. Negativni efekti višeg odnosa objašnjavaju se smanjenjem specifične snage grejanja (snage po jedinici mase suspenzije) i većim rastvaranjem hidrofilnih komponenti etarskog ulja lavande u cvetnoj vodi, umesto njihovim prelaskom u parnu fazu (Perović i sar. 2021). Kada je povećan odnos cveta i vode pri istoj ulaznoj snazi grejanja, specifična snaga grejanja se smanjuje, proces destilacije se usporava, a prinos etarskog ulja opada.

Tabela 7.5 Uticaj odnosa cveta i vode i brzine destilacije na maksimalni prinos etarskog ulja lavande

Odnos cveta i vode, g/ml	Brzina destilacije, ml/min	Prinos etarskog ulja lavande, ml/100 g suvih cvetova	Procenat u odnosu na najveći prinos etarskog ulja lavande, %
1:10	2,31 ± 0,01	1,90 ± 0,06	97,4
	4,21 ± 0,32	1,75 ± 0,06	89,7
	7,48 ± 0,11	1,95 ± 0,00	100,0
1:15	3,07 ± 0,03	1,51 ± 0,05	77,6
	5,17 ± 0,27	1,54 ± 0,03	78,8
	8,37 ± 0,12	1,50 ± 0,00	76,9
1:20	3,03 ± 0,21	1,20 ± 0,00	61,5
	5,39 ± 0,40	1,28 ± 0,03	65,4
	7,69 ± 0,18	1,33 ± 0,09	67,9

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija

Na osnovu ovih rezultata zaključeno je da odnos cveta i vode 1:10 g/ml obezbeđuje najveću početnu brzinu destilacije i najviši prinos etarskog ulja lavande. Manji odnosi nisu ispitivani, jer nisu omogućavali potpuno potapanje biljnog materijala i formiranje odgovarajuće suspenzije. Najveći prinos je ostvaren upravo pri ovom odnosu, uz najveću brzinu destilacije ($7,33 \pm 0,03$ ml/min), pri čemu je postignuta i znatno brža početna ekstrakcija etarskog ulja u poređenju sa ostalim radnim uslovima.

7.1.3 Hemijski sastav etarskog ulja dobijenog različitim vrstama predtretmana

U tabeli 7.6 prikazan je hemijski sastav etarskih ulja lavande dobijenih u različitim uslovima hidrodestilacije, uključujući predtretman različitim solima (KCl ili NaCl) i upotrebu VFHD iz prethodnih hidrodestilacija kao dela destilacionog medijuma u kombinaciji sa svežom destilovanom vodom u pet uzastopnih hidrodestilacija. Primeri GC/MS hromatograma etarskih ulja lavande dobijenih pri različitim uslovima predtretmana dati su u prilogu (Slike P7.1, P7.2 i P7.3). U svim uzorcima etarskih ulja detektovano je ukupno 62 jedinjenja, od kojih je 60 identifikovano. Glavna grupa identifikovanih jedinjenja su oksidovani monoterpeni (84,13–86,40%), a zatim slede seskviterpeni (4,60–5,68%). Kao glavne komponente u svim uzorcima etarskih ulja pojavljuju se linalol (30,91–33,02%), linalil acetat (16,77–20,41%), lavandulil acetat (6,32–6,87%), dok su 1-okten-3-il acetat i terpinen-4-ol bili prisutni u ukupnim procentima iznad 3% u svim analiziranim uzorcima.

Analiza je pokazala da vrsta soli koja se koristi tokom predtretmana nema značajan uticaj na većinu identifikovanih jedinjenja u uzorcima etarskog ulja. Međutim, tretman solima je značajno uticao na procentni sadržaj određenih jedinjenja sa kiseonikom, kao što su linalol i 1-okten-3-il acetat. Kada se cvetovi lavande tretiraju solju pre destilacije, rezultujuće blago povećanje tačke ključanja vodenog rastvora moglo bi da olakša efektivno isparavanje komponenti etarskog ulja sa višim tačkama ključanja. Takođe, drugi mehanizmi koji mogu da objasne ove efekte odnose se na moguće formiranje vodoničnih veza između jona soli i oksigenovanih jedinjenja, koje pospešuju njihov transfer iz biljnog matriksa u medijum za destilaciju, i „efekat isolvavanja“, koji smanjuje rastvorljivost kiseonikovih jedinjenja u vodi i povećava njihovu efikasnost destilacije (Lei i sar. 2020). Prisustvo Na^+ jona blago je povećalo udeo monoterpena, kao što su *o*- i *p*-cimen, limonen i 1,8-cineol. Nasuprot tome, α -terpinen i *p*-cimen nisu prisutni u uzorku dobijenom hidrodestilacijom sa destilovanom vodom, bez dodavanja VFHD iz prethodnih ciklusa destilacije (kontrolni uzorak). S

druge strane, linalol acetat i lavandulil acetat su pronađeni u nižim procentnim sadržajima u etarskim uljima dobijenim iz cvetova lavande tretiranih NaCl u poređenju sa kontrolnim uzorkom i etarskim uljima dobijenim od biljnog materijala tretiranog KCl. Ovi rezultati sugerišu da se efekat predtretmana različitim solima na efikasnost ekstrakcije specifičnih jedinjenja može pripisati prirodi i koncentraciji soli, kao i njihovim svojstvima jona (naelektrisanje, hidratacioni potencijal, rastvorljivost, odnos ili vrste) (Hassanpouraghdam i sar. 2012). Takođe je ranije potvrđeno da NaCl može smanjiti gubitak komponenti osetljivih na toplotu (Suryanti i sar. 2023).

Upotreba VFHD iz prethodnih hidrodestilacija kao dela destilacionog medijuma u narednim hidrodestilacijama može uticati na sastav etarskog ulja. Dodatak VFHD, koja već sadrži određenu količinu rastvorenih hidrofilnih komponenti iz etarskog ulja, utiče na polaritet sistema, utičući na proces ekstrakcije (Rao 2012, Stanojević i sar. 2011). Povećani polaritet dalje utiče na rastvorljivost i isparljivost jedinjenja etarskih ulja, utičući na komponente različitog polariteta i rastvorljivosti na različite načine (Trujillo-Echeverria i sar. 2020, Wu i sar. 2020, Zhang i sar. 2024b). Za linalol i linalil acetat, najzastupljenija jedinjenja u etarskom ulju lavande, dodavanje VFHD smanjuje njihov procentni sadržaj. Posle pet uzastopnih hidrodestilacija, sadržaj linalola blago opada za 4,4%, dok linalil acetat pokazuje izraženije smanjenje od 17,5%. Uočeno smanjenje procentnih sadržaja ovih jedinjenja može se pripisati dodatku VFHD, koja dovodi u sistem hidrofilne supstance, uglavnom oksigenovane monoterpene, iz prethodne destilacione šarže. Kada se dodaju destilovanoj vodi za sledeće šarže, ova rastvorena jedinjenja mogu uticati na difuziju i oslobađanje oksigenovanih monoterpena iz biljnog materijala, negativno utičući na prinos ovih jedinjenja (Perović i sar. 2025a). Udeo *cis*- i *trans*-linalol oksida se povećava sa dodatkom VFHD iz prethodnih hidrodestilacija, dostižući 30,0% i 38,5%, redom. Najveći sadržaj je primećen u etarskim uljima dobijenim ponovnim korišćenjem VFHD iz četvrte i pete hidrodestilacije. Takav rezultat sugerise da dodavanje VFHD može da poboljša uslove oksidacije linalola, što dovodi do stvaranja ovih proizvoda, dok se procentni sadržaj samog linalola smanjuje. Termolabilne komponente i komponente sklone oksidaciji, kao što su seskviterpeni, mogu se razgraditi usled produženog izlaganja uslovima destilacije. Međutim, iako je poznato da je kariofilen osetljivo i jedinjenje sklono oksidaciji, njegova oksidacija i razgradnja zahtevaju temperature iznad 170 °C (Lee i sar. 2021).

Tabela 7.6 Hemijski sastav etarskih ulja lavande dobijenih pri različitim uslovima hidrodestilacije, uključujući predtretman različitim solima (KCl ili NaCl) i upotrebu VFHD iz prethodnih hidrodestilacija kao dela destilacionog medijuma u kombinaciji sa svežom destilovanom vodom u pet uzastopnih hidrodestilacija.

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	VFHD					NaCl		KCl	
			I	II	III	IV	V	5%	10%	3%	5%
			Ukupni sadržaj, %					Ukupni sadržaj, %		Ukupni sadržaj, %	
n.i.	-	-	-	-	-	0,01 ± 0,01	-	-	-	-	-
α -Tujen	930	924,2	-	-	-	0,02 ± 0,01 ^a	0,02 ± 0,01 ^a	0,02 ± 0,01 ^a	-	-	-
α -Pinen	939	931,5	0,08 ± 0,03 ^{ab}	0,07 ± 0,07 ^{ab}	0,09 ± 0,04 ^{ab}	0,14 ± 0,03 ^a	0,14 ± 0,03 ^a	0,12 ± 0,02 ^{ab}	0,10 ± 0,03 ^{ab}	0,06 ± 0,05 ^c	0,07 ± 0,02 ^c
Kamfen	946	946,9	0,08 ± 0,02 ^a	0,10 ± 0,01 ^a	0,08 ± 0,03 ^a	0,11 ± 0,01 ^a	0,10 ± 0,01 ^a	0,06 ± 0,04 ^a	0,06 ± 0,04 ^a	0,09 ± 0,01 ^a	0,07 ± 0,01 ^a
n.i.	-	-	-	-	0,04 ± 0,02 ^a	0,04 ± 0,01 ^a	0,03 ± 0,03 ^a	-	-	-	-
β -Pinen	974	976	-	0,03 ± 0,02	-	-	-	-	-	-	-
1-Okten-3-ol	974	982,2	0,05 ± 0,04 ^a	0,06 ± 0,05 ^a	0,06 ± 0,05 ^a	0,06 ± 0,05 ^a	0,05 ± 0,04 ^a	0,06 ± 0,05 ^a	0,05 ± 0,04 ^a	0,05 ± 0,04 ^a	-
3-Oktanone	979	986,7	0,41 ± 0,04 ^a	0,47 ± 0,02 ^a	0,34 ± 0,10 ^a	0,45 ± 0,03 ^a	0,44 ± 0,03 ^a	0,43 ± 0,01 ^a	0,41 ± 0,05 ^a	0,41 ± 0,03 ^a	0,41 ± 0,04 ^a
Mircen	988	989,6	0,28 ± 0,09 ^{ab}	0,32 ± 0,06 ^a	0,26 ± 0,12 ^{ab}	0,38 ± 0,08 ^a	0,36 ± 0,07 ^a	0,31 ± 0,05 ^a	0,21 ± 0,02 ^b	0,25 ± 0,05 ^b	0,24 ± 0,06 ^b
Dehidroksi-trans-linalol oksid	991	991,2	-	-	-	0,11 ± 0,09 ^a	0,05 ± 0,04 ^a	0,12 ± 0,10 ^a	0,07 ± 0,05 ^a	-	-
Butil butanoat	993	993	0,15 ± 0,05 ^a	0,16 ± 0,04 ^a	0,14 ± 0,08 ^a	0,13 ± 0,11 ^a	0,20 ± 0,05 ^a	0,13 ± 0,11 ^a	0,15 ± 0,12 ^a	0,15 ± 0,06 ^a	0,15 ± 0,05 ^a
3-Oktanol	988	997,6	-	-	-	-	-	0,03 ± 0,03 ^a	-	-	0,03 ± 0,02 ^a
Dehidroksi-cis-linalol oksid	1006	1007,8	0,05 ± 0,01 ^a	0,05 ± 0,01 ^a	0,06 ± 0,02 ^{ab}	0,04 ± 0,03 ^a	0,10 ± 0,02 ^b	0,05 ± 0,04 ^a	0,07 ± 0,05 ^{ab}	0,07 ± 0,01 ^a	0,05 ± 0,01 ^a
Heksil acetat	1007	1011,3	0,69 ± 0,08 ^a	0,70 ± 0,10 ^a	0,51 ± 0,09 ^b	0,66 ± 0,08 ^{ab}	0,70 ± 0,05 ^a	0,74 ± 0,07 ^a	0,69 ± 0,04 ^a	0,69 ± 0,05 ^a	0,69 ± 0,07 ^a
α -Terpinen	1014	1016,7	-	-	-	-	-	0,04 ± 0,03 ^a	0,04 ± 0,03 ^a	0,03 ± 0,03 ^a	-
ρ -Cimen	1020	1022,3	-	-	0,03 ± 0,02 ^a	-	0,04 ± 0,01 ^a	0,05 ± 0,01 ^a	0,04 ± 0,01 ^a	0,03 ± 0,02 ^a	-
σ -Cimen	1022	1025,2	0,39 ± 0,00 ^a	0,42 ± 0,04 ^{ab}	0,30 ± 0,08 ^a	0,49 ± 0,04 ^{bc}	0,50 ± 0,04 ^c	0,47 ± 0,03 ^{bc}	0,46 ± 0,01 ^b	0,40 ± 0,01 ^a	0,36 ± 0,02 ^a
Limonen	1024	1028,3	0,20 ± 0,03 ^a	0,23 ± 0,01 ^{ab}	0,12 ± 0,10 ^a	0,24 ± 0,02 ^{ab}	0,24 ± 0,02 ^{ab}	0,26 ± 0,01 ^b	0,21 ± 0,03 ^a	0,21 ± 0,02 ^a	0,19 ± 0,01 ^a
1,8-Cineol	1026	1030,3	1,17 ± 0,03 ^a	1,34 ± 0,10 ^b	1,06 ± 0,10 ^a	1,26 ± 0,07 ^{ab}	1,24 ± 0,06 ^{ab}	1,35 ± 0,11 ^b	1,20 ± 0,05 ^{ab}	1,23 ± 0,08 ^b	1,15 ± 0,05 ^{ab}
(Z)- β -Ocimen	1032	1035,9	0,32 ± 0,17 ^a	0,36 ± 0,14 ^a	0,27 ± 0,22 ^a	0,38 ± 0,15 ^a	0,37 ± 0,15 ^a	0,40 ± 0,09 ^a	0,26 ± 0,18 ^a	0,37 ± 0,08 ^a	0,28 ± 0,14 ^a
Lavandin lakton	1034	1043,1	-	-	-	0,04 ± 0,03 ^a	0,11 ± 0,01 ^b	-	0,07 ± 0,02 ^a	-	-
(E)- β -Ocimen	1044	1046,4	0,18 ± 0,15 ^a	0,21 ± 0,12 ^a	0,19 ± 0,16 ^a	0,24 ± 0,16 ^a	0,25 ± 0,15 ^a	0,25 ± 0,09 ^a	0,15 ± 0,12 ^a	0,16 ± 0,12 ^a	0,15 ± 0,12 ^a
γ -Terpinen	1054	1058	0,06 ± 0,05 ^a	0,07 ± 0,05 ^a	0,07 ± 0,05 ^a	0,08 ± 0,06 ^a	0,08 ± 0,06 ^a	0,07 ± 0,06 ^a	0,07 ± 0,06 ^a	0,07 ± 0,06 ^a	0,07 ± 0,05 ^a
<i>cis</i> -Linalol oksid (furanoid)	1067	1074,2	3,31 ± 0,23 ^a	3,64 ± 0,36 ^a	3,33 ± 0,13 ^a	4,20 ± 0,13 ^b	4,30 ± 0,27 ^b	3,34 ± 0,36 ^a	3,69 ± 0,38 ^a	3,28 ± 0,30 ^a	3,53 ± 0,35 ^a
<i>trans</i> -Linalol oksid (furanoid)	1084	1090,4	2,31 ± 0,31 ^a	2,50 ± 0,20 ^a	2,48 ± 0,11 ^a	3,01 ± 0,25 ^b	3,20 ± 0,22 ^b	2,24 ± 0,14 ^a	2,48 ± 0,21 ^a	2,26 ± 0,14 ^a	2,46 ± 0,19 ^a
Linalol	1095	1106,9	32,32 ± 0,23 ^a	31,90 ± 0,15 ^a	31,47 ± 0,14 ^b	31,42 ± 0,08 ^b	30,91 ± 0,15 ^c	33,02 ± 0,32 ^d	31,58 ± 0,44 ^{ab}	31,93 ± 0,19 ^a	32,64 ± 0,17 ^d
1-Okten-3-il acetat	1110	1110,7	4,55 ± 0,33 ^a	4,88 ± 0,01 ^a	6,28 ± 0,04 ^b	6,82 ± 0,04 ^c	6,69 ± 0,01 ^d	5,81 ± 0,16 ^e	6,36 ± 0,02 ^b	5,34 ± 0,20 ^f	4,94 ± 0,01 ^g
3-Oktanol acetat	1120	1121,8	0,03 ± 0,02 ^a	0,04 ± 0,03 ^a	0,03 ± 0,02 ^a	0,03 ± 0,02 ^a	0,02 ± 0,01 ^a	0,09 ± 0,02 ^b	0,02 ± 0,02 ^a	0,03 ± 0,02 ^a	0,03 ± 0,02 ^a
<i>cis</i> - ρ -Menta-2,8-dien-1-ol	1133	1132,2	-	-	0,06 ± 0,05	-	-	-	-	-	-
Kamfor	1141	1145,5	0,64 ± 0,05 ^a	0,67 ± 0,03 ^a	0,64 ± 0,06 ^a	0,64 ± 0,04 ^a	0,64 ± 0,02 ^a	0,66 ± 0,05 ^a	0,67 ± 0,04 ^a	0,65 ± 0,04 ^a	0,63 ± 0,04 ^a
neo-3-Tujanol	1149	1151,4	0,08 ± 0,06 ^a	0,08 ± 0,07 ^a	0,10 ± 0,04 ^a	-	0,11 ± 0,07 ^a	-	0,12 ± 0,10 ^a	0,10 ± 0,08 ^a	0,07 ± 0,06 ^a
Nerol oksid	1154	1154,9	0,22 ± 0,06 ^a	0,22 ± 0,05 ^a	0,22 ± 0,05 ^a	0,19 ± 0,09 ^a	0,23 ± 0,03 ^a	0,12 ± 0,09 ^a	0,27 ± 0,08 ^a	0,24 ± 0,04 ^a	0,21 ± 0,05 ^a
Lavandulol	1157	1170,3	0,56 ± 0,16 ^a	0,57 ± 0,17 ^a	0,54 ± 0,14 ^a	0,54 ± 0,14 ^a	0,52 ± 0,13 ^a	0,60 ± 0,19 ^a	0,59 ± 0,18	0,59 ± 0,18 ^a	0,59 ± 0,18 ^a
Borneol	1165	1172,2	2,89 ± 0,53 ^a	2,26 ± 0,67 ^a	2,50 ± 0,89 ^a	1,72 ± 0,10 ^a	1,72 ± 0,34 ^a	2,82 ± 0,68 ^a	2,67 ± 0,86 ^a	2,63 ± 0,85 ^a	2,90 ± 0,54 ^a

Nastavak **tabele 7.6**

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	VFHD					NaCl		KCl	
			I	II	III	IV	V	5%	10%	3%	5%
			Ukupni sadržaj, %					Ukupni sadržaj, %		Ukupni sadržaj, %	
Terpinen-4-ol	1174	1182,1	3,62 ± 0,07 ^a	3,75 ± 0,09 ^a	3,64 ± 0,12 ^a	3,55 ± 0,03 ^a	3,67 ± 0,13 ^a	3,66 ± 0,14 ^a	3,65 ± 0,07 ^a	3,55 ± 0,05 ^a	3,62 ± 0,07 ^a
Kripton	1183	1189,4	1,10 ± 0,10 ^a	1,11 ± 0,10 ^a	1,15 ± 0,14 ^a	1,16 ± 0,15 ^a	1,16 ± 0,15 ^a	1,16 ± 0,14 ^a	1,17 ± 0,16 ^a	1,11 ± 0,11 ^a	1,09 ± 0,19 ^a
Heksil butanoat	1191	1192,4	0,80 ± 0,25 ^a	0,85 ± 0,29 ^a	0,81 ± 0,09 ^a	0,87 ± 0,21 ^a	0,89 ± 0,23 ^a	0,90 ± 0,23 ^a	0,83 ± 0,28 ^a	0,76 ± 0,22 ^a	0,80 ± 0,25 ^a
Mirtenal	1195	1195	0,15 ± 0,03 ^a	0,17 ± 0,04 ^a	0,18 ± 0,05 ^a	0,19 ± 0,05 ^a	0,19 ± 0,05 ^a	0,20 ± 0,06 ^a	0,24 ± 0,09 ^a	0,18 ± 0,05 ^a	0,18 ± 0,04 ^a
α-Terpineol	1186	1197,9	2,91 ± 0,01 ^a	2,77 ± 0,10 ^b	3,09 ± 0,11 ^{cd}	3,11 ± 0,03 ^c	2,99 ± 0,04 ^d	3,27 ± 0,03 ^e	3,09 ± 0,15 ^{cd}	2,75 ± 0,21 ^{ab}	3,00 ± 0,05 ^d
Verbenon	1204	1211,6	0,16 ± 0,13 ^a	-	0,25 ± 0,11 ^a	0,28 ± 0,10 ^a	0,19 ± 0,15 ^a	0,15 ± 0,12 ^a	0,17 ± 0,14 ^a	0,15 ± 0,12 ^a	0,14 ± 0,12 ^a
Hidrocinamil alkohol	1224	1216,4	0,17 ± 0,14 ^a	-	-	-	-	0,17 ± 0,14 ^a	0,22 ± 0,18 ^a	0,16 ± 0,13 ^a	-
Nerol	1227	1227,5	0,12 ± 0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
Askaridol	1234	1233,2	0,35 ± 0,29 ^a	0,34 ± 0,27 ^a	0,34 ± 0,28 ^a	0,41 ± 0,33 ^a	0,38 ± 0,30 ^a	0,32 ± 0,26 ^a	0,33 ± 0,27 ^a	0,31 ± 0,25 ^a	0,32 ± 0,26 ^a
Kumin aldehid	1238	1243,5	0,23 ± 0,12 ^a	0,18 ± 0,15 ^a	0,27 ± 0,07 ^a	0,28 ± 0,04 ^a	0,18 ± 0,15 ^a	0,33 ± 0,07 ^a	0,21 ± 0,17 ^a	0,20 ± 0,16 ^a	0,23 ± 0,12 ^a
Karvon	1239	1246,2	-	-	0,10 ± 0,08	-	-	-	-	-	-
Karvotanacetone	1244	1246,5	-	-	-	-	-	0,12 ± 0,09 ^a	-	0,11 ± 0,09 ^a	0,11 ± 0,09 ^a
Linalil acetat	1254	1255,6	20,41 ± 0,21 ^a	19,94 ± 0,63 ^{ab}	18,60 ± 0,82 ^{bcd}	16,77 ± 0,23 ^c	16,83 ± 0,23 ^c	17,96 ± 0,24 ^d	19,24 ± 0,72 ^b	20,28 ± 0,28 ^{ab}	19,88 ± 0,64 ^{ab}
Geraniol	1249	1258,4	1,14 ± 0,03 ^a	1,07 ± 0,17 ^a	1,11 ± 0,10 ^a	1,13 ± 0,12 ^a	1,14 ± 0,13 ^a	1,22 ± 0,19 ^a	1,13 ± 0,13 ^a	1,17 ± 0,15 ^a	1,18 ± 0,16 ^a
ρ-Ment-1-en-7-al	1273	1277,4	0,27 ± 0,08 ^a	0,34 ± 0,11 ^a	0,50 ± 0,04 ^b	0,55 ± 0,15 ^b	0,58 ± 0,16 ^b	0,46 ± 0,14 ^b	0,54 ± 0,16 ^b	0,39 ± 0,12 ^a	0,33 ± 0,13 ^a
Izobornil acetat	1283	1284,3	0,05 ± 0,04 ^a	0,05 ± 0,04 ^a	0,10 ± 0,00 ^b	0,07 ± 0,02 ^a	0,05 ± 0,04 ^a	0,07 ± 0,02 ^a	-	-	0,05 ± 0,04 ^a
Lavandulil acetat	1288	1289,3	6,87 ± 0,12 ^a	6,54 ± 0,30 ^{ab}	6,78 ± 0,11 ^a	6,49 ± 0,22 ^{ab}	6,33 ± 0,26 ^b	6,57 ± 0,11 ^b	6,32 ± 0,32 ^b	6,75 ± 0,20 ^a	6,84 ± 0,34 ^a
trans-Pinokarvil acetat	1298	1297,3	-	-	0,17 ± 0,14 ^a	-	0,20 ± 0,16 ^a	-	0,19 ± 0,15 ^a	-	-
Neril acetat	1359	1362,8	0,50 ± 0,18 ^a	0,50 ± 0,15 ^a	0,54 ± 0,13 ^a	0,55 ± 0,14 ^a	0,55 ± 0,14 ^a	0,47 ± 0,14 ^a	0,26 ± 0,11 ^b	0,47 ± 0,15 ^a	0,50 ± 0,17 ^a
Geranil acetat	1379	1382	1,17 ± 0,02 ^{ab}	1,15 ± 0,11 ^{ab}	1,27 ± 0,10 ^a	1,24 ± 0,13 ^a	1,23 ± 0,16 ^a	1,00 ± 0,10 ^b	0,82 ± 0,04 ^c	1,08 ± 0,18 ^b	1,15 ± 0,10 ^b
(E)-Kariofilen	1417	1418,4	1,46 ± 0,05 ^a	1,66 ± 0,02 ^b	1,76 ± 0,08 ^b	1,64 ± 0,17 ^b	1,73 ± 0,20 ^b	1,38 ± 0,11 ^a	1,42 ± 0,19 ^a	1,42 ± 0,12 ^a	1,36 ± 0,07 ^a
(E)-β-Farnezen	1440	1454,2	0,41 ± 0,09 ^a	0,50 ± 0,07 ^a	0,53 ± 0,15 ^a	0,49 ± 0,16 ^a	0,52 ± 0,09 ^a	0,42 ± 0,13 ^a	0,47 ± 0,16 ^a	0,44 ± 0,14 ^a	0,40 ± 0,17 ^a
Germakren D	1484	1480,4	-	-	0,13 ± 0,10 ^a	-	0,12 ± 0,10 ^a	-	-	-	-
Lavandulil-2-metil-butanoat	1511	1521,1	0,18 ± 0,04 ^a	0,16 ± 0,03 ^a	0,16 ± 0,03 ^a	-	-	0,15 ± 0,02 ^a	0,14 ± 0,02 ^a	0,17 ± 0,04 ^a	0,16 ± 0,03 ^a
cis-Kadinen eter	1552	1552,4	-	-	-	-	-	0,10 ± 0,08 ^a	0,09 ± 0,07 ^a	0,11 ± 0,09 ^a	0,12 ± 0,10 ^a
cis-Drakunkulifoliol	1541	1552,8	0,15 ± 0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
Kariofilen oksid	1582	1584	3,36 ± 0,39 ^a	3,04 ± 0,17 ^{ab}	3,26 ± 0,46 ^{ab}	2,76 ± 0,15 ^b	2,80 ± 0,15 ^b	2,70 ± 0,39 ^b	2,58 ± 0,89 ^b	3,08 ± 0,07 ^a	3,08 ± 0,10 ^a
Kusilol	1675	1677,6	0,34 ± 0,18 ^a	-	-	-	-	-	-	0,28 ± 0,13 ^a	-
Monoterpeni			1,09	1,24	0,95	1,46	1,48	1,4	1,19	1,14	1
Oksidovani monoterpeni			85,92	85,02	85,18	84,34	84,13	85,73	85,6	85,54	86,4
Seskviterpeni			5,38	5,2	5,18	4,89	5,17	4,6	4,56	5,05	4,96
Ostalo			4,55	4,01	4,16	4,25	4,28	4,71	4,52	4,51	4,09

^a Destilacioni sud zapremine 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml i brzina destilacije 6,5 ml/min.

* Hidrodestilacija korišćenjem destilovane vode bez dodavanja VFHD (kontrolni uzorak). Vrednosti u istom redu iza kojih slede ista slova nisu se značajno razlikovale ($p \leq 0,05$).

RI^{lit} – Linearni retencioni indeksi dostupni u literaturi (Adams 2007); RI^{exp} – Linearni retencioni indeksi određeni eksperimentalno pomoću homologe serije *n*-alkana (C₈-C₂₀) na HP-5MS koloni. Sve komponente su identifikovane poređenjem retencioni indeksa i masenih spektara; tr – komponenta prisutna u tragovima (<0,05%).

Takođe, uočeno je da etarsko ulje sadrži niži nivo linalil acetata od onog koji je propisan ISO standardom 3515:2002 (EN ISO 3515:2002), prema kojem sadržaj linalil acetata treba da bude u rasponu od 25,0% do 47,0%. Ovo odstupanje od ISO standarda je već primetilo nekoliko istraživačkih grupa (Besombes i sar. 2010, Garzoli i sar. 2021, Kiran Babu i sar. 2016a, Moussi Imane i sar. 2017, Périno-Issartier i sar. 2013, Rashed i sar. 2017, Walasek-Janusz i sar. 2022). Ovi rezultati naglašavaju varijabilnost u koncentracijama linalil acetata, sugerišući da faktori, kao što su geografska lokacija, metode ekstrakcije i poreklo biljke, mogu značajno uticati na hemijski sastav etarskih ulja. Ove razlike se mogu objasniti procesom prilagođavanja specifičnim klimatskim i životnim uslovima (Dob i sar. 2005). Uzorci etarskih ulja ekstrahovanih iz najčešće gajenih sorti lavande i lavandina u Srbiji sadrže visok sadržaj linalola (25,2–36,9%) i linalil acetata (6,9–28,9%) (Kiprovski i sar. 2023), što se poklapa sa ovim istraživanjem. Niži sadržaj linalil acetata može uticati na biološki efekat etarskog ulja. Svi uzorci imaju nizak sadržaj kamfora, što je dobro, jer on daje etarskom ulju neprijatan miris (Pljevljakušić i sar. 2023).

7.1.4 Optimizacija hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Postizanje maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande hidrodestilacijom zahteva optimizaciju ključnih faktora: odnosa cveta i vode, zapremine suda i brzine destilacije. U ovom radu za modelovanje odnosa između ovih varijabli i prinosa korišćena je kombinacija metode odzivnih površina i istorijskog dizajna eksperimenata, što je omogućilo identifikaciju optimalnih uslova.

Za opis zavisnosti prinosa od procesnih varijabli primenjen je polinomni model najvišeg reda bez alijasa, a izbor modela izvršen je na osnovu koeficijenata determinacije. Procena je sprovedena pomoću sekvencijalne sume kvadrata modela, testova neprilagođenosti modela i statistikom rezimea modela. Tabela 7.7 pokazuje da je linearan model favorizovan, sa umerenom vrednošću koeficijenta determinacije $R^2 = 0,638$ i usklađenim vrednostima podešenog i predviđenog koeficijenta determinacije $R_{adj}^2 = 0,612$ i $R_{pred}^2 = 0,574$ pošto je njihova razlika manja od 0,2 (Anderson 2010). Značajno je da je čista greška jednaka nuli, što ukazuje na odsustvo neobjašnjive varijabilnosti unutar grupa, odnosno da je model u potpunosti obuhvatio varijacije u prinosu etarskog ulja lavande. Stoga tradicionalni test neprilagođenosti modela ne može ukazati na eventualne probleme, jer model savršeno odgovara posmatranim podacima.

Prema rezultatima ova tri testa adekvatnosti, linearni model se može primeniti radi procene značaja procesnih varijabli i optimizacije hidrodestilacije etarskog ulja lavande iz celih cvetova.

Tabela 7.7 Test adekvatnosti modela^a

Test	Faktor	Zbir kvadrata	Stepeni slobode	Srednji kvadrat	F-vrednost	p-vrednost	Napomena
Sekvencijalna suma kvadrata modela	Srednja vrednost u odnosu na ukupnu vrednost	161,50	1	161,50			
	Linearni u odnosu na srednju vrednost	2,06	3	0,69	24,09	< 0,0001	Predložen
	2FI u odnosu na linearni	0,17	2	0,085	3,31	0,047	U alijasu
	Kvadratni u odnosu na 2FI	0,10	3	0,034	1,37	0,266	U alijasu
	Kubni u odnosu na kvadratni	0,34	6	0,057	3,10	0,018	U alijasu
	Ostatak	0,55	30	0,018			
	Ukupno	164,74	45	3,66			
Testovi neprilagođenosti modela	Izvor	Zbir kvadrata	Stepeni slobode	Srednja vrednost kvadrata			
	Linearni	1,17	39	0,030			
	2FI	1,00	37	0,027			
	Kvadratni	0,90	34	0,026			
	Kubni	0,55	28	0,020			
	Čista greška	0,00	2	0,000			
Statistički rezime modela	Izvor	Standardna devijacija	R^2	R_{adj}^2	R_{pred}^2	PRESS	Napomena
	Linearni	0,17	0,638	0,612	0,574	1,38	Predložen
	2FI	0,16	0,691	0,651	0,610	1,26	U alijasu
	Kvadratni	0,16	0,722	0,661	0,597	1,30	U alijasu
	Kubni	0,14	0,829	0,74	0,666	1,08	U alijasu

^a Sekvencijalna suma kvadrata modela: potrebno je odabrati model polinoma najvišeg reda koji nije u alijasu, tj. međusobno zavisano sa drugim efektima. Test neprilagođenosti modela: potrebno je da odabrani model ima beznačajni stepen neprilagođenosti modela. Statistički rezime modela: potrebno je da model ostvari što je moguće veću vrednost koeficijenta determinacije R_{adj}^2 . PRESS - prediktivna suma kvadrata grešaka.

Za procenu značaja varijabli i optimizaciju procesa sproveden je istorijski dizajn eksperimenata sa dve replikacije (tabela 7.8). Eksperimentalni podaci analizirani su pomoću metode odzivnih površina, a značajnost modela i pojedinačnih faktora potvrđena je ANOVA analizom na nivou pouzdanosti od 95%. Normalna raspodela reziduala (slika 7.7a) i odsustvo “autlajera” (slika 7.7b) dodatno su potvrdili validnost rezultata.

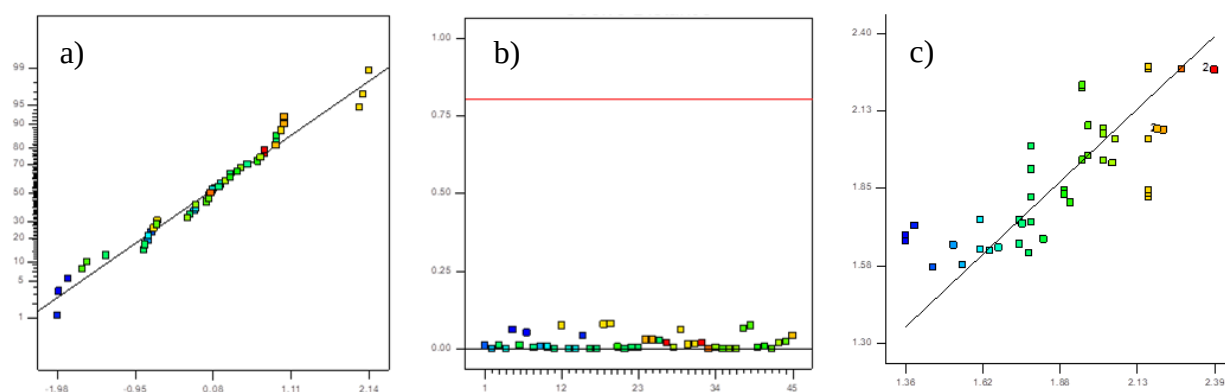
Tabela 7.8 Eksperimentalna matrica za prinos etarskog ulja lavande (istorijski dizajn)^a

	X_1 , g/ml	X_2 , ml	X_3 , ml/min	Y , ml/100 g suvih cvetova	Y_{calc} , ml/100 g suvih cvetova	$MRPD$, %
1	10	250	0,60	1,45	1,57	-8,3
2	10	250	0,77	1,55	1,58	-1,9
3	10	250	1,64	1,77	1,62	8,5
4	10	250	1,81	1,64	1,63	0,6
5	10	250	2,87	1,36	1,68	-23,5
6	10	250	2,63	1,82	1,67	8,2
7	10	250	2,47	1,36	1,66	-22,1
8	10	500	1,22	1,74	1,65	5,2
9	10	500	1,14	1,52	1,65	-8,6
10	10	500	2,96	1,61	1,74	-8,1
11	10	500	2,91	1,74	1,74	0,0
12	10	500	4,61	2,17	1,82	16,1
13	10	500	0,96	1,67	1,64	1,8
14	10	500	0,84	1,61	1,63	-1,2
15	10	500	2,55	1,39	1,72	-23,7
16	10	500	2,77	1,78	1,73	2,8
17	10	500	2,67	1,75	1,72	1,7
18	10	500	4,88	2,17	1,83	15,7
19	10	500	5,08	2,17	1,84	15,2
20	10	1000	2,06	1,91	1,80	5,8
21	10	1000	2,43	1,78	1,82	-2,2
22	10	1000	4,48	1,78	1,92	-7,9
23	10	1000	4,43	1,78	1,92	-7,9
24	10	1000	7,26	2,22	2,06	7,2
25	10	1000	7,26	2,22	2,06	7,2
26	10	1000	6,10	1,78	2,00	-12,4
27	10	2000	7,30	2,39	2,27	5,0
28	10	2000	2,31	2,06	2,02	1,9
29	10	2000	2,30	2,17	2,02	6,9
30	10	2000	7,40	2,17	2,27	-4,6
31	10	2000	7,55	2,17	2,28	-5,1
32	10	2000	7,30	2,39	2,27	5,0
33	10	2000	7,35	2,28	2,27	0,4
34	15	2000	3,05	2,02	1,95	3,5
35	15	2000	3,09	1,95	1,95	0,0
36	15	2000	5,36	2,02	2,06	-2,0
37	15	2000	4,98	2,02	2,04	-1,0
38	15	2000	8,28	1,95	2,21	-13,3
39	15	2000	8,45	1,95	2,22	-13,8
40	20	2000	3,17	1,89	1,84	2,6

Nastavak **tabele 7.8**

	X_1 , g/ml	X_2 , ml	X_3 , ml/min	Y , ml/100 g suvih cvetova	Y_{cal} , ml/100 g suvih cvetova	$MRPD$, %
41	20	2000	2,88	1,89	1,83	3,2
42	20	2000	5,67	1,97	1,97	0,0
43	20	2000	5,11	2,05	1,94	5,4
44	20	2000	7,81	1,97	2,07	-5,1
45	20	2000	7,56	2,20	2,06	6,4
Srednja greška =						$\pm 6,9$

^a X_1 – odnos voda:cvet, X_2 – zapremina destilacionog suda, X_3 – brzina destilacije (brzina zagrevanja) i Y – prinos etarskog ulja lavande.



Slika 7.7 Normalna raspodela eksperimentalnih podataka (a), Kukovo rastojanje (b) i poređenje predviđenih i stvarnih vrednosti prinosa etarskog ulja lavande za linearni model (c)

Prema analizi ANOVA (tabela 7.9), model je bio veoma značajan ($F=24,09$, $p<0,0001$), uz verovatnoću od samo 0,01% da je rezultat posledica slučajne varijacije. Sve tri procesne varijable pokazale su statistički značajan uticaj. Poređenjem F -vrednosti i koeficijenata iz jednačine (7.1) uočava se da zapremina suda (X_2) i brzina destilacije (X_3) imaju jači uticaj na prinos od odnosa vode i cveta (X_1). Dok je X_1 imao negativan efekat, X_2 i X_3 su pozitivno doprinosili prinosu. Negativan uticaj većeg odnosa vode i cveta u skladu je sa ranijim nalazima (Perović i sar. 2021), koji ga povezuju sa smanjenjem specifične toplote i većom rastvorljivošću hidrofilnih komponenti u VFHD. Suprotno tome, povećana zapremina suda poboljšava isparavanje, kondenzaciju i raspodelu toplote, dok veća brzina zagrevanja ubrzava isparavanje i ekstrakciju, skraćuje trajanje procesa i povećava ukupan prinos.

Do sada su Perović i saradnici (2021) jedini optimizovali hidrodestilaciju etarskog ulja iz celih cvetova lavande, koristeći metodu odzivnih površina i potpuni faktorski dizajn. Oni su

utvrdili da je negativan efekat odnosa vode i cveta značajniji od pozitivnog uticaja trajanja destilacije. Nasuprot tome, Labri i saradnici (2022) su proučavali hidrodestilaciju iz mlevenih listova lavande i zaključili da veličina čestica nema uticaj na prinos, dok su zapremina parnog prostora suda za destilaciju, brzina destilacije i njihova interakcija bili značajni faktori.

Tabela 7.9 Rezultati ANOVA za razvijene linearne modele za prinos etarskog ulja lavande

Model	Faktor ^a	Zbir kvadrata	Stepen slobode	Srednji kvadrat	F-vrednost	p-vrednost
Kvadratni	Model	2,06	3	0,69	24,09	< 0,0001
	X_1	0,17	1	0,17	5,85	0,0201
	X_2	0,44	1	0,44	15,43	0,0003
	X_3	0,37	1	0,37	13,02	0,0008
	Ostatak	1,17	41	0,029		
	Stepen neprilagođenosti modela	1,17	39	0,030		
	Čista greška	0,00	2	0,000		
	Ukupna korekcija	3,23	44			

^a X_1 – odnos vode i cveta, X_2 – zapremina destilacionog suda i X_3 – brzina destilacije

Razvijeni linearni modeli zasnovani na kodiranim i stvarnim faktorima procesa za prinos etarskog ulja lavande su sledeći:

- Kodirani faktori:

$$Y = 1,811 - 0,111 X_1 + 0,185 X_2 + 0,173 X_3 \quad (7.1)$$

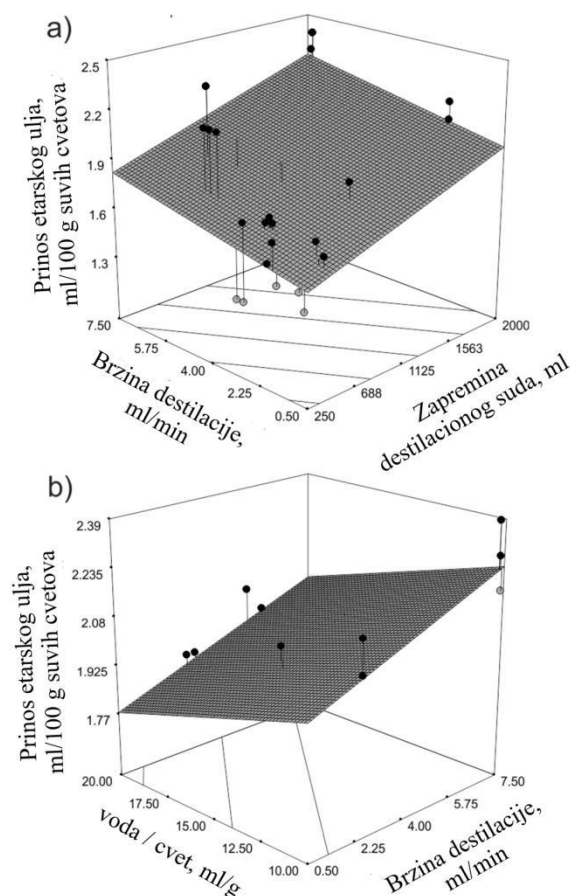
- Stvarni faktori:

$$Y = 1,709 - 0,0223 X_1 + 0,00021 X_2 + 0,0494 X_3 \quad (7.2)$$

Vrednost R^2 od 0,638 sugerise umerenu tačnost predviđanja, sa 63,8% varijabilnosti u prinosu etarskog ulja lavande. Pored toga, vrednost adekvatne preciznosti od 14,1 znatno iznad minimalnog praga od 4, potvrđuje podobnost modela za navigaciju u prostoru plana (Anderson i Whitcomb 2005). Niska *MRPD* vrednost od $\pm 6,9\%$ (zasnovano na 45 podataka) dalje pokazuje odlično slaganje između eksperimentalnih i predviđenih vrednosti, podupirajući kvalitet modela. Kao što je prikazano na slici 7.8c, predviđene i stvarne vrednosti su nasumično raspoređene po dijagonali, što ukazuje na dobro uklapanje. Sve u svemu, ovi kriterijumi procene potvrđuju pouzdanost, preciznost i adekvatnost modela, čineći ga robusnim alatom za izračunavanje i optimizaciju prinosa etarskog ulja lavande u okviru specificiranih opsega varijabli procesa.

Površine odgovora kreirane linearnim modelom pružaju jasnu i informativnu vizualizaciju načina na koji procesne promenljive hidrodestilacije utiču na prinos etarskog ulja

lavande u okviru eksperimentalnog domena. Slika 7.8 prikazuje varijacije u prinosu etarskog ulja kao funkciju dve promenljive, pri čemu je treća promenljiva držana konstantnom. Ovi grafici su od velikog značaja za procenu uticaja pojedinačnih promenljivih uz kontrolu ostalih, što pomaže u optimizaciji uslova za postizanje željenih rezultata. Slika 7.8a prikazuje kako prinos etarskog ulja lavande varira sa zapreminom destilacionog suda i brzinom destilacije uz održavanje konstantnog odnosa cveta i vode od 1:10 g/ml. Slika 7.8b ilustruje efekat odnosa cveta i vode i brzine destilacije na prinos etarskog ulja, sa fiksnom zapreminom destilacionog suda od 2000 ml. Odabrani odnos cveta i vode i zapremina destilacionog suda predstavljaju optimalne uslove hidrodestilacije. Rezultati pokazuju da se prinos etarskog ulja lavande povećava i sa zapreminom destilacionog suda i sa brzinom destilacije, ali se smanjuje kako se povećava odnos cveta i vode.



Slika 7.8 Površine odgovora generisane linearnim modelom: (a) pri konstantnom odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml i (b) konstantnoj zapremini destilacionog suda od 2000 ml

Ova studija optimizacije imala je za cilj maksimizaciju prinosa etarskog ulja lavande kroz odabir optimalnih uslova hidrodestilacije, odnosno odnosa cveta i vode, zapremine destilacionog

suda i brzine destilacije (brzine zagrevanja), primenom metode funkcije poželjnosti. Prema tabeli 7.10, linearni model predviđa da su optimalni uslovi za postizanje maksimalnog prinosa od 2,28 ml/100 g suvih cvetova: odnos cveta i vode 1:10 g/ml, zapremina destilacionog suda 2000 ml i brzina destilacije 7,5 ml/min. Primetno je da je najveći prinos etarskog ulja postignut sa najmanjim odnosom cveta i vode od 1:10 g/ml i najvećom brzinom destilacije od $7,33 \pm 0,03$ ml/min, sa znatno bržom početnom brzinom ekstrakcije etarskog ulja u poređenju sa drugim uslovima rada. Optimalni odnos cveta i vode od 1:10 g/ml već je potvrđen u prethodnoj studiji (Perović i sar. 2021). Ovaj odnos se najčešće koristi za mnoge biljke, kao što su kamilica, ruzmarin, origano i eukaliptus, zbog poboljšanog odvajanja etarskog ulja od hidrofilnih komponenti (Olascuaga-Castillo i sar. 2024).

Tabela 7.10 Maksimalni prinosi etarskog ulja lavande

R.br.	Odnos cvet:voda, g/ml	Zapremina destilacionog suda, ml	Brzina destilacije, ml/min	Prinos etarskog ulja lavande, ml/100 g suvih cvetova	Poželjnost
1	1:10	2000	7,5	2,28	0,893
2	1:10	2000	7,5	2,28	0,891
3	1:10	1982	7,5	2,28	0,889
4	1:10	1995	7,4	2,27	0,888
5	1:10	2000	7,5	2,27	0,887

7.1.5 Kinetika hidrodestilacije etarskog ulja lavande

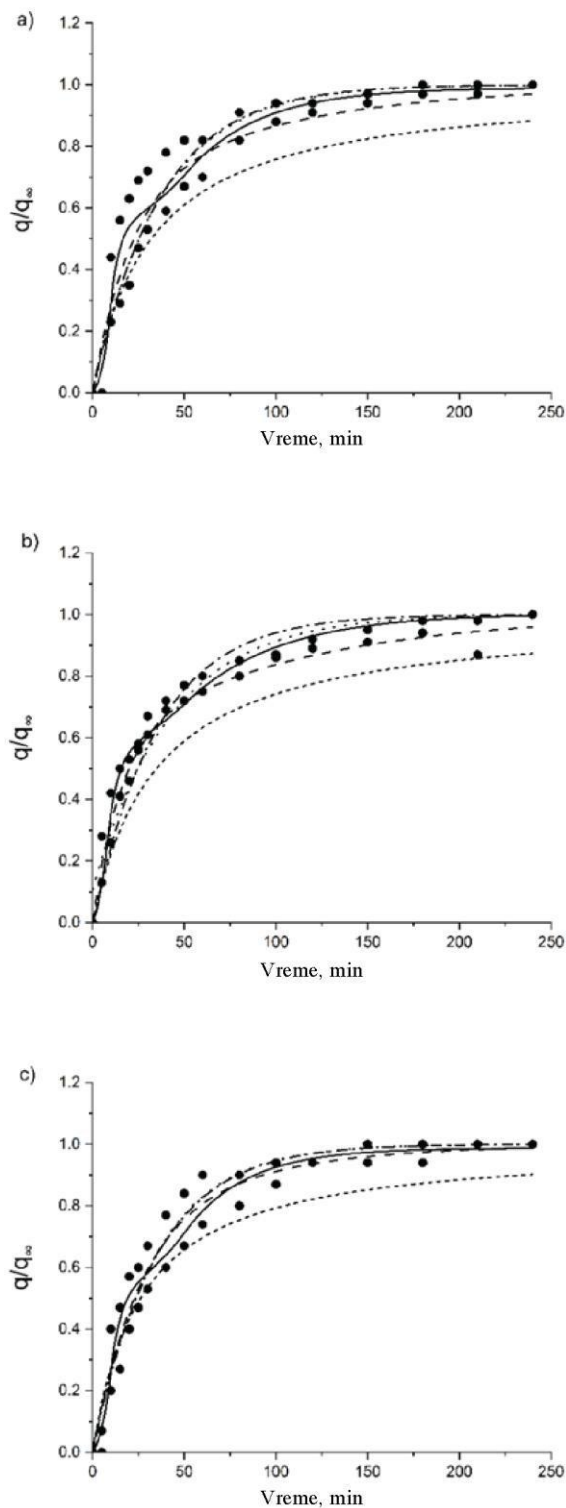
Kinetika hidrodestilacije etarskog ulja lavande iz sušenih cvetova analizirana je pri različitim zapreminama destilacionog suda, brzinama destilacije i odnosima cveta i vode. Dok su ranija istraživanja uglavnom razmatrala uticaj ovih parametara na prinos i sastav etarskog ulja, kinetika samog procesa oslobađanja ostala je nedovoljno istražena. Posebno treba naglasiti da njihov uticaj na brzinu i mehanizam ekstrakcije do sada nije sistematski proučavan. Radi popunjavanja te praznine, procenjeni su različiti kinetički modeli kako bi se identifikovao najpouzdaniji opis procesa hidrodestilaciju etarskog ulja lavande. Istovremeno je kvantifikovan uticaj operativnih uslova na vrednosti parametara modela. Krajnji cilj bio je definisanje pouzdanog i prediktivnog kinetičkog modela koji može poslužiti kao osnova za optimizaciju i kontrolu procesa.

7.1.5.1 Mehanizam hidrodestilacije etarskog ulja lavande

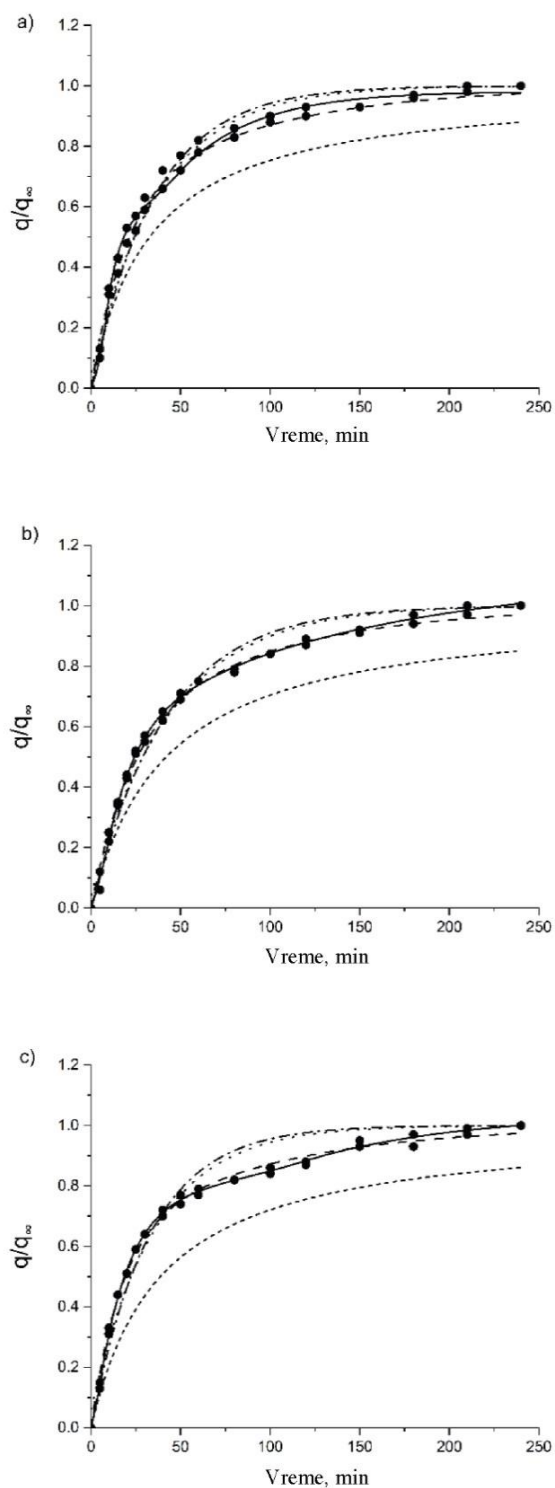
Slike 7.4, 7.5 i 7.6 prikazuju kako zapremina destilacionog suda, brzina destilacije i odnos cveta i vode utiču na dinamiku prinosa etarskog ulja lavande. Dobijene krive jasno ukazuju na tipičan dvofazni mehanizam hidrodestilacije, koji se sastoji iz rane faze ispiranja i kasnije difuzione faze. U ranoj fazi procesa dominantan je mehanizam ispiranja, koji se manifestuje naglim porastom prinosa i visokim početnim vrednostima brzine destilacije. Ovaj efekat potiče od oslobađanja etarskog ulja iz površinski dostupnih glandularnih trihoma, koji predstavljaju primarno skladište etarskog ulja lavande (Zhang i sar. 2023). Mehaničko usitnjavanje cveta dodatno narušava žlezdane strukture, čime se povećava dostupnost etarskog ulja i omogućava njegovo brzo oslobađanje pod dejstvom vodene pare, što rezultuje izraženim početnim impulsom izdvajanja etarskog ulja. Nakon relativno kratkog vremena iscrpljuje se rezervoar lako dostupnog etarskog ulja, doprinos ispiranja rapidno opada i proces prelazi u narednu, sporiju difuziono kontrolisanu fazu. U ovoj fazi etarsko ulje migrira iz unutrašnjih, neoštećenih žlezdanih struktura kroz ćelijske zidove i intercelularne prostore biljne matrice, usled čega brzina destilacije značajno opada, dok se ukupni prinos povećava veoma sporo. Ova faza je odgovorna za produženi difuziono ograničeni završni segment kinetičke krive i u najvećoj meri određuje ukupno trajanje procesa. Sličan dvofazni mehanizam zabeležen je i kod drugih aromatičnih biljaka, gde se etarsko ulje najpre oslobađa iz površinski dostupnih trihoma, a zatim difuzijom iz unutrašnjih tkiva (Milojević i sar. 2013). Ova poređenja potvrđuju da anatomske i morfološke karakteristike biljnih organa presudno određuju kinetiku hidrodestilacije. Kod lavande, upravo raspored i gustina glandularnih trihoma objašnjavaju zašto se najveći deo etarskog ulja oslobađa već u ranoj fazi ispiranja, dok difuziona faza doprinosi sporom i postepenom dodatnom prinosu.

7.1.5.2 blik kinetičkih krivih

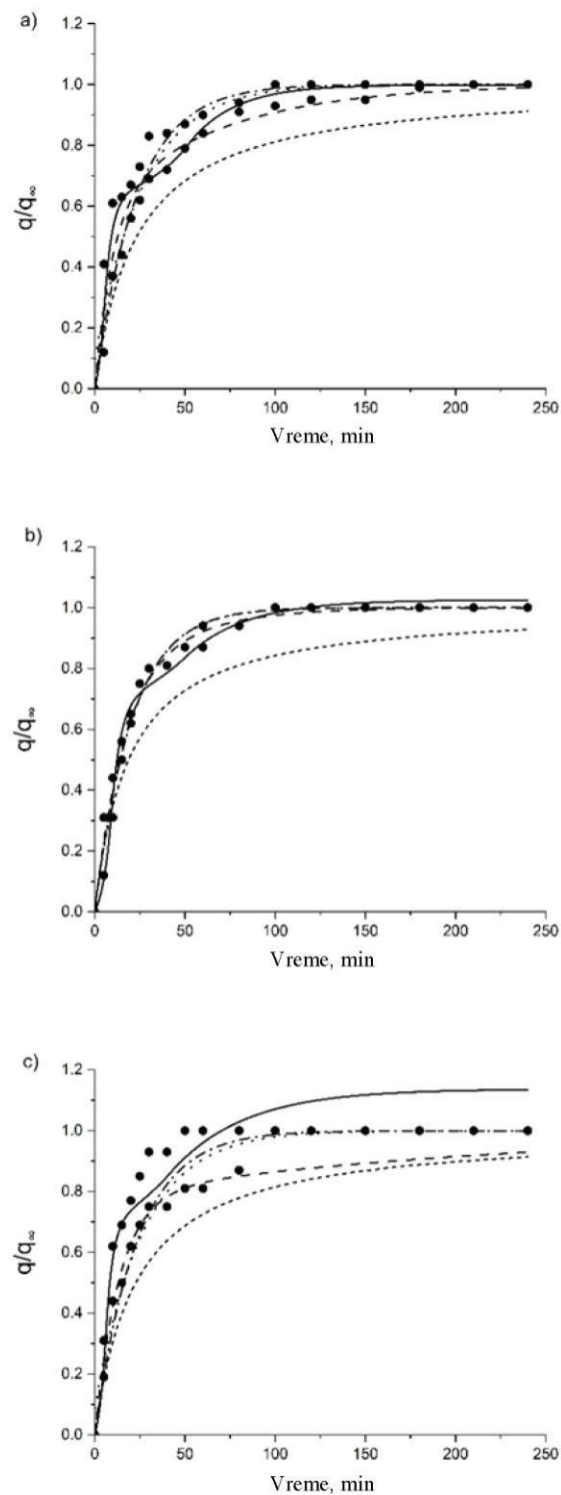
Slike 7.9a–f pokazuju da se kinetika hidrodestilacije može opisati tipičnim hiperboličkim krivama, bez obzira na varirane operative uslove (brzinu destilacije, zapreminu destilacionog suda i odnos cveta i vode). Ovaj obrazac karakteriše naglo oslobađanje etarskog ulja u ranoj fazi procesa, nakon čega prinos postepeno raste do tačke zasićenja.



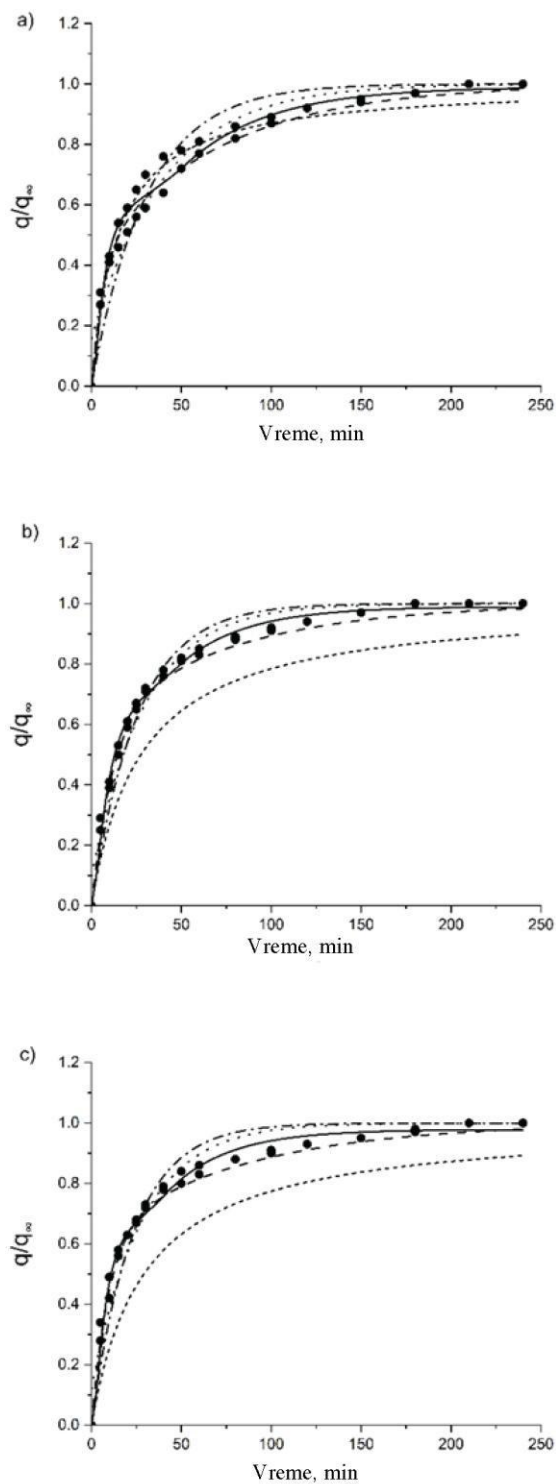
Slika 7.9a Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 250 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml, i brzine destilacije (ml/min) a) $0,69 \pm 0,09$ b) $1,73 \pm 0,09$ i c) $2,75 \pm 0,12$ (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)



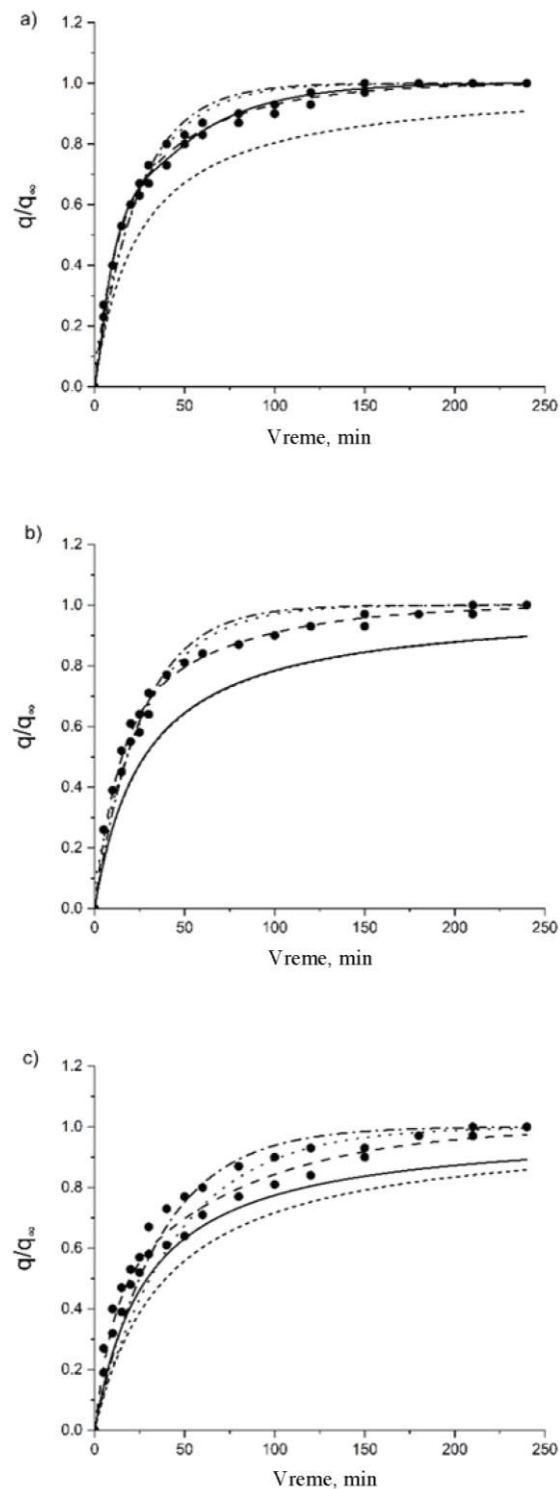
Slika 7.9b Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 500 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml, brzine destilacije (ml/min) a) $1,18 \pm 0,04$, b) $2,72 \pm 0,05$ i c) $4,98 \pm 0,10$ (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)



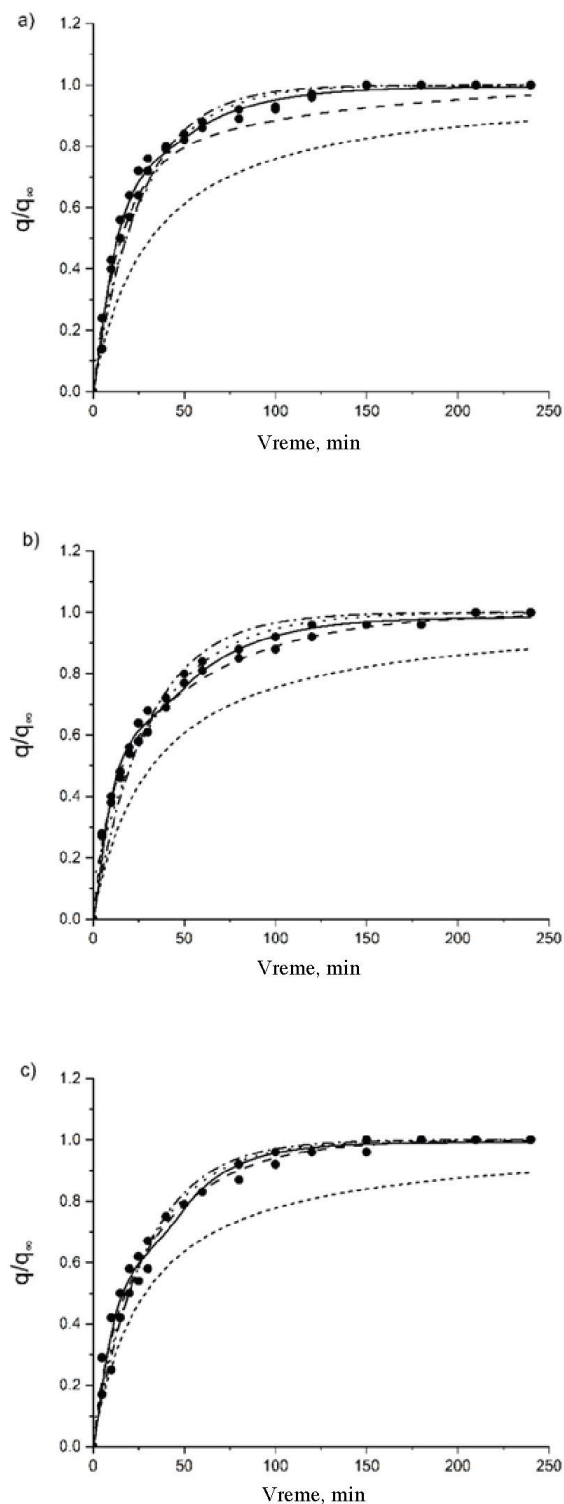
Slika 7.9c Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml, brzine destilacije (ml/min) a) $2,25 \pm 0,19$, b) $4,46 \pm 0,03$ i c) $6,68 \pm 0,58$ ml/min (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)



Slika 7.9d Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 2000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml, brzine destilacije (ml/min) a) $2,31 \pm 0,01$, b) $4,21 \pm 0,23$ i c) $7,33 \pm 0,03$ (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)



Slika 7.9e Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 2000 ml, odnos cveta i vode 1:15 g/ml, brzine destilacije (ml/min) a) $3,07 \pm 0,02$, b) $5,17 \pm 0,19$ i c) $8,35 \pm 0,10$ (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)



Slika 7.9f Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 2000 ml, odnos cveta i vode 1:20 g/ml, brzine destilacije (ml/min) a) $3,03 \pm 0,15$, b) $5,39 \pm 0,28$ i c) $7,69 \pm 0,13$ (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)

Hiperbolički oblik krivih proističe iz raspodele etarskog ulja u biljnom materijalu: najveći deo etarskog ulja potiče iz površinski dostupnih trihoma, dok je iz unutrašnjih tkiva oslobađanje sporije i ograničeno difuzijom. Na oblik i nagib krivih mogu da utiču različiti faktori, među kojima se izdvajaju površina biljnog materijala, početni sadržaj etarskog ulja i efikasnost prenosa mase tokom ekstrakcije. Njihova međusobna interakcija određuje brzinu približavanja zasićenju i ukupni prinos.

7.1.5.3 *valuacija kinetičkih modela konvencionalne hidriodestilacije*

Pet često korišćenih kinetičkih modela sa dva do šest parametara, prikazanih u tabeli 3.2, primenjeno je za opis kinetike hidrodestilacije etarskog ulja lavande. Odgovarajuće vrednosti parametara nalaze se u tabeli 7.11. Slike 7.9a–f prikazuju poređenje eksperimentalnih podataka sa krivama testiranih modela dobijenih pri različitim uslovima destilacije: odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml do 1:20 g/ml, zapremini destilacionog suda od 250 ml do 2000 ml i brzinama destilacije od 0,7 ml/min do 7,8 ml/min.

Na osnovu statističke procene svih kinetičkih modela korišćenjem *MRPD*, *AICc* i R^2 vrednosti iz tabela 7.11a–c, model I je dosledno pokazao najbolji ukupni učinak. Ovaj model je ostvario najniže vrednosti *MRPD*, najnegativnije rezultate *AICc* i najviše vrednosti R^2 u gotovo svim eksperimentalnim uslovima, što ukazuje na najbolju prediktivnu tačnost i najkvalitetniju prilagođenost eksperimentalnim podacima. Model II se rangira kao drugi, sa veoma dobrim performansama, tj. niskim *MRPD*, visoko negativnim *AICc* vrednostima i visokim R^2 , iako je nešto manje konzistentan od modela I. Model IV zauzima treće mesto, jer pruža stabilno i pouzdano slaganje podataka u difuzionoj fazi procesa. Model III je rangiran četvrti, sa umerenim *MRPD* i manje povoljnim *AICc* vrednostima, što ukazuje na slabije ukupno slaganje sa eksperimentalnim podacima. Model V pokazuje najslabije performanse, sa najvišim *MRPD* vrednostima, najmanje negativnim *AICc* rezultatima i najnižim R^2 vrednostima u odnosu na sve ostale modele. Ukupno posmatrano, rangiranje jasno pokazuje da dvofazni model I najtačnije opisuje kinetiku konvencionalne hidrodestilacije u ispitivanim uslovima.

Tabela 7.11a Parametri kinetičkih modela za hidrodestilaciju – zapremine suda: 250 ml i 500 ml; odnos cveta i vode 1:10 g/ml

Model	Parametri modela	Brzina destilacije, ml/min					
		0,69 ± 0,09	1,73 ± 0,09	2,75 ± 0,12	1,18 ± 0,04	2,72 ± 0,05	4,98 ± 0,10
		Zapremina destilacionog suda, ml					
		250			500		
I	τ_w , min	9,52***	7,78***	9,67***	8,51***	9,00***	5,74***
	τ_d , min	51,30*	51,3**	50,08**	47,86***	80,23*	118,8***
	α_w , g/100g/min	0,062	0,0561***	0,0508*	0,0458***	0,0268***	0,0354***
	α_d , g/100g/min	0,0069**	0,0057***	0,0082**	0,0065***	0,0021***	0,0018***
	k_w , min ⁻¹	0,2268	0,186*	0,1868	0,1525**	0,0549***	0,0597***
	k_d , min ⁻¹	0,0250	0,0198**	0,0298*	0,0235***	0,0071**	0,0114**
	q_w , g/100 g	0,528	0,518	0,500	0,519	0,679	0,764
	q_d , g/100 g	0,462	0,475	0,489	0,464	0,418	0,273
	MRPD, %	12,4	7,33	10,93	3,98	4,10	1,69
	AICc	-58,13	-93,9	-68,87	-132,2	-181,9	-192,9
	R ²	0,938	0,972	0,956	0,992	0,998	0,999
II	k_w , min ⁻¹	0,0487**	0,0680***	0,0401	0,0542***	0,0472***	0,0623***
	k_d , min ⁻¹	0,0103	0,0098***	0,0135	0,0115***	0,0113***	0,0113***
	f_w	0,6393*	0,569***	0,708	0,599***	0,544***	0,608***
	MRPD, %	9,71	8,36	14,26	6,81	6,42	3,78
	AICc	-73,06	-105,15	-76,25	-130,32	-160,05	-164,7
	R ²	0,907	0,959	0,954	0,989	0,996	0,996
III	k_d , min ⁻¹	0,0266***	0,0234***	0,0294***	0,0262***	0,0225***	0,0282***
	f_w	0,021	0,107**	0,007	0,053*	0,0417	0,0611*
	MRPD, %	10,96	10,62	13,27	9,05	9,95	8,08
	AICc	-65,23	-75,86	-76,06	-99,39	-110,57	-97,04
	R ²	0,925	0,932	0,951	0,970	0,979	0,967
IV	k_d , min ⁻¹	0,0274***	0,0282***	0,0291***	0,0285***	0,0240***	0,0311***
	MRPD, %	11,08	11,11	13,52	8,14	9,00	7,66
	AICc	-67,48	-77,89	-78,35	-97,84	-109,24	-95,37
	R ²	0,925	0,916	0,951	0,966	0,977	0,962
V	k_2 , min ⁻¹	0,0313***	0,0287***	0,0383***	0,0306***	0,0238***	0,0258***
	MRPD, %	11,61	8,67	20,13	10,00	12,78	7,02
	AICc	-69,90	-106,80	-61,99	-107,43	-108,47	-123,62
	R ²	0,892	0,956	0,886	0,964	0,968	0,975

* Značajne cifre: 0 **** 0,001 *** 0,01 ** 0,05 * 0,1 ' ' 1. Simboli: k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w i α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$. f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem, k_2 – konstanta brzine drugog reda, i q_w i q_d – količine etarskog ulja lavande ekstrahirane iz biljnih čestica ispiranjem i difuzijom.

Tabela 7.11b Parametri kinetičkih modela za hidrodestilaciju – zapremine suda: 1000 ml i 2000 ml; odnos cveta i vode: 1:10 g/ml

Model	Parametri modela	Brzina destilacije, ml/min					
		2,25 ± 0,19	4,46 ± 0,03	6,68 ± 0,58	2,31 ± 0,01	4,21 ± 0,23	7,33 ± 0,03
		Zapremina destilacionog suda, ml					
		1000			2000		
I	τ_w , min	5,29***	9,28***	6,00***	4,21**	4,87***	4,73***
	τ_d , min	51,56***	49,89**	41,76*	52,13***	48,61***	41,36***
	α_w , g/100g/min	0,0886**	0,0740***	0,102**	0,0633***	0,0536***	0,0665***
	α_d , g/100g/min	0,0077*	0,0057**	0,0068*	0,0055***	0,0052***	0,0063***
	k_w , min ⁻¹	0,2420	0,1981*	0,269	0,1714**	0,1173***	0,1666*
	k_d , min ⁻¹	0,0390	0,0300	0,0246	0,0213**	0,0270***	0,0298***
	q_w , g/100 g	0,630	0,688	0,681	0,559	0,656	0,617
	q_d , g/100 g	0,367	0,335	0,326	0,434	0,332	0,360
	MRPD, %	10,98	6,70	8,37	4,88	3,51	3,77
	AICc	-66,82	-91,10	-64,20	-112,66	-142,5	-128,8
	R ²	0,939	0,973	0,936	0,983	0,993	0,987
II	k_w , min ⁻¹	0,1030**	0,0648**	0,0745***	0,156***	0,0864***	0,105***
	k_d , min ⁻¹	0,0151*	0,0244	0,0046.	0,0143***	0,0131***	0,0121***
	f_w	0,587*	0,724	0,786***	0,424***	0,603***	0,621***
	MRPD, %	13,50	6,83	6,96	3,40	3,46	3,00
	AICc	-70,23	-121,22	-82,52	-146,70	-145,97	-148,18
	R ²	0,926	0,986	0,942	0,991	0,991	0,992
III	k_d , min ⁻¹	0,0374***	0,0484***	0,0378***	0,0247***	0,0334***	0,0357***
	f_w	0,0961	0,0077	0,086	0,157***	0,097**	0,120**
	MRPD, %	13,96	6,81	10,91	7,22	6,32	7,23
	AICc	-60,43	-118,62	-55,56	-83,71	-93,05	-82,04
	R ²	0,893	0,983	0,863	0,941	0,958	0,936
IV	k_d , min ⁻¹	0,0432***	0,0489***	0,0433***	0,0327***	0,0388***	0,0433***
	MRPD, %	13,29	6,75	11,19	12,65	9,07	10,08
	AICc	-59,64	-120,83	-55,77	-70,12	-87,57	-76,13
	R ²	0,883	0,983	0,854	0,905	0,947	0,918
V	k_2 , min ⁻¹	0,0431***	0,0534***	0,0440***	0,0674***	0,0363***	0,343***
	MRPD, %	14,37	12,49	8,19	5,77	3,81	3,06
	AICc	-74,42	-80,50	-84,89	-113,89	-136,57	-150,13
	R ²	0,869	0,909	0,888	0,957	0,978	0,982

* Značajne cifre: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '*' 0,1 ' ' 1. Simboli: k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w i α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$, f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvađa ispiranjem, k_2 – konstanta brzine drugog reda, i q_w i q_d – količine etarskog ulja lavande ekstrahirane iz biljnih čestica ispiranjem i difuzijom.

Tabela 7.11c Parametri kinetičkih modela za hidrodestilaciju – zapremina suda: 2000 ml; odnos cveta i vode: 1:15g/ml i 1:20 g/ml

Model	Parametri modela	Brzina destilacije, ml/min					
		3,07 ± 0,02	5,17 ± 0,19	8,35 ± 0,1	3,03 ± 0,15	5,39 ± 0,28	7,69 ± 0,13
		Odnos cveta i vode, g/ml					
		1:15			1:20		
I	τ_w , min	4,23***	4,35**	4,24	5,41***	4,92***	4,91**
	τ_d , min	49,23***	50,16**	59,6**	54,50**	50,07***	48,78***
	α_w , g/100g/min	0,0514***	0,0496***	0,0453***	0,0486***	0,0507***	0,0459***
	α_d , g/100g/min	0,0047***	0,0046**	0,0052***	0,0038**	0,0060***	0,0081***
	k_w , min ⁻¹	0,1058***	0,1051**	0,1108*	0,0912***	0,1261***	0,1124*
	k_d , min ⁻¹	0,0231***	0,0230**	0,0217*	0,0263*	0,0261***	0,0361**
	q_w , g/100 g	0,662	0,645	0,562	0,741	0,588	0,581
	q_d , g/100 g	0,338	0,340	0,416	0,255	0,397	0,409
	MRPD, %	2,64	4,19	6,40	4,08	4,55	6,57
	AICc	-149,3	-128,7	-98,3	-140,0	-126,0	-105,3
	R ²	0,994	0,997	0,975	0,993	0,989	0,982
II	k_w , min ⁻¹	0,102***	0,0820***	0,1048***	0,0662***	0,1283***	0,1422
	k_d , min ⁻¹	0,0196***	0,0153***	0,0130***	0,0087***	0,0167***	0,0255***
	f_w	0,504***	0,580***	0,425***	0,726***	0,411***	0,239*
	MRPD, %	2,28	2,98	5,08	5,86	2,49	6,34
	AICc	-167,97	-156,26	-128,76	-112,2	-166,7	-121,2
	R ²	0,996	0,994	0,986	0,979	0,996	0,986
III	k_d , min ⁻¹	0,0374***	0,0341***	0,0222***	0,0345***	0,0279***	0,0322***
	f_w	0,075**	0,083**	0,130***	0,064	0,117***	0,060*
	MRPD, %	4,77	5,37	7,62	8,72	5,93	6,35
	AICc	-110,57	-107,36	-86,87	-80,31	-101,35	-111,41
IV	R ²	0,976	0,974	0,950	0,941	0,967	0,979
	k_d , min ⁻¹	0,0417***	0,0385***	0,0279***	0,0381***	0,0338***	0,0351***
	MRPD, %	6,79	7,78	12,24	9,06	10,00	6,47
	AICc	-104,77	-100,46	-75,38	-80,00	-88,57	-107,58
V	R ²	0,970	0,965	0,925	0,936	0,949	0,975
	k_2 , min ⁻¹	0,0410***	0,0359***	0,0253***	0,0315***	0,0308***	0,0349***
	MRPD, %	5,00	4,52	5,79	7,55	3,56	9,81
	AICc	-119,78	-128,14	-118,85	-109,23	-140,84	-89,40
	R ²	0,967	0,974	0,968	0,956	0,982	0,935

* Značajne cifre: 0 **** 0,001 *** 0,01 ** 0,05 * 0,1 ' ' 1. Simboli: k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w i α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$. f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem, k_2 – konstanta brzine drugog reda, i q_w i q_d – količine etarskog ulja lavande ekstrahovane iz biljnih čestica ispiranjem i difuzijom.

Kod modela I, svi kinetički parametri (τ_w , τ_d , α_w , α_d , k_w , k_d , q_w i q_d) pokazuju jasnu osetljivost na promene procesnih uslova. Uticaj zapremine destilacionog suda je umeren: u većim sudovima može se javiti tendencija smanjenja τ_w i povećanja k_w zbog stabilnijeg termičkog režima, dok τ_d i k_d ne pokazuju jasan, jednosmeran trend i zavise od kombinacije zapremine i brzine destilacije. Povećanje brzine destilacije dosledno smanjuje τ_w i povećava α_w i k_w , što ukazuje na intenziviran protok pare i poboljšanu efikasnost faze ispiranja. Difuzioni parametri (α_d , k_d i q_d) takođe rastu sa povećanom brzinom destilacije, što potvrđuje ubrzano oslobađanje etarskog ulja iz unutrašnjih struktura biljnog materijala. Povećanje odnosa cvet:voda poboljšava redistribuciju etarskog ulja u brzoj fazi ispiranja, što se reflektuje blagim porastom q_w , dok se q_d može blago smanjiti usled povećane hidratacije biljne matrice i smanjenog efektivnog difuzionog gradijenta. Zbog svoje sposobnosti da konzistentno registruje promene u obe faze ekstrakcije, model I daje najstabilnije i najkompletnije opisivanje kinetike hidrodestilacije.

Parametri modela II (k_w , k_d i f_w) takođe pokazuju osetljivost na procesne promenljive, ali u manjoj meri nego u modelu I. Brža destilacija povećava k_w i, u nešto manjoj meri, k_d , što potvrđuje da faza ispiranja jače reaguje na povećan protok pare nego difuzioni režim. Parametar f_w raste sa brzinom destilacije i sa povećanim odnosima cvet:voda, što odražava veću dostupnost lako pristupačnog etarskog ulja za brzu ekstrakciju. Uticaj zapremine suda na k_w i k_d nije strogo linearan u nekim uslovima može se javiti blago smanjenje k_w zbog slabijeg mešanja u većim sistemima, dok k_d najčešće ostaje stabilan. Model II dobro prikazuje ravnotežu ispiranja i difuzije, ali sa slabijom eksplicitnom razdvojenošću faza nego model I.

Model III, zasnovan na parametrima k_d i f_w , pokazuje srednju osetljivost na procesne promene. Brža destilacija dosledno povećava k_d , dok je uticaj zapremine suda nelinearan — može doći do umerenog porasta k_d u srednjim zapreminama, dok ekstremno male ili veoma velike zapremine ne prate stabilan trend. Parametar f_w snažno varira sa brzinom destilacije i odnosom cvet:voda, što potvrđuje da se promenom hidrauličkih uslova značajno menja udeo etarskog ulja koje prelazi u bržu fazu oslobađanja. Međutim, ograničena struktura modela III otežava precizno opisivanje dvofaznog karaktera hidrodestilacije, pa odstupanja postaju izraženija pri kompleksnijim uslovima.

Model IV sadrži samo jedan kinetički parametar (k_d), što pojednostavljuje interpretaciju, ali smanjuje sposobnost modela da razdvoji efekte između ispiranja i difuzije. Brža destilacija povećava k_d , potvrđujući intenzifikaciju difuzionog prenosa pri jačem protoku pare. Uticaj

zapremine suda i odnosa cvet:voda je umeren i nelinearan: k_d može biti povećan u umerenim uslovima, ali ne pokazuje jedinstven ili stabilan trend kada se menjaju ekstremne vrednosti parametara. Zbog odsustva faze ispiranja u strukturi modela, ovaj model je manje osetljiv na procesne promene i pokazuje slabije statističke performanse.

Model V, definisan konstantom brzine drugog reda k_2 , najjače reaguje na promene brzine destilacije — veći protok pare dosledno povećava k_2 , ukazujući na osetljivu zavisnost globalne kinetike od hidrodinamičkih uslova. Međutim, uticaji zapremine suda i odnosa cvet:voda su nelinearni i često nepredvidljivi: k_2 može rasti u umerenim uslovima, ali opadati pri ekstremnim vrednostima ovih parametara, što je posledica promena u toplotnom balansu i stepenu hidratacije biljne matrice. Model V, iako koristan za globalno opisivanje kinetike, pokazuje najveću varijabilnost i najmanju stabilnost među modelima.

Posmatrajući sve modele, klasična hidrodestilacija pokazuje doslednu zavisnost kinetike od ključnih procesnih parametara (zapremina destilacionog suda, brzina destilacije i odnos cvet:voda). Ipak, modeli se značajno razlikuju u osetljivosti i stabilnosti: modeli I i II najvernije reflektuju dvofazni karakter procesa i konzistentno reaguju na promene uslova; modeli III i IV prate difuzione promene, ali slabije predstavljaju ispiranje; model V je najosetljiviji na protok pare, ali pokazuje najmanju robustnost. Ove razlike potvrđuju da složeniji modeli (I i II) pružaju najpouzdaniji opis hidrodestilacije, naročito pri različitim kombinacijama procesnih parametara.

7.1.5.4 zbor kinetičkog modela za inženjersku primenu

Iako je model I pokazao nešto bolje statističke performanse u poređenju sa modelom II, razlika između njih nije dovoljno velika da bi opravdala primenu složenijeg modela u inženjerskim uslovima. Model II poseduje jednostavniju strukturu, manji broj parametara i lakšu matematičku obradivost, što ga čini pogodnijim za brzu procenu parametara modela na osnovu eksperimentalnih podataka, operativnu upotrebu i pouzdane proračune. Zahvaljujući boljim svojstvima generalizacije i većoj robusnosti u primeni, tj. dobrom funkcionisanju i van skupa podataka na kojima je izveden i stabilnom i pouzdanom ponašanju u realnim uslovima, model II predstavlja praktičniji izbor za opisivanje kinetike hidrodestilacije, uprkos nešto slabijim statističkim pokazateljima u poređenju sa modelom I.

Kako se očekivalo, parametri modela II (k_w , k_d i f_w) zavise od odnosa cveta i vode, zapremine destilacionog suda i brzine destilacije. Za opis ove zavisnosti korišćena je sledeća empirijska korelacija:

$$y = k \cdot x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \quad (7.3)$$

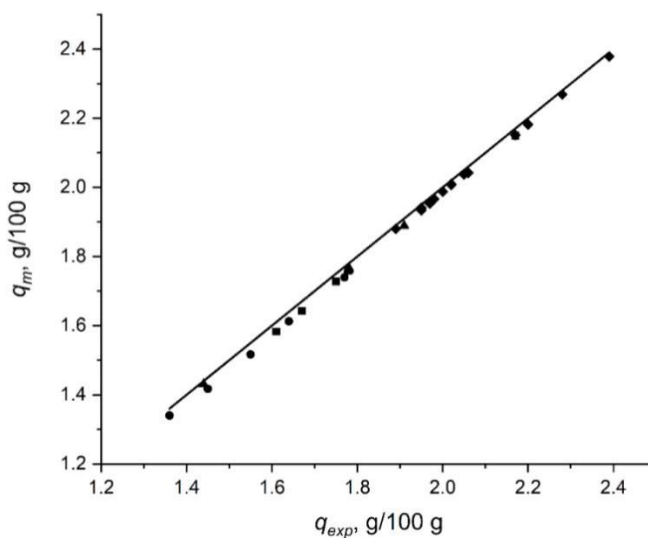
gde y označava analizirane parametre k_w , k_d i f_w , dok x_1 , x_2 i x_3 predstavljaju odnos cveta i vode, zapreminu destilacionog suda i brzinu destilacije, redom. Vrednosti koeficijenta k i eksponenta a , b i c date su u tabeli 7.12.

Tabela 7.12 Parametri jednačine (7.3).

Parametri	k	a	b	c
k_w, min^{-1}	0,0072	0,155	0,286	0,109
k_d, min^{-1}	0,0054	0,077	0,106	0,123
f_w	2,38	-0,445	-0,041	-0,026

Rezultati pokazuju da sva tri faktora procesa pozitivno utiču na konstante brzine ispiranja i difuzije, dok negativno utiču na frakciju ispranog etarskog ulja. Međutim, analiza pojedinačnih uticaja otkriva da povećanje zapremine destilacionog suda ima najveći efekat na konstantu brzine ispiranja, dok brzina destilacije pokazuje najmanji uticaj. Suprotno tome, brzina destilacije snažno utiče na konstantu brzine difuzije, dok je uticaj zapremine destilacionog suda relativno slabiji. Kada je reč o frakciji ispranog etarskog ulja, primećeno je da se prinos u fazi ispiranja smanjuje sa porastom bilo kog od faktora, pri čemu odnos cveta i vode ima najizraženiji uticaj, dok zapremina destilacionog suda i brzina destilacije imaju minimalne efekte.

Slika 7.10 potvrđuje odlično slaganje između eksperimentalno dobijenih prinosa etarskog ulja i onih predviđenih jednačinom (7.3) sa parametrima iz tabele 7.12. Ovo podudaranje dodatno potvrđuje mala vrednost $MRPD$ od $\pm 0,99\%$.

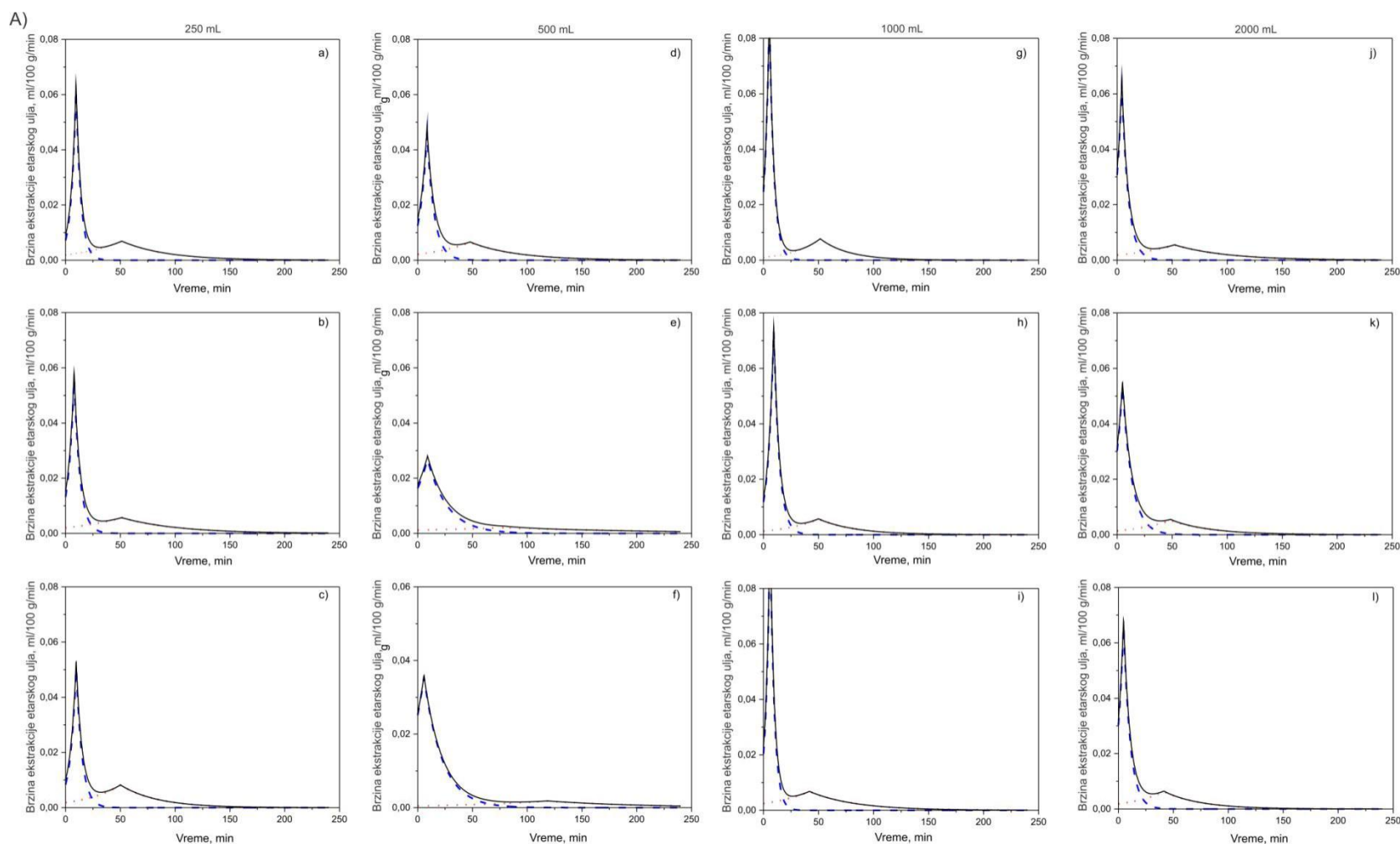


Slika 7.10 Poređenje eksperimentalnih i predviđenih vrednosti prinosa etarskog ulja lavande (zapremina destilacionog suda, ml: 250 – ●, 500 – ■, 1000 – ▲ i 2000 – ◆)

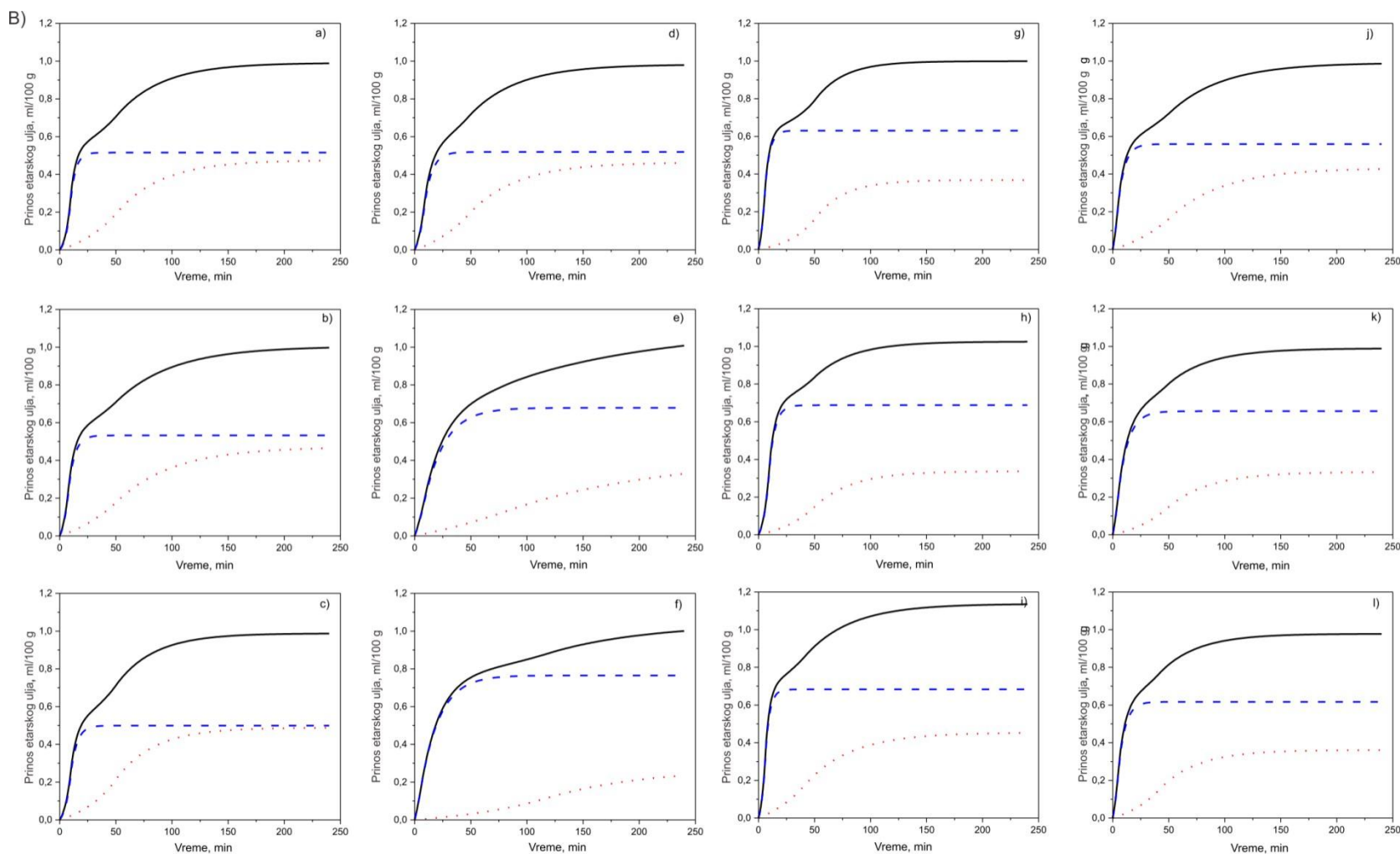
7.1.5.5 *ehanističko tumačenje kinetike konvencionalne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I*

Model I je primenjen za grafičku simulaciju promena prinosa i brzine hidrodestilacije etarskog ulja lavande tokom procesa u destilacionom sudu zapremine 250 ml, pri prosečnoj brzini destilacije od $0,69 \pm 0,09$ ml/min i odnosu cveta i vode 1:10 g/ml, što je prikazano na slikama 7.11 i 7.12. Simulisane krive prinosa i brzine destilacije etarskog ulja lavande verno reprodukuju eksperimentalno uočenu dvofaznu kinetiku procesa: izraženu ranu fazu ispiranja sa visokim početnim vrednostima brzine, kao i kasniju difuzionu kontrolisanu fazu sa asimptotskim porastom prinosa i produženu završnu fazu kinetičke krive.

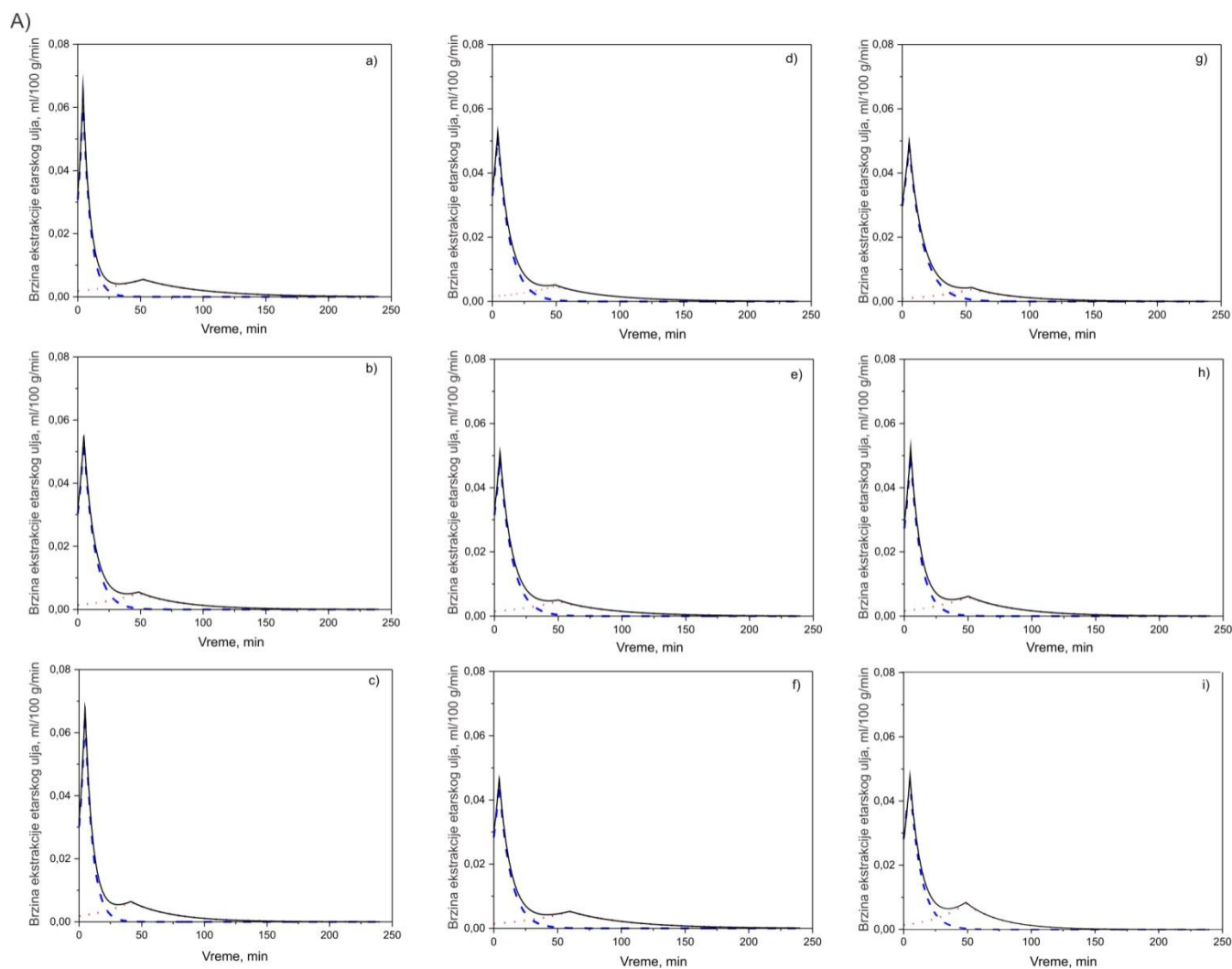
U svim ispitivanim uslovima, konvencionalna hidrodestilacija etarskog ulja lavande odvija se kroz početnu fazu u kojoj dominira ispiranje, nakon čega sledi difuzijom kontrolisana “krajnja” faza, što se ogleda u izraženom ranom maksimumu brzine ekstrakcije i produženoj fazi niske brzine izdvajanja etarskog ulja (slike 7.11 i 7.12). Pri fiksnom odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml, povećanje brzine destilacije unutar svake zapremine destilacionog suda pre svega dovodi do vremenske preraspodele ekstrakcije, intenzivirajući i pomerajući maksimum ispiranja ka početku procesa, uz istovremeno skraćivanje difuzijom kontrolisanog perioda, ali uz samo minimalne efekte na konačni prinos (slika 7.11).



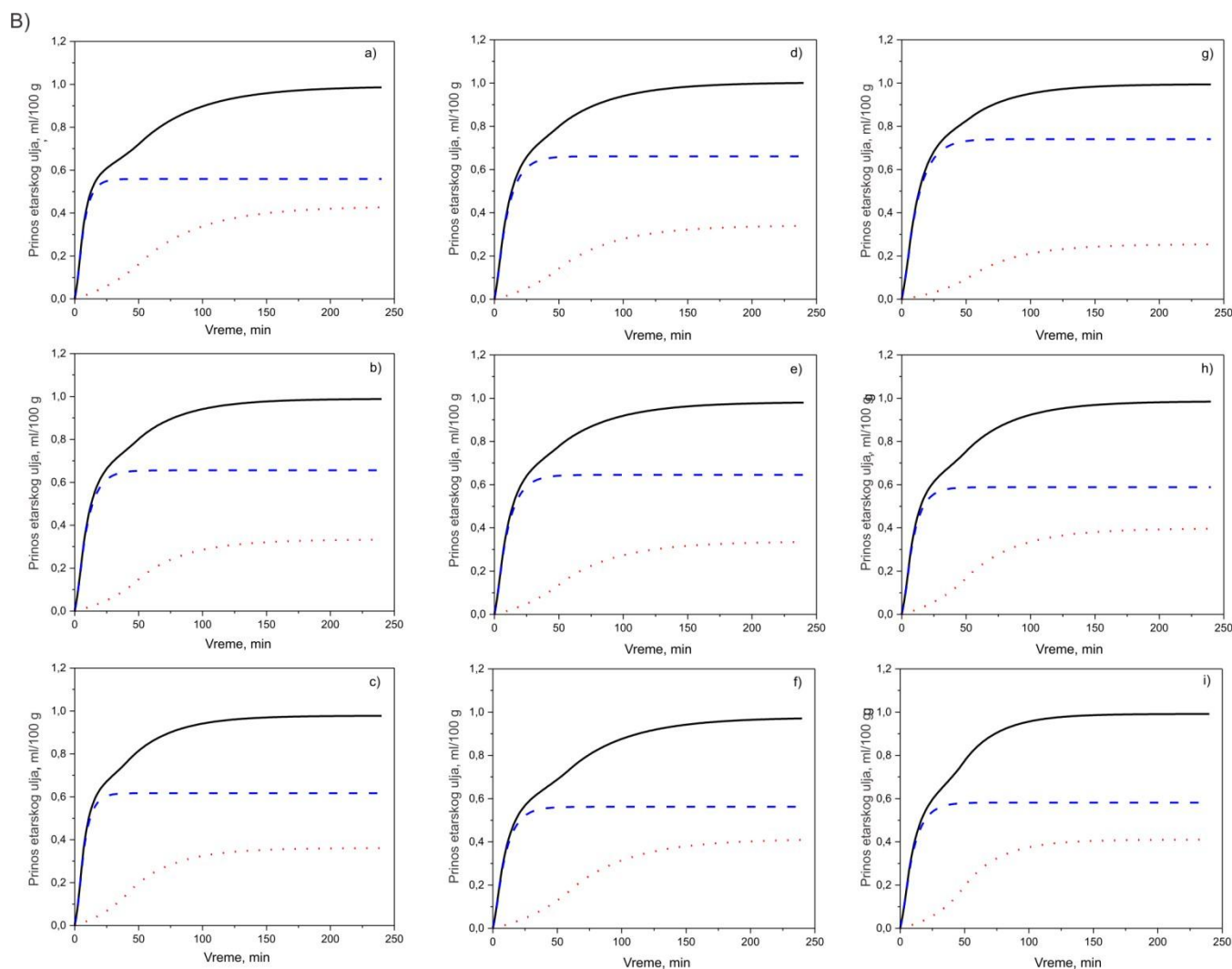
Slika 7.11A Vremenske promene brzine ekstrakcije etarskog ulja lavande tokom konvencionalne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml u destilacionim sudovima zapremine 250 ml (a–c), 500 ml (d–f), 1000 ml (g–i) i 2000 ml (j–l), simulirane primenom modela I, pri brzinama destilacije: (a) $0,69 \pm 0,09$ ml/min, (b) $1,73 \pm 0,09$ ml/min, (c) $2,75 \pm 0,12$ ml/min, (d) $1,18 \pm 0,04$ ml/min, (e) $2,72 \pm 0,05$ ml/min, (f) $4,98 \pm 0,10$ ml/min, (g) $2,25 \pm 0,19$ ml/min, (h) $4,46 \pm 0,03$ ml/min, (i) $6,68 \pm 0,58$ ml/min, (j) $2,31 \pm 0,01$ ml/min, (k) $4,21 \pm 0,23$ ml/min i (l) $7,33 \pm 0,03$ ml/min; plava isprekidana linija – ispiranje, crvena tačkasta linija – difuzija i crna puna linija – ispiranje + difuzija



Slika 7.11B Vremenske promene prinosa etarskog ulja lavande tokom konvencionalne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml u destilacionim sudovima zapremine 250 ml (a–c), 500 ml (d–f), 1000 ml (g–i) i 2000 ml (j–l), simulirane primenom modela I, pri brzinama destilacije: (a) $0,69 \pm 0,09$ ml/min, (b) $1,73 \pm 0,09$ ml/min, (c) $2,75 \pm 0,12$ ml/min, (d) $1,18 \pm 0,04$ ml/min, (e) $2,72 \pm 0,05$ ml/min, (f) $4,98 \pm 0,10$ ml/min, (g) $2,25 \pm 0,19$ ml/min, (h) $4,46 \pm 0,03$ ml/min, (i) $6,68 \pm 0,58$ ml/min, (j) $2,31 \pm 0,01$ ml/min, (k) $4,21 \pm 0,23$ ml/min i (l) $7,33 \pm 0,03$ ml/min; plava isprekidana linija – ispiranje, crvena tačkasta linija – difuzija i crna puna linija – ispiranje + difuzija



Slika 7.12A Vremenske promene brzine ekstrakcije etarskog ulja lavande tokom konvencionalne hidrodestilacije pri odnosima cveta i vode 1:10 g/ml (a–c), 1:15 g/ml (d–f) i 1:20 g/ml (g–i) u destilacionom sudu od 2000 ml, simulirane primenom modela I, pri brzinama destilacije: (a) $2,31 \pm 0,01$ ml/min, (b) $4,21 \pm 0,23$ ml/min, (c) $7,33 \pm 0,03$ ml/min, (d) $3,07 \pm 0,02$ ml/min, (e) $5,17 \pm 0,19$ ml/min, (f) $8,35 \pm 0,10$ ml/min, (g) $3,03 \pm 0,15$ ml/min, (h) $5,39 \pm 0,28$ ml/min i (i) $7,69 \pm 0,13$ ml/min; plava linija – ispiranje, crvena linija – difuzija i crna linija – ispiranje + difuzija



Slika 7.12B Vremenske promene prinosa etarskog ulja lavande tokom konvencionalne hidrodestilacije pri odnosima cveta i vode 1:10 g/ml (a–c), 1:15 g/ml (d–f) i 1:20 g/ml (g–i) u destilacionom sudu od 2000 ml, simulirane primenom modela I, pri brzinama destilacije: (a) $2,31 \pm 0,01$ ml/min, (b) $4,21 \pm 0,23$ ml/min, (c) $7,33 \pm 0,03$ ml/min, (d) $3,07 \pm 0,02$ ml/min, (e) $5,17 \pm 0,19$ ml/min, (f) $8,35 \pm 0,10$ ml/min, (g) $3,03 \pm 0,15$ ml/min, (h) $5,39 \pm 0,28$ ml/min i (i) $7,69 \pm 0,13$ ml/min; plava linija – ispiranje, crvena linija – difuzija, i crna linija – ispiranje + difuzija

Promene zapremine destilacionog suda utiču na intenzitet početnog „talasa” ispiranja: srednje zapremine (naročito 1000 ml) omogućavaju izraženije i efikasnije rano oslobađanje etarskog ulja, verovatno zbog povoljne ravnoteže između brzine stvaranja pare, zadržavanja tečnosti i hidrodinamičke obnove na granici cvet–voda, dok manji ili veći sudovi pokazuju ili slabije ispiranje ili izraženiji doprinos difuzije. Shodno tome, konačni prinosi etarskog ulja se u većini uslova približavaju istim vrednostima, osim kada povećana efikasnost ispiranja koincidira sa dovoljno visokim protokom pare, što dovodi do umerenog povećanja prinosa etarskog ulja.

Pri konstantnoj zapremini destilacionog suda od 2000 ml, promena odnosa cveta i vode menja relativne doprinose ispiranja i difuzije, ali bez značajnog uticaja na ukupno izdvajanje etarskog ulja (slika 7.12). Povećanje sadržaja vode (sa 1:10 g/ml na 1:20 g/ml) blago umanjuje dominaciju početne faze ispiranja i produžava difuzijom kontrolisanu fazu, u skladu sa razblaženjem koje dovodi do smanjenja koncentracionih gradijenata i sporijeg prenosa mase iz dubljih biljnih tkiva. Veće brzine destilacije ubrzavaju rano oslobađanje etarskog ulja i skraćuju period efektivne difuzije, tako da se ranije dostiže plato, ali konačni prinosi etarskog ulja ostaju uporedivi. To ukazuje da je kinetika hidrodestilacije u ispitivanim uslovima pretežno ograničena brzinom procesa, a ne maksimalno dostupnim prinosom etarskog ulja. U celini, zapremina destilacionog suda, brzina destilacije i odnos cveta i vode prvenstveno regulišu vremensku strukturu oslobađanja etarskog ulja pomeranjem ravnoteže između ispiranja i difuzije, dok na ukupni prinos etarskog ulja imaju samo sekundaran uticaj

7.1.6. Uticaj mlevenja i prosejavanja cveta i modifikacije destilacionog medijuma na kinetiku hidrodestilacije

7.1.6.1 Uticaj mlevenja na kinetiku hidrodestilacije

Tabela 7.13 prikazuje uticaj mlevenja na kinetiku hidrodestilacije opisanu modelom II. Visoke vrednosti koeficijenta determinacije ($R^2 > 0,96$) i relativno nizak *MRPD* (4–12%) potvrđuju dobro slaganje modela sa eksperimentalnim podacima. Udeo etarskog ulja koji se može isprati (f_w) raste od 0,631 za celi cvet, preko 0,752 i 0,786 za mokro- i suvo mleveni (neprosejani) cvet, do približno 0,805 za suvo mleveni i prosejani cvet. Najmanja vrednost f_w kod celog cveta objašnjava se znatno manjim stepenom oštećenja žlezdi koje sadrže etarsko ulje u poređenju sa mlevenim uzorcima. Suvo mlevenje i prosejavanje dodatno ubrzavaju početnu

brzinu destilacije, verovatno zbog veće specifične kontaktne površine i većeg oštećenja žlezdi koje sadrže etarsko ulje. Promene konstanti brzine ispiranja i difuzije u zavisnosti od primenjenog predtretmana ne mogu se u potpunosti objasniti, iako se njihov značajan uticaj ne očekuje. Ipak, prosečne vrednosti konstanti brzine ispiranja i difuzije ($k_w = 0,0867 \pm 0,0221 \text{ min}^{-1}$ i $k_d = 0,0117 \pm 0,0057 \text{ min}^{-1}$) pokazuju statistički značajnu razliku ($t = 7,367$ i $p = 0,00004 < 0,05$).

Tabela 7.13 Uticaj vrste mlevenja i primene prosejavanja suvo samlevenih cvetova lavande na maksimalni prinos etarskog ulja i kinetiku hidrodestilacije

Predtretman	Inicijalna brzina destilacije, ml/100 g/min	f_w , 1	k_w , min^{-1}	k_d , min^{-1}	R^2	MRPD, %
Bez predtretmana (celi cvetovi)	0,0573	0,631	0,0803	0,0179	0,999	$\pm 1,5$
Mokro mlevenje	0,0549	0,752	0,0707	0,0071	0,980	$\pm 11,6$
Suvo mlevenje (bez prosejavanja) neposredno pre hidrodestilacije	0,0580	0,786	0,0713	0,0089	0,992	$\pm 4,4$
Suvo mlevenje i prosejavanje neposredno pre hidrodestilacije	0,0713	0,805	0,0870	0,0067	0,983	$\pm 4,1$
Suvo mlevenje, prosejavanje i čuvanje u papirnoj kesi na suvom i tamnom mestu pre hidrodestilacije	0,0818	0,812	0,0985	0,0097	0,961	$\pm 5,9$

7.1.6.2 Uticaj vrste i koncentracije rastvora soli na kinetiku hidrodestilacije

Tabela 7.14 prikazuje uticaj vrste i koncentracije soli na kinetiku hidrodestilacije etarskog ulja iz celih cvetova lavande opisanu modelom II. Visoke vrednosti koeficijenta determinacije ($R^2 > 0,97$) i relativno nizak MRPD (5–13%) potvrđuju dobro slaganje modela sa eksperimentalnim podacima. Rezultati pokazuju da je početna brzina destilacije etarskog ulja viša u vodi nego u rastvorima KCl ili NaCl koncentracije 3–10%. Istovremeno, prisustvo soli ne utiče značajno na udeo etarskog ulja koji se može isprati ($f_w = 0,820 \pm 0,005$). Međutim, vrsta i koncentracija soli utiču na tok hidrodestilacije etarskog ulja, smanjujući brzinu ispiranja i povećavajući brzinu difuzije. Konkretno, konstanta brzine ispiranja opada ($k_w = 0,0477 \pm 0,0010 \text{ min}^{-1}$ naspram $0,0654 \text{ min}^{-1}$), dok konstanta brzine difuzije raste ($k_d = 0,0125 \pm 0,0028 \text{ min}^{-1}$ u odnosu na $0,0074 \text{ min}^{-1}$) u rastvorima soli u poređenju sa vodom. Pretpostavlja se

da soli mogu narušiti integritet žlezda koje sadrže etarsko ulje, čime se olakšava ekstrakcija etarskog ulja. Pored toga, dodavanje soli povišuje tačku ključanja rastvora, što dodatno ubrzava prenos mase i toplote tokom hidrodestilacije (Suryanti i sar. 2023).

Tabela 7.14 Uticaj dodatka soli u destilacioni medijum na maksimalni prinos etarskog ulja lavande i kinetiku hidrodestilacije

Vrsta soli	Inicijalna brzina destilacije etarskog ulja, ml/100 g/min	f_w , 1	k_w , min ⁻¹	k_d , min ⁻¹	R^2	$MRPD$, %
Voda	0,0555	0,826	0,0654	0,0074	0,987	± 7,4
KCl, 3%	0,0412	0,814	0,0487	0,0084	0,973	± 12,7
KCl, 5%	0,0416	0,818	0,0480	0,0128	0,995	± 4,9
NaCl, 5%	0,0416	0,825	0,0475	0,0144	0,996	± 4,8
NaCl, 10%	0,0406	0,819	0,0464	0,0143	0,993	± 8,2
		0,820 ± 0,005 ^b	0,0477 ± 0,0010 ^a	0,0125 ± 0,0028 ^a		

^a Srednja vrednost za rastvore soli ^b Srednja vrednost za vodu i rastvore soli

7.1.6.3 Uticaj VFHD na kinetiku hidrodestilacije

Tabela 7.15 prikazuje uticaj upotrebe VFHD iz prethodnih hidrodestilacija kao dela destilacionog medijuma u narednim hidrodestilacijama na kinetiku hidrodestilacije etarskog ulja iz celih cvetova, opisanu modelom II. Na osnovu visokih vrednosti koeficijenta determinacije ($R^2 > 0,98$) i umerenih vrednosti $MRPD$ -a (7–18%) može se zaključiti da je model II primenljiv i u slučaju uzastopne primene VFHD. Udeo etarskog ulja ekstrahovan ispiranjem ostaje približno isti od šarže do šarže, dok su promene konstanti brzine ispiranja i difuzije teže uočljive. Ovi rezultati se mogu objasniti različitim mehanizmima uključenim u dve glavne faze hidrodestilacije: ispiranje i difuziju. Dodavanje VFHD iz prethodne destilacije, u kombinaciji sa svežom vodom, verovatno ne utiče značajno na rastvorljivost ili dostupnost površinskog etarskog ulja, pa brzina ispiranja ostaje nepromenjena. Nasuprot tome, difuzija, koja obuhvata transport etarskog ulja iz unutrašnjih žlezda kroz biljno tkivo do površine, predstavlja sporiji proces podložan različitim faktorima, uključujući prodiranje vode u tkivo i ekstrakciju etarskog ulja iz unutrašnjih žlezda. Prisustvo VFHD, bogate hidrofilnim jedinjenjima iz prethodne hidrodestilacije, može pospešiti difuziju menjajući osmotski pritisak između ćelijskog sadržaja i

spoljašnjeg rastvora ili povećanjem polariteta rastvora (Trujillo-Echeverria i sar. 2020, Wu i sar. 2020, Zhang i sar. 2024b). Time se može olakšati razgradnja zidova žlezda i oslobađanje etarskog ulja. Pored toga, VFHD, kao rastvor sa već prisutnim ekstrahovanim komponentama, može dodatno unaprediti rastvorljivost preostalih jedinjenja u cvetovima lavande.

Tabela 7.15 Uticaj kombinovanja VFHD i vode na maksimalni prinos etarskog ulja i kinetiku hidrodestilacije.

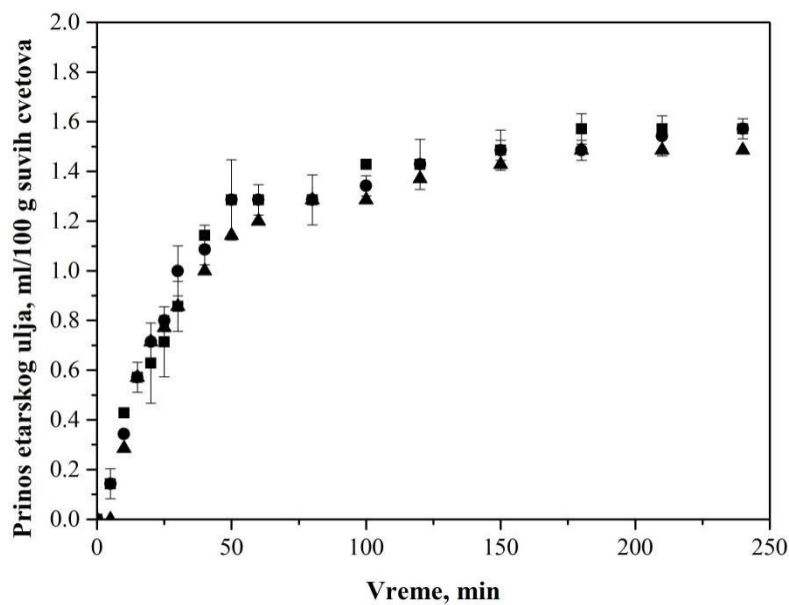
Broj šarže	Inicijalna brzina destilacije etarskog ulja, ml/100 g/min	f_w , 1	k_w , min ⁻¹	k_d , min ⁻¹	R^2	MRPD, %
I šarža (voda)	0,0555	0,827	0,0656	0,0074	0,987	± 7,4
II šarža	0,0571	0,823	0,0667	0,0127	0,978	± 11,9
III šarža	0,0592	0,830	0,0689	0,0124	0,984	± 8,8
IV šarža	0,0493	0,794	0,0592	0,0112	0,988	± 8,3
V šarža	0,0392	0,794	0,0459	0,0133	0,987	± 18,0
		0,810 ± 0,019 ^a	0,0602 ± 0,0104 ^a	0,0114 ± 0,0024 ^a		

^a Srednja vrednost za II-V šaržu

7.2 Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija

7.2.1 Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima

Na slici 7.13 prikazane su varijacije prinosa etarskog ulja lavande u procesu sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije u destilacionom sudu zapremine 1000 ml, pri amplitudama ultrazvuka od 60% i 80% i trajanju predtretmana od 30 min i 45 min, uz odnos cveta i vode 1:10 g/ml. U svim ispitivanim uslovima ostvaren je niži prinos u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom ($1,92 \pm 0,38$ ml/100 g suvih cvetova). Pri amplitudi od 60% i trajanju od 30 min prinos je iznosio $1,57 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova, dok je pri amplitudi od 80% i istom trajanju ostvaren prinos od $1,54 \pm 0,04$ ml/100 g suvih cvetova. Produženje vremena sonikacije na 45 min pri amplitudi od 80% dovelo je do daljeg smanjenja prinosa na $1,49 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova (tabela 7.16). Ovi rezultati jasno ukazuju da primenjeni ultrazvučni predtretman, pod datim uslovima, nije doprineo povećanju ukupnog prinosa etarskog ulja.



Slika 7.13 Varijacije prinosa etarskog ulja lavande u procesu sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije etarskog ulja iz celih cvetova u destilacionom sudu od 1000 ml pri različitim amplitudama i dejstvu ultrazvuka: 60% 30 min – ■, 80% 30 min – ● i 80% 45 min – ▲ (odnos cveta i vode 1:10 g/ml, brzina destilacije: $5,27 \pm 0,00$ – $6,43 \pm 0,13$ ml/min)

Tabela 7.16 Uticaj amplitude i vremena trajanja ultrazvuka na maksimalni prinos etarskog ulja iz celih cvetova lavande u destilacionom sudu od 1000 ml i pri odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml

Amplituda, %	Vreme trajanja ultrazvuka, min	Brzina destilacije, ml/min	Prinos etarskog ulja lavande, ml/100 g suvih cvetova	Poređenje sa klasičnom hidrodestilacijom, %
60	0	$6,68 \pm 0,82$	$1,92 \pm 0,38$	100,00
	30	$6,43 \pm 0,13$	$1,57 \pm 0,00$	81,77
80	0	$6,68 \pm 0,82$	$1,92 \pm 0,38$	100,00
	30	$6,41 \pm 0,14$	$1,54 \pm 0,04$	80,51
	45	$5,27 \pm 0,00$	$1,49 \pm 0,00$	77,60

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost $\pm$ standardna devijacija

Uočeno smanjenje prinosa može se objasniti primenom ultrazvučnih parametara izvan optimalnog operativnog domena. Iako ultrazvuk putem kavitacije mehanički oštećuje ćelijske zidove i sekretorne strukture, čime olakšava inicijalno oslobađanje ulja (Nora i Borges 2017, Toma i sar. 2001), optimizacione studije zasnovane na metodologiji površine odziva pokazuju da maksimalni prinos postoji samo u umerenim uslovima sonikacije (Moradi-Sadr i sar. 2023, Yu i sar. 2020). Pri pre niskim parametrima destrukcija tkiva je nedovoljna, dok previsoka amplituda

ili produženo trajanje tretmana dovode do intenzivne kavitacije, lokalnog pregrevanja i mogućih degradacionih procesa (Hielscher Ultrasonics 2024).

Pored potencijalne termičke i hemijske degradacije, visoki ultrazvučni intenzitet može uticati i na fizičko stanje oslobođenog etarskog ulja. Fragmentacija uljnih kapljica i njihova fina disperzija u vodenoj fazi pogoduju formiranju kinetički stabilnih emulzija (Chemat i sar. 2011, 2017), što može otežati gravitacionu koalescenciju i fazno razdvajanje u Klevendžerovom aparatu. Istovremeno, povećana permeabilnost i hidratacija biljnog tkiva dovode do bubrenja matrice, što može smanjiti efektivnu propustljivost za vodenu paru i usporiti difuzioni transport preostalog ulja tokom hidrodestilacije (Yu i sar. 2020). Stoga, smanjenje registrovanog prinosa ne mora nužno odražavati slabiju ekstrakciju, već promenu fazne raspodele i fizičkog oblika oslobođenog ulja.

Literaturni podaci potvrđuju da efekat ultrazvučnog predtretmana zavisi od prirode biljnog matriksa i kombinacije sa drugim energetske tehnikama. Chekoual i saradnici (2018a,b, 2021) pokazali su da ultrazvuk može skratiti vreme ekstrakcije i povećati prinos kod pojedinih populacija *L. stoechas* L., dok su Périno-Issartier i saradnici (2013) utvrdili da ultrazvučna obrada cvetova lavandina nije povećala prinos nakon parne destilacije. Šarifzadeh i saradnici (2022) su pokazali da kombinacija ultrazvuka i mikrotalasne ekstrakcije može značajno povećati prinos, što ukazuje da je efikasnost ultrazvuka snažno uslovljena energetske režimom procesa i strukturom matriksa. Nora i Borges (2017) su takođe pokazali da ultrazvučni predtretman može značajno skratiti vreme destilacije, dok Hedayati i saradnici (2025) ističu potrebu za daljim istraživanjima skalabilnosti i industrijske primene ovih metoda.

7.2.2 Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom

U tabeli 7.17 prikazan je hemijski sastav etarskih ulja lavande dobijenih sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom, pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml, u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri različitim amplitudama i različitom vremenu dejstva ultrazvuka. Primer GC/MS hromatograma uzorka etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri ultrazvuku amplitude 80% u trajanju od 30 minuta dat je u prilogu (Slika P7.4). U svim uzorcima etarskih ulja detektovano je ukupno 35 jedinjenja.

Tabela 7.17 Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom pri različitim amplitudama i vremenima dejstva ultrazvuka

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Amplituda ultrazvuka, %		
			60	80	80
			Vreme dejstva ultrazvuka, min		
			30	30	45
Ukupni sadržaj, %					
<i>α</i> -Pinen	939	930,9	0,132 ± 0,008	0,115 ± 0,019	0,129 ± 0,011
Kamfen	946	946,4	0,117 ± 0,003	0,058 ± 0,081	0,113 ± 0,056
3-Oktanon	979	984,6	0,472 ± 0,026	0,462 ± 0,025	0,450 ± 0,022
Mircen	988	989,1	0,324 ± 0,009	0,306 ± 0,042	0,366 ± 0,013
Butil butanoat	993	992,9	0,061 ± 0,086	0,160 ± 0,069	0,132 ± 0,054
Heksil acetat	1007	1011	0,933 ± 0,017	0,905 ± 0,036	0,891 ± 0,017
<i>ρ</i> -Cimen	1020	1022,7	0,382 ± 0,130	0,022 ± 0,031	tr
<i>o</i> -Cimen	1022	1024,6	0,226 ± 0,320	0,420 ± 0,036	0,462 ± 0,084
Limonen	1024	1027,9	0,184 ± 0,078	0,219 ± 0,033	0,243 ± 0,035
1,8-Cineol	1026	1029,7	1,796 ± 0,066	1,702 ± 0,172	1,755 ± 0,087
(Z)- <i>β</i> -Ocimen	1032	1035,4	0,401 ± 0,042	0,346 ± 0,036	0,395 ± 0,022
(E)- <i>β</i> -Ocimen	1044	1046,1	0,232 ± 0,062	0,242 ± 0,025	0,258 ± 0,068
<i>γ</i> -Terpinen	1054	1057,4	0,041 ± 0,057	0,039 ± 0,054	-
<i>cis</i> -Linalol oksid (furanoid)	1067	1073,6	3,365 ± 0,279	3,349 ± 0,011	3,785 ± 0,154
<i>trans</i> -Linalol oksid (furanoid)	1084	1089,9	2,235 ± 0,229	2,278 ± 0,117	2,613 ± 0,112
Linalol	1095	1106,2	37,394 ± 0,845	37,800 ± 0,805	39,04 ± 0,752
1-Okten-3-il acetat	1110	1109,7	5,108 ± 0,040	5,026 ± 0,148	5,181 ± 0,262
3-Oktanol acetat	1120	1121,4	0,074 ± 0,003	0,061 ± 0,022	-
Kamfor	1141	1145	0,506 ± 0,244	0,669 ± 0,030	0,678 ± 0,049
Nerol oksid	1154	1154,5	0,168 ± 0,062	0,117 ± 0,165	0,230 ± 0,187
Borneol	1165	1172,7	1,694 ± 0,917	1,462 ± 0,144	2,973 ± 0,221
Terpinen-4-ol	1174	1181,5	3,618 ± 0,108	3,559 ± 0,083	3,708 ± 0,052
Kripton	1183	1189	1,780 ± 0,049	1,799 ± 0,052	1,864 ± 0,077
<i>α</i> -Terpineol	1186	1197,3	2,597 ± 0,238	2,793 ± 0,188	3,073 ± 0,213
Verbenon	1204	1211,3	0,046 ± 0,004	0,123 ± 0,016	0,096 ± 0,008
Kumin aldehid	1238	1243,2	0,187 ± 0,023	0,083 ± 0,117	-
Linalil acetat	1254	1255	22,233 ± 1,429	21,437 ± 1,501	18,738 ± 1,227
<i>ρ</i> -Ment-1-en-7-al	1273	1277,2	-	-	0,164 ± 0,004
Izobornul acetat	1283	1283,7	-	0,017 ± 0,023	-
Lavandulil acetat	1288	1288,7	7,153 ± 0,140	7,365 ± 0,086	7,203 ± 0,061
Neril acetat	1359	1362,3	0,295 ± 0,004	0,300 ± 0,011	0,315 ± 0,010
Geranil acetat	1379	1381,6	0,570 ± 0,128	0,706 ± 0,001	0,897 ± 0,017
(E)-Kariofilen	1417	1424,7	0,868 ± 0,103	0,929 ± 0,060	0,643 ± 0,088
E)- <i>β</i> -Farnezen	1440	1453,7	0,107 ± 0,018	0,098 ± 0,043	-
Kariofilen oksid	1582	1583,1	1,778 ± 0,177	1,679 ± 0,004	1,422 ± 0,010
Monoterpeni			2,039	1,767	1,966
Oksidovani monoterpeni			83,670	83,677	85,268
Seskviterpeni			2,753	2,706	2,065
Ostalo			8,615	8,496	8,518

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost $\pm$ standardna devijacija. Procesni uslovi: odnos cveta i vode 1:10 g/ml, destilacioni sud zapremine 1000 ml

RI^{lit} – Linearni retencioni indeksi dostupni u literaturi (Adams, 2007); RI^{exp} – Linearni retencioni indeksi određeni eksperimentalno pomoću homologe serije *n*-alkana (C₈-C₂₀) na HP-5MS koloni. Sve komponente su identifikovane poređenjem retencionih indeksa i masenih spektara; tr – komponenta prisutna u tragovima <0,05%.

Pretpostavka je da je zbog kratkog vremena trajanja hidrodestilacije i selektivnog oslobađanja, izdvojeno manje jedinjenja nego prilikom konvencionalne hidrodestilacije.

Uglavnom je došlo do oslobađanja lakoisparljivih, termolabilnih monoterpena i oksidovanih monoterpena, dok su se seskviterpeni i stabilniji sastojci koji zahtevaju duže vreme da pređu u parnu fazu, izdvojili u manjoj meri. Glavna grupa identifikovanih jedinjenja su oksidovani monoterpeni (83,67–85,27%). Kao glavne komponente u svim uzorcima etarskih ulja pojavljuju se linalol (37,39–39,04%), linalil acetat (18,74–22,23%), lavandulil acetat (7,15–7,36%), 1-okten-3-il acetat je bio prisutan u granicama iznad 5% a terpinen-4-ol i α -terpineol su bili prisutni u ukupnim procentima iznad 2% u svim analiziranim uzorcima. U odnosu na konvencionalnu hidrodestilaciju, pri sekvencijalnoj ultrazvučnoj hidrodestilaciji dolazi do izdvajanja veće količine linalola (39,04% u odnosu na 32,32%), linalil acetata (22,23% u odnosu na 20,41%) i lavandulil acetata (7,36% u odnosu na 6,87%). Dodatno, količina monoterpena i seskviterpena u uljima dobijenim pri sekvencijalnoj ultrazvučnoj hidrodestilaciji bila je manja u poređenju sa uljima dobijenim konvencionalnom hidrodestilacijom. Istovremeno količina jedinjenja iz ovih grupa blago se smanjuje pri dužem dejstvu ultrazvuka i povećanju amplitude, što se može pripisati njihovoj podložnosti oksidaciji (Turek i sar. 2013), tokom produženog termičkog tretmana kod klasične hidrodestilacije ili usled povišene temperature usled kavitacije i lokalnih termičkih efekata ultrazvuka (Chemat i sar. 2017).

Linalil acetat i lavandulil acetat su ključni za cvetni/voćni miris lavande (Aprotosoae i sar. 2017). Njihovo smanjenje pri dužim i jačim tretmanima vode ka promeni mirisa, etarsko ulje može postati manje „slatkasto-cvetno“ i dobija više „biljno-zelene“ ili oksidovane note (Kiran Babu i sar. 2016, Wesolowska i sar. 2010). S obzirom da linalol i njegovi oksidi imaju različita farmakološka svojstva, promene u njihovim odnosima mogu uticati na antimikrobno i sedativno dejstvo etarskog ulja lavande (Duškova i sar. 2015). Isti zaključak, da se pri dužem i jačem tretmanu ultrazvukom menja hemijski sastav i smanjuje količina estara izneli su i Hedayati i saradnici (2025). Iz navedenih rezultata se može zaključiti da su poželjniji manje agresivni uslovi ultrazvuka ukoliko se želi komercijalizovati proizvodnja etarskog ulja lavande sa najboljom aromom.

7.2.3 Kinetika sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije etarskog ulja lavande

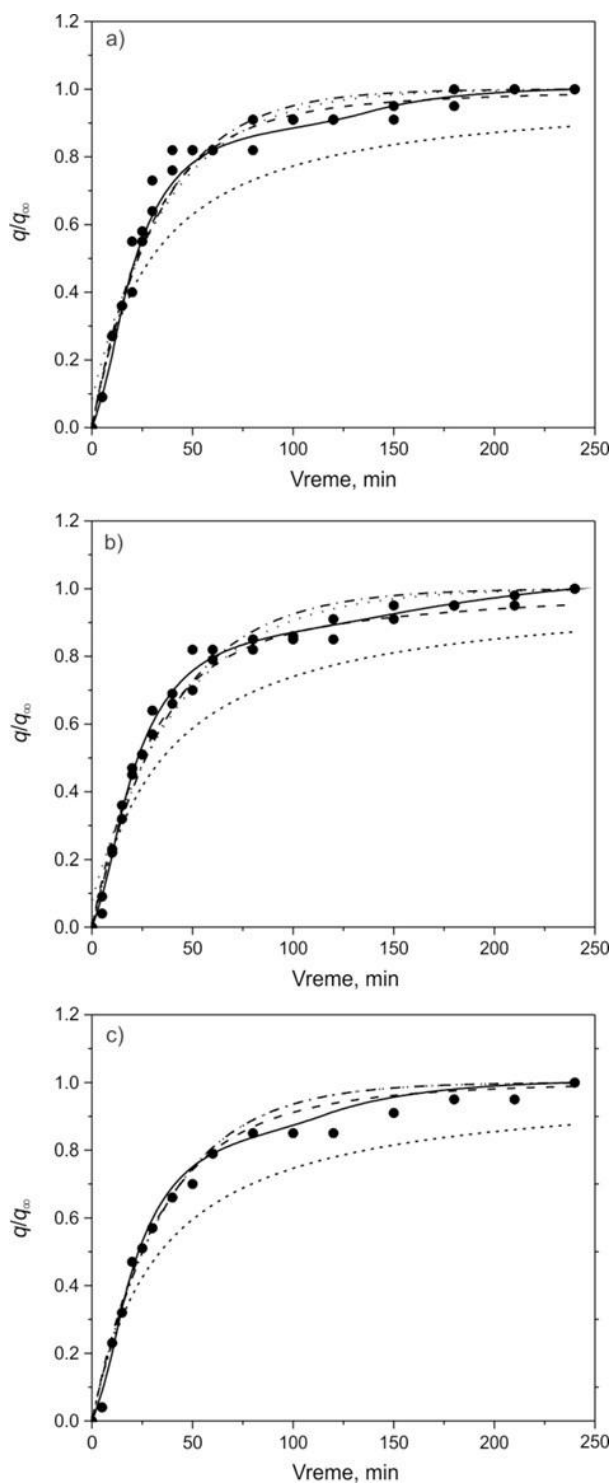
Na osnovu zaključaka dobijenih za konvencionalnu hidrodestilaciju, analiza kinetike sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije omogućava ispitivanje načina na koji prethodna obrada ultrazvukom (sonikacija) menja mehanizam oslobađanja etarskog ulja. Ovde ključnu

ulogu imaju parametri sonikacije, pre svega amplituda i vreme trajanja ultrazvučnog tretmana, koji mogu dovesti do intenzivnijeg razaranja sekretornih struktura i ubrzanog prenosa mase tokom hidrodestilacije. Dok prethodna istraživanja uglavnom razmatraju uticaj ultrazvuka na prinos i sastav etarskog ulja, uticaj uslova sonikacije u predtretmanu cveta lavande na kinetiku procesa i dalje je ograničeno dokumentovan. Zbog toga je u ovom delu rada izvršena procena više kinetičkih modela sa ciljem upoređivanja njihove primenljivosti u odnosu na rezultate dobijene ultrazvučnim predtretmanom pri različitim amplitudama i vremenima trajanja sonikacije. Posebna pažnja posvećena je analizi uticaja amplitude i vremena sonikacije na vrednosti parametara modela, kao i poređenju dobijenih trendova sa rezultatima konvencionalne hidrodestilacije.

7.2.3.1 *Mehanizam sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije etarskog ulja lavande*

U odnosu na konvencionalnu hidrodestilaciju, sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija uvodi sonikaciju u predtretmanu cveta lavande kao dodatni mehanički korak koji bitno menja karakteristike početne faze ekstrakcije. Slika 7.14 prikazuje kako amplituda i vreme trajanja sonikacije određuju dinamiku prinosa etarskog ulja lavande. Zahvaljujući kavitaciji, ultrazvuk izaziva pucanje trihoma, stvaranje mikropukotina i poroznosti u epidermalnim slojevima, što rezultuje znatno bržim oslobađanjem etarskog ulja u prvih 20–40 minuta procesa. Dok kod hidrodestilacije početnu fazu pokreću isključivo termički i mehanički efekti ključanja, kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije početni korak je intenzivniji i kraći, jer je biljna matrica već delimično otvorena.

Nakon inicijalnog naglog porasta prinos se približava maksimumu, a kriva se poravnjava približno za 180–200 min. U ovoj fazi većina lako dostupnih komponenti je već izolovana, a proces postaje ograničen difuzijom iz dubljih slojeva biljne matrice. Dakle, difuziona faza i dalje ostaje prisutna, kao i kod hidrodestilacije, ali započinje ranije i traje kraće jer su fizičke barijere već umanjene. Razlike u amplitudi pokazuju da intenzitet kavitacije proporcionalno pojačava početni prenos mase, što je posebno vidljivo pri 80% amplitude i dužem predtretmanu. Dobijeni rezultati se slažu sa literaturom koja navodi da sonikacija kao predtretman značajno ubrzava ranu fazu ekstrakcije i smanjuje ukupno vreme potrebno za dostizanje visokog prinosa (Nora i Borges. 2017), što se objašnjava time da veća snaga/amplituda ultrazvuka pojačava kavitaciju i mehaničko razaranje žlezdanih struktura (Khalid i sar. 2024).



Slika 7.14 Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije: zapremina destilacionog suda 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml i amplitude i vremena trajanja sonikacije: a) 60% 30 min ($6,43 \pm 0,13$ ml/min), b) 80% 30 min ($6,41 \pm 0,14$ ml/min) i c) 80% 45 min ($5,27 \pm 0,00$ ml/min) (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)

7.2.3.2 *blik kinetičkih krivih kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije*

Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija (slika 7.14) zadržava hiperbolički oblik dinamičkih krivih, ali menja dinamiku početne faze. Krive su strmije i brže dostižu visok relativni prinos, što je posledica ultrazvučne kavitacije koja pre hidrodestilacije otvara žlezdane strukture i povećava poroznost biljnog materijala. Dakle, osnovni oblik krive ostaje isti kao kod konvencionalne hidrodestilacije, ali prinos brže i intenzivnije raste u početnoj fazi ispiranja, a prelazak u difuzionu fazu nastupa ranije. Razlike u amplitudi ultrazvuka dodatno modulišu nagib početnog dela krive.

7.2.3.3 *valuacija kinetičkih modela sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije*

Analiza svih pet kinetičkih modela pokazuje da ultrazvučni predtretman prvenstveno modifikuje difuziono kontrolisanu fazu izdvajanja etarskog ulja, dok kinetika inicijalnog ispiranja ostaje relativno stabilna. Ovaj zaključak je najjasnije izražen u Modelima I i II, koji eksplicitno razdvajaju faze ispiranja i difuzije, dok ga pojednostavljeni modeli III–V potvrđuju indirektno, kroz promene relativnih doprinosa ili agregiranih kinetičkih parametara (tabela 7.18).

Model I pruža najdetaljniji mehanistički uvid, pokazujući da vreme τ_d , koje odgovara trenutku maksimalne brzine difuzionog izdvajanja, i difuziona konstanta k_d značajno variraju u zavisnosti od uslova sonikacije, dok parametri ispiranja (τ_w i k_w) pokazuju znatno manju osetljivost. Najizraženije poboljšanje difuzione efikasnosti postiže se tek kada se visoka amplituda ultrazvuka kombinuje sa produženim trajanjem, što ukazuje da je za razvoj trajnih strukturnih promena u biljnom tkivu neophodna dovoljna ukupna energetska izloženost. Istovremeno, blago smanjenje frakcije etarskog ulja izdvojene ispiranjem (q_w), uz preraspodelu difuzione frakcije (q_d), ukazuje na pomeranje ukupnog mehanizma izdvajanja ka difuziono kontrolisanom režimu, a ne na slabljenje ispiranja.

Model II potvrđuje isti mehanizam na pojednostavljen, ali konzistentan način. Konstanta brzine ispiranja k_w ostaje gotovo nepromenjena u širokom opsegu amplituda i trajanja sonikacije, dok difuziona konstanta k_d varira u zavisnosti od ukupne energetske izloženosti. Relativna frakcija ispranog etarskog ulja (f_w) nalazi se u umerenom opsegu i ne pokazuje dramatične promene, što je u saglasnosti sa zaključkom da ultrazvuk ne deluje kroz pojačavanje inicijalnog

ispiranja, već kroz pripremu biljnog materijala za efikasniju kasniju difuziju. Time modeli I i II zajednički i konzistentno identifikuju difuziju kao primarnu metu ultrazvučnog predtretmana.

Pojednostavljeni model III, koji koristi samo k_d i f_w , registruje isti pomak mehanizma prvenstveno kroz drastično smanjenje frakcije ispranog etarskog ulja (f_w), dok difuziona konstanta ostaje približno stabilna. Ovo ukazuje da pri snažnoj i dugotrajnoj sonikaciji doprinos ispiranjem kontrolisane faze postaje zanemarljiv u odnosu na difuziju, ali bez potrebe da se pretpostavi značajna promena same difuzione brzine. Model III stoga ne protivreči modelima I i II, već potvrđuje da se efekat ultrazvuka manifestuje kao preraspodela faza, a ne kao radikalna promena kinetičkih konstanti.

Model IV, koji ceo proces opisuje jednom difuzionom konstantom k_d , pokazuje da se ovaj parametar menja u relativno uskom opsegu bez jasnog sistematskog trenda. Takvo ponašanje odražava ograničenja modela, koji ne može eksplicitno razdvojiti ispiranje i difuziju, već promene u obliku kinetičke krive „ugrađuje” u malu varijaciju jedinstvenog parametra. Slično tome, model V, zasnovan na kinetici drugog reda, daje globalnu konstantu brzine k_2 koja ne pokazuje pouzdanu zavisnost od uslova sonikacije i istovremeno ima najslabije statističke pokazatelje prilagođenosti (najviši *MRPD* i najniže *R*). Zbog toga model V ima ograničenu interpretativnu vrednost i može se koristiti samo kao gruba aproksimacija ukupne kinetike, ali ne i za detaljno mehanističko tumačenje efekata ultrazvuka.

Posmatrani zajedno, modeli I–V jasno pokazuju da amplituda i trajanje ultrazvuka znatno jače utiču na difuziono kontrolisanu fazu nego na fazu ispiranja, dok razlike u brzini destilacije imaju sporednu ulogu. Povećanje amplitude bez produženja trajanja ne dovodi do potpunog razvoja difuzionih efekata, dok kombinacija visoke amplitude i dužeg vremena delovanja favorizuje difuziono kontrolisano oslobađanje etarskog ulja. Ovaj mehanizam najpreciznije opisuju detaljniji modeli I i II, dok pojednostavljeni modeli III–V potvrđuju isti trend kroz agregirane parametre. Ukupno gledano, sekvencijalni ultrazvučni predtretman ne menja fundamentalnu prirodu prenosa mase, već menja strukturu biljnog materijala tako da relativno pojačava difuziono kontrolisanu komponentu procesa izdvajanja etarskog ulja.

Tabela 7.18 Parametri testiranih kinetičkih modela za sekvencijanu ultrazvučnu hidrodestilaciju

Model – tip	Parametri modela	Amplituda / Trajanje		
		60% / 30 min	80% / 30 min	80% / 45 min
		Brzina destilacije, ml/min		
		6,43 ± 0,09	6,41 ± 0,10	5,27 ± 0,00
		Zapremina suda, ml		
		1000		
I	τ_w , min	11,9***	11,45***	12,2***
	τ_d , min	137,2**	148,0	115,7*
	α_w , g/100g/min	0,0462***	0,0429***	0,0423***
	α_d , g/100g/min	0,0025	0,0017	0,0030
	k_w , min-1	0,0501***	0,0488***	0,0504**
	k_d , min ⁻¹	0,0216	0,0068	0,0197
	q_w , g/100 g	1,336	1,256	1,225
	q_d , g/100 g	0,229	0,407	0,290
	MRPD, %	2,79	8,33	2,82
	AICc	-46,0	-87,8	-37,3
	R ²	0,996	0,989	0,993
II	k_w , min ⁻¹	0,0357***	0,0362***	0,0340
	k_d , min ⁻¹	0,0085	0,0060	0,0122
	f_w	0,880***	0,801	0,790
	MRPD, %	8,68	14,89	4,48
	AICc	-113,7	-111,8	-51,3
	R ²	0,984	0,982	0,984
III	k_d , min ⁻¹	0,0267***	0,0228***	0,0274***
	f_w	0,0832**	0,0793*	0,001
	MRPD, %	13,25	21,52	5,05
	AICc	-95,5	-85,4	-51,3
	R ²	0,971	0,959	0,982
IV	k_d , min ⁻¹	0,0301***	0,0259***	0,0275***
	MRPD, %	8,53	14,36	5,04
	AICc	-111,0	-93,9	-54,0
	R ²	0,980	0,965	0,982
V	k_2 , min ⁻¹	0,0340***	0,0285***	0,0324***
	MRPD, %	18,61	23,44	10,75
	AICc	-76,9	-88,95	-33,6
	R ²	0,926	0,946	0,922

* Značajne cifre: 0 **** 0,001 *** 0,01 ** 0,05 * 0,1 . 1. Simboli: k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w and α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$. f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem, k_2 – konstanta brzine reakcije drugog reda, q_w i q_d – količine etarskog ulja lavande izolovanog iz biljnog materijala ispiranjem i difuzijom. Procesni uslovi: zapremina destilacionog suda 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml

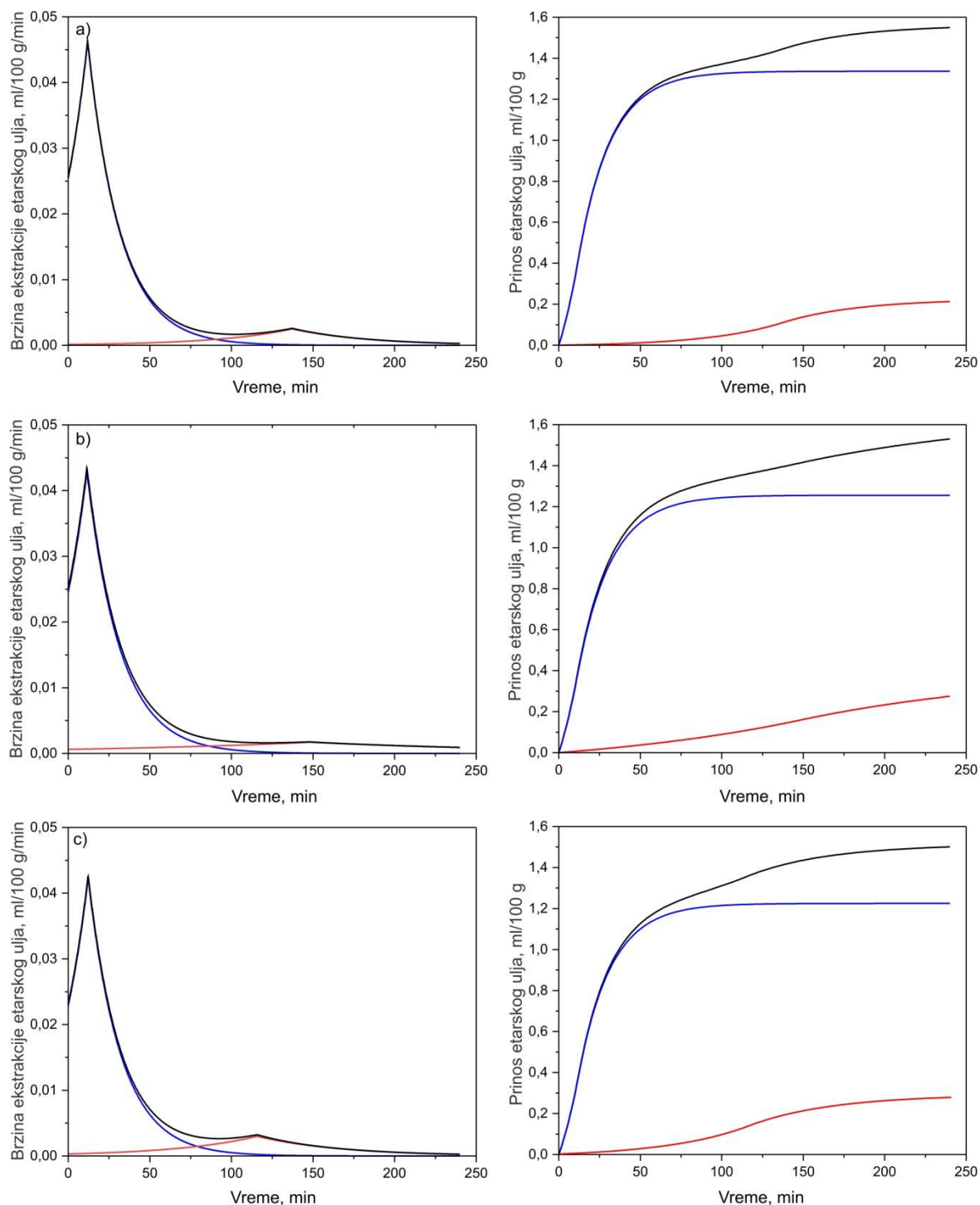
7.2.3.4 zbor kinetičkog modela za inženjersku primenu

Na osnovu tri evaluaciona kriterijuma: *MRPD* (niže je bolje), *AICc* (što negativniji to bolji) i *R* (više je bolje) izračunatih za tri uslova ultrazvučnog tretmana (60% 30 min, 80% 30 min i 80% 45 min), može se jasno rangirati učinak pet testiranih modela. Model I pokazuje ubedljivo najbolji ukupni statistički kvalitet. On ostvaruje najniže prosečne *MRPD* vrednosti (~2,8–8,3%) i najviše koeficijente determinacije ($R^2 = 0,989$ – $0,996$), uz umereno negativne *AICc*

vrednosti, iako ne i najnegativnije $AICc$ vrednosti. Ovakva kombinacija statističkih kriterijuma potvrđuje izvanredno dobro prilagođavanje eksperimentalnim podacima, uprkos većem broju parametara koje model sadrži. Model II zauzima drugo mesto. Iako postiže nešto više $MRPD$ vrednosti (posebno pri 60% 30 min i 80% 30 min), odlikuje se stabilno visokim R^2 vrednostima (0,982–0,984) i najnegativnijim $AICc$ vrednostima među svim modelima. Time predstavlja veoma dobar balans između kvaliteta fitovanja i strukturalne jednostavnosti. Model IV nalazi se na trećem mestu, sa $MRPD$ vrednostima koje su uporedive s modelom II, ali uz umereno negativne do veoma negativne $AICc$ rezultate i nešto niže R^2 vrednosti (0,965–0,982), što ga ukupno svrstava u model srednjih performansi. Model III zauzima četvrtu poziciju, pre svega zbog značajno viših $MRPD$ vrednosti (do 21,5%) i manje povoljnih $AICc$ rezultata, iako su vrednosti R^2 u zadovoljavajućem opsegu. Model V pokazao se najslabijim. Karakterišu ga najviše $MRPD$ vrednosti (10,8–23,4%), najmanje negativan $AICc$ i najniži R^2 (0,922–0,946), što ukazuje na ograničenu sposobnost da adekvatno opiše eksperimentalne podatke.

7.2.3.5 *ehanističko tumačenje kinetike sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I*

Slika 7.15 prikazuje brzinu ekstrakcije (levo) i prinos (desno) etarskog ulja lavande tokom sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml, za različite amplitude ultrazvuka i vremena izlaganja, kao i uporedive brzine destilacije, simulirane primenom modela I. Ove simulacije pokazuju da ultrazvučni pretretman pre svega preraspodeljuje relativne doprinose ekstrakcije kontrolisane ispiranjem i difuzijom, bez promene dvostepene kinetičke strukture ili konačnog prinosa. Pri blisko usklađenim brzinama destilacije za 60% 30 min ($6,43 \pm 0,09$ ml/min) i 80% 30 min ($6,41 \pm 0,10$ ml/min), povećanje amplitude ultrazvuka uglavnom dovodi do strmijeg početnog porasta prinosa usled pojačanog doprinosa ispiranja, što se ispoljava ranijim i oštrijim maksimumom ispiranja, dok faza kontrolisana difuzijom postaje manje dominantna. Produžena sonikacija pri 80% 45 min ($5,27 \pm 0,00$ ml/min) zadržava isti mehanistički obrazac, ali dodatno „pomera unapred” oslobađanje etarskog ulja, dovodeći do bržeg dostizanja zasićenja čak i pri nešto nižoj brzini destilacije.



Slika 7.15 Vremenske promene brzine ekstrakcije (levo) i prinosa (desno) etarskog ulja lavande tokom sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml u destilacionom sudu zapremine 1000 ml, simulirane primenom modela I. Kombinacije amplitude ultrazvuka i vremena izlaganja: (a) 60% 30 min (brzina destilacije: $6,43 \pm 0,09$ ml/min), (b) 80% 30 min ($6,41 \pm 0,10$ ml/min) i (c) 80% 45 min ($5,27 \pm 0,00$ ml/min); plava linija – ispiranje, crvena linija – difuzija i crna linija – ispiranje + difuzija

Poređenje sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije sa konvencionalnom hidrodestilacijom pri sličnoj brzini destilacije ($6,68 \pm 0,82$ ml/min; slika 7.11Bi) ističe mehanistički uticaj ultrazvučnog pretretmana. Konvencionalna hidrodestilacija pokazuje postepeniji početni porast prinosa i produženu fazu kontrolisanu difuzijom, što ukazuje na progresivno oslobađanje etarskog ulja iz manje dostupnih regiona biljne matrice. Nasuprot tome, sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija pokazuje znatno strmiji rani porast prinosa usled kavitacijom indukovano g narušavanja površinski lociranih žlezdanih trihoma pre ključanja. Simulacije modela I potvrđuju da ultrazvuk premešta veći deo etarskog ulja u lako dostupni „rezervoar“, ubrzavajući prelaz sa ekstrakcije kontrolisane ispiranjem na onu kontrolisanu difuzijom. Stoga, iako obe metode zadržavaju istu dvostepenu kinetiku, ultrazvučni pretretman povećava brzinu ekstrakcije, a ne iscrpnost izdvajanja etarskog ulja, dok se konvencionalna hidrodestilacija snažnije oslanja na dugotrajnu difuziju kako bi se postiglo postepeno i ujednačeno oslobađanje.

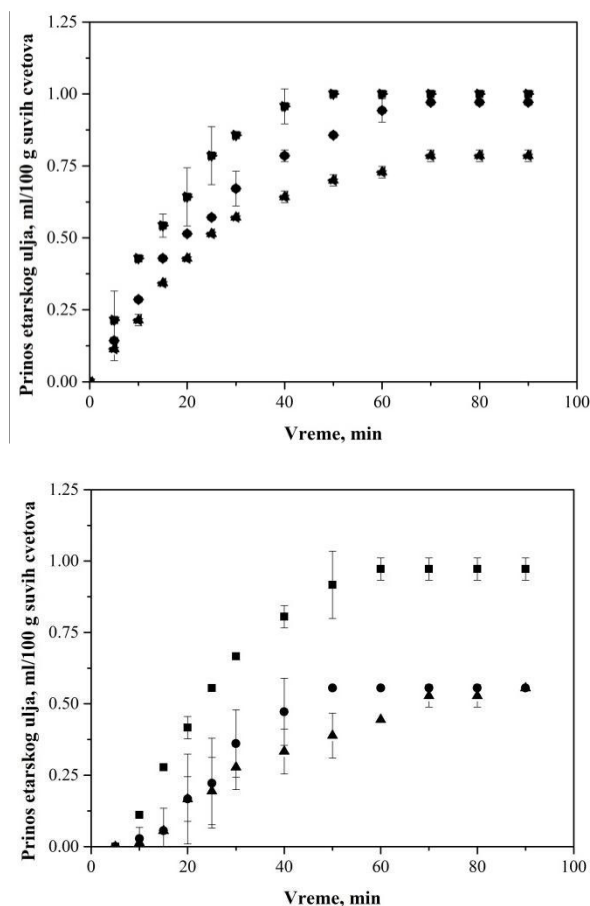
7.3 Mikrotalasna hidrodestilacija

7.3.1 Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima

Na slici 7.16 prikazane su varijacije prinosa etarskog ulja lavande tokom mikrotalasne hidrodestilacije u destilacionim sudovima zapremine 500 ml i 1000 ml pri različitim snagama mikrotalasa i konstantnom odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml. U oba sistema uočen je niži maksimalni prinos etarskog ulja lavande u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom (za sud zapremine 500 ml: $0,97 \pm 0,04$ ml/100 g suvih cvetova u odnosu na $2,17 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova, redom, a za sud zapremine 1000 ml: $1,00 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova u odnosu na $1,92 \pm 0,38$ ml/100 g suvih cvetova, redom), što je prikazano u tabeli 7.19.

Niži prinosi etarskog ulja primećeni kod mikrotalasne hidrodestilacije u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom prvenstveno se mogu pripisati neoptimizovanim radnim uslovima, a ne inherentnim ograničenjima mikrotalasnog zagrevanja. Volumetrijska dielektrična priroda zagrevanja mikrotalasne hidrodestilacije omogućava brzo i relativno uniformno unutrašnje zagrevanje biljnih tkiva, što dovodi do rane rupture sekretornih žlezda koje sadrže etarsko ulje (Bousbia i sar. 2009) i ubrzanog početnog oslobađanja etarskog ulja u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom (Guha 2017, Mahfud i sar. 2022). Međutim, prekomerna

snaga mikrotalasa ili nedovoljno vreme ekstrakcije mogu sprečiti da se ovo brzo oslobađanje pretvori u potpuno izdvajanje ulja. Brojne studije optimizacije pokazuju da prinos etarskog ulja dostiže maksimum u umerenom opsegu snage mikrotalasa i trajanja procesa, dok dalja intenzifikacija dovodi do stagnacije ili smanjenja prinosa etarskog ulja, što upućuje na postojanje optimalnog operativnog domena (Bhadange i sar. 2024, Hundie i sar. 2023, Mahfud i sar. 2022).



Slika 7.16 Varijacije prinosa etarskog ulja lavande u procesu mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja iz celih cvetova u destilacionom sudu od a) 1000 ml pri različitim snagama mikrotalasa (tj. brzinama destilacije 5,53–9,83 ml/min): 600 W – ■, 500 W – ● i 400W – ▲ i b) 500 ml pri različitim snagama mikrotalasa (tj. brzinama destilacije 0,77–5,62 ml/min): 400 W – ■, 300 W – ● i 250W – ▲ (odnos cveta i vode 1:10 g/ml)

Pri povišenim snagama mikrotalasa (najčešće iznad 500–600 W) može doći do lokalnog pregrevanja i neujednačene raspodele energije unutar biljne matrice, što pogoduje gubicima lako isparljivih i termolabilnih jedinjenja, kao i njihovoj delimičnoj degradaciji ili transformaciji (Chemat i Cravotto 2012, Filly i sar. 2014, Song i sar. 2011). Ovakvi efekti povezani su sa

intenzivnim dielektričnim zagrevanjem, jonskom provodljivošću i rotacijom dipola, koji dovode do lokalnih temperaturnih maksimuma unutar rastvarača i biljnog materijala (Sahraoui i sar. 2008). U ekstremnim slučajevima može doći do unutrašnjeg pregrevanja i karbonizacije biljne matrice, što dodatno ograničava efikasnost izdvajanja etarskog ulja (Farhat i sar. 2009, Ma i sar. 2011). Pored toga, efikasnost mikrotalasne hidrodestilacije dodatno zavisi od uslova hidratacije. Nedovoljna količina vode ograničava stvaranje vodene pare i unutrašnji prenos toplote, dok njen višak razblažuje apsorpciju mikrotalasne energije i usporava difuziono kontrolisano oslobađanje preostalog etarskog ulja (Hundie i sar. 2023).

Analiza podataka iz tabele 7.19 potvrđuje da primena mikrotalasne energije značajno utiče na kinetiku procesa destilacije, ali ne i na povećanje maksimalnog prinosa etarskog ulja. U sudu zapremine 500 ml, pri nižim snagama mikrotalasa (250 W i 300 W), brzina destilacije i prinos etarskog ulja znatno su niži u odnosu na konvencionalnu hidrodestilaciju, što ukazuje na nedovoljnu količinu unete termičke energije za efikasno isparavanje i oslobađanje ulja. Iako se pri snazi od 400 W brzina destilacije približava vrednostima karakterističnim za konvencionalni proces, prinos ostaje značajno manji, što ukazuje na nepotpunu ekstrakciju usled skraćenog trajanja procesa.

Tabela 7.19 Uticaj snage mikrotalasa na maksimalni prinos etarskog ulja iz celih cvetova lavande

Zapremina suda, ml	Snaga mikrotalasa, W	Brzina destilacije, ml/min	Prinos etarskog ulja lavande, ml/100 g suvih cvetova	Poređenje sa klasičnom hidrodestilacijom, %
500	0	4,98 ± 0,14	2,17 ± 0,00	100
	250	0,89 ± 0,11	0,56 ± 0,00	25,8
	300	2,99 ± 0,10	0,56 ± 0,00	25,8
	400	4,92 ± 0,70	0,97 ± 0,03	44,7
1000	0	6,68 ± 0,82	1,92 ± 0,38	100
	400	5,53 ± 0,17	0,79 ± 0,01	41,1
	500	7,77 ± 0,04	0,97 ± 0,00	50,5
	600	9,83 ± 0,32	1,00 ± 0,00	52,1

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija. Procesni uslovi: destilacioni sudovi od 500 i 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml.

Sličan obrazac uočen je i u sudu zapremine 1000 ml, gde brzina destilacije raste gotovo linearno sa povećanjem snage mikrotalasa, dostižući pri 600 W vrednosti za oko 47% veće u

odnosu na konvencionalno zagrevanje kalotom. Uprkos ovom ubrzanju, maksimalni prinos etarskog ulja ostaje približno upola manji u poređenju sa klasičnom hidrodestilacijom, što ukazuje da intenzivno zagrevanje i isparavanje ne omogućavaju dovoljnu difuziju i potpuno oslobađanje svih aromatičnih komponenti iz biljnog materijala. Izraženija efikasnost mikrotalasa u većim zapreminama sistema može se objasniti boljim upijanjem mikrotalasne energije i smanjenim efektima lokalnog pregrevanja.

Shodno tome, mikrotalasi prvenstveno utiču na kinetiku procesa, ubrzavajući zagrevanje, isparavanje i prenos mase, ali bez nužnog povećanja ukupnog prinosa etarskog ulja u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom (Mahfud i sar. 2022). Ovi nalazi, u saglasnosti sa dostupnim literaturnim podacima, jasno ukazuju da direktan prenos parametara konvencionalne hidrodestilacije na mikrotalasne sisteme ne garantuje poboljšano izdvajanje etarskog ulja. Optimalna primena mikrotalasne hidrodestilacije stoga zahteva pažljivo usklađivanje snage mikrotalasa, trajanja procesa i zapremine sistema kako bi se postigao uravnotežen kompromis između brzine procesa, prinosa i kvaliteta dobijenog etarskog ulja (Bhadange i sar. 2024).

Prema tome, uticaj mikrotalasne energije pre svega se ogleda u intenzifikaciji kinetike procesa, kroz ubrzano zagrevanje, isparavanje i prenos mase, dok povećanje ukupnog prinosa etarskog ulja nije nužno ostvareno. Slični efekti degradacije fenolnih i isparljivih jedinjenja pri intenzivnom mikrotalasnom zagrevanju opisani su i u drugim studijama (Farhat i sar. 2009, Ma i sar. 2011, Sahraoui i sar. 2008, Song i sar. 2011).

Gonzalez-Rivera i saradnici (2016) su pokazali da se mikrotalasnom hidrodestilacijom izdvaja 0,75% etarskog ulja iz stabljika i listova lavande za 30 minuta, bez povećanja nakon 60 minuta. Ovom metodom je za 5 minuta dobijeno visokokvalitetno etarsko ulje lavande sa takvim sadržajem 1,8-cineola i kamfora koji je pogodan za medicinsku i insekticidnu upotrebu. Nasuprot tome, Liu i saradnici (2019) su postigli prinos etarskog ulja od 3,19% iz cvetova lavande za 40 minuta koristeći mikrotalasnu snagu od 500 W. Nisu primetili značajne razlike u kompoziciji smeše jedinjenja između mikrotalasne i konvencionalne hidrodestilacije, ali su primetili varijacije u koncentracijama jedinjenja. Iriti i saradnici (2006) nisu pronašli značajne razlike u prinosu etarskog ulja lavande između mikrotalasne hidrodestilacije, mikrotalasne parne destilacije i konvencionalne hidrodestilacije iz cvetova lavande. Vakuumska mikrotalasna hidrodestilacija je dala prinos etarskog ulja od 4,61% za 20 minuta, dok je mikrotalasna parna destilacija bila najefikasnija, dajući prinos etarskog ulja od 7,88% za 20 minuta, u poređenju sa 4 sata za konvencionalnu hidrodestilaciju. Razlike su primećene kod seskviterpena, oksigenisanih

seskviterpena i linalool acetata, pri čemu su mikrotalasna hidrodestilacija i mikrotalasna parna destilacija nadmašile konvencionalnu hidrodestilaciju. Çelebi Uzkuç i saradnici (2021) postigli su prinos etarskog ulja lavande od 5,5% nakon 2 sata mikrotalasne hidrodestilacije. Abed i saradnici (2020) su primetili poboljšani prinos etarskog ulja lavande na višim nivoima snage mikrotalasa (50 W do 200 W) za cvetove lavande, sa maksimalnim prinosom od 1,87% na 175 W tokom 10 minuta. Ispod 125 W, prinos etarskog ulja je ostao konstantan na približno 1,35–1,40%.

7.3.2 Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog mikrotalasnom hidrodestilacijom

U tabeli 7.20 prikazan je hemijski sastav etarskih ulja lavande dobijenih mikrotalasnom hidrodestilacijom, pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml, u destilacionim sudovima zapremina 500 ml i 1000 ml i pri različitim snagama mikrotalasa. Primer GC/MS hromatograma uzorka etarskog ulja lavande dobijenog mikrotalasnom hidrodestilacijom u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri primeni mikrotalasa snage 600 W dat je u prilogu (Slika P7.5). U svim uzorcima etarskih ulja detektovano je ukupno 41 jedinjenje. Zbog kratkog vremena trajanja hidrodestilacije i selektivnog oslobađanja, izdvojeno je manje jedinjenja nego prilikom konvencionalne hidrodestilacije. Uglavnom je došlo do oslobađanja lakoisparljivih, termolabilnih monoterpena i oksidovanih monoterpena, dok su se seskviterpeni i stabilniji sastojci koji zahtevaju duže vreme da pređu u parnu fazu, izdvojili u manjoj meri. Glavna grupa identifikovanih jedinjenja su oksidovani monoterpeni (85,74–87,748%). Kao glavne komponente u svim uzorcima etarskih ulja pojavljuju se linalol (28,91–35,08%), linalil acetat (30,72–38,94%), lavandulil acetat (7,18–7,93%), dok su 1-okten-3-il acetat i terpinen-4-ol bili prisutni u ukupnim procentima u granicama iznad 2% u svim analiziranim uzorcima. Sadržaj linalola i linalil acetata je veći nego kod konvencionalne hidrodestilacije (30,50% i 22,80%, redom), a etarsko ulje izdvojeno mikrotalasnom hidrodestilacijom pokazalo je veću antimikrobnost.

Analiza je pokazala da snaga mikrotalasa koja se koristi tokom hidrodestilacije ima uticaj na većinu identifikovanih jedinjenja u uzorcima etarskog ulja. Primenom mikrotalasa smanjuje se degradacija termolabilnih komponenti, verovatno zbog kraćeg trajanja procesa.

Tabela 7.20 Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog mikrotalasnom hidrodestilacijom

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Zapremina destilacionog suda, ml					
			1000			500		
			Snaga mikrotalasa, W			Snaga mikrotalasa, W		
			600	500	400	400	300	250
			Ukupni sadržaj, %			Ukupni sadržaj, %		
α -Tujen	930	924	-	tr	tr	-	-	tr
α -Pinen	939	931,2	0,067 $\pm$ 0,004	0,076 $\pm$ 0,002	0,112 $\pm$ 0,003	tr	tr	0,081 $\pm$ 0,012
Kamfen	946	946,6	-	0,041 $\pm$ 0,057	0,099 $\pm$ 0,007	-	0,041 $\pm$ 0,006	0,085 $\pm$ 0,021
β -Pinen	974	975,8	-	tr	-	-	-	-
3-Octanon	979	984,5	0,266 $\pm$ 0,013	0,323 $\pm$ 0,027	0,362 $\pm$ 0,045	0,289 $\pm$ 0,066	0,245 $\pm$ 0,034	0,380 $\pm$ 0,046
Mircen	988	989,3	0,140 $\pm$ 0,011	0,183 $\pm$ 0,006	0,096 $\pm$ 0,136	0,053 $\pm$ 0,075	0,146 $\pm$ 0,013	0,182 $\pm$ 0,008
Butil butanoat	993	993,1	0,031 $\pm$ 0,044	0,035 $\pm$ 0,049	0,125 $\pm$ 0,004	0,068 $\pm$ 0,095	0,076 $\pm$ 0,012	0,122 $\pm$ 0,091
Dehidroksi- <i>cis</i> -Linalol oksid	1006	1007,5	-	-	tr	-	tr	tr
Heksil acetat	1007	1011,1	0,629 $\pm$ 0,073	0,694 $\pm$ 0,001	0,803 $\pm$ 0,069	0,641 $\pm$ 0,105	0,545 $\pm$ 0,086	0,750 $\pm$ 0,053
<i>o</i> -Cimen	1022	1024,8	0,244 $\pm$ 0,028	0,304 $\pm$ 0,003	0,340 $\pm$ 0,041	0,238 $\pm$ 0,016	0,206 $\pm$ 0,027	0,292 $\pm$ 0,025
Limonen	1024	1028	-	tr	-	0,054 $\pm$ 0,076	-	-
1,8-Cineol	1026	1029,9	1,263 $\pm$ 0,129	1,555 $\pm$ 0,206	1,664 $\pm$ 0,205	1,178 $\pm$ 0,279	1,041 $\pm$ 0,110	1,590 $\pm$ 0,102
(<i>Z</i>)- β -Ocimen	1032	1035,6	0,215 $\pm$ 0,034	0,262 $\pm$ 0,013	0,259 $\pm$ 0,011	0,175 $\pm$ 0,011	0,187 $\pm$ 0,008	0,226 $\pm$ 0,041
(<i>E</i>)- β -Ocimen	1044	1046,2	0,056 $\pm$ 0,079	0,138 $\pm$ 0,029	0,155 $\pm$ 0,003	0,088 $\pm$ 0,002	0,051 $\pm$ 0,072	0,150 $\pm$ 0,014
γ -Terpinen	1054	1057,7	0,030 $\pm$ 0,042	0,036 $\pm$ 0,051	0,072 $\pm$ 0,002	tr	0,031 $\pm$ 0,044	0,072 $\pm$ 0,004
<i>cis</i> -Linalol oksid (furanoid)	1067	1073,6	3,197 $\pm$ 0,113	3,165 $\pm$ 0,045	3,082 $\pm$ 0,200	1,517 $\pm$ 0,135	1,290 $\pm$ 0,286	1,608 $\pm$ 0,008
<i>trans</i> -Linalol oksid (furanoid)	1084	1089,9	2,212 $\pm$ 0,021	2,088 $\pm$ 0,179	2,067 $\pm$ 0,158	0,880 $\pm$ 0,055	0,794 $\pm$ 0,149	1,015 $\pm$ 0,093
Linalol	1095	1106,3	30,027 $\pm$ 1,742	30,845 $\pm$ 0,685	31,935 $\pm$ 1,136	30,587 $\pm$ 0,781	28,907 $\pm$ 0,944	35,081 $\pm$ 0,636
1-Okten-3-il acetat	1110	1109,9	2,759 $\pm$ 0,118	3,199 $\pm$ 0,143	3,200 $\pm$ 0,323	3,249 $\pm$ 0,065	3,097 $\pm$ 0,093	3,648 $\pm$ 0,236
3-Oktan-ol acetat	1120	1121,5	0,061 $\pm$ 0,006	0,036 $\pm$ 0,050	0,030 $\pm$ 0,042	0,029 $\pm$ 0,040	0,061 $\pm$ 0,003	0,021 $\pm$ 0,030
Kamfor	1141	1145,2	0,580 $\pm$ 0,057	0,598 $\pm$ 0,071	0,644 $\pm$ 0,081	0,609 $\pm$ 0,063	0,530 $\pm$ 0,032	0,703 $\pm$ 0,050
Nerol oksid	1154	1154,5	0,158 $\pm$ 0,005	0,184 $\pm$ 0,003	0,173 $\pm$ 0,000	0,181 $\pm$ 0,001	0,103 $\pm$ 0,145	0,182 $\pm$ 0,040
Borneol	1165	1172,6	2,131 $\pm$ 0,795	1,711 $\pm$ 0,512	1,408 $\pm$ 0,202	0,734 $\pm$ 1,038	3,240 $\pm$ 0,170	3,285 $\pm$ 0,355
Terpinen-4-ol	1174	1181,6	3,274 $\pm$ 0,110	3,213 $\pm$ 0,047	3,340 $\pm$ 0,025	2,853 $\pm$ 0,132	2,859 $\pm$ 0,192	3,226 $\pm$ 0,226
Kripton	1183	1189,1	1,433 $\pm$ 0,117	1,504 $\pm$ 0,029	1,597 $\pm$ 0,082	1,374 $\pm$ 0,117	1,217 $\pm$ 0,096	0,878 $\pm$ 0,627
Mirtenal	1195	1194,6	-	-	0,078 $\pm$ 0,110	-	-	-
α -Terpineol	1186	1197,4	1,577 $\pm$ 0,233	1,618 $\pm$ 0,071	1,715 $\pm$ 0,014	1,266 $\pm$ 0,042	1,350 $\pm$ 0,101	1,802 $\pm$ 0,280
Verbenon	1204	1211,3	0,098 $\pm$ 0,001	-	0,048 $\pm$ 0,068	0,089 $\pm$ 0,015	-	-
Hidrocinamil alkohol	1224	1216,4	0,022 $\pm$ 0,031	0,032 $\pm$ 0,045	-	-	-	-
Kumin aldehid	1238	1243,4	0,140 $\pm$ 0,019	0,125 $\pm$ 0,033	0,084 $\pm$ 0,031	0,165 $\pm$ 0,004	0,056 $\pm$ 0,078	0,037 $\pm$ 0,052
Linalil acetat	1254	1255,4	34,989 $\pm$ 2,314	33,973 $\pm$ 1,620	32,635 $\pm$ 1,462	37,294 $\pm$ 1,813	38,941 $\pm$ 1,018	30,716 $\pm$ 1,921
Geraniol	1249	1255,7	-	0,046 $\pm$ 0,064	-	-	-	-
ρ -Ment-1-en-7-al	1273	1277,2	0,006 $\pm$ 0,008	0,037 $\pm$ 0,052	0,028 $\pm$ 0,039	0,047 $\pm$ 0,066	0,076 $\pm$ 0,107	0,058 $\pm$ 0,081
Izobornil acetat	1283	1283,9	0,050 $\pm$ 0,011	0,058 $\pm$ 0,008	0,070 $\pm$ 0,002	0,040 $\pm$ 0,056	-	0,033 $\pm$ 0,046

Nastavak **tabele 7.20**

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Zapremina destilacionog suda, ml					
			1000			500		
			Snaga mikrotalasa, W			Snaga mikrotalasa, W		
			600	500	400	400	300	250
			Ukupni sadržaj, %			Ukupni sadržaj, %		
Lavandulil acetat	1288	1289,1	7,432 ± 0,165	7,433 ± 0,194	7,185 ± 0,040	7,927 ± 0,261	7,876 ± 0,179	7,272 ± 0,132
Neril acetat	1359	1362,4	0,184 ± 0,016	0,186 ± 0,016	0,154 ± 0,003	0,166 ± 0,008	0,178 ± 0,008	0,109 ± 0,153
Geranil acetat	1379	1381,5	0,424 ± 0,144	0,523 ± 0,062	0,341 ± 0,261	0,372 ± 0,042	0,494 ± 0,045	0,466 ± 0,024
(E)-Kariofilen	1417	1417,7	1,734 ± 0,260	1,391 ± 0,160	1,329 ± 0,185	1,931 ± 0,003	2,032 ± 0,271	1,660 ± 0,132
E)-β-Farnezen	1440	1453,8	0,295 ± 0,071	0,226 ±0,008	0,186 ± 0,046	0,309 ± 0,008	0,380 ± 0,067	0,227 ± 0,127
Lavandulil 2-metil butanoat	1511	1521	-	-	-	-	0,069 ± 0,097	0,034 ± 0,047
Kariofilen oksid	1582	1583,4	2,138 ± 0,110	1,992 ± 0,044	1,845 ± 0,168	2,171 ± 0,192	2,482 ± 0,220	1,814 ± 0,047
Monoterpeni			0,75	1,04	1,13	0,61	0,66	1,09
Oksidovani monoterpeni			87,60	87,23	86,57	85,74	87,75	86,48
Seskviterpeni			4,17	3,61	3,36	4,41	4,89	3,70
Ostalo			5,34	5,95	6,20	5,82	5,30	5,84

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija; RI^{lit} – Linearni retencioni indeksi dostupni u literaturi (Adams 2007); RI^{exp} – Linearni retencioni indeksi određeni eksperimentalno pomoću homologe serije n-alkana (C8-C20) na HP-5MS koloni. Sve komponente su identifikovane poređenjem retencioni indeksa i masenih spektara; tr – komponenta prisutna u tragovima (<0,05%).

Količina monoterpena smanjuje se primenom veće snage mikrotalasa, dok je uticaj mikrotalasne snage manje izražen kod oksidovanih monoterpena. Iako količina linalola i linalil acetata raste sa povećanjem snage mikrotalasa u destilacionom sudu manje zapremine, uticaj snage na sadžaj ovih jedinjenja u većem destilacionom sudu nema statistički značaj, što se može pripisati većoj specifičnoj snazi mikrotalasa u manjem sudu. Izolovana količina linalola veća je od one dobijene konvencionalnom hidrodestilacijom (35,08% u odnosu na 32,32%, redom). Isto je primećeno i kod 1-okten-3-il acetata, kamfora, borneola i α -terpineola.

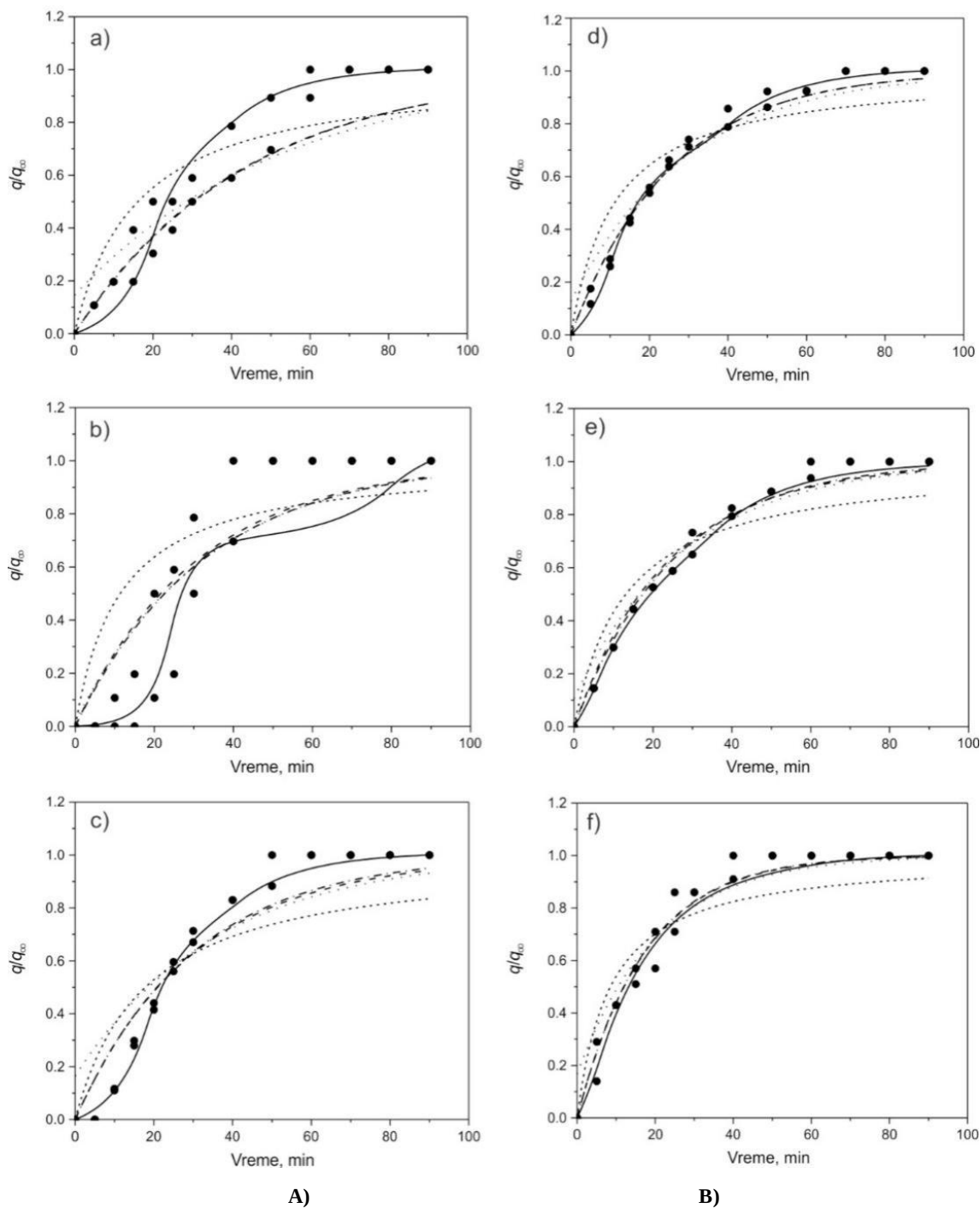
Veći sadržaj oksidisanih monoterpena mogu se objasniti time što, zbog njihovog visokog dipolnog momenta, dolazi do intenzivnije interakcije sa mikrotalasima i efikasnije ekstrakcije u odnosu na monoterpene sa niskim dipolnim momentom (Filly i sar. 2014, Pavia i sar. 2015). Takođe, veća količina linalil-acetata u uljima dobijenim pod dejstvom mikrotalasa u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom verovatno potiče i od njegove veće hidrolitičke nestabilnosti tokom dugotrajnog izlaganja vodi i povišenoj temperaturi, što pri konvencionalnoj hidrodestilaciji dovodi do raskidanja estarske veze i smanjenja njegovog sadržaja (Gedikoğlu i sar. 2024). Veća količina linalol i linalol acetata, uz manju količinu α -terpineola u etarskim uljima lavande izolovanim pod dejstvom mikrotalasa u odnosu na klasičnu hidrodestilaciju potvrđen je i u ranijim istraživanjima (Liu i sar. 2018). Pozitivan uticaj primene mikrotalasa na ekstrakciju lako isparljivih estara i ranije je dobro dokumentovan (Chemat i Lucchesi 2006, Chemat i sar. 2012, Vian i sar. 2008). Sadržaj linalil acetata u etarskom ulju je u granicama koje su propisane ISO standardom 3515:2002 (EN ISO 3515:2002), prema kojem sadržaj linalil acetata treba da bude u rasponu od 25,0% do 47,0%. Količina lavandulil acetata blago raste sa porastom primenjenije mikrotalasne snage, ali je sadržaj ovog jedinjenja neznatno veći u poređenju sa uljem dobijenim konvencionalnom hidrodestilacijom. Udeo *cis*- i *trans*-linalol oksida smanjuje se povećanjem snage mikrotalasa u sudu manje zapremine, gde je i specifična snaga mikrotalasa veća. Smanjenje udela *cis*- i *trans*-linalol oksida pri većoj specifičnoj snazi mikrotalasa može ukazivati na njihovu termičku transformaciju u stabilnije monoterpenske alkohole, poput linalola ili α -terpineola (Serra i sar. 2021). Može se primetiti da se udeo termolabilnih komponenti i komponenti sklonih oksidaciji, kao što su seskviterpeni, smanjuje primenom talasa većih snaga, što navodi na zaključak da dolazi do njihove razgradnje usled produženog dejstva mikrotalasima.

7.3.3 Kinetika mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Nakon razmatranja procesa konvencionalne i sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije, kinetička analiza mikrotalasne hidrodestilacije omogućava razumevanje efekata selektivnog i rapidnog zagrevanja koje je karakteristično za mikrotalase. Za razliku od ultrazvučnog tretmana, gde dominiraju kavitacija i mehaničke sile, kod mikrotalasne hidrodestilacije ključni procesni faktori uključuju primenjenu snagu mikrotalasa i zapreminu destilacionog suda, koja utiče na brzinu destilacije etarskog ulja i raspodelu toplote. Premda postoje brojni podaci o uticaju mikrotalasa na prinos i sastav etarskih ulja, kinetički aspekti procesa ostali su ograničeno objašnjeni. Stoga je ovde ponovo primenjen isti skup kinetičkih modela kao u prethodnim poglavljima, kako bi se omogućilo direktno poređenje sa rezultatima metoda konvencionalne i sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije. Istovremeno je analiziran način na koji snaga mikrotalasa i veličina destilacionog suda utiču na parametre modela i ukupnu dinamiku procesa.

7.3.3.1 Mehanizam mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande

U poređenju sa konvencionalnom i sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom, mikrotalasna hidrodestilacija uvodi sasvim drugačiji mehanizam oslobađanja ulja, zasnovan na volumetrijskom zagrevanju i naglom povećanju pritiska u biljnim tkivima (Bhadange i sar. 2024). Slika 7.17 pokazuje kako zapremina destilacionog suda i snaga mikrotalasa utiču na dinamiku prinosa etarskog ulja lavande. Mikrotalasi izazivaju brzo zagrevanje vode u ćelijama, konverziju u paru i stvaranje unutrašnjeg pritiska koji dovodi do rupture ćelijskih i subćelijskih struktura (Bhadange i sar. 2024, Ulucchesi i sar 2007, Qi i sar. 2014). Zbog toga je početna faza mikrotalasne hidrodestilacije još naglašenija i strmija nego kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije. U slučaju oba destilaciona suda porast prinosa etarskog ulja lavande je najstrmiji pri najvećoj snazi mikrotalasa od 400 W u sudu od 500 ml i 600 W u sudu od 1000 ml zahvaljujući bržem zagrevanju i jačem pritisku. Takođe, početni deo krive je strmiji u sudu od 500 ml nego u sudu od 1000 ml zbog veće specifične snage mikrotalasa (0,8 W/ml naspram 0,6 W/ml) koja obezbeđuje veću brzinu destilacije.



Slika 7.17 Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima mikrotalasne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml u destilacionom sudu od **A)** 500 ml (a–c) i **B)** 1000 ml (d– f) pri snazi mikrotalasa (tj. brzini destilacije) od a) 400 W ($4,92 \pm 1,00$ ml/min), b) 300 W ($2,99 \pm 0,14$ ml/min), c) 250 W ($0,88 \pm 0,16$ ml/min), d) 600 W ($9,83 \pm 0,45$ ml/min), e) 500 W ($7,77 \pm 0,06$ ml/min) i f) 400 W ($5,53 \pm 0,24$ ml/min) (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)

Nakon vrlo brzog oslobađanja lako dostupnog etarskog ulja, ekstrakcija prelazi u difuziono ograničenu fazu, ali ovaj deo krive ima manji doprinos ukupnom prinosu etarskog ulja nego kod prethodnih metoda. Snaga mikrotalasa se pokazuje kao ključni faktor, tj. veća snaga mikrotalasa vodi bržem zagrevanju, bržem formiranju pritiska i većoj brzini rupture sekretornih struktura. Efekti veličine destilacionog suda nadovezuju se na ranija opažanja iz konvencionalne i sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije: veća zapremina vodi sporijem zagrevanju i manje homogenom polju, što produžava početnu fazu i smanjuje strmost krive

7.3.3.2 *blik kinetičkih krivih kod mikrotalasne hidrodestilacije*

Kao i kod prethodne dve metode, kinetika mikrotalasne hidrodestilacije (slika 7.17) takođe se opisuje hiperboličkim krivama, ali se hiperbolični obrazac formira zbog drugačijeg fizičkog pokretača početne faze. Za razliku od sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije, gde strmost krive potiče od mehaničkog otvaranja tkiva, kod mikrotalasne hidrodestilacije strm početak je rezultat volumetrijskog i veoma brzog zagrevanja, koje dovodi do porasta pritiska, rupture sekretornih struktura i momentalnog oslobađanja etarskog ulja. Hiperbolični karakter krive zadržava se i ovde, ali početni nagib može biti još izraženiji nego kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije, zavisno od snage mikrotalasa. Zapremina destilacionog suda takođe utiče na oblik: u većem destilacionom sudu hiperbola je „ravnija“, jer se zagrevanje odvija sporije i manje homogeno.

7.3.3.3 *valuacija kinetičkih modela mikrotalasne hidrodestilacije*

Analiza kinetičkih parametara u okviru modela I pokazuje da snaga mikrotalasa snažno utiče na vremensku dinamiku izdvajanja etarskog ulja, pri čemu se efekti najjasnije ispoljavaju kroz ubrzanje inicijalne faze i preraspodelu doprinosa između ispiranja i difuzije. Vreme τ_w , koje odgovara trenutku dostizanja maksimalne brzine ispiranja, sistematski se skraćuje sa porastom snage mikrotalasa (19,93–5,99 min), što odražava brzo i volumetrijsko zagrevanje karakteristično za mikrotalase. Vreme τ_d , koje odgovara trenutku dostizanja maksimalne brzine difuzije, varira u opsegu 35,86–54,44 min, ukazujući da mikrotalasna energija generalno ubrzava razvoj difuzione faze, ali da se njen efektivni doprinos menja u zavisnosti od ukupne energetske izloženosti. Difuziona i konstanta brzine ispiranja, k_d i k_w , pokazuju nelinearne promene bez

jednoznačnog monotonog trenda, što ukazuje da mikrotalasi ne menjaju fundamentalnu prirodu prenosa mase, već utiču na relativni doprinos pojedinih faza procesa. U tom smislu, rast isprane frakcije (q_w) i preraspodela difuzione frakcije (q_d) sa porastom snage mikrotalasa odražavaju pomeranje procesa ka bržem inicijalnom oslobađanju etarskog ulja, dok kasnija difuzija ostaje ograničavajući korak pri ekstremnim uslovima.

Model II potvrđuje ovakav mehanistički obrazac u pojednostavljenoj formi. Konstante brzine ispiranja i difuzije (k_w i k_d) rastu u određenom opsegu snage mikrotalasa, ali bez striktno linearnog ponašanja, dok frakcija etarskog ulja izdvojena ispiranjem (f_w) pokazuje izraženu zavisnost od snage mikrotalasa: dostiže maksimum pri srednjim vrednostima, a zatim opada pri najvišim snagama. Ovakvo ponašanje ukazuje da umerena snaga mikrotalasa istovremeno intenzifikuje ispiranje i difuziju, dok se pri većim snagama relativni doprinos procesa pomera u korist difuzione faze. Kao i kod ultrazvučnog predtretmana, model II ne ukazuje na slabljenje ispiranja, već na promenu odnosa između mehanizama prenosa mase.

U okviru modela III, difuziona konstanta k_d menja se u širem opsegu sa porastom mikrotalasne snage, što odražava povećanu efikasnost unutrašnjeg prenosa mase usled volumetrijskog zagrevanja. Nasuprot tome, frakcija ispranog etarskog ulja (f_w) pokazuje nelinearno ponašanje, sa maksimumom pri srednjim snagama i smanjenjem pri višim vrednostima. Ovaj rezultat ukazuje da mikrotalasi menjaju raspodelu etarskog ulja između brzog i sporijeg režima izdvajanja, pri čemu se pri jačem zagrevanju sve veći deo etarskog ulja oslobađa u okviru difuzione komponente. Model III, slično kao i kod ultrazvuka, registruje promenu mehanizma prvenstveno kroz f_w , dok k_d predstavlja efektivni, globalni parametar.

Model IV, koji ceo proces opisuje jednom difuzionom konstantom, pokazuje da se k_d menja u relativno uskom i monotonijem opsegu sa porastom mikrotalasne snage. Ovakvo ponašanje ne ukazuje na promenu mehanizma, već potvrđuje da povećanje mikrotalasne energije generalno intenzifikuje prenos mase. Međutim, zbog odsustva razdvajanja faza, model IV ne može da registruje preraspodelu između ispiranja i difuzije, već ove promene „ugrađuje” u jednu efektivnu konstantu.

Model V, zasnovan na kinetici drugog reda, takođe pokazuje porast globalne konstante brzine k_2 sa povećanjem mikrotalasne snage, ali uz znatno lošije statističke pokazatelje (visok *MRPD* i niže R^2 vrednosti). To ukazuje da ovaj model nije dovoljno fleksibilan da opiše dvofaznu i nelinearnu prirodu kinetike mikrotalasne hidrodestilacije, te se njegove konstante mogu tumačiti samo kao grubi pokazatelji ukupne brzine procesa.

Posmatrani zajedno, modeli I–V jasno ukazuju da mikrotalasna snaga prvenstveno utiče na vremensku dinamiku i relativni doprinos faza ispiranja i difuzije, dok se fundamentalni mehanizmi prenosa mase ne menjaju. Umeren opseg snaga (300–500 W) obezbeđuje najpovoljniju kombinaciju brzog inicijalnog oslobađanja i efektivne difuzije, dok ekstremne snage dovode do dominacije rane faze bez proporcionalnog povećanja ukupnog difuzionog doprinosa. Kao i kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije, detaljniji modeli (I i II) najpreciznije opisuju ovu preraspodelu mehanizama, dok pojednostavljeni modeli (III–V) isti efekat registruju kroz agregirane kinetičke parametre.

7.3.3.4 zbor kinetičkog modela mikrotalasne hidrodestilacije

Na osnovu *MRPD*, *AICc* i R^2 iz tabele 7.21, model I ubedljivo ima najbolji učinak, sa najnižim *MRPD* vrednostima (2,14–6,93%), najvišim R^2 (0,981–0,997) i veoma negativnim *AICc* vrednostima. Ovakva kombinacija ukazuje na izuzetno precizno opisivanje i faze ispiranja i difuzione faze u uslovima ubrzanog prenosa mase karakterističnog za mikrotalasnu hidrodestilaciju. Model II zauzima drugo mesto, sa nešto višim *MRPD* vrednostima (6,49–8,37%), ali uz stabilno visoke R^2 vrednosti (0,978–0,991) i ubedljivo najnegativnije *AICc* rezultate među svim modelima, što ga čini izuzetno efikasnim u praćenju kinetike pri povišenoj snazi zračenja. Model IV nalazi se na trećoj poziciji: iako ostvaruje *MRPD* i R^2 vrednosti slične modelu II, *AICc* pokazuje nešto manju negativnost, što ukazuje na solidno, ali ipak manje precizno opisivanje ekstrakcione dinamike. Model III je četvrti, sa znatno višim *MRPD* vrednostima (13,05–65,98%) i umerenim *AICc* rezultatima, što ukazuje da ovaj model teško prati ubrzano otpuštanje ulja tipično za mikrotalasnu ekstrakciju. Model V pokazuje najslabije performanse, sa najvišim greškama predikcije (19,81–64,17%), najmanje negativnim *AICc* vrednostima (–42,6 do +2,97) i najnižim R^2 (0,523–0,864), potvrđujući njegovu ograničenu sposobnost da verno opiše brze dvofazne procese karakteristične za mikrotalasnu hidrodestilaciju.

Tabela 7.21 Parametri testiranih kinetičkih modela za mikrotalasnu hidrodestilaciju

Model – tip		Snaga / trajanje					
		250 W / 90 min	300 W / 90 min	400 W / 90 min	400 W / 90 min	500 W / 90 min	600 W / 90 min
		Brzina destilacije, ml/min					
		0,89 ± 0,12	2,99 ± 0,10	4,92 ± 0,71	5,53 ± 0,17	7,77 ± 0,04	0,83 ± 0,32
		Zapremina destilacionog suda, ml					
		500			1000		
I	τ_w , min	19,93	24,07***	18,34***	10,44***	6,02***	5,99*
	τ_d , min	54,44	79,77***	42,13**	40,70***	35,86***	60,34
	α_w , g/100g/min	0,0211	0,0456*	0,0440***	0,0359***	0,0329***	0,0478***
	α_d , g/100g/min	0,0107	0,0090	0,0090	0,0090**	0,0102	0,0011
	k_w , min-1	0,145	0,1922	0,1181*	0,1237**	0,0727	0,0627*
	k_d , min ⁻¹	0,0757	0,065	0,056	0,0567*	0,0479**	0,0553
	q_w , g/100 g	0,281	0,472	0,702	0,500	0,612	1,002
	q_d , g/100 g	0,280	0,275	0,304	0,303	0,388	0,038
	MRPD, %	17,08	32,35	5,03	5,57	2,14	6,93
	AICc	-71,0	-41,8	-77,86	-107,0	-116,2	-68,5
	R ²	0,956	0,899	0,990	0,993	0,997	0,981
II	k_w , min ⁻¹	0,0302	0,0367	0,03632	0,0401	0,0567	0,0645
	k_d , min ⁻¹	0,0216	0,0263	0,0213	0,0380	0,0325	0,0545
	f_w	0,176	0,582	0,814	0,678	0,424	0,334
	MRPD, %	50,12	49,22	24,54	6,49	8,37	8,03
	AICc	-24,11	-4,92	-37,8	-100,4	-79,9	-73,2
	R ²	0,881	0,814	0,931	0,991	0,983	0,978
III	k_d , min ⁻¹	0,0188***	0,0301***	0,0277***	0,0339***	0,0353***	0,0486***
	f_w	0,145	0,0167	0,164*	0,127**	0,106**	0,168**
	MRPD, %	65,98	48,48	34,82	14,76	13,05	13,22
	AICc	-11,8	-7,20	-20,29	-60,5	-62,9	-48,9
	R ²	0,789	0,811	0,849	0,958	0,963	0,935
IV	k_d , min ⁻¹	0,0227***	0,0306***	0,0334***	0,0394***	0,0398***	0,0581***
	MRPD, %	49,4	47,65	24,2	6,51	6,50	8,04
	AICc	-29,5	-10,5	-44,3	-104,3	-92,9	-78,4
	R ²	0,883	0,818	0,934	0,991	0,987	0,977
V	k_2 , min ⁻¹	0,0618***	0,0879***	0,0561***	0,0902***	0,0761***	0,1172***
	MRPD, %	64,17	59,38	38,99	21,30	21,30	19,81
	AICc	-12,5	2,97	-18,0	-42,6	-37,8	-36,8
	R ²	0,676	0,523	0,720	0,864	0,844	0,807

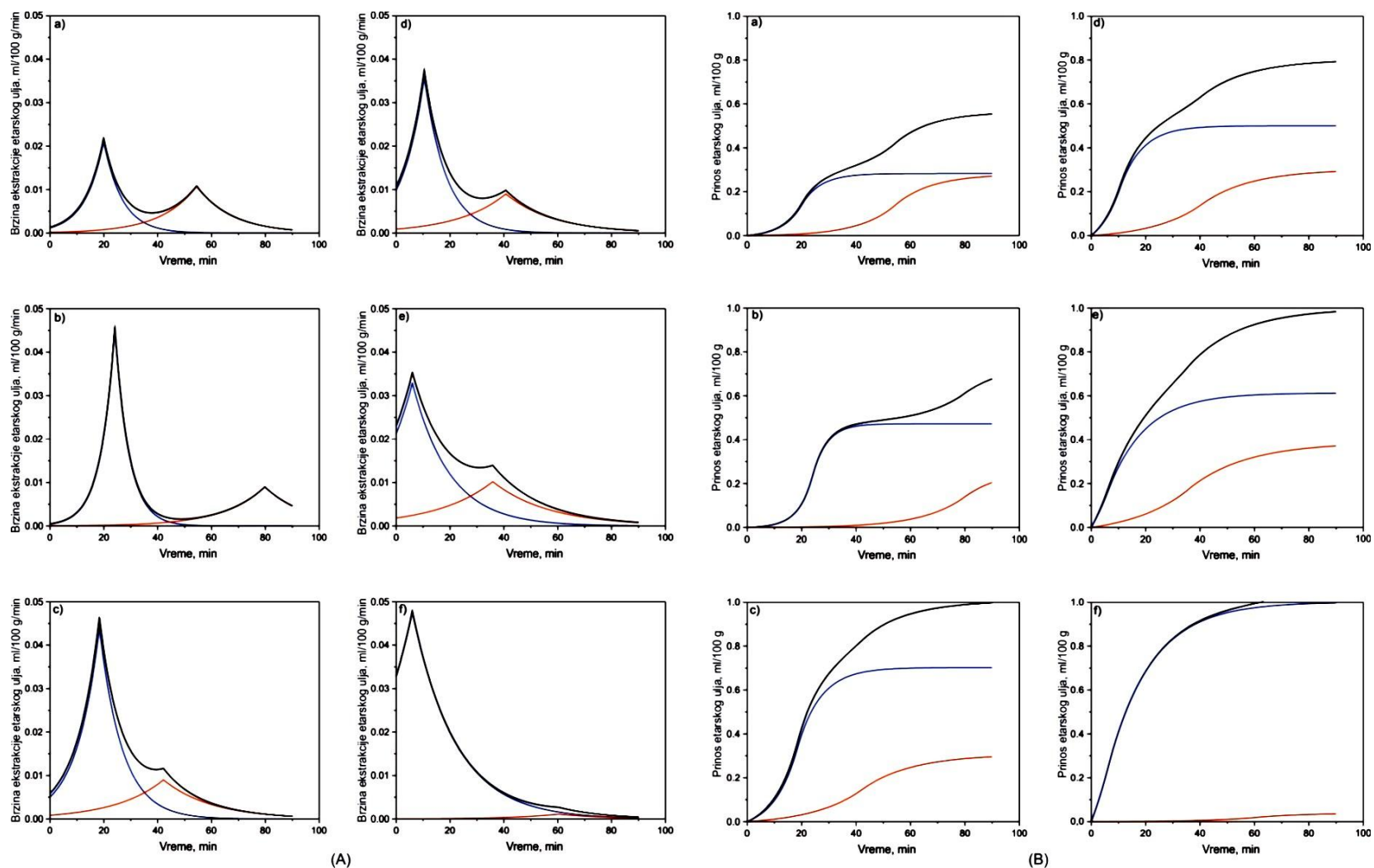
* Značajne cifre: 0 **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05 ' 0.1 ' 1. Simboli: k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w i α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$, f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem, k_2 – konstanta brine reakcije drugog reda, q_w i q_d – količine etarskog ulja lavande izolovanog iz biljnog materijala ispiranjem i difuzijom. Procesni uslovi: zapremine destilacionog suda 500 i 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml.

7.3.3.5 *mehanističko tumačenje kinetike mikrotalasne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I*

Na slici 7.18 prikazane su promene brzine ekstrakcije (slika 7.18A) i prinosa (slika 7.18B) etarskog ulja lavande tokom mikrotalasne hidrodestilacije u destilacionim sudovima zapremine 500 i 1000 ml, pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml i različitim snagama mikrotalasa (odnosno brzinama destilacije), simulirane pomoću modela I. Ove simulacije omogućavaju mehanističko razdvajanje efekata zapremine destilacionog suda i snage mikrotalasa na relativni doprinos faza kontrolisanih ispiranjem i difuzijom.

U sudu zapremine 500 ml, profili brzine ekstrakcije pokazuju oštiji i viši početni pik na krivoj ispiranja, što odražava veću specifičnu snagu mikrotalasa i brže povećanje unutrašnjeg pritiska u biljnom tkivu. Ovo brzo formiranje pritiska podstiče ranu rupturu sekretornih struktura i ubrzano oslobađanje lako dostupnog etarskog ulja (Bhadange i sar. 2024) (ref), što rezultira strmim početnim porastom prinosa. Međutim, ovaj intenzivan doprinos ispiranja je kratkotrajan, dok je difuziono kontrolisana faza vremenski skraćena. Nasuprot tome, u sudu zapremine 1000 ml uočava se manje strm, ali širi pik na krivoj ispiranja, praćen izraženijim i dugotrajnijim doprinosom difuzije. Veća zapremina sistema poboljšava homogenost mikrotalasnog polja i stabilizuje stvaranje pare, omogućavajući da difuziono kontrolisani transport doslednije doprinosi ukupnom izdvajanju etarskog ulja. Kao posledica toga, iako je početna brzina ekstrakcije nešto niža nego u sistemu od 500 ml, kumulativni prinos se razvija ravnomernije i predvidljivije, što ukazuje na uravnoteženiju interakciju između ispiranja i difuzije. Ovi rezultati pokazuju da povećanje zapremine destilacionog suda ublažava nagli, pritiskom vođeni impuls ispiranja, dok istovremeno povećava efikasnost i kontinuitet difuziono kontrolisane ekstrakcije.

Snaga mikrotalasa, izražena kroz brzinu destilacije, ima dominantan uticaj na mehanizam ekstrakcije u oba sistema. Pri niskim snagama mikrotalasa, odnosno brzinama destilacije (250–300 W; 0,88–2,99 ml/min), krive brzine ekstrakcije pokazuju slab pik na krivoj ispiranja i dominantan doprinos difuzije, što ukazuje na nedovoljno razvijen unutrašnji pritisak pare za efikasno razaranje žlezdanih struktura. Oslobađanje etarskog ulja u ovim uslovima je sporo i u velikoj meri ograničeno difuzijom, što dovodi do postepenog rasta prinosa. Pri srednjim snagama mikrotalasa, odnosno brzinama destilacije (400–500 W; 4,92–7,77 ml/min), komponenta ispiranja postaje izrazito naglašena.



Slika 7.18 Vremenske varijacije brzine ekstrakcije (A) i prinosa (B) etarskog ulja lavande tokom mikrotalasne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml u destilacionim sudovima od 500 ml (a-c) i 1000 ml (d-f), simulirane korišćenjem Modela I: (a) 250 W (brzina destilacije: $0,88 \pm 0,16$ ml/min), (b) 300 W ($2,99 \pm 0,14$ ml/min), (c) 400 W ($4,92 \pm 1,00$ ml/min), (d) 400 W ($5,53 \pm 0,24$ ml/min), (e) 500 W ($7,77 \pm 0,06$ ml/min) i (f) 600 W ($9,83 \pm 0,45$ ml/min); plava linija – ispiranje, crvena linija – difuzija i crna linija – ispiranje + difuzija

Brzo volumetrijsko zagrevanje stvara značajne unutrašnje gradijente pritiska, što dovodi do strmog početnog pika na krivoj ispiranja i bržeg porasta kumulativnog prinosa etarskog ulja, dok difuzija i dalje doprinosi u kasnijim fazama procesa. Ovaj režim predstavlja najpovoljniju ravnotežu između brzog oslobađanja etarskog ulja i održivog, difuziono kontrolisanog izdvajanja.

Pri najvišoj snazi mikrotalasa, odnosno brzini destilacije (600 W; $9,83 \pm 0,45$ ml/min), pik na krivoj ispiranja je izuzetno oštar i javlja se vrlo rano, što ukazuje na gotovo trenutno razaranje sekretornih struktura. Međutim, doprinos difuzije je znatno skraćen, a dalje povećanje brzine ekstrakcije ne dovodi do proporcionalnog povećanja kumulativnog prinosa etarskog ulja. Ovo ponašanje ukazuje da prekomerna snaga mikrotalasa kinetički „komprimuje“ proces ekstrakcije, favorizujući brzo početno oslobađanje etarskog ulja na račun produženog difuziono kontrolisanog prenosa mase.

U celini, ove simulacije pokazuju da zapremina destilacionog suda prvenstveno upravlja stabilnošću i ravnotežom između ispiranja i difuzije tokom mikrotalasne hidrodestilacije, dok snaga mikrotalasa (brzina destilacije) kontroliše intenzitet i vremenski raspored pritiskom vođenog oslobađanja etarskog ulja. Veći destilacioni sud omogućava stabilniju difuziju nakon početne faze ispiranja, dok povećanje snage mikrotalasa postepeno pomera mehanizam ekstrakcije etarskog ulja od difuziono dominiranog ka režimu dominiranom ispiranjem. Pri vrlo visokim snagama, proces postaje kinetički preintenzivan, što naglašava da optimalne performanse mikrotalasne hidrodestilacije zahtevaju kompromis između intenziteta volumetrijskog zagrevanja i dovoljnog vremena za difuziju, a ne prosto maksimiranje brzine destilacije.

Radi poređenja dve metode analizirane su slike 7.18d, 7.11Ah i 7.11Bh, koje prikazuju promene brzine ekstrakcije i kumulativnog prinosa etarskog ulja lavande tokom mikrotalasne (400 W) i konvencionalne hidrodestilacije u sudu zapremine 1000 ml, pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml i vrlo sličnim brzinama destilacije ($5,53 \pm 0,24$ ml/min naspram $4,46 \pm 0,03$ ml/min), simulirane pomoću modela I. Uprkos sličnom intenzitetu formiranja pare, profil brzine ekstrakcije kod mikrotalasne hidrodestilacije pokazuje izražen i rani pik na krivoj ispiranja, što odražava brzo volumetrijsko zagrevanje i ubrzano formiranje pare unutar biljnog tkiva. Ovo dovodi do naglog porasta pritiska, rupture sekretornih struktura i trenutnog oslobađanja lako dostupnog etarskog ulja (Bhadange i sar. 2024). Kao posledica toga, kumulativni prinos naglo raste na početku procesa, ukazujući da se veliki deo ulja oslobađa u ranim fazama. Difuzioni

doprinos se javlja kasnije i vremenski je skraćen, što sugerise da mikrotalasno zagrevanje ubrzava oslobađanje ulja prvenstveno putem mehanizama vođenih pritiskom, a ne dugotrajnim difuzionim procesima.

Nasuprot tome, konvencionalna hidrodestilacija pokazuje znatno ravniju krivu brzine ekstrakcije, sa slabim doprinosom ispiranja i dominantnom difuziono kontrolisanom fazom tokom većeg dela procesa. Spoljašnje zagrevanje i konvektivni prenos toplote dovode do postepenog porasta temperature u biljnom tkivu, sporijeg uspostavljanja koncentracionih gradijenata i oslobađanja etarskog ulja koje je prvenstveno kontrolisano difuzijom. Kao rezultat, kumulativni prinos raste sporije, ali se nastavlja tokom znatno dužeg vremena ekstrakcije, odražavajući dugotrajni, difuziono vođeni prenos mase, a ne brzo početno oslobađanje.

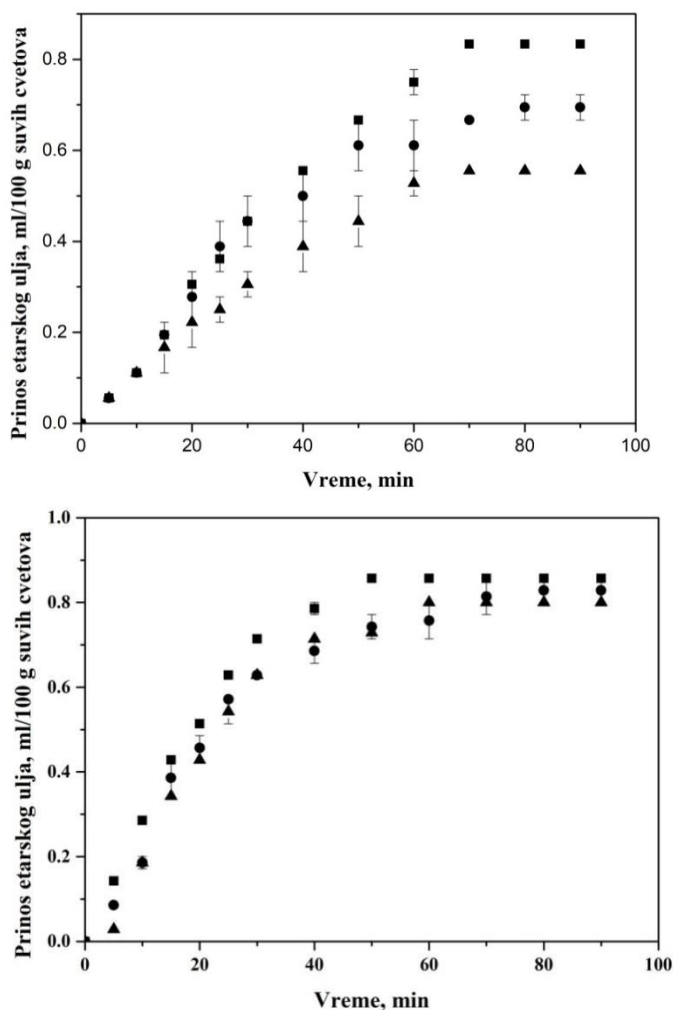
Poređenje evolucije prinosa dodatno potvrđuje ove mehanističke razlike. Iako obe metode rade pri sličnim brzinama destilacije, mikrotalasna hidrodestilacija omogućava brže početno povećanje prinosa, dok konvencionalna hidrodestilacija pokazuje odloženi, ali dugotrajniji porast prinosa. Time se jasno pokazuje da uočene razlike u ponašanju ekstrakcije nisu određene samo brzinom destilacije, već pre svega proizilaze iz suštinski različitih mehanizama prenosa toplote i mase: volumetrijskog, pritiskom potpomognutog zagrevanja kod mikrotalasne hidrodestilacije naspram difuziono kontrolisanog izdvajanja pri spoljašnjem zagrevanju kod konvencionalne hidrodestilacije.

7.4 Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija

7.4.1 Prinos etarskog ulja pri različitim operativnim uslovima

Na slikama 7.19 (a,b) prikazane su varijacije prinosa etarskog ulja lavande u procesu sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije u destilacionim sudovima od 500 i 1000 ml pri različitim snagama mikrotalasa i predtretmanu biljnog materijala ultrazvukom amplitude 80% u trajanju od 30 minuta pri odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml. Prinos etarskog ulja lavande u oba slučaja prikazan je u tabeli 7.22. Uočava se da je prinos etarskog ulja lavande u oba slučaja manji u odnosu na onaj dobijen konvencionalnom hidrodestilacijom (za sud 500 ml: $0,83 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova u odnosu na $2,17 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova, redom, a za sud 1000 ml: $0,86 \pm 0,00$ ml/100 g suvih cvetova u odnosu na $1,92 \pm 0,38$ ml/100 g suvih cvetova, redom).

Takođe se uočava da je prinos etarskog ulja manji i u odnosu na onaj dobijen mikrotalasnom hidrodestilacijom. Negativan uticaj trajanja ultrazvuka u predtretmanu cveta lavande neposredno pre mikrotalasne hidrodestilacije je već uočen i objašnjen kod sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije. Uočeno smanjenje prinosa etarskog ulja nakon ultrazvučnog predtretmana može se objasniti mehanizmima već detaljno razmotrenim u poglavlju o sekvencijalnoj ultrazvučnoj hidrodestilaciji, pre svega narušavanjem integriteta sekretornih struktura, prevremenim oslobađanjem etarskog ulja i njegovom delimičnom difuzijom u vodenu fazu, kao i gubicima lako isparljivih i termolabilnih komponenti pre početka destilacije.



Slika 7.19 Varijacije prinosa etarskog ulja lavande iz celih cvetova u procesu sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije u destilacionom sudu od a) 500 ml (snaga mikrotalasa: 400 W – ■, 300 W – ● i 250 W – ▲; brzina destilacije: 0,62–5,71 ml/min) i b) 1000 ml (snaga mikrotalasa: 600 W – ■, 500 W – ●, 400 W – ▲; brzina destilacije: 5,43–8,51 ml/min); predtretman ultrazvukom amplitude 80% u trajanju od 30 min, odnos cveta i vode 1:10 g/ml

Dodatno smanjenje prinosa pri mikrotalasnoj hidrodestilaciji u skladu je sa objašnjenjima datim u poglavlju o mikrotalasnoj hidrodestilaciji, gde je pokazano da volumetrijsko i veoma brzo zagrevanje pod dejstvom mikrotalasa prvenstveno utiče na kinetiku procesa, ali ograničava trajanje difuziono-ispirajuće faze neophodne za iscrpnu ekstrakciju. Ovi efekti su naročito izraženi kod biljnog materijala prethodno izloženog ultrazvučnom predtretmanu, zbog čega kombinovana primena ultrazvuka i mikrotalasa dovodi do kumulativnih gubitaka i najnižeg ukupnog prinosa etarskog ulja (Karimi i sar. 2020).

Zajedničkim dejstvom navedenih mehanizama objašnjava se uočeni redosled prinosa: konvencionalna hidrodestilacija > sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija > mikrotalasna hidrodestilacija > sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija. Ukupno posmatrano, rezultati ukazuju da kod cvetova lavande brži i energetski intenzivniji postupci favorizuju kinetiku procesa, ali ne i njegovu iscrpnost, tako da bez pažljive optimizacije intenziteta ultrazvuka, snage mikrotalasa i vremena obrade, njihova kombinovana primena može biti kontraproduktivna u pogledu ukupnog prinosa etarskog ulja.

Tabela 7.22 Uticaj predtretmana ultrazvukom amplitude 80% u trajanju od 30 minuta i snage mikrotalasa na maksimalni prinos etarskog ulja iz celih cvetova lavande

Zapremina destilacionog suda, ml	Snaga mikrotalasa, W	Brzina destilacije, ml/min	Prinos etarskog ulja lavande, ml/100 g suvih cvetova	Poređenje sa klasičnom hidrodestilacijom, %
500	250	062 ± 0,06	0,56 ± 0,00	25,8
	300	2,09 ± 0,12	0,69 ± 0,09	31,8
	400	5,71 ± 0,32	0,83 ± 0,00	38,3
1000	400	5,43 ± 0,07	0,80 ± 0,00	41,7
	500	8,62 ± 0,36	0,83 ± 0,03	43,2
	600	8,51 ± 0,62	0,86 ± 0,00	44,8

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija. Procesni uslovi: destilacioni sudovi od 500 ml i 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml

Gonzalez-Rivera i saradnici (2023) su primenili sekvencijalnu ultrazvučno-mikrotalasnu hidrodestilaciju za izolovanje etarskog ulja iz svežih biljaka lavande (cvetovi, stabljike i listovi) i dobijene rezultate poredili sa mikrotalasnom hidrodestilacijom i konvencionalnom hidrodestilacijom u pogledu prinosa etarskog ulja, koncentracije polifenola i termohemijskih svojstava čvrstih ostataka. Prinos etarskog ulja se kretao između 2,54% i 3,19%, ali su najveće i najniže vrednosti dobijene korišćenjem mikrotalasne hidrodestilacije i konvencionalne

hidrodestilacije, redom. Upotreba ultrazvuka tokom procesa mikrotalasne hidrodestilacije dovela je do negativnog uticaja na prinos etarskog ulja, što se verovatno pripisuje potencijalu ultrazvuka da olakša emulgovanje ili disperziju etarskog ulja u VFHD. Ključna aromatična jedinjenja koja daju cvetne note etarskom ulju lavande bila su linalil acetat i linalol. Njihov kumulativni sadržaj bio je najniži u etarskom ulju dobijenom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom. Ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija kojoj je prethodio kombinovani enzimski tretman celulazom i hemicelulazom, korišćena je za dobijanje etarskih ulja iz suvih cvetova *L. angustifolia* (Rashed i sar. 2017) i *L. pubescence* (Rashed i sar. 2018) i za testiranje njihovih antioksidativnih i mikrobioloških efekata. Predtretman enzimima olakšava oslobađanje etarskog ulja iz biljne matrice razbijanjem žlezdanih trihoma biljnih ćelija. Prinos etarskog ulja iz cvetova *L. angustifolia* dobijen ovom metodom (0,98%) bio je veći u kraćem vremenu (1 sat) od onih dobijenih konvencionalnom hidrodestilacijom korišćenjem netretiranih cvetova (0,61%, 3 sata) i cvetova prethodno tretiranih pojedinačnim (celulaza: 0,74%, hemicelulaza: 0,63%) ili kombinovanim (0,81%) enzimima (Rashed i sar. 2017). Međutim, predtretman cvetova *L. pubescence* jednom celulazom obezbedio je najveći prinos etarskog ulja (0,50%) u poređenju sa drugim tretmanima (Rashed i sar. 2018). Oba etarska ulja lavande dobijena ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom iz enzimski prethodno tretiranih cvetova pokazala su izražene biološke efekte protiv patogenih bakterijskih sojeva i slobodnih radikala (Rashed i sar. 2017, 2018).

Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija je do sada primenjena za izolovanje etarskih ulja iz nekoliko biljnih materijala, uključujući nadzemne delove *L. coronopifolia* Poir (Sharifzadeh i sar. 2022), latice ruže (Patrascu i Radoiu 2016), plodove *S. chinensis* (Li i sar. 2019a), listove *Z. multiflora* (Karimi i sar. 2020), listove *C. camphora* (Wei i sar. 2022) i nadzemne delove *E. caucasicum* (Kakoei i sar. 2023). Međutim, samo su Sharifzadeh i saradnici (2022) uporedili izolovanje etarskog ulja iz nadzemnih delova *L. coronopifolia* Poir sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom i mikrotalasnom hidrodestilacijom u pogledu prinosa, hemijskog sastava, bioloških svojstava i uticaja na životnu sredinu. Najveći prinos od 1,15%, dobijen pod optimalnim uslovima bio je veći u kraćem vremenu za 82% u poređenju sa mikrotalasnom hidrodestilacijom. Etarsko ulje dobijeno sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom imalo je bolja antioksidativna i antimikrobna svojstva od onog dobijenog mikrotalasnom hidrodestilacijom. Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija daje veći prinos etarskog ulja lavande za

kraće vreme nego mikrotalasna hidrodestilacija, što se pripisuje sinergističkim efektima mikrotalasa i ultrazvuka (Sharifzadeh i sar. 2022). Nasuprot tome, za isto vreme destilacije, ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija daje manje etarskog ulja nego mikrotalasna hidrodestilacija, ali više nego konvencionalna hidrodestilacija. Ultrazvuk negativno utiče na prinos etarskog ulja tokom ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije, verovatno zbog emulgovanja etarskog ulja u VFHD (González-Rivera i sar. 2023).

7.4.2 Hemijski sastav etarskog ulja dobijenog sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom

U tabeli 7.23 prikazan je hemijski sastav etarskih ulja lavande dobijenih sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml u destilacionim sudovima zapremina 500 ml i 1000 ml uz ultrazvuk amplitude 80% u trajanju od 30 min i pri različitim snagama mikrotalasa. Primer GC/MS hromatograma uzorka etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri ultrazvuku amplitude 80% u trajanju od 30 minuta a zatim primenom mikrotalasa snage 600 W dat je u prilogu (Slika P7.6). U svim uzorcima etarskih ulja detektovano je ukupno 36 jedinjenja. Zbog kratkog vremena trajanja hidrodestilacije i selektivnog oslobađanja, izdvojeno je manje jedinjenja nego prilikom konvencionalne hidrodestilacije. Uglavnom je došlo do oslobađanja lakoisparljivih monoterpena i oksidovanih monoterpena, dok su se seskviterpeni i teže isparljivi sastojci koji zahtevaju duže vreme da pređu u parnu fazu, izdvojili u manjoj meri. Glavna grupa identifikovanih jedinjenja su oksidovani monoterpeni (84,74–87,20%). Kao glavne komponente u svim uzorcima etarskog ulja pojavljuju se linalol (27,83–35,48%), linalil acetat (29,91–40,31%), lavandulil acetat (7,58–8,86%). 1-Okten-3-il acetat i terpinen-4-ol su bili prisutni u ukupnim procentima iznad 3% u skoro svim analiziranim uzorcima, dok su 1,8-cineol, kamfor, borneol bili prisutni u ukupnoj količini od po nekoliko procenata. Ostale komponente (monoterpeni kao što su α -pinen, kamfen, mircen, β -ocimen i dr.) prisutne su u znatno manjim količinama (< 1%).

Tabela 7.23 Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom, pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml, u destilacionim sudovima različitih zapremina i pri različitim snagama mikrotalasa

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Zapremina destilacionog suda, ml					
			1000			500		
			Ultrazvuk 30 min, amplituda 80 %					
			Snaga mikrotalasa, W			Snaga mikrotalasa, W		
			600	500	400	400	300	250
			Ukupni sadržaj, %			Ukupni sadržaj, %		
<i>α</i> -Pinen	939	931	tr	0,038±0,053	0,040±0,056	-	tr	0,018±0,025
Kamfen	946	946,4	-	0,064±0,014	0,036±0,051	tr	tr	-
3-Oktanon	979	984,4	0,255±0,047	0,297±0,009	0,309±0,017	0,093±0,131	0,256±0,008	0,274±0,033
Mircen	988	989,1	0,082±0,001	0,154±0,013	0,179±0,057	0,081±0,013	0,179±0,007	0,183±0,000
Butil butanoat	993	993,1	0,050±0,071	0,076±0,038	0,109±0,076	-	-	-
Heksil acetat	1007	1010,9	0,53±0,025	0,716±0,011	0,692±0,021	0,429±0,018	0,557±0,039	0,569±0,003
<i>o</i> -Cimen	1022	1024,8	0,209±0,008	0,291±0,034	0,291±0,036	0,162±0,010	0,227±0,021	0,224±0,002
1,8-Cineol	1026	1029,8	1,081±0,083	1,464±0,091	1,506±0,078	0,635±0,010	1,049±0,033	1,156±0,018
(Z)- <i>β</i> -Ocimen	1032	1035,5	0,148±0,025	0,215±0,019	0,237±0,032	0,145±0,006	0,189±0,013	0,201±0,009
(E)- <i>β</i> -Ocimen	1044	1046,1	-	0,070±0,099	0,183±0,008	0,088±0,010	0,144±0,012	0,158±0,006
<i>γ</i> -Terpinen	1054	1057,6	-	-	0,032±0,045	0,021±0,030	-	0,035±0,049
<i>cis</i> -Linalol oksid (furanoid)	1067	1073,4	1,519±2,002	3,074±0,350	2,644±0,064	1,151±0,071	1,493±0,105	1,765±0,080
<i>trans</i> -Linalol oxid (furanoid)	1084	1089,7	1,835±0,044	2,058±0,194	1,740±0,121	0,684±0,011	0,895±0,085	1,086±0,094
Linalol	1095	1105,8	31,068±0,564	30,518±0,489	32,905±0,336	27,828±0,233	33,112±0,515	35,481±0,583
1-Okten-3-il acetat	1110	1110,1	2,974±0,270	3,307±0,384	3,486±0,030	2,931±0,151	3,306±0,098	3,378±0,165
3-Oktanol acetat	1120	1121,5	tr	0,033±0,047	0,068±0,003	0,054±0,006	0,038±0,053	0,077±0,008
Kamfor	1141	1145	0,606±0,084	0,607±0,077	0,626±0,026	0,518±0,005	0,607±0,025	0,717±0,025
Nerol oksid	1154	1154,4	0,058±0,082	0,062±0,087	0,093±0,131	0,159±0,015	0,176±0,004	0,202±0,010
Borneol	1165	1172,4	1,202±0,461	1,158±0,162	1,898±1,229	1,797±1,200	1,081±0,266	2,242±1,673
Terpinen-4-ol	1174	1181,5	3,401±0,074	3,159±0,094	3,293±0,099	2,818±0,092	3,275±0,091	3,154±0,226
Kripton	1183	1189,1	1,102±0,518	1,603±0,159	1,471±0,144	0,972±0,441	1,535±0,137	1,442±0,033
<i>α</i> -Terpineol	1186	1197,1	1,296±0,006	1,482±0,344	1,756±0,102	1,344±0,235	2,048±0,146	1,992±0,131
Verbenon	1204	1211	0,056±0,079	-	-	0,031±0,044	-	-
Hidrocinaamil alkohol	1224	1216,5	-	-	-	-	0,013±0,018	-
Kumin aldehid	1238	1243,4	-	0,175±0,019	0,014±0,019	0,074±0,104	0,110±0,022	0,109±0,154
Linalil acetat	1254	1255,3	35,033±1,235	34,566±1,136	32,509±0,433	40,312±0,664	32,402±1,961	29,914±0,987
Geraniol	1249	1256,2	-	-	0,030±0,042	-	-	-
<i>ρ</i> -Ment-1-en-7-al	1273	1277,1	0,030±0,042	tr	0,008±0,011	0,031±0,043	0,100±0,020	0,062±0,088

Nastavak **tabele 7.23**

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Zapremina destilacionog suda					
			1000 ml			500 ml		
			Ultrazvuk 30 min, amplituda 80%					
			Snaga mikrotalasa, W			Snaga mikrotalasa, W		
			600	500	400	400	300	250
			Ukupni sadržaj, %			Ukupni sadržaj, %		
Izobornil acetat	1283	1283,7	-	0,042±0,049	-	0,033±0,046	0,045±0,063	0,025±0,035
Lavandulil acetat	1288	1288,9	7,942±0,103	7,820±0,262	7,581±0,225	8,857±0,107	8,453±0,236	7,776±0,146
Neril acetat	1359	1362,3	0,167±0,003	0,078±0,110	0,140±0,103	0,193±0,017	0,193±0,127	0,270±0,009
Geranil acetat	1379	1381,5	0,447±0,041	0,204±0,132	0,475±0,003	0,547±0,103	0,644±0,032	0,743±0,001
(E)-Kariofilen	1417	1417,7	1,517±0,021	1,425±0,129	1,468±0,061	1,966±0,149	1,839±0,121	1,703±0,083
E)-β- <i>Farnezen</i>	1440	1453,6	0,185±0,052	0,192±0,001	0,162±0,059	0,322±0,078	0,305±0,030	0,285±0,015
Lavandulil 2-metil butanoat	1511	1520,8	-	-	-	0,044±0,062	0,061±0,086	-
Kariofilen oksid	1582	1583,1	2,206±0,062	2,142±0,219	1,883±0,267	2,811±0,016	2,490±0,350	1,990±0,063
Monoterpeni			0,44	0,83	1,00	0,50	0,74	0,82
Oksigenovani monoterpeni			84,74	84,83	87,20	86,35	85,73	86,58
Seskviterpeni			3,91	3,76	3,51	5,10	4,63	3,98
Ostalo			4,91	6,21	6,15	4,55	5,82	5,85

Rezultati su izraženi kao srednja vrednost $\pm$ standardna devijacija; RI^{lit} – Linearni retencioni indeksi dostupni u literaturi (Adams 2007); RI^{exp} – Linearni retencioni indeksi određeni eksperimentalno pomoću homologe serije n-alkana (C8-C20) na HP-5MS koloni. Sve komponente su identifikovane poređenjem retencionih indeksa i masenih spektara; tr – komponenta prisutna u tragovima (<0,05%).

Rezultati analize pokazuju da snaga mikrotalasa primenjena u sekvencijalnoj ultrazvučno-mikrotalasnoj hidrodestilaciji značajno utiče na hemijski sastav etarskog ulja lavande. Tokom primene ultrazvuka dolazi do oštećenja biljnog materijala usled razaranja žlezdanih trihoma u kojima se nalazi etarsko ulje. Kada se nakon toga primene mikrotalasi, deo jedinjenja, posebno monoterpena, se oksiduje ili isparava pre kondenzacije i na taj način dolazi do gubitka najisparljivijih komponenti, kao što je slučaj sa α -pinenom i limonenom (Chemat i sar. 2017, Vian i sar. 2008). S druge strane, s obzirom da proces kratko traje, teže isparljive komponente nemaju vremena da se izdvoje. Rezultat toga je etarsko ulje sa manjim spektrom jedinjenja. Mikrotalasi oslobađaju prvenstveno polarne komponente dok neke nepolarne i teže isparljive komponente (npr. seskviterpeni) najverovatnije ostaju u biljnom materijalu, pa je njihov udeo manji nego u slučaju mikrotalasne i konvencionalne hidrodestilacije. Hemijski profil ulja postaje jednostavniji, sa manjim brojem komponenti i većim udelom pojedinih jedinjenja u odnosu na mikrotalasnu i konvencionalnu hidrodestilaciju. Takav je slučaj sa linalolom, linalil acetatom i lavandulil acetatom. Na osnovu rezultata može se uočiti da se pri nižim snagama (250–300 W) postiže manji udeo glavnih komponenti etarskog ulja, pre svega linalola i linalil acetata, što ukazuje na delimično nekompletnu ekstrakciju. Kao i kod mikrotalasne hidrodestilacije, i slučaju sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije procentualni sadržaj linalola raste sa povećanjem snage mikrotalasa, pri čemu je u destilacionom sudu od 500 ml detektovan najveći udeo linalola primenom mikrotalasa najmanje snage 250 W. Izolovani procentualni sadržaj linalola veći je od onog dobijenog konvencionalnom hidrodestilacijom (35,48% u odnosu na 32,32%, redom). Isto je primećeno i kod 1-okten-3-il acetata, kamfora, borneola i α -terpineola. U slučaju linalil acetata, povećanje snage mikrotalasa negativno utiče na njegov procentualni sadržaj. Naime, najveći procentualni sadržaj linalil acetata izolovan je u destilacionom sudu od 500 ml pri snazi mikrotalasa od 400 W. Ovaj procentualni sadržaj je duplo veći od onog izolovanog konvencionalnom hidrodestilacijom (40,31% u odnosu na 20,41%, redom). Procentualni sadržaj linalil acetata u etarskom ulju je u granicama koje su propisane ISO standardom 3515:2002 (EN ISO 3515:2002), prema kojem sadržaj linalil acetata treba da bude u rasponu od 25,0% do 47,0%. Negativni uticaj mikrotalasa, odnosno smanjenje procentualnog sadržaja jedinjenja sa povećanjem snage mikrotalasa primećeno je kod (E)-kariofilena i kariofilen oksida. Procentualni sadržaj lavandulil acetata nije mnogo varirao u zavisnosti od primenjene snage mikrotalasa, a za oko 1% je veći nego u slučaju konvencionalne hidrodestilacije. Svi uzorci imaju nizak procentualni sadržaj kamfora, što je dobro, jer negativno

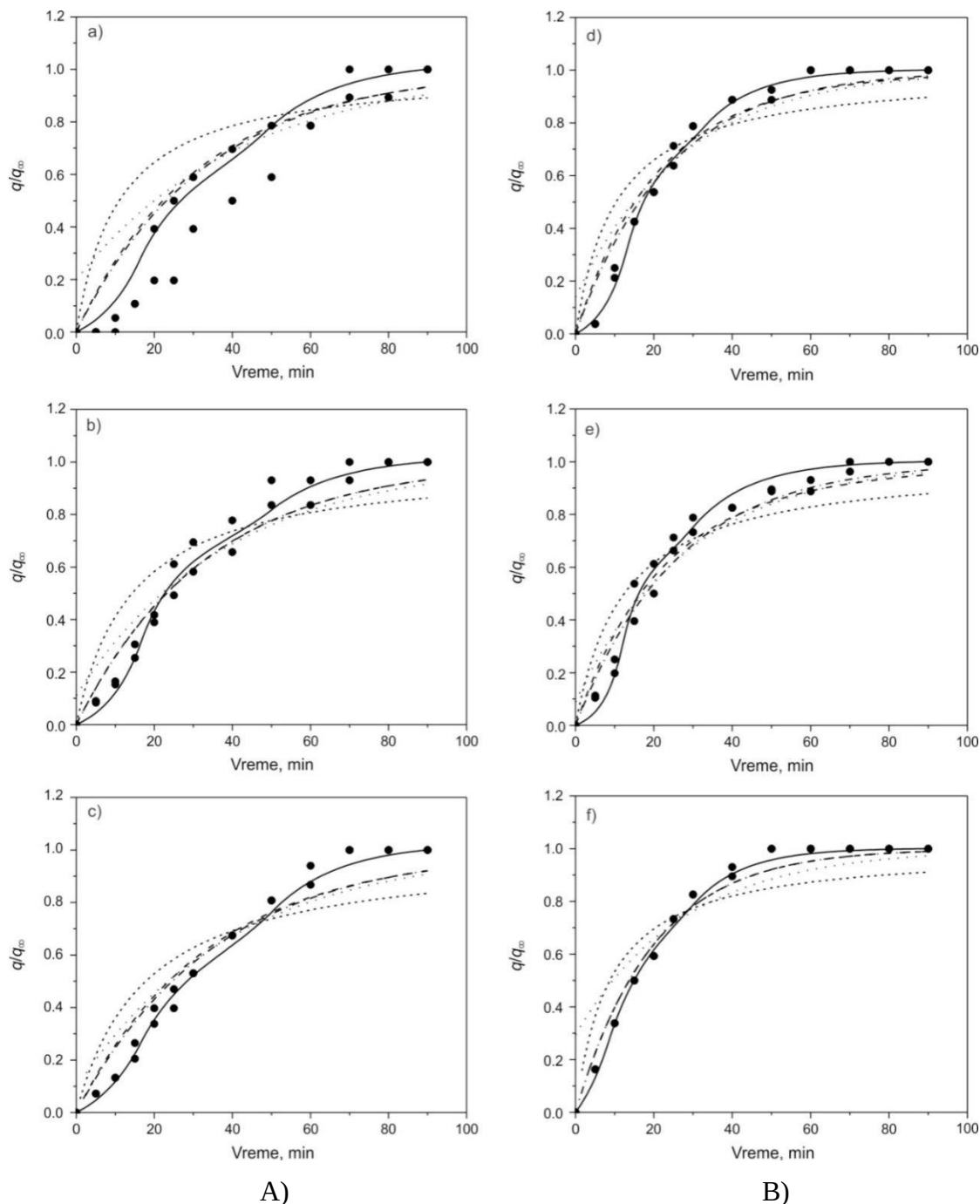
utiče na olfaktorni kvalitet etarskog ulja (Pljevljakušić i sar. 2023). Srednja snaga mikrotalasa (400–500 W) daje najpovoljniji hemijski sastav, sličan standardnom etarskom ulju visoke čistoće, uz manji broj termički degradiranih jedinjenja. Može se reći da u tom slučaju postoji balans između efikasnosti ekstrakcije i očuvanja termolabilnih jedinjenja. Pri najvećoj snazi (600 W) uočava se pad udela estarskih komponenti uz porast procentualnog sadržaja oksidovanih terpena (borneol, terpinen-4-ol, α -terpineol), što ukazuje na pojavu termičke degradacije i oksidacije usled prekomernog zagrevanja.

7.4.3 Kinetika sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Nadovezujući se na rezultate konvencionalne, sekvencijalne ultrazvučne i mikrotalasne hidrodestilacije, analiza sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije pruža uvid u kombinovane efekte mehaničkog i termičkog delovanja. Ultrazvučni predtretman može inicijalno narušiti strukturu biljnog tkiva, dok mikrotalasi obezbeđuju brzo i unutrašnje zagrevanje, što stvara specifičnu dinamiku oslobađanja etarskog ulja koja se kvalitativno razlikuje od pojedinačnih tehnika. Iako su pojedinačno efekti ultrazvuka i mikrotalasa donekle proučeni, njihova sekvencijalna primena i njen uticaj na kinetiku procesa ostaju nedovoljno istraženi. Primena istog seta kinetičkih modela kao u prethodnim poglavljima omogućava direktno poređenje sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije sa procesima konvencionalne, sekvencijalne ultrazvučne i mikrotalasne hidrodestilacije. Pri tome je analiziran uticaj zapremine destilacionog suda i snage mikrotalasa na vrednosti parametara modela, sa ciljem identifikovanja specifičnih kinetičkih obrazaca ove kombinovane tehnike.

7.4.3.1 Mehanizam sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije etarskog ulja lavande

Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija (slika 7.20) takođe pokazuje dvofazni mehanizam, ali s najizraženijom inicijalnom fazom među svim metodama. Ova metoda kombinuje mehaničko otvaranje tkiva (ultrazvuk) i brzo volumetrijsko zagrevanje (mikrotalasi), pa je ispiranje etarskog ulja sa površine biljnih čestica brže, čak i u odnosu na mikrotalasnu hidrodestilaciju. U kasnijoj fazi brzina se smanjuje, kao i kod prethodnih metoda, ali je pristup zasićenju najbrži, koje se dešava u periodu od 40 min do 90 min.



Slika 7.20 Verifikacija testiranih modela pod specifičnim uslovima sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode od 1:10 g/ml u destilacionom sudu od A) 500 ml (a–c) i B) 1000 ml (d–f) pri snazi mikrotalasa (tj. brzina destilacije) od a) 400 W ($5,71 \pm 0,32$ ml/min), b) 300 W ($2,09 \pm 0,12$ ml/min) i c) 250 W ($0,62 \pm 0,06$ ml/min), d) 600 W ($8,51 \pm 0,62$ ml/min), d) 500 W ($8,62 \pm 0,36$ ml/min) i f) 400 W ($5,43 \pm 0,07$ ml/min) (model I – puna linija, model II – isprekidana linija, model III – tačkasta linija, model IV – linija crta-tačka i model V – kratka isprekidana linija)

7.4.3.2 *blik kinetičkih krivih kod sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije*

Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija (slika 7.20) takođe pokazuje hiperbolički oblik kinetičkih krivih, ali s najizraženijom inicijalnom fazom među svim metodama. Zbog kombinacije dejstava ultrazvuka (mehaničko otvaranje tkiva) i mikrotalasa (brzo volumetrijsko zagrevanje), početni deo krive je strmiji čak i u odnosu na mikrotalasnu hidrodestilaciju. Za razliku od konvencionalne hidrodestilacije (klasično zagrevanje), sekvencijalne ultrazvučne hidrodestilacije (mehaničko otvaranje) i mikrotalasne hidrodestilacije (termička ekspanzija), kod sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije prvi deo hiperbolične krive oblikuje sinergija oba mehanizma, što dovodi do najbržeg porasta prinosa etarskog ulja. U kasnijoj fazi dinamika se smiruje, kao i kod prethodnih metoda, ali je pristup zasićenju najbrži. Veličina destilacionog suda i snaga mikrotalasa utiču na „širinu“ hiperbole, slično trendovima u mikrotalasnoj hidrodestilaciji, ali se inicijalna strmost skoro uvek zadržava kao najveća među sve četiri metode.

7.4.3.3 *valuacija kinetičkih modela sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije*

U skladu sa pristupom primenjenim kod prethodnih metoda, izvršena je evaluacija kinetičkih modela sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije, sa posebnim fokusom na zajedničke i diferencijalne efekte ultrazvuka i mikrotalasnog zagrevanja na faze ispiranja i difuzije etarskog ulja.

Kod modela I, parametri snažno reaguju na povećanje snage mikrotalasa i zapremine destilacionog suda. Sa porastom snage mikrotalasa od 250 W ka 600 W, vreme τ_w , koje odgovara trenutku dostizanja maksimalne brzine ispiranja, varira u opsegu od približno 8,5 do 16,1 min, dok se vreme τ_d , koje odgovara trenutku dostizanja maksimalne brzine difuzije, kreće u rasponu od oko 30 do 48,8 min, ukazujući na ubranu kinetiku u odnosu na metode bez mikrotalasa, ali i na zadržavanje jasne dvofazne prirode procesa. Maksimalne brzine ispiranja i difuzije, α_w i α_d obuhvataju relativno široke intervale vrednosti, pri čemu njihove maksimalne vrednosti nisu nužno vezane za najviše snage mikrotalasa. Konstante brzine ispiranja i difuzije, k_w i k_d , variraju u širim opsezima u sudu od 1000 ml nego u sudu od 500 ml, što ukazuje na značaj zapremine sistema i efikasnosti volumetrijskog zagrevanja. Isprana frakcija etarskog ulja q_w pokazuje postepenu redistribuciju u korist brže izdvojivih komponenti, dok se difuzionu frakcija q_d kreće

kroz umeren raspon vrednosti sa izraženim maksimumima pri srednjim režimima, što ukazuje na ograničenja difuzione faze pri ekstremnim uslovima. Zaključak je da veća snaga mikrotalasa i veća zapremina destilacionog suda ubrzavaju ispiranje i difuziju, ali ekstremno visoka snaga može narušiti difuzionu fazu.

Kod modela II konstante brzine ispiranja i difuzije, k_w i k_d , nalaze se u širim opsezima vrednosti u odnosu na prethodne metode, naročito u većim destilacionim sudovima. Udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem f_w pokazuje izraženu varijabilnost u zavisnosti od snage mikrotalasa, sa vrednostima koje odražavaju prelaz između režima dominiranog ispiranjem i režima u kome difuzija ima značajniju ulogu. Ovakav raspored vrednosti f_w potvrđuje postojanje prelaznog kinetičkog režima, karakterističnog za kombinovano dejstvo ultrazvuka i mikrotalasa.

Kod modela III difuziona konstanta k_d stabilno raste sa snagom mikrotalasa ($0,0236 \rightarrow 0,0367$) i uvek je veća u sudu od 1000 ml, što ukazuje na jače i ravnomernije volumetrijsko zagrevanje. Parametar f_w pokazuje izrazite oscilacije bez jasnog trenda, što odražava istovremeno delovanje više konkurentnih procesa, uključujući ultrazvučni kolaps ćelija, mikrotalasno zagrevanje i promene hidratacionog stanja biljnog materijala. Zaključak je da povećanje snage mikrotalasa pojačava difuziju, dok f_w ostaje visokovarijabilan i reflektuje kompleksnu prirodu procesa.

Model IV, koji uključuje samo k_d , pokazuje najjednostavniju i najjasniju zavisnost: k_d monotonno raste sa snagom mikrotalasa i uvek je viši u sudu od 1000 ml. Ovaj model precizno registruje pojačanu difuziju izazvanu kombinovanim efektima ultrazvuka i mikrotalasnog zagrevanja ali, zbog svoje jednostavne strukture, ne može da prikaže promene u preraspodeli etarskog ulja između ispiraljive i difuzione frakcije.

Konstanta brzine drugog reda k_2 raste sa povećanjem snage mikrotalasa i zapremine destilacionog suda, pokazujući ubrzanje ukupne kinetike procesa. Ipak, model V dosledno pokazuje najviše *MRPD* i najniže R^2 vrednosti u svim uslovima, što ga čini najmanje pouzdanim za opisivanje procesa. Zaključak je da model ne može adekvatno opisati kinetiku procesa.

Sveobuhvatno posmatrano, parametri difuzione faze (τ_d , k_d i k_2), dok parametri ispiranja (τ_w , α_w , f_w i q_w) ispoljavaju nelinearne i visokovarijabilne raspodele vrednosti usled kombinovanog delovanja ultrazvučnog kolapsa ćelija i mikrotalasnog pregrevanja. Kompleksniji modeli I i II omogućavaju identifikaciju prelaznih kinetičkih režima između ispiranja i difuzije, dok jednostavniji modeli III–V uglavnom registruju promene u difuzionoj efikasnosti bez detaljnog uvida u redistribuciju etarskog ulja. Ovi rezultati potvrđuju da sekvencijalna

ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija dovodi do najširih opsega varijacije kinetičkih parametara i najsloženije kinetičke strukture procesa u poređenju sa prethodno analiziranim metodama.

7.4.3.4 Izbor kinetičkog modela sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije

Na osnovu *MRPD*, *AICc* i R^2 vrednosti (tabela 7.24), model I je ubedljivo najbolji kinetički model za ultrazvučno-mikrotalasnu hidrodestilaciju, sa najnižim *MRPD* vrednostima (3,5–10,1%) i najvišim koeficijentima determinacije (0,982–0,997), uz veoma negativne *AICc* vrednosti koje potvrđuju odlično slaganje sa eksperimentalnim podacima. Model II zauzima drugo mesto: iako pokazuje više *MRPD* vrednosti, posebno pri manjim snagama mikrotalasa, pri višim snagama i većoj zapremini suda održava stabilno visoke R^2 vrednosti (0,928–0,983) i dovoljno negativne *AICc* rezultate, što ukazuje na robusnu strukturu modela. Model IV je rangiran kao treći, sa umerenim *MRPD* vrednostima, dobrim difuzionim parametrima i stabilnim *AICc*, što ga pozicionira kao model srednjih performansi. Model III zauzima četvrtu poziciju, pre svega zbog visokih *MRPD* vrednosti (do 67,71%) i promenljivih R^2 vrednosti, koje ukazuju na poteškoće u preciznom opisivanju ubrzane dvofazne ekstrakcije. Model V se pokazao najslabijim, sa najvećim predikcionim greškama, najmanje negativnim *AICc* vrednostima i najnižim R , što potvrđuje njegovu ograničenu primenljivost u uslovima kombinovane ultrazvučne i mikrotalasne hidrodestilacije.

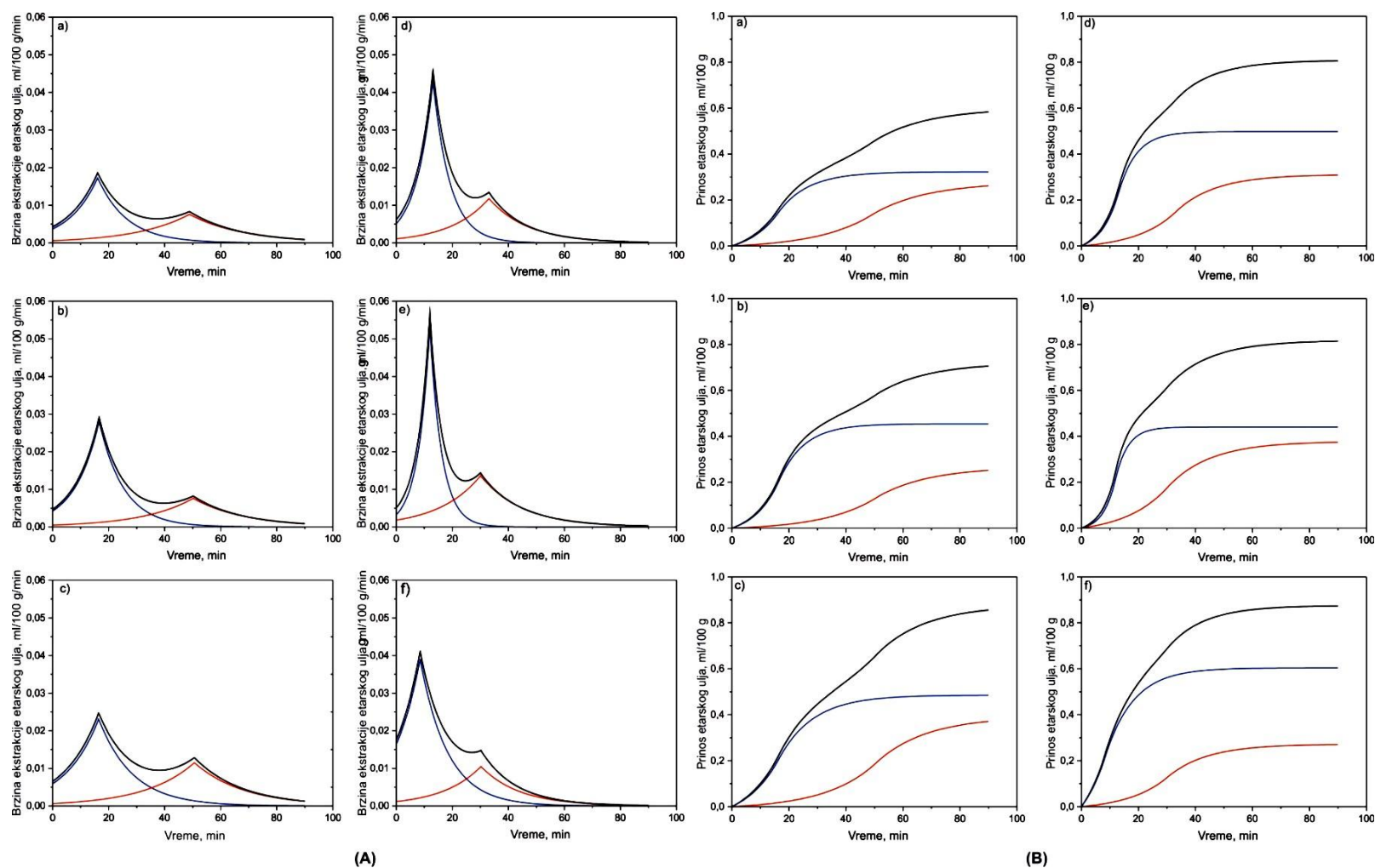
Tabela 7.24 Parametri testiranih kinetičkih modela za sekvencijalnu ultrazvučno-mikrotalasnu hidrodestilaciju

Model - tip	Parametri modela	Amplituda / Trajanje					
		80% / 30 min	80% / 30 min	80% / 30 min	80% / 30 min	80% / 30 min	80% / 30 min
		Snaga / Trajanje					
		250 W / 90 min	300 W / 90 min	400 W / 90 min	400 W / 90 min	500 W / 90 min	600 W / 90 min
		Brzina destilacije, ml/min					
		0,62 ± 0,06	2,09 ± 0,12	5,71 ± 0,32	5,43 ± 0,07	8,62 ± 0,37	8,50 ± 0,63
		Zapremina destilacionog suda, 500 ml			Zapremina destilacionog suda, 1000 ml		
I	τ_w , min	16,07	16,60***	16,44***	13,09	11,97***	8,49***
	τ_d , min	48,84	50,17***	50,59***	33,06	30,03***	30,21***
	α_w , g/100g/min	0,0173	0,0280**	0,0231***	0,0431	0,0529**	0,0390***
	α_d , g/100g/min	0,0076	0,0076	0,0115***	0,0118	0,0136*	0,0105*
	k_w , min ⁻¹	0,0959	0,1140.	0,0830*	0,1630	0,233	0,102*
	k_d , min ⁻¹	0,0526	0,0551	0,0570*	0,0724	0,0672*	0,0729**
	q_w , g/100 g	0,323	0,455	0,486	0,498	0,441	0,,603
	q_d , g/100 g	0,278	0,266	0,392	0,312	0,377	0,273
	MRPD, %	17,54	13,05	7,38	8,6	10,13	3,47
	AICc	-76,35	-73,5	-107,7	-103,9	-77,9	-121,5
	R ²	0,961	0,972	0,995	0,994	0,982	0,997
II	k_w , min ⁻¹	0,0376	0,0334	0,0378	0,0578	0,0535	0,0517
	k_d , min ⁻¹	0,0245	0,0287	0,0245	0,0315	0,0217	0,0477
	f_w	0,549	0,294	0,394	0,594	0,693	0,740
	MRPD, %	21,12	21,73	28,2	48,86	16,76	8,32
	AICc	-39,79	-51,1	-43,7	-50,17	-64,6	-80,0
	R ²	0,928	0,950	0,940	0,953	0,968	0,983
III	k_d , min ⁻¹	0,0236***	0,0262***	0,0254***	0,0367***	0,0347***	0,0362***
	f_w	0,1985**	0,1106*	0,0929	0,139*	0,0894**	0,294***
	MRPD, %	39,12	35,0	39,64	67,71	20,81	23,56
	AICc	-21,3	-37,6	-34,9	-35,35	-56,8	-25,1
	R ²	0,838	0,908	0,907	0,909	0,952	0,847
IV	k_d , min ⁻¹	0,0300***	0,0299***	0,0282***	0,0426***	0,0386***	0,0507***
	MRPD, %	19,4	21,5	25,7	43,56	14,59	8,34
	AICc	-46,6	-56,2	-51,2	-60,6	-75,5	-85,1
	R ²	0,933	0,950	0,946	0,962	0,974	0,983
V	k_2 , min ⁻¹	0,0911***	0,0698***	0,0561***	0,0964***	0,0804***	0,1141***
	MRPD, %	33,76	38,7	45,42	72,9	27,8	22,56
	AICc	-21,5	-27,9	-21,16	-24,9	-39,8	-33,9
	R ²	0,773	0,811	0,786	0,794	0,854	0,814

* Značajne cifre: 0 **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05 ' . 0.1 ' ' 1. Simboli: k_w i k_d – konstante brzine destilacije za ispiranje i difuziju, α_w i α_d – maksimalne brzine destilacije za ispiranje i difuziju pri $t = \tau_w$ i $t = \tau_d$. f_w – udeo etarskog ulja koji se izdvaja ispiranjem, k_2 – konstanta brzine reakcije drugog reda, q_w i q_d – količine etarskog ulja lavande izolovanog iz biljnog materijala ispiranjem i difuzijom. Procesni uslovi: zapremine destilacionog suda 500 i 1000 ml, odnos cveta i vode 1:10 g/ml.

7.4.3.5 ehanističko tumačenje kinetike sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije na osnovu simulacija modela I

Na slici 7.21, povećanje snage mikrotalasa (odnosno brzine destilacije) pre svega pojačava i „pomera unapred” oslobađanje etarskog ulja u fazi u kojoj dominira ispiranje, što rezultuje izraženijim ranim maksimumom brzine ekstrakcije i bržim početnim porastom hiperbolične krive prinosa etarskog ulja, dok doprinos difuzije biva vremenski komprimovan. Za obe zapremine destilacionog suda, najveće snage mikrotalasa ne dovode do najvećeg konačnog prinosa etarskog ulja: pri veoma visokim snagama mikrotalasa proces postaje izrazito intenziviran u pogledu brzine, ali manje iscrpan, što je u skladu sa skraćenim efektivnim difuzionim prozorom (ranije dostizanje platoa sa nižom asimptotom). Zapremina destilacionog suda moduliše ovaj efekat snage mikrotalasa promenom homogenosti polja, odnosno specifične snage mikrotalasa, i ravnoteže između faza. Pri istoj nominalnoj snazi mikrotalasa (npr. 400 W), sistem od 1000 ml (niža specifična snaga) pokazuje manje ekstremnu ranu dominaciju „ispiranja” i postojaniji doprinos difuzije, što rezultuje većim prinosom etarskog ulja u poređenju sa sistemom od 500 ml. Odnosno, zapremina destilacionog suda pretežno preoblikuje relativne udele ispiranja i difuzije, ali ne menja postojanje dvostepenog mehanizma. U celini posmatrano, sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija intenzivira ekstrakciju preraspodelom doprinosa prenosa mase u vremenu, ostvarujući najviše brzine ekstrakcije, ali i najsloženije i najosetljivije kinetičko ponašanje među svim ispitivanim metodama.



Slika 7.21 Vremenske promene brzine ekstrakcije (A) i prinosa (B) etarskog ulja lavande tokom sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml u destilacionim sudovima zapremina 500 ml (a–c) i 1000 ml (d–f), simulirane primenom modela I: (a) 250 W ($0,62 \pm 0,06$ ml/min), (b) 300 W ($2,09 \pm 0,12$ ml/min) i (c) 400 W ($5,71 \pm 0,32$ ml/min), (d) 400 W ($5,43 \pm 0,07$ ml/min), (e) 500 W ($8,62 \pm 0,36$ ml/min) i (f) 600 W ($8,51 \pm 0,62$ ml/min); plava linija – ispiranje, crvena linija – difuzija i crna linija – ispiranje + difuzija

7.5 Poređenje konvencionalne, sekvencijalne ultrazvučne, mikrotalasne i sekvencijalne ultrazvučno-mikrotalasne hidrodestilacije

7.5.1 Poređenje maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande različitih metoda hidrodestilacije

Slika 7.22 pokazuje zavisnosti maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande od brzine destilacije pri primeni različitih metoda hidrodestilacije. Rezultati jasno pokazuju da i brzina destilacije i maksimalni prinos etarskog ulja zavise od dominantnog mehanizma prenosa toplote i mase tokom procesa. Dok je kod konvencionalne hidrodestilacije uočena nelinearna zavisnost prinosa od brzine destilacije, sekvencijalna ultrazvučna, mikrotalasna i sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija pokazuju približno linearne odnose, što ukazuje na drugačiju kinetičku kontrolu procesa.

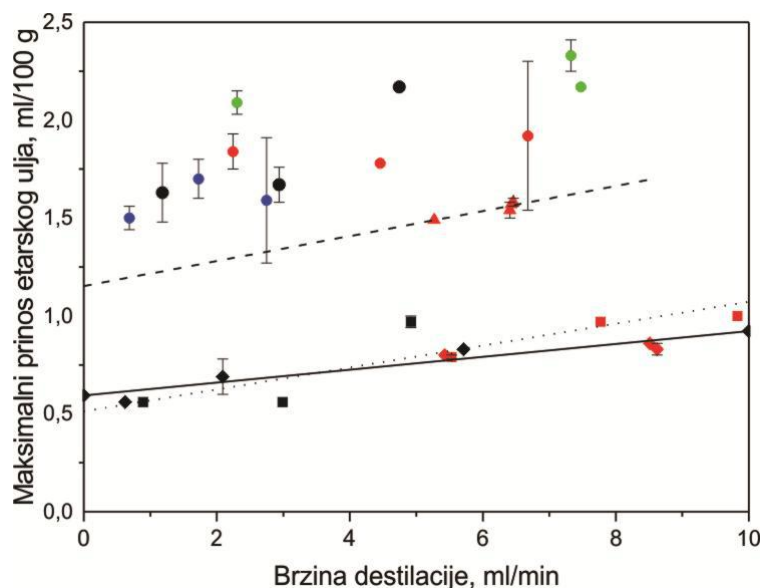
Konvencionalna hidrodestilacija, zasnovana na spoljašnjem zagrevanju i konvektivnom prenosu toplote, odvija se pri nižim brzinama destilacije i karakteriše se sporijim porastom prinosa. Produženo trajanje procesa omogućava postepeno razaranje peltatnih žlezdanih trihoma i potpuniju difuziju etarskog ulja iz biljnog tkiva, što rezultira najvećim krajnjim prinosom, ali uz značajno duže vreme ekstrakcije.

Sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija pokazuje najveće vrednosti odsečka (1,152) i nagiba (0,064), što ukazuje da se visoki prinosi postižu već pri relativno malim brzinama destilacije. Visok koeficijent determinacije ($R^2 = 0,847$) potvrđuje stabilnu linearnu zavisnost između brzine destilacije i prinosa. Ovakvo ponašanje može se pripisati kavitacionim efektima ultrazvuka, koji dovode do mehaničkog oštećenja ćelijskih zidova, povećanja propustljivosti biljne matrice i olakšanog oslobađanja etarskog ulja, bez potrebe za povišenim temperaturama.

Mikrotalasna hidrodestilacija pokazuje umerene vrednosti odsečka (0,512) i nagiba (0,056), uz niži R^2 (0,751) i višu $MRPD$ vrednost (8,8%), što ukazuje na veću varijabilnost procesa. Dielektrično zagrevanje omogućava brzo oslobađanje etarskog ulja, ali pri višim snagama dolazi do lokalnog pregrevanja i neujednačene ekstrakcije (Bhadange i sar. 20245), što ograničava krajnji prinos i objašnjava smanjenu linearnost u odnosu na ultrazvučne metode.

Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija pokazuje najpovoljniju kombinaciju statističkih pokazatelja ($R^2 = 0,861$ i $MRPD = 5,0\%$), što ukazuje na visoku

stabilnost i reproduktivnost procesa. Niži nagib zavisnosti prinosa od brzine destilacije (0,033) ukazuje da povećanje intenziteta destilacije prvenstveno utiče na ubrzanje procesa, a ne na rast prinosa etarskog ulja. Ovakvo ponašanje sugerise da je veći deo lako dostupnog ulja oslobođen već u ranim fazama procesa, zahvaljujući ultrazvučnom predtretmanu koji prethodno destabilizuje sekretorne strukture. Mikrotalasno zagrevanje zatim omogućava brzo, ali ograničeno izdvajanje preostalog ulja, bez njegovog dodatnog forsiranog oslobađanja, što se manifestuje sporijim porastom prinosa sa povećanjem brzine destilacije.



Slika 7.22 Zavisnost maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande od brzine destilacije različitim metodama hidrodestilacije: konvencionalna (250, 500, 1000 i 2000 ml – krugovi), sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija (1000 ml – trougao; isprekidana linija), mikrotalasna (500 i 1000 ml – kvadrat; tačkasta linija) i sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna (500 i 1000 ml – romb; puna linija); 250 ml – plavi, 500 – crveni, 1000 – crni i 2000 ml – zeleni)

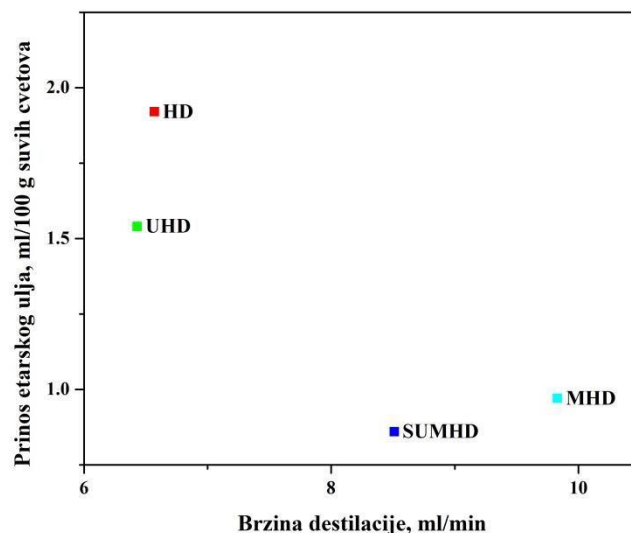
Tabela 7.24 Zavisnosti maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande od brzine destilacije

Tip hidrodestilacije	Odsečak	Nagib	R^2	R_{adj}^2	MRPD, %
Sekvencijalna ultrazvučna	1,152	0,064	0,847	0,771	0,7*
Mikrotalasna	0,512	0,056	0,751	0,689	8,8**
Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna	0,593	0,033	0,861	0,827	5,0**

* Nagib nije značajno različit od nule ($p = 0,050$) ** Nagib je značajno različit od nule ($p = 0,050$)

Na slici 7.23 prikazana je zavisnost maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande od brzine destilacije različitim metodama hidrodestilacije u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri

odnosu cveta i vode 1:10 g/ml. Uočava se da se najveći prinos etarskog ulja postiže konvencionalnom hidrodestilacijom (1,92 ml/100 g suvih cvetova), dok ultrazvučna (1,54 ml/100 g suvih cvetova), mikrotalasna (0,97 ml/100 g suvih cvetova) i sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna metoda (0,86 ml/100 g suvih cvetova) daju niže prinose pri većim brzinama destilacije. Povećanje brzine destilacije smanjuje vreme kontakta između biljnog materijala i vode, čime se ograničava difuziono kontrolisano oslobađanje etarskog ulja, naročito kod metoda sa intenzifikovanim zagrevanjem. Ovi rezultati potvrđuju da brzina destilacije predstavlja važan parametar koji direktno utiče na efikasnost ekstrakcije etarskog ulja i ukazuju na kompromis između prinosa, trajanja procesa i energetske efikasnosti primenjene metode. U praktičnom smislu, optimalna metoda zavisi od željenog cilja: ako je cilj maksimalni prinos etarskog ulja, pogodnija je konvencionalna hidrodestilacija, ako je cilj ušteda vremena i energije, tada se prednost daje mikrotalasnoj metodi.



Slika 7.23 Zavisnost maksimalnog prinosa etarskog ulja lavande od brzine destilacije različitim metodama hidrodestilacije u destilacionom sudu zapremine 1000 ml pri odnosu cveta i vode 1:10 g/ml (HD – konvencionalna hidrodestilacija, UHD – sekvencijalna ultrazvučna hidrodestilacija, MHD – mikrotalasna hidrodestilacija i SUMHD – sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija)

Iako se ultrazvuk i mikrotalasi u literaturi često ističu kao tehnike za intenzifikaciju procesa, njihova efikasnost je visoko zavisna od biljnog materijala i primenjenih parametara, što omogućava više objašnjenja za rezultate dobijene u ovoj doktorskoj disertaciji.

Prvo, vreme destilacije ima ključnu ulogu u postizanju ravnotežnog prinosa etarskog ulja. Prinos etarskog ulja lavande kontinuirano raste tokom dužeg trajanja sva četiri procesa hidrodestilacija, verovatno zahvaljujući potpunijem razaranju žlezdanih trihoma i boljem prenosu mase iz rezervoara etarskog ulja u destilat (Bousbia i sar. 2009). Ultrazvučni predtretman ili mikrotalasne tehnike mogu značajno skratiti vreme hidrodestilacije, ali često ne povećavaju krajnji prinos, što je već uočeno kod lavande (Çelebi Uzkuç i sar. 2021) i drugih aromatičnih biljaka, uključujući timijan (Golmakani i Rezaei 2008b, Lucchesi i sar. 2004), citrus kore (Bousbia i sar. 2009), ruzmarin (Elyemni i sar. 2019) i celer (Zorga i sar. 2020).

Drugo, intenzitet kavitacije tokom ultrazvučnog predtretmana može doprineti smanjenju prinosa etarskog ulja. Umeren ultrazvuk povećava efikasnost ekstrakcije etarskog ulja povećanjem propustljivosti ćelijskih zidova i poboljšanjem prenosa mase, dok prevelika snaga ultrazvuka može izazvati ozbiljnu deteksturaciju tkiva i stabilne emulzije, smanjujući prinos etarskog ulja (Chemat i sar. 2017, Gao i sar. 2021, Shen i sar. 2023, Wang i sar. 2022, Zorga i sar. 2020). Takvi efekti pre intenzivnog tretmana ranije su potvrđeni, uključujući i slučajeve smanjenja prinosa pri većoj snazi i dužem trajanju ultrazvuka kod kineskog cimeta (Chen i sar. 2021) i karanfilića (Suttiarporn i sar. 2024). S obzirom da lavanda poseduje nežne trihome bogate monoterpenima, ovakvi efekti mogu biti posebno izraženi.

Treće, procesi mikrotalasne i sekvencijalne ultrazvučno–mikrotalasne hidrodestilacije mogu biti ograničeni neujednačenim zagrevanjem i lokalnim pregrevanjem (Gao i sar. 2021, Filly i sar. 2014, Vian i sar. 2008, Wang i sar. 2022). Mikrotalasi podstiču efikasan prenos mase samo kada su sadržaj vode i odnos biljne mase adekvatni; prenisko učešće vode dovodi do formiranja lokalno pregreanih zona koje mogu izazvati delimičnu degradaciju ili gubitak najisparljivijih komponenti (Gao i sar. 2021, Vian i sar. 2008). Zbog visokog sadržaja lako isparljivih monoterpena, lavanda je izrazito osetljiva na ovakve toplotne gradijente. Ako je brzina generisanja pare veća od kapaciteta kondenzatora, što je zabeleženo u više studija, deo etarskog ulja može napustiti sistem pre kondenzacije, što umanjuje mereni prinos (Chemat i sar. 2017, Zorga i sar. 2020).

Četvrto, sekvencijalni ultrazvučno-mikrotalasni pristup može dovesti do kumulativnog strukturnog i termičkog oštećenja. Takva sinergija ultrazvučno-mikrotalasnog zračenja je demonstrirana kod aromatičnih biljaka kao što je *Zataria multiflora*, gde sekvencijalna prethodna obrada povećava efikasnost ekstrakcije samo u uskom vremenskom okviru optimizovanog vremena ultrazvuka i snage mikrotalasa (Karimi i sar. 2020). Međutim, kada ovi parametri nisu

pravilno optimizovani, prekomerno zagrevanje mikrotalasima ili produžena sonikacija mogu izazvati intenzivno isparavanje i delimičnu razgradnju isparljivih komponenti, što na kraju smanjuje prinos etarskog ulja (Golmakani i Rezaei 2008b, Karimi i sar. 2020). Pored toga, anatomski oštećenja izazvana mikrotalasima, uključujući kolaps peltatnih žlezdanih trihoma, dokumentovana su kod lavande, što ukazuje da su strukture koje sadrže etarsko ulje veoma osjetljive na termička i mehanička naprezanja nastala tokom intenzivirane hidrodestilacije (Iriti i sar. 2006). Ova osjetljivost je dodatno potvrđena u preglednim radovima, koji napominju da hibridne ultrazvučno-mikrotalasne tehnike mogu dati lošije rezultate od konvencionalne hidrodestilacije kada parametri procesa odstupaju od optimalnog područja, zbog kombinovanih efekata kavitacije, lokalizovanog pregrevanja i strukturne degradacije (Chemat i sar. 2017).

Najzad, ponašanje primećeno u ovom istraživanju: veći prinosi etarskog ulja pri konvencionalnoj hidrodestilaciji u odnosu na sekvencijalnu ultrazvučnu, mikrotalasnu i sekvencijalnu ultrazvučno-mikrotalasnu hidrodestilaciju nije karakteristično samo za lavandu. Kod više aromatičnih biljaka pokazano je da primena ultrazvučnog predtretmana ili mikrotalasne hidrodestilacije ne dovodi nužno do povećanja ukupnog prinosa etarskog ulja u odnosu na konvencionalnu hidrodestilaciju, tako da u zavisnosti od procesnih uslova može rezultovati jednakim ili čak nižim prinosima (Binello i sar. 2014, Gao i sar. 2021, Saw i Venkatachalam 2010, Wei i sar. 2013). Ovo potvrđuje da tehnike koje koriste ultrazvuk i mikrotalase prvenstveno utiču na brzinu ekstrakcije etarskog ulja, dok se konačan prinos poboljšava samo u uslovima precizno optimizovanim za dati biljni materijal (Filly i sar. 2014, Vian i sar. 2008).

Sveukupno, rezultati jasno ukazuju da ultrazvuk i mikrotalasi prvenstveno utiču na kinetiku procesa, dok povećanje maksimalnog prinosa zahteva strogo optimizovane uslove specifične za biljni materijal. U slučaju lavande, kombinacija osjetljive morfologije sekretornih struktura i termičke nestabilnosti monoterpena objašnjava zašto je u ispitivanim uslovima konvencionalna hidrodestilacija dala najveći prinos etarskog ulja, uprkos dužem vremenu procesa.

7.5.2 Uticaj metoda ekstrakcije na hemijski profil etarskog ulja lavande

Hemijski sastav etarskog ulja dobijen ultrazvučnim i mikrotalasnim tehnikama pokazuje isti kvalitativni spektar identifikovanih jedinjenja kao i konvencionalna hidrodestilacija, ali sa izraženim kvantitativnim razlikama. Hidrodestilacija je korišćena kao referentna metoda zbog

njene sposobnosti da očuva kako najlakše isparljive monoterpena, tako i stabilnije oksidovane seskviterpena, što je u skladu sa prethodnim pregledima hemijskog profila etarskog ulja lavande. Hemijski sastav etarskog ulja lavande detaljno je opisan u dostupnoj naučnoj literaturi i karakteriše ga stabilan kvalitativni spektar sastojaka, u kome linalol, linalil acetat, lavandulil acetat, terpinen-4-ol, 1,8-cineol, borneol, kamfor, mircen i β -ocimen gotovo uvek dominiraju bez obzira na primenjenu metodu ekstrakcije. Komparativne studije pokazuju da se kvalitativni profil etarskog ulja praktično ne menja primenom hidrodestilacije, ultrazvučno potpomognutih, mikrotalasnih ili kombinovanih tehnika, dok se kvantitativne razlike veoma jasno ispoljavaju u zavisnosti od metode izolacije (Danila i sar. 2018, Kozuharova i sar. 2023, Patil i Waghmare 2024). U skladu sa navodima iz literature, i u ovom istraživanju sve primenjene metode ekstrakcije proizvode etarsko ulje sa identičnim skupom glavnih jedinjenja, ali uz jasna pomeranja u relativnim sadržajima.

Poređenje profila etarskog ulja lavande pokazuje da klasična hidrodestilacija daje najuravnoteženiji hemijski sastav, sa visokim udelom oksidovanih monoterpena (~49%), umerenim sadržajem estara (~33%) i najvećim udelom oksidovanih seskviterpena (~6%), što je u skladu sa nalazima da niži intenzitet termičkog i mehaničkog stresa pogoduje njihovom očuvanju (Kozuharova i sar. 2023, Patil i Waghmare 2024). Nasuprot tome, napredne metode smanjuju sadržaj monoterpenskih ugljovodonika i oksidovanih seskviterpena, dok istovremeno povećavaju koncentraciju ključnih komponenti lavande: linalola, linalil acetata i lavandulil acetata – koje zajedno dostižu 66–74%.

Ultrazvučni pretretman u ovom radu dovodi do značajnog povećanja udela linalola (26,4% → 37,8), uz umereno povećanje linalil acetata i lavandulil acetata, što se poklapa sa dobro poznatim mehanizmima akustične kavitacije koja povećava permeabilnost sekretornih struktura i olakšava oslobađanje srednje isparljivih i polarnih frakcija (Chemat i sar. 2017). Istovremeno se beleži pad udela borneola, kariofilen-oksida i lavandulola, što je u skladu sa rezultatima o selektivnom oslobađanju ili degradaciji osetljivijih oksidovanih seskviterpena pod uticajem mikrostrujanja i lokalnih energetske efekata ultrazvuka (Chemat i sar. 2017).

Mikrotalasna hidrodestilacija pomera profil ka estrima, što potvrđuju i mehanističke studije o selektivnom volumetrijskom zagrevanju mikrotalasima. U ovom radu, porast snage mikrotalasa od 400 ka 600 W rezultuje povećanjem sadržaja linalil acetata (32,6% → 35,0%) i stabilnom, ali nešto nižom vrednošću sadržaja linalola. Takvo ponašanje je u skladu sa prethodnim uporednim studijama koje pokazuju da mikrotalasi efikasnije oslobađaju lako

isparljive estre u odnosu na konvencionalnu hidrodestilaciju (Chemat i Lucchesi 2006, Chemat i sar. 2012, Vian i sar. 2008).

Kombinacija ultrazvuka i mikrotalasa daje najizraženiji porast karakterističnih komponenti lavande, pri čemu zbir sadržaja linalola, linalil acetata i lavandulil acetata dostiže 73–74%. Ovakav sinergizam objašnjava se time što ultrazvuk pre tretmana značajno povećava poroznost i fragmentaciju tkiva, dok mikrotalasi obezbeđuju brzo i efikasno volumetrijsko zagrevanje, pa se volatilne komponente oslobađaju brže i u većem procentu (Chemat i sar. 2012, Vian i sar. 2008). Slična zapažanja navode se i u savremenim studijama koje analiziraju etarska ulja lavande ekstrahovana pod ekstremnim ili ubrzanim uslovima (Gedikoğlu i sar. 2024).

Opšta interpretacija pokazuje da izbor metode omogućava ciljanu modulaciju hemijskog profila etarskog ulja lavande. Konvencionalna hidrodestilacija daje najkompleksniji profil, bogat oksidovanim seskviterpenima i uravnotežen monoterpenski sastav. Ultrazvučna hidrodestilacija pomera profil ka linalol-dominantnom etarskom ulju, sa povećanim udelom oksidovanih monoterpena. Mikrotalasna hidrodestilacija favorizuje oslobađanje estara, proizvodeći etarsko ulje sa jasno izraženim estarskim karakterom. Kombinovani pristup ultrazvuka i mikrotalasa daje najkoncentrisaniji profil lavande, sa najvišim udelom linalola i njegovih estara i minimalnim sadržajem težih frakcija.

7.5.3 Uporedna analiza kinetičkih modela prema *MRPD*, *AICc* i R^2 za četiri ekstrakcione metode

Za sve metode ekstrakcije, statistički kriterijumi *MRPD*, *AICc* i R^2 dosledno ukazuju da je model I najprecizniji i najstabilniji kinetički model, sa najmanjim greškama, najnegativnijim *AICc* vrednostima i najvišim R^2 (tabela 7.25). Model II zauzima drugo mesto i posebno je pouzdan u intenziviranim režimima ekstrakcije, kao što su procesi potpomognuti ultrazvukom i mikrotalasima. Model IV pokazuje stabilno i dobro slaganje podataka u difuzionoj fazi procesa. Model III daje umerene rezultate, ali značajno slabi u uslovima visoke intenzifikacije. Model V je u svim slučajevima najslabiji. U celini, dvofazni mehanistički modeli (I i II) najuspešnije opisuju kinetiku izdvajanja etarskog ulja u širokom spektru tehnoloških uslova. Ovo potvrđuje i kompozitno rangiranje modela, kao što se vidi u tabeli 7.26.

Tabela 7.25 Uporedna analiza kinetičkih modela prema *MRPD*, *AICc* i R^2 za četiri ekstrakcione metode

Metoda ekstrakcije	Model	<i>MRPD</i> (opseg)	<i>AICc</i> (opseg)	R^2 (opseg)	Kratka ocena
HD	Model I	3–10%	–192.9 do –58.13	0.980–0.997	Najbolje slaganje, najviša tačnost
	Model II	5–15%	–164.70 do –70.23	0.970–0.990	Odličan, pouzdan
	Model IV	10–20%	–120.83 do –55.77	0.930–0.970	Dobar, fokusiran na difuziju
	Model III	10–25%	–118.62 do +6.35	0.950–0.980	Umeren, manje stabilan
	Model V	>20%	–150.13 do –61.99	<0.93	Najslabiji
Ultrazvučna HD	Model I	2.79–8.33%	–87.8 do –37.3	0.989–0.996	Najbolji, veoma visoka tačnost
	Model II	4.48–14.89%	–113.7 do –51.3	0.982–0.984	Odličan
	Model IV	5.04–14.36%	–111.0 do –54.0	0.965–0.982	Vrlo dobar
	Model III	5.05–21.52%	–95.5 do –51.3	0.959–0.982	Umeren
	Model V	10.75–23.44%	–88.95 do –33.6	0.922–0.946	Najslabiji
Mikrotalasna HD	Model I	2.14–6.93%	–116.2 do –41.8	0.981–0.997	Najbolji ukupno
	Model II	6.49–8.37%	–100.4 do –4.92	0.978–0.991	Odličan
	Model IV	6.50–8.04%	–104.3 do –10.5	0.977–0.991	Vrlo dobar
	Model III	13.05–65.98%	–62.9 do –7.20	0.789–0.963	Umeren
	Model V	19.81–64.17%	–42.6 do +2.97	0.523–0.864	Najslabiji
Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna HD	Model I	3.47–10.13%	–121.5 do –73.5	0.982–0.997	Najbolje performanse
	Model IV	8.34–43.56%	–85.1 do –46.6	0.933–0.983	Dobar
	Model II	16.76–48.86%	–80.0 do –39.79	0.928–0.983	Stabilan
	Model III	20.81–67.71%	–56.8 do –21.3	0.838–0.952	Umeren
	Model V	22.56–72.90%	–39.8 do –21.16	0.773–0.854	Najslabiji

Tabela 7.26 Kompozitno rangiranje kinetičkih modela kroz sve metode ekstrakcije

Model	HD	US-HD	MW-HD	US-MW-HD	Kompozitni rang (1–5)*	Konačna pozicija
Model I	1	1	1	1	1.0	Najbolji ukupno
Model II	2	2	2	3	2.25	Odličan ukupno
Model IV	3	3	3	2	2.75	Dobar i stabilan
Model III	4	4	4	4	4.0	Umeren
Model V	5	5	5	5	5.0	Najslabiji

* Srednja vrednost rangova

7.6 Karakterizacija etarskog ulja lavande dobijenog pri optimalnim uslovima

7.6.1 Fizičko-hemijske karakteristike etarskog ulja lavande

Etarsko ulje lavande dobijeno pod optimalnim uslovima je bleđožuta, bistra tečnost sa karakterističnim mirisom lavande, ima relativnu gustinu koja u okviru vrednosti propisanih standardom ISO 3515:2002, dok je indeks refrakcije niži za 0,55%. Literaturni podaci fizičko-hemijskih osobina etarskih ulja lavande dobijenih konvencionalnim i inovativnim metodama, prikazani su u Tabeli 7.27.

Tabela 7.27. Fizičko-hemijske karakteristike etarskog ulja lavande različitog porekla

Biljka, deo biljke, poreklo	Metoda ekstrakcije	Relativna gustina (20°C)	Indeks refrakcije (20°C)	Ugao rotacije (°)	Tačka paljenja (20°C)	Referenca
<i>L. angustifolia</i> , suvi cvetovi, Poljska	HD	-	1,4667	5,6	-	Smigielski i sar. 2009
<i>L. officinalis</i> L., cvetovi, Srbija	HD, voda	0,890	1,461	-	-	Stanojević i sar. 2011
	HD, VFHD+voda	0,896	1,465			
<i>L. angustifolia</i> Mill., sveži cvetovi, Srbija	SD	-	1,465 – 1,466	-	-	Kiprovski i sar. 2023
<i>L. angustifolia</i> , cvetovi, Rumunija	HD	0,88	1,449	-	76	Danila i sar. 2018
	MAHD	0,876	1,468		65	
<i>L. angustifolia</i> , mlevena biljka, Maroko	MAHD	0,893	1,456	-4	-	Lakhimi i sar. 2020
<i>L. angustifolia</i> , suvi cvetovi, Srbija	HD	0,893 ± 0,005	1,450	-	-	Ovaj rad
Standard		0,877–0,890	1,4580–1,4640	-11 do -7	74	ISO 3515:2002

Uočene su male varijacije u vrednostima gustine i indeksa refrakcije između etarskih ulja dobijenih primenom različitih tehnika hidrodestilacije, pri čemu većina uzoraka, uključujući i ulje dobijeno u ovom radu, neznatno odstupa od granica propisanih ISO standardom. Ova odstupanja su uglavnom minimalna i mogu se smatrati prihvatljivim, imajući u vidu prirodnu varijabilnost hemijskog sastava etarskih ulja. Razlike u fizičko-hemijskim karakteristikama najverovatnije su posledica geografskog porekla biljnog materijala, agroekoloških uslova uzgoja, faze razvoja biljke, kao i specifičnosti primenjene metode izolacije (Perović i sar. 2024).

7.6.2 Hemijski sastav etarskog ulja lavande

Hemijski sastav etarskog ulja lavande dobijenog pri optimalnim uslovima hidrodestilacije, utvrđenim postupkom optimizacije metode odzivnih površina, detaljno je prikazan u tabeli 7.28. Primer GC/MS hromatograma uzorka etarskog ulja lavande dobijenog pri optimalnim uslovima dat je u prilogu (Slika P7.7). Identifikovano je ukupno 47 jedinjenja, što čini 97,6% ukupnog etarskog ulja. Posebno, etarsko ulje karakteriše visok sadržaj oksigenisanih monoterpena, pri čemu su linalol (32,19%) i linalil acetat (18,29%) dominantni sastojci.

Tabela 7.28 Hemijski sastav etarskog ulja lavande i sastavi zahtevani međunarodnim standardima

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Ukupni sadržaj, %	Evropska farmakopeja*, %	ISO 3515:2002 <i>L. angustifolia</i> (drugo poreklo), %
α -Tujen	930	923,8	0,06 $\pm$ 0,01	-	-
α -Pinen	939	931	0,14 $\pm$ 0,04	-	-
Kamfen	946	946,3	0,12 $\pm$ 0,02	-	-
β -Pinen	974	975,5	0,05 $\pm$ 0,01	-	-
1-Octen-3-ol	974	982,2	0,15 $\pm$ 0,05	-	-
3-Octanon	979	984,5	0,55 $\pm$ 0,10	0,10–5,00	$\leq$ 3,00
Mircen	988	989	0,50 $\pm$ 0,09	-	-
Dehidroksi- <i>trans</i> -linalol oksid	991	991,9	0,20 $\pm$ 0,04	-	-
Butil butanoat	993	993,1	0,20 $\pm$ 0,03	-	-
Dehidroksi- <i>cis</i> -linalol oksid	1006	1007,3	tr	-	-
Hexil acetat	1007	1011	0,60 $\pm$ 0,07	-	-
α -Terpinen	1014	1016,1	tr	-	-
ρ -Cimen	1020	1021,9	tr	-	-
<i>o</i> -Cimen	1022	1025	0,29 $\pm$ 0,01	-	-
Limonen	1024	1030	0,28 $\pm$ 0,01	$\leq$ 1,00	$\leq$ 1,00
1,8-Cineol	1026	1030	1,44 $\pm$ 0,02	$\leq$ 2,50	$\leq$ 3,00
<i>cis</i> - β -Ocimen	1032	1035,5	0,88 $\pm$ 0,04	----	1,00–10,00
<i>trans</i> - β -Ocimen	1044	1046,1	0,47 $\pm$ 0,02	20,00–45,00	0,50–6,00
γ -Terpinen	1054	1057,5	0,12 $\pm$ 0,01	--	---
<i>cis</i> -Linalol oksid	1067	1073,8	2,13 $\pm$ 0,11	$\leq$ 1,20	20,00–43,00
<i>trans</i> -Linalol oksid	1084	1090,1	1,68 $\pm$ 0,18	-	--
Linalol	1095	1107,2	32,19 $\pm$ 0,29	$\leq$ 0,10	$\leq$ 1,50
1-Octen-3-il acetat	1110	1110,6	3,19 $\pm$ 0,10	-	-
3-Octanol acetat	1120	1121,6	tr		$\leq$ 0,30
Kamfor	1141	1145	0,68 $\pm$ 0,11		-
Nerol oksid	1154	1154,5	0,14 $\pm$ 0,00		
Lavandulol	1157	1170	1,38 $\pm$ 0,01		
Borneol	1165	1172,1	3,19 $\pm$ 0,07		

Nastavak **tabele 7.28**

Jedinjenje	RI ^{lit}	RI ^{exp}	Ukupni sadržaj, %	Evropska farmakopeja*, %	ISO 3515:2002 <i>L. angustifolia</i> (drugo poreklo), %	
Terpinen-4-ol	1174	1182,1	4,22 ± 0,08	0,10–8,00	≤ 8,00	
Kripton	1183	1189,3	1,88 ± 0,02	-	-	
α-Terpineol	1186	1197,8	3,17 ± 0,06	≤ 2,00	≤ 2,00	
Verbenon	1204	1211,5	0,28 ± 0,03	---	---	
Askaridol	1234	1231,5	0,59 ± 0,03	25,00–47,00	25,00–47,00	
Kumin aldehid	1238	1243,4	0,32 ± 0,12	--	--	
Linalil acetat	1254	1255,5	18,29 ± 0,33	≤ 0,20	≤ 8,00	
Geraniol	1249	1258,1	2,43 ± 0,24	----	----	
ρ-Ment-1-en-7-al	1273	1277,1	0,24 ± 0,11	-	-	
Lavandulil acetat	1288	1289,1	6,56 ± 0,21			
α-Terpinil acetat	1346	1350,5	0,18 ± 0,06			
Citronelil acetat	1350	1354,1	0,20 ± 0,01			
Neril acetat	1359	1362,7	0,73 ± 0,14			
Geranil acetat	1379	1381,7	1,68 ± 0,22			
(E)-Kariofilen	1417	1418,3	1,92 ± 0,15			
	(E)-β-Farnezen		1440	1454,4	0,69 ± 0,24	-
	- Lavandulil 2-metil		1511	1520,9	0,21 ± 0,03	-
butanoat						-
Kariofilen oksid	1582	1583,5	3,35 ± 0,36	-	-	

* European Pharmacopoeia 10.0; RI^{lit} – Linearni retencioni indeksi dostupni u literaturi (Adams, 2007); RI^{exp} – Linearni retencioni indeksi određeni eksperimentalno pomoću homologe serije *n*-alkana (C₈–C₂₀) na HP-5MS koloni. Sve komponente su identifikovane poređenjem retencionih indeksa i masenih spektara; tr – komponenta prisutna u tragovima (<0,05%).

Rezultati dobijeni u ovoj studiji, u pogledu najzastupljenijih komponenti, u skladu su sa etarskim uljima lavande poreklom iz Kine (Liu i sar. 2018, Rashed i sar. 2017), Francuske (Filli i sar. 2014, Périno-Issartier i sar. 2013), Poljske (Adaszynska-Skwirzynska i sar. 2018), Češke (Duškova i sar. 2016) ili Sjedinjenih Država (Renaud i sar. 2001). Linalol i linalil acetat su identifikovani kao glavne komponente etarskog ulja lavande u brojnim publikacijama (Aprotosoia i sar. 2017, Da Porto i sar. 2009, Lesage-Meessen i sar. 2015, Perović i sar. 2024). Treće najzastupljenije isparljivo jedinjenje je lavandulil acetat (6,56%), koji je takođe prisutan u umerenom nivou u etarskim uljima lavande iz Francuske (Filli i sar. 2016) i Australije (Shellie i sar. 2002). Međutim, postoji značajan broj uzoraka etarskog ulja lavande sa suštinski različitim sastavima, koji su klasifikovani prema svojim dominantnim komponentama kao 1,8-cineol/kamfor hemotip (Gonzalez-Rivera i sar. 2016), fenon/kamfor hemotip (El Omari i sar. 2023), 1,8-cineol ili karvakrol hemotip (Aprotosoia i sar. 2017, Mostefa i sar. 2014). Ove varijacije u sastavu etarskog ulja mogu se pripisati faktorima kao što su klima, nadmorska visina, uslovi zemljišta, sorta, specifični deo biljke koji se koristi, tehnologija nakon žetve i metod

ekstrakcije, što potvrđuju brojna istraživanja (Détár i sar. 2020, Duškova i sar. 2016, Da Porto i sar. 2009, Perović i sar. 2021, 2024, Shellie i sar. 2002).

Zbog visoke koncentracije linalola i linalil acetata, komponenti poznatih po svom specifičnom cvetnom mirisu, rezultati pokazuju da je etarsko ulje lavande dobijeno u ovoj studiji, po kvalitetu i sastavu, pogodno za upotrebu u prehrambenoj i kozmetičkoj industriji (Aprotosoia i sar. 2017). Međutim, u poređenju sa međunarodnim standardima dobijeno etarsko ulje u ovoj studiji nije zadovoljilo zahteve standarda ISO 3515:2002 i Evropske farmakopeje (European Pharmacopoeia 10.0) za sadržaj linalil acetata (min. 25%). Sa sličnim problemom su se susreli (Pokajewicz i sar. 2021), koji su analizirali etarsko ulje iz 13 različitih sorti *L. angustifolia* ubranih u tri različite godine i otkrili značajne varijacije u sastavu i usklađenosti sa međunarodnim standardima. Naveli su sadržaj linalola u rasponu od 11,4% do 46,7%, linalil acetata od 7,4% do 44,2% i α -terpineola od 0,5% do 4,5%, što ukazuje da je u većini uzoraka sastav odstupio od standarda propisanih međunarodnim propisima. Ovakva odstupanja su ranije zabeležena (Beale i sar. 2017, Najar i sar. 2022, Smigielski i sar. 2018) i potencijalno se mogu rešiti standardizacijom metoda ispitivanja i usaglašavanjem navedenih vrednosti između propisa ISO i Farmakopeje. Znajući da ovi standardi regulišu samo nekoliko komponenti, neophodno je uključiti procenu neregulisanih jedinjenja, jer ona često doprinose jedinstvenom karakteru i kvalitetu etarskog ulja. To bi pomoglo očuvanju kompleksnosti, kvaliteta i autentičnosti etarskih ulja lavande, čak i kada se njihov sastav razlikuje od važećih propisa.

7.6.3 Antioksidativna aktivnost određena DPPH metodom

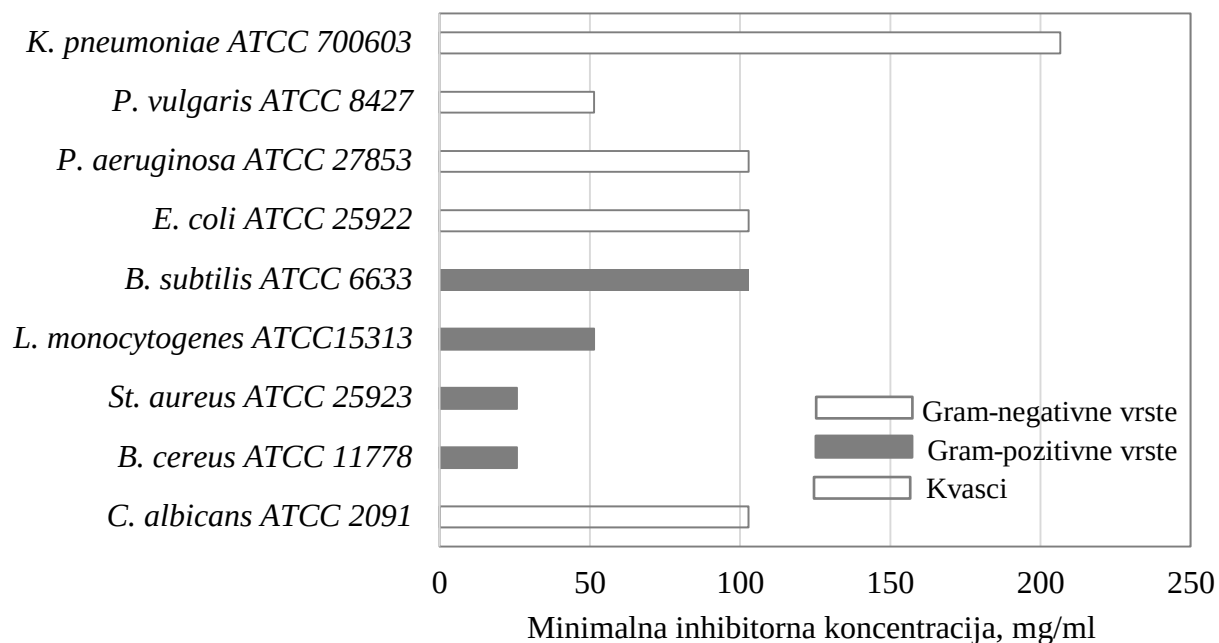
Antioksidativni kapacitet etarskog ulja lavande dobijenog pri predloženim optimalnim uslovima hidrodestilacije, analiziran je na bazi sposobnosti neutralisanja DPPH radikala. Koncentracija etarskog ulja potrebna za neutralizaciju 50% DPPH radikala (EC_{50}) za analizirano ulje bila je $10,13 \pm 0,11$ mg/ml. Ova vrednost je značajno viša od vrednosti standardnog antioksidansa butilovanog hidroksitoluena, koji je iznosio 88,8 μ g/ml, što ukazuje na znatno slabiji antioksidativni potencijal u poređenju sa referentnim standardom. U poređenju sa podacima iz literature, EC_{50} vrednost od $12,1 \pm 2,16$ mg/ml koja je određena od strane Chen i saradnika (2023), uočava se da postoji uporediva antioksidativna aktivnost sa nalazima u ovom radu. Nasuprot tome, Da Silva i saradnici (2015) su otkrili da je neophodna mnogo veća koncentracija etarskog ulja lavande (51,05 mg/ml) za inhibiciju 50% slobodnih radikala. Iako je

ovo etarsko ulje sadržalo slične koncentracije glavnih komponenti, etarsko ulje u toj studiji je pokazalo značajno višu vrednost EC_{50} , naglašavajući važnost sinergističkih efekata jedinjenja prisutnih u nižim koncentracijama na ukupnu biološku aktivnost etarskog ulja. Za šest različitih sorti *Lavandula angustifolia* Mill. iz Turske, vrednosti EC_{50} za neutralizaciju DPPH radikala kretale su se od 91,56 do 105,08 $\mu\text{g/ml}$, u poređenju sa 16,48 $\mu\text{g/ml}$ za tokoferol, što ukazuje na visoku antioksidativnu aktivnost, ali ipak znatno slabiju u odnosu na referentni standard (Kıvrak 2018). Iako su ova etarska ulja bila istog hemotipa i imala sličan sadržaj linalola kao etarsko ulje u ovom radu, sadržala su značajno veću količinu linalil acetata. Slično uzorcima iz Hrvatske, etarsko ulje iz Italije pokazalo je najveću antioksidativnu aktivnost, sa EC_{50} vrednošću od $7,75 \pm 0,10 \mu\text{g/ml}$. Poređenja radi, u istom istraživanju, Troloks, standardni antioksidant, imao je EC_{50} vrednost od $3,30 \pm 0,10 \mu\text{g/ml}$, što potvrđuje da ovo etarsko ulje poseduje izuzetan antioksidativni potencijal (Garzoli i sar. 2021). Ovo ulje je takođe pripadalo istom hemotipu kao i etarsko ulje analizirano u ovom radu, ali je njegov sadržaj linalola bio znatno veći. S obzirom na sve navedene faktore, razlike u hemijskom sastavu i koncentraciji glavnih komponenti mogu objasniti značajnu razliku u antioksidativnoj aktivnosti.

7.6.4 Antimikrobna aktivnost

Rezultati za antimikrobnu aktivnost etarskog ulja lavande protiv različitih mikroorganizama dati su na slici 7.24. Generalno, MIC su se kretale od 25,7 do 206,6 mg/ml , što je u skladu sa prethodno pokazanom umerenom antimikrobnom aktivnošću etarskog ulja lavande (Moussa i sar. 2023). Rezultati pokazuju da je najbolja antimikrobna aktivnost uočena protiv gram-pozitivnih sojeva *B. cereus* i *S. Aureus*, što je potvrđeno i literaturnim podacima (Martucci i sar. 2015, Najar i sar. 2022, Nazzaro i sar. 2013). Ovo se može objasniti jednostavnom strukturom ćelijskog zida gram-pozitivnih bakterija, koja omogućava etarskim uljima ili njihovim sastojcima da lakše prodiru i izazovu promene u ćelijskoj strukturi ili funkciji.

Nasuprot tome, gram-negativne bakterije imaju dodatnu zaštitnu spoljašnju membranu sastavljenu od hidrofилnih polisaharida koji ih čine otpornijima (Nazzaro i sar. 2013). Utvrđeno je da je gram-negativni soj *K. pneumoniae* najotporniji na ispitivano etarsko ulje lavande, sa najvećom MIC vrednošću.



Slika 7.24 Minimalne inhibitorne koncentracije etarskog ulja lavande na rast mikroorganizama

Prema prethodno dokumentovanoj antifungalnoj aktivnosti linalola, kao i rezultatima Moussa i saradnika (2023), koji je pokazao da etarsko ulje lavande ima antimikrobno dejstvo protiv kliničkih sojeva *C. albicans*, očekivana je umerena aktivnost etarskog ulja protiv ovog kvasca dobijenog u ovoj studiji. Ipak, etarsko ulje lavande iz Hrvatske pokazalo je jaku antibakterijsku aktivnost u koncentracijama $\leq 1,0$ mg/ml protiv različitih bakterija, uključujući ključne patogene poput *E. coli*, *L. monocitogenes*, *P. aeruginosa*, *S. enteritidis* i *S. piogenes*. Iako je isti autor utvrdio da su za inhibiciju *B. cereus*, *E. faecalis* i *I. enterocolitica* potrebne koncentracije veće od dvostruke (2,0–2,5 mg/ml) (Blažeković i sar. 2018), ove vrednosti su i dalje značajno niže u poređenju sa rezultatima za etarsko ulje dobijeno u ovom radu. Prema istraživanju etarskog ulja lavande iz Maroka, jaka antimikrobna aktivnost sa vrednostima MIC u rasponu od 0,511 do 1,23 mg/ml zabeležena je za *B. subtilis*, *E. coli*, *P. aeruginosa* i *St. aureus*. Ovako značajno bolja antimikrobna aktivnost prema ovim mikroorganizmima, u poređenju sa uljem dobijenim u ovom radu, može se objasniti većim sadržajem karvakrola u marokanskom ulju (preko 10%) ili prisustvom drugih jedinjenja u manjim koncentracijama (Lahkimi i sar. 2020).

Prema literaturi, na antimikrobnu aktivnost etarskih ulja u velikoj meri utiče njihov sastav, uglavnom sadržaj terpena i fenolnih jedinjenja (Kalemba i Kunicka 2003). Pored toga,

dokazano je da jedinjenja prisutna u nižim koncentracijama mogu značajno poboljšati antimikrobno dejstvo kroz sinergističke efekte, dok u pojedinim slučajevima mogu ispoljiti i antagonistički efekat, smanjujući ukupno antimikrobno dejstvo (Bassolé i Juliani 2012). Iako je etarsko ulje lavande bogato terpenskim jedinjenjima, posebno linalolom i linalil acetatom, oba poznata po svojoj izuzetnoj antimikrobnoj aktivnosti protiv širokog spektra mikroorganizama (Danh i sar. 2012), umereni antimikrobni efekti uočeni u ovom istraživanju mogu potencijalno biti objašnjeni antagonističkim efektom nekih jedinjenja prisutnih u manjim koncentracijama. Takođe, na rezultate antimikrobne aktivnosti mogu uticati faktori kao što su vrsta ili soj mikroorganizama, zapremina inokuluma, faza rasta, vreme inkubacije, temperatura, medijum ili drugi uslovi, što može otežati poređenje sa podacima iz literature (Blažeković i sar. 2018).

7.7 Primena etarskog ulja lavande u alginatnim premazima za produženje roka trajanja sveže sečene jabuke

Etarsko ulje lavande dobijeno pod optimalnim uslovima i VFHD su, u različitim koncentracijama, dodavani u alginatne premaze kojim je tretirana sečena jabuka, a zatim su praćeni parametri: promena boje, gubitak mase, pH vrednost, titraciona kiselost, sadržaj malondialdehida, mikrobiološka stabilnost i senzorne karakteristike. Navedene analize vršene su u cilju ispitivanja efekta primene etarskog ulja lavande u alginatnim premazima na očuvanje kvaliteta i produženje roka trajanja minimalno prerađenog voća, konkretno sveže sečene jabuke.

7.7.1 Fizičko-hemijske karakteristike sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom skladištenja

Tokom čuvanja i skladištenja, voće gubi vlagu većinski usled transpiracije (90%) i respiracije, procesa koji imaju ključnu ulogu u smanjenju mase, dok istovremeno uslovljavaju i promene u izgledu, teksturi, kvalitetu i nutritivnim svojstvima (Link i sar. 2004, Özdemir i Gökmen 2019). Navedeni procesi izraženiji su kod minimalno prerađenog voća, kao što su sećeni ili oljušteni plodovi, usled narušavanja integriteta ćelijskih struktura, povećane površine izložene isparavanju i mikrobiološkoj kontaminaciji, različitih enzimskih reakcija, što ih čini podložnijim drugim fiziološkim poremećajima kao što su smanjenje čvrstine, ubrzavanje

površinskog propadanja i deformacija proizvoda (Wills i Golding 2015). Ove nepoželjne promene mogu biti ublažene primenom jestivih premaza i filmova, koji istovremeno doprinose očuvanju kvaliteta i produženju roka trajanja proizvoda (Yadav i sar. 2024, Yousuf i sar. 2021).

7.7.1.1 ubitak mase sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Promena mase uzoraka sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima sa dodatkom etarskog ulja lavande (0,1% i 0,2%) i VFHD (25% i 50%) tokom 14 dana skladištenja na +4 °C prikazana je u tabeli 7.29. Tokom perioda skladištenja u trajanju od 14 dana kod svih uzoraka sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima je došlo do gubitka mase (do $1,37 \pm 0,05\%$), dok je gubitak mase kod kontrolnog uzorka bio skoro 6%.

Tabela 7.29 Gubitak mase (%) sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Vreme skladištenja, dan				
	1	3	7	10	14
Kontrola	$0,47^{aC} \pm 0,09$	$2,14^{bB} \pm 0,20$	$2,50^{bB} \pm 0,13$	$5,19^{cB} \pm 0,06$	$5,98^{dB} \pm 0,01$
Alginatni premaz	$0,14^{aB} \pm 0,01$	$0,44^{bA} \pm 0,11$	$0,8^{7cA} \pm 0,02$	$1,36^{dA} \pm 0,10$	$1,16^{dA} \pm 0,18$
0,1% LEO	$0,17^{aB} \pm 0,01$	$0,35^{bA} \pm 0,06$	$0,78^{cA} \pm 0,06$	$1,10^{dA} \pm 0,05$	$1,26^{dA} \pm 0,04$
0,2% LEO	$0,16^{aB} \pm 0,02$	$0,35^{bA} \pm 0,17$	$0,78^{cA} \pm 0,17$	$1,17^{dA} \pm 0,21$	$1,3^{4dA} \pm 0,05$
25% VFHD	$0,11^{aA} \pm 0,03$	$0,33^{bA} \pm 0,00$	$0,80^{cA} \pm 0,16$	$1,16^{dA} \pm 0,05$	$1,30^{dA} \pm 0,02$
50% VFHD	$0,10^{aA} \pm 0,02$	$0,30^{bA} \pm 0,07$	$0,84^{cA} \pm 0,02$	$1,29^{dA} \pm 0,37$	$1,37^{dA} \pm 0,05$

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja $\pm$ standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO - sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD - sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD - sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

Nakon prvog dana uočeno je da su uzorci tretirani premazima sa dodatkom VFHD, nezavisno od njene koncentracije, imali statistički značajno manji gubitak mase. Rezultati se mogu delimično objasniti visokim sadržajem VFHD u premazu, čije polisaharidne komponente verovatno doprinose formiranju nešto efikasnije barijere na površini ploda na početku čuvanja, smanjujući tako gubitak mase. Obzirom da gubitak mase može biti i posledica oksidacionih procesa (Yousuf i sar. 2019), prisustvo bioaktivnih jedinjenja u VFHD sa potencijalno dobrim antioksidativnim osobinama može dodatno doprineti očuvanju mase na početku. Visok sadržaj vodorastvornih pektinskih polisaharida i bioaktivnih materija u otpadnom materijalu koji se

dobija nakon destilacije etarskog ulja lavande dobro je dokumentovan u literaturi (Marovska i sar. 2022a, 2022b), a za očekivati je da ova jedinjenja budu prisutna u VFHD i da dodavanjem u premaz donekle mogu uticati na karakteristike alginatnih premaza. Nakon trećeg dana, nije bilo značajnih razlika u gubitku mase među uzorcima tretiranim alginatnim premazima, niti u ukupnom gubitku mase tokom 14 dana. Istovremeno, kontrolni uzorak je imao i do pet puta veći ukupni gubitak mase tokom 14 dana u odnosu na rezultate zabeležene kod uzoraka sa alginatnim premazima, nezavisno od dodatka etarskog ulja, VFHD ili primene samog alginatnog premaza bez dodataka. Ovaj rezultat pokazuje da alginatni premaz funkcioniše kao efikasna barijera protiv isparavanja i smanjuje gubitak mase. Dobijeni rezultati su u skladu sa ranije objavljenim koji pokazuju da alginatni i drugi polisaharidni premazi smanjuju gubitak mase i time produžavaju rok trajanja i svežinu sečenog voća stvaranjem barijere za prolaz vodene pare i modifikovanjem mikrookoline na površini komada voća. Uočeno je do sada da je gubitak mase sveže sečenih jabuka pri skladištenju na nižim temperaturama i bez premaza oko 5–8% tokom 10–14 dana, dok se dodatkom alginatnih premaza sa dodatkom etarskih ulja cimeta, karanfilića ili limunske trave, gubitak mase smanjuje na $\leq 2\%$ tokom istog perioda skladištenja (Raybaudi-Massilia i sar. 2008, Chiabrando i Giacalone 2015). Prema Yousuf i saradnicima (2021) etarska ulja deluju kao hidrofobni deo emulzionih premaza i pružaju zaštitu od gubitka vlage koji se dešava kroz hidrofilni deo premaza, pri čemu odnos hidrofilnog i hidrofobnog dela, odnosno koncentracija etarskog ulja u premazu ima ključnu ulogu u propustljivosti vodene pare. Međutim, gubitak mase kod sečenih fudži jabuka skladištenih na $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ tokom 14 dana tretiranih alginatnim premazima sa dodatkom 0,1% i 1% etarskog ulja limunske trave u formi nanodisperzije se nije međusobno razlikovao (Cofelice i sar. 2019). Ovi rezultati, kao i rezultati dobijeni u ovom radu ukazuju da male razlike u koncentraciji etarskog ulja u premazu nemaju velikog uticaja na propustljivost vodene pare, karakteristike i efikasnost premaza u smislu smanjenja gubitka mase.

U radu Cofelice i saradnika (2019) nakon 14 dana skladištenja sečenih jabuka nije više bilo statistički značajnih razlika u gubitku mase između tretiranih i netretiranih uzoraka koji se kretao u granicama od 15% do 20%, što nije u skladu sa našim rezultatima gde je pokazano da postoji značajna razlika i da je procenat gubitka mase bio ne veći od 6%. Sa druge strane, veći gubitak mase kontrolnog uzorka tokom 15 dana skladištenja sečenih jabuka u odnosu na uzorke tretirane sa tri različita bioaktivna premaza kombinovana sa etarskim uljem cimeta ranije je već uočen kod sorte jabuka zlatni delišes, s razlikom da je u odnosu na rezultate iz ovog rada gubitak

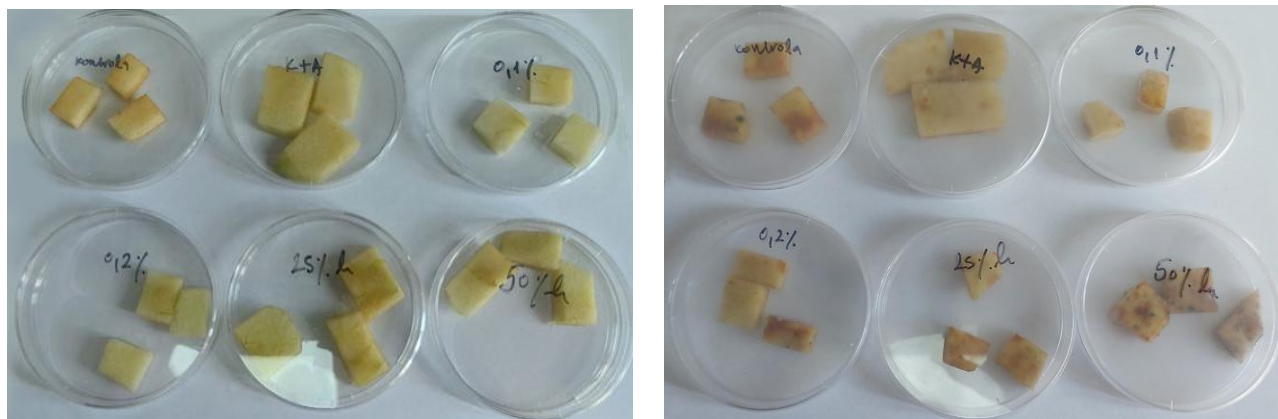
u masi bio u zavisnosti od tretmana u granicama od 50% do 80% (Solís-Contreras i sar. 2021). Analizom efikasnosti primene alginatnih premaza na sečenu jabuku sorte gala uočeno je, takođe, da je gubitak mase bio manji kod uzoraka tretiranih premazima u poređenju sa kontrolom, iako se procenat ukupnog gubitka mase tokom skladištenja kretao u opsegu od 15% do 30%. Ovako velike razlike u efikasnosti alginatnih premaza u smanjenju gubitka mase tokom skladištenja sa rezultatima dobijenim u ovom radu mogu se delimično objasniti fiziološkim karakteristikama sorti jabuka (Ding i sar. 2024). Granny Smith pokazuje drugačiju dinamiku omekšavanja i nižu čvrstinu tkiva u poređenju sa fudži sortom i nekim drugim sortama (Saftner i sar. 2005), što može omogućiti bolju interakciju i dublje prodiranje premaza u površinske slojeve, pa i potencijalno efikasniju zaštitu. Sem toga, značajne razlike u rezultatima mogu biti objašnjene varijacijama uslova eksperimenta, kao što su inicijalni kvalitet plodova, oblik i veličina komada sečene jabuke, koncentracija i homogenost nanošenja premaza, način čuvanja tokom skladištenja, kao i razlike u temperaturi i relativnoj vlažnosti tokom skladištenja.

7.7.1.2 Promena boje sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Vizuelni parametri, izgled i boja voća, su važni kriterijumi kvaliteta koji direktno utiču na percepciju kvaliteta kod potrošača i predstavljaju kritičan parametar koji može učiniti proizvod neprihvatljivim. Boja voća se menja tokom skladištenja, a posebno kada se radi o sečenom voću. Potamnjivanje voća može nastati kao rezultat enzimskih i neenzimskih reakcija, koje se u oba slučaja višestruko ubrzavaju ako se voće seče (Yousuf i sar. 2021). Kombinacija jestivog premaza i etarskog ulja može imati značajnu ulogu u usporavanju ili odlaganju promene boje sveže sečenog voća, što je povezano sa formiranjem fizičke barijere i usporavanjem respiracije, smanjenjem akumulacije etilena, stvaranjem uslova sa niskim sadržajem O_2 i visokim sadržajem CO_2 i modulacijom aktivnosti enzima odgovornih za potamnjivanje (Horison i sar. 2022).

Parametri boje (L^* , a^* i b^*) mogu biti dobar pokazatelj promene boje tokom skladištenja voća, pri čemu zavise od vrste voća koja se posmatra, uslova skladištenja, prethodne obrade, koncentracije i vrste enzima i fenolnih supstanci, dostupnosti kiseonika i pH vrednosti sredine (Chiabrando i Giacalone 2015). Promena parametara boje sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima sa dodatkom etarskog ulja lavande (0,1% i 0,2%) i VFHD (25% i 50%) tokom 14 dana skladištenja na +4 °C data je u tabeli P7.8 u prilogu. Na slici 7.25 moguće je vizuelno uočiti

razlike u boji među uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima nakon trećeg i četrnaestog dana skladištenja.



a)

Slika 7.25 Izgled sečenih jabuka sa alginatnim premazima sa 0,1%, odnosno 0,2% etarskog ulja lavande i 25% odnosno 50% VFHD, kao i kontrolnog uzorka i uzorka samo sa alginatnim premazom (k+a) tokom skladištenja: a) nakon 3 dana i b) nakon 14 dana

Sa slike 7.25 koja ilustruje stanje svežih sečenih jabuka sa alginatnim premazima nakon 3. i 14. dana skladištenja se uočava da dolazi do potamnjenja presečene površine, što dodatno potvrđuje povećanje kolorimetrijskih vrednosti a^* i b^* i smanjenje L^* tokom skladištenja (tabela P7.8 u Prilogu). Ovakve promene vrednosti parametara boje već su dokumentovane tokom čuvanja sveže sečenih jabuka sorti zlatni delišes i fudži (Chiabrando i Giacalone 2015, Pérez-Gago i sar. 2006, Rojas-Graü i sar. 2008). Tamnjenje sečenog voća uglavnom nastaje usled izloženosti kiseoniku i reakcije fenolnih jedinjenja prirodno prisutnih u biljnom tkivu, kao i dejstva oksidativnih enzima poput polifenoloksidaze i peroksidaze, što dovodi do stvaranja tamnih pigmenata. Primena alginatnih jestivih premaza može usporiti ovaj proces, jer se formiranjem fizičke barijere na površini sečenog ploda ograničava kontakt fenolnih jedinjenja sa kiseonikom i enzimima, čime se smanjuje aktivnost polifenoloksidaze i peroksidaze, ključnih enzima u procesu potamnjenja, usporava oksidacija i nastajanje tamnih pigmenata (Olivas i Barbosa-Cánovas 2005, Raybaudi-Massilia i sar. 2008, Tilley i sar. 2023).

Nakon nanošenja alginatnih premaza sa dodatkom etarskog ulja lavande (0,1% i 0,2%) i VFHD (25% i 50%), već u početnom trenutku (dan 0) uočava se razlika u vrednosti parametra L^* , pri čemu najnižu vrednost pokazuje uzorak tretiran alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Ovakav rezultat je očekivan, s obzirom na to da sama VFHD poseduje obojenost koja

uzrokuje promenu boje premaza i nepovoljno utiče na boju preseka voća uslovljavajući smanjenje sjajnosti i svetline površine sečene jabuke. Tokom vremena, primetan je trend opadanja L^* vrednosti kod svih uzoraka, pri čemu je najveća vrednost zabeležena kod uzorka tretiranog premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande. U dostupnoj literaturi (Chiabrando i Giacalone 2015) uočeno je da uticaj dodatka etarskih ulja u alginatni premaz na parametar L^* kod sveže sečene jabuke zavisi od vrste etarskog ulja. Tako, primena etarskog ulja ruzmarina u koncentraciji od 0,3% u alginatnom premazu dovodi do očuvanja većih L^* vrednosti u odnosu na kontrolu, ukazujući na zaštitni efekat protiv površinskog tamnjenja. Nasuprot tome, etarsko ulje cimeta u istoj koncentraciji nije pokazalo značajnu razliku u L^* parametru u poređenju sa netretiranim uzorcima. Rojas-Graü i saradnici (2007a) uočili su da L^* vrednosti sveže sečenih jabuka sorte fudži ostaju stabilne tokom prve dve nedelje skladištenja kod uzoraka tretiranih alginatnim premazima sa dodatkom etarskog ulja limunske trave (1,0% m/m) ili vanilina (0,6% m/m). S druge strane, Raybaudi-Massilia i saradnici (2008) pokazali su da se kod iste sorte jabuka, primenom alginatnih premaza obogaćenih etarskim uljima kore cimeta, karanfilića ili limunske trave u koncentracijama 0,3% i 0,7%, L^* vrednost može uspešno održavati konstantom tokom tri nedelje skladištenja. Ovi rezultati potvrđuju da efekat etarskih ulja zavisi od hemijskog sastava ulja i njegove interakcije sa komponentama premaza i jedinjenjima prisutnim u sečenom voću. Vrednosti parametara a^* i b^* , iako variraju tokom skladištenja, generalno pokazuju tendenciju porasta, pri čemu su vrednosti kod uzoraka tretiranih alginatnim premazima, sa ili bez dodataka etarskog ulja, i dalje nešto niže u odnosu na kontrolu ukazujući na bolju stabilnost boje i manje potamnjivanje. Istovremeno, vrednosti a^* i b^* kod uzoraka tretiranih premazima na bazi alginata sa dodatkom etarskog ulja lavande su niže u odnosu na kontrolu, što ukazuje da prisustvo komponenata etarskog ulja lavande (linalol, linalil acetat) doprinosi očuvanju boje sečene jabuke. Uzorci tretirani alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD imaju parametre boje koji ukazuju na najveće potamnjivanje, što može biti posledica obojenosti premaza koja potiče od visokog učešća VFHD, ali i prisustva fenolnih jedinjenja koja sama mogu služiti kao supstrat za polifenoloksidazu. U svojim istraživanjima Salvia-Trujillo i saradnici (2015) sugerišu da jestivi premazi sa dodatkom etarskih ulja mogu izazvati potamnjivanje površine sečenog voća, jer fenoli prisutni u etarskim uljima mogu biti učesnici u reakcijama oksidacije. Ovo se može odnositi i na fenolna jedinjenja prisutna u VFHD. Sem toga, Raybaudi-Massilia i saradnici (2008) navode da pri većim koncentracijama etarskog ulja u jestivim premazima može doći do oštećenja integriteta ćelijskog tkiva, što dalje uzrokuje

oslobađanje enzima i supstrata koji međusobno reaguju i stvaraju obojena jedinjenja. Ovakvi navodi upućuju na zaključak da je optimizacija količine etarskog ulja u premazima od ključnog značaja, jer prevelika koncentracija može potencijalno imati negativan uticaj na boju tretiranih proizvoda, dok adekvatna količina omogućava antimikrobni i antioksidativni efekat sastojaka ulja bez izazivanja neželjenog tamnjenja.

Iako svaki od praćenih hromatskih faktora ima svoje značenje i mogu se uočiti trendovi u promenama pojedinačnih vrednosti, jedinstvena kombinacija ovih parametara u trodimenzionalnom prostoru definiše percepciju boje. Zbog toga se promene boje ne mogu u potpunosti oceniti samo posmatranjem pojedinačnih vrednosti L^* , a^* i b^* , te se za precizniju kvantifikaciju koristi indeks potamnjenja (BI), koji uzima u obzir istovremeno promene svih parametara boje i omogućava objektivniju i precizniju procenu ukupne promene boje tokom skladištenja (Olivas i Barbosa-Cánovas 2005). Tabela 7.30 pokazuje tipičan porast indeksa potamnjenja tokom skladištenja. Kod kontrole, indeks potamnjenja se tokom skladištenja značajno povećava, od 54,5 (dan 0) do 92,7 (dan 14).

Tabela 7.30 Indeks potamnjenja (BI) sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Vreme skladištenja, dan						
	0	2	5	7	9	12	14
Kontrola	54,51 ^{aC} ±4,86	63,69 ^{bBC} ±1,07	65,73 ^{bC} ±1,39	71,55 ^{bCB} ±3,80	86,42 ^{cdB} ±0,20	91,16 ^{dC} ±13,18	92,74 ^{dC} ±1,26
Alginatni premaz	28,57 ^{aB} ±3,07	47,74 ^{bAB} ±5,41	60,08 ^{bBC} ±3,15	62,50 ^{bCB} ±4,56	68,9 ^{4cA} ±10,33	71,66 ^{cB} ±2,42	74,04 ^{cB} ±8,34
0,1% LEO	25,54 ^{bA} ±4,35	39,59 ^{bA} ±5,60	45,17 ^{bCA} ±3,81	55,9 ^{7bA} ±5,87	62,42 ^{cA} ±3,62	62,51 ^{cA} ±4,74	62,83 ^{cA} ±13,47
0,2% LEO	27,12 ^{aA} ±3,38	39,09 ^{bA} ±6,82	50,66 ^{cAB} ±2,55	56,10 ^{cA} ±5,74	62,28 ^{cA} ±5,21	61,05 ^{cA} ±15,79	63,4 ^{2cA} ±0,76
25% VFHD	30,65 ^{aB} ±0,52	52,9 ^{3bBC} ±1,64	59,92 ^{bBC} ±8,63	65,20 ^{cAB} ±2,04	61,56 ^{bCA} ±14,81	67,75 ^{cAB} ±0,00	73,95 ^{dB} ±2,99
50% VFHD	36,57 ^{aB} ±2,49	53,49 ^{bBC} ±2,91	64,31 ^{cBC} ±7,96	72,06 ^{cdB} ±10,54	83,10 ^{deB} ±7,99	87,36 ^{deC} ±3,96	96,98 ^{eC} ±7,37

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja ± standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

Na osnovu rezultata može se uočiti da primena alginatnih premaza na sveže sečene jabuke, bez obzira na dodatak etarskog ulja ili VFHD, prva dva dana uslovljava znatno niže vrednosti indeksa potamnjenja u poređenju sa kontrolom (od 20 do 50%). Nakon tog perioda, alginatni premazi sa dodatkom etarskog ulja imaju u proseku oko 30% niže vrednosti indeksa potamnjenja u odnosu na kontrolu, dok se kod uzorka sa dodatkom 50% VFHD ubrzano

povećava indeks potamnjenja i izjednačava sa kontrolom već nakon drugog dana skladištenja. Ovo se može objasniti time što sama VFHD poseduje određeni stepen prirodne obojenosti, koja utiče na povećanje izračunate vrednosti indeksa potamnjenja. Pored toga, VFHD sadrži značajno veći udeo polisaharidnih jedinjenja, koja, uprkos antioksidativnim i antibakterijskim efektima prisutnih bioaktivnih jedinjenja, mogu obezbediti pogodne uslove za razvoj mikroorganizama. Nakon 12 dana skladištenja uočava se površinski rast mikrobnih kolonija samo kod ovog uzorka, što dodatno doprinosi promeni boje sečene jabuke.

Nakon 14 dana skladištenja na +4 °C indeks potamnjenja sečene jabuke sa premazom sa dodatkom etarskog ulja lavande bio je skoro identičan onom koji je imao kontrolni uzorak bez premaza nakon samo 2 dana skladištenja. Ovakvi, rezultati pokazuju da se etarsko ulje lavande i u malim koncentracijama (0,1–0,2%) u alginatnim jestivim premazima može smatrati potencijalno dobrim i efikasnim sredstvom protiv potamnjenja sveže sečenog voća. Prema istraživanju Raybaudi-Massilia i saradnika (2008), alginatni premazi sa dodatkom etarskog ulja cimeta, karanfilića ili limunove trave u koncentracijama 0,3 i 0,7% značajno su smanjili indeks potamnjenja kod sveže sečenih jabuka u poređenju sa kontrolom. Guerreiro i saradnici (2016) su testirali polisaharidne premaze na bazi alginata i pektina (1% i 2%) sa dodatkom citrala (0,15 i 0,3 g/100 ml) i eugenola (0,1 i 0,2 g/100 ml) u cilju smanjenja indeksa potamnjenja i boljeg očuvanja vizuelnog kvaliteta sveže sečene jabuke sorte bravo de esmolfe tokom 7 dana skladištenja na +4 °C. Upotreba citrala i eugenola pokazala se manje efikasnom kada je korišćen alginat u poređenju sa upotrebom pektina. Samo uzorak sa premazom na bazi pektina sa dodatkom 0,1% eugenola je bio značajno svetliji (više L^* vrednosti) od kontrole. Takvi rezultati ukazuju da je alginat pri nižoj koncentraciji u stanju da poboljša svetlinu, ali prisustvo citrala ili eugola ima negativan efekat na boju površine sveže sečenih jabuka. Nasuprot tome, prisustvo eugenola u formulaciji sa pektinom, pri nižoj koncentraciji, pozitivno utiče na svetlinu uzoraka. Takođe, alginat pri nižoj koncentraciji može delovati kao kiseonička barijera koja ograničava dejstvo polifenol oksidaza, ali prisustvo citrala ili eugenola ima negativan efekat.

Ovi rezultati potvrđuju da je za postizanje optimalnih rezultata neophodno pažljivo odabrati vrstu premaza i prilagoditi formulaciju kako bi se poboljšao vizuelni kvalitet i odložila pojava potamnjenja.

7.7.1.3 pH i titraciona kiselost sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

pH vrednost i titraciona kiselost su parametri koji utiču na svežinu voća i međusobno su povezani jer pH zavisi od prisustva i koncentracije organskih kiselina. Sadržaj kiselina u plodovima voća vremenom opada, što se delimično pripisuje respiratornoj aktivnosti, pri kojoj se organske kiseline koriste kao supstrati u Krebsovom ciklusu i oksiduju do CO₂ i H₂O radi proizvodnje energije, a delimično enzimskoj dekarboksilaciji (Cofelice i sar. 2019, Kovács i Djedjro 1994). Kao posledica toga, očekuje se povećanje pH vrednosti tokom skladištenja voća (Cofelice i sar. 2019). U svim uzorcima primećen je trend porasta pH vrednosti tokom skladištenja na +4 °C, što ukazuje na postepene promene u sadržaju kiselina, verovatno usled oksidacije i degradacije organskih kiselina (tabela 7.31). Početna pH vrednost svih uzoraka bila je 3,69.

Tabela 7.31 pH vrednost i titraciona kiselost (g jabučne kiseline/100 g) sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Parametar	Uzorak	Vreme skladištenja, dan				
		1	3	7	10	14
pH	Kontrola	3,65 ^{abc} ± 0,01	3,85 ^{ba} ± 0,10	3,99 ^{bcB} ± 0,03	4,13 ^{ca} ± 0,04	4,15 ^{ca} ± 0,06
	Alginatni premaz	3,73 ^{aC} ± 0,04	3,69 ^{aA} ± 0,27	3,98 ^{abB} ± 0,02	4,13 ^{ba} ± 0,05	4,16 ^{ba} ± 0,03
	0,1% LEO	3,58 ^{aAB} ± 0,01	3,54 ^{aA} ± 0,06	3,79 ^{ba} ± 0,02	4,02 ^{ca} ± 0,01	4,13 ^{ca} ± 0,06
	0,2% LEO	3,46 ^{aA} ± 0,05	3,48 ^{aA} ± 0,01	3,73 ^{ba} ± 0,01	3,99 ^{ca} ± 0,04	4,11 ^{ca} ± 0,08
	25% VFHD	3,62 ^{abc} ± 0,03	3,41 ^{aA} ± 0,01	3,95 ^{bcB} ± 0,05	3,95 ^{bcA} ± 0,06	4,13 ^{ca} ± 0,16
	50% VFHD	3,59 ^{abAB} ± 0,06	3,46 ^{aA} ± 0,02	3,68 ^{ba} ± 0,02	4,04 ^{ca} ± 0,06	4,160 ^{ca} ± 0,07
Titraciona kiselost, g jabučne kiseline/100 g	Kontrola	0,74 ^{ca} ± 0,13	0,70 ^{ca} ± 0,05	0,40 ^{ba} ± 0,09	0,22 ^{aA} ± 0,02	0,14 ^{aA} ± 0,00
	Alginatni premaz	0,74 ^{cdA} ± 0,09	0,77 ^{da} ± 0,09	0,50 ^{bcA} ± 0,07	0,28 ^{aAB} ± 0,04	0,23 ^{aB} ± 0,04
	0,1% LEO	0,84 ^{ca} ± 0,05	0,80 ^{ca} ± 0,09	0,44 ^{ba} ± 0,05	0,21 ^{aA} ± 0,02	0,18 ^{aAB} ± 0,03
	0,2% LEO	0,74 ^{ba} ± 0,12	0,64 ^{ba} ± 0,05	0,36 ^{aA} ± 0,09	0,18 ^{aA} ± 0,02	0,16 ^{aAB} ± 0,02
	25% VFHD	0,70 ^{ba} ± 0,09	0,74 ^{ba} ± 0,04	0,30 ^{aA} ± 0,05	0,29 ^{aAB} ± 0,06	0,25 ^{abc} ± 0,01
	50% VFHD	0,80 ^{ba} ± 0,08	0,74 ^{ba} ± 0,09	0,54 ^{baA} ± 0,19	0,36 ^{aBC} ± 0,01	0,31 ^{aC} ± 0,01

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja ± standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

Statistički značajan porast pH vrednosti u odnosu na početnu vrednost kod uzoraka tretiranih alginatnim premazima, nezavisno od dodataka i njihove koncentracije, uočava se nakon sedmog dana, dok se ovakva promena kod kontrolnog uzorka javlja već posle trećeg dana.

Nakon desetog dana skladištenja više nije bilo statistički značajne razlike u pH vrednostima između analiziranih uzoraka, ali je u svim uzorcima ova vrednost u odnosu na početnu bila statistički značajno veća. Povećanje pH vrednosti tokom skladištenja povezano je sa smanjenjem sadržaja organskih kiselina, prvenstveno jabučne kiseline, usled ubrzanih promena koje nastaju nakon ljuštenja i sečenja, uključujući respiraciju i enzimske reakcije (Han i sar. 2023), što tokom dužeg perioda dovodi do postizanja slične ravnotežne vrednosti pH u svim uzorcima.

Dobijeni rezultati u skladu su sa studijom koju su sproveli Zhang i saradnici (2024a) na sveže sečenim jabukama premazanim jestivim premazom na bazi skroba iz sago palme i sojinog ulja, gde je primećeno da pH u svim uzorcima, uključujući i kontrolni, raste tokom 12 dana skladištenja. U studiji koju su sproveli Mathe i saradnici (2025) sa jabukama sorte greni smit koje su tretirane alginatnim premazom i skladištene 5 nedelja na +15 °C takođe je uočen porast pH vrednosti tokom skladištenja pri čemu na kraju skladištenja, kao i u ovom radu, nije bilo statistički značajnih razlika u pH vrednosti između tretiranog uzorka i kontrole.

Bez razlike u pH vrednosti nakon 10 dana između kontrole i uzoraka jabuke tretirane hitozanskim premazom sa dodatkom enkapsulisane arome jabuke, kao i konstantan trend porasta pH vrednosti tokom skladištenja, primetili su Luo i saradnici (2024) za jabuku sorte fudži. Cofelice i saradnici (2019) su uočili da se primenom alginatnog premaza sa dodatkom 0,1% etarskog ulja limunske trave kod sveže sečenih jabuka smanjuje pH vrednost u odnosu na početnu vrednost i u poređenju sa kontrolom i uzorkom tretiranim premazom sa većom koncentracijom etarskog ulja (1%). Autori su objašnjenje zasnovali na činjenici da tokom nanošenja premaza (umakanje komadića voća u premaz) limunska kiselina koja ulazi u sastav premaza prodire u tkivo jabuke u većoj meri u nanoformulacijama sa 0,1% etarskog ulja nego u nanoformulacijama sa 1% etarskog ulja limunske trave, jer veći sadržaj ulja povećava hidrofobnost filma i delimično ograničava prolazak hidrofilnih molekula, poput limunske kiseline, do tkiva jabuke. Neslaganje navedenih sa rezultatima dobijenim u ovom radu mogu se pripisati razlikama u strukturi parenhimskog tkiva, veličini međucelijskih prostora i propustljivosti tkiva jabuke (Hou i sar. 2016), što direktno može uticati na difuziju sastojaka premaza ili interakciju sa tkivom ploda. Povećanje pH vrednosti kod jabuka tokom skladištenja, uključujući sortne razlike, već su ranije dokumentovane od strane Han i saradnika (2023).

Titraciona kiselost je jedan od ključnih parametara za određivanje zrelosti i ukusa voća (Islam i sar. 2013). Na osnovu rezultata iz tabele 7.31 uočava se pad vrednosti titracione kiselosti kod svih analiziranih uzoraka tokom 14 dana skladištenja na +4 °C, što je očekivano jer se

organske kiseline troše tokom respiracije koja se znatno ubzava nakon narušavanja celosti ćelija tokom sečenja voća (Rocha i sar. 2003). Ovi mehanizmi su prethodno opisani u literaturi za trend promene ukupne kiselosti kod minimalno procesiranog voća (Cofelice i sar. 2019, Olivas i sar. 2007, Rocha i sar. 2003, Zhang i sar. 2024a). Titraciona kiselost se do sedmog dana skladištenja nije statistički značajno razlikovala između analiziranih uzoraka, dok su unutar istog tretmana zabeležene statistički značajno niže vrednosti u odnosu na početnu vrednost. Kod svih uzoraka, bez obrira na tretman, evidentno je održavanje vrednosti titracione kiselosti u prva tri dana skladištenja nakon čega se uočava znatan pad vrednosti. Nakon desetog dana skladištenja uočena je statistički značajno veća vrednost titracione kiselosti kod uzoraka tretiranih premazom sa dodatkom VFHD, nezavisno od primenjene koncentracije, u odnosu na kontrolni uzorak, kao i uzorke tretirane premazima sa dodatim etarskim uljem u obe koncentracije. Ovakav efekat može se pripisati prisustvu veće količine vodorastvornih fenolnih jedinjenja u VFHD, koje mogu doprineti usporavanju metaboličke potrošnje organskih kiselina tokom skladištenja (Kirkinci i sar. 2024, Turrini i sar. 2021). Sličan mehanizam, zasnovan na smanjenju respiratorne aktivnosti plodova i posledično manjoj potrošnji rastvorljivih šećera i organskih kiselina kao respiratornih supstrata, opisan je u slučaju primene kafeinske kiseline u cilju produženja roka trajanja i očuvanja senzornog kvaliteta nektarine (Lu i sar. 2025). U navedenom istraživanju, tretman kafeinskom kiselinom rezultirao je manjim padom sadržaja rastvorljivih suvih materija i titracione kiselosti, uz očuvanje karakterističnog ukusa i ukupnog aromatskog profila ploda. Bazirano na literaturnim podacima prema kojima su u VFHD dobijenom nakon destilacije etarskog ulja lavande identifikovana različita fenolna jedinjenja (Kirkinci i sar. 2024, Lesage-Meessen i sar. 2018, Turrini i sar. 2021), uključujući kafeinsku kiselinu, koja su u prethodnim istraživanjima pokazala potencijal za očuvanje ukupnih kiselina u plodovima, moguće je da je sličan mehanizam doprineo održavanju ukupne kiselosti u uzorcima sveže sečene jabuke tretirane premazima sa dodatkom VFHD. Uz kafeinsku kiselinu, doprinos uočenim efektima može poticati i od drugih fenolnih jedinjenja prirodno prisutnih u cvetu (Caser i sar. 2023, Dobros i sar. 2022) i sporednim proizvodima destilacije lavande, koja potencijalno mogu imati slične antioksidativne i metabolički modulirajuće efekte (Kirkinci i sar. 2024, Lesage-Meessen i sar. 2018, Turrini i sar. 2021). Pored navedenog, ne može se u potpunosti isključiti ni mogućnost da je uočeni mikrobni rast na površini uzoraka tretiranih premazima sa dodatkom VFHD, putem ograničene mikrobne aktivnosti, doprineo formiranju određenih količina organskih kiselina. Razlika u kiselosti u odnosu na kontrolni uzorak, uzevši u obzir relativno visoki broj prisutnih

psihrofilnih bakterija (Tabela 7.35), može se potencijalo objasniti razlikama u sastavu mikrobnje populacije, budući da visok udeo VFHD u formulaciji premaza obezbeđuje uslove sredine (hranljive supstrate za rast mikroorganizama) koji mogu selektivno uticati na rast i metaboličku aktivnost pojedinih mikroorganizama. Literaturni podaci ukazuju da nakon destilacije u destilacionom sudu zaostaje materijal koji je i dalje bogat bioaktivnim jedinjenjima (fenoli, flavonoidi), uključujući ugljene hidrate (ksiloza, glukoza, celuloza, pektin), terpene i proteine (Lesage-Meessen i sar. 2018). Zbog rastvorljivosti ovih komponenti u vodi, njihov prelazak u VFHD je očekivan (Turrini sar. 2021), čime se u premazima sa dodatkom VFHD posredno obezbeđuje dostupnost hranljivih supstrata za mikroorganizme.

Nakon 14 dana skladištenja, najmanje vrednosti titracione kiselosti, odnosno najveći pad u odnosu na početnu vrednost, zabeleženi su kod kontrolnog uzorka, kao i kod uzoraka tretiranih alginatnim premazom sa dodatkom etarskog ulja lavande, nezavisno od primenjene koncentracije etarskog ulja. Ovakvi rezultati ukazuju na to da primenjeni alginatni premazi sa dodatkom etarskog ulja lavande nisu pokazali potencijal da efikasno doprinesu očuvanju titracione kiselosti tokom skladištenja, što je u skladu sa dobijenim rezultatima za sadržaj malondialdehida (tabela 7.32). Literaturni podaci pokazuju da promene titracione kiselosti tokom skladištenja kod sveže sečenih jabuka mogu imati različite trendove, u zavisnosti od primenjenog tretmana. Cofelice i saradnici (2007) su pokazali da primena nanoformulacije na bazi alginata sa 0,1% etarskog ulja limunske trave omogućava održavanje vrednosti titracione kiselosti tokom čitavog trajanja eksperimenta, dok je kod nanoformulacije sa većom koncentracijom etarskog ulja (1%) zabeležen pad titracione kiselosti nakon šestog dana skladištenja. Istovremeno, vrednosti titracione kiselosti kod tretmana sa 1% etarskog ulja na kraju eksperimenta nisu se statistički značajno razlikovale u odnosu na kontrolu. Slično tome, Olivas i saradnici (2007) su primenom alginatnih premaza sa dodatkom acetilovanih monoglicerida linolne kiseline ili buter-linolne kiseline na sveže sečene jabuke sorte gala utvrdili da nakon devet dana skladištenja nije bilo statistički značajnih razlika u sadržaju titracione kiselosti između različitih tretmana i kontrole, iako je kod svih uzoraka zabeleženo statistički značajno smanjenje u odnosu na početne vrednosti ($p < 0,05$).

Generalno, ovi rezultati ukazuju na to da je promena titracione kiselosti tokom skladištenja pre svega posledica metaboličkih procesa u plodu, dok primenjeni premazi i dodaci mogu uticati na dinamiku promena, ali ne moraju nužno dovesti do značajnih razlika u odnosu na kontrolu u završnoj fazi skladištenja. Pri tome treba imati u vidu da su, kako su istakli

Zambrano-Zaragoza i saradnici (2014) vrsta tretmana, sorta jabuke i uslovi skladištenja ključni faktori koji određuju intenzitet i pravac promena kiselosti tokom skladištenja, što može objasniti uočene razlike između pojedinih studija, ali i njihovu delimičnu saglasnost sa rezultatima ovog rada.

7.7.1.4 Sadržaj malondialdehida sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Malondialdehid, kao krajnji proizvod lipidne peroksidacije, često se koristi kao indeks oksidativnog oštećenja u biološkim sistemima, jer odražava intenzitet peroksidacije polinezasićenih masnih kiselina izazvanih reaktivnim kiseoničnim vrstama (Morales i Munné-Bosch 2019). Njegov sadržaj varira u zavisnosti od vrste voća, zrelosti i stresnih faktora poput sečenja, hlađenja, nedostatka vode i dr. (Xing i sar. 2021). Određivanjem sadržaja malondialdehida prati se reakcija voća na stres, a samim tim i antioksidativna aktivnost. Visok nivo malondialdehida obično ukazuje na značajno oštećenje lipidnih membrana uzrokovano slobodnim radikalima, što može negativno uticati na kvalitet voća i njegov rok trajanja (Lieu i sar. 2025).

U Tabeli 7.32 prikazan je sadržaj malondialdehida u uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima sa dodatkom etarskog ulja lavande (0,1% i 0,2%) i VFHD (25% i 50%) tokom skladištenja na +4 °C u trajanju od 14 dana. Tokom skladištenja sveže sečene jabuke na +4 °C uočen je porast sadržaja malondialdehida u svim uzorcima, pri čemu je povećanje bilo najizraženije kod kontrolnog uzorka. Već nakon trećeg dana skladištenja primetna je razlika u količini akumuliranog malondialdehida između kontrolnog uzorka i uzoraka tretiranih alginatnim premazima sa dodatkom etarskog ulja lavande ili VFHD, nezavisno od njihove koncentracije. Istovremeno, nije utvrđena statistički značajna razlika u odnosu na uzorak premazan čistim alginatnim premazom bez dodataka. Nakon sedmog dana pa do kraja eksperimenta svi tretirani uzorci imali su statistički značajno manju količinu malondialdehida u odnosu na kontrolu. Ovakav trend potvrđuje potencijal alginatnog premaza i odabranih dodataka da deluju kao efikasna barijera i izvor antioksidativno aktivnih jedinjenja, čime se smanjuje oksidativni stres i peroksidacija lipida, odnosno usporava oštećenje ćelijskih membrana tokom skladištenja. Smanjenje intenziteta lipidne peroksidacije, praćeno nižim sadržajem malondialdehida, često se

navodi kao jedan od ključnih pokazatelja zaštitnog efekta alginatnih premaza tokom skladištenja voća.

Tabela 7.32 Sadržaj malondialdehida (mg/kg) u uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Vreme skladištenja, dan					
	0	1	3	7	10	14
Kontrola	0,57 ^{aa} ± 0,06	1,01 ^{bc} ± 0,01	1,58 ^{cc} ± 0,11	1,67 ^{cd} ± 0,04	2,64 ^{de} ± 0,03	2,65 ^{de} ± 0,10
Alginatni premaz	0,57 ^{aa} ± 0,06	0,98 ^{bc} ± 0,03	1,42 ^{cc} ± 0,09	1,52 ^{cc} ± 0,01	1,67 ^{cd} ± 0,03	1,60 ^{cd} ± 0,06
0,1% LEO	0,56 ^{aa} ± 0,06	0,57 ^{aa} ± 0,01	0,86 ^{ba} ± 0,03	1,09 ^{cb} ± 0,06	1,20 ^{cd} ± 0,04	1,17 ^{dbc} ± 0,07
0,2% LEO	0,56 ^{aa} ± 0,06	0,60 ^{aa} ± 0,03	0,88 ^{bab} ± 0,03	0,84 ^{ba} ± 0,04	0,97 ^{ca} ± 0,05	0,87 ^{ba} ± 0,07
25% VFHD	0,56 ^{aa} ± 0,06	0,82 ^{bb} ± 0,03	1,03 ^{cb} ± 0,01	1,07 ^{cd} ± 0,04	1,21 ^{ebc} ± 0,04	1,13 ^{db} ± 0,06
50% VFHD	0,56 ^{aa} ± 0,06	0,97 ^{bc} ± 0,02	1,02 ^{bab} ± 0,05	1,06 ^{bb} ± 0,06	1,32 ^{cc} ± 0,05	1,35 ^{cc} ± 0,01

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja ± standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% LEO; 0,2% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% LEO; 25% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala i velika slova ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti u redovima, odnosno kolonama ($p < 0,05$).

U ranije objavljenim istraživanjima pokazano je da alginatni premazi efikasno ograničavaju oksidativna oštećenja tkiva plodova, što se ogleda u smanjenoj akumulaciji malondialdehida kao pokazatelja peroksidacije lipida (Ali i sar. 2021). Tako je kod plodova manga tretiranih alginatnim premazom i čuvanih 10 dana na +25 °C detektovan znatno niži sadržaj malondialdehida u poređenju sa kontrolnim uzorkom (Wang i sar. 2025a). Slično tome, primena alginatnog premaza na plodove breskve skladištene na +5 °C tokom 28 dana rezultirala je smanjenjem sadržaja malondialdehida za oko 38% u odnosu na kontrolu (Wang i sar. 2025b). Kod jagode tretirane premazom na bazi alginata i hitozana sadržaj malondialdehida bio je približno 20% niži nakon 5 dana skladištenja u poređenju sa netretiranim plodovima (Du i sar. 2021). Poređenjem premaza na bazi pektina, hitozana, natrijum-alginata ili karboksimetilceluloze, sa ili bez dodatka N-acetil cisteina, tokom 14 dana skladištenja na +4 °C, utvrđeno je da tretirani uzorci belih pečuraka (*Agaricus bisporus*) imaju smanjen sadržaj malondialdehida u odnosu na kontrolu, pri čemu je nakon 7 dana skladištenja najbolji rezultat bio zabeležen kod uzorka tretiranog premazom na bazi alginata (Pleșoianu i Nour 2022). Dobijeni rezultati potvrđuju da alginatni premazi efikasno usporavaju oksidativne procese, verovatno zahvaljujući stvaranju polupropusne barijere za gasove i vlagu, smanjenju respiracije i očuvanju antioksidativnog sistema tkiva.

Slični pozitivni efekti u smislu smanjenja lipidne peroksidacije i nižeg sadržaja malondialdehida zabeleženi su i kod premaza na bazi drugih polisaharida i prirodnih biopolimera. Wang i sar. (2023) su pokazali da premaz na bazi celuloznih nanovlakana primenjen na sveže sečene fudži jabuke uslovljava 1,34 puta nižu akumulaciju malondialdehida u poređenju sa kontrolnim uzorkom. Takođe, Shao i sar. (2012) su utvrdili da primena premaza na bazi hitozana na gala jabukama, skladištenim na 0 °C tokom 8 nedelja, a zatim 7 dana na +20 °C (simulacija uslova u maloprodajnom objektu) efikasno usporava porast sadržaja malondialdehida. Premazi na bazi gume arabike pokazali su značajno smanjenje akumulacije malondialdehida kod plodova kajsije čuvanih 8 dana na +20 °C, gde je sadržaj malondialdehida bio 1,35 puta niži u odnosu na netretirane plodove (Ali i sar. 2021), kao i kod plodova japanske jabuke tokom 20 dana skladištenja, pri čemu su netretirani plodovi akumulirali 1,44 puta više malondialdehida (Saleem i sar. 2020). Dodatno, premaz na bazi guar gume obogaćen ekstraktom žen-šena značajno je usporio lipidnu peroksidaciju kod plodova trešnje čuvane 8 dana na +20 °C, pri čemu je sadržaj malondialdehida na kraju skladištenja iznosio 0,063 µmol/l, što je značajno niže u odnosu na kontrolu (0,102 µmol/l) i uzorak tretiran samo guar gumom (0,095 µmol/l) (Dong i Wang 2018). Predstavljeni rezultati dodatno potvrđuju da polisaharidni jestivi premazi, bilo na bazi alginata ili drugih biopolimera, predstavljaju efikasnu strategiju za ograničavanje oksidativnih oštećenja i očuvanje kvaliteta sveže sečenog i celog voća tokom skladištenja.

Nakon 14 dana skladištenja, uzorci premazane sečene jabuke tretirani alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% odnosno 0,2% etarskog ulja lavande imali su za 55,8%, odnosno 67,2% niži sadržaj malondialdehida u poređenju sa kontrolnim uzorkom, što ukazuje da dodatak etarskog ulja doprinosi smanjenju oksidativnog oštećenja izazvanog sečenjem ploda. Dodatkom 25% odnosno 50% VFHD u alginatni premaz, nakon 14 dana skladištenja na +4 °C sadržaj malondialdehida manji je u odnosu na sadržaj u kontrolnom uzorku za 57,4% odnosno 49,1%, redom. Najizraženiji efekat na sadržaj malondialdehida u uzorcima sveže sečene jabuke tokom skladištenja zabeležen je kod uzorka tretiranog alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande, pri čemu je sadržaj ovog jedinjenja na kraju perioda skladištenja bio tri puta niži u odnosu na kontrolni uzorak, što ukazuje da viša koncentracija etarskog ulja u premazu može doprineti efikasnijem ograničavanju oksidativnih procesa tokom skladištenja. Ovi rezultati su u saglasnosti sa prethodno prikazanim antioksidativnim svojstvima etarskog ulja lavande u ovom radu i potvrđuju da njegovo uključivanje u alginatni premaz doprinosi efikasnijem neutralisanju reaktivnih kiseoničnih vrsta i zaštiti ćelijskih membrana tokom skladištenja.

S obzirom na to da je malondialdehid krajnji produkt lipidne peroksidacije i pouzdan indikator oštećenja ćelijskih membrana, prisustvo manje količine u tretiranim plodovima upućuje na ublažavanje oksidativnog stresa tokom skladištenja (Ali i sar. 2021).

7.7.2 Mikrobiološka stabilnost sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom skladištenja

Mikrobiološka analiza sveže sečene jabuke sa različitim dodacima u alginatnom premazu (0,1% i 0,2% etarskog ulja lavande ili 25% i 50% VFHD) pokazuje da efekat tretmana varira u zavisnosti od dodate aktivne komponente, njene koncentracije i vremena skladištenja. Rezultati primene alginatnih premaza na ukupan broj mezofilnih bakterija, kvasaca i plesni, kao i psihofilnih bakterija, prikazani su u tabelama 7.33, 7.34 i 7.35.

Ukupni broj mezofilnih i psihofilnih bakterija je iznosio $1,43 \pm 0,38$ log CFU/g, odnosno $2,03 \pm 0,05$ log CFU/g, dok kvasci i plesni nisu detektovani u uzorcima sveže sečene jabuke pre nanošenja premaza. Vrednosti za ukupan broj bakterija, kvasaca i plesni rastu tokom skladištenja na $+4$ °C u svim uzorcima, što je očekivano kod sveže sečenog voća koje sadrži visok udeo vlage i lako dostupne nutrijente za razvoj mikrobiote.

Tabela 7.33 Ukupni broj bakterija (log CFU/g) u uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Vreme skladištenja, dan				
	1	3	7	10	14
Kontrola	2,03 ^{ba} ± 0,06	2,44 ^{bcC} ± 0,08	2,74 ^{cB} ± 0,04	4,00 ^{dB} ± 0,06	6,17 ^{eC} ± 0,16
Alginatni premaz	2,03 ^{ba} ± 0,06	1,84 ^{ba} ± 0,05	1,92 ^{ba} ± 0,08	3,73 ^{dB} ± 0,04	4,84 ^{eAB} ± 0,15
0,1% LEO	1,92 ^{abA} ±	2,01 ^{bB} ± 0,07	2,02 ^{ba} ± 0,13	3,27 ^{cA} ± 0,16	4,93 ^{dB} ± 0,21
0,2% LEO	0,07 1,86 ^{abA}	2,04 ^{bB} ± 0,12	1,79 ^{abA} ± 0,20	2,95 ^{cA} ± 0,24	4,48 ^{dA} ± 0,19
25% VFHD	± 0,12 1,90 ^{aA}	2,33 ^{bC} ± 0,05	2,47 ^{bB} ± 0,21	3,99 ^{cB} ± 0,03	6,02 ^{dC} ± 0,05
50% VFHD	± 0,10	2,01 ^{bB} ± 0,02	2,64 ^{cB} ± 0,06	4,02 ^{dB} ± 0,05	5,95 ^{eC} ± 0,04
	2,13 ^{ba} ± 0,15				

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja $\pm$ standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

Tabela 7.34 Ukupni broj kvasaca i plesni (log CFU/g) u uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Vreme skladištenja, dan				
	1	3	7	10	14
Kontrola	0	0	2,04 ^a ± 0,04	4,15 ^{bC} ± 0,010	6,03 ^{cC} ± 0,05
Alginatni premaz	0	0	0	4,04 ^{aC} ± 0,075	5,37 ^{bB} ± 0,21
0,1% LEO	0	0	0	3,02 ^{aA} ± 0,070	4,53 ^{bA} ± 0,29
0,2% LEO	0	0	0	2,86 ^{aA} ± 0,196	4,10 ^{bA} ± 0,17
25% VFHD	0	0	0	4,14 ^{aC} ± 0,047	5,85 ^{bBC} ± 0,13
50% VFHD	0	0	0	3,47 ^{aB} ± 0,060	6,00 ^{bC} ± 0,10

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja ± standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

Tabela 7.35 Broj psihrofilnih bakterija (log CFU/g) u uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Vreme skladištenja, dan				
	1	3	7	10	14
Kontrola	2,17 ^{aA} ± 0,15	2,97 ^{bA} ± 0,20	3,14 ^{bB} ± 0,13	3,98 ^{cD} ± 0,04	5,66 ^{dB} ± 0,03
Alginatni premaz	2,12 ^{aA} ± 0,13	2,85 ^{bA} ± 0,07	2,93 ^{bAB} ± 0,21	3,71 ^{cC} ± 0,08	5,18 ^{dA} ± 0,11
0,1% LEO	2,05 ^{aA} ± 0,05	2,77 ^{bA} ± 0,08	2,68 ^{bA} ± 0,18	3,09 ^{cA} ± 0,08	5,18 ^{dA} ± 0,07
0,2% LEO	2,08 ^{aA} ± 0,07	2,77 ^{bA} ± 0,08	2,79 ^{bAB} ± 0,08	3,53 ^{cB} ± 0,04	5,16 ^{dA} ± 0,05
25% VFHD	2,09 ^{aA} ± 0,10	3,04 ^{bA} ± 0,09	3,06 ^{bB} ± 0,12	4,38 ^{cE} ± 0,08	5,29 ^{dA} ± 0,02
50% VFHD	2,06 ^{aA} ± 0,05	2,95 ^{bA} ± 0,01	2,87 ^{bAB} ± 0,06	3,81 ^{cCD} ± 0,10	5,56 ^{dB} ± 0,07

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja ± standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

Prema Pravilniku o opštim i posebnim uslovima higijene hrane i mikrobiološkim kriterijumima za hranu („Sl. glasnik RS“, br. 30/2024), za kategoriju rezanog voća i povrća, koje se svrstava u hranu spremnu za konzumiranje, propisano je odsustvo bakterija roda *Salmonella* spp. tokom celokupnog roka trajanja proizvoda. Istovremeno, prema Institutu za nauku o hrani i tehnologiju (IFST, 1999), za sečeno voće dozvoljeno je prisustvo *L. monocytogenes* i *E. coli* ≤ log 2 CFU/g na kraju roka trajanja, pod uslovom da nije prisutna *Salmonella* spp. niti *E. coli* koja proizvodi šiga toksin. U svim analiziranim uzorcima sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima, skladištenim na +4 °C tokom 14 dana, prisustvo ovih bakterija nije detektovano.

Obzirom na to da važećim nacionalnim propisima nisu definisani drugi mikrobiološki kriterijumi za sveže sečeno voće, dobijeni rezultati interpretirani su u odnosu na odredbe Pravilnika o mikrobiološkoj ispravnosti namirnica u prometu („Sl. list SRJ“, br. 26/93, 53/95 i 46/2002), koji propisuje maksimalno dozvoljeni broj od 5 log CFU/g za ukupne bakterije u smrznutom voću. Iako se navedeni pravilnik odnosi na smrznuto voće, on predstavlja najbliži regulatorni okvir za poređenje i omogućava okvirnu procenu mikrobiološke ispravnosti analiziranih uzoraka. Na kraju perioda skladištenja (14. dan), ukupan broj bakterija kod analiziranih uzoraka dostiže vrednosti od 4,48 do 6,17 log CFU/g. Dobijeni rezultati ukazuju da kontrolni uzorak, kao i uzorci sa dodatkom VFHD, prelaze usvojenu referentnu graničnu vrednost od 5 log CFU/g, te se, prema navedenom kriterijumu, u tom mometu ne mogu smatrati mikrobiološki ispravnim. Istovremeno, kod svih uzoraka je zabeležen kontinuirani porast ukupnog broja psihrofilnih bakterija, pri čemu je na kraju eksperimenta najveći broj registrovan kod kontrolnog uzorka ($5,66 \pm 0,03$ log CFU/g) i uzorka tretiranog premazom sa dodatkom 50% VFHD ($5,56 \pm 0,07$ log CFU/g), dok je u tom trenutku i kod svih ostalih uzoraka broj bakterija bio > 5 log CFU/g. Dodavanje etarskog ulja lavande u alginatni premaz u koncentracijama od 0,1% i 0,2% pokazalo je smanjenje ukupnog broja svih grupa mikroorganizama u uzorcima sveže sečene jabuke u poređenju sa kontrolom tokom celokupnog perioda skladištenja. Ovo ukazuje da premazi sa inkorporiranim etarskim uljem potencijalno omogućavaju sporo i stabilno otpuštanje ulja, čime se antimikrobna aktivnost održava tokom čitavog perioda skladištenja. Pozitivan efekat koji premaz sa dodatkom etarskog ulja ima na mikrobiološku stabilnost uzoraka može se pripisati delovanju monoterpena (linalol, linalil acetat, terpinen-4-ol) prikazanih u tabeli 7.28, za koje je ranije dokazano da imaju izraženu antimikrobnu aktivnost zahvaljujući sposobnosti da narušavaju ćelijske membrane mikroorganizama i inhibiraju enzimsku aktivnost (Nikšić i sar. 2017). Efekat je nešto izraženiji kod primene premaza sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande, što ukazuje da povećanje koncentracije etarskog ulja povećava efikasnost alginatnog premaza u smislu održavanja mikrobiološke stabilnosti sveže sečene jabuke. Do sličnih rezultata su došli i Song i saradnici (2013) koji su proučavali uticaj jestivih premaza na bazi aloe vere sa dodatkom 0,5% cisteina na kvalitet sveže sečenih jabuka tokom skladištenja na $+4$ °C u trajanju od 16 dana. Nakon 16 dana skladištenja, ukupan broj aerobnih bakterija kod kontrolnog uzorka je bio 5 log CFU/g, dok je kod jabuka obloženih gelom aloe vere sa i bez dodatka cisteina bio 4,21 i 3,86 log CFU/g, redom. Sličan trend zabeležen je i za kvasce i plesni: kontrolni uzorak dostigao je 5,61 log CFU/g, dok su obloženi uzorci imali 5,24 i 4,50 log CFU/g,

redom. Etarska ulja različitih biljaka kao što su karanfilić, limun, cimet, čajevac, lavanda, origano i nana, predstavljaju izvor raznovrsnih bioaktivnih jedinjenja sa izraženom antimikrobnom aktivnošću (Anis i sar. 2021). Pored očuvanja fizičko-hemijskog kvaliteta, etarska ulja se koriste i kao zaštita od širokog spektra patogenih mikroorganizama koji izazivaju kvarenje hrane (Chouhan i sar. 2017). Sarengaowa i saradnici (2018) su pokazali da alginatni premaz sa dodatkom etarskog ulja timijana efikasno inhibira rast mikroorganizama kod sveže sečenih jabuka sorte crveni fudži. Jestivi premazi na bazi alginata sa dodatkom etarskog ulja limuna (*Citrus lemon* L.), pomorandže (*Citrus sinensis* L.) i grejpfruta (*Citrus paradisi* L.) nanešeni na kivi smanjuju potrošnju O₂ i proizvodnju CO₂, kao i broj kvasca i plesni (Chiabrandu i Giacalone 2019). Kapetanakou i saradnici (2019) uočili su da premaz na bazi alginata sa dodatkom etarskog ulja cimeta (0,9%, v/v) inhibira rast plesni *A. carbonarius* na obloženim kriškama jabuka i krušaka. Rojas-Graü i saradnici (2007b) su primetili statistički značajne razlike između broja psihofilnih mikroorganizama kod sveže sečene fudži jabuke premazane alginatnim premazom sa dodatkom etarskih ulja limunske trave, origana i vanilina i kontrole. Ukupan broj kolonija mikroorganizama kod kontrole povećao se za približno 5,5 log CFU/g od 0. do 21. dana skladištenja, dostižući vrednosti i do 7 log CFU/g. Kod sečenih jabuka sa premazima sa dodatkom etarskog ulja limunske trave (1,0 i 1,5% v/v) i ulja origana (0,5% v/v) nisu detektovane kolonije (granica detekcije 1 log CFU/g). S druge strane, uzorci premazani alginatnim premazom sa dodatkom vanilina i uljem origana (0,1%) pokazali su niži početni broj psihofilnih bakterija u odnosu na kontrolne uzorke, što ukazuje na bakteriostatski efekat tokom prvih 14 dana skladištenja. Nakon ovog perioda, primećen je blagi porast broja psihofilnih aerobnih bakterija u uzorcima premazanim alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% ulja origana. Alginatni premaz sa dodatkom etanolnog ekstrakta ploda dlakave smokve (*Fikus hirta*) usporava rast plave plesni, povećava sadržaj antioksidanata i aktivnost odbrambenih enzima kod mandarine sorte nanfeng (Chen i sar. 2016), dok dodatak vodeno-etanolnog ekstrakta rabarbare (*Rheum rhaponticum*) u alginatni premaz inhibira rast plesni *Penicillium expansum* i čuva fiziološka i senzorna svojstva kada se primeni na plodove breskvi (*Prunus persica*) (Li i sar. 2019b). Na osnovu rezultata do kojih su došli Lopes i saradnici (2023), moguće je zaključiti da alginatni premazi sa dodatkom biljnih ekstrakata sladića, eukaliptusa i timijana pokazuju dobra bioaktivna svojstva i potencijalno se mogu koristiti u novim, biorazgradivim pakovanjima. Njihovi rezultati su pokazali da su premazi potpuno inhibirali ili smanjili rast bakterija (*E. coli*, *P. aeruginosa*, *B. cereus*, *L. monocytogenes* i *S. aureus*), osim u slučaju premaza sa ekstraktom

žalfije. Ovakvi rezultati ukazuju da ne samo etarska ulja, već i drugi bioaktivni proizvodi, poput biljnih ekstrakata, mogu imati pozitivan uticaj na mikrobiološku stabilnost sveže secenog voca kada se primene u alginatne premaze. Međutim, za razliku od dodatka etarskog ulja lavande u alginatni premaz, koji je pokazao pozitivan efekat na produženje mikrobiološke stabilnosti tretiranih uzoraka sveže sečene jabuke, dodatak VFHD, koja se može smatrati vodenim ekstraktom cveta lavande, nije doprineo očuvanju mikrobiološke stabilnosti analiziranih uzoraka jer je u ovim uzorcima na kraju eksperimenta uočen najveći broj svih praćenih grupa mikroorganizama (ukupan broj mezofilnih i psihrofilnih bakterija, kvasaca i plesni). To potvrđuje da VFHD lavande, iako sadrži određenu koncentraciju bioaktivnih jedinjenja, najverovatnije ima nizak sadržaj aktivnih jedinjenja da bi ostvario značajan inhibitorni efekat na rast mikroorganizama prisutnih na površini sveže sečene jabuke. Na osnovu literaturnih podataka koji ukazuju da VFHD lavande može sadržati različite količine fenolnih jedinjenja i flavonoida (Kirkinci i sar. 2024, Turrini i sar. 2021), kao i činjenice da iscrpljeni biljni materijal nakon destilacije etarskog ulja i dalje sadrži različite bioaktivne i vodorastvorne komponente, uključujući ugljene hidrate, terpene i proteine (Lesage-Meessen i sar. 2018), može se pretpostaviti da deo ovih jedinjenja, usled svoje rastvorljivosti, u određenoj meri prelazi u VFHD. U tom kontekstu, dodatak VFHD u alginatni premaz, pored potencijalno prisutnih bioaktivnih jedinjenja, može istovremeno obezbediti i druge vodorastvorne komponente koje predstavljaju dostupne supstrate za rast i metaboličku aktivnost mikroorganizama. Takva kombinacija jedinjenja može doprineti izostanku izraženog antimikrobnog efekta, što je u skladu sa dobijenim rezultatima, prema kojima se broj mikroorganizama kod uzoraka tretiranih premazima sa dodatkom VFHD nije statistički značajno razlikovao u odnosu na kontrolu.

Promene u ukupnom broju kvasaca i plesni kod sveže sečene jabuke skladištene 14 dana na +4 °C prikazane su u tabeli 7.34. U interpretaciji rezultata primenjene su, kao i kod diskusije za ukupan broj bakterija, referentne vrednosti propisane Pravilnikom o mikrobiološkoj ispravnosti namirnica u prometu („Sl. list SRJ“, br. 26/93, 53/95 i 46/2002) za smrznuto voće, koji definiše maksimalno dozvoljeni broj od 2 log CFU/g za kvasce i plesni. Nakon sedmog dana skladištenja kod kontrolnog uzorka, odnosno nakon desetog dana kod tretiranih uzoraka, bez obzira na vrstu i koncentraciju dodatka, broj kvasaca premašio usvojenu referentnu vrednost od 2 log CFU/g. Shodno tome, kontrolni uzorci se već nakon sedmog dana skladištenja ne mogu smatrati mikrobiološki prihvatljivim za upotrebu, dok primena tretmana doprinosi značajnom produženju mikrobiološke stabilnosti proizvoda, odlažući dostizanje graničnih vrednosti do

desetog dana skladištenja. Najbolji rezultati u pogledu očuvanja mikrobiološke stabilnosti zabeleženi su kod uzoraka tretiranih premazom sa dodatkom etarskog ulja lavande, pri čemu broj mikroorganizama nije pokazao statistički značajne razlike u zavisnosti od primenjene koncentracije ulja. Rezultate u skladu sa ovde predstavljenim objavili su Rojas-Graü i saradnici (2007b) koji su pokazali inhibitorni efekat etarskih ulja limunske trave, origana i vanilina, inkorporiranih u alginatni premaz koji je nanet na sveže sečene jabuke sorte fudži, na rast kvasaca i plesni. Kao i u našem slučaju sam alginatni premaz bez dodatka etarskih ulja nije značajno smanjio broj kvasaca i plesni. Međutim, u slučaju primene alginatnog premaza sa dodatkom etarskog ulja limunske trave (1,0% v/v i 1,5% v/v) i ulja origana (0,5% v/v) na komadima jabuke nisu detektovani kvasci i plesni (granica detekcije 2 log CFU/g) tokom 21 dana skladištenja na +4 °C. Međutim, u slučaju primene alginatnog premaza sa dodatkom 0,1% v/v ulja origana broj kvasca i plesni dostigao je 4,1 log CFU/g nakon 21 dana skladištenja. Kao što je primećeno i kod psihrofilnih mikroorganizama, efikasnost ulja origana (0,1% v/v) smanjivala se tokom vremena skladištenja, dok se broj kvasca i plesni povećavao u poslednjim danima skladištenja. Brzina rasta kvasaca i plesni je inhibirana u uzorcima premazanim maksimalnom koncentracijom ulja origana (0,5% v/v) i vanilina (0,3% v/v i 0,6% v/v), ne prelazeći 3 log CFU/g na kraju skladištenja.

Generalno, može se zaključiti da alginatni premaz, sam po sebi, kao fizička barijera, može donekle usporiti difuziju kiseonika i gubitak vlage, ali bez dodatka aktivnih supstanci nema dovoljno snažan efekat na mikrobiološku stabilnost proizvoda. Dodavanje etarskog ulja lavande može predstavljati efikasnu alternativu za poboljšanje mikrobiološke stabilnosti sveže sečene jabuke.

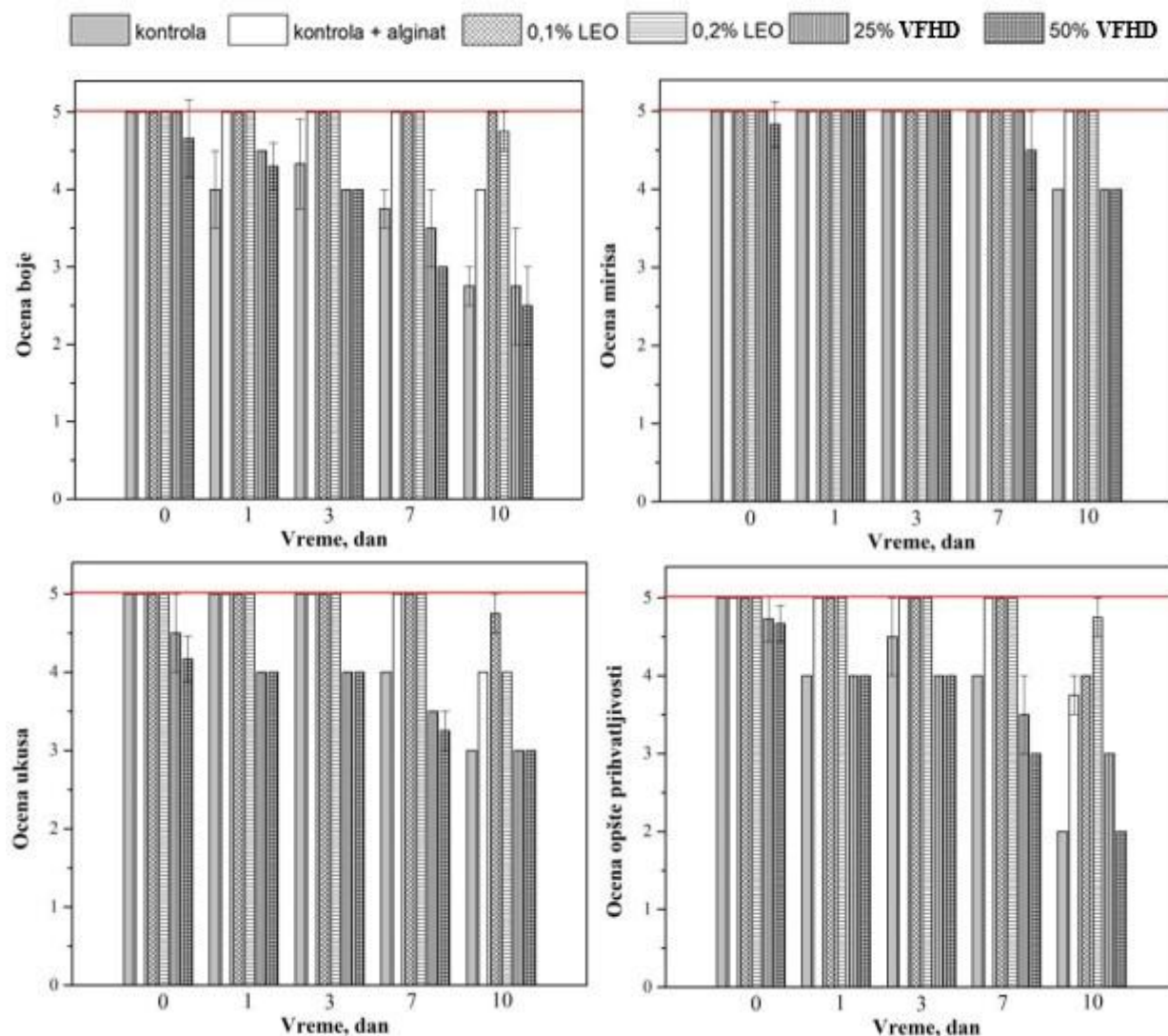
7.7.3 Senzorne karakteristike sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom tokom skladištenja

Za produženje roka trajanja sveže sečenog voća sve češće se primenjuju jestivi premazi (Aayush i sar. 2022, Özdemir i Gökmen 2019, Mahela i sar. 2020). Jedan od ključnih kriterijuma pri njihovoj primeni jeste da ne narušavaju senzorne karakteristike proizvoda, kao što su boja, miris i ukus, ili da ako postoji uticaj na senzorne karakteristike on bude pozitivan. Ovakav zahtev ograničava primenu etarskih ulja u formulaciji jestivih premaza zbog njihovog intenzivnog mirisa i arome, dok njihova hemijska reaktivnost može dodatno uticati na senzorna svojstva

voća. Senzorna analiza sveže sečenog voća obuhvatila je ocenjivanje senzornih opažaja za vizuelne (boju), olfaktorne (miris), gustativne (ukus) attribute, kao i ukupnu prihvatljivost (Barrett i sar. 2010, Beaulieu 2011). Rezultati senzorne analize sveže sečene jabuke sa alginatnim premazom sa dodatkom etarskog ulja lavande (0,1% i 0,2%), odnosno VFHD zaostale nakon dobijanja etarskog ulja (25% i 50%) na +4 °C u trajanju od 14 dana prikazani su na slici 7.26.

Na osnovu rezultata vizuelne faze senzorne analize sveže sečenih jabuka tretiranih alginatnim premazima tokom 10 dana skladištenja na +4 °C (slika 7.26a) može se zaključiti da su uzorci tretirani alginatnim premazom sa dodatkom etarskog ulja lavande, nezavisno od primenjene koncentracije, uspešno očuvali boju tokom celokupnog trajanja eksperimenta, što je potvrđeno konstantnom maksimalnom ocenom (5). Uzorak tretiran alginatnim premazom bez dodataka u potpunosti je očuvao boju do sedmog dana skladištenja, dok je desetog dana zabeleženo blago smanjenje ocene, koje je i dalje ostalo u okviru prihvatljivih vrednosti. Pozitivan uticaj primene premaza na očuvanje boje sveže sečene jabuke, može se pored efekta koje ima premaz pripisati i tretmanu limunskom kiselinom u okviru nanošenja premaza. Kod kontrolnog uzorka uočen je neznatan pad ocene boje već prvog dana skladištenja, međutim ove vrednosti su ostale prihvatljive do trećeg dana (4 i više). Nasuprot tome, uzorci tretirani alginatnim premazom sa dodatkom 25% i 50% VFHD imali su niže početne ocene boje odmah nakon nanošenja premaza, iako razlike u odnosu na ostale uzorke nisu bile statistički značajne. Obojenost VFHD primenjene u formulaciji usloвила je promenu boje premaza, posledično i uzorka, što se nepovoljno odrazilo na vizuelne karakteristike i rezultiralo nižim ocenama za boju ovih uzoraka. Tokom skladištenja, kod uzoraka tretiranih premazom sa dodatkom VFHD kao i kod kontrolnog uzorka došlo je do izraženog pogoršanja senzorne ocene za boju, pri čemu su sedmog dana zabeležene vrednosti 3 (granica prihvatljivosti). Ovakvi nalazi su u saglasnosti sa rezultatima instrumentalne analize boje, odnosno promenama hromatskih parametara praćenih tokom eksperimenta.

Rezultati olfaktorne faze senzorne analize uzoraka (slika 7.26b) ukazuju da primena alginatnog premaza, sa ili bez dodataka, nije imala značajan uticaj na senzornu ocenu mirisa sveže sečenih jabuka. Nezavisno od primenjenog tretmana, tokom većeg dela perioda skladištenja zabeleženo je održavanje visokih i stabilnih vrednosti senzornih ocena.



Slika 7.26 Rezultati ocena senzornih opažaja ocenjivanih za sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Jedino je poslednjeg dana eksperimenta uočen pad senzorne ocene mirisa kod kontrolnog uzorka i uzoraka tretiranih alginatnim premazom sa dodatkom VFHD, pri čemu je vrednost ocene opala sa 5 na 4, što predstavlja smanjenje od 20%. Uprkos uočenom padu, ove vrednosti su ostale u okviru senzorno prihvatljivog opsega. Bambace i saradnici (2024) takodje su uočili da kod primene alginatnog premaza sa dodatkom probiotika na sveže sečene jabuke tokom skladištenja u trajanju od 8 dana nije bilo uticaja na ukus i aromu tretiranih uzoraka.

U okviru gustativne faze senzornog ocenjivanja sveže sečenih jabuka tokom skladištenja uočava se da primena alginatnog premaza bez dodataka, kao i alginatnog premaza sa dodatkom etarskog ulja lavande, doprinosi uspešnom očuvanju ukusa tokom prvih sedam dana skladištenja.

Kod ovih uzoraka pad senzorne ocene ukusa zabeležen je tek poslednjeg dana eksperimenta, kada je vrednost opala sa 5 na 4, što i dalje predstavlja senzorno prihvatljiv nivo. Ovakvi rezultati ukazuju na dobru efikasnost alginatnih premaza sa dodatkom etarskog ulja lavande u očuvanju gustativnog kvaliteta sveže sečenih jabuka (slika 7.26c). Rojas-Graü i saradnici (2007b) su ispitivali uticaj alginatnih premaza sa dodatkom etarskih ulja limunske trave, origana i vanilina, na kvalitet sveže sečenih jabuka tokom skladištenja na 4 °C. Uzorci tretirani premazom sa dodatkom etarskog ulja origana (0,1%) imali su nižu opštu prihvatljivost zbog rezidualnog biljnog ukusa, dok je dodatak etarskog ulja limunske trave (1%) negativno uticao na boju i teksturu ploda, što je rezultirano neprihvatljivim ocenama nakon 7 dana. Suprotno tome, uzorak sveže sečenih jabuka tretiran premazom sa dodatkom vanilina (0,3%) je nakon 14 dana skladištenja imao naveće senzorne ocene za boju, miris, ukus, dok je najbolju ocenu nakon istog perioda za čvrstinu i ukupnu prihvatljivost dobio uzorak tretiran premazom bez dodataka. Očuvanje senzorne ocene za ukus sveže sečenih jabuka tokom 12 dana uočeno je u slučaju primene premaza na bazi skroba saga palme sa dodatkom sojinog ulja (Zhang i sar. 2024a). Suprotno, u literaturi je zabeleženo da inkorporacija etarskih ulja cimeta (0,125%) i muskatnog oraščića (0,250%) u alginatne premaze dovodi do smanjenja senzornih ocena ukusa, arome i ukupne prihvatljivosti u odnosu na kontrolni uzorak (dos Santos i sar. 2018). Ovi rezultati ukazuju da efekat dodataka u alginatnim premazima u velikoj meri zavisi od njihove kompatibilnosti sa voćnom matricom i pažljive formulacije premaza. Različit efekat na senzorne karakteristike sveže sečene jabuke sorte zlatni delišes tokom 10 dana čuvanja uočen je poređenjem tri jestiva premaza sa dodatkom 0,06% etarskog ulja cimeta, pri čemu je utvrđeno da je premaz na bazi hitozana negativno uticao na aromu, dok su jabuke premazane guar gumom i kompozitnim premazom na bazi guar gume i kukuruznog skroba imale bolje senzorne ocene za boju, miris, ukus, teksturu i ukupni izgled u odnosu na kontrolu (Solís-Contreras i sar. 2021), što dodatno ističe značaj optimizacije formulacije premaza za očuvanje senzornih svojstava voća.

Nezavisno od koncentracije, dodatak VFHD u alginatni premaz nije pokazao pozitivan uticaj na očuvanje ukusa sveže sečenih jabuka tokom 14 dana skladištenja na +4 °C. Tokom čitavog perioda skladištenja, senzorne ocene za ukus kod ovih uzoraka bile su niže u poređenju sa ostalim uzorcima (slika 7.26c). Nakon sedmog dana skladištenja, vrednosti senzornih ocena ukusa približile su se granici prihvatljivosti (ocena 3).

Dobijene vrednosti senzornih ocena za opštu prihvatljivost sveže sečenih jabuka tretiranih alginatnim premazima tokom 10 dana skladištenja na +4 °C (slika 7.26d) ukazuju je da

kontrolni uzorak već prvog dana skladištenja ima pad senzorne ocene na vrednost 4, kao i da su uzorci tretirani alginatnim premazom sa dodatkom VFHD od samog početka pokazivali primetan negativan uticaj na ocenu opšte prihvatljivosti. Tokom trajanja eksperimenta, vrednosti ocena opšte prihvatljivosti kod ovih uzoraka postepeno su opadale i poslednjeg dana postale su neprihvatljive, pri čemu su ocene za uzorak sa 25% VFHD iznosile 3, a za uzorak sa 50% VFHD 2. Uzorci ocenjeni prosečnom ocenom 3 smatraju se umereno prihvatljivim (granica prihvatljivosti), dok se oni sa manjim ocenama tretiraju kao proizvodi sa izraženim nedostacima (Moreira i sar. 2015). Nasuprot tome, uzorci tretirani alginatnim premazom bez dodataka, kao i sa dodatkom etarskog ulja lavande, očuvali su visok nivo opšte prihvatljivosti tokom prvih sedam dana skladištenja. Posebno je značajno da je uzorak sa 0,2% etarskog ulja lavande zadržao ocenu veću od 4,5 i poslednjeg dana eksperimenta, ukazujući na odličnu opštu prihvatljivost.

Značaj optimizacije formulacije alginatnih premaza u cilju poboljšanja senzornih osobina proizvoda potvrđuju i rezultati Ghavidel i saradnika (2013), koji su ispitivali različite jestive premaze za produženje roka trajanja sveže sečenih jabuka, uključujući premaze na bazi alginata, karagenana i proteina. Iako su jestivi premazi generalno doprinosili očuvanju vizuelnog kvaliteta ploda tokom skladištenja, alginatni premazi su rezultirali nižim ocenama za miris i ukus u poređenju sa karagenanom i koncentratom proteina surutke. Međutim, dodatak suncokretovog ulja u alginatni premaz doveo je do poboljšanja teksture uzoraka jabuke, potvrđujući potrebu za optimizacijom formulacije. Alginatni jestivi premaz sa dodatkom ekstrakta pulpe avokada pozitivno je uticao na vizuelni izgled minimalno prerađenih jabuka i rezultirao najboljim senzornim ocenama za izgled, aromu, ukus, teksturu i ukupnu senzornu prihvatljivost tokom 15 dana skladištenja u poređenju sa uzorkom tretiranim premazom na bazi hitozana i kontrolom (Ribeiro i sar. 2023). Pérez-Gago i saradnici (2006) su pokazali da se primenom kompozitnog premaza na bazi koncentrata surutke i pčelinjeg voska sa dodatkom cisteina, na sveže sečenim jabukama oseća miris jedinjenja sumpora. Međutim, ukoliko se u ovaj premaz umesto cisteina ugradi askorbinska kiselina postižu se isti efekti bez značajnog uticaja na organoleptička svojstva. Navedeni literaturni podaci, kao i rezultati dobijeni u ovom radu, jasno sugerišu da efekat dodataka u jestivim premazima zavisi od njihove vrste i koncentracije, što naglašava potrebu za sistematskim laboratorijskim ispitivanjem kako bi se postigao optimalan balans između efikasnosti, senzorne prihvatljivosti i potencijalno funkcionalnih karakteristika.

Dobijeni rezultati ukazuju da primena alginatnog premaza, posebno u kombinaciji sa etarskim uljem lavande, pozitivno utiče na očuvanje vizuelnih, olfaktornih i gustativnih

karakteristika sveže sečenih jabuka tokom sladištenja, kao i na ukupnu opštu prihvatljivost. Nasuprot tome, dodatak VFHD u premaz ima nepovoljan efekat na sve parametre ocenjivane u okviru senzorne analize, što ograničava njegovu primenu u očuvanju senzorskog kvaliteta voća.

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih u okviru ove doktorske disertacije mogu se izvesti zaključci koji se odnose na optimizaciju postupka dobijanja etarskog ulja lavande visokog kvaliteta i biološke aktivnosti, čija primena u biorazgradivim alginatnim premazima predstavlja efikasan pristup produženju roka trajanja sveže sečene jabuke.

- Suvo mlevenje i prosejavanje cvetova lavande smanjuju maksimalni prinos etarskog ulja za 26–35% u odnosu na korišćenje celih ili mokro mlevenih cvetova, te se za hidrodestilaciju preporučuje upotreba celih cvetova lavande, što smanjuje troškove i gubitke koji nastaju tokom mlevenja i prosejavanja, istovremeno skraćujući ukupno trajanje proizvodnog procesa.
- Predtretman neorganskim solima (NaCl i KCl u koncentracijama od 3–10%) i surfaktantom nije imao očekivan pozitivan uticaj na maksimalni prinos etarskog ulja dobijenog hidrodestilacijom celih cvetova lavande, dok upotrebom VFHD iz prethodnih hidrodestilacija kao deo destilacionog medijuma u narednim hidrodestilacijama (ciklus od 5 uzastopnih hidrodestilacija) dolazi do povećanja prinosa etarskog ulja lavande za 29%. Predtretmani biljnog materijala nisu imali značajan uticaj na sastav etarskog ulja.
- Pri sekvencijalnoj ultrazvučnoj hidrodestilaciji predtretman ultrazvukom olakšava inicijalno oslobađanje etarskog ulja iz biljnog tkiva zahvaljujući kavitacionom oštećenju ćelijskih i sekretornih struktura i skraćuje vreme ekstrakcije, međutim, pri intenzivnijim uslovima sonikacije može doći do formiranja stabilnih emulzija i promene fazne raspodele ulja, što može objasniti niži prinos u poređenju sa konvencionalnom metodom.
- Mikrotalasna hidrodestilacija ubrzava početnu ekstrakciju etarskog ulja lavande usled brzog i uniformnog zagrevanja i rane rupture sekretornih žlezda. Ipak, maksimalni prinos ostaje niži u poređenju sa konvencionalnom hidrodestilacijom, što ukazuje da intenzivno zagrevanje i isparavanje ne omogućavaju dovoljnu difuziju i potpuno oslobađanje svih aromatičnih komponenti iz biljnog materijala. Veća efikasnost mikrotalasa u sudovima većih zapremina može se objasniti boljom apsorpcijom mikrotalasne energije i smanjenim efektima lokalnog pregrevanja sistema.
- Sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija ubrzava početno oslobađanje etarskog ulja iz biljnog tkiva zahvaljujući sinergiji ultrazvuka i mikrotalasa, ali krajnji prinos

je manji u poređenju sa konvencionalnom i mikrotalasnom hidrodestilacijom. Ovo smanjenje može se objasniti kumulativnim efektima ultrazvučnog predtretmana i volumetrijskog zagrevanja mikrotalasa, narušavanjem integriteta sekretornih struktura, prevremenim oslobađanjem ulja, stvaranjem stabilnih emulzionih sistema, delimičnom difuzijom u vodenu fazu i gubicima lako isparljivih i termolabilnih komponenti, što ograničava trajanje difuziono-ispirajuće faze i ukupni prinos etarskog ulja.

- Poređenje metoda izolovanja etarskog ulja lavande prema efikasnosti izdvajanja etarskog ulja pokazuje da konvencionalna hidrodestilacija daje najveći maksimalni prinos (1,92 ml/100 g suvih cvetova), dok ultrazvučna (1,54 ml/100 g suvih cvetova), mikrotalasna (0,97 ml/100 g suvih cvetova) i sekvencijalna ultrazvučno-mikrotalasna metoda (0,86 ml/100 g suvih cvetova) daju niže vrednosti. Brži i intenzivniji postupci ubrzavaju početnu ekstrakciju, ali ne povećavaju ukupni prinos, pa kombinovana ultrazvučno-mikrotalasna metoda, bez pažljive optimizacije snage, amplitude i vremena, može biti manje efikasna u odnosu na klasični postupak.
- Na osnovu statističkih pokazatelja i analize karakteristika primenjenih kinetičkih modela, model I je identifikovan kao najpouzdaniji za opisivanje kinetike hidrodestilacije, nezavisno od primenjene tehnike izolovanja ulja. Ovaj model omogućava detaljno i mehanistički konzistentno razdvajanje brze i spore faze procesa, pokazuje visoku osetljivost na promene procesnih uslova i pruža najpotpuniji kvantitativni opis dinamike ekstrakcije. Zbog toga predstavlja čvrstu teorijsku osnovu za dublju analizu, optimizaciju i kontrolu procesa.
- Iako model I ostvaruje nešto bolje statističke pokazatelje u odnosu na model II, razlika između modela nije dovoljno izražena da bi opravdala primenu složenijeg modela u inženjerskoj praksi. Zbog jednostavnije strukture, manjeg broja parametara i lakše matematičke obrade, model II omogućava brzu i pouzdanu procenu kinetičkih parametara, jednostavniju implementaciju i stabilnu operativnu primenu. Njegova dobra sposobnost generalizacije i robusno ponašanje u realnim uslovima čine ga praktičnijim izborom za inženjerske proračune i svakodnevnu primenu, uprkos blago slabijim statističkim performansama u poređenju sa modelom I.
- Kod svih analiziranih etarskih ulja lavande uočava se dominacija linalola i linalil acetata, uz prisustvo lavandulil acetata, terpinen-4-ola, 1,8-cineola i borneola. Iako primenjena metoda destilacije nije imala uticaj na kvalitativni sastav, kvantitativni odnosi pojedinih komponenti

značajno variraju u zavisnosti od tehnike, što ukazuje da izbor metode omogućava ciljanu modulaciju hemijskog profila etarskog ulja lavande.

- Konvencionalna hidrodestilacija daje ulja sa najvećim sadržajem monoterpena i oksidovanih seskviterpena. Ultrazvučna hidrodestilacija povećava udeo linalola i njegovih estara, dok mikrotalasna metoda favorizuje oslobađanje estarskih komponenti, poput linalil acetata. Kombinovana ultrazvučno-mikrotalasna hidrodestilacija daje etarska ulja lavande sa najviše linalola i estara.
- Maksimalni prinos etarskog ulja zavisi od dominantnog mehanizma prenosa toplote i mase tokom procesa. Optimalna metoda izolovanja ulja zavisi od željenog cilja: ako je cilj maksimalni prinos etarskog ulja, pogodnija je konvencionalna hidrodestilacija, ako je cilj ušteda vremena i energije onda se kao pogodnija metoda preporučuje mikrotalasna hidrodestilacija.
- Primena metode odzivnih površina i istorijskog dizajna omogućila je precizno modelovanje procesa konvencionalne hidrodestilacije etarskog ulja lavande i identifikaciju optimalnih uslova (odnos cveta i vode od 1:10 g/ml, zapremina destilacionog suda od 2000 ml i brzina destilacije od 7,5 ml/min) za postizanje maksimalnog prinosa od 2,28 ml/100 g suvih cvetova.
- Etarsko ulje lavande dobijeno pod definisanim optimalnim uslovima je bleđožute boje, karakterističnog mirisa, a njegova gustina i indeks refrakcije u skladu su sa literaturnim podacima. Pokazuje umerenu antioksidativnu aktivnost ($EC_{50} = 10,13$ mg/ml) i dobru antimikrobnu aktivnost protiv gram-pozitivnih bakterija, naročito *B. cereus* i *S. aureus*. Odlikuje se visokim sadržajem oksigenisanih monoterpena, pri čemu su linalol (32,19%) i linalil acetat (18,29%) dominantne komponente, te je prema svojim karakteristikama pogodno za primenu u prehrambenoj i kozmetičkoj industriji.
- U cilju ispitivanja efekta primene etarskog ulja lavande u alginatnim premazima na očuvanje kvaliteta i produženje roka trajanja minimalno prerađenog voća, konkretno sveže sečene jabuke, etarsko ulje lavande dobijeno pod optimalnim uslovima (0,1% i 0,2%) i VFHD (25% i 50%) dodavani su u jestive alginatne premaze kojima je tretirana sečena jabuka.
- Primena formulisanih alginatnih premaza značajno je umanjila gubitak mase sveže sečene jabuke tokom 14 dana skladištenja na +4 °C, pri čemu je ukupni gubitak mase bio do 1,37%, u poređenju sa skoro 6% kod kontrolnog uzorka. Dodatak VFHD je doprineo manjem

gubitku mase u početnoj fazi čuvanja, dok razlike u koncentraciji etarskog ulja nisu imale značajan uticaj na efikasnost premaza.

- Primena alginatnih premaza značajno je usporila potamnjenje sveže sečene jabuke, pri čemu su premazi sa dodatkom etarskog ulja lavande pokazali oko 30% niže vrednosti indeksa potamnjenja u odnosu na kontrolu i dugotrajniji efekat očuvanja boje. Nasuprot tome, uzorci sa dodatkom 50% VFHD pokazali su lošije rezultate, jer prirodna obojenost VFHD utiče na povećanje indeksa potamnjenja.
- Tokom skladištenja sveže sečene jabuke pH vrednost je postepeno rasla, dok je titraciona kiselost opadala usled smanjenja sadržaja organskih kiselina nakon sečenja. Nakon desetog dana nije bilo razlike u pH vrednostima među uzorcima, dok je primena VFHD doprinela nešto boljim vrednostima ukupne kiselosti. Ipak, na osnovu rezultata zaključuje se da primenjeni premazi nisu efikasno očuvali kiselinski profil voća tokom celokupnog perioda skladištenja.
- Kod uzoraka premazanih alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% odnosno 0,2% etarskog ulja lavande, nakon 14 dana skladištenja na +4 °C sadržaj malondialdehida je bio manji nego kod kontrolnog uzorka što pokazuje da etarsko ulje lavande deluje kao antioksidaciono sredstvo i usporava oksidativni stres uzrokovan sečenjem jabuke.
- Dodavanje etarskog ulja lavande u alginatni premaz je uslovalo smanjenje ukupnog broja mikroorganizama na tretiranim uzorcima sveže sečenih jabuka u poređenju sa kontrolom tokom celokupnog perioda skladištenja. Efekat je nešto izraženiji kod primene 0,2% etarskog ulja lavande, što ukazuje da povećanje koncentracije etarskog ulja povećava efikasnost alginatnog premaza u smislu očuvanja mikrobne stabilnosti sveže sečene jabuke.
- Tretman alginatnim premazima sa dodatkom etarskog ulja lavande, nezavisno od primenjene koncentracije, značajno produžava mikrobiološku stabilnost sveže sečene jabuke, odlažući prekoračenje referentne vrednosti ukupnog broja kvasaca i plesni (2 log CFU/g) sa sedmog dana kod kontrole na desetodnevni period kod tretiranih uzoraka.
- Alginatni premazi sa dodatkom etarskog ulja lavande efikasno su očuvali boju sveže sečene jabuke tokom 14 dana skladištenja na +4 °C, dok je dodatak VFHD zbog svoje obojenosti uslovio niže početne ocene i brzo dalje pogoršanje ocena za boju dobijenih u okviru vizuelne faze senzorne analize sveže sečenih jabuka.

- Primena alginatnog premaza, sa ili bez dodataka, nije značajno uticala na miris sveže sečene jabuke, što ukazuje da primenjeni premazi nemaju uticaj na olfaktorne karakteristike sveže sečene jabuke.
- Alginatni premazi sa dodatkom etarskog ulja lavande efikasno su očuvali gustativni kvalitet sveže sečenih jabuka tokom 14 dana skladištenja na +4 °C, pri čemu su senzorne ocene ukusa ostale visoke i prihvatljive do kraja eksperimenta. Nasuprot tome, senzorne ocene uzoraka tretiranih premazima sa dodatkom VFHD, nezavisno od primenjene koncentracije, su nakon sedmog dana skladištenja bile na granici prihvatljivosti (ocena 3), što ukazuje da prisustvo VFHD u premazu negativno utiče na gustativni kvalitet sveže sečene jabuke.
- Primena alginatnog premaza, posebno u kombinaciji sa etarskim uljem lavande, pozitivno utiče na očuvanje vizuelnih, olfaktornih i gustativnih karakteristika sveže sečenih jabuka tokom skladištenja, kao i na ukupnu opštu prihvatljivost. Nasuprot tome, dodatak VFHD u premaz ima nepovoljan efekat na sve parametre ocenjivane u okviru senzorne analize, što ograničava njegovu primenu u očuvanju senzorskog kvaliteta voća i naglašava značaj optimizacije formulacije premaza.

9. LITERATURA

- Aayush K., McClements D.J., Sharma S., Sharma R., Singh G.P., Sharma K., Oberoi K., 2022, Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed Apple, *Food Control*, 141.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109188>
- Abed A.K., 2020, Effect of microwave power on the yield of essential oil from lavender, *Journal of Alasmarya University: Basic and Applied Sciences*, 5(2), 35 – 53.
<https://doi.org/10.59743/aujas.v5i2.1000>
- Aćimović M., Lončar B., Stanković Jeremić J., Cvetković M., Pezo L., Pezo M., Todosijević M., Tešević V., 2022, Weather conditions influence on lavandin essential oil and hydrolate quality, *Horticulturae*, 8, 281. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040281>
- Adams R.P., Stream C., 2007, Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry, 4th ed., Allured Publishing: IL, ISBN 978-1-932633-21-4.
- Adaszynska-Skwirzynska M., Dzieciol M., 2018, Comparison of chemical composition and antimicrobial activity of essential oils obtained from different cultivars and morphological parts of *Lavandula angustifolia*, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(6), 1532–1541. <https://doi.org/10.1080/0972060x.2018.1526123>
- Agriopoulou S., Stamatelopoulou E., Skiada V., Tsarouhas P., Varzakas T., 2020, Emerging Nanomaterial Applications for Food Packaging and Preservation: Safety Issues and Risk Assessment, *Proceedings*, 70, 7. https://doi.org/10.3390/foods_2020-07747
- Aguayo E., Requejo-Jackman C., Stanley R., Woolf A., 2010, Effects of calcium ascorbate treatments and storage atmosphere on antioxidant activity and quality of fresh-cut apple slices, *Postharvest Biology and Technology*, 57, 52-60.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.03.001>
- Akoh C.C., 2017, Food lipids, Chemistry, Nutrition, and Biotechnology, Fourth Edition, CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781315151854>
- Al-Hassan A.A., Norziah M.H., 2012, Starch–gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers, *Food Hydrocolloids*, 26, 108–117.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>

- Alehosseini A., Ghorani B., Sarabi-Jamab M., Tucker N., 2018, Principles of electrospraying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58 (14), 2346-2363.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1323723>.
- Ali A., Yeoh W.K., Forney C, M.W., M.W., 2017, Advances in postharvest technologies to extend the storage life of minimally processed fruits and vegetables, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58, 2632-2649.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1339180>
- Ali S., Akbar Anjum M., Nawaz A., Naz S., Ejaz S., Shahzad Saleem M., Tul-Ain Haider S., Ul Hasan M., 2021, Effect of Gum Arabic Coating on Antioxidative Enzyme Activities and Quality of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Fruit during Ambient Storage, *Journal of Food Biochemistry*, 45, 13656. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13656>
- Allende A., Tomás-Barberán F.A., Gil M.I., 2006, Minimal processing for healthy traditional foods, *Trends in Food Science and Technology*, 17(9), 513-519.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.005>
- Alves M.M., Gonçalves M.P., Rocha C.M.R., 2017, Effect of ferulic acid on the performance of soy protein isolate-based edible coatings applied to fresh-cut apples, *LWT*, 80, 409-415.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.013>
- Aljabary A.M.A., Awlqadr F.H., Altemimi A.B., Abdulrahman A.B.M., Saeed M.N., Hesarinejad M.A., 2025, Advances in oil-based edible coatings for postharvest preservation of fruits and vegetables: A comprehensive review of biopolymer types, functional plant oils, nanoemulsion systems, and application techniques, *Journal of Agriculture and Food Research*, 24, 102425. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102425>
- Amenaghawon N.A., Okhueigbe K.E., Ogbeide S.E., Okieimen C.O., 2014, Modelling the Kinetics of Steam Distillation of Essential Oils from Lemon Grass (*Cymbopogon* spp.), *International Journal of Applied Science and Engineering*, 12(2), 107–115.
<https://www.naturalingredient.org/wp/wp-content/uploads/Lemongrass-Modeling-the-Kinetics.pdf> (pristupljeno 08.02.2025.)
- Aminahmadi B., Vaes E., Willemse F., Braile D., Gomez L.N., Andersen S.K., Beer T., Kumar A., 2025, Experimental and Modeling-Based Approaches for Mechanistic Understanding

- of Pan Coating Process-A Detailed Review, *Pharmaceutics*, 18 (1), 19.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics18010019>
- Ananey-Obiri D., Matthews L., Azahrani M.H., 2018, Application of protein-based edible coatings for fat uptake reduction in deep-fat fried foods with an emphasis on muscle food proteins, *Trends in Food Science & Technology*, 80, 167-174.
<http://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.012>
- Anderson M.J., 2010, *Statistics Made Easy_ Blog*, 10(6).
<http://www.statease.com/news/faqalert10-06.html> (pristupljeno 15.02.2014.)
- Anderson M.J., Whitcomb P.J., 2005, *RSM simplified, Optimizing processes using response surface methods for design of experiments*, 2nd edition, Productivity Press, New York.
<https://doi.org/10.1201/9781315382326>
- Andrade R.D., Skurtys O., Osorio F.A., 2012, Atomizing spray systems for application of edible coatings, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11 (3), 323–337.
<https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00186.x>
- Andriani V., Handayani N.A., 2023, Recent technology of edible coating production: a review, *Materials Today: Proceedings*, 87, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.397>
- Andrys D., Kulpa D., Grzeszczuk M., Bihun M., Dobrowolska A., 2017, Antioxidant and antimicrobial activities of *Lavandula angustifolia* Mill. field-grown and propagated in vitro, *Folia Horticulturae*. 29, 161–180. <https://doi.org/10.1515/fhort-2017-0016>.
- Angelova V.R., Grekov D.F., Kisyov V.K., Ivanov K.I., 2015, Potential of Lavender (*Lavandula Vera* L.) for Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9, 522–529.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1105651>
- Anis A., Pal K., Al-Zahrani S.M., 2021, Essential oil-containing polysaccharide-based edible films and coatings for food security applications, *Polymers*, 13(4), 575.
<https://doi.org/10.3390/polym13040575>
- Aprotosoiaie A.C., Gille E., Trifan A., Luca V.S., Miron A., 2017, Essential oils of *Lavandula* genus: a systematic review of their chemistry, *Phytochemistry Reviews*, 16(4), 761–799.
<https://doi.org/10.1007/s11101-017-9517-1>
- Arnold M., Gramza-Michałowska A., 2022, Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review, *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 21 (6), 5038-5076. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13059>

- Artés F., Allende A., 2005, Minimal Fresh Processing of Vegetables, Fruits and Juices, *Emerging Technologies for Food Processing*, 583–597. <https://doi.org/10.1016/B978-012676757-5/50028-1>
- Asbahani A.E., Miladi K., Badri W., Sala M., Addi E.A., Casabianca H., Mousadik A.E., Hartmann D., Jilale A., Renaud F., Elaissari A., 2015, Essential oils: From extraction to encapsulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 483(1-2), 220-243. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.12.069>
- Aschemann-Witzel J., de Hooge I., Amani P., 2015, Consumer-related food waste: Causes and potential for action, *Sustainability*, 7, 6457-6477. <https://doi.org/10.3390/su7066457>
- Atanasova K., Savov V., 2023, Effect of process conditions on waterborne wood coating performance applied by dipping, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 1-22. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.3.1>
- Azarakhsh N., Osman A., Ghazali H.M., Tan C.P., Adzahan, N.M., 2012, Optimization of alginate and gellan-based edible coating formulations for fresh-cut pineapples, *International Food Research Journal*, 19(1), 279-285.
- Azarakhsh N., Osman A., Ghazali H.M., Tan C.P., Adzahan N.M., 2014, Lemongrass essential oil incorporated into alginate-based edible coating for shelf-life extension and quality retention of fresh-cut pineapple, *Postharvest Biology and Technology*, 88, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.09.004>
- Aziz M.S.A., Salama H.E., 2022, Development of alginate-based edible coatings of optimized UV-barrier properties by response surface methodology for food packaging applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 212, 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.107>
- Bader S.B., 2012, *The Lavender Lover's Handbook: The 100 Most Beautiful and Fragrant Varieties for Growing, Crafting, and Cooking*, 1st edition, Timber Press: Portland
- Bakkali F., Averbeck S., Averbeck D., Idaomar M., 2008, Biological effects of essential oils – A review, *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), 446 – 475. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106>
- Bakry A.M., Abbas S., Ali B., Majeed H., Abouelwafa M.Y., Mousa A., Liang L., 2015, Microencapsulation of oils: A comprehensive review of benefits, techniques, and

- applications, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 143-182.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>
- Bambace M.F., Alvarez M.V., Moreira M.R., 2024, Alginate coatings applied on apple cubes as a vehicle for *Lactocaseibacillus casei*: probiotic viability and overall quality of a new functional product, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(1), 74-83.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.13805>
- Barbieri C., Borsotto P., 2018, Essential oils: market and legislation, in: El-Shemy, H.A. (Ur.), *Potential of Essential Oils*, IntechOpen Ltd., London, UK.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.77725>
- Barkhordari P., Bazargani-Gilani B., 2021, Effect of apple peel extract and zein coating enriched with ginger essential oil on the shelf life of chicken thigh meat, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(3), 2727–2742. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00863-4>
- Barrett D.M., Beaulieu J.C., Shewfelt R., 2010, Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 369–389. <https://doi.org/10.1080/10408391003626322>
- Barry-Ryan C., O’Beirne D., 1999, Ascorbic Acid Retention in Shredded Iceberg lettuce as affected by minimal processing, *Journal of Food Science*, 64(3), 498-500.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15070.x>
- Barth M., Hankinson T.R., Zhuang H., Breidt F., 2010, Microbiological spoilage of fruits and vegetables, *Compendium of the Microbiological Spoilage of Foods and Beverages*.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0826-1_6.
- Basch E., Foppa I., Liebowitz R., Nelson J., Smith M., Sollars D., Ulbricht C., 2009, Monograph from Natural Standard: Lavender (*Lavandula Angustifolia* Miller), *Journal of Herbal Pharmacotherapy*, 4(2), 63–78. https://doi.org/10.1080/J157v04n02_07
- Başer K.H.C., Buchbauer G., 2024, *Handbook of essential oils: science, technology, and applications*, 3rd edition, CRC Press, Taylor & Francis Group
- Bassolé I.H.N., Juliani H.R., 2012, Essential Oils in Combination and Their Antimicrobial Properties, *Molecules*, 17(4), 3989-4006. <https://doi.org/10.3390/molecules17043989>

- Baydar H, Baydar N.G., 2005, The effects of harvest date, fermentation duration and Tween 20 treatment on essential oil content and composition of industrial oil rose (*Rosa damascena* Mill.), *Industrial Crops and Products*, 21, 2511–255.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.004>
- Beale D.J., Morrison P.D., Karpe A.V., Dunn M.S., 2017, Chemometric analysis of lavender essential oils using targeted and untargeted GC-MS acquired data for the rapid identification and characterization of oil quality, *Molecules*, 22, 1339.
<https://doi.org/10.3390/molecules22081339>
- Beaulieu J.C., 2011, Factors Affecting Sensory Quality of Fresh-Cut Produce, In book: *Advances in Fresh-Cut Fruits and Vegetables Processing*, Publisher: CRC Press, Taylor and Francis Group LLC, Editors: O Martín-Belloso, R Soliva Fortuny.
<https://doi.org/10.1201/b10263-6>
- Becerril R., Nerín C., Silva F., 2020, Encapsulation Systems for Antimicrobial Food Packaging Components: An Update, *Molecules*, 25, 1134.
<https://doi.org/10.3390/molecules25051134>
- Bendahou M., Muselli A., Grignon-Dubois M., Benyoucef M., Desjobert J.M., Bernardini A.F., Costa J., 2008, Antimicrobial activity and chemical composition of *Origanum glandulosum* Desf. essential oil and extract obtained by microwave extraction: Comparison with hydrodistillation, *Food Chemistry*, 106, 132–139.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.050>
- Besombes C., Allaf K., Berka-Zougali B., 2010, Instant controlled pressure drop extraction of lavandin essential oils: Fundamentals and experimental studies, *Journal of Chromatography A*, 1217(44), 6807–6815. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.08.050>
- Beuchat L.R., 2002, Ecological factors influencing survival and growth of human pathogens on raw fruits and vegetables, *Microbes and Infection*, 4 (4), 413–423.
[https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(02\)01555-1](https://doi.org/10.1016/S1286-4579(02)01555-1)
- Beulah A.M., Sucharitha K.V., 2025, Effect of Zein edible coatings on the postharvest quality of minimally processed papaya fruits fortified with ascorbic acid, *Vitae*, 32 (3).
<https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v32n3a361330>
- Bhadange Y.A., Carpenter J., Saharan V.K., 2024, A Comprehensive Review on Advanced Extraction Techniques for Retrieving Bioactive Components from Natural Sources, *ACS Omega*, 9, 31274–31297. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02718>

- Binello A., Orio L., Pignata G., Nicola S., Chemat F., Cravotto G., 2014, Effect of microwaves on the *in situ* hydrodistillation of four different *Lamiaceae*, *Comptes Rendus Chimie*, 17(3), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2013.11.007>
- Blažeković B., Yang W., Wang Y., Li C., Kindl M., Pepeljnjak S., Knežević V.S., 2018, Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of essential oils of *Lavandula × intermedia* “Budrovka” and *L. angustifolia* cultivated in Croatia, *Industrial Crops and Products*, 123, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.041>
- Blind K., 2010, The use of the regulatory framework for innovation policy, In: *The Theory and Practice of Innovation Policy*, Edward Elgar Publishing
- Bousbia N., Vian M.A., Ferhat M.A., Meklati B.Y., Chemat F., 2009, A new process for extraction of essential oil from Citrus peels: Microwave hydrodiffusion and gravity, *Journal of Food Engineering*, 90(3), 409–413. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.034>
- Bremenkamp I., Gallagher M.J.S., 2025, Edible Coatings for Ready-to-Eat Products: Critical Review of Recent Studies, *Sustainable Packaging Perspectives, Challenges and Emerging Trends, Polymers*, 17(3), 376. <https://doi.org/10.3390/polym17030376>
- Brecht J., 1995, Physiology of lightly processed fruits and vegetables, *Horticultura Science*, 30(1), 18–22. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.1.18>
- Butt J.G., Abbott J.A., 2000, Browning inhibition of fresh-cut ‘Anjou,’ ‘Bartlett,’ and ‘Bosc’ pears, *Hortscience*, 35(6), 1111–1113. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.6.1111>
- Cai C., Ma R., Duan M., Deng Y., Liu T., D. Lu D., 2020, Effect of starch film containing thyme essential oil microcapsules on physicochemical activity of mango, *LWT*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109700>
- Cakmak H., Kumcuoglu S., Tavman S., 2019, Electrospray coating of minimally processed strawberries and evaluation of the shelf-life quality properties, *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13082. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13082>
- Campaniello D., Bevilacqua A., Sinigaglia M., Corbo M.R., 2008, Chitosan: antimicrobial activity and potential applications for preserving minimally processed strawberries, *Food Microbiology*, 25, 992–1000. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.06.009>
- Carnaval L.S.C., Jaiswal A.K., Jaiswal S., 2024, Agro-Food Waste Valorization for Sustainable Bio-Based Packaging, *Journal of Composites Science*, 8, 1–24. <https://doi.org/10.3390/jcs8020041>

- Caser M., Falla N.M., Sonia Demasi S., Scariot V., 2023, From Fresh to Dried Lavender Flower: Changes in Phytochemical Profile According to Drying Method, *Horticultura*, 9(6), 700. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060700>
- Cavanagh H.M.A., Wilkinson J.M., 2002, Biological Activities of Lavender Essential Oil, *Phytotherapy Research*, 16(4), 301–308. <https://doi.org/10.1002/ptr.1103>
- Çelebi Uzkuç N.M., Uzkuç H., Berber M.M., Kuzu K.T., Toğay S.O., Hoşoğlu M.I., Toklucu A.K., Kurt S.B., Sahiner N., Yüceer Y.K., 2021, Stabilisation of lavender essential oil extracted by microwave-assisted hydrodistillation: Characteristics of starch and soy protein-based microemulsions, *Industrial Crops and Products*, 172, 114034. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114034>
- Chaudhari A.K., Das S., Dwivedi A., Dubey N.K., 2023, Application of chitosan and other biopolymers based edible coatings containing essential oils as green and innovative strategy for preservation of perishable food products: a review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 127688. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127688>
- Chawla R., Sivakumar S., Kaur H., 2021, Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements- a review, *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100024>
- Chekoual L., Aissat A., Ait-Kaci A.K., Benabdelkader T., 2018a, The effect of ultrasound pretreatment on the yield, chemical composition and antioxidant activity of essential oil from wild *Lavandula stoechas* L., *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21, 253–263. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1432419>
- Chekoual L., Aissat A., Ait-Kaci A.K., Benabdelkader T., 2018b, Comparative study of yield, chemical composition and antioxidant activity of wild Algerian *Lavandula stoechas* L. obtained by ultrasound pretreatment and by conventional hydrodistillation, *Phytothérapie*, 16, S109–S118. <https://doi.org/10.3166/phyto-2018-0105>
- Chekoual L., Aissat A., Benabdelkader T., Ait Kaci A.K., Boumeridja S., Lamari L., 2021, Effect of ultrasound pretreatment on the quality and antimicrobial activity of essential oils from four wildpopulations of Algerian *Lavandula stoechas* L.: comparison with conventional hydrodistillation, *Journal of Applied Biological Sciences*, 15(1), 75-90.
- Chemat F., Lucchesi M.E., 2006, Microwave-assisted extraction of essential oils, U.A. Loupy (Ed.), *Microwaves in organic synthesis*, 2nd edition, Wiley-VCH., 959–983. <https://doi.org/10.1002/9783527619559.ch22>

- Chemat F., Abert-Vian M., Dangles O., 2007, Essential oils as antioxidants, *International Journal of Essential Oil Therapeutics*, 1(1), 4–15.
- Chemat F., Zill-e-Huma, Khan, M.K., 2011, Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction, *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Chemat F., Abert-Vian M., Fernandez X., 2012, Microwave-assisted extraction of essential oils and aromas, *UF. Chemat & G. Cravotto (Ur.)*, Microwave-assisted extraction for bioactive compounds, Springer, 53–86. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4830-3_3
- Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.-G., Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.-S., Abert-Vian M. 2017, Ultrasound-assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review, *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Chen C., Peng X., Zeng R., Chen M., Wan C., Chen J., 2016, *Ficus hirta* fruits extract incorporated into an alginate-based edible coating for Nanfeng mandarin preservation, *Scientia Horticulturae*, 202, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.046>
- Chen F., Liu S., Zhao Z., Gao W., Ma Y., Wang X., Luo D., 2020, Ultrasound pretreatment combined with microwave-assisted hydrodistillation of essential oils from *Perilla frutescens* (L.) Britt. leaves and its chemical composition and biological activity, *Industrial Crops and Products*, 143, 111908. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111908>
- Chen G., Sun F., Wang S., Wang W., Dong J., Gao F., 2021, Enhanced extraction of essential oil from *Cinnamomum cassia* bark by ultra-sound assisted hydrodistillation, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 36, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.007>
- Chen Z., Wu K., Zhu W., Wang Y., Su C., Yi F., 2022, Chemical compositions and bioactivities of essential oil from perillaleaf (*Perillae folium*) obtained by ultrasonic-assisted hydrodistillation with natural deep eutectic solvents, *Food Chemistry*, 375, 131834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131834>
- Chen X., Shang S., Yan F., Jiang H., Zhao G., Tian S., Chen, R., Chen D., Dang Y., 2023, Antioxidant activities of essential oils and their major components in scavenging free radicals, inhibiting lipid oxidation and reducing cellular oxidative stress, *Molecules*, 28, 4559. <https://doi.org/10.3390/molecules28114559>

- Cheng Y., Cai X., Zhang X., 2024, Applications in Pickering emulsions of enhancing preservation properties: Current trends and future prospects in active food packaging coatings and films, *Trends in Food Science & Technology*, 151, 104643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104643>
- Chiabrando V., Giacalone G., 2015, Effect of essential oils incorporated into an alginate-based edible coating on fresh-cut apple quality during storage, *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7, 251–259. <https://doi.org/10.3920/QAS2013.0337>
- Chiabrando V., Giacalone G., 2019, Effects of citrus essential oils incorporated in alginate coating on quality of fresh-cut Jintao kiwifruit, *Journal of Food and Nutrition Research*, 58, 177–186.
- Chiumarell M., Ferrary C.C., Sarantópoulos C.I.G.L., Hubinger M.D., 2011, Fresh cut “Tommy Atkins” mango pre-treated with citric acid and coated with cassava (*Manihot esculenta* Crantz) starch or sodium alginate, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.05.004>
- Chou S.Y., Lo S.L., Hsieh C.H., Chen C.L., 2009, Sintering of MSWI fly ash by microwave energy, *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 357–362. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.06.100>
- Chouhan S., Sharma K., Guleria S., 2017, Antimicrobial activity of some essential oils-present status and future perspectives, *Medicines*, 4(3), 58. <https://doi.org/10.3390/medicines4030058>
- Cisneros-Zevallos L., Krochta J.M., 2003, Dependence of coating thickness on viscosity of coating solution applied to fruits and vegetables by dipping method, *Journal of Food Science*, 68, 503–510. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05702.x>
- Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), 2015, Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing, 25th Informational Supplement, CLSI document M100-S25, Wayne, Pennsylvania, SAD
- Cloete L., Picot-Allain C., Ramasawmy B., Neetoo H., Ramful-Baboolall D., Emmambux M.N., 2023, Drivers and barriers for commercial uptake of edible coatings for fresh fruits and vegetables industry-A review, *Food Reviews International*, 39(6), 3481-3514. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012795>

- Cofelice M., Lopez F., Cuomo F., 2019, Quality Control of Fresh-Cut Apples after Coating Application, *Foods*, 8, 189. <https://doi.org/10.3390/foods8060189>
- Commission Directive 2002/72/EC of 6 August 2002 relating to plastic materials and articles intended to come into contact with foodstuffs (Text with EEA relevance)
- Commission Regulation (EC) No 450/2009 of 29 May 2009 on active and intelligent materials and articles intended to come into contact with food
- Conte A., Angiolillo L., Mastromatteo M., Del Nobile M.A., 2013, Technological Options of Packaging to Control Food Quality, *Food Industry*, 32, InTech, 137–44. <https://doi.org/10.5772/53151>
- Costa C., Conte A., Alessandro M., Nobile D., 2016, Use of Metal Nanoparticles for Active Packaging Applications, Elsevier Ltd, Academic Press, London, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800723-5.00031-0>
- Crișan I., Ona A., Vârban D., Muntean L., Vârban R., Stoie A., Mihăiescu T., Morea A., 2023, Current trends for lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) crops and products with emphasis on essential oil quality, *Plants*, 12, 357. <https://doi.org/10.3390/plants12020357>
- Cruz-Monterrosa R.G., Rayas-Amor A.A., González-Reza R.M., 2023, Application of Polysaccharide-Based Edible Coatings on Fruits and Vegetables: Improvement of Food Quality and Bioactivities, *Polysaccharides*, 4, 99-115. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides4020008>
- Cui H., Surendhiran D., Li C., Lin L., 2020, Biodegradable zein active film containing chitosan nanoparticle encapsulated with pomegranate peel extract for food packaging, *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100511. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100511>
- Cvetkovic D., Stanojevic J., Djordjevic N., Karabegović I., Stanojevic Lj., Pavlic B., Danilović B., 2022, Effect of different extraction techniques on the composition of essential oil isolated from fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) rhizome, *Journal Of Essential Oil Research*. <https://doi.org/10.1080/10412905.2022.2107102>
- Dai L., Wang X., Mao X., He L., Li C., Zhang J., Chen Y., 2024, Recent advances in starch-based coatings for the postharvest preservation of fruits and vegetables, *Carbohydrate Polymers*, 15, 328, 121736. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121736>.
- Dainelli D., 2015, Global legislation for active and intelligent packaging materials, Baughan JSBT-GL for FCM (Ed.), Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 8, Woodhead Publishing, 183-199.

- Damyeh M.S., Niakousari M., Saharkhiz M.J., 2016, Ultrasound pretreatment impact on *Prangos ferulacea* Lindl. and *Satureja macrosiphonia* Bornm. essential oil extraction and comparing their physicochemical and biological properties, *Industrial Crops and Products* 87, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.025>
- Danh L.T., Han L.N., Triet N.D.A., Zhao J., Mammucari R., Foster N., 2012, Comparison of chemical composition, antioxidant and antimicrobial activity of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) essential oils extracted by supercritical CO₂, hexane and hydrodistillation, *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3481–3489. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1026-z>
- Danila E., Kaya D.A., Patrascu M., Kaya M.A., Kumbakisak S., 2018, Comparative study of *Lavandula angustifolia* essential oils obtained by microwave and classical hydrodistillation, *Revista de Chimie*, 69(8), 2240-2244. <https://doi.org/10.37358/RC.18.8.6508>
- Da Porto C., Decorti D., Kikic I., 2009, Flavour compounds of *Lavandula angustifolia* L. to use in food manufacturing: Comparison of three different extraction methods, *Food Chemistry*, 112(4), 1072–1078. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.015>
- Darmawati E., Nava N., Suyatma N., 2019, Aloe vera as a coating material for tropical fruits using spray method, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 309, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/309/1/012011>
- Das S., Ghosh A., Mukherjee A., 2021, Nanoencapsulation-based edible coating of essential oils as a novel green strategy against fungal spoilage, mycotoxin contamination, and quality deterioration of stored fruits: an overview, *Frontiers in Microbiology*, 12, 768414. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.768414>
- Da Silva G.L., Luft C., Lunardelli A., Amaral R.H., Melo D.A.D.S., Donadio M.V.F., Oliveira J.R.D., 2015, Antioxidant, analgesic and anti-inflammatory effects of lavender essential oil, *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 87(2), 1397–1408. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520150056>
- Dawange B., Pawar S., Surawase R., Maru A., 2018, Applications of fluidized bed processing: a review, *World Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 414-420. <https://doi.org/10.20959/wjpr201814-12893>
- De Corato U., 2019, Improving the shelf-life and quality of fresh and minimally-processed fruits and vegetables for a modern food industry: A comprehensive critical review from the

- traditional technologies into the most promising advancements, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(6), 940-975. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1553025>
- Deák T., 1996, *Handbook of Food Spoilage Yeasts*, 2nd ed., CRC Press
- Denny E.F.K., 2001, *Field distillation for herbaceous oils*, 3rd edition, Lilydale, Australia
- Denoya G.I., Vaudagna S.R., Chamorro V.C., Godoy M.F., Budde C.O., Polenta G.A., 2017, Suitability of different varieties of peaches for producing minimally processed peaches preserved by high hydrostatic pressure and selection of process parameters, *LWT-Food Science and Technology*, 78, 367-372. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.006>
- Despinasse Y., Moja S., Soler C., Jullien F., Pasquier B., Bessière J.M., Baudino S., Nicolè F., 2020, Structure of the Chemical and Genetic Diversity of the True Lavender over Its Natural Range, *Plants*, 9, 1640. <https://doi.org/10.3390/plants9121640>
- Détár E., Németh É.Z., Gosztola B., Demján I., Pluhár, Z., 2020, Effects of variety and growth year on the essential oil properties of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) and lavandin (*Lavandula x intermedia* Emeric ex Loisel.), *Biochemical Systematics and Ecology*, 90, 104020. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2020.104020>
- Détár E., Zámboi-Németh É., Gosztola B., Harmath A., Ladányi M., Pluhár Z., 2021, Ontogenesis and harvest time are crucial for high quality lavender – role of the flower development in essential oil properties, *Industrial Crops and Products*, 163, 113334. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113334>
- Devi L.S., Jaiswal A.K., Jaiswal S., 2024, Lipid incorporated biopolymer based edible films and coatings in food packaging: A review, *Current Research in Food Science*, 8, 100720. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100720>
- Dewettinck K., Huyghebaert A., 1998, Top-spray fluidized bed coating: effect of process variables on coating efficiency, *LWT-Food Science and Technology*, 31(6), 568-575. <https://doi.org/10.1006/fstl.1998.0417>
- Dhillon N., Saxena D., Jabroot K., 2024, Application of different coatings in Ber fruit: a review, *International Journal of Research in Agronomy*, 7(4), 568-572. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i4h.605>
- Dhiman A., Suhag R., Singh A., Prabhakar P.K., 2022, Mechanistic understanding and potential application of electrospraying in food processing: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(30), 8288-8306. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1926907>

- Dhingra S., Sharma S., Saha S., 2022, Infection resistant surface coatings by polymer brushes: strategies to construct and applications, *ACS Applied Bio Materials Journal*, 5(4), 1364-1390. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c01006>
- Díaz-Montes E., Castro-Muñoz R., 2021, Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview, *Food*, 10, 249. <https://doi.org/10.3390/foods10020249>
- Ding X., Zheng Y., Jia R., Li X., Wang B., Zhao Z., 2024, Comparison of Fruit Texture and Storage Quality of Four Apple Varieties, *Foods*, 13(10), 1563. <https://doi.org/10.3390/foods13101563>
- do Amaral P.H.R., Andrade P.L., de Conto L.C., 2019, Microencapsulation and its uses in food science and technology: A review, *Microencapsulation - Processes, Technologies and Industrial Applications*. IntechOpen Ltd., London, UK. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81997>
- Dob T., Dahmane D., Tayeb B., Chelghoum C., 2005, Chemical composition of the essential oil of *Lavandula dentata* L. from Algeria, *International Journal of Aromatherapy*, 15, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijat.2005.03.010>
- Dobros N., Zawada K., Paradowska K., 2022, Phytochemical Profile and Antioxidant Activity of *Lavandula angustifolia* and *Lavandula x intermedia* Cultivars Extracted with Different Methods, *Antioxidants*, 11(4), 711. <https://doi.org/10.3390/antiox11040711>
- Donati I., Paoletti S., 2009, Material properties of alginates, *Alginates: Biology and Applications*, 1-53. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92679-5_1
- Dong F., Wang X., 2018, Guar Gum and Ginseng Extract Coatings Maintain the Quality of Sweet Cherry., *LWT-Food Science and Technology*, 89, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.035>
- Dong X., Wrolstad R.E., Sugar D., 2000, Extending shelf-life of fresh-cut pears, *Journal of Food Science*, 65(1), 181–186. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb15976.x>
- Donsì F., Marchese E., Maresca P., Pataro G., Vu K.D., Salmieri S., Ferrari G., 2015, Green beans preservation by combination of a modified chitosan based-coating containing nanoemulsion of mandarin essential oil with high pressure or pulsed light processing, *Postharvest Biology and Technology*, 106, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.006>
- Dordevic D., Gablo N., Zelenkova L., Dordevic S., Tremlova B., 2024, Utilization of Spent Coffee Grounds as a Food By-Product to Produce Edible Films Based on κ -Carrageenan

- with Biodegradable and Active Properties, *Foods*, 13, 1833. <https://doi.org/10.3390/foods13121833>
- dos Santos S.M., Malpass G.R.P., Okura M.H., Granato A.C., 2018, Edible active coatings incorporated with *Cinnamomum cassia* and *Myristica fragrans* essential oils to improve shelf-life of minimally processed apples, *Food Technology*, 48(12), e20180447. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180447>
- Drinić Z., Pljevljakušić D., Janković T., Zdunić G., Bigović D., Šavikin K., 2021, Hydrodistillation and microwave-assisted distillation of *Sideritis raeseri*: comparison of the composition of the essential oil, hydrolat and residual water extract. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 24, 100538. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100538>
- Du Y., Yang F., Yu H., Cheng Y., Gu Y., Yao W., Xie Y., 2021, *Food Chemistry*, 351, 129284. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129284>
- Duangkhamchan W., Ronsse F., Pieters J.G., 2018, CFD study of top-spray fluidized bed coating process, *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*, 2nd ed, CRC Press, 531-560. <https://doi.org/10.1201/9781351263481>
- Dušková E., Dušek K., Indrák P., Smalová K., 2015, Postharvest changes in essential oil content and quality of lavender flowers, *Industrial Crops and Products* 79, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.007>
- Dorđević V., Balanč B., Belščak-Cvitanović A., Lević S., Trifković K., Kalušević A., Kostić I., Komes D., Bugarski B., Nedović V., 2015, Trends in encapsulation technologies for delivery of food Bioactive compounds, *Food Engineering Reviews*, 7(4), 452-490. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9106-7>
- El-Kharraf S., El-Guendouz S., Abdellah F., El Hadrami E.M., Machado A.M., Tavares C.S., Figueiredo A.C., Miguel M.G., 2022, Unassisted and carbon dioxide-assisted hydro- and steam-distillation: modelling kinetics, energy consumption and chemical and biological activities of volatile oils, *Pharmaceuticals*, 15, 567. <https://doi.org/10.3390/ph15050567>
- Elyemni M., Garoui E.M., Aazza S., Guaougouaou F.E., Ouarghi H., Markouk M., 2019, Extraction of essential oils of *Rosmarinus officinalis* L. by two different methods: Hydrodistillation and microwave assisted hydrodistillation, *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 3659432. <https://doi.org/10.1155/2019/3659432>
- EN ISO 3515:2002: Oil of Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.). Geneva, Switzerland, 2002

- Erkmen O., Bozoglu T.F., 2016, Food Microbiology: Principles into Practice, Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119237860>
- European Pharmacopoeia 10.0: Published in Accordance with the Convention on the Elaboration of a European Pharmacopoeia; European Directorate for the Quality of Medicines & Healthcare of the Council of Europe: Strasbourg, France, 2019.
- Fallik E., Alkalai-Tuvia S., Chalupowicz D., 2021, Hot water rinsing and brushing of fresh produce as an alternative to chemical treatment after harvest—the story behind the technology, *Agronomy*, 11(8), 1653. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081653>
- Fan X., 2022, Chemical inhibition of polyphenol oxidase and cut surface browning of fresh-cut apples, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63 (27), 8737-8751.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2061413>.
- Farhat A., Ginies C., Romdhane M., Chemat F., 2009, Eco-friendly and cleaner process for isolation of essential oil using microwave energy Experimental and theoretical study, *Journal of Chromatography A*, 1216, 5077–5085.
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.04.084>
- Farina R. Passafiume I. Tinebra E. Palazzolo G. Sortino, 2020, Use of aloe vera gel-based edible coating with natural anti-browning and anti-oxidant additives to improve post-harvest quality of fresh-cut ‘fuji’ apple, *Agronomy*, 10(4), 515.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10040515>
- Feng Z., Wu G., Liu C., 2018, Edible coating based on whey protein isolate nanofibrils for antioxidation and inhibition of product browning, *Food Hydrocolloids*, 79, 179-188.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.028>
- Feng Z., Shao B., Yang Q., 2025a, The force of Zein self-assembled nanoparticles and the application of functional materials in food preservation, *Food Chemistry*, 463, 141197.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141197>
- Feng Z., Sun P., Zhao F., 2025b, Advancements and challenges in biomimetic materials for food preservation: A review, *Food Chemistry*, 463.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141119>
- Feng Z., Zhang Q., Wang Y., 2025c, Anti-Aspergillus niger mechanism of small molecular combinations of essential oils and their application in extending the shelf-life of bread, *Food Bioscience*, 64, 105979. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105979>

- Filly A., Fernandez X., Minuti M., Visinoni F., Cravotto G., Chemat F., 2014, Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: from laboratory to pilot and industrial scale, *Food Chemistry*, 150, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.139>.
- Filly A., Fabiano-Tixier A.S., Louis C., Fernandez X., Chemat F., 2016, Water as a green solvent combined with different techniques for extraction of essential oil from lavender flowers. *Comptes Rendus Chimie*, 19(6), 707–717. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.01.018>
- Flanagan D., 2020, Lavender flower and oil production. Fact sheet, Horticulture, 12, Teagasc Ashtown Research Centre, Ashtown, Dublin. <https://www.teagasc.ie/media/website/rural-economy/rural-development/diversification/12---Lavender-Flower--Oil-Production.pdf> (Pristupljeno 10.07.2023).
- Galus S., Kadzińska J., 2015, Food applications of emulsionbased edible films and coatings, *Trends in Food Science & Technology*, 45, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.011>
- Galus S., Kibar E.A.A., Gniewosz M., Kraśniewska K., 2020, Novel materials in the preparation of edible films and coatings — A review, *Coatings*, 10 (7), 674. <https://doi.org/10.3390/coatings10070674>
- Gao Q., Feng Z., Wang J., 2024a, Application of nano-ZnO in the food preservation industry: antibacterial mechanisms, influencing factors, intelligent packaging, preservation film and safety, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2387327>
- Gao Q., Qi J., Tan Y., Ju J., 2024b, Antifungal mechanism of *Angelica sinensis* essential oil against *Penicillium roqueforti* and its application in extending the shelf life of bread, *International Journal of Food Microbiology*, 408, 110427. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110427>
- Garcia L.C., Pereira L.M., deLuca Sarantópoulos C.I.G., Hubinger M.D., 2011, Effect of antimicrobial starch edible coating on Shelf-Life of fresh strawberries, *Packaging Technology and Science*, 25, 413–425. <https://doi.org/10.1002/pts.987>
- Garzoli S., Laghezza Masci V., Franceschi S., Tiezzi A., Giacomello P., Ovidi E., 2021, Headspace/GC–MS analysis and investigation of antibacterial antioxidant and cytotoxic activity of essential oils and hydrolates from *Rosmarinus officinalis* L. and *Lavandula angustifolia* Miller, *Foods*, 10(8), 1768. <https://doi.org/10.3390/foods10081768>

- Gašić M.J., 1985, Etarska ulja, IHTM, Beograd
- Gavahian M., Chu Y.H., 2018, Ohmic accelerated steam distillation of essential oil from lavender in comparison with conventional steam distillation, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 50, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.006>
- Gedikoğlu A., Öztürk H.İ., Özçoban A., 2024, Analysis of the chemical composition, antimicrobial, and antioxidant qualities of microwave- and supercritical CO₂-extracted lavender essential oils cultivated in a hyperarid region of Türkiye, *Molecules*, 29(23), 5605. <https://doi.org/10.3390/molecules29235605>
- Ghavidel R.A., Davoodi M.G., Adib A.F., Tanoori T., Sheykholeslami Z., 2013, Effect of selected edible coatings to extend shelf-life of fresh-cut apples, *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6(16), 1171-1178.
- Ghazanfari N., Mortazavi S.A., Yazdi F.T., Mohammadi M., 2020, Microwave-assisted hydrodistillation extraction of essential oil from coriander seeds and evaluation of their composition, antioxidant and antimicrobial activity, *Heliyon*, 6, e04893. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04893>
- Giannakas A.E., Zaharioudakis K., Kollia E., Kopsacheili A., Avdylaj L., Georgopoulos S., Leontiou A., Karabagias V.K., Kehayias G., Ragkava E., Proestos C., Salmas C.E., 2023, The Development of a Novel Sodium Alginate-Based Edible Active Hydrogel Coating and Its Application on Traditional Greek Spreadable Cheese, *Gels*, 9 (10), 807. <https://doi.org/10.3390/gels9100807>
- Giannoulis K.D., Evangelopoulos V., Gougoulas N., Wogiatzi E., 2020, Lavender organic cultivation yield and essential oil can be improved by using bio-stimulants, *Acta Agriculturae Scandinavica, Sect. B -Soil Plant Sci.* 70, 648–656. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1833974>
- Giray F.H., 2018, An analysis of world lavender oil markets and lessons for Turkey, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21, 1612–1623. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1574612>
- Global Market Insights, 2024, Processed Fruits and Vegetables Market Size – By Type, By Product, By Processing Equipment, Forecast, 2025 – 2034, Published Date: September 2024, Report ID: GMI3232, from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/processed-fruits-and-vegetables-market> (pristupljeno 17.05.2025.)

- Golijan J., Veličković M., Dimitrijević B., Marković D., 2017, Biljna proizvodnja po konceptu organske poljoprivrede u svetu i Republici Srbiji - istorijat i trenutno stanje. *Acta Agriculturae Serbica*, 22, 67–88. <https://doi.org/10.5937/AASer1743067G>
- Golmakani M.T., Rezaei K., 2008a, Comparison of microwave-assisted hydrodistillation with the traditional hydrodistillation method in the extraction of essential oils from *Thymus vulgaris* L., *Food Chemistry*, 109, 925–930. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.084>
- Golmakani M.T., Rezaei K., 2008b, Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from *Zataria multiflora* Boiss, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(5), 448–454. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200700239>
- Gomes B.A.F., Alexandre A.C.S., Vieira de Andrade G.A., Zanzini A.P., Araújo de Barros H.E., Ferraz e Silva L.M.S, Costa P.A., Boas E.V.B.V., 2023, Recent advances in processing and preservation of minimally processed fruits and vegetables: A review – Part 2: Physical methods and global market outlook, *Food Chemistry Advances*, 2, 100304. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100304>
- Gonzalez-Rivera J., Campanella B., Pulidori E, Bramanti E., Tiné M.R., Bernazzani L., Onor M., Bärberi P., Celia Duce C., Carlo Ferrari C., 2023, From volatiles to solid wastes: Towards the full valorization of lavender and rosemary by simultaneous in situ microwaves and ultrasounds irradiation extraction, *Industrial Crops and Products*, 194, 116362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116362>
- Gropper S.S., Smith J.L., 2013, *Advanced nutrition and human metabolism*, 8 edition, Cengage Learning
- Gross J., 1987, *Pigments in Fruits*, Academic Press, London, 303
- Guerra I.C.D., de Oliveira P.D.L., Santos M.M.F., Lúcio A.S.S.C., Tavares J.F., de Souza E.L., 2016, The effects of composite coatings containing chitosan and *Mentha (piperita* L. or *x villosa* Huds) essential oil on postharvest mold occurrence and quality of table grape cv. Isabella, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.008>
- Guerreiro A.C., Gago C.M.L., Faleiro M.L., Miguel M.G.C., Antunes M.D.C., 2016, Edible coatings enriched with essential oils for extending the shelf-life of ‘Bravo de Esmolfe’ fresh-cut apples, *International Journal of Food Science & Technology*, 51(1), 87-95. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12949>

- Gul O., Dar A.H., Dash K.K., Bhagyaraj G.V.S., Khan S.A., Sultan U., Ayoub W.S., Zahoor I., Rasool S., Dwivedi M., 2023, Essential oil extraction from lavender using negative pressure cavitation extraction and coating to extend grape shelf life, *Applied Food Research*, 3(2), 100335. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100335>
- Günel-Köroğlu D., Capanoglu E., 2025, Plant protein-based edible films and the effect of phenolic additives, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65 (11), 2155-2175. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2328181>.
- Gupta V., Biswas D., Roy S., 2022, A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications, *Materials*, 15(17), 5899. <https://doi.org/10.3390/ma15175899>
- Hadri A., Benmimoun Y., Miloudi K., Bouhadda Y., Elsayed S., Abderrahmane H., 2023, Effect of pulsed electric field treatment on the extraction of essential oil from lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.), *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 20, 37–46. <https://www.researchgate.net/publication/368291511> (Pristupljeno 11.12.2024.)
- Han J.W., Ruiz-Garcia L., Qian J.P., Yang X.T., 2018, Food Packaging: A Comprehensive Review and Future Trends, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 860-877. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12343>
- Han Y., Su Z., Du J., 2023, Effects of apple storage period on the organic acids and volatiles in apple wine, *LWT—Food Science and Technology*, 173, 114389. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114389>
- Handa S.S., Khanuja S.P.S., Longo G., Rakesh D.D., 2008, Extraction technologies for Medicinal and Aromatic Plants, International centre for science and high technology, Trieste
- Hassan B., Chatha S.A.S., Hussain A.I., 2018, Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 10951107. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097>
- Hassanpouraghdam M.B, Nazemiyeh H., Shalamzari M.S., Mehrabani L.V., 2012, Salt effects on the quality and recovery of *Mentha pulegium* L. essential oil, *Chemija*, 23(2), 113–117.
- Hassiotis C.N., Ntana F., Lazari D.M., Poullos S., Vlachonasios K.E., 2014, Environmental and developmental factors affect essential oil production and quality of *Lavandula angustifolia* during flowering period, *Industrial Crops and Products*, 62, 359–366.

- <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.048>.
- Hayes B.L., 2002, Microwave synthesis: Chemistry at the speed of light, CEM Publishing, Matthew, NC
- Heard G.M., 2002, Microbiology of fresh-cut produce.
- Hedayati S., Tarahi M., Madani A., Mazloomi S.M., Hashempur M.H., 2025, Towards a Greener Future: Sustainable Innovations in the Extraction of Lavender (*Lavandula spp.*) Essential Oil, *Foods*, 14(1), 100. <https://doi.org/10.3390/foods14010100>
- Hielscher Ultrasonics, 2024, Ultrasonic hydrodistillation of essential oils, <https://www.hielscher.com/ultrasonic-hydrodistillation-of-essential-oils.htm>. (Pristupljeno 10.09.2025.)
- Hou J., Sun Y., Chen F., Yu L., Mao Q., Wang L., Guo X., Liu C., 2016, Analysis of Microstructures and Macrottextures for Different Apple Cultivars Based on Parenchyma Morphology, *Microscopy Research And Technique*, 79(4), 304-312. <https://doi.org/10.1002/jemt.22631>
- Hundie K.B., Bullo T.A., Bayisa Y.M., Akuma D.A., Bultum M.S., 2023, Optimization of microwave-assisted hydro-distillation essential oil extracted from *Rumex crispus* leaves using definitive screening design, *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 104665. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104665>
- Hurst W.C., 1995, Sanitation of lightly processed fruits and vegetables, *Hortscience*, 31(1), 22-24. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.1.22>
- IFST, 1999, Microbiological Criteria for Foods, Institute of Food Science and Technology, London.
- Ilić Z.S., Kevrešan Ž., Šunić L., Stanojević L., Milenković L., Stanojević J., Milenković A., Cvetković D., 2023, Chemical profiling and antioxidant activity of wild and cultivated sage (*Salvia officinalis* L.) essential oil, *Horticulturae*, 9, 624. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060624>
- Iñiguez-Moreno M., 2026, A review of edible coatings for fruits and vegetables: Biopolymeric bases, application strategies, regulatory challenges, and future research gaps, *International Journal of Biological Macromolecules*, 335(1), 149260. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149260>
- Iriti M., Colnaghi G., Chemat F., Smadja J., Faoro F., Visinoni F.A., 2006, Histo-cytochemistry and scanning electron microscopy of lavender glandular trichomes following

- conventional and microwave-assisted hydrodistillation of essential oils: a comparative study, *Flavour and Fragrance Journal*, 21, 704–712. <https://doi.org/10.1002/ffj.1692>
- Islam M., Khan M.Z.H., Sarkar M.A.R., Absar N., Sarkar S.K., 2013, Changes in acidity, TSS, and sugar content at different storage periods of the postharvest mango (*Magnifera indica* L.) influenced by Bavistin DF, *International Journal of Food Science*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/939385>
- Jacotet-Navarro M., Rombaut N., Deslis S., Fabiano-Tixier A.S., Pierre F.X., Bily A., Chemat F., 2016, Towards a “dry” bio-refinery without solvents or added water using microwaves and ultrasound for total valorization of fruits and vegetables by-products, *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/C5GC02542G>.
- Jadhav H., Jadhav A., Morabiya Y., Takkalkar P., Qureshi S.S., Baloch A.G., Mubarak N.M., 2020, Combined impact of ultrasound pre-treatment and hydrodistillation on bioactive compounds and GC–MS analysis of *Cinnamomum cassia* bark extract, *Waste and Biomass Valorization*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01031-3>
- Jadhav J.J., Jadeja G.C., Desai M.A., 2023, Ultrasound-assisted hydrodistillation for extraction of essential oil from clove buds – A step towards process improvement and sustainable outcome, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 189, 109404. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109404>
- Jamróz E., Juszczak L., Kucharek M., 2018, Investigation of the Physical Properties, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Ternary Potato Starch-Furcellaran-Gelatin Films Incorporated with Lavender Essential Oil, *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 1094–1101. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.014>
- Jeevanandam J., Kulabhusan P.K., Danquah M.K., 2019, Biofunctional nanoparticles for protein separation, purification and detection, (Ur. Pogaku, R) *Horizons in Bioprocess Engineering*, Chapter 7, Publisher: Springer, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29069-6_7
- Jiang Y., Pen L., Li J., 2004, Use of citric acid for shelf life and quality maintenance of fresh-cut Chinese water chestnut, *Journal of Food Engineering*, 63, 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.004>
- Ju J., Xie Y., Guo Y., Cheng Y., Qian H., Yao W., 2019, Application of edible coating with essential oil in food preservation, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59, 2467–2480. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1456402>

- Kakoei H., Mortazavian A.M., Mofid V., Gharibzahedi S.M.T., Hosseini H., 2023, Single and combined hydrodistillation techniques of microwave and ultrasound for extracting bio-functional hydrosols from Iranian *Eryngium caucasicum* Trautv, Chemical Papers, 77, 533–547. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02474-9>
- Kalemba D., Kunicka A., 2003, Antibacterial and antifungal properties of essential oils, Current Medicinal Chemistry, 10, 813–829. <https://doi.org/10.2174/0929867033457719>
- Kalita P., Roy P.K., Bhattacharjee B., Goswami A., Pachau L., Roy S., 2025, Alginate-based coating in post-harvest fruits preservation: A comprehensive review, International Journal of Biological Macromolecules, 320, 1, 145799. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145799>
- Kaloustian J., Pauli A.M., Pastor J., 2000, Chemical and Thermal Analysis of the Biopolymers in the Lavandin, Journal of Applied Polymer Science, 77(7), 1629–1641. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20000815\)](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000815))
- Kapetanakou A.E., Nestora S., Evageliou V., 2019, Skandamis P.N., Sodium alginate–cinnamon essential oil coated apples and pears: Variability of *Aspergillus carbonarius* growth and ochratoxin-A production, Food Research International, 119, 876–885. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.072>
- Kappe C.O., Stadler A., 2005, Microwaves in Organic and Medicinal Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- Karakaya S., El S.N., Karagozlu N., Sahin S., Sumnu G., Bayramoglu B., 2014, Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from rosemary, Journal of Food Science and Technology, 51, 1056–1065. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0610-y>
- Karimi S., Sharifzadeh S., Abbasi H., 2020, Sequential ultrasound-microwave assisted extraction as a green method to extract essential oil from *Zataria multiflora*, Journal of Food and Bioprocess Engineering, 3, 101–109. <https://doi.org/10.22059/jfabe.2020.308833.1064>
- Khalid M.A., Niaz B., Saeed F., Afzaal M., Islam F., Hussain M., Mahwish, Khalid H.M.S., Siddeeg A., Al-Farga A., 2022, Edible coatings for enhancing safety and quality attributes of fresh produce: A comprehensive review, International Journal of Food Properties, 25, 1817–1847. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2107005>
- Khalid S., Chaudhary K., Amin S., Raana S., Zahid M., Naeem M., Khaneghah A.M., Aadil R.M., 2024, Recent advances in the implementation of ultrasound technology for the

- extraction of essential oils from terrestrial plant materials: A comprehensive review, *Ultrasonics Sonochemistry*, 107, 106914. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106914>
- Khan M.K.I., Schutyser M., Schroën K., Boom R., 2014a, Barrier properties and storage stability of edible coatings prepared with electrospraying, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 23, 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.03.001>
- Khan M.K.I., Cakmak H., Tavman Ş., Schutyser M., Schroën K., 2014b, Anti-browning and barrier properties of edible coatings prepared with electrospraying, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 25, 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.10.006>.
- Khan K., Verma R.K., 2020, Essential oil bearing aromatic plants: their potential for sequestering carbon in marginal soils of India, *Soil Use and Management*, 36, 565–570. <https://doi.org/10.1111/sum.12624>.
- Kiprovski B., Zeremski T., Varga A., Čabarkapa I., Filipović J., Lončar B., Aćimović M., 2023, Essential oil quality of lavender grown outside its native distribution range: a study from Serbia, *Horticulturae*, 9, 816. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070816>
- Kiran Babu G.D., Sharma A., Singh B., 2016, Volatile composition of *Lavandula angustifolia* produced by different extraction techniques, *Journal of Essential Oil Research*, 28, 489–500. <https://doi.org/10.1080/10412905.2016.1162210>
- Kirkinci S., Gercek Y.C., Baştürk F.N., Yildirim N., Gidik B., Bayram N.E., 2024, Evaluation of lavender essential oils and by-products using microwave hydrodistillation and conventional hydrodistillation, 14(1), 20922. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71115-w>.
- Kitić D., 2002, Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet, Univezitet u Nišu, Niš.
- Kišgeci J., Adamović D., Kota E., 1987, *Proizvodnja lekovitog bilja*, Nolit, Beograd, Srbija.
- Kıvrak Ş., 2018, Essential oil composition and antio idant activities of eight cultivars of Lavender and Lavandin from western Anatolia, *Industrial Crops and Products*, 117, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.089>
- Kizildag N., 2023, Pullulan films with PCMs: Recyclable bio-based films with thermal management functionality, *Coatings*, 13, 414. <https://doi.org/10.3390/coatings13020414>
- Klai N., Yadav B., El Hachimi O., Pandey A., Sellamuthu B., Tyagi R.D., 2021, Agro-Industrial Waste Valorization for Biopolymer Production and Life-Cycle Assessment Toward Circular Bioeconomy, In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Circular Bioeconomy-*

- Current Developments and Future Outlook, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 515–555. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821878-5.00007-6>
- Kovács E., Djedjro G.A., 1994, Changes in organic acids of fruits after different treatments, *Acta Horticulturae*, 368, 251-261. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.368.31>
- Kovačević N., 2004, Osnovi farmakognozije, Institut za farmakognozu, Farmaceutski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija.
- Kozuharova E., Simeonov V., Batovska D., Stoycheva C., Valchev H., Benbassat N., 2023, Chemical composition and comparative analysis of lavender essential oil samples from Bulgaria in relation to the pharmacological effects, *Pharmacia* 70(2), 395-403. <https://doi.org/10.3897/pharmacia.70.e104404>
- Kumar N., Pratibha, Neeraj, Petkoska A.T., Al-Hilifi S.A., Fawole O.A., 2021, Effect of chitosan–pullulan composite edible coating functionalized with pomegranate peel extract on the shelf life of mango (*Mangifera indica*), *Coatings*, 11, 764. <https://doi.org/10.3390/coatings11070764>
- Kumar P.V., 2022, A comprehensive review on clove (*Caryophyllus aromaticus* L.) essential oil and its significance in the formulation of edible coatings for potential food applications, *Frontiers in Nutrition*, 987674. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.987674>
- Kumoro A.C., Wardhani D.H., Retnowati D.S., Haryani K., Yustika S., Fajar T.A., 2021, Extraction of essential oil from ultrasoundpre-treated citronella grass (*Cymbopogon nardus*) leaves by hydrodistillation method, *Chemical Engineering Transactions*, 87, 643–648. <https://doi.org/10.3303/CET2187108>
- Kysar D.A., 2004, Preferences for processes: the process/product distinction and the regulation of consumer choice, *Harvard Law Review*, 118, 526.
- Kwon K.S., Mosa M.A., Kim S.H., 2022, Multi-nozzle electrospray method for high-throughput uniform superhydrophobic coating, *Research Square*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1304740/v1>
- Labri K., Moghrani H., Ihadadene R., Hamitouche H., Maachi R., 2022, The application of the full factorial design and response surface methodology in optimization conditions for essential oils extraction from *Lavandula stoechas*, *Carum carvi* and *Eucalyptus camaldulensis*: effect of plants particle size on the extraction of essential oils, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100830. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100830>

- Lafarga T., Colás-Medá P., Abadias M., 2019, Strategies to reduce microbial risk and improve quality of fresh and processed strawberries, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.012>
- Lahkimi A., Nechad I., Chaouch M., Eloutassi N., 2020, Antibacterial antifungal and antioxidant activity of *Lavandula angustifolia* of the middle atlas central (Morocco), *Moroccan Journal of Chemistry*, 8 (4) 905-918.
<https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v8i4.18680>
- Lainez-Cerón E., Jiménez-Munguía M.T., López-Malo A., Ramírez-Corona N., 2021, Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation of eucalyptus essential oil, *Heliyon*, 7(10), e08234.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08234>
- Lahkimi A., Louaste B., Nechad I., Chaouch M., Eloutassi N., 2020, Antibacterial, antifungal and antioxidant activity of *Lavandula angustifolia* of the middle atlas central (Morocco). *Moroccan Journal of Chemistry*, 8, 905–918. <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM%2FMORJCHEM-V8I4.18680>.
- Lan X., Liu Y., Wang L., 2023, A review of curcumin in food preservation: Delivery system and photosensitization, *Food Chemistry*, 424, 136464.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136464>
- Lee H.Y., Ko M.J., 2021, Thermal decomposition and oxidation of β -caryophyllene in black pepper during subcritical water extraction, *Food Science and Biotechnology*, 30, 1527–1533. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00983-z>
- Lei G., Song C., Wang E., Zhao S., Yang C., 2020, Effects and potential mechanisms of mixed-salt substrate on yield, hydrodistillation kinetics and essential oil composition of flowers of tree peony ‘Taiping Hong’ (Paeoniaceae), *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 23(5), 970-984. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2020.1840447>
- Lesage-Meessen L., Bou M., Sigoillot J.C., Faulds C.B., Lomascolo A., 2015, Essential oils and distilled straws of lavender and lavandin: a review of current use and potential application in white biotechnology, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 3375–3385. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6511-7>
- Lesage-Meessen L., Bou M., Ginies C., Chevret D., Navarro D., Drula E., Bonnin E., del Río J.C., Odinet E., Bisotto A., Berrin J.G., Sigoillot J.C., Faulds C.B., Lomascolo A., 2018, Lavender- and lavandin-distilled straws: An untapped feedstock with great potential for

- the production of high-added value compounds and fungal enzymes, *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 217. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1218-5>
- Leung A.Y., Foster S., 1996, *Encyclopedia of common natural ingredients used in food, drugs and cosmetics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA.
- Li N., Cheng Y., Li Z., Yue T., Yuan Y., 2024, An alginate-based edible coating containing lactic acid bacteria extends the shelf life of fresh strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.), *International Journal of Biological Macromolecules*, 274 (Pt 1), 133273. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133273>
- Li Y., Fabiano-Tixier A.S., Tomao V., Cravotto G., Chemat F., 2013, Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower as an alternative solvent, *Ultrasonics Sonochemistry*, 20, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.005>
- Li J.H., Li W., Luo S., Ma C.H., Liu S.X., 2019a, Alternate ultrasound/microwave digestion for deep eutectic hydro-distillation extraction of essential oil and polysaccharide from *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill, *Molecules*, 24, 1288. <https://doi.org/10.3390/molecules24071288>
- Li X.Y., Du X.L., Liu Y., Tong L.J., Wang Q., Li J.L., 2019b, Rhubarb extract incorporated into an alginate-based edible coating for peach preservation, *Scientia Horticulturae*, 257, 108685. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108685>
- Li Z., Wei Y., Cao Z., Jiang S., Chen Y., X. Shao X., 2021, The Jasmonic acid signaling pathway is associated with Terpinen-4-ol-Induced disease resistance against botrytis cinerea in strawberry fruit, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(36), 10678-10687. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04608>
- Li F., Yan Y., Gu C., 2022, Preparation and characterization of phenolic Acid-Chitosan derivatives as an edible coating for enhanced preservation of saimaiti apricots, *Foods*, 11. <https://doi.org/10.3390/foods11223548>
- Lidström P., Tierney J., Wathey B., Westman J., 2001, Microwave assisted organic synthesis – review, *Tetrahedron*, 57(45), 9225–9283. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)00906-1](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)00906-1)
- Lieu D.M., Dang T.T.K., Nguyen H.T., 2025, Protein and polysaccharide edible coatings: A promising approach for fruits preservation - recent advances, *Food Chemistry: X*, 27, 102388. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102388>

- Lima Á.M., Cerqueira M.A., Souza B.W.S., Santos E.C.M., Teixeira J.A., Moreira R.A., Vicente A.A., 2010, New edible coatings composed of galactomannans and collagen blends to improve the postharvest quality of fruits - influence on fruits gas transfer rate, *Journal of Food Engineering*, 97(1), 101–109.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.09.021>
- Link S.O., Drake S.R., Thiede M.E., 2004, Prediction Of Apple Firmness From Mass Loss And Shrinkage, *Journal of Food Quality*, 27, 13-26. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2004.tb00634.x>
- Lipin A.A., Lipin A.G., 2022, Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process, *Particuology*, 61, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.03.010>
- Lis-Balchin M., 2002, *Lavender: the genus Lavandula (Medicinal and aromatic plants-industrial profiles)*, 1st edition, CRC Press, London.
- Liu B., Fu J., Zhu Y., Chen P., 2018, Optimization of microwave-assisted extraction of essential oil from lavender using response surface methodology, *Journal of Oleo Science*, 67, 1327–1337. <https://doi.org/10.5650/jos.ess18019>
- Liu X.Y., Ou H., Xiang Z.B., Gregersen H., 2019, Optimization, chemical constituents and bioactivity of essential oil from *Iberis amara* seeds extracted by ultrasound-assisted hydro-distillation compared to conventional techniques, *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 13, 100204.
<https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2019.100204>
- Liu B., Wang J., Zhang Y., Liu D., Zhang Y., 2022, Structure and properties of gelatin edible film modified using oxidized poly(2-hydroxyethyl acrylate) with multiple aldehyde groups, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 6349–6357.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.12001>
- Liyanapathirana A., 2023, Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables, *Coatings*, 13(7), 1177. <https://doi.org/10.3390/coatings13071177>
- Lopes A.I., Melo A., Caleja C., Pereira E., Finimundy T.C., Afonso T.B., Silva S., Ivanov M., Soković M., Tavará F.K., Barros L., Pintado M., 2023, Evaluation of Antimicrobial and Antioxidant Activities of Alginate Edible Coatings Incorporated with Plant Extracts, *Coatings*, 13(9), 1487. <https://doi.org/10.3390/coatings13091487>

- López V., Nielsen B., Solas M., Ramírez M.J., Jäger A.K., 2017, Exploring Pharmacological Mechanisms of Lavender (*Lavandula angustifolia*) Essential Oil on Central Nervous System Targets, *Frontiers in Pharmacology*, 8, 280.
<https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00280>
- Lu J., Wang H., Zhang Y., Wang H., Deng L., Chen L., Cao J., Wang B., Jiang W., 2025, Caffeic acid enhances the postharvest quality by maintaining the nutritional features and improving the aroma volatiles for nectarine fruit, *Food Chemistry*, 464(2), 141633.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141633>
- Lu Y., Luo Q., Chu Y., Tao N., Deng S., Wang L., Li L., 2022, Application of gelatin in food packaging: A review, *Polymers*, 14 (3), 436. <https://doi.org/10.3390/polym14030436>
- Lucchesi M.E., Chemat F., Smadja J., 2004, Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: Comparison with conventional hydro-distillation, *Journal of Chromatography A*, 1043, 323–327. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.05.083>
- Lucchesi M.E., Smadja J., Bradshaw S., Louw W., Chemat F., 2007, Solvent free microwave extraction of *Elletaria cardamomum* L.: a multivariate study of a new technique for the extraction of essential oil, *Journal of Food Engineering*, 79, 1079–1086.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.029>
- Lukošiūtė S., Šernaitė L., Morkeliūnė A., Rasiukevičiūtė N., Valiuškaitė A., 2020, The Effect of *Lamiaceae* Plants Essential Oils on Fungal Plant Pathogens in vitro, *Agronomy Research*, 8, 2761–2769. <https://doi.org/10.15159/ar.20.225>
- Luo Z., Li G., Du Y., Yi J., Hu X., Jiang Y., 2024, Enhancing Fresh-Cut Apple Preservation: Impact of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Chitosan–Apple Essence Microencapsulation Coating on Browning and Flavor, *Foods*, 13(10), 1585.
<https://doi.org/10.3390/foods13101585>
- Ma C.-H., Liu T.-T., Yang L., Zu Y.-G., Chen X., Zhang L., Zhang Y., Zhao C., 2011, Ionic liquid-based microwaveassisted extraction of essential oil and biphenyl cyclooctene lignans from *Schisandra chinensis* Baill fruits, *Journal of Chromatography A*, 1218, 8573–8580. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.09.075>
- Maes C., Bouquillon S., Fauconnier M.L., 2019, Encapsulation of essential oils for the development of Biosourced pesticides with controlled release: A review, *Molecules*, 24(14), 2539. <https://doi.org/10.3390/molecules24142539>

- Mahalakshmi L., Leena M.M., Moses J.A., Anandharamakrishnan C., 2020, Micro- and nano-encapsulation of β -carotene in zein protein: Size-dependent release and absorption behavior, *Food & Function*, 11, 1647–1660. <https://doi.org/10.1039/C9FO02088H>
- Mahfud M., Ma'sum Z., Bhuana D.S., Altway A., Yuniati Y., 2022, A comparison of essential oil extraction from the leaves of lemongrass (*Cymbopogon nardus* L.) using two microwave-assisted methods, *Journal of Applied Engineering Science*, 20(3), 881-888. <https://doi.org/10.5937/jaes0-34006>
- Maizura M., Fazilah A., Norziah M.H., A.A. Karim A.A., 2007, Antibacterial activity and mechanical properties of partially hydrolyzed sago starch-alginate edible film containing lemongrass oil, *Journal of Food Science*, 72. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00427.x>
- Manojlović V., 2008, Imobilizacija biološki aktivnih supstanci i ćelija u mikro- i nanočestičnim sistemima, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Marić M., Grassino A.N., Zhu Z., Barba F.J., Brnčić M., Rimac Brnčić S., 2018, An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction, *Trends in Food Science & Technology*, 76, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022>
- Marković T., 2011, Etarska ulja i njihova bezbedna primena, Institut za proiĉavanje lekovitog bilja “dr Josif Panĉić”, Beograd
- Marković M.S., Radosavljević D.B., Pavićević V.P., Ristić M.S., Milojević Š.Ž., Bošković-Vragolović N.M., Veljković V.B., 2018, Influence of common juniper berries pretreatment on the essential oil yield, chemical composition and extraction kinetics of classical and microwave-assisted hydrodistillation, *Industrial Crops and Products*, 122:402–413. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.018>
- Marovska G., Vasileva I., Petkova N., Ognyanov M., Gandova V., Stoyanova, A., Merdzhanov P., Simitchiev A., Slavov A., 2022a, Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) industrial by-products as a source of polysaccharides, *Industrial Crops and Products*, 188, 115678. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115678>.
- Marovska G.I., Vasileva I.N., Aggelidou A., Yantcheva N.S., Slavov A.M., 2022b, Physico-chemical characteristics of polysaccharides isolated from lavender by-products, *Bulgarian Chemical Communications*, 54(1), 81 – 86.

- <https://doi.org/10.34049/bcc.54.1.MAEP07>
- Martins B.A., de Albuquerque P.B.S., M.P., Souza M.P., 2022, Bio-based Films and Coatings: Sustainable Polysaccharide Packaging Alternatives for the Food Industry, *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 4023-4039. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02442-0>
- Martins E., Poncelet D., Rodrigues R.C., Renard D., 2017, Oil encapsulation techniques using alginate as encapsulating agent: Applications and drawbacks, *Journal of Microencapsulation*, 34(2), 1-18. <https://doi.org/10.1080/02652048.2017.1403495>
- Martucci J. F., Gende L. B., Neira L. M., Ruseckaite R. A., 2015, Oregano and lavender essential oils as antioxidant and antimicrobial additives of biogenic gelatin films, *Industrial Crops and Products*, 71, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.079>
- Mathe S., Monyela N.F., Belay Z.A., van Breda V.M., Oluwafemi J. Caleb O.J., 2025, Effects of sodium alginate coating and cold plasma treatment on biochemical changes, microbial load, and microstructure of 'Granny Smith' apples during storage, *Technology in Horticulture*, 5, e001. <https://doi.org/10.48130/tihort-0024-0029>
- Matloob A., Ayub H., Mohsin M., Ambreen S., Khan F.A., Oranab S., Rahim M.A., Khalid W., Nayik G.A., Ramniwas S., Ercisli S., 2023, A review on edible coatings and films: Advances, composition, production methods, and safety concerns, *ACS Omega*, 8, 28932–28944. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03459>
- McCarthy R.A., Mathews R.H., 1994, Nutritional quality of fruits and vegetables subject to minimal processes, In: Wile, R.C. (Ed.), *Minimal Processed Refrigerated Fruits and Vegetables*, Chapman and Hall, 313 326.
- Mehta D., 2023, Quality evaluation of tomatoes coated by an advanced electrostatic spray coating system, *International Journal of Food Science & Technology*, 58(12), 6351-6361. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16743>
- Meijer G.W., Lähteenmäki L., Stadler R.H., Weiss J., 2021, Issues surrounding consumer trust and acceptance of existing and emerging food processing technologies, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61, 97-115. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1718597>
- Meireles A., 2008, *Extracting Bioactive Compounds for Food Products: Theory and Applications*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA

- Melo J., Quintas C., 2023, Minimally processed fruits as vehicles for foodborne pathogens, *AIMS Microbiology*, 9(1), 1-19. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2023001>
- Mikus M., Szulc K., Galus S., 2025, The Use of Bioactive Edible Coatings Based on Pectin and Phenolic Acids for Enhancing Quality Attributes of Golden Delicious Apples During Storage, *Processes*, 13(12), 3821. <https://doi.org/10.3390/pr13123821>
- Milani J.M., Tirgarian B., 2020, An overview of Edible Protein-Based Packaging: Main Sources, Advantages, Drawbacks, Recent Progressions and Food Applications, *Journal of Packaging Technology and Research*, 4, 103-115. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00086-w>
- Milani J.M., Nemati A., 2022, Lipid - Based Edible Films and Coatings: A Review of Recent Advances and Applications, *Journal of Packaging Technology and Research*, 6, 11–22. <https://doi.org/10.1007/s41783-021-00130-3>
- Milojević S., Stojanović T., Palić R., Lazić M., Veljković V., 2008, Kinetics of distillation of essential oil from comminuted ripe juniper (*Juniperus communis* L.) berries, *Biochemical Engineering Journal*, 3, 553–574. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.10.017>
- Milojević S.Ž., Radosavljević D.B., Pavićević V.P., Pejanović S., Veljković, V.B., 2013, Modeling the kinetics of essential oil hydrodistillation from plant materials, *Hemijska industrija*, 67(5), 843–859. <https://doi.org/10.2298/HEMIND121026009M>
- Miteluţ A.C., 2021, Latest developments in edible coatings on minimally processed fruits and vegetables: a review, *Foods*, 10(11), 2821. <https://doi.org/10.3390/foods10112821>
- Mohammed A.S.A., Naveed M., Jost N., 2021, Polysaccharides; Classification, Chemical Properties, and Future Perspective Applications in Fields of Pharmacology and Biological Medicine (A Review of Current Applications and Upcoming Potentialities), *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 2359-2371. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02052-2>
- Mollaei S., Sedighi F., Habibi B., Hazrati S., Asgharian P., 2019, Extraction of essential oils of *Ferulago angulata* with microwave-assisted hydrodistillation, *Industrial Crops and Products*, 137, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.015>
- Moradi S., Fazlali A., Hamed H., 2018, Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from rosemary: comparison with traditional distillation. *Avicenna Journal of Medical Biotechnology*, 10 (1), 22–28. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29296263/> (pristupljeno 22.03.2023.)

- Moradi-Sadr J., Ebadi M.T., Ayyari M., Ghomi H, 2023, Optimization of ultrasonic Bath and cold plasma pre-treatments in the spearmint essential oil isolation process, Food Science & Nutrition, 11(4), 1904-1915. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3224>
- Morales M., Munné-Bosch S., 2019, Malondialdehyde: Facts and Artifacts, Plant Physiology, 180(3), 1246-1250. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00405>
- Moreira M.D.R., Roura S.I., Ponce A., 2011, Effectiveness of chitosan edible coatings to improve microbiological and sensory quality of fresh cut broccoli, LWT-Food Science and Technology, 44, 2335-2341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.04.009>
- Moreira M.R., Cassani L., Martín-Belloso O., Soliva-Fortuny R., 2015, Effects of polysaccharide-based edible coatings enriched with dietary fiber on quality attributes of fresh-cut apples, Journal of Food Science and Technology, 52(12), 7795–7805. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1907-z>
- Mostefa M.B., Kabouche A., Abaza I., Aburjai T., Touzani R., Kabouche Z., 2014, Chemotypes investigation of *Lavandula* essential oils growing at different North African soils, Journal of Materials and Environmental Science, 5(6), 1896-1901.
- Moussa A.H.H., Benaliouche H., Sbartaï I., Sbartaï H., 2023, Biological activities and chemical characterization of *Lavandula angustifolia* essential oil from Seraïdi, Northeastern Algeria, Biodiversitas, 24(8), 4535-4542 <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240856>
- Moussi Imane M., Houda F., Said Amal A.H., Kaotar N., Mohammed T., Imane R., Farid H., 2017, Phytochemical composition and antibacterial activity of Moroccan *Lavandula angustifolia* Miller, Journal of Essential Oil Bearing Plants, 20(4), 1074–1082. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2017.1363000>
- Muñoz-Tebar N., Pérez-Álvarez J.A., Fernández-López J., Viuda-Martos M., 2023, Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review, Polymers, 15 (2), 396. <https://doi.org/10.3390/polym15020396>
- Muntean L.S., Tămas M., Muntean S., Muntean L., Duda M.M., Vârban D.I., Florian S., 2016, Treatise of cultivated and spontaneous medicinal plants, 2nd edition, Risoprint, Cluj-Napoca, Romania.
- Munteanu B.S., Vasile C., 2021, Encapsulation of natural bioactive compounds by electrospinning—Applications in food storage and safety, Polymers, 13(21), 3771. <https://doi.org/10.3390/polym13213771>

- Naeem M., Khan A.M.M., 2025, Essential Oil-Bearing Plants: Agro-techniques, Phytochemicals, and Healthcare Applications, Academic Press
- Najar B., Pistelli L., Fratini F., 2022, Exploitation of marginal hilly land in Tuscany through the cultivation of *Lavandula angustifolia* Mill.: Characterization of its essential oil and antibacterial activity, *Molecules*, 27, 3216. <https://doi.org/10.3390/molecules27103216>
- Nazzaro F., Fratianni F., De Martino L., Coppola R., De Feo V., 2013, Effect of essential oils on pathogenic bacteria, *Pharmaceuticals*, 6, 1451-1474. <https://doi.org/10.3390/ph6121451>
- Ncube L.K., Ude A.U., Ogunmuyiwa E.N., Zulkifli R., Beas I.N., 2020, Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials, *Materials*, 13, 4994. <https://doi.org/10.3390/ma13214994>
- Niemira B.A., Fan X., 2014, Fruits and Vegetables: Advances in Processing Technologies to Preserve and Enhance the Safety of Fresh and Fresh-Cut Fruits and Vegetables, In: Batt, C.A., Tortorello, M.L. (Ed.), *Encyclopedia of Food Microbiology*, 1, Elsevier Ltd, Academic Press, London, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00428-6>
- Nikšić H., Kovač-Bešović E., Makarević E., Durić K., Kusturica J., Muratovic S., 2017, Antiproliferative, antimicrobial, and antioxidant activity of *Lavandula angustifolia* Mill. essential oil, *Journal of Health Sciences*, 7(1), 35-43. <https://doi.org/10.17532/jhsci.2017.412>
- Nora F.M.D., Borges C.D., 2017, Ultrasound pretreatment as an alternative to improve essential oils extraction, *Ciencia Rural*, 47, e20170173. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2017017>
- Nunes C., Silva M., Farinha D., 2023, Edible Coatings and Future Trends in Active Food Life Increasing, *Foods*, 12, 3-4.
- Ochoa E., Saucedo-Pompa S., Rojas-Molina R., 2011, Evaluation of a Candelilla Wax-based Edible Coating to Prolong the Shelf-life Quality and Safety of Apples, *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 6(1), 92-98.
- Oduro K.O.A., 2021, Edible Coating, In book: *Postharvest Technology - Recent Advances, New Perspectives and Applications*, Ahiduzzaman M. (Ur.), IntechOpen Ltd., London, UK. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101283>
- Olascuaga-Castillo K., Castillo-Medina O., Villacorta-Zavaleta M., Diaz-Ortega J., Blanco-Olano C., Altamirano-Sarmiento D., Valdiviezo-Campos J., 2024, Extraction of essential

- oils by hydrodistillation of four aromatic species: conditioning, extraction conditions, yield and chemical composition. *Scientia Agropecuaria*, 15, 385–408.
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.029>
- Olivas G.I., Barbosa-Cánovas G.V., 2005, Edible coatings for fresh-cut fruits, *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 45(7-8), 657-670.
<https://doi.org/10.1080/10408690490911837>
- Olivas G.I., Mattinson D.S., Barbosa-Canovas G.V., 2007, Alginate coatings for preservation of minimally processed ‘Gala’ apples, *Postharvest Biology and Technology* 45, 89–96.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.11.018>
- Oliveira M., Abadias M., Usall J., 2015, Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables – A review, *Trends in Food Science & Technology*, 46, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.017>
- Osei-Kwarteng M., Ogwu M.C., Mahunu G.K., N.A. Afoakwah N.A., Ogwu M.C., Izah S.C., Ntuli N.R., 2024, *Post-harvest Food Quality and Safety in the Global South: Sustainable Management Perspectives BT - Food Safety and Quality in the Global South*, Springer Nature Singapore, Singapore, 151-195.
- Özdemir K.S., Gökmen V., 2019, Effect of Chitosan-Ascorbic Acid Coatings on the Refrigerated Storage Stability of Fresh-Cut Apples, *Coatings*, 9, 503.
<https://doi.org/doi:10.3390/coatings9080503>
- Palanisamy S., Saravana Kumar B.K., Vetrivel A., 2025, Nanoplastics in heat-sensitive food packaging: A review of migration, detection, health, and environmental impacts, *Food Control*, 169, 111002. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111002>
- Pandey V.K., Islam R.U., Shams R., Dar A.H., 2022, A comprehensive review on the application of essential oils as bioactive compounds in nano-emulsion based edible coatings of fruits and vegetables, *Applied Food Research*. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100042>
- Pandey V.K., Srivastava S., Singh R., Dar A.H., Dash K.K., 2023, Effects of clove essential oil (*Caryophyllus aromaticus* L.) nanoemulsion incorporated edible coating on shelf-life of fresh cut apple pieces, *Journal of Agriculture and Food Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100791>
- Parmar V.M., Laxmiben C.D., D. Kanzaria D., 2023, Strategies for extending shelf life of fresh fruits, *Research Matrix*, 1(10), 2321-7073.

- Parreidt T.S., Müller K., Schmid M., 2018, Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications, *Foods*, 7 (10), 170. <https://doi.org/10.3390/foods7100170>
- Patil P., Waghmare J., 2024, Lavender oil: A comprehensive review of composition and applications, *Asian Journal of Research in Chemistry*, 17(6), 377-6. <https://doi.org/10.52711/0974-4150.2024.00063>
- Patil V., Shams R., Dash K.K., 2023, Techno-functional characteristics, and potential applications of edible coatings: a comprehensive review, *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100886. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100886>
- Patrascu M., Radoiu M., 2016, Rose essential oil extraction from fresh petals using synergetic microwave and ultrasound energy: chemical composition and antioxidant activity assessment, *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 10, 136–142. <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2016.03.004>
- Pavia D.L., Lampman G.M., Kriz G.S., Vyvyan J.R., 2015, Introduction to spectroscopy, 5th edition, Department of Chemistry, Western Washington University, Bellingham, Washington
- Pavlátková L., Sedlářiková J., Pleva P., Peer P., Uysal-Unalan I., Janalíková M., 2023, Bioactive zein/chitosan systems loaded with essential oils for food-packaging applications, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(3), 1097-1104. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11978>
- Pellegrino M., Godwin Elechi J.O., Plastina P., Loizzo M.R., 2024, Application of Natural Edible Coating to Enhance the Shelf Life of Red Fruits and Their Bioactive Content, *Applied Sciences*, 14(11), 4552. <https://doi.org/10.3390/app14114552>
- Perdones Á., Escriche I., Chiralt A., Vargas M., 2016, Effect of chitosan–lemon essential oil coatings on volatile profile of strawberries during storage, *Food chemistry*, 197, 979–986. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.054>
- Perera C.O., Baldwin E.A., 2001, Biochemistry of fruits, *Biochemistry of fruits and its implications on processing*, In: Arthy D., Ashurst P.R. (Ed.), *Fruit Processing: Nutrition, Products and Quality Management*, 2nd edition, Aspen Publisher, Inc, Garthersburg, MD, USA.
- Perera C.O., Smith B., 2013, Chapter 11 - Technology of Processing of Horticultural Crops, *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, Second Edition, 259–315. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00011-2>

- Peretto G., Du W.X., Avena-Bustillos R., Berrios J., Sambo P., McHugh T., 2017, Electrostatic and conventional spraying of alginate-based edible coating with natural antimicrobials for preserving fresh strawberry quality, *Food and Bioprocess Technology*, 10, 165–174. [https://doi.org/ 0.1007/s11947-016-1808-9](https://doi.org/0.1007/s11947-016-1808-9)
- Pérez-Gago M.B., Serra M., Alonso M., Mateos M., del Río M.A., 2005, Effect of whey protein- and hydroxypropyl methylcellulose-based edible composite coatings on color change of fresh-cut apples, *Postharvest Biology and Technology*, 36, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.10.009>
- Pérez-Gago M.B., Serra M., del Río M.A., 2006, Color change of fresh-cut apples coated with whey protein concentrate-based edible coatings, *Postharvest Biology and Technology*, 39(1), 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.08.002>
- Perez-Vazquez A., Barciela P., Carpena M., Prieto M.A., 2023, Edible coatings as a natural packaging system to improve fruit and vegetable shelf life and quality, *Foods*, 12(19), 3570. <https://doi.org/10.3390/foods12193570>
- Périno-Issartier S., Ginies C., Cravotto G., Chemat F., 2013, A comparison of essential oils obtained from lavandin via different extraction processes: Ultrasound, microwave, turbohydrodistillation, steam and hydrodistillation, *Journal of Chromatography A*, 1305, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2013.07.024>
- Perović A.B., Karabegović I.T., Krstić M.S., Veličković A.V., Avramović J.M., Danilović B.R., Đorđević N.G., Mančić S.S., Veljković V.B., 2025a, Optimization and kinetics of lavender essential oil extraction: effects of flower pretreatment, salt solutions, and hydrolat reuse, *Advanced Technologies*, 14, 46–56. <https://doi.org/10.5937/savteh2501045P>
- Perović A.B., Karabegović I.T., Krstić M.S., Veličković A.V., Avramović J.M., Danilović B.R., Veljković V.B., 2025b, Modern Insights into Traditional Lavender Oil Production: Methods, Optimization, Kinetics, and Perspectives, *Separation & Purification Reviews*. <https://doi.org/10.1080/15422119.2025.2480606>
- Perović A.B., Karabegović I.T., Krstić M.S., Veličković A.V., Avramović J.M., Danilović B.R., Veljković V.B., 2024, Novel hydrodistillation and steam distillation methods of essential oil recovery from lavender: A comprehensive review, *Industrial Crops and Products*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118244>

- Perović A.B., Stanković M.Z., Veljković V.B., Kostić M.D., Stamenković O.S., 2021, A further study of the kinetics and optimization of the essential oil hydrodistillation from lavender flowers, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 29, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.06.028>
- Perreux L., Loupy A., 2001, A tentative rationalization of microwave effects in organic synthesis according to the reaction medium and mechanistic considerations, *Tetrahedron*, 57(45) 9199 – 9223. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)00905-X](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)00905-X)
- Persistence Market Research, 2023, Lavender oil market. <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/lavender-oil-market.asp>. (Pristupljeno 11.01.2024.)
- Perumal A.B., Huang L., Nambiar R.B., He Y., Li X, Sellamuthu P.S., 2022, Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: A review, *Food Chemistry*, 375, 131810. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131810>
- Philosoph-Hadas S., Meir A., Aharoni N., 1991, Effects of wounding on ethylene biosynthesis and senescence of detached spinach leaves, *Physiologia Plantarum*, 83, 246-341. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb02148.x>
- Pilevar Z., Bahrami A., Beikzadeh S., 2019, Migration of styrene monomer from polystyrene packaging materials into foods: Characterization and safety evaluation, *Trends in Food Science & Technology*, 91, 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.020>
- Pisseri F., Bertoli A., Pistelli L., 2008, Essential oils in medicine: principles of therapy, *Parassitologia*, 50(1-2), 89–91.
- Pleșoianu A.M., Nour V., 2022, Effect of Some Polysaccharide-Based Edible Coatings on Fresh White Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Quality during Cold Storage, *Agriculture*, 12(9), 1491. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091491>
- Pljevljakušić D., Kostadinović Veličkovska S., Mihajlov Lj., Čerepnalkovski A., 2023, Chemical composition and biological activity of lavandin and lavender essential oils, *La Rivista Italiana delle Sostanze Grasse*, 100(2), 91-103.
- Pokajewicz K., Biało M., Svydenko L., Fedin R., Hudz N., 2021, Chemical Composition of the Essential Oil of the New Cultivars of *Lavandula angustifolia* Mill. Bred in Ukraine, *Molecules*, 26, 5681, <https://www.mdpi.com/journal/molecules> (Pristupljeno 11.08.2024.)

- Pranoto Y., Salokhe V.M., Rakshit S.K., 2005, Physical and antibacterial properties of alginate-based edible film incorporated with garlic oil, *Food Research International*, 38, 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.04.009>
- Prusinowska R., Śmigielski K.B., 2014, Composition, Biological Properties and Therapeutic Effects of Lavender (*Lavandula angustifolia* L). A Review, *Herba Polonica*, 60(2), 56–66. <https://doi.org/10.2478/hepo-2014-0010>
- Prusinowska R., Śmigielski K., Stobiecka A., Kunicka-Styczyńska A., 2016, Hydrolates from lavender (*Lavandula angustifolia*)—their chemical composition as well as aromatic, antimicrobial and antioxidant properties, *Natural Product Research*, 30, 386–393. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1016939>.
- Purewal S.S., Kaur A., Bangar S.P., 2024, Protein-Based Films and Coatings: An Innovative Approach, *Coatings*, 14, 1-24. <https://doi.org/10.3390/coatings14010032>
- Puscaselu R.G., Gutt G., Amariei S., 2020, The Use of Edible Films Based on Sodium Alginate in Meat Product Packaging: An Eco-Friendly Alternative to Conventional Plastic Materials, *Coatings*, 10(2), 166. <https://doi.org/10.3390/coatings10020166>
- Qadri O.S., Yousuf B., Srivastava A.K., 2015, Fresh-cut fruits and vegetables: Critical factors influencing microbiology and novel approaches to prevent microbial risks - A review, *Cogent Food & Agriculture*, 1, 1121606. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1121606>
- Qi H., Hu W., Jiang A., Tian M., Li Y., 2011, Extending shelf-life of Fresh-cut ‘Fuji’ apples with chitosan-coatings, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.11.001>
- Qi X.L., Li T.T., Wei Z.F., Guo N., Luo M., Wang W., Zu Y.G., Fu Y.J., Peng X., 2014, Solvent-free microwave extraction of essential oil from pigeon pea leaves (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) and evaluation of its antimicrobial activity, *Industrial Crops and Products*, 58, 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.038>
- Quirós-Sauceda A.E., Ayala-Zavala J.F., Olivas G.I., González-Aguilar G.A., 2014, Edible coatings as encapsulating matrices for bioactive compounds: a review, *Journal of Food Science and Technology*, 51, 1674-1685. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1246-x>
- Radi M., Eddardar Z., Dríoiche A., Remok F., Hosen M.E., Zibouh K., Ed-Damsyry B., Bouatkiout A., Amine S., Touijer H., Salamatullah A.M., Bourhia M., Ibenmoussa S., Zair T., 2024, Comparative study of the chemical composition, antioxidant, and

- antimicrobial activity of the essential oils extracted from *Lavandula abrialis* and *Lavandula stoechas*: in vitro and in silico analysis, *Frontiers in Chemistry* 12, 1353385. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1353385>
- Radu D., Alexe P., Stănciuc N., 2020, Overview on the Potential Role of Phytochemicals from Lavender as Functional Ingredients, *The Annals of the University Dunarea de Jos Galati. Fascicle VI: Food Technology*, 44(2), 173–188. <https://doi.org/10.35219/foodtechnology.2020.2.11>
- Raghav P.K., Agarwal N., Saini M., 2016, Edible coating of fruits and vegetables: a review, *International Journal of Scientific Research and Modern Education*, 1(1), 188-204.
- Rahman S.M.A., Nassef A.M., Al-Dhaifallah M., Abdelkareem M.A., Rezk H., 2020, The effect of a new coating on the drying performance of fruit and vegetables products: Experimental investigation and artificial neural network modeling, *Foods*, 9, 308. <https://doi.org/10.3390/foods9030308>
- Rajkovic A., Smigic N., Devlieghere F., 2010, Contemporary strategies in combating microbial contamination in food chain, *International Journal of Food Microbiology*, 141, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.019>
- Ramos B., Miller F.A., Brandão T.R.S., Teixeira P., Silva C.L.M., 2013, Fresh fruits and vegetables-overview on applied methodologies to improve its quality and safety, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 20, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.07.002>
- Ramos M., Valdés A., Beltrán A., Garrigós M.C., 2016, Gelatin-based films and coatings for food packaging applications, *Coatings*, 6 (4), 41. <https://doi.org/10.3390/coatings6040041>
- Ranjha M.M.A.N., Zahra S.M., Irfan S., Shafique B., Noreen R., Alahmad U.F., Liaqat S., Umar S., 2023, Chapter 2 - Extraction and analysis of essential oils: Extraction methods used at laboratory and industrial level and chemical analysis, *U: Essential Oils: Extraction, Characterization and Applications*, Nayik G.A., Ansari M.J. (Ur.), Elsevier Ltd, Academic Press, London, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91740-7.00021-9>
- Rao B.R.R., 2012, Hydrosols and water-soluble essential oils of aromatic plants: Future economic products, *Indian Perfumers*, 56, 29-33.

- Rashad Y.M., Abdel Razik E.S., Darwish D.B., 2022, Essential Oil from *Lavandula Angustifolia* Elicits Expression of Three SbWRKY Transcription Factors and Defense-Related Genes Against Sorghum Damping-Off, *Scientific Reports*, 12(1), 857. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-04903-x>
- Rashed M., Tong Q., Nagi A., Li J.P., Khan N.U., Chen L., Rotail A., Bakry A., 2017, Isolation of essential oil from *Lavandula angustifolia* by using ultrasonic-microwave assisted method preceded by enzymolysis treatment, and assessment of its biological activities. *Industrial Crops and Products*, 100, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.033>
- Rashed M.M.A., Ghaleb A.D.S., Li J.P., Nagi A., Hua-Wei Y., Wen-You Z., Tong Q., 2018, Enhancement of mass transfer intensification for essential oil release from *Lavandula pubescence* using integrated ultrasonic-microwave technique and enzymatic pretreatment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering Journal*, 6, 1639–1649. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02860>
- Raybaudi-Massilia R.M., Rojas-Graü M.A.A., Mosqueda-Melgar J., OLGA Martin-Belloso O., 2008, Comparative Study on Essential Oils Incorporated into an Alginate-Based Edible Coating To Assure the Safety and Quality of Fresh-Cut Fuji Apples, *Journal of Food Protection*, 71(6), 1150–1161. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-71.6.1150>
- Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC, *Official Journal of the European Union*, L 338/4, 13.11.2004.
- Renaud E.N.C., Charles D.J., Simon, J.E., 2001, Essential oil quantity and composition from 10 cultivars of organically grown lavender and lavandin, *Journal of Essential Oil Research*, 13(4), 269–273. <https://doi.org/10.1080/10412905.2001.9699691>
- ResAP(2004)1 - Framework Resolution on coatings intended to come into contact with foodstuffs (Adopted by the Committee of Ministers on 1 December 2004 at the 907th meeting of the Ministers' Deputies)
- Ribeiro A.A.P., Sanfelice R.C., Malpass G.R.P., Okura M.H., Malpass A.C.G., 2023, Shelf life and sensory analysis comparison of alginate and chitosan edible coating incorporating avocado extract applied to minimally processed apples, *Food Materials Research*, 3, 26. <https://doi.org/10.48130/FMR-2023-0026>

- Rocha A.M.C.N, Morais A.M.M.B, 2003, Shelf life of minimally processed apple (cv. Jonagored) determined by colour changes, *Food Control*, 14(1), 13-20. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00046-4)
- Rodriguez O.T., Valero M.F., Gómez-Tejedor J.A., Diaz L., 2024, Performance of Biodegradable Active Packaging in the Preservation of Fresh-Cut Fruits: A Systematic Review, *Polymers (Basel)*, 16(24), 3518. <https://doi.org/10.3390/polym16243518>.
- Rojas-Graü, M.A., Tapia, M.S., Rodriguez, F.J., Carmona, A.J., Martin-Belloso, O., 2007a, Alginate and gellan-based edible coatings as carriers of antibrowning agents applied on fresh-cut Fuji apples, *Food Hydrocolloids*, 21, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.03.001>
- Rojas-Graü M.A., Raybaudi-Massilia R.M., Soliva-Fortuny R., Avena-Bustillos R., Mchugh T., Martin-Belloso O., 2007b, Apple puree-alginate edible coating as carrier of antimicrobial agents to prolong shelf-life of fresh-cut apples, *Postharvest Biology and Technology* 45(2), 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.017>
- Rojas-Graü M.A., Tapia M.S., Martín-Belloso O., 2008, Using polysaccharide-based edible coatings to maintain quality of fresh-cut Fuji apples, *LWT - Food Science and Technology*, 41, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.01.009>
- Ruban S., 2009, Biobased Packaging - Application in Meat Industry, *Veterinary World*, 2, 79. <https://doi.org/10.5455/vetworld.2009.79-82>
- Saba M.K., Sogvar O.B., 2016, Combination of carboxymethyl cellulose-based coatings with calcium and ascorbic acid impacts in browning and quality of fresh-cut apples, *LWT-Food Science and Technology*, 66, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.022>
- Saftner R.A., Abbott J., Bhagwat A.A., Vinyard B., 2005, Quality Measurement of Intact and Fresh-cut Slices of Fuji, Granny Smith, Pink Lady, and Gold Rush Apples, 70(5), S317-S324. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09985.x>
- Saha A., Tyagi S., Gupta R.K., Y.K. Tyagi Y.K., 2017, Natural gums of plant origin as edible coatings for food industry applications, *Critical Reviews in Biotechnology*, 37, 959-973. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1286449>
- Sahraoui N., Vianb M.A., Bornardc I., Boutekedjireta C., Chemat F., 2008, Improved microwave steam distillation apparatus for isolation of essential oils. Comparison with conventional steam distillation, *Journal of Chromatography A*, 1210, 229–233. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.09.078>

- Saleem M.S., Ejaz S., Anjum M.A., Nawaz A., Naz S., Hussain S., Ali S., Canan İ., 2020, Postharvest Application of Gum Arabic Edible Coating Delays Ripening and Maintains Quality of Persimmon Fruits during Storage., *Journal of Food Processing and Preservation*, 44, 14583. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14583>
- Salehi F., 2017, Rheological and physical properties and quality of the new formulation of apple cake with wild sage seed gum (*Salvia macrosiphon*), *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 2006-2012. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9583-5>
- Salehi B., Mnayer D., Özçelik B., Altin G., Kasapoğlu K.N., Daskaya-Dikmen C., Sharifi-Rad M., Selamoglu Z., Acharya K., Sen S., Matthews K.R., Fokou P.V.T., Sharopov F., Setzer W.N., Martorell M., Sharifi-Rad J., 2018, Plants of the genus *Lavandula*: from farm to pharmacy, *Natural Product Communications* 13, 1385–1402. <https://doi.org/10.1177/1934578X1801301037>
- Salvia-Trujillo L., Rojas-Graü M.A., Soliva-Fortuny R., Martín-Belloso O., 2015, Use of antimicrobial nanoemulsions as edible coatings: impact on safety and quality attributes of fresh-cut fuji apples, *Postharvest Biology and Technology*, 105, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.03.009>
- Sangsuwan J., Sutthasupa S., 2019, Effect of chitosan and alginate beads incorporated with lavender, clove essential oils, and vanillin against *Botrytis cinerea* and their application in fresh table grapes packaging system, *Packaging Technology and Science*, 1-11. <https://doi.org/10.1002/pts.2476>
- Santhosh R., Ahmed J., Thakur R., Sarkar P., 2024, Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties – a review, *Sustainable Food Technology*, 2, 307. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
- Sanz S., Gimenez M., Olarte C., Lomas C., Portu J., 2002, Effectiveness of chlorine Washing disinfection and Effects on the appearance of atrichoke and borage, *Journal of Applied Microbiology*, 93(6), 986-993. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01773.x>
- Sarengaowa, Hu W., Jiang A., Xiu Z., Feng K., 2018, Effect of thyme oil-alginate-based coating on quality and microbial safety of fresh-cut apples, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 2302–2311. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8720>
- Sateriale D., 2022, Towards Green Strategies of food security: antibacterial synergy of essential oils from *Thymus vulgaris* and *Syzygium aromaticum* to inhibit *Escherichia coli* and

- Staphylococcus aureus* pathogenic food isolates, *Microorganisms*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122446>
- Senturk Parreidt T., Lindner M., Rothkopf I., Schmid M., Müller K., 2019, The development of a uniform alginate-based coating for cantaloupe and strawberries and the characterization of water barrier properties, *Foods*, 8, 203. <https://doi.org/10.3390/foods8060203>
- Serra S., De Simeis D., Papili S., 2021, A Practical Laboratory-Scale Synthesis of All Eight Stereoisomeric Forms of Terpene Linalool Oxide, *Chemistry*, 3(4), 1247-1257. <https://doi.org/10.3390/chemistry3040090>
- Shah Y.A., Bhatia S., Al-Harrasi A., Afzaal M., Saeed F., Anwer M.K., Khan M.R., Jawad M., Akram N., Faisal Z., 2023, Mechanical Properties of Protein-Based Food Packaging Materials, *Polymers (Basel)*, 15 (7), 1724. <https://doi.org/10.3390/polym15071724>
- Shao X.F., Tu K., Tu S., Tu J., 2012, A Combination of Heat Treatment and Chitosan Coating Delays Ripening and Reduces Decay in “Gala” Apple Fruit, *Journal of Food Quality*, 35, 83–92. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2011.00429.x>
- Shapiro J.E., Holder I.A., 1960, Effect of antibiotic and chemical dips on the microflora of packaged salad mix, *Applied Microbiology*, 8, 341. <https://doi.org/10.1128/AEM.8.6.341-345.1960>
- Sharifzadeh S., Karimi S., Abbasi H., Assari M., 2022, Sequential ultrasound-microwave technique as an efficient method for extraction of essential oil from *Lavandula coronopifolia* Poir, *Food Measure*, 16, 377–390. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01170-8>
- Sharma A., Singh A.K., 2025, Sodium Alginate: A Green Biopolymer Resource-Based Antimicrobial Edible Coating to Enhance Fruit Shelf-Life: A Review, *Colloids Interfaces*, 9(3), 32. <https://doi.org/10.3390/colloids9030032>
- Shevkani K., 2024, Food-Based Natural Mitigators of Enzymatic Browning on Fruits and Vegetables: Insights into Active Constituents, Modes of Action, and Challenges, *Food Bioprocess Technol*, 17, 2561-2582. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03233-8>
- Shiekh K.A., Ngwngam K., W. Tongdeesoontorn W., 2021, Polysaccharide-based active coatings incorporated with bioactive compounds for reducing postharvest losses of fresh fruits, *Coatings*, 12(1), 8. <https://doi.org/10.3390/coatings12010008>
- Shellie R., Mondello L., Marriott P., Dugo G., 2002, Characterisation of lavender essential oils by using gas chromatography-mass spectrometry with correlation of linear retention

- indices and comparison with comprehensive two-dimensional gas chromatography, *Journal of Chromatography A*, 970(1-2), 225–234. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(02\)00653-2](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(02)00653-2)
- Shen L., Pang S., Zhong M., Sun Y., Qayum A., Liu Y., Rashid A.U.R., Xu B., Liang Q., Ma H., Ren X.A., 2023, A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies, *Ultrasonics Sonochemistry*, 101, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>
- Scholz R.W., Wellmer F.W., Mew M., G. Steiner G., 2025, The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply, *Resources, Conservation and Recycling*, 213, 107993. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107993>
- Silva P.T., Fries L.L., Menezes C.R., Holkem A.T., Schwan C.L., Wigmann É.F., Bastos J.D., Silva C.D., 2014, Microencapsulation: Concepts, mechanisms, methods and some applications in food technology, *Ciência Rural*, 44(7), 1304-1311. <https://doi.org/10.1590/0103-8478CR20130971>
- Singh J., A. Mirza A., 2018, Influence of Ascorbic Acid Application on Quality and Storage Life of Fruits, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 4319-4328. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.503>
- Siroli L.F., Patrignani D.I., Serrazanetti F., 2015, Innovative strategies based on the use of bio-control agents to improve the safety, shelf-life and quality of minimally processed fruits and vegetables, *Trends in Food Science & Technology*, 46, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.014>
- Sirvaityte J., Siugzdaite J., Valeika V., 2011, Application of Commercial Essential Oils of Eucalyptus and Lavender as Natural Preservative for Leather Tanning Industry. *Revista de Chimie*, 62, 884–893. <https://bch.ro/pdfRC/SIRVAITYTE%20J.pdf%209%2011.pdf> (Pristupljeno 10.07.2025.)
- Skala D., Žižović I., Petrović S.S., 1999, Etarska ulja-destilacija, ekstrakcija, izbor tehnologije i kvalitet, *Pregledni rad, Hemijska industrija* 53, 123-139
- Skendi A., Irakli M., Chatzopoulou P., Bouloumpasi E., Biliaderis C.G., 2022, Phenolic extracts from solid wastes of the aromatic plant essential oil industry: Potential uses in food applications, *Food Chemistry Advanced*, 1, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100065>

- Smigielski K., Raj A., Krosowiak K., Grusk R., 2009, Chemical composition of the essential oil of *Lavandula angustifolia* cultivated in Poland, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 12, 338–347. <https://doi.org/10.3390/molecules26185681>
- Smigielski K.B., Prusinowska R., Krosowiak K., Sikora M., 2013, Comparison of qualitative and quantitative chemical composition of hydrolate and essential oils of lavender (*Lavandula angustifolia*), *Journal of Essential Oil Research*, 25, 291–299. <https://doi.org/10.1080/10412905.2013.775080>
- Smigielski K., Prusinowska R., Stobiecka A., Kunicka-Styczyńska A., Gruska R., 2018, Biological Properties and chemical composition of essential oils from flowers and aerial parts of lavender (*Lavandula angustifolia*), *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21, 1303–1314. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1503068>
- Smith R.L., Cohen S.M., Doull J., Feron V.J., Goodman J.I., Marnett L.J., Portoghese P.S., Waddell W.J., Wagner B.M., Hall R.L., Higley N.A., Lucas-Gavin C., Adams T.B., 2005, A procedure for the safety evaluation of natural flavor complexes used as ingredients in food: Essential oils, *Food and Chemical Toxicology*, 43(3), 345–363. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.11.007>
- Solís-Contreras G.A., Rodríguez-Guillermo M.A., Reyes-Vega M.L., Aguilar C.N., Rebollosa-Padilla O.N., Corona-Flores J., Soriano-Melgar L.A.A., Ruelas-Chacon X., 2021, Extending Shelf-Life and Quality of Minimally Processed Golden Delicious Apples with Three Bioactive Coatings Combined with Cinnamon Essential Oil, *Foods*, 10(3), 597. <https://doi.org/10.3390/foods10030597>
- Soliva-Fortuny B.C., Oms-Oliu G., Martín-Belloso O., 2002, Effects of ripeness stages on the storage atmosphere, color, and textural properties of minimally processed apple slices, *Journal of Food Science*, 67(5), 1958-1963. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08752.x>
- Soliva-Fortuny R.C., Alos-Saiz N., Espachs-Barroso A., Martín-Belloso O., 2004, Influence of maturity at processing on quality attributes of fresh-cut conference pears, *Journal of Food Science*, 6(7), 290-294. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb13631.x>
- Song J., Li D., Liu C., Zhang, Y., 2011, Optimized microwaveassisted extraction of total phenolics (TP) from *Ipomoea batatas* leaves and its antioxidant activity, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12, 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.03.001>

- Song H.Y., Jo W.S., Song N.B., Min S.C., Song K.B., 2013, Quality change of apple slices coated with aloe vera gel during storage, *Journal of Food Science*, 78, 817-822. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12141>
- Sosnik A., 2014, Alginate particles as platform for drug delivery by the oral route: State-of-the-Art, *ISRN Pharmaceutics*, 2014, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2014/926157>
- Souza A.C.F., de Almeida A.T., Marques M.J.L., Souza J.F., 2020, Microbiological analysis of minimally processed fruits and vegetables marketed in supermarkets in the city of Macapá-Amapá Research, Society and Development, 9(6), 148963751. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i6.3751>
- Sovová H., Aleksovski S., 2006, Mathematical model for hydrodistillation of essential oils, *Flavour and Fragrance Journal*, 21, 881–889. <https://doi.org/10.1002/ffj.1729>
- Spiro M., Jaganyi D., Broom M.C., 1992, Kinetics and Equilibria of Tea Infusion: Part 9. The Rates and Temperature Coefficients of Caffeine Extraction from Green Chun Mee and Black Assam Bukial Teas, *Food Chemistry*, 45(5), 333–335. [http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146\(92\)90033-X](http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146(92)90033-X)
- Stanković M.Z., Veljković V.B., Lazić. M.L., 1994a, Bioaktivni proizvodi iz ploda kleke (*Juniperus communis* L.), Monografija, Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac
- Stanković M.Z., Cakić M.D., Cvetković D.M., Veljković V.B., 1994b, Kinetics of extraction of resinoids from overground parts of swett clover (*Melilotus officinalis* L.), *Journal of the Serbian Chemical Society*, 59, 735-741.
- Stanojević Lj., Stanković M., Cakić M., Nikolić V., Nikolić Lj., Ilić D., Radulović N., 2011, The effect of hydrodistillation techniques on yield, kinetics, composition and antimicrobial activity of essential oils from flowers of *Lavandula officinalis* L., *Hemijska Industrija*, 65, 455–463. <https://doi.org/10.2298/HEMIND110129047S>
- Stoleru E., Brebu M., 2021, Stabilization techniques of essential oils by incorporation into biodegradable polymeric materials for food packaging, *Molecules*, 26(20), 6307. <https://doi.org/10.3390/molecules26206307>
- Stupar M., Grbić M.L., Džamić A., Unković N., Ristić M., Jelikić A., Vukojević J., 2014, Antifungal Activity of Selected Essential Oils and Biocide Benzalkonium Chloride Against the Fungi Isolated from Cultural Heritage Objects, *South African Journal of Botany*, 93, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.03.016>

- Su L.J., Arab L., 2006, Salad and raw vegetable consumption and nutritional status in the adult US population: Results from the third national health and nutrition examination survey, *Journal of the American Dietetic Association*, 106(9), 1394-1404. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2006.06.004>
- Sucheta A., Singla G., Chaturvedi K., Sandhu P.P., 2020, Status and recent trends in fresh-cut fruits and vegetables, *Fresh-Cut Fruits and Vegetables*, 17-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816184-5.00002-1>
- Suhag R., Kumar N., Petkoska A.T., Upadhyay A., 2020, Film formation and deposition methods of edible coating on food products: a review, *Food Research International*, 136, 109582. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109582>
- Sui X., Meng Z., Dong T., Fan X., Wang Q., 2023, Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies, *Current Opinion in Biotechnology*, 81, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102921>
- Sun J., Leng X., Zang J., Zhao G., 2022, Bio-based antibacterial food packaging films and coatings containing cinnamaldehyde: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64, 140-152. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2105300>
- Suppakul P., Miltz J., Sonneveld K., Bigger S.W., 2003, Active Packaging Technologies with an Emphasis on Antimicrobial Packaging and its Application, *Journal of Food Science*, 68, 408-420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05687.x>
- Suryanti F., Qadariah L., Mahfud M., 2023, Effect of addition of NaCl salt on extraction of essential oil from lemongrass leaves by microwave hydro-distillation method, *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(4), 974–983. <https://doi.org/10.22146/ijc.78919>
- Suttiarporn P., Diloksumpun S., Rakariyatham K., Chalermchart Y., 2024, Enhanced extraction of clove essential oil by ultrasound and microwave assisted hydrodistillation and their comparison in antioxidant activity, *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 8, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100411>
- Szymkowiak A., Guzik P., Kulawik P., Zając M., 2020, Attitude-behaviour dissonance regarding the importance of food preservation for customers, *Food Quality and Preference*, 84, 103935. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.103935>
- Tang X., Yan X., 2017, Dip-coating for fibrous materials: Mechanism, methods and applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 81, 378–404. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4197-7>

- Thostenson E.T., Chou T.W., 1999, Microwave processing: Fundamentals and applications, Composites part A: Applied Science and Manufacturing, 30(9), 1055–1071. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00020-2)
- Tilley A., McHenry M.P., McHenry J.A., Solah V., Bayliss K., 2023, Enzymatic browning: The role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning, Current Research in Food Science, 7, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100623>
- Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B.L., 2011, Global food demand and the sustainable intensification of agriculture, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108, 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tiwari S., Yadav V., Poonia A.K., Pal D., 2024, Exploring advances in sulfur composite cathodes for lithium-sulfur batteries: A comprehensive review, Journal of Energy Storage, 94, 112347. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112347>
- Toma M., Vinatoru M., Paniwnyk L., Mason T.J., 2001, Investigation of the effects of ultrasound on vegetal tissues during solvent extraction, Ultrasonics Sonochemistry, 8(2), 137–142. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(00\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(00)00033-X)
- Tripathi A.D., Sharma R., Agarwal A., Haleem D.R., 2021, Nanoemulsions based edible coatings with potential food applications, International Journal of Biobased Plastics, 3, 112-125. <https://doi.org/10.1080/24759651.2021.1875615>
- Trujillo-Echeverria L., Lara Fiallos M.V., de la Vega Quintero J.C., Valladares R.E., · Yordi E.G., Radice M., Pérez Martínez A., 2020, Technical-economic analysis of the solvent-method optimization of *Origanum vulgare* essential oil extraction based on technical and quality criteria, SN Applied Sciences, 2, 2133. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03955-w>
- Turek C., Stintzing F.C., 2013, Stability of Essential Oils: A Review, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 12(1), 40–53. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12006>
- Turrini F., Beruto M., Mela L., Curir P., Triglia G., Boggia R., Zunin P., Monroy F., 2021, Ultrasound-Assisted Extraction of Lavender (*Lavandula angustifolia* Miller, Cultivar Rosa) Solid By-Products Remaining after the Distillation of the Essential Oil, Applied Sciences, 11(12), 5495. <https://doi.org/10.3390/app11125495>
- Usman I., Sana S., Jaffar H.M., Munir M., Afzal A., Sukhera S., Boateng I.D., Afzaal M., Urugo M.M., 2025, Recent progress in edible films and coatings: Toward green and

- sustainable food packaging technologies, *Applied Food Research*, 5(2), 101070. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101070>
- Vargas M., Pastor C., Chiralt A., McClements D.J., Gonzales-Martinez C., 2008, Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits, *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*, 48, 496-511. <https://doi.org/10.1080/10408390701537344>
- Vasileva I., Denkova R., Chochkov R., Teneva D., Denkova Z., Dessev T., Denev P., Slavov A., 2018, Effect of lavender (*Lavandula angustifolia*) and melissa (*Melissa officinalis*) waste on quality and shelf life of bread, *Food Chemistry*, 253, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.131>
- Veggeland F., Borgen S.O., 2005, Negotiating international food standards: The world trade organization's impact on the Code Alimentarius Commission, *Governance*, 18(4), 675-708. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0491.2005.00297.x>
- Veličković D., 2007, Ultrazvučna ekstrakcija žalfije (*Salvia* L.), Monografija, Zadužbina Andrejević, Beograd
- Verbeke W., 2005, Consumer acceptance of functional foods: Socio-demographic, cognitive and attitudinal determinants, *Food Quality and Preference*, 16, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2004.01.001>
- Vian M.A., Fernandez X., Visinoni F., Chemat F., 2008, Microwave hydrodiffusion and gravity, a new technique for extraction of essential oils, *Journal of Chromatography A*, 1190(1–2), 14–17. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.02.086>
- Vilarinho F., Sendón R., van der Kellen A., 2019, Bisphenol A in food as a result of its migration from food packaging, *Trends in Food Science & Technology*, 91, 33-65. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.012>
- Vinatoru M., 2001, An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrasonics Sonochemistry*, 8, 303–313. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00071-2)
- Vinatoru M., Toma M., Radu O., Filip P.I., Lazurca D., Mason T.J., 1997, The use of ultrasound for the extraction of bioactive principles from plant materials, *Ultrasonics Sonochemistry*, 4, 135-139. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(97\)83207-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(97)83207-5)
- Vishwakarma G.S., Gautam N., Babu J.N., Mittal S., Jaitak V., 2016, Polymeric encapsulates of essential oils and their constituents: A review of preparation techniques, characterization,

- and sustainable release mechanisms, *Polymer Reviews*, 56(4), 668-701.
<https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1123725>
- Volić M., Pajić-Lijaković I., Djordjević V., Knežević-Jugović Z., Pećinar I., Stevanović-Dajić Z., Veljović Đ., Hadnadjev M., Bugarski, B., 2018, Alginate/soy protein system for essential oil encapsulation with intestinal delivery, *Carbohydrate Polymers*, 200, 15-24.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.033>
- Volić M., 2020, Novi hidrogel sistemi na bazi alginata i proteina za kontrolisano otpuštanje etarskih ulja, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.
- Walasek-Janusz M., Grzegorzczak A., Zalewski D., Malm A., Gajcy S., Gruszecki R., 2022, Variation in the antimicrobial activity of essential oils from cultivars of *Lavandula angustifolia* and *L. × intermedia*, *Agronomy*, 12, 2955.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12122955>
- Wang C., Meng L., Zhang G., Yang X., Pang B., Cheng J., He B., Sun F., 2024, Unraveling crop enzymatic browning through integrated omics, *Frontiers in Plant Science*, 15.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1342639>
- Wang J., Wei Y., Chen Y., Jiang S., Ye J., Ding P., Xu F., Shao X., 2025b, Alginate oligosaccharide alleviates chilling injury in postharvest peach fruit via regulating antioxidant and membrane lipid metabolisms, *Plant Physiology and Biochemistry*, 228, 110292. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110292>
- Wang Y., Li R., Jiang Z.T., Tan J., Tang S.H., Li T.T., Li J.T., 2018, Green and solvent-free simultaneous ultrasonic-microwave assisted extraction of essential oil from white and black peppers, *Industrial Crops and Products*, 114, 164–172.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.002>
- Wang Y., Yuan Z., Tang Y., 2021, Enhancing food security and environmental sustainability: A critical review of food loss and waste management, *Resources, Environment and Sustainability*, 4, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100023>
- Wang Y., Li G., Yang X., Wei Y., Zhang X., 2022, Effect of response surface methodology-optimized ultrasound-assisted pretreatment extraction on the composition of essential oil released from *Tribute citrus* peels, *Frontiers in Nutrition*, 9, 840780.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.840780>

- Wang Y., Zhang J., Wang D., Wang X., Zhang F., Chang D., You C., Zhang S., Wang X., 2023, Effects of cellulose nanofibrils treatment on antioxidant properties and aroma of fresh-cut apples, *Food Chemistry*, 415, 135797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135797>
- Wang W., Wu X., Chantapakul T., Wang D., Zhang S., Ma X., Ding T., Ye X., Liu D., 2017, Acoustic cavitation assisted extraction of pectin from waste grapefruit peels: a green two-stage approach and its general mechanism, *Food Research International*, 102, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.087>
- Wang W., Yu J., Huang Y., Li B.J., Shen W., Zhang W., Xia Y., Lin Q., 2025a, Preparation of sodium alginate/sodium carboxymethyl cellulose composite coating film and evaluation of its effects on mango preservation, *Food Chemistry*, 495(3), 146611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146611>
- Wei C., Li H., Cui G., Ma C., Deng R., Zou Z., Liu Z., 2022, Efficient separation of *Cinnamomum camphora* leaf essential oil and in vitro evaluation of its antifungal activity, *Arabian Journal of Chemistry*, 15, 104225. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104225>
- Wei L., Zhang Y., Jiang B., 2013, Comparison of microwave-assisted hydrodistillation with the traditional hydrodistillation method in the extraction of essential oils from *Dwarfed Cinnamomum camphora* var. *linaolifera* Fujita leaves and twigs, *Advances Journal of Food Science and Technology*, 5(11), 1436–1442. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3363>
- Wells R., Truong F., Adal A.M., Sarker LS, Mahmoud S.S., 2018, Lavandula essential oils: A current review of applications in medicinal food, and cosmetic industries of lavender. *Natural Product Communications*, 13. <https://doi.org/10.1177/1934578X1801301038>.
- Werner B.G., Koontz J.L., Goddard J.M., 2017, Hurdles to commercial translation of next generation active food packaging technologies, *Current Opinion in Food Science*, 16, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.07.007>
- Wesolowska A., Jadczyk D., Grzeszczuk M., 2010, Influence of distillation time on the content and composition of essential oil isolated from lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.), *Herba Polonica*, 56, 25–36.
- Wills R.B.H., Golding J.B., 2015, *Advances in postharvest fruit and vegetable technology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18489>

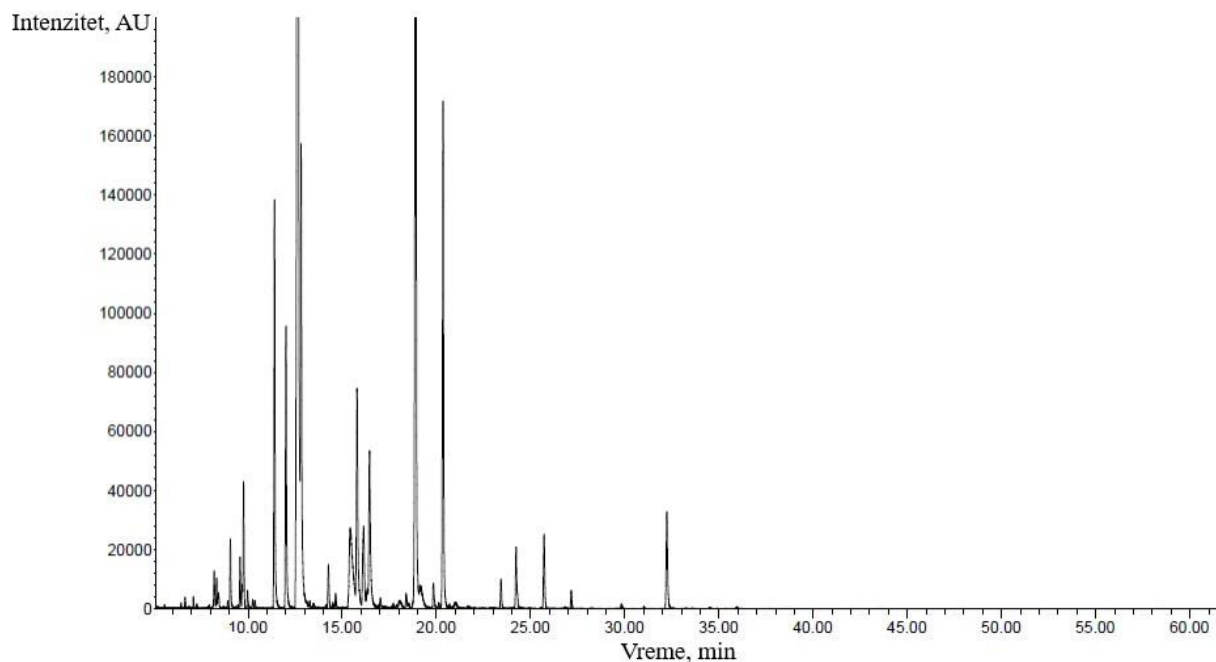
- Woronuk G., Demissie Z., Rheault M., Mahmoud S., 2011, Biosynthesis and Therapeutic Properties of *Lavandula* Essential Oil Constituents, *Planta Medica*, 77(01), 7–15. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1250136>
- Wu J., Zhang L., Fan K., 2024, Recent advances in polysaccharide-based edible coatings for preservation of fruits and vegetables: A review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64 (12), 3823-3838. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2136136>
- Wu Y., Chen G., Liu B., Zhao X., 2020, The study on extraction technology of essential oil from Tribute citru, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 3, 032044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/3/032044>
- Wu Y., Luo Y., Wang Q., 2012, Antioxidant and antimicrobial properties of essential oils encapsulated in zein nanoparticles prepared by liquid-liquid dispersion method, *LWT-Food Science and Technology*, 48, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.03.027>
- Wu Y., Wu H., Hu L., 2024, Recent Advances of Proteins, Polysaccharides and Lipids-Based Edible Films/Coatings for Food Packaging Applications: a Review, *Food Biophysics*, 19, 29-45. <https://doi.org/10.1007/s11483-023-09794-7>
- Xing Y, Yang S., Xu Q., Xu L., Zhu D., Li X., Shui Y., Liu X., Bi X., 2021, Effect of Chitosan/Nano-TiO₂ Composite Coating on the Postharvest Quality of Blueberry Fruit, *Coatings*, 11(5), 512. <https://doi.org/10.3390/coatings11050512>
- Yadav V., Pal D., A.K. Poonia A.K., 2024, Edible coatings for enhancing the shelf-life of foods: meaningful or myth, *Exon*, 1(2), 38-53.
- Yadav V., Pal D., Gaba V.K., 2025, Recently Implemented Edible Coatings for Extending the Shelf Life of Foods: A Technological Enhancement Perspective, *Sustainable Chemistry One World*. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2025.100127>
- Yang X., Zhao R., Wei M., Gu H., Li J., Yang L., Liu T., 2022, An improved approach of salting-out solvent-free microwave mediated rotary distillation for essential oil preparation from fresh leaves of magnolia (*Oyama sieboldii.*), *Food Chemistry: X*, 16, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100524>
- Ye Z., Xu Y.J., Y. Liu Y., 2021, Influences of dietary oils and fats, and the accompanied minor content of components on the gut microbiota and gut inflammation: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 113, 255-276. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.001>

- Yildirim S, Röcker B., Pettersen M.K., Nilsen-Nygaard J., Ayhan Z., Rutkaite R., 2018, Active Packaging Applications for Food, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 165–99. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>
- Yousuf B., Srivastava A.K., 2019, Impact of honey treatments and soy protein isolate-based coating on fresh-cut pineapple during storage at 4 °C, *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100361. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100361>
- Yousuf B., Ovais O.S., 2020, Preservation of fresh-cut fruits and vegetables by edible coatings, *Fresh-cut Fruits and Vegetables*, 225–242. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816184-5.00011-2>
- Yousuf B., Wu S., Siddiqui M.W., 2021, Incorporating essential oils or compounds derived thereof into edible coatings: Effect on quality and shelf life of fresh/fresh-cut produce, *Trends in Food Science & Technology*, 108, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.016>
- Yu J., Lou Q., Zheng X., Cui Z., Fu J., 2017, Sequential combination of microwave- and ultrasound-assisted extraction of total flavonoids from *Osmanthus fragrans* Lour. flowers, *Molecules*, 22(12), 2216. <https://doi.org/10.3390/molecules22122216>
- Yu K., Yang L., Zhang S., 2026, Multifunctional sodium alginate/nanocellulose fibers/chitosan edible coating: A sustainable strategy for prolonged fruit preservation and reduced cold-chain dependency, *Food Chemistry*, 501, 147535. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147535>
- Yu S., Xie X., Li S., Li W., 2013, Optimization of ultrasonic enhanced salt-containing hydrodistillation by response surface methodology, *Chemical Engineering & Technology*, 36, 801–809. <https://doi.org/10.1002/ceat.201200671>
- Yu F., Wan N., Zheng Q., Li Y., Yang M., Wu Z., 2020, Effects of ultrasound and microwave pretreatments on hydrodistillation extraction of essential oils from Kumquat peel, *Food Science & Nutrition*, 9(5), 2372-2380. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2073>
- Yuan X., Zhan Z., Lin W., Zhang C., Wang B., 2025, The membrane may be a key factor influencing browning: a mini review on browning mechanisms of fresh-cut fruit and vegetables from a multi-omics perspective, *Frontiers in Nutrition*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1534594>
- Zambrano-Zaragoza M.L., Mercado-Silva E., Del Real A., Gutierrez-Cortez E., Cornejo Villegas M.A., Quintanar-Guerrero D., 2014, The effect of nano-coatings with α -tocopherol and

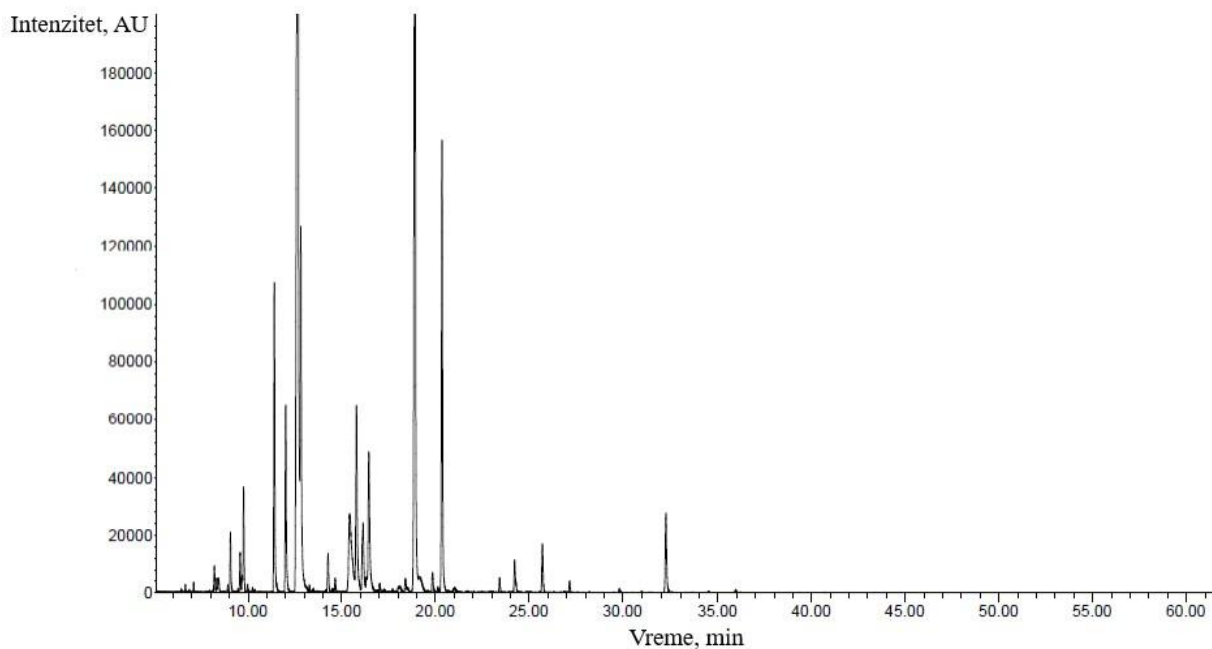
- xanthan gum on shelf-life and browning index of fresh-cut “Red Delicious” apples, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 22, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.09.008>
- Zambrano-Zaragoza L., González-Reza R., Mendoza-Muñoz N., 2018, Nanosystems in edible coatings: A novel strategy for food preservation, *International Journal of Molecular Science*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijms19030705>
- Zeljковић S.Ć., Maksimović M., 2015, Chemical composition and bioactivity of essential oil from *Thymus* species in Balkan Peninsula, *Phytochemistry Reviews*, 14, 335–352. <https://doi.org/10.1007/s11101-014-9378-9>
- Zhang X., Ismail B.B., Cheng H., Jin T.Z., Qian M., Arabi S.A., Liu D., Guo M., 2021, Emerging chitosan-essential oil films and coatings for food preservation - A review of advances and applications, *Carbohydrate Polymers*, 1, 273, 118616. <https://doi.org/doi:10.1016/j.carbpol.2021.118616>
- Zhang Q., Huo Y., Yang Q., 2025, Migration of chemical substances from packaging materials to food, *Food Chemistry*, 485, 144544. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144544>
- Zhang Y., Wang D., Li H., Bai H., Sun M., Shi L., 2023, Formation Mechanism of Glandular Trichomes Involved in the Synthesis and Storage of Terpenoids in Lavender, *BMC Plant Biology*, 23, 307. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04399-5>
- Zhang M., Xiao D., Zhu C., Younis K., Yousuf O., 2024a, Shelf-Life Extension and Quality Changes of Fresh-Cut Apple via Sago and Soy-Oil-Based Edible Coatings, *Coatings*, 14, 1202. <https://doi.org/10.3390/coatings14091202>
- Zhang X., Zeng F., Niu Y., Huang Y., Chang J., Liu Z., Xie W., Xie W., Huang W., 2024b, Essential oil was extraction from *Cinnamomum camphor* peel using microwave as an aid and study of their inhibitory effect on *Pseudocercospora psidii*, *Arabian Journal of Chemistry*, 17(3), 105643. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105643>
- Zhang W., Hedayati S., Tarahi M., Karaca A.C., Hadidi M., Assadpour E., Jafari S. M., 2023, Advances in transglutaminase cross-linked protein-based food packaging films; a review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 253 (6), 127399. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127399>
- Zhao P., Ndayambaje J.P., Liu X., X. Xia X., 2022, Microbial Spoilage of Fruits: A Review on Causes and Prevention Methods, *Food Reviews International*, 38, 225-246. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.185885>

- Zill-e-Huma H., 2010, Hydrodiffusion assistée par micro-ondes, Nouvelle technique d'extraCTION d'antio ydants, PhD Thesis, Academie d'ai -Marseille, Universite d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, France.
- Zorga J., Błażewicz A., Czupa W., 2020, Ultrasound-assisted hydrodistillation of essential oil from celery seeds (*Apium graveolens* L.), Applied Sciences, 10(22), 8080. <https://doi.org/10.3390/molecules25225322>

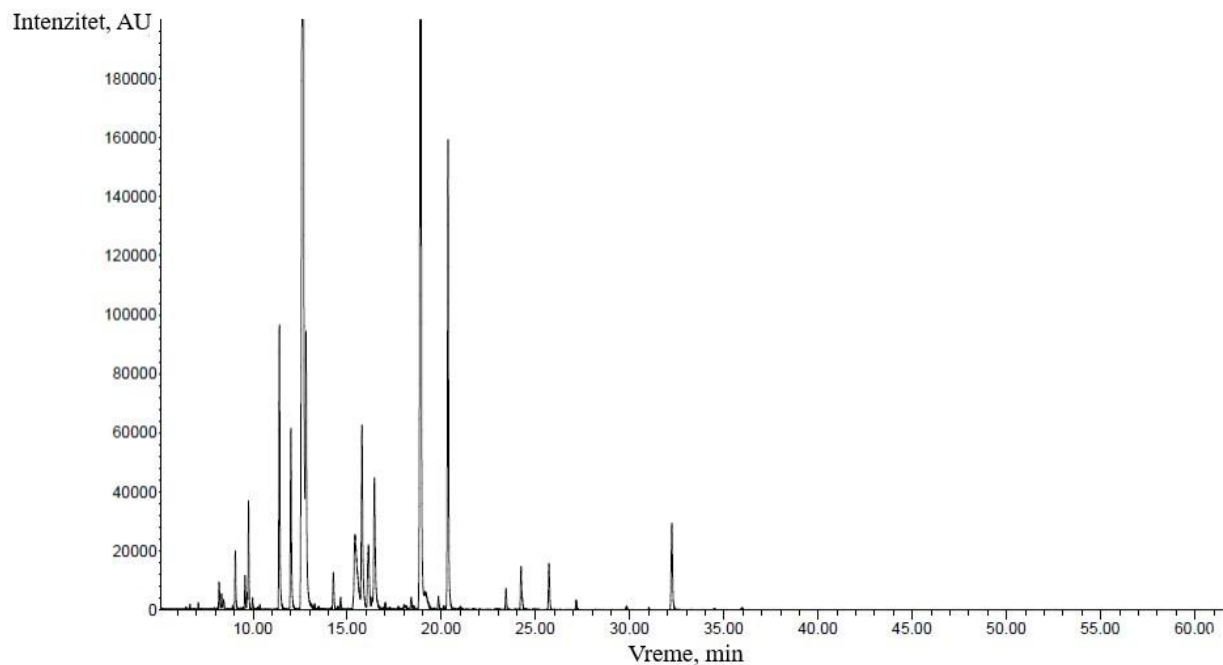
10. PRILOG



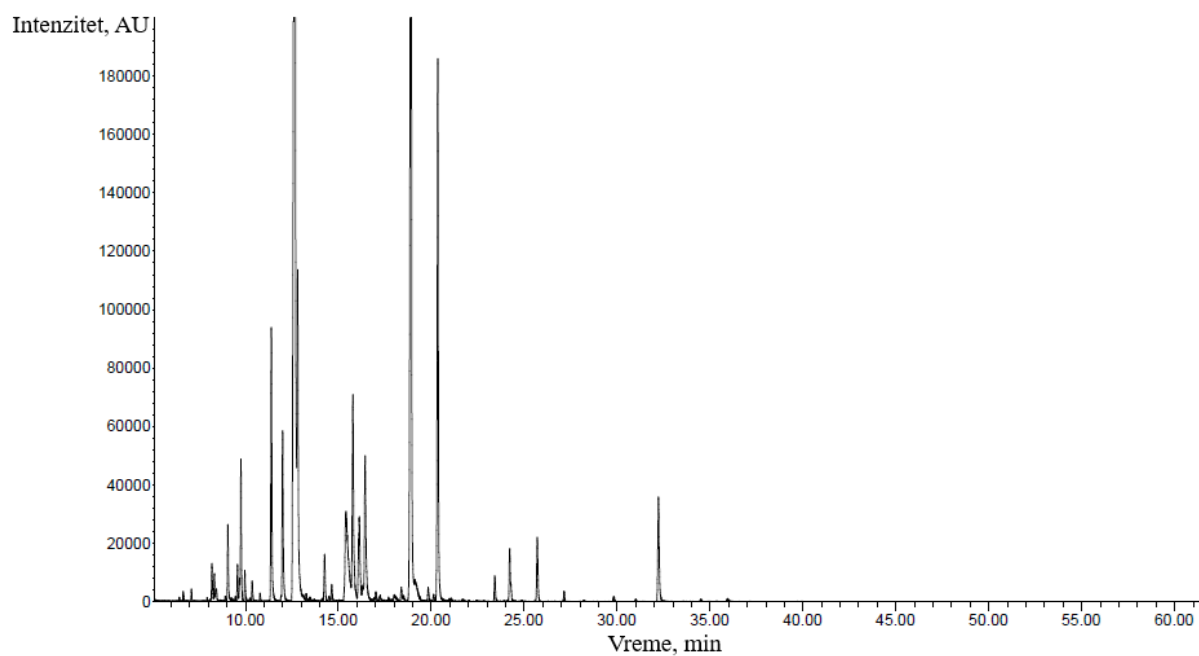
Slika P7.1 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog upotrebom VFHD iz prethodne hidrodestilacije kao dela destilacionog medijuma u narednoj hidrodestilaciji



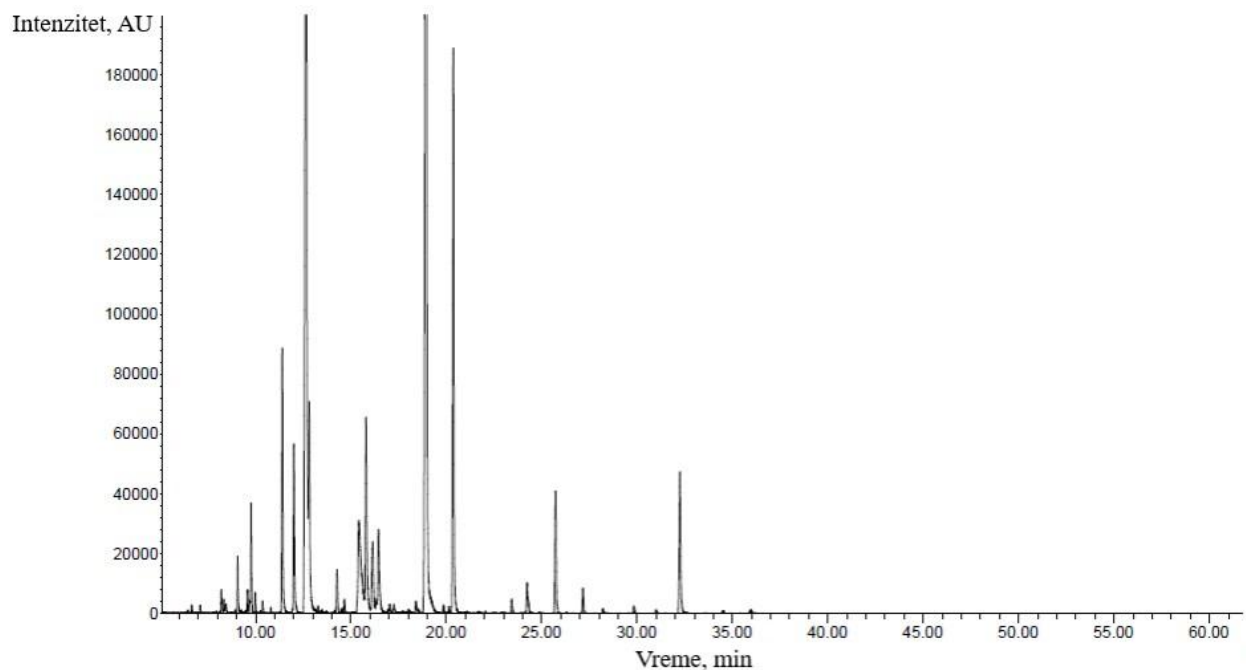
Slika P7.2 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog dodatkom 10% NaCl destilacionom medijumu



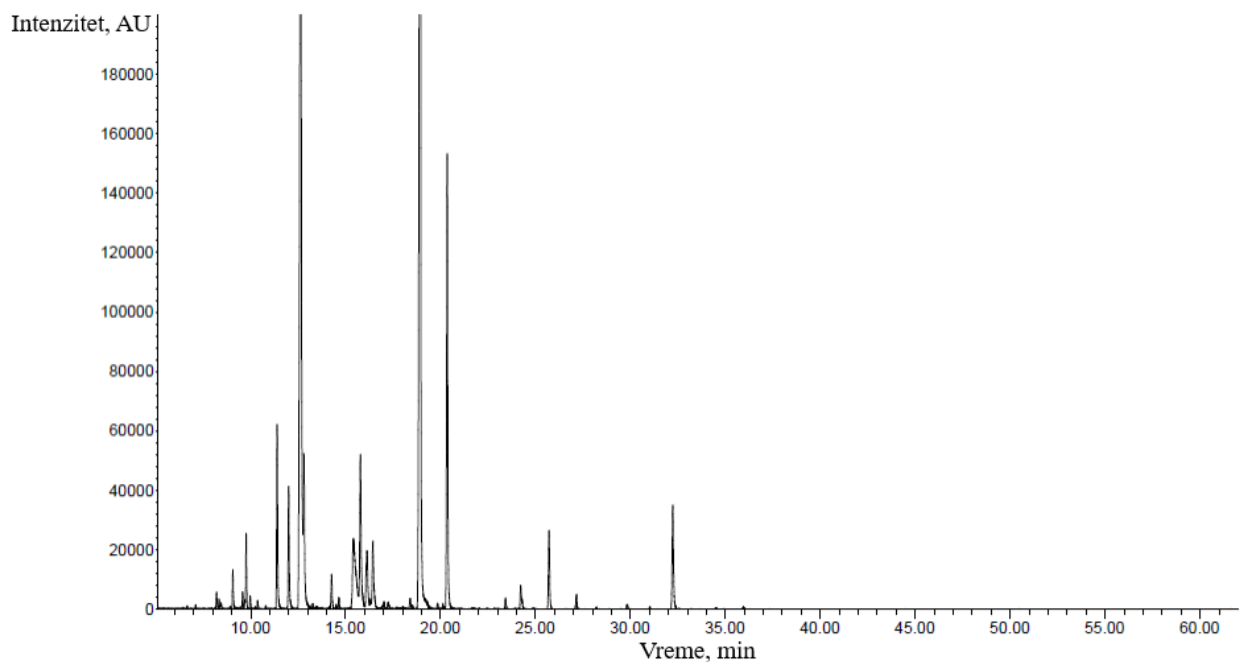
Slika P7.3 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog dodatkom 5% KCl destilacionom medijumu



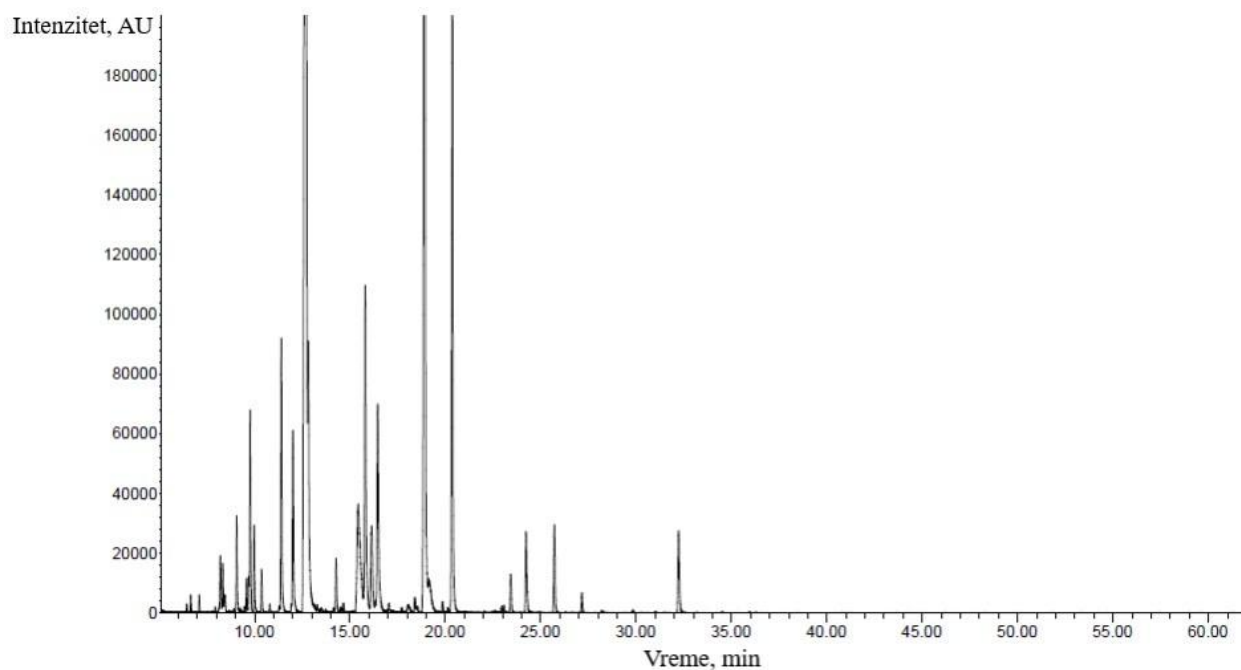
Slika P7.4 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučnom hidrodestilacijom u destilacionom sudu zapremine 1000 ml primenom ultrazvuka amplitude 80% u trajanju od 30 minuta



Slika P7.5 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog mikrotalasnom hidrodestilacijom u destilacionom sudu zapremine 1000 ml primenom mikrotalasa snage 600 W



Slika P7.6 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog sekvencijalnom ultrazvučno-mikrotalasnom hidrodestilacijom u destilacionom sudu zapremine 1000 ml primenom ultrazvuka amplitude 80% u trajanju od 30 minuta i nakon toga primenom mikrotalasa snage 600 W



Slika P7.7 GC/MS hromatogram uzorka etarskog ulja lavande dobijenog konvencionalnom hidrodestilacijom pri optimalnim uslovima

Tabela P7.8 Vrednosti parametara boje (L^* , a^* i b^*) sveže sečene jabuke sa alginatnim premazima tokom skladištenja

Uzorak	Parametri boje	Vreme skladištenja, dan						
		0	2	5	7	9	12	14
Kontrola	L^*	66,72 ± 0,64	66,22 ± 0,15	66,30 ± 0,72	62,92 ± 1,75	61,16 ± 1,01	57,67 ± 3,75	57,18 ± 1,42
	a^*	1,65 ± 0,30	4,03 ± 0,05	2,52 ± 0,13	3,75 ± 0,58	5,64 ± 0,66	7,38 ± 0,36	4,69 ± 0,29
	b^*	28,19 ± 1,61	30,55 ± 0,42	32,06 ± 0,15	31,86 ± 1,66	34,94 ± 0,83	33,26 ± 2,28	34,65 ± 1,17
Alginatni premaz	L^*	67,64 ± 3,05	61,38 ± 1,58	60,56 ± 0,62	59,42 ± 0,84	59,09 ± 2,26	60,21 ± 0,50	62,72 ± 1,68
	a^*	-1,22 ± 0,20	0,34 ± 0,06	3,12 ± 0,18	2,60 ± 0,30	4,14 ± 0,51	4,77 ± 0,15	2,10 ± 0,70
	b^*	18,01 ± 1,08	23,84 ± 1,72	26,89 ± 0,92	27,45 ± 1,51	28,64 ± 2,31	30,02 ± 0,75	33,28 ± 3,42
0,1% LEO	L^*	69,69 ± 1,44	68,65 ± 0,73	65,32 ± 1,17	62,82 ± 2,71	60,53 ± 1,74	61,07 ± 1,19	64,95 ± 2,26
	a^*	-1,60 ± 0,41	-0,94 ± 0,22	-0,70 ± 0,41	1,34 ± 0,26	3,48 ± 0,41	2,65 ± 0,57	3,78 ± 1,51
	b^*	17,12 ± 1,88	23,64 ± 2,71	24,87 ± 1,58	27,14 ± 0,95	27,53 ± 0,70	28,22 ± 1,70	29,45 ± 3,67
0,2% LEO	L^*	68,17 ± 1,45	64,15 ± 3,42	64,25 ± 0,26	63,98 ± 1,37	59,33 ± 0,92	61,85 ± 3,93	60,93 ± 0,61
	a^*	-2,90 ± 0,32	-1,47 ± 0,13	-1,14 ± 0,04	1,26 ± 0,10	3,53 ± 0,37	3,51 ± 1,09	3,59 ± 0,10
	b^*	18,39 ± 1,57	22,12 ± 2,79	26,98 ± 0,93	27,82 ± 2,36	26,89 ± 1,66	27,25 ± 3,24	28,00 ± 0,44
25% VFHD	L^*	67,73 ± 0,45	63,42 ± 1,24	60,40 ± 3,37	59,96 ± 1,13	63,13 ± 4,23	64,56 ± 0,00	58,89 ± 0,27
	a^*	-2,00 ± 0,09	1,10 ± 0,16	1,60 ± 0,31	2,03 ± 0,38	2,85 ± 0,49	4,47 ± 0,00	4,03 ± 0,70
	b^*	19,61 ± 0,36	26,42 ± 0,21	27,30 ± 1,68	28,92 ± 1,19	28,36 ± 3,36	31,06 ± 0,00	30,38 ± 0,95
50% VFHD	L^*	64,91 ± 2,30	63,39 ± 0,49	60,20 ± 2,36	55,16 ± 2,23	56,72 ± 3,51	53,61 ± 3,60	51,84 ± 6,99
	a^*	-1,83 ± 0,14	0,96 ± 0,10	3,76 ± 0,11	4,71 ± 2,01	5,21 ± 1,41	6,62 ± 0,77	7,46 ± 1,16
	b^*	21,50 ± 0,49	26,70 ± 1,06	27,83 ± 1,58	27,39 ± 1,84	31,46 ± 2,98	30,17 ± 1,17	31,12 ± 3,49

Rezultati u tabeli prikazani kao srednja vrednost tri merenja ± standardna devijacija; kontrola – sečena jabuka bez premaza; alginatni premaz – sečena jabuka sa alginatnim premazom; 0,1% LEO – sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,1% etarskog ulja lavande; 0,2% LEO - sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 0,2% etarskog ulja lavande; 25% VFHD- sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 25% VFHD; 50% VFHD - sečena jabuka sa alginatnim premazom sa dodatkom 50% VFHD. Različita mala slova u redovima i velika slova u kolonama ukazuju na statistički značajne razlike između vrednosti ($p < 0,05$).

БИОГРАФИЈА

Александра Б. Перовић, мастер инжењер технологије, рођена је 13.07.1983. год. у Лесковцу. Основну и средњу Хемијско-технолошку школу завршила је у Лесковцу. Стручни назив Мастер инжењер технологије – хемијског и биохемијског инжењерства стекла је на Технолошком факултету у Лесковцу. Основне студије завршила је 2007. године на Технолошком факултету у Лесковцу на смеру Хемијско и биохемијско инжењерство са просечном оценом 9,13. Дипломски рад под називом „Хидродестилација етарског уља из цвета лаванде (*Lavandula officinalis* L.), одбранила је са оценом 10.

У току студија била је корисник студентске стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Своје усавршавање наставила је уписом докторских академских студија шк. 2017/18. год., на студијском програму Технолошко инжењерство, Технолошког факултета у Лесковцу. Положила је све испите предвиђене планом и програмом на докторским студијама са просечном оценом 10,00. Од 2024. год. ангажована је на научноистраживачком пројекту Огранка САНУ у Нишу „Развој, моделовање и оптимизација сепарационих метода изоловања биопроизвода из различитих биљних материјала. Резултате досадашњих истраживања објавила је у врхунском међународном часопису (2), међународном часопису изузетних вредности (1), истакнутом међународном часопису (1) и часопису међународног значаја (1). Учествовала је са радовима на 2 међународна научна скупа (саопштења са међународног скупа штампана у изводу) и 1 националном научном скупу (саопштење са скупа националног значаја штампано у целини).

Од 2016. год. ради у компанији ДЦП Хемигал д.о.о. у Лесковцу, а од 2019. год. у истој компанији ради на позицији Директора контроле квалитета.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ДЕСТИЛАЦИЈЕ ЕТАРСКОГ УЉА ЛАВАНДЕ И ЊЕГОВА ПРИМЕНА У АЛГИНАТНИМ ПРЕМАЗИМА ЗА ПРОДУЖЕЊЕ РОКА ТРАЈАЊА МИНИМАЛНО ПРЕРАЂЕНОГ ВОЋА

која је одбрањена на Технолошком факултету у Лесковцу, Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивала на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредила ауторска права, нити злоупотребила интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Лесковцу, 25.09.2026.

Потпис аутора дисертације:

Александра Б. Перовић

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ
ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ДЕСТИЛАЦИЈЕ ЕТАРСКОГ УЉА
ЛАВАНДЕ И ЊЕГОВА ПРИМЕНА У АЛГИНАТНИМ ПРЕМАЗИМА
ЗА ПРОДУЖЕЊЕ РОКА ТРАЈАЊА МИНИМАЛНО ПРЕРАЂЕНОГ
ВОЋА**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предала за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

У Лесковцу, 25.09.2026.

Потпис аутора дисертације:

Александра Б. Перовић

Изјава 3.

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ДЕСТИЛАЦИЈЕ ЕТАРСКОГ УЉА ЛАВАНДЕ И ЊЕГОВА ПРИМЕНА У АЛГИНАТНИМ ПРЕМАЗИМА ЗА ПРОДУЖЕЊЕ РОКА ТРАЈАЊА МИНИМАЛНО ПРЕРАЂЕНОГ ВОЋА

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Лесковцу, 25.09.2026.

Потпис аутора дисертације:

Александра Б. Перовић