

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA ŽIVILSTVO

Tjaša PREVC

**POVEZAVA DIELEKTRIČNE KONSTANTE IN MAŠČOBNIH
ŠTEVIL MODELNIH LIPIDNIH SISTEMOV**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**THE CORRELATION BETWEEN THE DIELECTRIC
CONSTANT AND FATTY VALUES IN MODEL LIPID SYSTEMS**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija živilske tehnologije. Opravljeno je bilo v laboratoriju Katedre za biokemijo in kemijo živil, Oddelka za živilstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Študijska komisija Oddelka za živilstvo je za mentorico diplomskega dela imenovala doc. dr. Natašo Šegatin, za somentorico prof. dr. Natašo Poklar-Ulrih in za recenzenta doc. dr. Rajka Vidriha.

Mentorica: doc. dr. Nataša Šegatin

Somentorica: prof. dr. Nataša Poklar-Ulrih

Recenzent: doc. dr. Rajko Vidrih

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Tjaša Prevc

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Dn
- DK UDK 544.03+543.632+537.226.2: 664.3: 665 (043)=163.6
- KG dielektrične lastnosti / sončnično olje / modelni lipidni sistemi / dielektrična konstanta / faktor dielektričnih izgub / maščobna števila / kislinsko število / jodovo število / peroksidno število / p-anizidniska vrednost
- AV PREVC, Tjaša
- SA ŠEGATIN, Nataša (mentorica) / POKLAR-ULRIH, Nataša (somentorica) / VIDRIH, Rajko (recenzent)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo
- LI 2010
- IN POVEZAVA DIELEKTRIČNE KONSTANTE IN MAŠČOBNIH ŠTEVIL MODELNIH LIPIDNIH SISTEMOV
- TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
- OP XII, 67 str., 15 preg., 18 sl., 35 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Namen diplomskega dela je študij vpliva maščobnih števil na dielektrične lastnosti modelnih lipidnih zmesi. Pripravili smo modelne lipidne zmesi, v katerih se močno spreminja kislinsko, jodovo ali peroksidno število ter p-anizidinska vrednost. Variiranje kislinskega števila v modelnem lipidnem sistemu smo dosegli z dodajanjem oleinske kisline sončničnemu olju; variiranje jodovega števila pa z dodajanjem sintetičnega nasičenega triglicerida sončničnemu olju. Modelne lipidne zmesi z različnimi vrednostmi peroksidnega števila ter p-anizidinske vrednosti smo dosegli z dodajanjem kontrolirano staranega olja žafranika (*Carthamus tinctorius*) sončničnemu olju. Modelnim lipidnim zmesem smo določili dielektrično konstanto in faktor dielektričnih izgub pri frekvencah od 50 Hz do 2 MHz in v temperaturnem območju od 20 do 50 °C. Ugotovili smo, da se z naraščanjem kislinskega števila sončničnega olja zmanjšujeta tako dielektrična konstanta kot faktor dielektričnih izgub; zmanjševanje jodovega števila olja je povezano s povečanjem dielektrične konstante in zmanjševanjem faktorja dielektričnih izgub v vsem opazovanem frekvenčnem območju. Staranje sončničnega olja (zvišanje peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti) lahko določimo z merjenjem dielektrične konstante, ki narašča v vsem frekvenčnem območju in z merjenjem faktorja dielektričnih izgub, ki narašča pri frekvencah nad 1 MHz.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Dn
- DC UDC 544.03+543.632+537.226.2: 664.3: 665 (043)=163.6
- CX dielectric properties /sunflower oil / model lipid systems / dielectric constant / dielectric loss factor / fatty values / acid value / iodine value / peroxide value / p-anisidine value
- AU PREVC, Tjaša
- AA ŠEGATIN, Nataša (supervisor) / POKLAR-ULRIH, Nataša (co-advisor) / VIDRIH, Rajko (reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
- PB University of Ljubljana, Biotechnical faculty, Department of Food Science and Technology
- PY 2010
- TI THE CORRELATION BETWEEN THE DIELECTRIC CONSTANT AND FATTY VALUES IN MODEL LIPID SYSTEMS
- DT Graduation Thesis (University studies)
- NO XII, 67 p., 15 tab., 18 fig., 35 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB The main objective of this thesis is to study the influence of fatty values on dielectric properties in model lipid mixtures. Model lipid mixtures have been prepared, in which acid or iodine or peroxide and p-anisidine values varied significantly. Variations in acid values in model lipid systems were achieved by adding oleic acid to sunflower oil while variations in the iodine values were achieved by adding synthetic saturated triglyceride to sunflower oil. Model lipid mixtures with different values of peroxide and p-values were prepared by adding aged safflower oil (*Carthamus tinctorius*) to sunflower oil. Dielectric constants and dielectric loss factors were determined in model lipid mixtures at frequencies from 50 Hz to 2 MHz and temperature ranges from 20 to 50 °C. The increase of the acid value of sunflower oil caused a decrease in dielectric constant and dielectric loss factor. Lowering the iodine value of sunflower oil has been associated with increase in dielectric constant and decreases dielectric loss factor in all the observed frequency ranges. The aging of sunflower oil (an increase in peroxide and p-anisidine value) can be determined by means of dielectric constant which increases over the whole frequency range and by means of dielectric loss factor which increases at frequencies above 1 MHz.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
ZAHVALA	VII
PRILOGE.....	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PREGLEDNIC	X
KAZALO PRILOG	XI
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XII
1 UVOD	1
1.1 NAMEN NALOGE	2
1.2 HIPOTEZI	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 LIPIDI.....	3
2.1.1 Maščobe	3
2.1.2 Kemijske metode v analitiki maščob	4
2.1.3 Sodobne tehnike za analizo maščob	6
2.2 DIELEKTRIČNA KONSTANTA IN FAKTOR IZGUB	7
2.2.1 Definicija dielektrične konstante in faktorja izgub	7
2.2.2 Dielektrične lastnosti živil	8
2.2.3 Pomen dielektričnih lastnosti v analizi maščob	9
3 MATERIALI IN METODE	11
3.1 MATERIALI ZA RAZISKAVO	11
3.1.1 Osnovni vzorci rastlinskih olj in modelnih lipidov	11
3.1.1.1 Sončnično olje	11
3.1.1.2 Oleinska kislina	12
3.1.1.3 Sintetični nasičeni triglicerid	12
3.1.1.4 Olje žafranike (<i>Carthamus tinctorius</i>) (Sigma – Aldrich, 2010)....	12
3.1.1.5 Kontrolirano starano olje žafranike (<i>Carthamus tinctorius</i>)	12
3.1.2 Zmesi vzorcev sončničnega olja in modelnih lipidov	13
3.2 KEMIJSKE ANALIZE VZORCEV	14

3.2.1	Kislinsko število	14
3.2.2	Jodovo število	14
3.2.3	Peroksidno število	16
3.2.4	p-anizidinska vrednost	16
3.3	DOLOČANJE DIELEKTRIČNE KONSTANTE	17
3.3.1	Sistem LCR meter Agilent E4980A s celico 16452A	17
3.3.1.1	Celica za določanje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev	17
3.3.1.2	Merilnik LCR	19
3.3.1.3	Termostatiranje vzorcev	21
3.3.2	Izračun dielektričnih parametrov (dielektrične konstante in faktorja dielektričnih izgub) iz meritev kapacitivnosti in upornosti	22
3.3.3	Priprava olja – degaziranje	23
3.3.4	Čiščenje celice	23
3.4	STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV	24
4	REZULTATI.....	25
4.1	REZULTATI KEMIJSKIH ANALIZ OSNOVNIH VZORCEV SONČNIČNEGA OLJA, MODELNIH LIPIDOV IN NEKATERIH NJIHOVIH ZMESI	25
4.1.1	Rezultati meritev kemijskih analiz vzorcev	25
4.1.2	Izračun maščobnih števil zmesi	26
4.2	DIELEKTRIČNA KONSTANTA MODELNIH LIPIDNIH ZMESI.....	28
4.2.1	Dielektrična konstanta sončničnega olja	28
4.2.2	Vpliv kislinskega števila na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi.....	30
4.2.2.1	Dielektrična konstanta oleinske kisline	30
4.2.2.2	Dielektrične konstante zmesi sončničnega olja in oleinske kisline	31
4.2.3	Vpliv jodovega števila na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi.....	37
4.2.3.1	Dielektrična konstanta sintetičnega nasičenega triglicerida	37
4.2.3.2	Dielektrična konstanta zmesi sončničnega olja s sintetičnim nasičenim trigliceridom	38
4.2.4	Vpliv peroksidnega števila na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi	43
4.2.4.1	Dielektrična konstanta kontrolirano staranega olja žafranike (<i>Carthamus tinctorius</i>)	43
4.2.4.2	Dielektrična konstanta zmesi sončničnega olja s kontrolirano staranim oljem žafranike (<i>Carthamus tinctorius</i>).....	43
4.2.5	Vpliv p-anizidinske vrednosti na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi	49
4.3	FAKTOR DIELEKTRIČNIH IZGUB MODELNIH LIPIDNIH ZMESI.....	51

4.3.1	Faktor dielektričnih izgub sončničnega olja	51
4.3.2	Faktor dielektričnih izgub modelnih lipidnih zmesi s sestavo 60 % oleinske kisline in 40 % sončničnega olja.....	54
4.3.3	Faktor dielektričnih izgub nasičenega sintetičnega triglicerida	55
4.3.4	Faktor dielektričnih izgub kontrolirano staranega olja žafranike ..	56
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	59
5.1	RAZPRAVA.....	59
5.1.1	Dielektrične lastnosti sončničnega olja	59
5.1.2	Dielektrične lastnosti olja in kislinsko število	59
5.1.3	Dielektrične lastnosti olja in jodovo število	60
5.1.4	Dielektrične lastnosti olja in peroksidno število in p-anizidinska vrednost	61
5.2	SKLEPI.....	62
6	POVZETEK.....	63
7	VIRI	65

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO SLIK

Slika 1: Celice za merjenje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev 16452A (Agilent Technologies, 2000).	18
Slika 2: Vezava celice za merjenje dielektričnih lastnosti z LCR metrom (Agilent Technologies, 2000).	20
Slika 3: Fotografija sistema celice, merilnika za merjenje impedance, termostata in uporovnega termometra.	21
Slika 4: Dielektrična konstanta sončničnega olja v odvisnosti od frekvence in temperature.	28
Slika 5: Dielektrična konstanta oleinske kisline v odvisnosti od frekvence in temperature.	31
Slika 6: Odvisnost dielektrične konstante platoja, ϵ'_p , od kislinskega števila in temperature za vzorce olja, oleinske kisline in njunih zmesi.	34
Slika 7: Odvisnost dielektrične konstante pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , od kislinskega števila in temperature za vzorce olja, oleinske kisline in njunih zmesi.	34
Slika 8: Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, od kislinskega števila in temperature za vzorce olja, oleinske kisline in njunih zmesi.	35
Slika 9 Dielektrična konstanta sintetičnega nasičenega triglicerida v odvisnosti od frekvence in temperature.	37
Slika 10: Odvisnost platoja dielektrične konstante, ϵ'_p , od jodovega števila in temperature za vzorce olja, nasičenega sintetičnega triglicerida in njunih zmesi.	40
Slika 11: Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, od jodovega števila in temperature za vzorce olja, nasičenega sintetičnega triglicerida in njunih zmesi.	41
Slika 12: Dielektrična konstanta kontrolirano staranega olja žafranike v odvisnosti od frekvence in temperature.	43
Slika 13: Odvisnost vrednosti dielektrične konstante, ϵ'_{vf} , od peroksidnega števila in temperature pri frekvencah 1 MHz za vzorce olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njunih zmesi.	45

Slika 14: Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante, $\Delta\epsilon'_{vf}$, od peroksidnega števila in temperature pri frekvencah nad 1 MHz za vzorce olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njunih zmesi.....	46
Slika 15: Faktor dielektričnih izgub sončničnega olja (vzorec 1) v odvisnosti od frekvence in temperature.	52
Slika 16: Faktor dielektričnih izgub modelne lipidne zmesi s sestavo 60 % oleinske kisline in 40 % sončničnega olja v odvisnosti od frekvence in temperature.....	55
Slika 17: Faktor dielektričnih izgub za sintetični nasičeni triglicerid v odvisnosti od frekvence in temperature.	56
Slika 18: Faktor dielektričnih izgub kontrolirano staranega olja žafranike.....	57

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Osnovne vzorci olja in modelnih lipidov.	11
Preglednica 2: Zmesi vzorcev sončničnega olja in osnovnih modelnih lipidov.....	13
Preglednica 3: Razmik med elektrodama in prosornina v celici za določanje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev pri različnih distančnikih (Agilent Technologies, 2000).	19
Preglednica 4: Izmerjene vrednosti maščobnih števil za izbrane vzorce lipidov.	25
Preglednica 5: Odsek (A) in naklon premice (B), standardna napaka (s) in korelacijski koeficient (r) za linearne zveze, ki opisujejo odvisnost maščobnih števil (MŠ) od sestave zmesi.	27
Preglednica 6: Izračunane vrednosti maščobnih števil za vse zmesi lipidov.	27
Preglednica 7: Dielektrična konstanta treh vzorcev sončničnega olja, njena povprečna vrednost in standardna napaka v odvisnosti od frekvence pri 20 °C.	29
Preglednica 8: Odvisnost dielektrične konstante v frekvenčnem območju od 10 kHz do 1 MHz, ϵ'_p , dielektrična konstanta pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , in 2 MHz, ϵ'_{vf} , ter spreminjanje dielektrične konstante od 50 Hz do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, in od 1 MHz do 2 MHz, $\Delta\epsilon'_{vf}$, od temperature in kislinskega števila.	33
Preglednica 9: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od kislinskega števila in temperature.	36
Preglednica 10: Odvisnost platoja dielektrične konstante, ϵ'_p , vrednosti dielektrične konstante pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , in 2 MHz, ϵ'_{vf} , in spreminjanje dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, in nad 1 MHz, $\Delta\epsilon'_{vf}$, od temperature in jodovega števila.....	39
Preglednica 11: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od jodovega števila in temperature.....	41
Preglednica 12: Odvisnost parametrov ϵ'_p , ϵ'_{nf} , ϵ'_{vf} , $\Delta\epsilon'_{nf}$ in $\Delta\epsilon'_{vf}$ od peroksidnega števila, p-anizidinske vrednosti in temperature.	44
Preglednica 13: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od peroksidnega števila in temperature.	47
Preglednica 14: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od p-anizidinske vrednosti in temperature.	49
Preglednica 15: Faktor dielektričnih izgub treh vzorcev sončničnega olja, njegova povprečna vrednost, standardna napaka in koeficient variabilnosti v odvisnosti od frekvence pri 20 °C.	53

KAZALO PRILOG

Priloga A: Meritve kapacitivnosti zraka v odvisnosti od frekvence in temperature.

Priloga B: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec sončničnega olja.

Priloga C: Dielektrična konstanta v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec oleinske kisline.

Priloga D: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec sintetičnega nasičenega triglicerida.

Priloga E: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube za vzorec nativnega olja žafranike.

Priloga F: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec kontrolirano staranega olja žafranike.

Priloga G: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 2b.

Priloga H: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 2c.

Priloga I: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 2d.

Priloga J: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3a.

Priloga K: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3b.

Priloga L: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3c.

Priloga M: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3d.

Priloga N: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5, a.

Priloga O: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5b.

Priloga P: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5, c.

Priloga Q: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5d.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

- 1 vzorec sončničnega olja
- 2 oleinska kislina
- 3 nasičen sintetični triglicerid
- 4 nativno olje žafranike
- 5 kontrolirano starano olje žafranike
- 2a zmes s sestavo 20 % sončničnega olja in 80 % oleinske kisline
- 2b zmes s sestavo 40 % sončničnega olja in 60 % oleinske kisline
- 2c zmes s sestavo 60 % sončničnega olja in 40 % oleinske kisline
- 2d zmes s sestavo 80 % sončničnega olja in 20 % sintetičnega nasičenega triglicerida
- 3a zmes s sestavo 20 % sončničnega olja in 80 % sintetičnega nasičenega triglicerida
- 3b zmes s sestavo 40 % sončničnega olja in 60 % sintetičnega nasičenega triglicerida
- 3c zmes s sestavo 60 % sončničnega olja in 40 % sintetičnega nasičenega triglicerida
- 3d zmes s sestavo 80 % sončničnega olja in 20 % sintetičnega nasičenega triglicerida
- 5a zmes s sestavo 20 % sončničnega olja in 80 % kontrolirano staranega olja žafranike
- 5b zmes s sestavo 40 % sončničnega olja in 60 % kontrolirano staranega olja žafranike
- 5c zmes s sestavo 60 % sončničnega olja in 40 % kontrolirano staranega olja žafranike
- 5d zmes s sestavo 80 % sončničnega olja in 20 % kontrolirano staranega olja žafranike
- MŠ maščobno število
- KŠ kislinsko število
- JŠ jodovo število
- PŠ peroksidno število
- p-AV p-anizidinska vrednost
- ϵ' dielektrična konstanta
- ϵ'' faktor dielektričnih izgub

1 UVOD

Tako pri nas kot na področju Evropske Unije se veliko pozornosti posveča zagotavljanju varnosti in kakovosti živil. Kakovost izdelka je odvisna od kakovosti surovin in od tehnoloških postopkov, katerim so bile surovine podvržene med predelavo v končni produkt. Med obdelavo živil prihaja do sprememb vseh komponent živil, kar povzroči spremembo v njihovi prehranski in hranilni vrednosti. V živilih igrajo pomembno vlogo maščobe. Na maščobah prihaja do velikih sprememb pri toploti obdelavi, kot tudi pri hidrogeniranju, sušenju in drugih tehnoloških postopkih s katerimi dosegamo senzorično kakovost in varnost živilskih izdelkov. Zaradi težnje po podaljševanju roka uporabe, so ključnega pomena tudi spremembe na maščobah med staranjem izdelka do izteka roka uporabe.

Zagotavljanje kakovosti in varnosti številnih novih izdelkov, ki so rezultat novih postopkov obdelave živil, kot so toplotna obdelava z mikrovalovi in radiofrekvenčno segrevanje (Marra in sod., 2009), tehnologija toplotne obdelave pri temperaturah višjih od 120 °C, razprševalno sušenje, priprava predpripravljenih izdelkov in toplotna regeneracija, zahteva čim hitrejši razvoj analitskih tehnik, za zaznavanje spreminjanje kvalitete živil (Sosa-Morales in sod., 2010). Raznovrstne in natančne analize maščob v živilih so pomembne za določanje prehranske in energijske vrednosti, zagotavljanje konstantne kakovosti produktov in njihove varnosti, pripravljane prehranskih tabel in razumevanje vpliva maščob na funkcionalne lastnosti živila (Akoh in Min, 2008), kot tudi pri načrtovanju in vodenju tehnoloških procesov v predelavi živil in tehnologiji samih olj in masti.

Klasične kemijske metode za določanje parametrov, ki so merilo za kakovosti maščob so običajno precej zamudne, poleg tega pa je poraba organskih topil pri tem velika. Razvoj novih metod za določanje fizikalno-kemijskih lastnosti, ki bi odražale kakovost maščob in hkrati skrajšale čas analize in zmanjšale porabo topil, je nujen. Ena od skupin modernih metod na področju analize živil, tudi maščob, temelji na merjenju dielektričnih lastnosti, kar pomeni hiter, okolju prijazen in pogosto nedestruktiven način analize.

Dielektrične lastnosti so odvisne od sestave kompleksne zmesi, tudi živila. Dielektrične lastnosti snovi odražajo odziv snovi na električno polje: velikost dielektrične konstante je odvisna od sposobnosti snovi, da shrani električno energijo, faktor dielektričnih izgub pa sposobnost snovi da odda električno energijo (Datta in sod., 2005).

V vzorcih olja lahko z merjenjem dielektričnih lastnosti spremljamo kakovosti in iztrošenostjo olja med postopkom toplotne obdelave. Vrednosti dielektrične konstante se povezuje z drugimi parametri, ki so pokazatelji kakovosti olja, kot so kislinsko število, gostota in viskoznost. Dobra korelacija med dielektrično konstanto in kislinskim številom je bila že ugotovljena (Sahin in Gülüm Sumnu, 2006).

1.1 NAMEN NALOGE

V nalogi bomo preverili odvisnost dielektričnih lastnosti (dielektrične konstante in faktorja izgub) modelnega lipidnega sistema od vrednosti maščobnih števil lipidnega sistema. Z mešanjem sončničnega olja in modelnih lipidov bomo pripravili zmesi, v katerih variirajo kislinsko, jodovo ali peroksidno število in p-anizidinska vrednost. Dielektrično konstanto smo določali s kapacitivno metodo (merjenje kapacitivnosti in upornosti) s komercialno dostopnim LCR metrom Agilent s celico 16452A v frekvenčnem območju od 50 Hz do 2 MHz in v temperaturnem območju od 20 do 50 °C v korakih po 10 °C. Namen dela je ugotoviti, v kolikšni meri sta dielektrična konstanta in faktor dielektričnih izgub lahko pokazatelj spremembe kislinskega, jodovega, peroksidnega števila ali p-anisidinskega vrednosti maščobe. Meritve bodo podlaga za morebitni razvoj hitre in nedestruktivne metode za določanje maščobnih števil rastlinskih olj.

1.2 HIPOTEZI

- Dielektrične lastnosti (dielektrična konstanta in faktor izgub) modelnih lipidnih zmesi so odvisne od sestave modelne lipidne zmesi oziroma maščobnih števil, temperature in frekvence.
- Za določanje posameznih maščobnih števil na podlagi dielektrične konstante so ugodne različne frekvence in temperature merjenja.

2 PREGLED OBJAV

2.1 LIPIDI

Lipidi so zelo raznolika skupina spojin. V literaturi se pojavlja mnogo definicij lipidov (Akoh in Min, 2008). Večina definicij temelji na trditvi o izvoru in topnosti. Med lipide tako uvrščamo zelo raznolike biološke spojine, za katere je skupna boljša topnost v nepolarnih topilih, kot so ogljikovodiki, kloroform, eter, alkoholi, kot v vodi (Boyer, 2005; Akoh in Min, 2008). Splošno uporabljena trditev v definicijah o slabi topnosti lipidov v vodi ne velja v primeru organskih kislin z zelo kratkimi verigami (C1-C4), ki jih štejemo med lipide. Med lipide prištevamo tudi sintetične lipide z nizko kalorično vrednostjo in s hidrogeniranjem nastale trans maščobne kisline, ki pa niso spojine naravnega izvora (Akoh in Min, 2008).

Ker v to skupino molekul uvrščamo molekule glede na njihovo topnost in ne glede na njihovo kemijsko zgradbo, kot to velja pri ogljikovih hidratih in proteinih, se med lipide uvršča zelo različne molekule: maščobne kisline in njihove derivate (monogliceride, digliceride, trigliceride, voske, fosfolipide), steroide, sterole, v maščobah topne vitamine, terpene, fenolne spojine, žolčne kisline in druge. Pestrost v strukturi snovi, ki jih uvrščamo med lipide ponuja tudi veliko pestrost fizikalno-kemijskih lastnosti in bioloških funkcij (Boyer, 2005; Akoh in Min, 2008).

Razvrščanje lipidov je mogoče na osnovi fizikalnih lastnosti pri sobni temperaturi; olja so pri sobni temperaturi tekoča, medtem ko so masti trdne (Akoh in Min, 2008). Glede na polarnost se lipidi delijo na polarne in nepolarne, glede na njihovo kemijsko sestavo pa na enostavne in kompleksne. Nepolarni lipidi vključujejo maščobne kisline, alkohole, gliceride in sterole, polarni lipidi pa glicerofosfolipide in gliceroglikolipide. Zaradi polarnosti se pojavi problem pri nekaterih kratkoverižnih maščobnih kislinah, ki so po svoji naravi zelo polarne, zato lipide razdelimo glede na strukturo. Osnovne enote v strukturi večine enostavnih in sestavljenih lipidov so maščobne kisline in alkoholi. Med enostavne lipide uvrščamo gliceride, sterole in njihove estre ter voske. Načeloma se pri hidrolizi enostavnih lipidov običajno sprostijo maščobne kisline in alkohol. Sestavljeni lipidi pa vključujejo fosfolipide, glikolipide in sfingolipide, ki pri hidrolizi razpadejo na več različnih komponent (Akoh in Min, 2008).

2.1.1 Maščobe

Čeprav se izraz lipidi včasih uporablja tudi kot sinonim za maščobe, so maščobe podskupina lipidov. FDA definira maščobe kot celokupno količino maščobnih kislin, izraženo kot trigliceridi (Akoh in Min, 2008). Tako maščobe zajemajo tiste lipide z biološko funkcijo shranjevanja energije (Boyer, 2005).

Osnovna enota maščob je sestavljena iz molekule glicerola, na katero so preko estrskih vezi vezane tri maščobne kisline in se imenuje triglicerid. Če so na glicerol vezane enake maščobne kisline, je to enostaven triglicerid, če pa je prisotna več kot ena vrsta maščobnih kislin, je triglicerid sestavljen.

Poleg trigliceridov je v maščobi prisoten manjši del digliceridov, monogliceridov in prostih maščobnih kislin (Patterson, 1989), fosfolipidov in drugih negliceridnih (neumiljivih) snovi (Akoh in Min, 2008; Patterson, 1989).

V fosfolipidih je, v primerjavi s trigliceridi, ena maščobna kislina zamenjana s fosfatno skupino, kar jim daje amfifilne lastnosti. Pomembno vlogo imajo v celicah, saj so sestavni deli celične membrane. Med negliceridne snovi v maščobah prištevamo tudi sterole in njihove estre, kamor sodijo tudi holesterol, steroidni hormoni in žolčne kisline, ki vplivajo na prehransko vrednost živil (Akoh in Min, 2008). Na senzorično kakovost maščobe, barvo, okus, vonj pa tudi odpornost proti oksidaciji pa vplivajo poleg negliceridnih snovi še klorofili, karotenoidi in fenolne spojine. Hkrati z vplivom na barvo (klorofili so zeleni, karotenoidi pa so lahko rumeni, rdeči ali vijolični) je pomemben vpliv negliceridnih snovi na stabilnost, saj imajo tako antioksidativne, kot tudi prooksidativne lastnosti (Cert in sod., 2000).

Maščobo, ki je pri sobni temperaturi tekoča imenujemo olje, trdno pa mast. Izjemoma so rastlinske maščobe pri sobni temperaturi trdne, na primer kokosova, kakavova in palmina mast. Agregatno stanje maščobe pri sobni temperaturi je povezano predvsem z razmerjem med nasičenimi in nenasičenimi maščobnimi kislinami, ki maščobo sestavljajo. Maščobe z večjim deležem nasičenih maščobnih kislin imajo višjo temperaturo tališča in so zato pri sobni temperaturi trdne.

2.1.2 Kemijske metode v analitiki maščob

Analize vsebnosti in kakovosti maščob v živilih so pomembne za določanje prehranske in energijske vrednosti, zagotavljanje konstantne kakovosti produktov, pripravljanje prehranskih tabel in razumevanje vpliva maščob na funkcionalne lastnosti živila ter pri načrtovanju in vodenju tehnoloških procesov v predelavi živil, kot tudi tehnologiji olj in maščob (Akoh in Min, 2008).

Pri analizi maščob v živilu običajno maščobo izoliramo. Postopki priprave živilskih vzorcev so odvisni od količine maščob in njihovega načina vezave z živilskim matriksom. Vključujejo sušenje in mletje posušenih vzorcev, čemur sledi obdelava s kislino ali bazo. S tem se razcepijo ionske in kovalentne vezi, s katerimi so lipidi vezani na proteine in ogljikove hidrate, razbijejo se maščobne kroglice v emulziji, hkrati pa poteče hidroliza proteinov in ogljikovih hidratov.

V tako pripravljenih vzorcih se lahko odločimo za različne načine ekstrakcije maščob z organskimi topili, ki so lahko čista ali pa zmesi topil. Obstajajo tudi metode ekstrakcije maščob brez uporabe zdravju škodljivih topil s superkritično tekočino ali ekstrakcijo s pomočjo mikrovalov ter še nekatere druge metode ekstrakcije. Vsem tem metodam je skupno, da pripravimo maščobni ekstrakt (Akoh in Min, 2008).

Pri analizah maščob, ki so namenjene za humano prehrano, ekstrakcijski postopki niso potrebni. Analize se lahko izvaja neposredno na vzorcu olja ali masti. V oljih in maščobnih ekstraktih se največkrat določa količino vode, gostoto, viskoznost, vsebnost nečistoč, holesterola, antioksidantov in maščobna števila. Uporabljamo različna maščobna števila, in sicer jodovo število, ki je merilo za stopnjo nenasičenosti, kislinsko število, ki je merilo za vsebnostjo prostih maščobnih kislin, peroksidno število in p-anizidinska vrednost sta merila za stopnjo oksidacije, saponifikacijsko število in druge parametre, s katerimi je opredeljena kakovost maščobe (O'Brien, 2004).

Pri analizi kvalitete maščob namenjenih za humano prehrano določamo sestavo maščob, vsebnost nečistoč (vode, usedline) ter kvara. Pri analizi sestave maščob poleg kromatografije, uporabljamo še druge fizikalne in kemijske metode. Fizikalni parametri, ki jih običajno določamo so temperature tališča, gostota, lomni količnik in viskoznost. S kemijskimi metodami pa običajno določamo maščobna števila.

Prisotnost vode v maščobah pospeši kondenzacijo in polimerizacijo, hidrolizo estrskih vezi in adicijo snovi na dvojne vezi med postopki obdelave maščob. Metode za določanje vode temeljijo na določanju spremembe mase pri sušenju. Natančnejša pa je metoda za določanje vode po Karl-Fischerju (O'Brien, 2004). Za določanje nečistoč in usedline uporabljamo različne filtracije in določanja mase filtrata. Filtriramo lahko določeno količino olja, maščobo raztopljeno v različnih topilih ali hidrolizirano maščobo. To so nespecifične analize, s katerimi ne moremo določiti komponent filtrata. Med negliceridnimi komponentami maščob so tudi antioksidanti, ki so pomembni za zaščito maščob pred kvarom. Poznamo specifične metode določanja posameznih antioksidantov, pri katerih se izkorišča specifične reakcije za kvantifikacijo posamezne snovi ali pa se določa celokupni antioksidativni potencial (Pomeranz in Meloan, 1994).

Poleg kemijskih metod se v analitiki maščob uporabljajo številne fizikalno-kemijske metode. Barvo se določa s standardnimi barvnimi lestvicami ali fotometrično pri določenih valovnih dolžinah. Lomni količnik olja je povezan z jodovim številom, zato se ga v nekaterih primerih uporablja za določanje nasičenosti vzorca. Pogosto se določa tudi temperaturo tališča maščobe in druge parametre, ki opišejo konsistenco, kot so sprememba specifičnega volumna zaradi spremembe temperature (Pomeranz in Meloan, 1994).

Za določanje kakovosti maščob se še vedno veliko uporablja maščobna števila. Iz jodovega števila določimo stopnjo nasičenosti maščobnih kislin vezanih v triglicerid. Večina metod določanja jodovega števila temelji na adiciji halogena na dvojne vezi med ogljikovimi

atomi. Uporablja se lahko različne halogene elemente. Pri analizi se zatehtani maščobi doda halogen element, nato pa določi količino prebitnega reagenta, rezultat pa se iz množinskega razmerja preračuna na maso joda.

Kislinsko število je merilo za vsebnost prostih maščobnih kislin. Temelji na nevtralizacijski titraciji kislin s standardno raztopino natrijevega hidroksida ob prisotnosti fenolftaleina. Rezultate te analize se lahko izraža na različne načine; kot kislinsko število ali kot vsebnost prostih maščobnih kislin, kar lahko izrazimo kot delež oleinske ali kakšne druge definirane maščobne kisline ali kot maso kalijevega hidroksida, porabljenega za nevtralizacijo enega grama maščobe (Pomeranz in Meloan, 1994).

Oksidacijo olja je mogoče zasledovati z določanjem peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti. Pri določanju peroksidnega števila se določa količino joda, ki se sprosti iz nasičenega kalijevega jodida po dodatku olja raztopljenega v očetni kislini in kloroformu (2:1). Sproščen jod se titrira s standardno raztopino natrijevega tiosulfata, pri čemer je peroksidno število izraženo kot mmol kisika na kilogram maščobe (Pomeranz in Meloan, 1994). p-anizidinska vrednost se določa spektrofotometrično. p-anizidinska vrednost je definirana kot $100 \times$ vrednost absorbance raztopine, ki je posledica reakcije 1 g maščobe s p-anizidinom v 100 mL mešanice topila, merjena pri 350 nm kiveti 10 mm. Peroksidno število odraža vsebnost primarnih produktov oksidacije, p-anizidinska vrednost pa posreduje podatek o prisotnosti aldehydov, torej sekundarnih produktov oksidacije v vzorcu olja (Paquot in Hautfenne, 1992).

Vse več se v analitiki maščob uporablja kromatografske tehnike, kot so kolonska, plinska (GC), visokoločljivostna (HPLC), tankoplastna kromatografija (TLC) in kromatografija s superkritičnimi tekočinami (SFC). Kolonsko kromatografijo se največkrat uporablja predvsem za ločevanje posameznih frakcij in služi kot pripravljalna tehnika v kombinaciji z drugimi tehnikami. Pri plinski kromatografiji je po navadi potrebna derivatizacija, maščob, ker so slabo hlapne. Pripravi se metilne estre maščobnih kislin, ki pa se lahko kasneje ločujejo na koloni za plinsko kromatografijo. Tudi priprava vzorcev maščob za HPLC zahteva derivatizacijo, poleg tega pa se izvede še hidroliza ali saponifikacija, da se sprostijo proste maščobne kisline, ki jih kasneje kvantitativno določamo (Akoh in Min, 2008).

2.1.3 Sodobne tehnike za analizo maščob

Sodobne tehnike analize maščob se razvijajo v smeri določanja novih parametrov, katerih vrednosti bi nadomestile do sedaj uveljavljene analize, na primer vsebnost vode in maščobna števila. Večina kromatografskih metod je dolgotrajnih in zahteva postopke priprave vzorca. Pri klasičnih kemijskih analizah pa se porablja velike količine topil, ki so zdravju škodljiva. Tako se išče metode, ki bi bile robustne, hitre, natančne in točne, z možnostjo merjenja in-line in ki bi se lahko izvajale na že obstoječi laboratorijski opremi, ali pa bi bila oprema glede na število analiz in zahtevnost vzdrževanja cenovno ugodna.

Che Man in Mirghani (2000) sta preučevala uporabo infrardeče spektroskopije kot hitre metode za določanje vsebnosti vode v maščobah. Vsebnost vode določeno z IR spektroskopiji sta primerjala s klasičnimi metodami in ugotovila primerljivo natančnost. (Che Man in Mirghani, 2000). V ribjem olju pridobljenem iz jeter trske je bila vsebnost maščobe in vode določena z metodo nuklearne magnetne resonance (NMR). Metoda je bila razvita za analize on-line in naj bi nadomestila ekstrakcijske metode določanja maščobe in vode v živilskih matriksih (Petrov in sod., 2008).

Za določitev jodovega števila je bila narejena primerjalna študija oksidativne razgradnje rastlinskega olja z metodo termogravimetrične analize. Dobra korelacija se je pokazala med prvim korakom oksidativne razgradnje olja in jodovim številom, kar pomeni, da termogravimetrična analiza teoretično lahko nadomesti meritve jodovega števila ob predhodni kalibraciji (Saad in sod., 2008).

Z infrardečo spektroskopijo je mogoče določiti izvor lipidov in potvorbe, na primer masla z rastlinsko maščobo, kakavovega masla s hidrogenirano maščobo in podobno (Pomeranz in Meloan, 1994).

2.2 DIELEKTRIČNA KONSTANTA IN FAKTOR IZGUB

2.2.1 Definicija dielektrične konstante in faktorja izgub

Z električno permitivnostjo opišemo interakcijo snovi z zunanjim električnim poljem. (Datta in sod., 2005) V praksi največkrat podajamo relativno permitivnost, to je razmerje med električno permitivnostjo snovi in električno permitivnostjo praznega prostora (vakuuma):

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

ϵ^* relativna permitivnost materiala,

ϵ permitivnost materiala

ϵ_0 permitivnost vakuuma ($\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$)

Relativna permitivnost ϵ^* je kompleksna količina in je sestavljena iz realnega in imaginarnega člena:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2)$$

ϵ' realni del relativne permitivnosti ali dielektrična konstanta

ϵ'' imaginarni del relativne permitivnosti ali relativni faktor dielektričnih izgub.

j oznaka za imaginarni del kompleksne količine

ϵ' in ϵ'' sta brezdimenzijska faktorja, saj sta prav tako kot ϵ^* definirana relativno glede na ϵ_0 . Tako ϵ' kot ϵ'' opisujeta način in stopnjo interakcije snovi z električnim poljem. Velikost dielektrične konstante je odvisna od sposobnosti materiala, da shranjuje električno energijo, faktor izgub pa je povezan z različnimi načini sproščanja energije. Sproščanje energije poteka po različnih mehanizmih, oznaka ϵ'' označuje njihovo kombinacijo. Vrednost ϵ'' je običajno mnogo manjša kot ϵ' .

Med tem, ko je živilo izpostavljeno elektromagnetnemu sevanju v frekvenčnem območju mikrovalov se v njem dogajata predvsem dva procesa, ki povzročita naraščanje temperature. Ker imajo molekule vode dipolni značaj, se poskušajo v električnem polju orientirati in slediti tokovnicam električne poljske jakosti, ki se zaradi izmenične napetosti hitro spreminja. Toplota je posledica hitre rotacije molekul vode. Poleg vode pa se v električnem polju premikajo tudi nabiti ioni. V živilih so najpogostejši natrijevi in kloridni ioni (Datta in sod. 2005). Zaradi električnega polja se pozitivno nabiti ioni gibljejo v eno, negativno nabiti ioni pa v nasprotno smer. Ko pride med nasprotno nabitimi delci do trkov, delca drug drugemu oddata del kinetične energije, kar povzroči vzbujeno stanje in enako kot rotacija molekul vode, dvig temperature materiala. Pri nižjih frekvencah pa električno polje povzroči gibanje delcev z električnim nabojem, kar ima za posledico električno prevodnost snovi.

Dielektrične lastnosti živila so odvisne od sestave živila, predvsem vsebnosti vode, frekvence elektromagnetnega valovanja in temperature. Večja kot je koncentracija polarnih snovi in ionov v materialu, večja je njegova dielektrična konstanta (Sahin in Gülüm Sumnu, 2006).

2.2.2 Dielektrične lastnosti živil

Glavne komponente, ki sestavljajo večji del živil so voda, ogljikovi hidrati, maščoba in proteini. Pogost in ključen aditiv v živilih pa je tudi natrijev klorid. Proteini, maščobe in škrob imajo na dielektrične lastnosti majhen vpliv, saj se največkrat obnašajo kot neelektroliti, medtem ko je vpliv vode, monosaharidov in ionov velik. Dielektrična konstanta je namreč odvisna od prisotnosti vodikovih vezi, elektrolitov in drugih nabitih skupin. Fizikalne spremembe, ki se dogajajo med obdelavo živil, kot na primer denaturacija beljakovin in izguba vode prav tako vplivajo na obnašanje živilskega matriksa v elektromagnetnem polju (Holtz in sod., 2010). Zato je pomembno preučevanje spreminjanja dielektričnih lastnosti živil, saj lahko na ta način izboljšamo kakovosti živil namenjenih za obdelavo z mikrovalovi in razvijamo nove postopke, ki vključujejo mikrovalovno segrevanje (Sosa-Morales in sod., 2010).

Dielektrične lastnosti so bile določene soljenemu in nesoljenemu maslu. Dodatek soli je povzročil rahlo zmanjšanje dielektrične konstante zaradi zmanjšanja količine proste vode, medtem ko se je faktor izgub bistveno povečal. (Ahmed in sod., 2007) Podobno kot sol na količino proste vode vplivajo tudi ogljikovi hidrati, predvsem sladkorji, ki imajo sami po

sebi majhno dielektrično aktivnost (Guo, 2010). Drugače pa je pri proteinih, kjer na dielektrično konstanto najbolj vpliva na proteine adsorbirana voda, poleg tega pa so proste aminokisline dielektrično reaktivne. V maščobah prevladujejo nepolarne komponente z izjemo prostih maščobnih kislin. Zmanjšanje dielektrične konstante v živilu je predvsem posledica zmanjšanja količine vode na račun povečanja vsebnosti maščob z nizko dielektrično konstanto (Sahin in Gülüm Sumnu, 2006).

Voda je v živilu prisotna kot prosta in vezana. Prosta voda se v emulzijah nahaja v kapilarah ali kapljicah, vezana voda pa je adsorbirana na površini suhe snovi. Na faktor dielektrične izgube vplivata obe obliki vode.

Pri določanju dielektrične konstante lipidov ima količina vode pomembno vlogo. Enako velja za vse medije, katerim določamo dielektrične lastnosti. Vrednost dielektrične konstante destilirane vode merjena pri 25 °C je okrog 77 (Sahin in Gülüm Sumnu, 2006). Vrednosti dielektričnih konstant za oleinski tip olja, kakršno je tudi sončnično olje s povečanim deležem oleinske kisline, pa se giba med 3,04 in 3,07 (Lizhi in sod., 2008). Zato že majhna količina prisotne vode močno poveča dielektrično konstanto vzorca.

Voda v tekočem agregatnem stanju je zelo polarna in močno absorbira energijo elektromagnetnega valovanja. Povečana vsebnost vode v mediju pomeni povečano polarnost, kar vpliva na zvišanje vrednosti tako dielektrične konstante kot tudi faktorja izgube, med sušenjem pa se dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube zmanjšata, saj se zmanjšuje količina proste vode (Sahin in Gülüm Sumnu, 2006).

2.2.3 Pomen dielektričnih lastnosti v analizi maščob

V literaturi se pri analizi kvalitete maščob pogosto navaja dielektrična konstanta. Kot enota za dielektrično konstanto se imenuje FOS (angl. Food oil sensor). FOS je prenosni instrument (Northern Instruments Corp.), s katerim se meri spremembo dielektrične konstante maščobe, uporabljeno pri cvrtju glede na svežo maščobo istega tipa. Instrument se kalibrira s svežo maščobo uporabljeno pri cvrtju. Območje meritev je od 0 do 10 enot imenovanih FOS. V živilstvu se smejo uporabljati maščobe z odčitkom FOS < 4 (Marmesat in sod., 2007). Gertz (2000) navaja, da je merjenje dielektrične konstante z instrumentom Food oil sensor dober pokazatelj vsebnosti polarnih komponent v maščobi. Delež polarnih komponent v zmesi se s klasično metodo določa s kolonsko kromatografijo.

Lizhi in sodelavci (2008) so v svojem delu obravnavali vpliv frekvence, temperature, vlage in sestave olj in nekaterih maščobnih kislin na dielektrične lastnosti. V raziskavo je bilo vključenih deset olj z japonskega področja, med drugim tudi sončnično in olivno olje in šest maščobnih kislin od kaprinske do oleinske kisline. Pri tem so uporabili celico za merjenje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev (16452A Agilent Technologies), ki je enaka kot smo jo pri delu uporabili mi. Območje na katerem so merili dielektrično konstanto in faktor izgube je bil med 100 Hz in 1 MHz. Ugotovili so, da je dielektrična

konstanta le malo odvisna od območja frekvenc, pri katerih so meritve potekale, medtem ko je faktor dielektričnih izgub od frekvence močno odvisen. Ugotovili so, da dielektrična konstanta s temperaturo pada, kar so pripisali večji viskoznosti olj pri nižjih temperaturah in tako daljšemu času sproščanja nakopičene energije. Velik vpliv na dielektrično konstanto pa je imela tudi vsebnost vode.

Leta 2010 je ista skupina avtorjev preiskovala še možnost zaznave potvorb oljčnega olja z drugimi rastlinskimi olji z merjenjem dielektričnih lastnosti. Izkazalo se je, da je dielektrična konstanta oljčnega olja naraščala, če so mu dodajali sojino, koruzno, sezamovo, kanolino in perilino olje. Sprememba dielektrične konstante se je spreminjala linearno s povečevanjem deleža dodanega olja v zmesi. Merjenje dielektrične konstante bi lahko pomagalo pri kvantitativni določitvi potvorb oljčnega olja z drugimi rastlinskimi olji (Lizhi in sod., 2010).

El -Shami s sodelavci pa se je ukvarjal s spreminjanjem dielektrične konstante olj namenjenih za cvrtje med toplotno obdelavo (El-Shami in sod., 1992). Z merjenjem dielektrične konstante je želel spremljati spreminjanje sestave maščob med toplotno obdelavo. Naraščanje dielektrične konstante tekom večurnega segrevanja pri temperaturah 180 – 190 °C so pripisali nastajanju primarnih in sekundarnih produktov oksidacije (El-Shami in sod., 1992).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIALI ZA RAZISKAVO

3.1.1 Osnovni vzorci rastlinskih olj in modelnih lipidov

Namen naloge je pripraviti lipidne sisteme z izrazito različnimi, če je mogoče celo mejnimi vrednostmi maščobnih števil in ugotoviti spreminjanje dielektrične konstante in faktorja izgube v teh sistemih. Pripravo lipidnih sistemov z različnimi maščobnimi števili smo izvedli tako, da smo osnovne vzorce z mejnimi vrednostmi maščobnih števil mešali med seboj. Za osnovni vzorec smo izbrali sončnično olje. To je rastlinsko olje z nizko vrednostjo kislinskega, peroksidnega in p-anizidinskega števila ter visoko vrednostjo jodovega števila. Osnovni vzorci modelnih lipidov pa so: oleinska kislina, nasičen sintetični triglicerid in kontrolirano starano olje žafranike (*Carthamus tinctorius*). Oleinska kislina je prosta maščobna kislina pri kateri pričakujemo visoko kislinsko število. Nasičen sintetični triglicerid je tekoč pri sobni temperaturi in ima nizko jodovo število v primerjavi z rastlinskimi olji. Modelni lipid z visokim peroksidnim številom smo pripravili s kontroliranim staranjem olja žafranike (*Carthamus tinctorius*). Podatke o osnovnih vzorcih olja in modelnih lipidov smo zbrali v preglednici 1.

Preglednica 1: Osnovne vzorci olja in modelnih lipidov.

Osnovni vzorec	Oznaka osnovnega vzorca	Opis lipida
sončnično olje	1	rastlinsko olje slovenskega izvora, oleinskega tipa
oleinska kislina	2	prosta maščobna kislina
sintetični nasičeni triglicerid	3	nasičen lipid, tekoč pri sobni temperaturi
olje žafranike (<i>Carthamus tinctorius</i>)	4	rastlinsko olje brez dodatkov za zaščito pred oksidacijo
kontrolirano starano olje žafranike (<i>Carthamus tinctorius</i>)	5	kontrolirano starano rastlinsko olje brez dodatkov za zaščito pred oksidacijo

3.1.1.1 Sončnično olje

Hladno stiskano sončnično olje z visoko vsebnostjo oleinske kisline je slovenskega izvora in se zaradi ugodne maščobnokislinske sestave veliko uporablja v prehrabne namene. Povprečna hranilna vrednost 100 g izdelka je 3700 kJ oziroma 900 kcal in vsebuje 86,3 % oleinske kisline, 5,1 % linolne, 0,2 % linolenske, 3,2 % stearinske in 3,3 % palmitinske

kislina. Linolna in linolenska kislina sta večkrat nenasičeni, oleinska enkrat nenasičena, medtem ko sta stearinska in palmitinska nasičeni maščobni kislini.

3.1.1.2 Oleinska kislina

Oleinska kislina proizvajalca Merck, kataloška številka 100471, je prečiščena rastlinska maščobna kislina. Na videz je podobna olju, bistra in homogena, in je zelo svetlo rumene barve. Njena gostota pri 25 °C je 0,891 g/mL (Merck, 2009).

Po podatkih proizvajalca ima kemikalija naslednjo maščobnokislinsko sestavo: oleinske kisline vsebuje 79,0 %, prisotne so še stearinska kislina (1,9 %), palmitinska kislina (6,2 %) in linolna kislina (11,4 %). Miristinska, margarinska, palmitoleinska in linolenska kislina pa so prisotne v koncentraciji manjši kot 0,1 %. Analiza je bila narejena s plinsko kromatografijo. Proizvajalec podaja vrednosti jodovega števila 91, peroksidnega števila 4,0 in kislinskega števila 201 (Merck, 2009).

3.1.1.3 Sintetični nasičeni triglicerid

Sintetični triglicerid, proizvajalca Cognis, Delios V liquid, je mešanica trigliceridov, ki imajo na glicerol vezane maščobne kisline s srednje dolgimi verigami (angl. *medium-chain triglycerides* - MCTs). V trigliceride je vezano 1-2 % palmitinske kisline, 65-75 % kaprilne kisline, 25-35 % kaprinske kisline in 2 % lavrinske kisline (Brulc, 2010). Vzorec je pri sobni temperaturi bistra prozorna tekočina podobna olju.

Glede na maščobnokislinsko sestavo MCTs smo pričakovali, da ima v primerjavi z rastlinskim oljem, nizko jodovo število, saj so palmitinska, kaprilna, kaprinska in lavrinska kislina nasičene maščobne kisline.

3.1.1.4 Olje žafranike (*Carthamus tinctorius*) (Sigma – Aldrich, 2010)

Olje žafranike proizvajalca Sigma, kataloška številka S8281, je naravno olje pridobljeno s stiskanjem semen žafranike (*Charthamus tinctorius*). Olje ne vsebuje zaščitnih sredstev, ki bi ga varovala pred oksidacijo. Je bistro in homogeno olje svetlo rumene barve, z gostoto 0,921 g/mL pri 25 °C in plameniščem pri 113 °C.

V trigliceride je vezano do 20 % oleinske kisline, do 10 % palmitinske kisline, do 5 % stearinske kisline in več kot 60 % linolenske kisline. Za nevtralizacijo prostih maščobnih kislin v 10 g vzorca je potrebno manj kot 2,5 mL natrijevega hidroksida s koncentracijo 0,02 mol/L.

3.1.1.5 Kontrolirano starano olje žafranike (*Carthamus tinctorius*)

Olje žafranike smo za staranje pripravili tako, da smo po 30 g olja zatehtali v tri 300 mL erlenmajerice in pokrili z aluminijasto folijo. Nato smo vzorce pustili 11 dni (259 ur) pri

normalnem zračnem tlaku in 65 °C (Nikolič, 2006). Vsak dan smo vzorce dvakrat pretresli. Uporabili smo sušilnik Memmert VO 400.

Po 11 dneh staranja je olje dobilo intenziven vonj po žarkem, barva pa je bila v primerjavi z nestaranim precej temnejša. Vsebino vseh treh erlenmajeric smo združili in do izvajanja analiz hranili zaprto v hladilniku pri 5 °C.

3.1.2 Zmesi vzorcev sončničnega olja in modelnih lipidov

Modelne lipidne sisteme za proučevanje dielektrične konstante in faktorja izgube z različno vrednostjo posameznega maščobnega števila (kislinskega, jodovega, peroksidnega) ali p-anizidinske vrednosti in čim bolj fiksnimi vrednostmi drugih maščobnih števil smo pripravili z mešanjem osnovnih vzorcev. Pripravo posameznih modelnih zmesi smo predstavili v preglednici 2, kjer smo zbrali oznake vzorcev ter maso in masni delež komponent v modelni lipidni zmesi. V preglednici 2 pomeni indeks 1 maso ali masni delež sončničnega olja (m_1 , w_1), in indeks j (m_j , w_j) preostale osnovne modelne lipide: oleinsko kislino, nasičen triglicerid ali kontrolirano starano olje žafranike.

Preglednica 2: Zmesi vzorcev sončničnega olja in osnovnih modelnih lipidov.

Komponenti v zmesi	Oznaka zmesi	Masa sončničnega olja	Masa dodane komponente	Masni delež sončničnega olja	Masni delež dodane komponente
		m_1 (g)	m_j (g)	w_1 (%)	w_j (%)
Sončnično olje in oleinska kislina	2a	8,07	32,15	20,1 %	79,9 %
	2b	24,03	36,07	40,0 %	60,0 %
	2c	18,02	12,02	60,0 %	40,0 %
	2d	32,21	8,54	79,0 %	21,0 %
Solnčnčno olje in sintetični nasičeni triglicerid	3a	4,42	17,67	20,0 %	80,0 %
	3b	8,83	13,22	40,0 %	60,0 %
	3c	16,82	11,27	59,9 %	40,1 %
	3d	17,63	4,45	79,8 %	20,2 %
Sončnično olje in starano olje žafranike	5a	4,43	17,66	20,1 %	79,9 %
	5b	8,80	13,21	40,0 %	60,0 %
	5c	18,00	12,08	59,8 %	40,2 %
	5d	17,61	4,45	79,8 %	20,2 %

Modelne lipidne zmesi za študij vpliva kislinskega števila na dielektrično konstanto smo pripravili iz ustreznih količin sončničnega olja in oleinske kisline (prvi del v oznaki zmesi je 2). Zmesi za raziskavo vpliva jodovega števila na dielektrično konstanto smo pripravili iz sončničnega olja in nasičenega sintetičnega triglicerida (prvi del v oznaki zmesi je 3).

Sončnično olje smo mešali s kontrolirano staranim oljem žafranike (prvi del v oznaki zmesi je 5) za proučevanje vpliva peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti na dielektrične lastnosti modelne lipidne zmesi. Vzorce sončničnega olja z drugimi lipidi smo pripravili z naslednjimi masnimi deleži: 20 %, 40 %, 60 % in 80 % (drugi del oznake lipidne mešanice od a-d). Točne sestave zmesi smo podali v preglednici 2.

Tehtali smo s tehtnico Mettler Toledo PB 3002-S, ki meri z natančnostjo ± 0,01 g. Vzorce smo dobro premešali in do analize hranili v hladilniku.

3.2 KEMIJSKE ANALIZE VZORCEV

3.2.1 Kislinsko število

Kislinsko število je definirano kot masa kalijevega hidroksida (mg), ki nevtralizira proste maščobne kisline v 1,0 g maščobe. Modificirana metoda je povzeta po ISO 660.

a) Postopek:

7,5 g lipida (0,1 g pri vzorcu 2) smo raztopili v 25 mL zmesi etanola in etra (1 : 1). Zmes topil je bila predhodno nevtralizirana s standardno raztopino NaOH ob prisotnosti fenolftaleina kot indikatorja. Raztopini lipida v zmesi topil smo dodali nekaj kapljic fenolftaleina in jo titriral s standardno raztopino NaOH (c = 0,1 mol/L) do pojava rožnate barve.

b) Kislinsko število smo izračunali iz zveze:

$$K\dot{S} = \frac{V(\text{NaOH}) \cdot c(\text{NaOH}) \cdot M(\text{KOH})}{m_{\text{lipida}}} \tag{3}$$

$K\dot{S}$	.....	kislinsko število
$V(\text{NaOH})$	.....	volumen porabljene standardne raztopine natrijevega hidroksida (mL)
$c(\text{NaOH})$	.....	koncentracija standardne raztopine natrijevega hidroksida (mol/L)
$M(\text{KOH})$	.....	molska masa kalijevega hidroksida (g/mol)
m_{lipida}}	.....	masa vzorca (g)

Kislinsko število smo določili osnovnim petim vzorcem rastlinskega olja in modelnih lipidov, to je sončničnemu olju, staranemu olju žafranike, oleinski kislini, nasičenemu sintetičnemu trigliceridu in zmesi sončničnega olja in oleinske kisline pripravljene v razmerju 40 : 60.

Relativna napaka določitve kislinskega števila je odvisna od velikosti vrednosti kislinskega števila. Pri običajnih vrednostih za rastlinska olja je relativna napaka 0,06 %, medtem ko

se pri meritvah izven območja predvidenega s postopkom za določanje kislinских števil rastlinskih olj poveča in naraste na 0,6 % pri oleinski kislini.

3.2.2 Jodovo število

Jodovo število je definirano kot masa joda (g), ki se adira na 100 g maščobe. Metoda je povzeta po AOAC Official Method 993.20.

a) Postopek:

Odtehtali smo 0,5 g vzorca v erlenmajerico z obrusom in mu dodali 15 mL kloroforma. Ko se je olje raztopilo, smo dodali še 25 mL raztopine jodovega bromida v očetni kislini. Raztopino smo premešali in pustili stati v temi 30 minut. Po 30 minutah smo dodali raztopini 20 mL vodne raztopine kalijevega jodida in premešali. Notranje stene erlenmajerice smo sprali z destilirano vodo in raztopino titriral s standardizirano raztopino natrijevega tiosulfata ($c = 0,1 \text{ mol/L}$) do bledorumene barve.

Vzporedno smo izvedeli še slepi poskus, tako da smo v erlenmajerico nalili 15 mL kloroforma in 25 mL raztopine jodovega bromida v očetni kislini in zmes pustili stati v temi 30 minut, nato pa ravnali enako kot pri vzorcu.

b) Jodovo število smo izračunali iz zveze:

$$J\dot{S} = \frac{(V_{Na_2S_2O_3(EV)} - V_{Na_2S_2O_3}) \cdot c_{Na_2S_2O_3} \cdot 12,6905}{m_{lipida}} \tag{4}$$

$J\dot{S}$	.....	jodovo število
$V_{Na_2S_2O_3(EV)}$	.....	volumen natrijevega tiosulfata, porabljen za titracijo slepega vzorca (mL)
$V_{Na_2S_2O_3}$	.....	volumen natrijevega tiosulfata porabljenega za titracijo vzorca (mL)
$c_{Na_2S_2O_3}$	.....	koncentracija raztopine natrijevega tiosulfata (mol / L)
m_{lipida}	.....	masa vzorca (g)
12,6905	.....	vrednost, ki ustreza desetinki atomske mase joda

Jodovo število smo določili osnovnim petim vzorcem modelnih lipidov in sicer vzorcu sončničnega olja, oleinske kisline, staranemu olju žafranike, sintetičnemu nasičenemu trigliceridu in zmesi sončničnega olja in sintetičnega nasičenega triglicerida pripravljeni v razmerju 60 : 40.

Pri določitvah jodovega števila za rastlinska olja in oleinsko kislino je relativna napaka določitve manjša kot 1 %, pri nasičenem standardu, ki ima nizko jodovo število, pa manjša kot 10 %.

3.2.3 Peroksidno število

Peroksidno število je definirano kot množina O₂ (mmol) v kilogramu maščobe. Metoda določanja je povzeta po AOAC Official Method 965.33.

a) Postopek:

Odtehtali smo 5 g vzorca lipida (2 g pri vzorcu 5) v 250 mL erlenmajerico in vzorcu dodali 25 mL zmesi očetne kisline in kloroforma v razmerju 3 : 2. Zmes smo mešali, dokler se lipid v topilu ni raztopil. Raztopini smo dodali 1,0 mL nasičene vodne raztopine kalijevega jodida, zmes premešali in pustili stati v temi točno dve minuti.

Sproščeni jod smo titrirali s standardno raztopino natrijevega tiosulfata (c = 0,1 mol/L). Kot indikator smo uporabili raztopino škrobovice.

Vzporedno smo opravili še slepi poskus, v katerem smo ravnali po enakem postopku, le da tokrat nismo dodali vzorca olja.

b) Peroksidno število smo izračunali iz zveze:

$$P\dot{S} = \frac{(V_{Na_2S_2O_3} - V_{Na_2S_2O_3(SV)}) \cdot c_{Na_2S_2O_3} \cdot 1000}{2m} \quad (5)$$

$P\dot{S}$	.....	jodovo število
$V_{Na_2S_2O_3(SV)}$	.....	volumen natrijevega tiosulfata, porabljen za titracijo slepega vzorca (mL)
$V_{Na_2S_2O_3}$	.....	volumen natrijevega tiosulfata, porabljenega za titracijo vzorca (mL)
$c_{Na_2S_2O_3}$	.....	koncentracija raztopine natrijevega tiosulfata (mol / L)
m_{lipida}	.....	masa vzorca (g)

Peroksidno število smo določili osnovnim šestim vzorcem modelnih lipidov in sicer vzorcu sončničnega olja, oleinske kisline, olju žafranike, staranemu olju žafranike, sintetičnemu nasičenemu trigliceridu in zmesi sončničnega olja in staranega olja žafranike pripravljeni v razmerju 60 : 40.

Relativna napaka določitve peroksidnega števila je manjša kot 2 %.

3.2.4 p-anizidinska vrednost

p-anizidinska vrednost je definirana kot 100-kratna absorbanca raztopine, ki je posledica reakcije 1 g maščobe v 100 mL mešanice topila, merjena pri 350 nm v celici široki 10 mm. Metoda določanja je povzeta po IUPAC Method 2.504 (Paquot in Hautfenne, 1992).

a) Postopek:

2 do 3 g lipida (0,2 g pri vzorcih 5 in 5a) smo zatehtali v 25 mL bučko, s heksanom dopolnili do oznake in pomerili absorbanco raztopine (Ab) pri valovni dolžini 350 nm. Pri tem smo uporabili čisto topilo kot slepi vzorec.

Nato smo odpipetirali 5 mL raztopine lipida v heksanu v 10 mL epruveto. V drugo 10 mL epruveto smo odpipetirali 5 mL topila in v vsako od epruvet dodali 1 mL reagenta p-anizidina (2,5 g p-anizidina / L ledocetne kisline) in premešali. Po točno 10 minutah smo izmerili absorbanco prve epruvete (As) pri valovni dolžini 350 nm in uporabili za slepi vzorec vsebinsko druge epruvete.

b) p-AV smo izračunali iz zveze:

$$p - AV = 25 \cdot \frac{(1,2 \cdot As - Ab)}{m_{lipida}} \quad (6)$$

<i>p-AV</i>	.....	para anizidinska vrednost
<i>As</i>	.....	absorbanca vzorca pri 350 nm z dodanim p-anizidinom
<i>Ab</i>	.....	absorbanca vzorca pri 350 nm brez dodatka p-anizidina
<i>m_{lipida}</i>	.....	masa vzorca (g)

p – anizidinsko vrednost smo določili osnovnim šestim vzorcem modelnih lipidov in sicer vzorcu sončničnega olja, oleinske kisline, olju žafranike, staranemu olju žafranike, sintetičnemu nasičenemu trigliceridu in zmesi sončničnega olja in staranega olja žafranike pripravljeni v razmerju 60 : 40.

Napake določitve p-anizidinske vrednosti se gibljejo okrog 1 %, pri staranem olju žafranike pa 2 %.

3.3 DOLOČANJE DIELEKTRIČNE KONSTANTE

3.3.1 Sistem LCR meter Agilent E4980A s celico 16452A

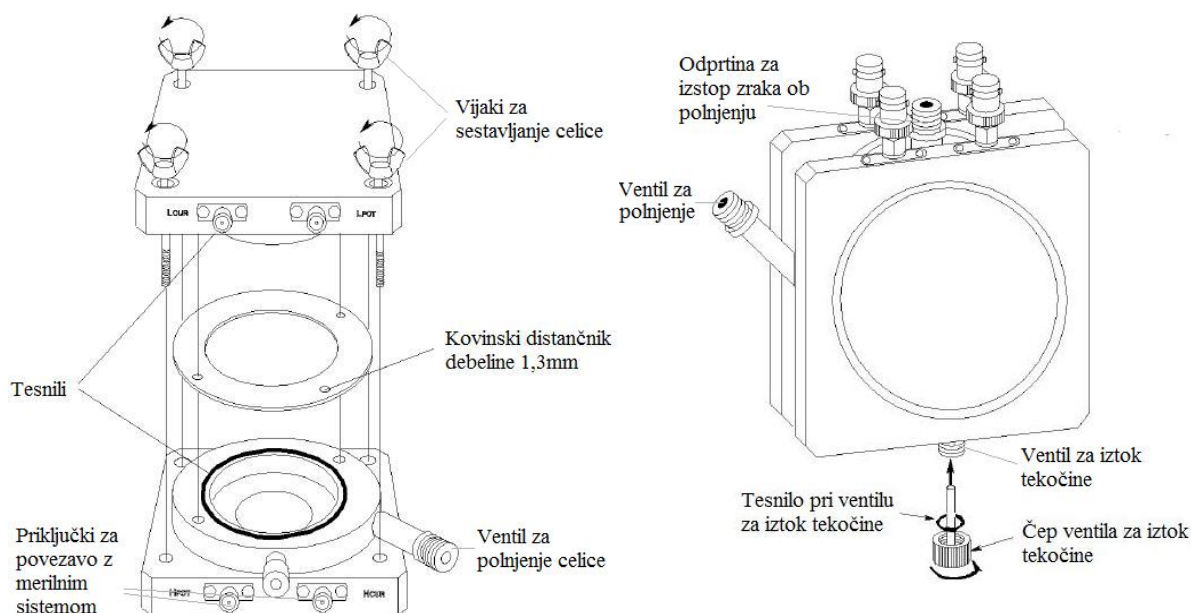
Dielektrične lastnosti olja in modelnih lipidnih zmesi smo merili s kapacitivno metodo z uporabo celice za merjenje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev (Agilent, 16452A, Agilent Technologies, California, USA) in LCR merilnikom (Agilent, E4980A, Agilent Technologies, California, USA).

3.3.1.1 Celica za določanje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev

Celica (Agilent, 16452A) omogoča določanje dielektrične konstante preko meritev impedance tekočim vzorcem. Impedanca je elektrotehniška in fizikalna količina, ki

označuje odziv elektrotehniškega elementa v izmeničnem električnem toku. Sestavljena je iz realnega dela - upornosti in imaginarnega dela - reaktance (Agilent Technologies, 2000).

Vzorec se napolni med dve ploščati okrogli vzporedni elektrodi (slika 1), kar predstavlja kondenzator z določeno kapacitivnostjo. Površina elektrod v celici ima premer 38 mm. Celica ima možnost spreminjanja prostornine med elektrodama tako, da med obe polovici celice vstavimo distančnike različnih debelin (preglednica 3). Sestavni deli, način sestavljanja in ventili za polnjenje in praznjenje celice so prikazani na sliki 1. Celica deluje pri napetosti do 30 V in v področju frekvenc od 20 Hz do 30 MHz, odvisno od merilnika, s katerim je celica povezana. Meritve se lahko izvajajo pri temperaturah med -20 do +125 °C, pri čemer je potrebno uporabiti povezovalni kabel, ki omogoča meritve v enakem temperaturnem območju (Agilent, 16452-61601, dolžine 1m). Povezovalni kabel se na celico priključi preko SMA-BNC adapterjev. Ohišje celice je izdelano iz zlitine, ki vsebuje 54 % železa, 17 % kobalta in 29 % niklja. Izolator je keramičen in sicer iz aluminijevega oksida in je z ohišjem spojen preko zlitine srebra in bakra ter zlata in bakra. Tesnila so iz viton gume. Celica ima dimenzije 85 mm × 85 mm × 37 mm in tehta 1,4 kg (Agilent Technologies, 2000).



Slika 1: Celice za merjenje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev 16452A (Agilent Technologies, 2000).

Preglednica 3: Razmik med elektrodama in prostornina v celici za določanje dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev pri različnih distančnikih (Agilent Technologies, 2000).

debelina distančnika (mm)	1,3	1,5	2,0	3,0
razmik med elektrodama (mm)	0,3	0,5	1,0	2,0
prostornina vzorca (cm ³)	3,4	3,8	4,8	6,8

V primeru merjenja dielektričnih lastnosti lipidnih vzorcev se je izkazalo, da je zaradi velikosti merjenih kapacitivnosti C (majhna kapacitivnost) za meritve najprimernejši distančnik debeline 1,3 mm. Vrednosti dielektrične konstante in faktorja izgub določene s tem distančnikom za sončnično olje in oleinsko kislino so primerljive z vrednostmi iz literature (Lizhi in sod., 2008). Tako smo vse meritve opravili z razmikom med elektrodama 0,3 mm.

Vzorci lipidov smo v celico napolnili s pomočjo 5 mL injekcijske igle po odzračevanju.

3.3.1.2 Merilnik LCR

Celico smo povezali z merilnikom za merjenje impedance Agilent Precision LCR Meter E4980A. Merilnik omogoča meritve impedanc v merilnem območju frekvenc od 20 Hz do 2 MHz pri razponu napetosti od 100 μ V do 2 V in razponu toka od 1 μ A do 20 mA.

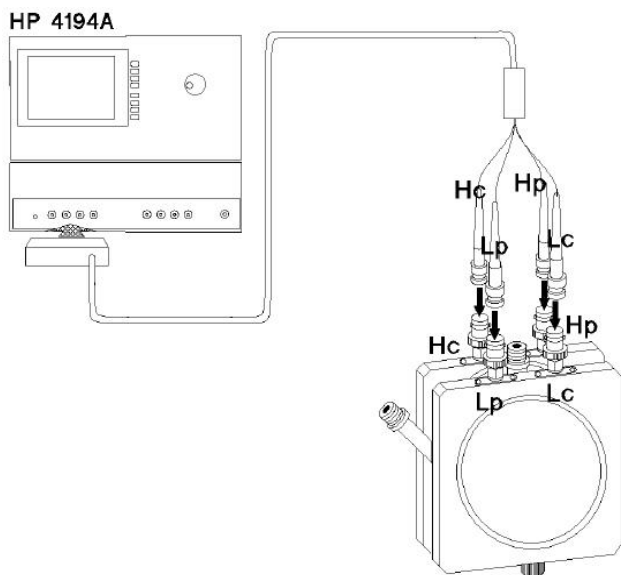
Pri tem nam instrument poda vrednost dveh parametrov: primarnega parametra, ki zajema večji del impedance in je določen z večjo natančnostjo in sekundarnega, pogosto tudi minornega, ki je določen z manjšo natančnostjo. Izmed možnih impedančnih parametrov smo glede na podatke iz literature (Agilent Technologies, 2006; Lizhi in sod., 2008) izbrali za primarni parameter kapacitivnost, C in za sekundarni parameter upornost R . Pri meritvah smo uporabili merilno napetost (1 V). To je pogosto uporabljena vrednost napetosti pri meritvah električnih in dielektričnih lastnosti tekočih vzorcev. Tok je dosegel vrednosti >1 mA.

Gledano s stališča osnov elektrotehnike je celica, napolnjena z modelno lipidno zmesjo, realni kondenzator. Za opis dejanskih električnih elementov uporabljamo nadomestna vezja. Realni kondenzator opišemo z nadomestno vezavo idealnega kondenzatorja in upora, ki sta lahko vezana paralelno ali serijsko (Šuhel in Kralj, 1991). V primeru določanja dielektričnih lastnosti lipidnim vzorcem smo na osnovi predhodnih meritev in podatkov iz literature (Lizhi in sod., 2008; Agilent Technologies, 2000) ugotovili, da je primerno izbrati paralelno nadomestno vezavo. Oznaki C_p in R_p torej označujeta meritve

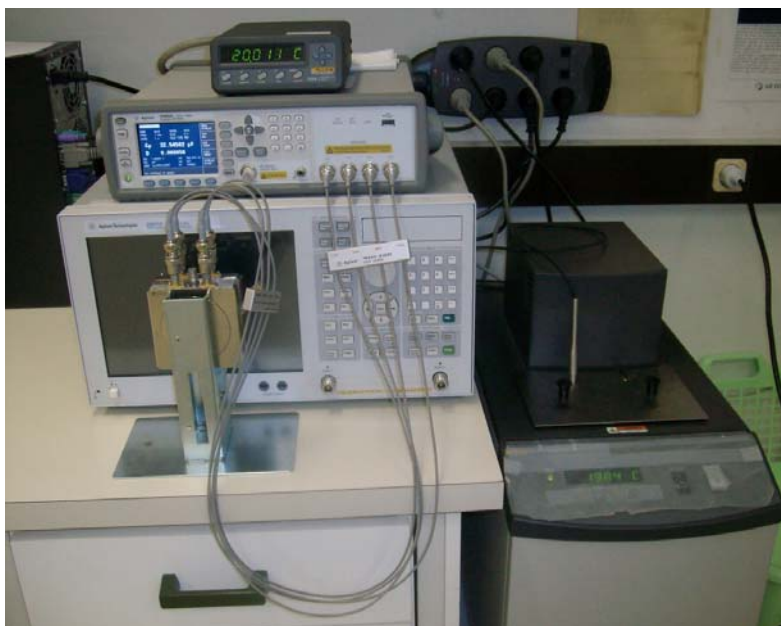
primarnega parametra kapacitivnosti in sekundarnega parametra upornosti na osnovi paralelne nadomestne vezave. Shema vezave celice na instrument je prikazana na sliki 2, fotografija sistema pa na sliki 3.

Pri meritvah dielektričnih lastnosti modelnih maščob smo izvajali meritve C_p in R_p vzorcev v frekvenčnem območju med 50 Hz in 1 kHz po korakih po 100 Hz, med 1 kHz in 10 kHz v korakih po 1 kHz, med 10 kHz in 100 kHz v korakih po 10 kHz in med 100 kHz in 2 MHz v korakih po 100 kHz. Na ta način smo posneli dielektrični spekter vzorcev pri 47 frekvencah med 50 Hz in 2 MHz. Celoten merilni proces smo izvajali avtomatizirano z uporabo računalnika ter pripadajočo programsko podporo.

Za sistem LCR merilnika in pripadajoče celice smo v skladu z navodili proizvajalca izvedli kalibracijo sistema s kratkim stikom. Poleg tega smo izmerili kapacitivnost zraka, C_0 pri enakih frekvencah in temperaturah merjenja kot pri vzorcih in jo uporabili pri izračunu dielektričnih parametrov (Lizhi in sod., 2008; Agilent Technologies, 2006).



Slika 2: Vezava celice za merjenje dielektričnih lastnosti z LCR metrom (Agilent Technologies, 2000).



Slika 3: Fotografija sistema celice, merilnika za mejenje impedance, termostata in uporovnega termometra.

3.3.1.3 Termostatiranje vzorcev

Meritve impedančnih parametrov smo izvajali pri temperaturah 20, 30, 40 in 50 °C. Za termostatiranje vzorcev smo uporabili termostatsko kopel (Fluke 7230-25), plinasti uporovni termometer (Fluke 1502A) z merilnim območjem -200 do 420 °C in digitalni termometer (Fluke 5627-6-D) z natančnostjo $\pm 0,005$ °C.

Temperaturo smo nastavljali ročno na termostatski kopeli in jo preverjali z digitalnim termometrom. Meritev smo opravili, ko je digitalni termometer v termostatu 15 minut kazal konstantno temperaturo in se je ta gibala $\pm 0,005$ °C od izbrane temperature (npr. pri 20 °C med 20,005 in 19,995 °C).

3.3.2 Izračun dielektričnih parametrov (dielektrične konstante in faktorja dielektričnih izgub) iz meritev kapacitivnosti in upornosti

Dielektrično konstanto ϵ' olja smo izračunali z naslednjo enačbo (Agilent Technologies, 2000):

$$\epsilon' = \alpha \frac{C_p}{C_0} \quad (7)$$

ϵ'	.....	dielektrična konstanta maščobe
C_p	.....	kapacitivnost maščobe
C_0	.....	kapacitivnost zraka
α	.....	korekcijski faktor

Faktor dielektrične izgube smo izračunali iz meritev upornosti in kapacitivnosti zraka.

$$\epsilon'' = \alpha \frac{1}{R_p C_p \omega} \quad (8)$$

ϵ''	.....	faktor dielektrične izgube
C_p	.....	kapacitivnost maščobe
R_p	.....	upornost maščobe
α	.....	korekcijski faktor
ω	.....	kotna frekvenca ($\omega = 2\pi f$)

Korekcijski faktor je definiran s strani proizvajalca celice in je odvisen od dielektrične konstante merjenega medija.

$$\alpha = \frac{100|\epsilon'_{\text{m}}|}{97,0442|\epsilon'_{\text{m}}| + 2,9558} \quad (9)$$

$$|\epsilon'_{\text{m}}| = \left(\frac{C_p^2}{C_0^2} + \frac{1}{(R_p C_p \omega)^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Vrednosti korekcijskega koeficienta α so za zrak enake 1, medtem ko so za modelne lipidne sisteme med 1,017 pri oleinski kislini in 1,022 pri nasičenem standardu in staranem olju žafranike.

Deklarirana napaka dielektrične konstante za proučevane lipide pri navedenih pogojih merjenja je odvisna od frekvence in temperature. Pri 20 in 30 °C se napaka dielektrične konstante znižuje od 1 % pri 100Hz do 0,2 % pri 1kHz in od 50 kHz narašča do 0,5 % pri 2 MHz. Pri 40 in 50 °C je napaka dielektrične konstante 0,4 % pri frekvencah od 30-

100 kHz in narašča do 0,8 % pri 2 MHz in okrog 5 % pri 100 Hz (Agilent Technologies, 2006). Napaka določitve faktorja izgub je mnogo višja kot pri dielektrični konstanti, saj je v opisanem sistemu upornost sekundarni parameter merjenja. Kadar določimo ϵ' okrog 3 in je ϵ' 0,03 (100× manjši) je napaka določitve do 20 %; pri vrednostih ϵ'' 0,0003 pa napaka naraste tudi do 50 % in čez.

3.3.3 Priprava olja – degaziranje

Pred začetkom merjenja dielektričnih lastnosti vzorca olja in drugih modelnih lipidnih zmesi, je bilo potrebno vzorec pripraviti. Iz dejstev navedenih v uvodu vemo, da je smiselno primerjati dielektrično konstanto in faktor izgube le v vzorcih z enako vsebnostjo vode, saj že majhno variiranje v vsebnosti vode z zelo visoko dielektrično konstanto bistveno vpliva na izmerjene vrednosti dielektričnih lastnosti olja in drugih lipidnih zmesi, ki so močno nepolarni in imajo dielektrično konstanto mnogo manjšo.

Pred meritvami smo vse vzorce olj in modelnih lipidnih zmesi posušili in razplinili. Uporabili smo metodo sušenja vzorcev prirejeno po AOCS Ca 2d-25. Metoda temelji na sušenju vzorca pri znižanem tlaku (do 100 mm Hg ali 0,133 bara) in temperaturi 20 do 25 °C. V 50 mL čaši smo 5 g vzorca odzračevali eno uro v plastičnem eksikatorju z vakuumsko črpalko pri tlaku 0,10 bara pri sobni temperaturi, ki se je gibala med 23 in 25 °C, ob stalnem mešanju.

Na ta način smo poskušali vzorcem ohranjati enake vrednosti maščobnih števil, predvsem peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti, saj jih nismo izpostavili visokim temperaturam, pri katerih bi pospešili oksidacijo in druge procese staranja olja.

Hkrati smo rešili še problem polnjenja vzorca v merilno celico. Zaradi narave vzorcev olj in modelnih lipidnih zmesi, ki imajo bistveno večjo viskoznost kot vodne raztopine, je bilo težko celico napolniti tako, da med elektrodama ni bilo ujetih mehurčkov zraka. Tako je metoda sušenja hkrati služila za odzračevanje vzorcev in izrivanje plinov.

3.3.4 Čiščenje celice

Po izvedeni meritvi smo vzeli celico iz termostata, jo osušili in odklopili vse 4 priključke. Skozi polnilni vod smo izlili večino vzorca, nato pa vanjo natočili 3 mL čistila za čiščenje elektrod, ki odstranjuje maščobo (Hanna Instruments, HI 7077, electrode cleaning solutions for oils). Po 15 minutah smo zaprto celico še trikrat sprali s po 3 mL propan-2-ola. Celico smo odprli in obe polovici sprali še s približno po 20 mL propan-2-ola. Na koncu smo zaključili čiščenje celice tako, da smo vsako od polovic sprali še z acetonom dokler se nista ohišje celice in površina elektrod na pogled zdeli popolnoma čisti. Kljub robustnem izgledu celice smo površino elektrod izključno spirali s topili, za čiščenje ohišja celice pa uporabili še staničevino.

Celico smo čez noč sušili na zraku. V primeru ponovne uporabe celice v istem dnevu smo jo sušili s sušilnikom za lase, in nato še prepihali z dušikom iz jeklenke.

3.4 STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV

Za vse izračune smo uporabili osebni računalnik in paket za statistično obdelavo podatkov ORIGIN (MicrocalTM, 1995).

Enostavni statistični parametri, ki smo jih določali so:

- Aritmetična sredina meritev – srednja vrednost ($\bar{x}$)
- Napaka aritmetične sredine – standardna napaka (SD)
- Koeficient variacije (%) – KV

Za ugotavljanje vpliva maščobnih števil na vrednost dielektrične konstante modelnih lipidov, smo uporabili linearno regresijsko analizo. Z metodo najmanjših kvadratov smo izračunali parametre premice, odsek in naklon premice, njuno standardno napako (SD), korelacijski koeficient premice (r) in standardno napako določitve (s) (Skoog in sod., 1998).

4 REZULTATI

4.1 REZULTATI KEMIJSKIH ANALIZ OSNOVNIH VZORCEV SONČNIČNEGA OLJA, MODELNIH LIPIDOV IN NEKATERIH NJIHOVIH ZMESI

4.1.1 Rezultati meritev kemijskih analiz vzorcev

V preglednici 4 smo zbrali rezultate meritev kemijskih analiz osnovnih vzorcev rastlinskih olj in modelnih lipidov: sončničnega olja, oleinske kisline, olja žafranike, nasičenega sintetičnega triglicerida ter nekaterih njihovih zmesi. V preglednici je sončnično olje našteto trikrat. Prvo olje smo uporabili za pripravo zmesi z oleinsko kislino, drugo pa pri zmeseh z oznakami 3, 4, in 5. Tretje olje pa smo uporabili za primerjavo vzorcev sončničnega olja.

Preglednica 4: Izmerjene vrednosti maščobnih števil za izbrane vzorce lipidov.

oznaka vzorca	KŠ	JŠ	PŠ	p-AV
1	1,66	93,4	/	/
1'	2,00	84,7	2,37	0,17
1"	2,40	82,1	2,70	0,2
2b	124	/	/	/
2	200	91,9	1,18	16,3
3c	/	53,9	/	/
3	0,13	4,13	0,36	0,41
4	/	/	24,7	5,18
5c	/	/	189	98,3
5	3,17	97,4	512	249

Vrednosti maščobnih števil določenih za sončnično olje uporabljeno v naši analizi so primerljive z vrednostmi za maščobna števila objavljena za sončnično olje slovenskih proizvajalcev (Klofutar in Rudan-Tasič, 1999). Trije vzorci sončničnega olja pripadajo istemu proizvajalcu in isti vrsti izdelka. Razlikujejo se le po datumu izdelave. Kislinsko število je za vse tri izdelke podobno, prav tako jodovo število za vzorca 1' in 1". Peroksidno število ter p-anizidinska vrednost vzorcev 1' in 1" se zadovoljivo ujemata. Za vzorec 1 sklepamo, da so vrednosti peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti podobne izmerjenim vrednosti za 1' in 1".

Kislinsko število oleinske kisline se dobro ujema z izračunano vrednostjo, ki znaša 199 in podatki proizvajalca (Merck, 2009). Prav tako se z navedbo proizvajalca dobro ujema jodovo število, medtem ko smo določili nekoliko nižjo vrednost peroksidnega števila kot jo navaja proizvajalec.

Glede na sestavo smo za nasičeni triglicerid, vzorec 3 pričakovali še nižje jodovo število kot 4, medtem ko so vrednosti za ostala maščobna števila pričakovane.

Peroksidno število in p-anizidinska vrednost v staranem olju žafranike presegata najvišje pričakovane vrednosti. Teoretično možnost tako visoke vrednosti peroksidnega števila smo preverili z izračunom teoretične vrednosti peroksidnega števila oleinske kisline. Izračun pokaže, da lahko peroksidno število doseže še višje vrednosti kot 500 (Patterson, 1989).

4.1.2 Izračun maščobnih števil zmesi

Večini zmesem pripravljenim kot je zapisano v preglednici 4 smo maščobna števila izračunali. Tega manj natančnega postopka, kot je določitev vseh maščobnih števil, smo se poslužili zaradi namena naloge, da opravimo grob pregled vpliva maščobnih števil na dielektrično konstanto in faktor izgube. Račun smo izvedli na dva načina. Pri zmeseh, za katere smo po sestavi predvidevali, da se jim maščobna števila le malo razlikujejo, naprimer jodovo in peroksidno število ter p-anizidinska vrednost pri zmeseh 2, kislinsko in peroksidno število ter p-anizidinska vrednost pri zmeseh 3 in kislinsko in jodovo število pri zmeseh 5 smo maščobna števila izračunali na osnovi principa aditivnosti po naslednji enačbi:

$$M\check{S}_{[x]} = w_1 M\check{S}_1 + w_j M\check{S}_j \quad (11)$$

V enačbi 11 pomeni MŠ maščobno število: kislinsko, jodovo in peroksidno število ali p-anizidinska vrednost. Indeks 1 pomeni sončnično olje, j pa ostale osnovne modelne lipide z oznakami od 2 do 5. Glede na različne masne deleže sončničnega olja v modelni lipidni zmesi zavzame indeks x oznake a, b, c, in d, ki predstavljajo 20, 40, 60 in 80 % masni delež sončničnega olja v modelni lipidni zmesi.

Pri maščobnih številih, ki se močno spreminjajo s sestavo modelne lipidne zmesi kot je kislinsko število pri zmeseh z oznako 2, jodovo število pri zmeseh 3 in peroksidno število ter p-anizidinska vrednost pri zmeseh 5 smo na osnovi metode najmanjših kvadratov poiskali linearno odvisnost maščobnega števila od sestave zmesi:

$$M\check{S} = A + B \cdot w_1 \quad (12)$$

V enačbi 12 je A odsek in B naklon premice. Vrednosti koeficientov premice in njune standardne napake, hkrati s korelacijskim koeficientom premice in standardno napako določitve premice smo zbrali v preglednici 5.

Preglednica 5: Odsek (A) in naklon premice (B), standardna napaka (s) in korelacijski koeficient (r) za linearne zveze, ki opisujejo odvisnost maščobnih števil (MŠ) od sestave zmesi.

MŠ	A	B	r	s
KŠ	201,1 ± 2,6	- 198,2 ± 4,2	-0,99978	3
JŠ	4,5 ± 1,1	80,8 ± 1,7	0,99979	1
PŠ	501,1 ± 2,9	-498,8 ± 2,9	-0,99926	6
p-AV	244,2 ± 2,7	- 243,7 ± 2,7	-0,99985	2

Na osnovi odvisnosti 11 in 12 smo dopolnili vrednosti za maščobna števila zmesi. Izračunana maščobna števila smo zbrali v preglednici 6. Vrednosti za zmesi 2 temeljijo na meritvi kislinskega števila sončničnega olja z oznako 1 in izračun za ostale zmesi na vrednostih maščobnih števil za sončnično olje z oznako 1'. Pri uporabi izračunanih vrednosti maščobnih števil v preglednici 6 smo pri nadaljnjem delu upoštevali standardno napako določitve, s iz zadnje kolone v preglednici 5.

Preglednica 6: Izračunane vrednosti maščobnih števil za vse zmesi lipidov.

oznaka vzorca	KŠ	JŠ	PŠ	p-AV
2a	160	92,2	2,91	13,15
2b	120	92,5	4,62	9,99
2c	80,9	92,8	6,35	6,82
2d	43,1	93,0	7,99	3,81
3a	0,504	20,3	0,76	0,36
3b	0,879	36,4	1,16	0,31
3c	1,25	52,4	1,56	0,26
3d	1,62	68,5	1,96	0,21
5a	2,94	94,8	410	199
5b	2,70	92,3	308	149
5c	2,47	89,8	207	99,9
5d	2,24	87,3	105	50,3

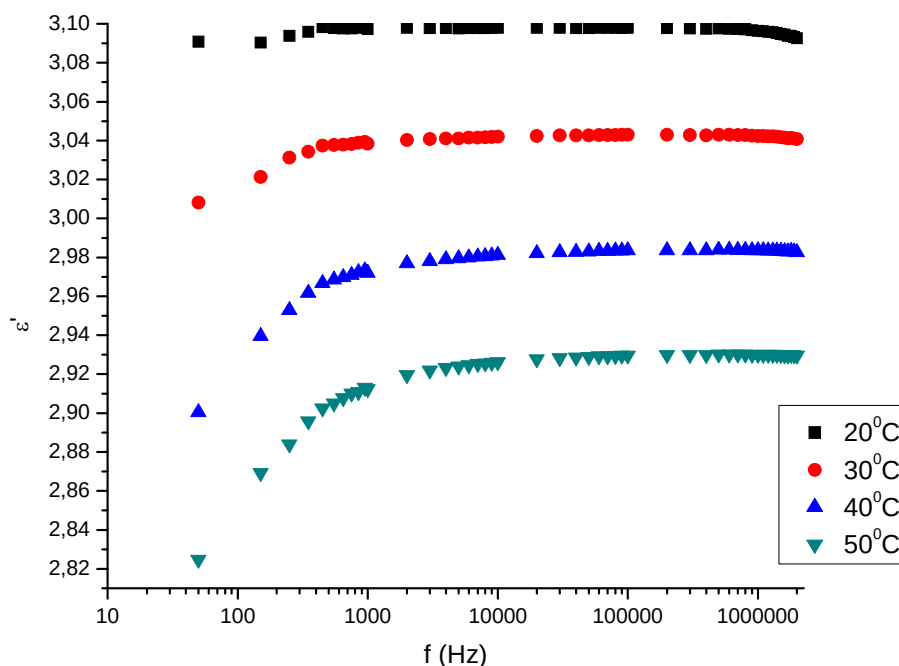
Vrednosti maščobnih števil v preglednicah 5 in 6 so podane na eno števko več kot določajo pravila o računanju z merskimi števili, saj strogo zaokrožanje merskih števil pogosto vpliva na rezultate nadaljnjih računov.

4.2 DIELEKTRČINA KONSTANTA MODELNIH LIPIDNIH ZMESI

4.2.1 Dielektrična konstanta sončničnega olja

Na sliki 4 je predstavljena dielektrična konstanta sončničnega olja za vzorec 1 v odvisnosti od frekvence v območju od 50 Hz do 2 MHz (dielektrični spekter) in temperature v območju od 20 °C do 50 °C v intervalih po 10 °C. Iz slike je razvidno, da se dielektrična konstanta olja spreminja s frekvenco in temperaturo.

S povečevanjem temperature vrednost dielektrične konstante pada. Pri temperaturi 20 °C je tako vrednost dielektrične konstante najvišja in se s povišanjem temperature za 10 °C zniža za približno 2,5 %.



Slika 4: Dielektrična konstanta sončničnega olja v odvisnosti od frekvence in temperature.

Dielektrično konstanto smo določili trem vzorcem hladno stiskanega sončničnega olja Gea. Primerjavo smo podali za 20 °C v preglednici 7. V preglednici pomeni $\bar{\epsilon}'$ in $\Delta\epsilon'$ povprečno vrednost in standardno napako dielektrične konstante določeno pri treh vzorcih olja.

Preglednica 7: Dielektrična konstanta treh vzorcev sončničnega olja, njena povprečna vrednost in standardna napaka v odvisnosti od frekvence pri 20 °C.

f (kHz)	olje 1	ε' olje 1'	olje 1''	$\bar{\varepsilon}'$	$\Delta\varepsilon'$
0,05	3,091	3,127	3,124	3,114	0,020
0,15	3,090	3,130	3,120	3,113	0,021
0,25	3,094	3,135	3,121	3,116	0,021
0,35	3,096	3,137	3,123	3,119	0,021
0,45	3,098	3,139	3,125	3,121	0,021
0,55	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
0,65	3,098	3,138	3,124	3,120	0,021
0,75	3,098	3,138	3,124	3,120	0,021
0,85	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
0,95	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
1	3,097	3,138	3,123	3,120	0,021
2	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
3	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
4	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
5	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
6	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
7	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
8	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
9	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
10	3,098	3,139	3,124	3,120	0,021
20	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
30	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
40	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
50	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
60	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
70	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
80	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
90	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
100	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
200	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
300	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
400	3,097	3,138	3,123	3,120	0,021
500	3,098	3,139	3,123	3,120	0,021
600	3,097	3,138	3,123	3,120	0,021
700	3,097	3,138	3,123	3,119	0,021
800	3,097	3,138	3,123	3,119	0,021
900	3,097	3,138	3,123	3,119	0,021
1000	3,096	3,137	3,123	3,119	0,021
1100	3,096	3,137	3,123	3,119	0,021
1200	3,096	3,137	3,123	3,118	0,021
1300	3,096	3,137	3,123	3,118	0,021
1400	3,095	3,136	3,123	3,118	0,021
1500	3,095	3,136	3,123	3,118	0,021
1600	3,094	3,135	3,123	3,117	0,021
1700	3,094	3,135	3,122	3,117	0,021
1800	3,094	3,135	3,122	3,117	0,021
1900	3,093	3,134	3,122	3,116	0,021
2000	3,093	3,133	3,122	3,116	0,021

Dielektrična konstanta ima pri vseh temperaturah najnižjo vrednost pri 50 Hz. Od najnižje vrednosti dielektrična konstanta narašča približno do 1 kHz, kjer doseže plato, ki se vleče do frekvence okrog 1 MHz. Sprememba dielektrične konstante od 50 Hz do 1 kHz se s temperaturo spreminja: najnižja je pri 20 °C in največja je pri 50 °C. Pri frekvencah nad 1 MHz se dielektrična konstanta olja spet nekoliko zmanjša. Znižanje dielektrične konstante od 1 - 2 MHz je najizrazitejše pri 50 °C.

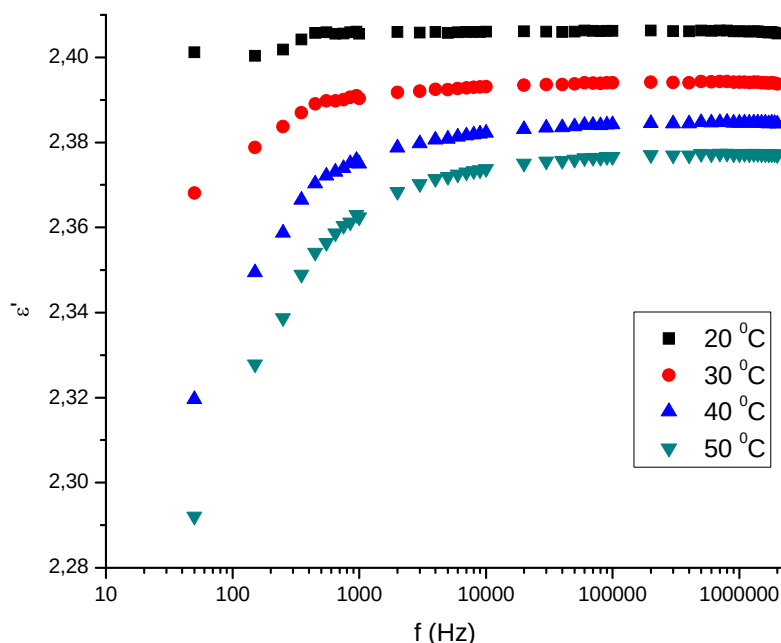
Iz preglednice 7 lahko vidimo, da se dielektrična konstanta treh vzorcev olja razlikuje za 0,7 % pri 20 °C in je enaka v vsem frekvenčnem območju. Sipanje meritev je pri višjih temperaturah nekoliko večje, pri 50 °C naraste do 1,5 %. Deklarirana napaka določitve dielektrične konstante je 0,5 % pri 20°C, kar je nekoliko manj kot je sipanje meritev treh različnih vzorcev olja.

4.2.2 Vpliv kislinskega števila na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi

4.2.2.1 Dielektrična konstanta oleinske kisline

Dielektrična konstanta oleinske kisline je v odvisnosti od frekvence in temperature prikazana na sliki 5. Dielektrična konstanta oleinske kisline je nižja kot dielektrična konstanta sončničnega olja. Podobno kot pri sončničnem olju tudi dielektrična konstanta oleinske kisline z naraščanjem temperature pada. Pri vseh temperaturah doseže najnižjo vrednost pri 50 Hz. Naraščanje dielektrične konstante s frekvenco je najbolj izrazito pri najvišji in najmanj izrazito pri najnižji temperaturi. Nasprotno je plato v frekvenčnem območju od 10 kHz do 1 MHz najizrazitejši pri najnižji in manj izrazit pri višjih temperaturah. Znižanje dielektrične konstante pri visokih frekvencah merjenja od 1 - 2 MHz je neizrazito.

Dielektrično konstanto oleinske kisline lahko primerjamo z vrednostjo iz literature. Lizhi in sodelavci (2008) so določili vrednost 2,377 pri 25 °C. Vrednost dielektrične konstante določena pri našem delu je nekoliko višja in znaša 2,394 pri 20 °C in 2,406 pri 30 °C.



Slika 5: Dielektrična konstanta oleinske kisline v odvisnosti od frekvence in temperature.

4.2.2.2 Dielektrične konstante zmesi sončničnega olja in oleinske kisline

Zanimalo nas je, kako se dielektrična konstanta spreminja s kislinskim številom. Pripravili smo lipidne zmesi iz sončničnega olja in oleinske kisline (vzorci 2a - 2d), v katerih izrazito variira kislinsko število. Jodovo in peroksidno število se v teh zmesih malo razlikujeta, precej opazna pa je razlika pri p-anizidinski vrednosti.

Dielektrična konstanta oleinske kisline je za 0,7 nižja kot dielektrična konstanta sončničnega olja. Dielektrični spektri zmesi 2a - 2d se s povečanjem dodatka oleinske kisline v sončnično olje vse bolj razlikujejo od spektra sončničnega olja in približujejo sliki spektra oleinske kisline. Za opis spektrov smo podobno kot so Lizhi in sodelavci (2008) uporabili naslednjo razdelitev na 3 frekvenčne intervale:

1. interval frekvenc od 10 kHz do 1 MHz, kjer dielektrična konstanta dosega plato. Ta del v dielektričnem spektru smo opisali s srednjo vrednostjo in standardno napako dielektrične konstante izračunano v tem frekvenčnem območju. Srednjo vrednost smo označili z ε'_p .

2. naraščanje dielektrične konstante pri nizkih frekvencah od 50 Hz do 10 kHz. Ta del smo opisali z dvema vrednostima: dielektrično konstanto izmerjeno pri 50 Hz (ϵ'_{nf}) in razliko med dielektrično konstanto ϵ'_p in dielektrično konstanto pri 50 Hz in jo označili z $\Delta\epsilon'_{nf}$:

$$\Delta\epsilon'_{nf} = \epsilon'_{nf} - \epsilon'_p \tag{13}$$

3. interval dielektrične konstante pri frekvencah med 1 MHz in 2 MHz, kjer vrednost dielektrične konstante nekoliko pade. Ta del smo opisali z dielektrično konstanto izmerjeno pri 2 MHz (ϵ'_{vf}) in razliko med dielektrično konstanto platoja in dielektrično konstanto pri 2 MHz in jo označili z $\Delta\epsilon'_{vf}$:

$$\Delta\epsilon'_{vf} = \epsilon'_{vf} - \epsilon'_p \tag{14}$$

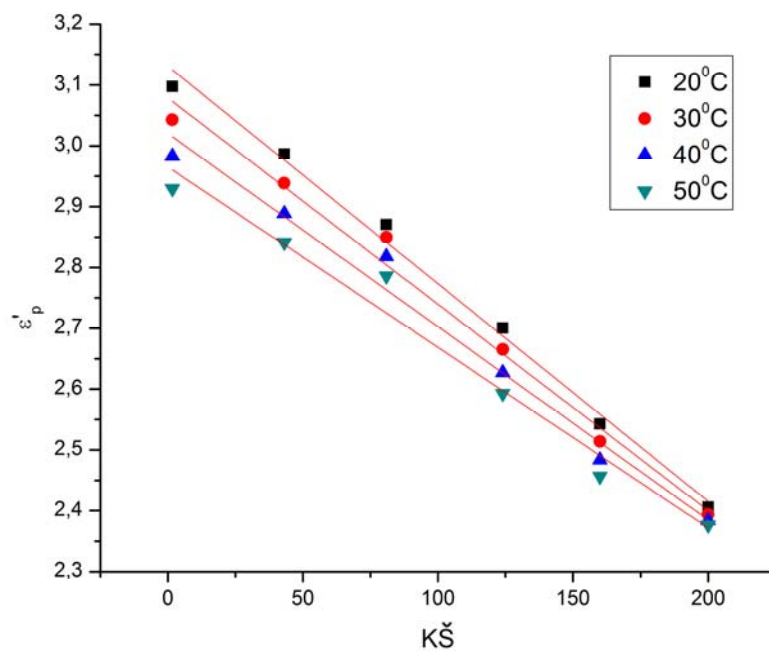
Vse opisane vrednosti smo za sončnično olje, oleinsko kislino in njune zmesi zbrali v preglednici 8. Najvišjo vrednost dielektrične konstante ϵ'_p smo določili pri sončničnem olju in 20 °C. Dielektrična konstanta, ϵ'_p , ϵ'_{nf} in ϵ'_{vf} pada z naraščajočim kislinским številom pri vseh temperaturah. Spreminjanje frekvence v območju od 10 kHz do 1 MHz zelo malo vpliva na velikost dielektrične konstante, saj je sipanje ϵ'_p zelo nizko: od 0,0001 pri oleinski kislini in 20 °C do 0,001 pri vseh zmesih in 50 °C. Dielektrična konstanta pri 50 Hz, ϵ'_{nf} je za vse zmesi nižja kot tista določena pri frekvencah od 10 kHz do 1 MHz, kar kaže negativna vrednost $\Delta\epsilon'_{nf}$. Naraščanje dielektrične konstante od 50 Hz do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$ je najmanjše pri 20 °C in največje 50 °C; pri vseh temperaturah je največje pri sončničnem olju in pada z dodajanjem oleinske kisline v lipidno zmes. Spreminjanje dielektrične konstante pri frekvencah nad 1 MHz je majhno: ϵ'_{vf} je podobna ϵ'_p in $\Delta\epsilon'_{vf}$ je majhna. Negativna vrednost $\Delta\epsilon'_{vf}$ kaže na nižanje dielektrične konstante pri višjih frekvencah. Največje je znižanje dielektrične konstante pri visokih frekvencah pri sončničnem olju in 20 °C. Pojav je manj izrazit pri višjem kislinским številu: pri isti temperaturi je z naraščajočim kislinским številom in tako višjo vsebnostjo oleinske kisline v lipidni zmesi $\Delta\epsilon'_{vf}$ vse manj negativna. Pri čisti oleinski kislini in v zmesi z 20 % olja pri 40 °C in za vse zmesi pri 50 °C ima $\Delta\epsilon'_{vf}$ pozitiven predznak, kar pomeni, da za te zmesi dielektrična konstanta pri frekvencah nad 1 MHz komaj opazno narašča.

Preglednica 8: Odvisnost dielektrične konstante v frekvenčnem območju od 10 kHz do 1 MHz, ϵ'_p , dielektrična konstanta pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , in 2 MHz, ϵ'_{vf} , ter spreminjanje dielektrične konstante od 50 Hz do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, in od 1 MHz do 2 MHz, $\Delta\epsilon'_{vf}$, od temperature in kislinkega števila.

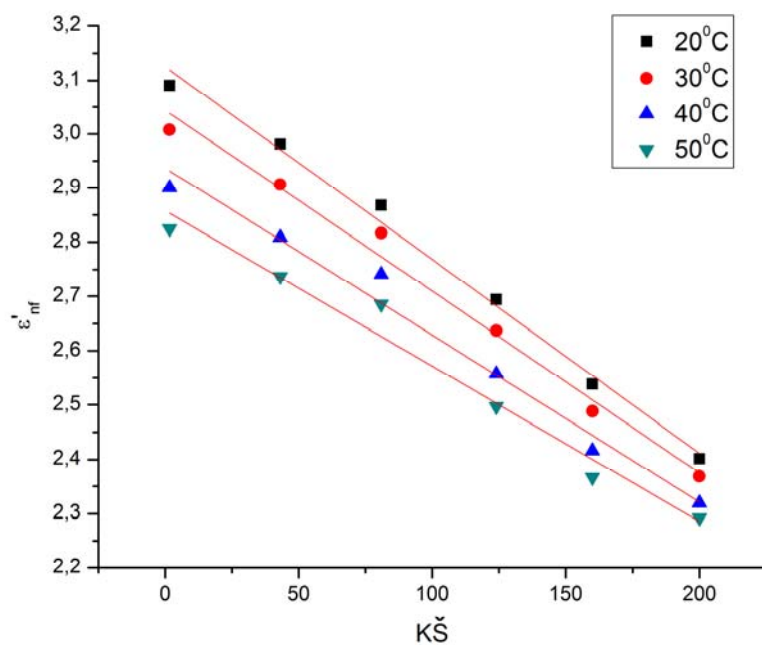
Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, oleinske kisline in njune zmesi.

oznaka vzorca	T (°C)	KŠ	ϵ'_p		ϵ'_{nf}	$\Delta\epsilon'_{nf}$	ϵ'_{vf}	$\Delta\epsilon'_{vf}$
1	20	1,66	3,0976	± 0,0005	3,0909	-0,0067	3,0926	-0,0050
2d		43,1	2,9867	± 0,0003	2,9814	-0,0053	2,9828	-0,0038
2c		80,9	2,8706	± 0,0002	2,8677	-0,0030	2,8680	-0,0026
2b		124	2,7003	± 0,0002	2,6944	-0,0059	2,6987	-0,0016
2a		160	2,5429	± 0,0001	2,5387	-0,0042	2,5420	-0,0010
2		200	2,4062	± 0,0001	2,4012	-0,0050	2,4056	-0,0006
1	30	1,66	3,0427	± 0,0003	3,0081	-0,0347	3,0407	-0,0020
2d		43,1	2,9385	± 0,0003	2,9065	-0,0321	2,9369	-0,0016
2c		80,9	2,8496	± 0,0003	2,8165	-0,0330	2,8485	-0,0011
2b		124	2,6652	± 0,0004	2,6371	-0,0281	2,6642	-0,0010
2a		160	2,5139	± 0,0003	2,4885	-0,0254	2,5135	-0,0003
2		200	2,3940	± 0,0003	2,3681	-0,0259	2,3937	-0,0002
1	40	1,66	2,9833	± 0,0007	2,9004	-0,0828	2,9827	-0,0006
2d		43,1	2,8886	± 0,0007	2,8088	-0,0798	2,8881	-0,0005
2c		80,9	2,8179	± 0,0007	2,7411	-0,0768	2,8177	-0,0002
2b		124	2,6273	± 0,0007	2,5574	-0,0698	2,6273	0,0000
2a		160	2,4838	± 0,0007	2,4161	-0,0677	2,4839	0,0002
2		200	2,3841	± 0,0007	2,3196	-0,0645	2,3843	0,0002
1	50	1,66	2,9294	± 0,0010	2,8248	-0,1046	2,9296	0,0002
2d		43,1	2,8410	± 0,0011	2,7370	-0,1040	2,8413	0,0003
2c		80,9	2,7862	± 0,0011	2,6856	-0,1006	2,7866	0,0004
2b		124	2,5927	± 0,0010	2,4971	-0,0956	2,5932	0,0005
2a		160	2,4569	± 0,0010	2,3662	-0,0907	2,4575	0,0005
2		200	2,3765	± 0,0009	2,2921	-0,0844	2,3771	0,0006

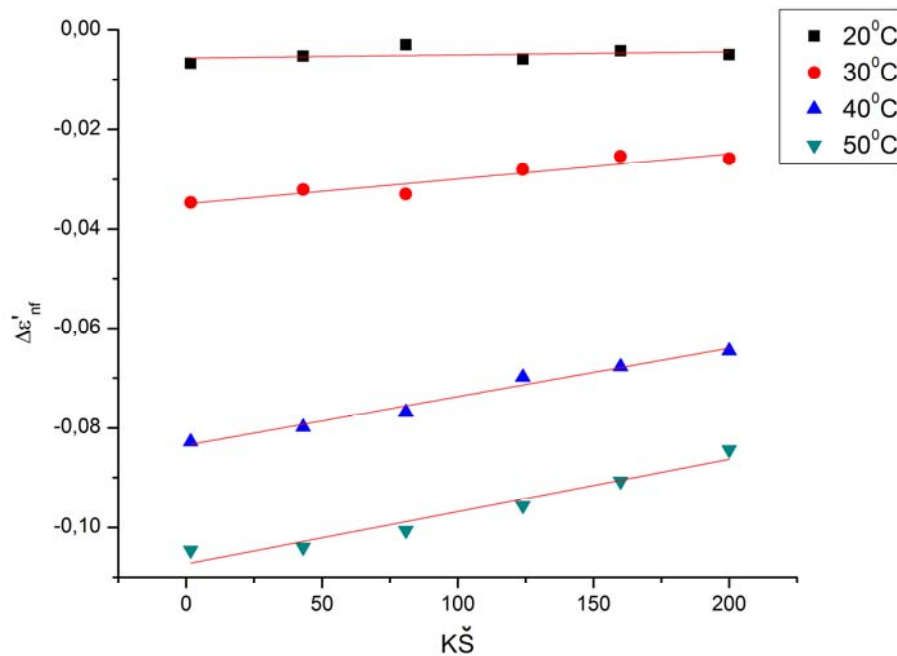
Odvisnost dielektrične konstante platoja od 10 kHz do 1 MHz, ϵ'_p , dielektrične konstante pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , ter spreminjanje dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, od kislinkega števila in temperature smo prikazali na slikah od 6 do 8.



Slika 6: Odvisnost dielektrične konstante platoja, ϵ'_p , od kislinskega števila in temperature za vzorce olja, oleinske kisline in njihovih zmesi.



Slika 7: Odvisnost dielektrične konstante pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , od kislinskega števila in temperature za vzorce olja, oleinske kisline in njihovih zmesi.



Slika 8: Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, od kislinkega števila in temperature za vzorce olja, oleinske kisline in njihovih zmesi.

Spreminjanje izbranih parametrov za opis dielektričnega spektra, ϵ'_p , ϵ'_{nf} in $\Delta\epsilon'_{nf}$ v odvisnosti od kislinkega števila in temperature, predstavljene na slikah 6 do 8, lahko opišemo naslednjo enačbo:

$$Y = A_0 + A_1 \cdot M\check{S} \quad (15)$$

V enačbi 15 je Y plato dielektrične konstante ϵ'_p , vrednost dielektrične konstante pri 50 Hz ϵ'_{nf} ali spreminjanje dielektrične konstante do 10 kHz $\Delta\epsilon'_{nf}$, $M\check{S}$ je maščobno število; in A_0 je odsek na y osi in A_1 smerni koeficient premice. A_0 in A_1 sta določena z metodo najmanjših kvadratov in smo ju poleg njunih napak in hkrati s korelacijskim koeficientom in standardno napako določitve premice zbrali v preglednici 9.

Na slikah 6 in 7 in v preglednici 9 lahko vidimo, da se dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi (tako ϵ'_p kot ϵ'_{nf}) v odvisnosti od kislinkega števila spreminja linearno. Dielektrična konstanta, tako ϵ'_p kot ϵ'_{nf} pada z naraščajočim kislinškim številom (koeficient A_0). Zmanjševanje dielektrične konstante je največje pri 20 °C, kar kaže najvišja absolutna vrednost koeficienta A_1 . Razlika v spreminjanju dielektrične konstante s kislinškim številom ϵ'_p kot ϵ'_{nf} ni statistično značilna, saj sta koeficienta A_0 in A_1 znotraj eksperimentalne napake za ϵ'_p in ϵ'_{nf} enaka. Koeficient A_1 je največji pri 20 °C. To pomeni, da je za opazovanje naraščanja kislinkega števila v sončničnem olju najprimerneje izbrati temperaturo 20 °C. Izbor frekvence ni tako pomemben. Saj so razlike v dielektrični

konstanti znotraj celega frekvenčnega območja majhne. Največje razlike dielektrične konstante zaradi spreminjanja frekvence smo opazili pri 50 °C. Pri tej temperaturi pa se dielektrična konstanta manj spreminja s kislinim številom.

Preglednica 9: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od kislinkega števila in temperature.

Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, oleinske kisline in njune zmesi.

Y	T (°C)	A_0	$-10^3 \cdot A_1$	r	s
ε'_p	20	3,131 ± 0,017	3,58 ± 0,14	0,9961	0,0468
	30	3,079 ± 0,022	3,39 ± 0,18	0,9930	0,0599
	40	3,020 ± 0,026	3,18 ± 0,21	0,9893	0,0694
	50	2,965 ± 0,028	2,97 ± 0,23	0,9851	0,0766
ε'_{nf}	20	3,125 ± 0,018	3,57 ± 0,1	0,9981	0,0486
	30	3,044 ± 0,021	3,34 ± 0,2	0,9955	0,0579
	40	2,937 ± 0,025	3,08 ± 0,2	0,9903	0,0682
	50	2,858 ± 0,027	2,86 ± 0,2	0,9849	0,0744

Če se kislinsko število spremeni za 1 se vrednost dielektrične konstante pri nizkih kislinških številih zniža za 0,00358 pri 20 °C in za 0,00297 pri 50 °C. Če upoštevamo relativno napako dielektrične konstante $\pm 0,5 \%$ ali absolutno napako dielektrične konstante $\pm 0,02$ bi lahko zaznali spremembo kislinkega števila med 5 in 7 pri 20 °C. Izbor frekvenc v območju od 50 Hz do 2 MHz ne vpliva bistveno na spreminjanje dielektrične konstante zaradi spreminjanja kislinkega števila.

Na sliki 8 in v preglednici 8 se vidi, da je spreminjanje dielektrične konstante v frekvenčnem območju od 50 Hz do 10 kHz, $\Delta\varepsilon'_{nf}$, različno pri različnih temperaturah in kislinškem številu. Pri 20 °C je $\Delta\varepsilon'_{nf}$ majhna in neodvisna od kislinkega števila ($\Delta\varepsilon'_{nf} = 0,006 \pm 0,003$). Z naraščajočo temperaturo je spreminjanje dielektrične konstante s frekvenco med 50 Hz in 10 kHz vse bolj izrazito in se linearno spreminja s kislinškim številom, kar smo zapisali z enačbami od 16 do 19:

$$20^\circ\text{C} \quad \Delta\varepsilon'_{nf} = 0,006 \pm 0,003 \quad (16)$$

$$30^\circ\text{C} \quad \Delta\varepsilon'_{nf} = (-0,034 \pm 0,001) + (5,0 \pm 0,09) \cdot 10^{-3} K_S \quad (17)$$

$$r = 0,927 \text{ in } s = 0,003$$

$$40^\circ\text{C} \quad \Delta\varepsilon'_{nf} = (-0,083 \pm 0,001) + (9,7 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} K_S \quad (18)$$

$$r = 0,989 \text{ in } s = 0,002$$

$$50^\circ\text{C} \quad \Delta\varepsilon'_{nf} = (-0,107 \pm 0,002) + (10,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} K_S \quad (19)$$

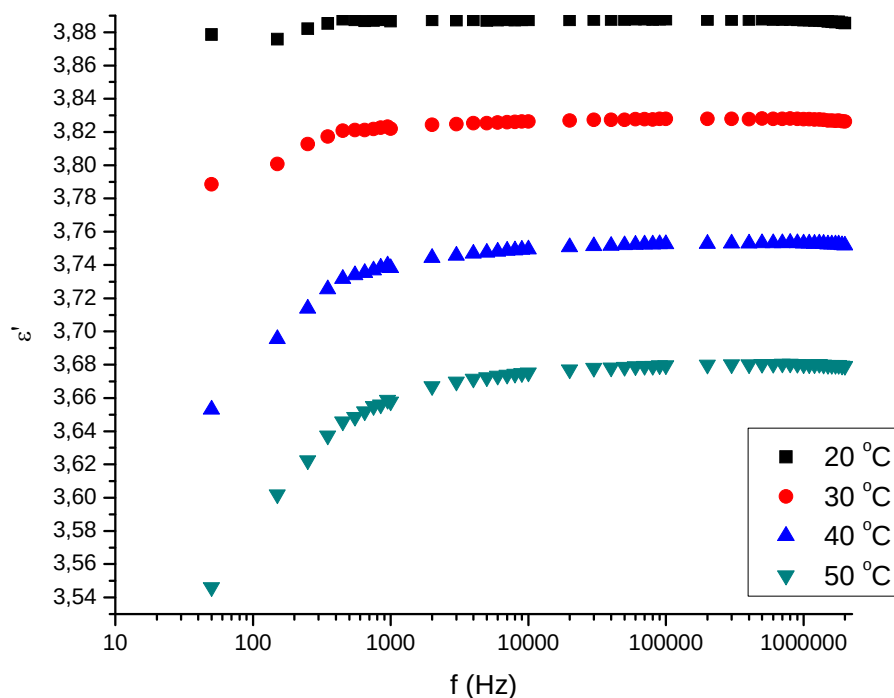
$$r = 0,974 \text{ in } s = 0,002$$

Iz enačb lahko ugotovimo, da se dielektrična konstanta najbolj spreminja s frekvenco pri 50 °C pri vseh zmesih sončničnega olja in oleinske kisline, kar lahko vidimo iz naraščanja odseka premice v enačbah (16- 19). Prav tako je vpliv kislinskega števila na $\Delta\epsilon'_{nf}$ največji pri 50 °C, kar vidimo iz naraščanja smernega koeficienta premice s temperaturo.

4.2.3 Vpliv jodovega števila na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi

4.2.3.1 Dielektrična konstanta sintetičnega nasičenega triglicerida

Odvisnost dielektrične konstante sintetičnega nasičenega triglicerida od temperature in frekvence je prikazana na sliki 9.



Slika 9 Dielektrična konstanta sintetičnega nasičenega triglicerida v odvisnosti od frekvence in temperature.

Enako kot pri vseh do sedaj opisanih vzorcih tudi pri sintetičnem nasičenem trigliceridu dielektrična konstanta s temperaturo pada in je tako pri 20 °C najvišja in znaša 3,888. Pri povečevanju temperature v enakomernih korakih za 10 °C pa dielektrična konstanta ne pada enakomerno. Tako je razlika med dielektrično konstanto med 20 in 30 °C manjša kot pri povečanju temperature s 30 na 40 °C in s 40 na 50 °C.

V nasprotju s tem, kar je veljalo pri primerjavi dielektričnih konstant oleinske kisline in olja, je v tem primeru dielektrična konstanta sintetičnega nasičenega triglicerida v primerjavi z oljem bistveno višja in sicer za 0,75 pri 20 °C in 0,67 pri 50 °C.

Oblika krivulje na sliki 9 je podobna kot pri sončničnem olju. Naraščanje od najnižje začetne vrednosti dielektrične konstante pri 50 Hz je najbolj izrazito pri najvišji temperaturi in najmanj izrazito pri najnižji temperaturi. Pri 10 kHz se naraščanje dielektrične konstante ustavi in se njena vrednost pri posamezni temperaturi ne spreminja s frekvenco do 2 MHz.

4.2.3.2 Dielektrična konstanta zmesi sončničnega olja s sintetičnim nasičenim trigliceridom

Zanimalo nas je, kako se dielektrična konstanta spreminja z jodovim številom. Pripravili smo lipidne zmesi iz sončničnega olja in sintetičnega nasičenega triglicerida (vzorci 3a - 3d), v katerih izrazito variira jodovo število. V primerjavi z jodovim številom se kislinsko in peroksidno število in p-anizidinska vrednost v vzorcih 3a - 3d spreminjajo relativno malo.

Enako kot pri poskusu z modelnimi lipidnimi zmesmi sončničnega olja in oleinske kisline, se tudi v tem primeru pokaže, da se s povečevanjem deleža nasičenega triglicerida v pripravljeni zmesi, spekter vzorca vse bolj razlikuje od spektra čistega sončničnega olja in se približuje vrednostim nasičenega triglicerida.

Kot je razloženo že v poglavju 4.2.2.2, smo za opis spektrov uporabili razdelitev celotnega frekvenčnega območja na 3 intervale, ki smo jih opisali na enak način kot v primeru za zmesi olja in oleinske kisline: ϵ'_p je srednja vrednost dielektrične konstante v območju frekvenc 10 kHz do 1 MHz s pripadajočo standardno napako, ϵ'_{nf} je vrednost dielektrične konstante pri 50 Hz in $\Delta\epsilon'_{nf}$ je razlika med vrednostjo ϵ'_{nf} in ϵ'_p , vrednost dielektrične konstante pri 2 MHz označeno z ϵ'_{vf} in razliko med ϵ'_p in ϵ'_{vf} označeno z $\Delta\epsilon'_{vf}$. Vse vrednosti smo zbrali v preglednici 10.

Preglednica 10: Odvisnost platoja dielektrične konstante, ϵ'_p , vrednosti dielektrične konstante pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , in 2 MHz, ϵ'_{vf} , in spreminjanje dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, in nad 1 MHz, $\Delta\epsilon'_{vf}$, od temperature in jodovega števila.

Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, nasičenega sintetičnega triglicerida in njune zmesi.

oznaka vzorca	T (°C)	JŠ	ϵ'_p	ϵ'_{nf}	$\Delta\epsilon'_{nf}$	ϵ'_{vf}	$\Delta\epsilon'_{vf}$
3	20	4,13	3,8876 ± 0,0002	3,8786	-0,0090	3,8854	-0,002
3a		20,3	3,7206 ± 0,0002	3,7101	-0,0105	3,7182	-0,0024
3b		36,4	3,5864 ± 0,0002	3,5761	-0,0103	3,5834	-0,0030
3c		53,9	3,4349 ± 0,0003	3,4268	-0,0080	3,4314	-0,0035
3d		68,5	3,2841 ± 0,0003	3,2767	-0,0075	3,2800	-0,0042
1'		84,7	3,1385 ± 0,0005	3,1274	-0,0112	3,1331	-0,0054
3	30	4,13	3,8276 ± 0,0004	3,7886	-0,0390	3,8262	-0,0014
3a		20,3	3,6694 ± 0,0004	3,6246	-0,0448	3,6680	-0,0014
3b		36,4	3,5354 ± 0,0004	3,5014	-0,0340	3,5337	-0,0016
3c		53,9	3,3894 ± 0,0003	3,3527	-0,0367	3,3877	-0,0017
3d		68,5	3,2466 ± 0,0003	3,2115	-0,0351	3,2447	-0,0019
1'		84,7	3,1048 ± 0,0003	3,0709	-0,0339	3,1025	-0,0023
3	40	4,13	3,7524 ± 0,0010	3,6531	-0,0993	3,7518	-0,0006
3a		20,3	3,6026 ± 0,0009	3,5038	-0,0988	3,6020	-0,0006
3b		36,4	3,4717 ± 0,0009	3,3737	-0,0980	3,4711	-0,0006
3c		53,9	3,3312 ± 0,0008	3,2389	-0,0923	3,3306	-0,0006
3d		68,5	3,1965 ± 0,0008	3,1112	-0,0853	3,1958	-0,0007
1'		84,7	3,0584 ± 0,0007	2,9749	-0,0835	3,0576	-0,0008
3	50	4,13	3,6793 ± 0,0014	3,5462	-0,1331	3,6793	0,0000
3a		20,3	3,5383 ± 0,0013	3,4096	-0,1288	3,5384	0,0000
3b		36,4	3,4103 ± 0,0013	3,2886	-0,1217	3,4103	0,0000
3c		53,9	3,2753 ± 0,0012	3,1542	-0,1211	3,2753	0,0000
3d		68,5	3,1474 ± 0,0012	3,0325	-0,1148	3,1474	0,0001
1'		84,7	3,0138 ± 0,0011	2,9027	-0,1111	3,0139	0,0001

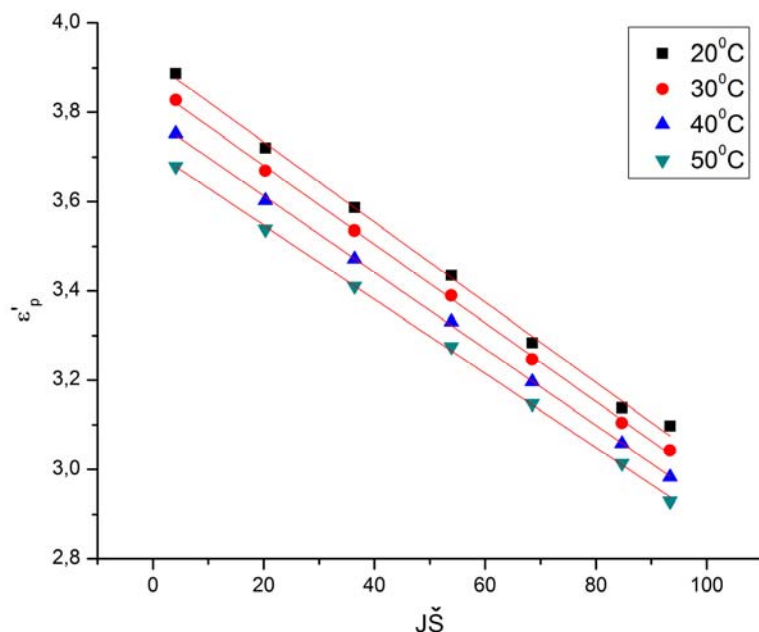
Vrednosti ϵ'_p padajo z naraščanjem vrednosti jodovega števila pri vseh temperaturah. S povečevanjem temperature pri istem vzorcu ϵ'_p prav tako pada. Najnižjo vrednost ϵ'_p smo določili pri vzorcu sončničnega olja pri 50 °C, najvišjo pa pri vzorcu nasičenega sintetičnega triglicerida pri temperaturi 20 °C. Koeficient variabilnosti ϵ'_p je, najmanjši pri 20 in 30 °C in sicer 0,0003, pri 50 °C pa 0,0012. Povečuje se s temperaturo in povečevanjem deleža nasičenega triglicerida v zmesi in je največje pri nasičenem trigliceridu pri temperaturi 50 °C in sicer 0,0014.

Dielektrična konstanta pri 50 Hz, ϵ'_{nf} , je za vse zmesi nižja kot tista določena pri frekvencah od 10 kHz do 1 MHz, kar kaže negativna vrednost $\Delta\epsilon'_{nf}$. Naraščanje

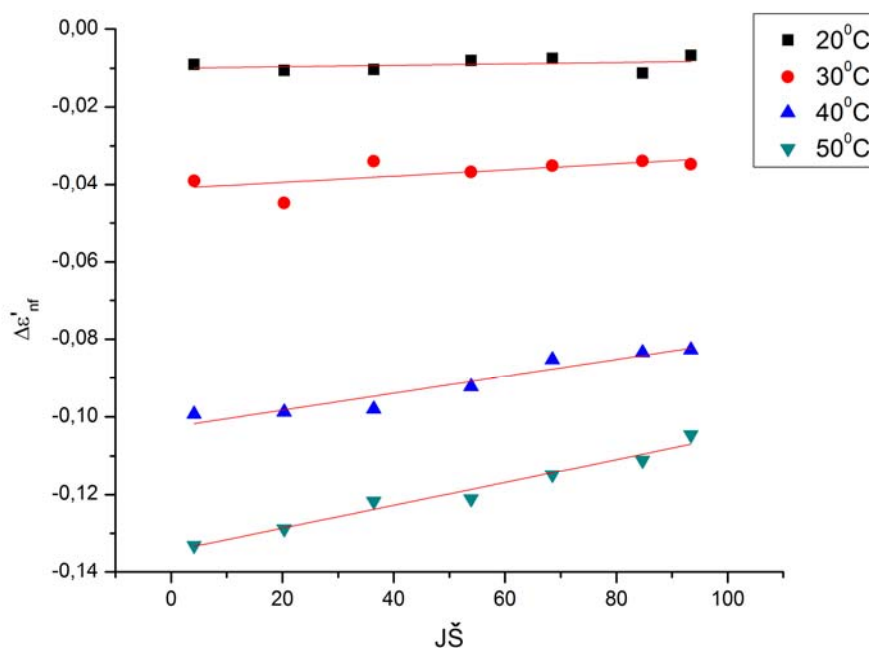
dielektrične konstante od 50 Hz do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$ je najmanjše pri 20 °C in največje pri 50 °C. Absolutna vrednost $\Delta\epsilon'_{nf}$ se zmanjšuje z naraščajočim jodovim številom pri temperaturah 30, 40 in 50 °C, medtem ko se pri 20 °C zmanjšuje manj.

Vrednost dielektrične konstante pri 2 MHz pri posameznih vzorcih s temperaturo pada, zato ima tudi razlika med ϵ'_{vf} in ϵ'_p , podana kot $\Delta\epsilon'_{vf}$, negativen predznak. Njena absolutna vrednost je največja pri 20 °C, sicer pa je v vseh primerih znotraj eksperimentalne napake dielektrične konstante.

Odvisnost dielektrične konstante platoja v frekvenčnem območju od 10 kHz do 1 MHz, ϵ'_p in spreminjaje dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, od jodovega števila in temperature smo prikazali na slikah 10 in 11.



Slika 10: Odvisnost platoja dielektrične konstante, ϵ'_p , od jodovega števila in temperature za vzorce olja, nasičenega sintetičnega triglicerida in njunih zmesi.



Slika 11: Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$, od jodovega števila in temperature za vzorce olja, nasičenega sintetičnega triglicerida in njunih zmesi.

Enako kot v primeru zmesi sončničnega olja z oleinsko kislino, je mogoče spreminjanje izbranih parametrov za opis dielektričnega spektra ϵ'_p in ϵ'_{nf} v odvisnosti od jodovega števila in temperature opisati s premico. Koeficienta A_0 in A_1 , določena z metodo najmanjših kvadratov, sta zbrana v preglednici 11.

Preglednica 11: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od jodovega števila in temperature.

Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, nasičenega sintetičnega triglicerida in njune zmesi.

Y	T (°C)	A_0		$-10^3 \cdot A_1$		r	s
ϵ'_p	20	3,913	± 0,011	8,97	± -0,19	0,9986	0,0346
	30	3,857	± 0,006	8,81	± -0,10	0,9996	0,0183
	40	3,784	± 0,004	8,56	± -0,07	0,9998	0,0122
	50	3,713	± 0,005	8,30	± -0,08	0,9997	0,0150
ϵ'_{nf}	20	3,90	± 0,01	8,95	± -0,20	0,9984	0,037
	30	3,82	± 0,01	8,73	± -0,12	0,9994	0,022
	40	3,68	± 0,00	8,34	± -0,07	0,9998	0,013
	50	3,58	± 0,00	8,00	± -0,07	0,9998	0,012

Na sliki 10 in v preglednici 11 (koeficient A_0) vidimo, da se dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi olja z nasičenim sintetičnim trigliceridom (tako ϵ'_p kot ϵ'_{nf})

linearno zmanjšuje z naraščajočim jodovim številom. Zmanjševanje dielektrične konstante je največje pri 20 °C, kar kaže največja absolutna vrednost koeficienta A_1 . Razlika za koeficiente pri ϵ'_p in ϵ'_{nf} ni statistično različna, saj sta koeficient A_0 in A_1 znotraj eksperimentalne napake pri isti temperaturi enaka. Koeficient A_1 je, enako kot pri odvisnosti dielektrične konstante od kislinskega števila, največji pri 20 °C, zato je tudi v tem primeru najprimerneje izbrati to temperaturo za določanje jodovega števila. Največje razlike dielektrične konstante zaradi spreminjanja frekvence smo opazili pri 50 °C, kjer pa se dielektrična konstanta manj spreminja z jodovim številom. Pri temperaturi 50 °C je smiselno razlikovati meritve znotraj frekvenčnega območja, saj je vpliv jodovega števila na dielektrično konstanto nekoliko večji pri frekvencah nad 10 kHz (koeficient A_1 pri ϵ'_p).

Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante pri frekvencah 50 Hz do 10 kHz, $\Delta\epsilon'_{nf}$ od jodovega števila pri vseh štirih temperaturah smo zapisali v enačbah 20 do 23. Pri 20 in 30 °C je $\Delta\epsilon'_{nf}$ neodvisen od jodovega števila, pri 40 in 50 °C pa se spreminja linearno.

$$20^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = -0,009 \pm 0,001 \quad (20)$$

$$30^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = -0,037 \pm 0,004 \quad (21)$$

$$40^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,103 \pm 0,002) + (2,2 \pm 0,2) \cdot \text{JŠ} \\ r = 0,953 \quad s = 0,003 \quad (22)$$

$$50^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,135 \pm 0,001) + (2,9 \pm 0,2) \cdot \text{JŠ} \\ r = 0,901 \quad s = 0,004 \quad (23)$$

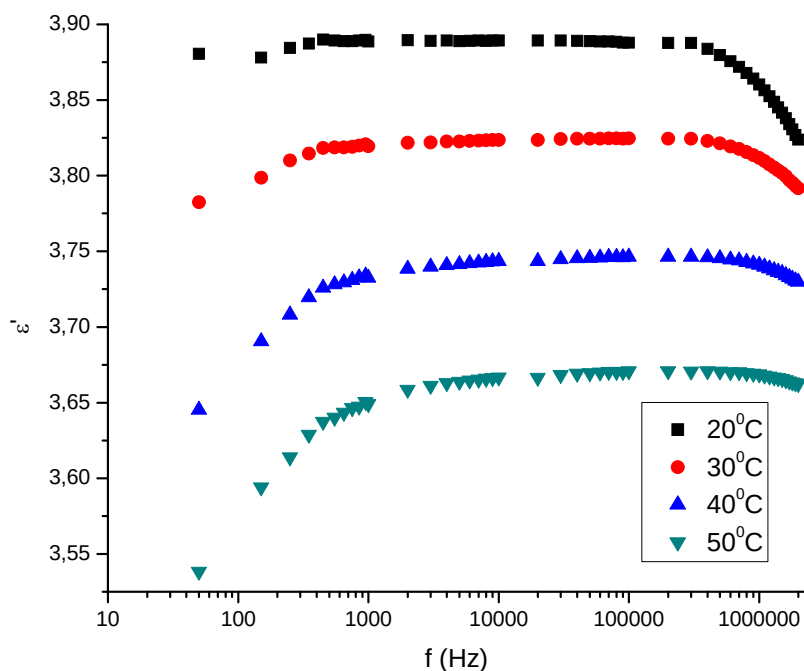
Iz enačb (18-21) lahko vidimo, da se dielektrična konstanta najbolj spreminja pri 50 °C pri vseh zmesih sončničnega olja in nasičenega sintetičnega triglicerida, kar je razvidno iz naraščanja absolutne vrednosti odseka premice v enačbah 18 do 21. Prav tako je vpliv jodovega števila na $\Delta\epsilon'_{nf}$ največji pri 50 °C, kar vidimo iz naraščanja smernega koeficienta premice s temperaturo. Spreminjanje dielektrične konstante v frekvenčnem območju od 50 Hz do 10 kHz $\Delta\epsilon'_{nf}$ je najbolj negativno pri nasičenem trigliceridu (jodovo število 4) in narašča s povečevanjem deleža sončničnega olja v zmesi (slika 11, pozitivna vrednost smernega koeficienta v enačbah 22 in 23).

Jodovo število proučevanega sončničnega olja je 85. Pri drugih vrstah sončničnega olja slovenskega izvora so bile določene tudi višje vrednosti (Klofutar, Rudan-Tasič, 1999). Povečevanje jodovega števila za 1 je povezano z zmanjšanjem dielektrične konstante za 0,009 pri 20 °C v frekvenčnem območju od 50 Hz do 2 MHz (preglednic 11).

4.2.4 Vpliv peroksidnega števila na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi

4.2.4.1 Dielektrična konstanta kontrolirano staranega olja žafranike (*Carthamus tinctorius*)

Na sliki 12 je prikazana dielektrična konstanta kontrolirano staranega olja žafranike v odvisnosti od frekvence in temperature. S slike je razvidna precej drugačna oblika krivulje, kot pri ostalih osnovnih vzorcih. Bolj kot pri ostalih vzorcih je namreč izrazit trend padanja vrednosti dielektrične konstante pri vseh temperaturah pri frekvencah nad 1 MHz. Padanje je najbolj izrazito pri 20 °C, kjer je dielektrična konstanta pri 2 MHz za 1,5 % manjša od dielektrične konstante med 10 kHz in 1 MHz, pri 50 °C pa je zmanjšanje vrednosti dielektrične konstante od platoja do 2 MHz le še 0,2 %.



Slika 12: Dielektrična konstanta kontrolirano staranega olja žafranike v odvisnosti od frekvence in temperature.

4.2.4.2 Dielektrična konstanta zmesi sončničnega olja s kontrolirano staranim oljem žafranike (*Carthamus tinctorius*)

Zanimalo nas je, kako se dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi spreminja z naraščanjem peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti. V zmesih sončničnega olja in kontrolirano staranega olja žafranike (vzorci 5a - 5d) močno variira vrednost obeh maščobnih števil. V primerjavi z njima pa ostajata kislinsko in jodovo število pri vseh

vzorcih zelo podobna. Dielektrična konstanta staranega olja žafranike je za 0,74 enote višja od vrednosti dielektrične konstante sončničnega olja pri 20 °C in za 0,66 enote pri 50 °C. Poleg tega je bistvena razlika v obliki krivulje, predvsem v območju visokih frekvenc nad 1 MHz, kjer je pri sončničnem olju znižanje dielektrične konstante neizrazito, medtem ko je pri staranem olju žafranike znižanje predvsem pri 20 in 30 °C veliko.

S povečevanjem deleža staranega olja žafranike v zmesih vrednosti dielektrične konstante naraščajo, se oddaljujejo od vrednosti za sončnično olje in se približujejo vrednostim za kontrolirano starano olje žafranike. Kot pri obravnavi vplivov kislinskega in jodovega števila na vrednost dielektrične konstante modelne lipidne zmesi, smo tudi tokrat spekter opisali s parametri ϵ'_p , ϵ'_{nf} , ϵ'_{vf} , $\Delta\epsilon'_{nf}$ in $\Delta\epsilon'_{vf}$ in vrednosti parametrov zbrali v preglednici 12, kjer smo navedli še podatke za nativno olje žafranike s peroksidnim številom 24,7.

Preglednica 12: Odvisnost parametrov ϵ'_p , ϵ'_{nf} , ϵ'_{vf} , $\Delta\epsilon'_{nf}$ in $\Delta\epsilon'_{vf}$ od peroksidnega števila, p-anizidinske vrednosti in temperature.

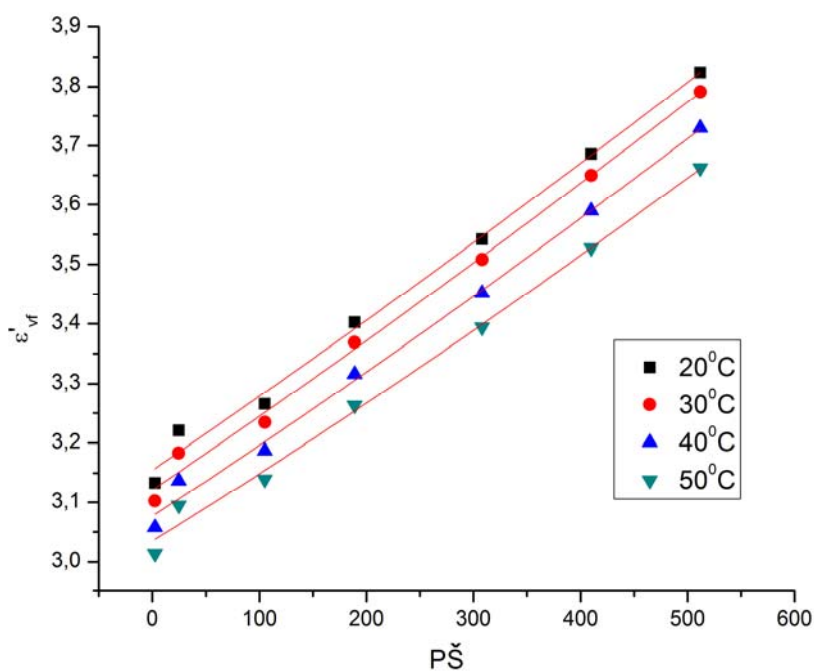
Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njune zmesi.

oznaka vzorca	T (°C)	PŠ	p-AV	ϵ'_p			ϵ'_{nf}	$\Delta\epsilon'_{nf}$	ϵ'_{vf}	$\Delta\epsilon'_{vf}$
1'	20	2,37	0,17	3,1385	±	0,0006	3,1274	-0,0112	3,1331	-0,0054
4		24,7	5,18	3,2250	±	0,0003	3,2176	-0,0074	3,2210	-0,0039
5d		105	50,3	3,2762	±	0,0012	3,2673	-0,0089	3,2655	-0,0107
5c		189	98,3	3,4217	±	0,0026	3,4147	-0,0070	3,4024	-0,0193
5b		308	149	3,5729	±	0,0045	3,5699	-0,0030	3,5423	-0,0306
5a		410	199	3,7301	±	0,0070	3,7238	-0,0063	3,6857	-0,0444
5		512	249	3,8825	±	0,0096	3,8805	-0,0020	3,8239	-0,0586
1'	30	2,37	0,17	3,1048	±	0,0003	3,0709	-0,0339	3,1025	-0,0023
4		24,7	5,18	3,1849	±	0,0003	3,1519	-0,0331	3,1831	-0,0018
5d		105	50,3	3,2395	±	0,0004	3,2057	-0,0338	3,2347	-0,0048
5c		189	98,3	3,3781	±	0,0010	3,3403	-0,0379	3,3689	-0,0092
5b		308	149	3,5232	±	0,0020	3,4835	-0,0397	3,5081	-0,0151
5a		410	199	3,6726	±	0,0030	3,6363	-0,0363	3,6500	-0,0226
5		512	249	3,8218	±	0,0042	3,7825	-0,0393	3,7917	-0,0301
1'	40	2,37	0,17	3,0584	±	0,0007	2,9749	-0,0835	3,0576	-0,0008
4		24,7	5,18	3,1376	±	0,0009	3,0517	-0,0859	3,1370	-0,0006
5d		105	50,3	3,1887	±	0,0008	3,1035	-0,0852	3,1870	-0,0017
5c		189	98,3	3,3200	±	0,0008	3,2278	-0,0922	3,3160	-0,0040
5b		308	149	3,4591	±	0,0009	3,3646	-0,0945	3,4520	-0,0071
5a		410	199	3,6008	±	0,0012	3,5022	-0,0986	3,5897	-0,0111
5		512	249	3,7449	±	0,0016	3,6452	-0,0997	3,7298	-0,0151
1'	50	2,37	0,17	3,0138	±	0,0011	2,9027	-0,1111	3,0139	0,0001
4		24,7	5,18	3,0944	±	0,0011	2,9841	-0,1103	3,0946	0,0002
5d		105	50,3	3,1397	±	0,0013	3,0275	-0,1123	3,1396	-0,0001
5c		189	98,3	3,2644	±	0,0013	3,1470	-0,1174	3,2631	-0,0013
5b		308	149	3,3973	±	0,0013	3,2758	-0,1214	3,3944	-0,0029
5a		410	199	3,5324	±	0,0013	3,4027	-0,1297	3,5274	-0,0050
5		512	249	3,6697	±	0,0013	3,5383	-0,1313	3,6624	-0,0073

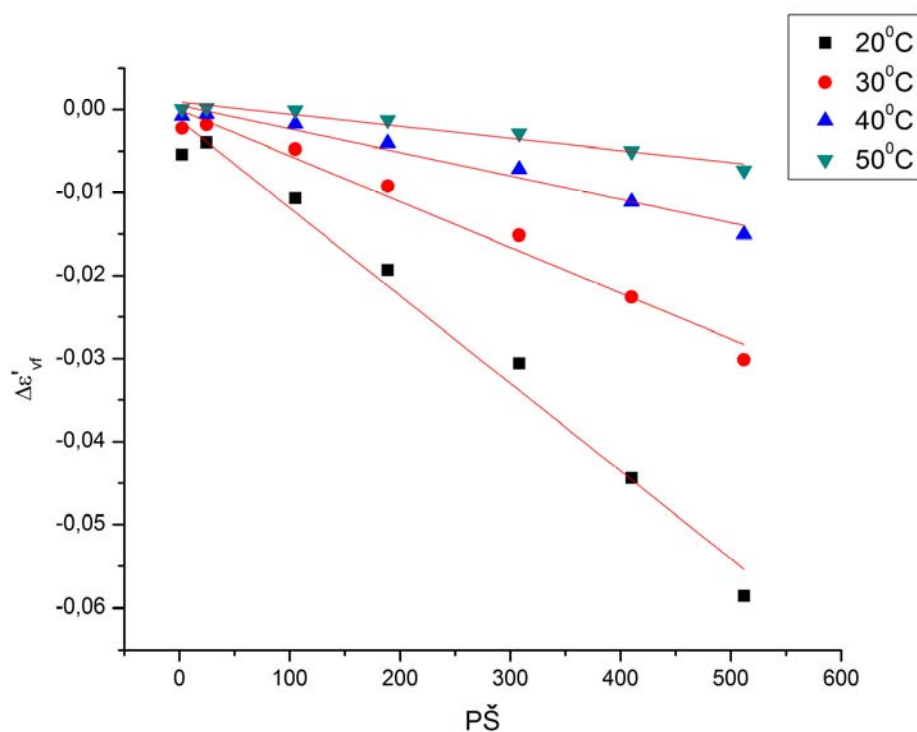
Vrednosti ϵ'_p za zmesi sončničnega olja in staranega olja žafranike z naraščajočim peroksidnim številom naraščajo pri vseh temperaturah. Sipanje ϵ'_p od 10 kHz do 1 MHz je najmanjše pri čistem sončničnem olju in nativnem olju žafranike in se povečuje s temperaturo in z naraščanjem peroksidnega števila zmesi. Podobno kot ϵ'_p in ϵ'_{nf} s peroksidnim številom naraščata tudi ϵ'_{vf} pri vseh temperaturah, kar je razvidno tudi s slike 13. $\Delta\epsilon'_{nf}$ je najmanjša pri nizki temperaturi in visokem peroksidnem številu, torej pri čistem vzorcu staranega olja žafranike in narašča s povečevanjem deleža sončničnega olja v zmesi pri vseh temperaturah.

Dielektrična konstanta pri 2 MHz, ϵ'_{vf} , je za vse zmesi nižja kot tista določena pri frekvencah od 10 kHz do 1 MHz, kar kaže negativna vrednost $\Delta\epsilon'_{vf}$.

Dielektrični spekter modelnih lipidnih zmesi predstavljenih v tem podpoglavju se od tistih v prejšnjih podpoglavjih najbolj razlikuje pri frekvencah nad 1 MHz, zato smo na slikah 13 in 14 prestavili odvisnost ϵ'_{vf} in $\Delta\epsilon'_{vf}$ od peroksidnega števila in temperature.



Slika 13: Odvisnost vrednosti dielektrične konstante, ϵ'_{vf} , od peroksidnega števila in temperature pri frekvencah 1 MHz za vzorce olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njunih zmesi.



Slika 14: Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante, $\Delta\epsilon'_{vf}$, od peroksidnega števila in temperature pri frekvencah nad 1 MHz za vzorce olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njunih zmesi.

V frekvenčnem območju od 1 do 2 MHz je zmanjševanje dielektrične konstante $\Delta\epsilon'_{vf}$ največje pri 20 °C in najmanjše pri 50 °C (preglednica 12, slika 14). Absolutna vrednost $\Delta\epsilon'_{vf}$ z naraščajočim peroksidnim številom narašča. Pojav je najbolj izrazit pri 20°C, kjer je absolutna vrednost $\Delta\epsilon'_{vf}$ največja in znaša skoraj 0,06.

Enako kot v primeru zmesi sončničnega olja z nasičenim trigliceridom, je mogoče spreminjanje izbranih parametrov za opis dielektričnega spektra ϵ'_p , ϵ'_{nf} in ϵ'_{vf} v odvisnosti od peroksidnega števila in temperature opisati s premico. Koeficienta A_0 in A_1 (enačba 15) določena z metodo najmanjših kvadratov, sta zbrana v preglednici 13.

Preglednica 13: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od peroksidnega števila in temperature.
Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njune zmesi.

Y	T (°C)	A_0			$-10^3 \cdot A_1$			r	s
ϵ'_p	20	3,151	±	0,014	1,41	±	0,05	0,9966	0,0507
	30	3,117	±	0,012	1,36	±	0,04	0,9971	0,0456
	40	3,071	±	0,012	1,30	±	0,04	0,9969	0,0451
	50	3,028	±	0,012	1,24	±	0,04	0,9964	0,0462
ϵ'_{nf}	20	3,142	±	0,014	1,42	±	0,05	0,9964	0,0525
	30	3,083	±	0,012	1,35	±	0,04	0,9969	0,0465
	40	2,987	±	0,012	1,26	±	0,04	0,9969	0,0434
	50	2,919	±	0,012	1,19	±	0,04	0,9961	0,0462
ϵ'_{vf}	20	3,150	±	0,013	1,31	±	0,05	0,9961	0,0503
	30	3,117	±	0,012	1,30	±	0,04	0,9969	0,0449
	40	3,071	±	0,012	1,27	±	0,04	0,9968	0,0445
	50	3,029	±	0,012	1,22	±	0,04	0,9963	0,0457

V preglednici 13 (koeficient A_1) vidimo, da dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi olja s kontrolirano staranim oljem žafranike (tako ϵ'_p kot ϵ'_{nf} in ϵ'_{vf}) linearno narašča z naraščajočim peroksidnim številom. Naraščanje dielektrične konstante je največje pri 20 °C, kar kaže največja vrednosti koeficienta A_1 . Razlika za koeficiente pri ϵ'_p in ϵ'_{nf} ni statistično značilna, saj sta koeficient A_0 in A_1 znotraj eksperimentalne napake pri isti temperaturi enaka. Koeficient A_1 je, največji pri 20 °C, zato je tudi v tem primeru najprimerneje izbrati to temperaturo za določanje peroksidnega števila. Izbor frekvenc v območju od 50 Hz do 1 MHz je poljuben.

Največje razlike dielektrične konstante zaradi spreminjanja frekvence v frekvenčnem območju nad 1 MHz smo opazili pri 20 °C. Pri 2 MHz dielektrična konstanta zaradi naraščanja peroksidnega števila naraste za največ 0,69, kar je manj kot pri nižjih frekvencah (0,74), kar se vidi iz manjšega koeficienta A_1 pri ϵ'_{vf} in 20 °C. Ta značilnost se pri višjih temperaturah zmanjša.

Za proučevanje peroksidnega števila s pomočjo dielektrične konstante lahko zaključimo, da smo največje povečanje dielektrične konstante zaradi povečanja peroksidnega števila opazili pri 20 °C in frekvencah do 1 MHz, kjer lahko zaznamo povečanje peroksidnega števila za 5 če se istemu olju poveča dielektrična konstanta za več kot je eksperimentalna napaka.

Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante pri frekvencah 50 Hz do 10 kHz od peroksidnega števila pri vseh štirih temperaturah smo zapisali v enačbah 22 do 25. Pri

20 °C je $\Delta\epsilon'_{nf}$ najmanj odvisen od peroksidnega števila, odvisnost se s temperaturo povečuje. Z naraščajočim peroksidnim številom je $\Delta\epsilon'_{nf}$ bolj negativen.

$$20^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = -0,007 \pm 0,003 \quad (24)$$

$$30^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = -0,026 \pm 0,003 \quad (25)$$

$$40^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,084 \pm 0,001) - (3,30 \pm 0,3) \times 10^{-3} P\check{S} \quad (26)$$

$$r = 0,969 \quad s = 0,004$$

$$50^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,109 \pm 0,001) - (4,40 \pm 0,3) \times 10^{-3} P\check{S} \quad (27)$$

$$r = 0,982 \quad s = 0,004$$

Iz naraščanja absolutne vrednosti odseka premice v enačbah 24 do 27, je razvidno, da se dielektrična konstanta v frekvenčnem območju od 50 Hz do 10 kHz najbolj spreminja pri 50 °C pri vseh zmesih sončničnega olja in staranega olja žafranike. Prav tako je vpliv peroksidnega števila na $\Delta\epsilon'_{nf}$ največji pri 50 °C, kar vidimo iz povečevanja absolutne vrednosti smernega koeficienta premice s temperaturo.

Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante pri frekvencah 1 MHz do 2 MHz od peroksidnega števila pri vseh štirih temperaturah smo zapisali v enačbah 28 do 31.

$$20^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{vf} = (-0,0013 \pm 0,0017) - (10,6 \pm 0,6) \times 10^{-3} P\check{S} \quad (28)$$

$$r = 0,990 \quad s = 0,007$$

$$30^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{vf} = (-0,0001 \pm 0,0010) - (5,5 \pm 0,4) \times 10^{-3} P\check{S} \quad (29)$$

$$r = 0,988 \quad s = 0,004$$

$$40^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{vf} = (-0,0005 \pm 0,0006) - (2,8 \pm 0,2) \times 10^{-3} P\check{S} \quad (30)$$

$$r = 0,984 \quad s = 0,002$$

$$50^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{vf} = (-0,0009 \pm 0,0004) - (1,4 \pm 0,1) \times 10^{-3} P\check{S} \quad (31)$$

$$r = 0,970 \quad s = 0,002$$

Spreminjanje dielektrične konstante pri frekvencah od 1 MHz do 2 MHz s peroksidnim številom je pri vseh štirih temperaturah je linearno. Najmanjši vpliv je opaziti pri 50 in največji pri 20 °C, saj je smerni koeficient premice največji pri najnižji temperaturi.

Staranje olja s pomočjo peroksidnega števila in dielektričnih lastnosti je opazoval tudi El-Shami s sodelavci (1992). Zmes sončničnega olja z oljem bombažnih semen so starali s

segrevanjem pri 180 °C. Ugotovili so večji vpliv peroksidnega števila na dielektrično konstanto. Pri 30 °C se je dielektrična konstanta povečala za 0,004, če se je peroksidno število povečalo za 1, pri našem delu pa se je v enakem primeru dielektrična konstanta povečala za 0,0014 (El-Shami in sod., 1992).

4.2.5 Vpliv p-anizidinske vrednosti na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi

Vpliv p-anizidinske vrednosti smo preučevali na enakih vzorcih kot vpliv peroksidnega števila, torej na sončničnem olju, staranem in nativnem olju žafranike in zmesih sončničnega olja in staranega olja žafranike. Pričakovali smo, da je pri zmesih s povišanim peroksidnim številom povišana tudi p-anizidinska vrednost, ki naj bi bila najvišja pri staranem olju žafranike, in padala s povečevanjem masnega deleža sončničnega olja v zmesi do najnižje vrednosti pri čistem sončničnem olju. Dielektrična konstanta bi v primeru zmesi 5a–5d narasla tudi zaradi naraščanja p-anizidinske vrednosti in ne samo zaradi peroksidnega števila.

V preglednici 12 smo podali tudi vpliv p-anizidinske vrednosti na dielektrično konstanto modelnih lipidnih zmesi in ga opisali s parametri ϵ'_p , ϵ'_{nf} , ϵ'_{vf} , $\Delta\epsilon'_{nf}$ in $\Delta\epsilon'_{vf}$.

Enako kot v primeru peroksidnega števila je mogoče spreminjanje izbranih parametrov za opis dielektričnega spektra ϵ'_p , ϵ'_{nf} in ϵ'_{vf} v odvisnosti od p-anizidinske vrednosti opisati s premico. Koeficienta A_0 in A_1 (enačba 15) določena z metodo najmanjših kvadratov, sta zbrana v preglednici 14.

Preglednica 14: Odsek (A_0) in naklon premice (A_1) za opis linearne odvisnosti dielektrične konstante od p-anizidinske vrednosti in temperature.

Pri poskusu so bili uporabljeni vzorci sončničnega olja, kontrolirano staranega olja žafranike in njune zmesi.

Y	T (°C)	A_0		$-10^3 \cdot A_1$		r	s
ϵ'_p	20	3,157	± 0,017	2,86	± 0,13	0,9943	0,0661
	30	3,122	± 0,016	2,76	± 0,11	0,9949	0,0602
	40	3,076	± 0,016	2,63	± 0,11	0,9946	0,0592
	50	3,033	± 0,016	2,50	± 0,11	0,9939	0,0597
ϵ'_{nf}	20	3,148	± 0,018	2,89	± 0,13	0,9940	0,0681
	30	3,088	± 0,016	2,73	± 0,12	0,9945	0,0616
	40	2,992	± 0,015	2,56	± 0,11	0,9945	0,0578
	50	2,924	± 0,016	2,41	± 0,11	0,9935	0,0592
ϵ'_{vf}	20	3,155	± 0,017	2,65	± 0,12	0,9938	0,0638
	30	3,122	± 0,015	2,64	± 0,11	0,9947	0,0585
	40	3,077	± 0,015	2,57	± 0,11	0,9945	0,0580
	50	3,034	± 0,016	2,47	± 0,11	0,9939	0,0590

V preglednici 14 (koeficient A_1) lahko vidimo, da dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi olja s kontrolirano staranim oljem žafranike, tako ϵ'_p kot ϵ'_{nf} in ϵ'_{vf} linearno narašča z naraščajočo p-anizidinsko vrednostjo. Naraščanje dielektrične konstante je največje pri 20 °C, kar kaže največja vrednosti koeficienta A_1 . Najbolj primerno je za proučevanje p-anizidinske vrednosti izbrati 20 °C, frekvence pa v območju od 50 Hz do 1MHz.

Največje razlike dielektrične konstante zaradi spreminjanja frekvence v frekvenčnem območju nad 1 MHz smo opazili pri 20 °C, vendar zniževanje dielektrične konstante neugodno vpliva na spreminjanje dielektrične konstante s p-anizidinsko vrednostjo. Smerni koeficient A_1 je pri ϵ'_{vf} za 8 % nižji kot pri nižjih frekvencah. Ta značilnost se pri višjih temperaturah zmanjša. Pri 50 °C je A_1 znotraj eksperimentalne napake enak pri vseh frekvencah.

Za proučevanje p-anizidinske vrednosti s pomočjo dielektrične konstante lahko zaključimo, da smo največje povečanje dielektrične konstante zaradi povečanja p-anizidinske vrednostji opazili pri 20 °C in frekvencah do 1 MHz, kjer lahko zaznamo prirast p-anizidinske vrednosti za 3, če se istemu olju poveča dielektrična konstanta za več kot je eksperimentalna napaka.

Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante pri frekvencah 50 Hz do 10 kHz od p-anizidinsko vrednostjo pri vseh štirih temperaturah smo zapisali v enačbah 32 do 35. Pri 20 °C je $\Delta\epsilon'_{nf}$ najmanj odvisen od p-anizidinsko vrednostjo, na kar sklepamo iz najmanjše absolutne vrednosti smernega koeficienta premice. Odvisnost se s temperaturo povečuje in absolutna vrednost smerni koeficient narašča.

$$20^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,006 \pm 0,003) \quad (32)$$

$$30^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,036 \pm 0,003) \quad (33)$$

$$40^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,084 \pm 0,001) - (0,07 \pm 0,01) \times 10^{-2} p - AV \\ r = 0,971 \quad s = 0,004 \quad (34)$$

$$50^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{nf} = (-0,109 \pm 0,001) - (0,09 \pm 0,1) \times 10^{-2} p - AV \\ r = 0,981 \quad s = 0,004 \quad (35)$$

Odvisnost spreminjanja dielektrične konstante pri frekvencah od 1 MHz do 2 MHz od p-anizidinske vrednosti je pri vseh štirih temperaturah je linearna in prikazana v enačbah 36 do 39. Najmanjši vpliv je opaziti pri 50 in največji pri 20 °C, saj je smerni koeficient premice največji pri najnižji temperaturi.

$$\begin{aligned} 20^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{\text{wf}} &= (-0,002 \pm 0,002) - (2,14 \pm 0,14) \times 10^{-4} p - AV \\ r &= 0,988 \quad s = 0,007 \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} 30^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{\text{wf}} &= (0,000 \pm 0,001) - (1,12 \pm 0,08) \times 10^{-4} p - AV \\ r &= 0,985, \quad s = 0,004 \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} 40^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{\text{wf}} &= (0,000 \pm 0,001) - (0,57 \pm 0,05) \times 10^{-4} p - AV \\ r &= 0,980 \quad s = 0,002 \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} 50^{\circ}\text{C} \quad \Delta\epsilon'_{\text{wf}} &= (0,001 \pm 0,000) - (0,29 \pm 0,2) \times 10^{-4} p - AV \\ r &= 0,965 \quad s = 0,000 \end{aligned} \quad (39)$$

V modelnih lipidnih zmesih 5a-5d sta peroksidno število in p-anizidinska vrednost povezani. Ko naraste peroksidno število za 1 naraste p-anizidinska vrednost za 0,5. Z opravljenimi poskusi ni mogoče ločiti med vplivom peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti na naraščanje dielektrične konstante. Iz poskusa lahko ugotovimo, da dielektrična konstanta olja s staranjem narašča ter, da ob spremembi peroksidnega števila za 1 in p-anizidinske vrednosti za 0,5 se dielektrična konstanta poveča za 0,0014 pri 20 °C in v frekvenčnem območju od 50 Hz do 1 MHz.

4.3 FAKTOR DIELEKTRIČNIH IZGUB MODELNIH LIPIDNIH ZMESI

4.3.1 Faktor dielektričnih izgub sončničnega olja

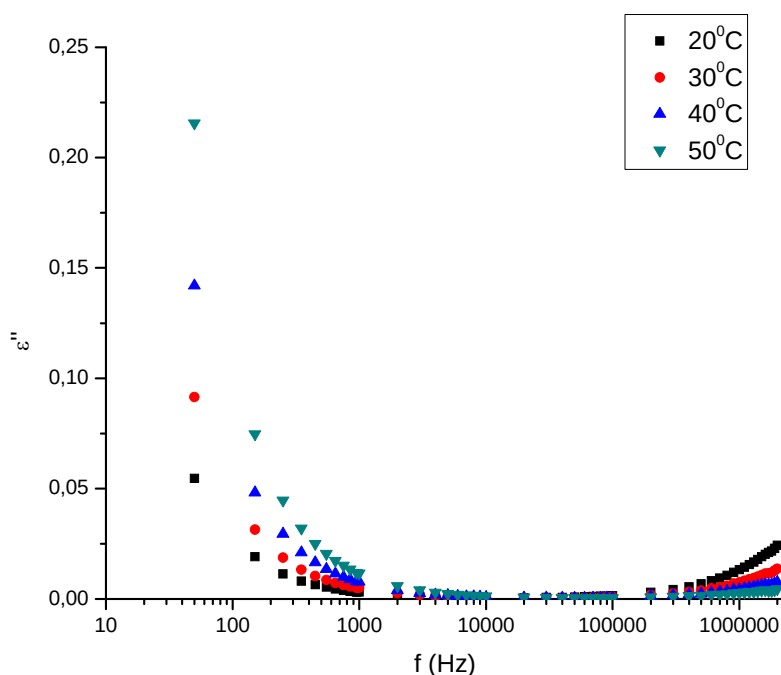
Na sliki 15 je predstavljen faktor izgub ϵ'' sončničnega olja v odvisnosti od frekvence v območju od 50 Hz do 2 MHz in temperature od 20 do 50 °C v intervalih po 10 °C.

Faktor izgub olja se spreminja s frekvenco in temperaturo. Krivulja odvisnosti faktorja izgub od frekvence, podane na logaritemski skali ima obliko črke U. Vrednost faktorja izgub pada s frekvenco od 50 Hz. V območju frekvenc med 10 in 100 kHz faktor izgub doseže minimalno vrednost. Z naraščanjem frekvence do 2 MHz faktor izgub narašča.

Spreminjanje ϵ'' s frekvenco je različno pri vseh temperaturah merjenja. Oblika krivulje v obliki črke U je najbolj pravilna pri temperaturi 20 °C, pri kateri je vrednost ϵ'' pri 50 Hz 0,055 in pri 2 MHz 0,024. Pri nizkih frekvencah z naraščajočo temperaturo ϵ'' narašča. Sprememba ϵ'' je največja pri temperaturah od 40 do 50 °C in najmanjša od 20 do 30 °C. Nasprotno pa pri visokih frekvencah ϵ'' z naraščajočo temperaturo pada in je pri 50 °C

0,0045. Sprememba ϵ'' pri 2 MHz je največja pri spremembi temperature od 20 do 30 °C in najmanjša od 40 do 50 °C. Pri 50 °C je vrednost ϵ'' pri 50 Hz 0,216 in pri 2 MHz 0,0045.

Minimum krivulj v odvisnosti od frekvence ϵ'' je raztegnjen in se pojavi nekje med frekvencami 10 kHz pri 20 °C in 100kHz pri 50 °C. Vrednosti faktorja izgub pri minimumu so okrog 0,0003 in so določene z veliko eksperimentalno napako. Velika eksperimentalna napaka določitev ϵ'' pri nizkih vrednostih ϵ'' in razvlečenost minimuma preko širšega frekvenčnega območja otežujeta točno določitev frekvence, pri kateri se pojavi minimum.



Slika 15: Faktor dielektričnih izgub sončničnega olja (vzorec 1) v odvisnosti od frekvence in temperature.

Tako kot dielektrično konstanto smo tudi faktor izgub, ϵ'' določili trem vzorcem hladno stiskanega sončničnega olja Gea. To so trije istovrstni izdelki, ki se razlikujejo le po datumu proizvodnje. Primerjavo smo za 20 °C in celo frekvenčno območje smo podali v preglednici 15. V preglednici pomenijo $\bar{\epsilon''}$, $\Delta\epsilon''$ in $\Delta\epsilon''/\bar{\epsilon''}$ povprečno vrednost, standardno napako in koeficient variabilnosti faktorja izgub treh vzorcev sončničnega olja.

Preglednica 15: Faktor dielektričnih izgub treh vzorcev sončničnega olja, njegova povprečna vrednost, standardna napaka in koeficient variabilnosti v odvisnosti od frekvence pri 20 °C.

f (kHz)	$10^3 \cdot \varepsilon''$			$10^3 \cdot \bar{\varepsilon}''$	$10^3 \cdot \Delta \varepsilon''$	$\Delta \varepsilon'' / \bar{\varepsilon}''$
	olje 1	olje 1'	olje 1''			
0,05	54,6	40,2	57,9	50,9	9,39	0,18
0,15	19,1	12,8	20,7	17,5	4,16	0,24
0,25	11,3	8,0	12,0	10,4	2,16	0,21
0,35	8,1	5,6	8,8	7,5	1,71	0,23
0,45	6,4	4,4	6,8	5,9	1,26	0,21
0,55	5,3	3,7	5,6	4,9	1,03	0,21
0,65	4,5	3,1	4,9	4,2	0,9	0,22
0,75	3,9	2,7	4,3	3,6	0,8	0,22
0,85	3,4	2,4	3,8	3,2	0,7	0,22
0,95	3,0	2,1	3,5	2,9	0,7	0,24
1	3,2	2,3	3,6	3,0	0,6	0,21
2	1,7	1,3	2,0	1,6	0,4	0,23
3	1,2	0,9	1,5	1,2	0,3	0,26
4	0,85	0,64	1,17	0,88	0,27	0,30
5	0,77	0,60	1,08	0,81	0,25	0,30
6	0,59	0,45	0,90	0,65	0,23	0,36
7	0,55	0,41	0,84	0,60	0,22	0,37
8	0,58	0,46	0,88	0,64	0,22	0,34
9	0,53	0,43	0,85	0,60	0,22	0,36
10	0,53	0,44	0,83	0,60	0,21	0,34
20	0,55	0,48	0,72	0,59	0,12	0,21
30	0,71	0,66	0,78	0,71	0,06	0,08
40	0,70	0,65	0,69	0,68	0,03	0,04
50	0,85	0,80	0,72	0,79	0,06	0,08
60	0,94	0,90	0,81	0,88	0,07	0,08
70	1,05	1,01	0,93	1,00	0,06	0,06
80	1,16	1,14	1,05	1,12	0,06	0,05
90	1,28	1,26	1,17	1,23	0,06	0,05
100	1,39	1,37	1,29	1,35	0,05	0,04
200	2,95	3,00	2,94	2,96	0,03	0,01
300	4,22	4,34	4,29	4,28	0,06	0,01
400	5,50	5,66	5,64	5,60	0,08	0,01
500	6,76	6,97	7,02	6,92	0,14	0,02
600	8,16	8,44	8,41	8,34	0,15	0,02
700	9,41	9,73	9,68	9,61	0,17	0,02
800	10,58	10,96	10,95	10,83	0,22	0,02
900	12,07	12,50	12,31	12,29	0,21	0,02
1000	13,19	13,69	13,67	13,52	0,28	0,02
1100	14,35	14,88	14,92	14,72	0,32	0,02
1200	15,56	16,14	16,18	15,96	0,34	0,02
1300	16,65	17,30	17,39	17,11	0,41	0,02
1400	17,91	18,58	18,61	18,37	0,40	0,02
1500	19,07	19,79	19,74	19,53	0,40	0,02
1600	20,22	20,80	20,87	20,63	0,36	0,02
1700	21,00	21,73	21,79	21,51	0,44	0,02
1800	21,74	22,55	22,71	22,33	0,52	0,02
1900	22,99	23,82	24,09	23,63	0,57	0,02
2000	24,33	25,28	25,47	25,03	0,61	0,02

V preglednici 15 bi radi opozorili na sipanje meritev za tri vzorce sončničnega olja. Srednja vrednost in standardna napaka faktorja izgub sta največji pri 50 Hz, najnižji v območju srednjih frekvenc merjenja, potem pa naraščata do 2 MHz. Koeficient variabilnosti je pri 50 Hz 20 % in narašča čez 30 % pri najnižjih vrednostih faktorja izgub. Vrednosti koeficienta variabilnosti med 1 in 2 % so značilne za frekvence nad 100 kHz. Koeficient variabilnosti treh paralelk istega vzorca olja pa je 6-8 % pri nizkih frekvencah in do 0,5-0,7 % pri visokih frekvencah.

Lizhi s sodelavci (2008) je proučeval dielektrične lastnosti osmih vrst jedilnih olj z japonskega geografskega področja v frekvenčnem območju od 100 Hz do 1 MHz. Opisali so podobno obliko krivulje odvisnosti faktorja izgub od frekvence kot smo jo opazili mi pri našem delu. Faktor izgub rastlinskih olj je enakega velikostnega reda, kot smo ga določili za sončnično olje. Opazili so podoben vpliv temperature na obliko krivulje, kot je predstavljen na sliki 15.

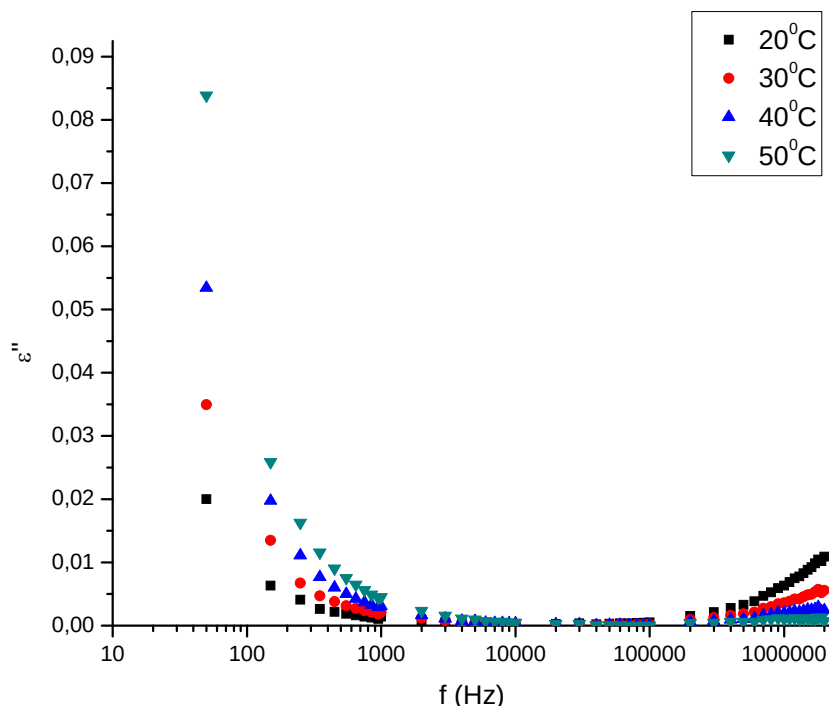
4.3.2 Faktor dielektričnih izgub modelnih lipidnih zmesi s sestavo 60 % oleinske kisline in 40 % sončničnega olja

Pri določanju faktorja izgub oleinski kislini s sistemom LCR meter Agilent E4980A s celico 16452A smo podobno kot Lizhi s sodelavci (2008) dobili nesmiselne in neponovljive rezultate. Podobno ponovljive rezultate kot pri merjenju faktorja izgub sončničnega olja, smo dobili še za modelne lipidne zmesi do sestave 60 % oleinske kisline in 40 % olja. Spekter faktorja dielektrične izgube smo na sliki 16 predstavili za lipidno zmes iz 60 % oleinske kisline in 40 % olja.

Potek krivulje na sliki 16 je podoben kot pri olju na sliki 15: oblika črke U je najbolj pravilna pri 20 °C. Pri višjih temperaturah se levi krak pri nizkih frekvencah viša in desni krak pri višjih frekvencah niža.

Sprememba ϵ'' pri nizkih frekvencah je največja pri temperaturah od 40 do 50 °C in najmanjša od 20 do 30 °C. Pri 2 MHz se ϵ'' najbolj poveča pri spremembi temperature od 20 do 30°C in najmanj od 40 do 50°C.

Vrednosti faktorja izgube so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 20 °C je ϵ'' 0,020 pri 50 Hz in 0,011 pri 2 MHz (olje 0,055 in 0,024). Pri 50 °C je vrednost faktorja izgub pri 50 Hz 0,085 in pri 2 MHz 7×10^{-4} (olje 0,216 in 0,0045).



Slika 16: Faktor dielektričnih izgub modelne lipidne zmesi s sestavo 60 % oleinske kisline in 40 % sončničnega olja v odvisnosti od frekvence in temperature.

4.3.3 Faktor dielektričnih izgub nasičenega sintetičnega triglicerida

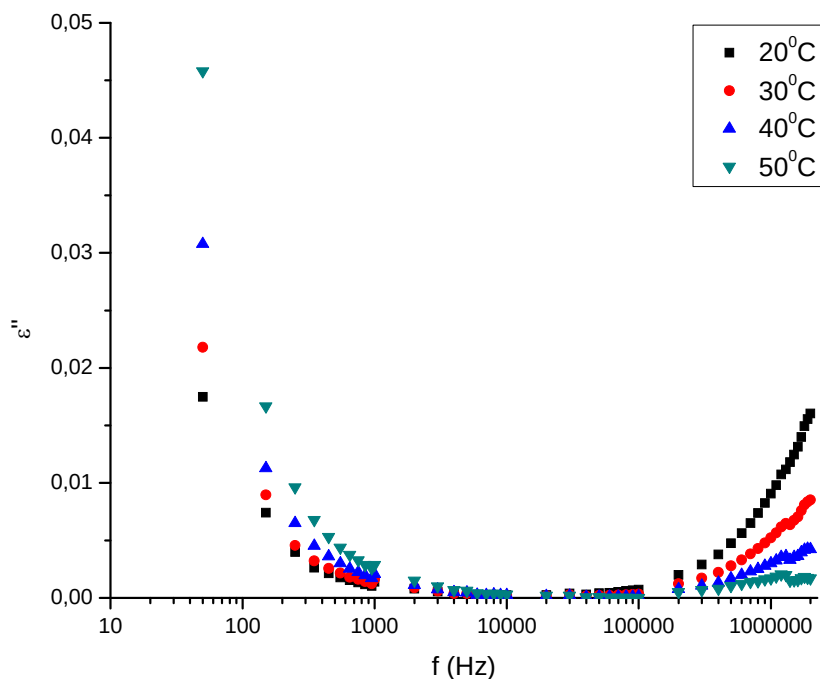
Na sliki 17 je predstavljen faktor izgub ϵ'' za sintetični nasičeni triglicerid v odvisnosti od frekvence v območju od 50 Hz do 2 MHz in temperaturnem območju od 20 °C do 50 °C v intervalih po 10 °C.

Potek krivulje na sliki 17 je podoben kot pri olju. Oblika črke U ja najbolj pravilna pri 20°C. Pri višjih temperaturah se levi krak pri nizkih frekvencah viša in desni krak pri višjih frekvencah niža. Spremembe ϵ'' v intervalih temperature po 10 °C so podobni kot tisti na slikah 15 in 16.

Vrednosti faktorja izgube so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 20°C in pri 50 Hz je ϵ'' 0,017, pri 20 °C in 2 MHz pa 0,016 (olje 0,055 in 0,024). Pri 50oC je vrednost faktorja izgub pri 50 Hz 0,046 in pri 2 MHz 0,0017 (olje 0,216 in 0,0045).

Iz opisanega lahko sklepamo, da pri vseh temperaturah in frekvencah faktor izgub sončničnega olja narašča z naraščajočim jodovim številom in se zmanjšuje z zmanjševanjem jodovega števila sončničnega olja. Pri 50 Hz bi spremembo jodovega števila najprej zaznali pri temperaturi 50 °C vendar zaradi velike eksperimentalne napake

pri teh temperaturah le spremembe jodovega števila več kot 10. Pri 2 MHz je najbolj učinkovito slediti faktorju izgub pri 20 °C, kjer lahko zaznamo že spremembe jodovega števila okrog 1.



Slika 17: Faktor dielektričnih izgub za sintetični nasičeni triglicerid v odvisnosti od frekvence in temperature.

4.3.4 Faktor dielektričnih izgub kontrolirano staranega olja žafranike

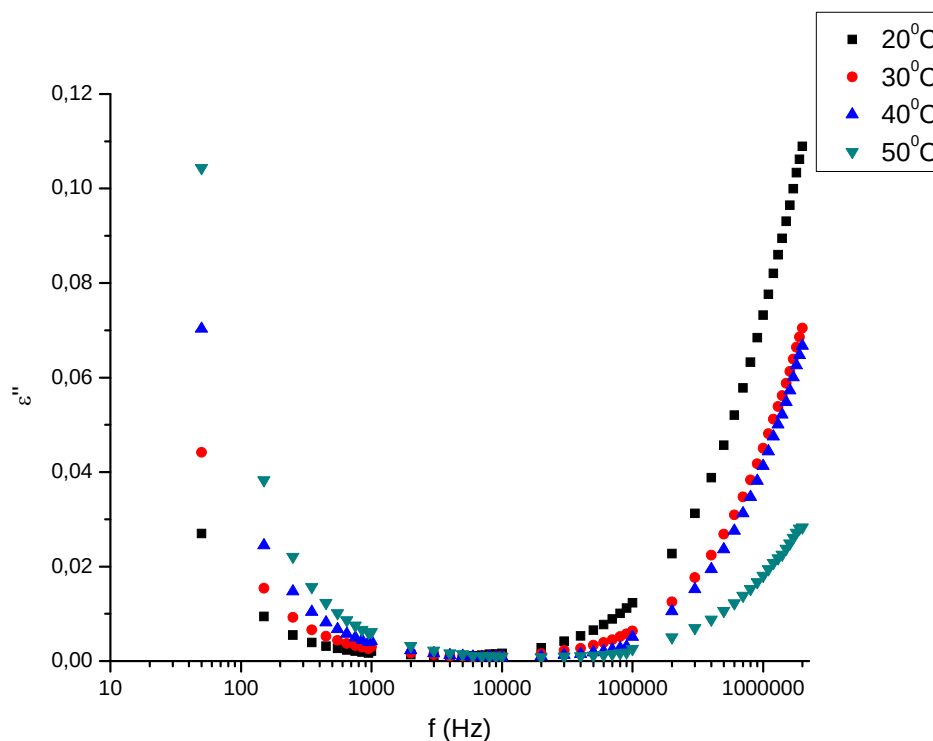
Na sliki 18 je predstavljen faktor izgub ϵ'' za kontrolirano starano olje žafranike v odvisnosti od frekvence v območju od 50 Hz do 2 MHz in temperature od 20 °C do 50 °C v intervalih po 10°C.

Potek krivulje na sliki 18 se nekoliko razlikuje od krivulj na slikah 15 do 17. Oblika črke U se ohranja, desni krak pri višjih frekvencah pa je bolj izrazit. Najbolj pravilen potek v obliki črke U je značilen za 30 in 40 °C, pri 20 °C je bolj izrazit desni krak pri frekvencah nad 10 kHz, pri 50°C pa levi krak pri nižjih frekvencah. Spremembe ϵ'' v intervalih temperature po 10°C so pravilne pri 50 Hz in neenakomerne pri 2 MHz.

Vrednosti faktorja izgub pri nizkih frekvencah so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 50 Hz in pri 20°C je ϵ'' enak 0,027, pri 50°C pa 0,104 (olje 0,055 in 0,216).

Pri visokih frekvencah pa se trend obrne. Vrednosti faktorja izgub so v primerjavi s sončničnim oljem večje. Pri 2 MHz in pri 20°C je ϵ'' enak 0,109, pri 50°C pa 0,028. (olje 0,024 in 0,0045).

Iz opisanega lahko sklepamo, da se pri nizkih frekvencah in vseh temperaturah faktor izgub sončničnega olja zmanjšuje z naraščajočim peroksidnim številom. Pri visokih frekvencah in vseh temperaturah pa se faktor izgub sončničnega olja povečuje z naraščajočim peroksidnim številom. Pri 50 Hz so razlike faktorja izgub podobne kor pri ostalih maščobnih številih kar se ni izkazalo primerno za določanje peroksidnega števila. Pri 2 MHz pa lahko določimo povečanje peroksidnega števila sončničnega olja za 1 ali 2 enoti zaradi povečanja ϵ'' pri 20°C in za 10 enot pri 50°C.



Slika 18: Faktor dielektričnih izgub kontrolirano staranega olja žafranike.

Hkrati z visokim peroksidnim številom smo kontrolirano staranemu olju žafranike določili tudi visoko p-anizidinsko vrednost (249). Potek spektra faktorja izgub za kontrolirano starano olje žafranike lahko pripišemo tudi visoki p-anizidinski vrednosti.

Staranje olja, ki ga s klasičnimi kemijskimi analizami določamo s peroksidnim številom, p-anizidinsko vrednostjo in še s kakšno drugo analizo se v spektru faktorja izgub kaže predvsem pri višjih frekvencah, kjer ta faktor s staranjem olja narašča.

Faktor izgub zmesi sončničnega olja z oljem semen bombaža je proučeval tudi El-Shami s sodelavci in določil njegovo vrednost za 10 in večkrat višjo kot pri našem delu. Enako kot v tem delu ugotavlja trend povečevanja ϵ'' z naraščanjem peroksidnega števila pri frekvencah od 1 do 2 MHz in od 20 do 40°C (El-Shami in sod. 1992).

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

5.1.1 Dielektrične lastnosti sončničnega olja

Sončničnemu olju smo določili dielektrično konstanto in faktor izgub. V frekvenčnem območju od 50 Hz do 2 MHz se dielektrična konstanta malo spreminja s frekvenco. Pri vseh temperaturah dielektrična konstanta s frekvenco narašča od 50 Hz do 10 kHz. V tem frekvenčnem območju je vpliv frekvence na temperaturo največji. Pri frekvencah od 10 kHz do 1 MHz se dielektrična konstanta sončničnega olja ne spreminja, pri naraščanju frekvence do 2 MHz pa se nekoliko zmanjša. Pri 20°C je vpliv frekvence na dielektrično konstanto 0,2 %. Vpliv frekvence na dielektrično konstanto raste s temperaturo in je največji pri 50°C, kjer se dielektrična konstanta s frekvenco spremeni za 4 %.

Faktor izgub sončničnega olja se močno spreminja s frekvenco. Pri vseh temperaturah merjenja je najvišji pri najnižji frekvenci, s frekvenco se zmanjša za 100× pri 20°C in za 1000× pri 50°C. Minimum je pri frekvencah od 10 kHz do 100 kHz. Z naraščanjem frekvence do 2 MHz faktor izgub naraste od 10 do 50×, povečanje je največje pri nižjih temperaturah.

Dielektrične lastnosti sončničnega olja smo primerjali z vrednostmi v literaturi. Lizhi s sodelavci (2008) je določal dielektrične lastnosti jedilnih rastlinskih olj z enako celico in podobnim instrumentom kot mi. Dielektrična konstanta za sončnično olje se razlikuje od naše za 1 %, pri čemer analizira olja z drugim geografskim poreklom. Vrednosti faktorja izgub za sončnično olje ne poda. Spekter dielektrične konstante in faktorja izgub se ujema s spektri na slikah 14 in 15.

El-Shami s sodelavci (1992) je objavil dielektrični spekter mešanice sončničnega olja z oljem bombažnih semen. Ugotovil je podobno sliko za odvisnost dielektrične konstante od frekvence, medtem ko se njegove slike odvisnosti faktorja izgub od frekvence razlikuje od slike 15 in podatkov Lizhi-ja in sodelavcev (2008).

Dielektrično konstanto pri 2 MHz za štiri različne vrste sončničnega olja slovenskega izvora sta določila Klofutar in Rudan Tasič (1999). Eden izmed njunih vzorcev se dobro ujema z vrednostmi, ki smo jih izmerili našemu vzorcu sončničnega olja, saj je razlika v določitvi dielektrične konstante 0,3 %.

5.1.2 Dielektrične lastnosti olja in kislinško število

Spekter dielektrične konstante oleinske kisline je podoben spektru sončničnega olja: pri 20°C se dielektrična konstanta poveča z rastočo frekvenco za 0,5 % in pri 50°C za 4 %.

Vrednost dielektrične konstante oleinske kisline je za 0,7 nižja od vrednosti sončničnega olja. Faktor izgube smo določili v zmesi sončničnega olja in oleinske kisline v razmerju 40 : 60. Vrednosti faktorja izgube so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 20°C in pri 50 Hz je ϵ'' 0,02 in pri 2 MHz 0,01 (olje 0,055 in 0,024). Pri 50°C je vrednost faktorja izgube pri 50 Hz 0,085 in pri 2 MHz 7×10^{-4} (olje 0,16 in 0,003).

Če se kislinsko število spremeni za 1 se vrednost dielektrične konstante pri nizkih kislinskih številih zniža za 0,0028 pri 20°C in za 0,0022 pri 50°C. Če upoštevamo relativno napako dielektrične konstante $\pm 0,5 \%$ ali absolutno napako dielektrične konstante $\pm 0,02$ bi lahko zaznali spremembo kislinskega števila med 5 in 7. Izbor frekvenc v območju od 50 Hz do 2 MHz ne vpliva bistveno na spreminjanje dielektrične konstante zaradi spreminjanja kislinskega števila.

Kislinsko število se pri dodatku 60 % oleinske kisline v sončnično olje spremeni za približno 120. Pri 50 Hz je to povezano z zmanjšanjem ϵ'' za 0,035 pri 20°C in 0,132 pri 50°C. 10 % napaka določitve ϵ'' pri 50 Hz omogoča določitev spremembe kislinskega števila sončničnemu olju za 20 enot ne glede na temperaturo. Pri 2 MHz se zaradi spremembe kislinskega števila za 120 ϵ'' zmanjša za 0,013 pri 20°C in 0,0023 pri 50°C. 1 % napaka določitve ϵ'' pri 2 MHz omogoča določitev spremembe kislinskega števila sončničnega olja za 2 pri 20°C.

Za opazovanje naraščanja kislinskega števila v sončničnem olju s spreminjanjem dielektrične konstante je najbolje izbrati temperaturo 20°C. Na izbor frekvence vpliva faktor izgub, saj je le-tega najbolj smiselno opazovati pri čim višjih frekvencah.

Iz opisanega sledi, da se z naraščanjem kislinskega števila sončničnega olja zmanjšujeta tako dielektrična konstanta kot faktor izgub. Z opazovanjem olja pri 20°C in pri 2 MHz bi lahko zaznali spremembo kislinskega števila sončničnega olja okrog 5.

5.1.3 Dielektrične lastnosti olja in jodovo število

Spekter dielektrične konstante nasičenega sintetičnega triglicerida je podoben spektru sončničnega olja. Vrednost dielektrične konstante nasičenega sintetičnega triglicerida je za 0,7 višja kot pri sončničnem olju. Vrednosti faktorja izgube nasičenega sintetičnega triglicerida so v primerjavi s sončničnim oljem manjše pri vseh temperaturah in frekvencah merjenja.

Jodovo število sončničnega olja je 85 in lahko pri drugih vrstah sončničnega olja narašča (Klofutar, Rudan-Tasič, 1999). V zmesih 3a-3d je povečevanje jodovega števila za 1 povezano z zmanjšanjem dielektrične konstante za 0,009 pri 20 °C pri vseh frekvencah merjenja od 50 Hz do 2 MHz. Koeficient korelacije dielektrične konstante za sončnično olje je 0,5 % in standardna napaka 0,02. Iz poskusov v tej nalogi lahko sklepamo, da bi

bilo z merjenjem dielektrične konstante mogoče določiti spremembo jodovega števila za okrog 2.

Faktor izgub sončničnega olja pri vseh temperaturah in frekvencah narašča z naraščajočim jodovim številom in se zmanjšuje z zmanjševanjem jodovega števila sončničnega olja. Najbolj učinkovito je slediti faktorju izgub pri temperaturi 20°C in frekvenci 2 MHz, kjer lahko zaznamo že spremembe jodovega števila okrog 2.

Naraščanje jodovega števila sončničnega olja je povezano s zmanjševanjem dielektrične konstante in povečevanjem faktorja izgub. Za določanje obeh parametrov je najprimernejša temperatura 20 °C in visoke frekvence, kjer lahko zaznamo že spremembe jodovega števila za 1 enoto.

5.1.4 Dielektrične lastnosti olja in peroksidno število in p-anizidinska vrednost

V modelnih lipidnih zmesih 5a-5d sta peroksidno število in p-anizidinska vrednost povezani. Ko naraste peroksidno število za 1 naraste p-anizidinska vrednost za 0,5. Za olja velja, da zaradi staranja naraščata tako PŠ, ki odraža primarne produkte oksidacije olja kot p-AV, ki odraža nastanek aldehydov in sekundarnih produktov oksidacije. Z opravljenimi poskusi ni mogoče ločiti med vplivom peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti na naraščanje dielektrične konstante. Iz poskusa lahko ugotovimo, da dielektrična konstanta olja s staranjem narašča, ter da se ob spremembi peroksidnega števila za 1 in p-anizidinske vrednosti za 0,5 dielektrična konstanta poveča za 0,0014 pri 20 °C in v frekvenčnem območju od 50 Hz do 1 MHz.

Faktor izgub sončničnega olja je smiselno proučevati pri višjih frekvencah, saj se pri frekvencah od 1MHz do 2 MHz z naraščajočim peroksidnim številom faktor izgub povečuje. Ta trend je nasproten kot pri vplivu kislinkega in jodovega števila. Pri 2 MHz pa lahko določimo povečanje peroksidnega števila sončničnega olja za 1-2 enoti zaradi povečanja ϵ'' pri 20°C.

Staranje olja s pomočjo peroksidnega števila in dielektričnih lastnosti je opazoval tudi El-Shami s sodelavci. Zmes sončničnega olja s oljem bombažnih semen so starali s segrevanjem pri 180 °C . Ugotovili so večji vpliv peroksidnega števila na dielektrično konstanto. Pri 30 °C se je dielektrična konstanta povečala za 0,004, če se je peroksidno število povečalo za 1 (naše delo 0,0014). Prav tako so ugotovili naraščanje faktorja izgub z naraščajočim peroksidnim številom.

5.2 SKLEPI

Dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi ima plato v frekvenčnem območju od 10 Hz do 1 MHz pri vseh temperaturah.

Dielektrična konstanta modelnih lipidnih zmesi se linearno spreminja s kislinim, jodovim in peroksidnim številom ter p-anizidinsko vrednostjo.

Faktor izgub se močno spreminja s frekvenco, najvišje vrednosti ima pri nizkih in visokih frekvencah (50 Hz in 2 MHz), minimum pa pri frekvencah od 10 do 100 kHz.

Z naraščanjem kislinkega števila sončničnega olja se zmanjšujeta tako dielektrična konstanta kot faktor izgub.

Največje spremembe dielektričnih lastnosti zaradi kislinkega števila smo določili pri 20°C in 2 MHz, kjer bi z upoštevanjem dielektrične konstante in faktorja izgub lahko zaznali spremembo kislinkega števila sončničnega olja med 2 in 5.

Naraščanje jodovega števila sončničnega olja je povezano s zmanjševanjem dielektrične konstante in povečevanjem faktorja izgub.

Vpliv jodovega števila na dielektrično konstanto in faktor izgub je največji pri 20 °C in pri 2 MHz, kjer lahko zaznamo že spremembe jodovega števila za 2 enoti.

Staranje sončničnega olja (zvišanje peroksidnega števila in p-anizidinske vrednosti) lahko določimo z naraščanjem dielektrične konstante v vsem frekvenčnem območju in z naraščanjem faktorja izgub pri frekvencah okrog 2 MHz.

6 POVZETEK

V diplomskem delu smo določili dielektrične lastnosti modelnim lipidnim zmesem sončničnega olja z oleinsko kislino, nasičenim sintetičnim trigliceridom in staranim oljem žafranike. V sistemih smo iskali zvezo med vrednostmi maščobnih števil; kislinским, jodovim in peroksidnim številom ter p-anizidninsko vrednostjo, določenih s kemijskimi metodami z dielektrično konstanto in faktorjem izgub. Pri tem smo opazovali tudi vpliv pogojev merjenja, in sicer frekvence med 50 Hz do 2 MHz in temperature med 20 in 50 °C na dielektrično konstanto in faktor izgub.

Kislinsko število smo opazovali pri vrednostih med 1,66 pri sončničnem olju do 200 pri oleinski kislini. Za opis spektrov smo uporabili razdelitev celotnega frekvenčnega območja na 3 intervale: ϵ'_p je srednja vrednost dielektrične konstante v območju frekvenc 10 kHz do 1 MHz s pripadajočo standardno napako, ϵ'_{nf} je vrednost dielektrične konstante pri 50 Hz in $\Delta\epsilon'_{nf}$ je razlika med vrednostjo ϵ'_{nf} in ϵ'_p , vrednost dielektrične konstante pri 2 MHz označeno z ϵ'_{vf} in razliko med ϵ'_p in ϵ'_{vf} označeno z $\Delta\epsilon'_{vf}$. Med kislinским številom in dielektrično konstanto smo določili negativno linearno odvisnost za parametre ϵ'_p in ϵ'_{nf} pri vseh temperaturah. Koeficient korelacije se je gibal med 0,998 pri 20 °C in 0,984 pri 50 °C. $\Delta\epsilon'_{nf}$ je od kislinского števila pri 20 °C neodvisen in znaša $0,006 \pm 0,003$, odvisnost pa se nato povečuje in je največja pri 50 °C, kjer jo lahko zapišemo v obliki linearne enačbe 19. Zmanjšanje dielektrične konstante na območju frekvenc 1 MHz do 2 MHz je bilo v te primeru neizrazito.

Jodovo število smo opazovali med 85 pri sončničnem olju in 4 pri nasičenem sintetičnem trigliceridu. Tudi v tem primeru se je pokazala negativna linearna odvisnost pri ϵ'_p in ϵ'_{nf} , pri čemer se je koeficient korelacije gibal med 0,999 pri 20 °C in 1,000 pri 50 °C. Pri 20 in 30 °C je bila $\Delta\epsilon'_{nf}$ od jodovega števila neodvisna in je znašala $-0,009 \pm 0,001$ pri 20 °C in $-0,037 \pm 0,004$ pri 30 °C. Pri 50 °C pa se je izkazalo, da je odvisnost dielektrične konstante od jodovega števila največja in je zapisana v obliki linearne enačbe 23.

Peroksidno in p-anizidinsko vrednost smo opazovali vzporedno, saj z opravljenim poskusom ni mogoče ločiti vpliva primarnih in sekundarnih produktov oksidacije na velikost dielektrične konstante vzorca. Peroksidno število smo opazovali med 2,4 pri sončničnem olju in 512 pri kontrolirano staranem olju žafranike, p-anizidinsko vrednost pa med 0,2 in 250 pri istih vzorcih. V območju nizkih frekvenc (50 Hz do 100 kHz in 100 kHz do 1 MHz) so se izkazali podobni trendi spreminjanja dielektrične konstante s peroksidnim številom in p-anizidinsko vrednostjo kot v prejšnjih dveh primerih s to razliko, da sta se ϵ'_p in ϵ'_{nf} z naraščajočimi števili pri vseh temperaturah povečevala. Največje razlike odvisnosti dielektrične konstante od obeh obravnavanih števil smo opazili pri frekvencah 1 MHz do 2 MHz, kjer se je $\Delta\epsilon'_{vf}$ spreminjala linearno in se je največja

odvisnost od peroksidnega števila pokazala pri 20 °C in je podana z enačbo 28, nato pa se je odvisnost z naraščanjem temperature do 50 °C zmanjševala, kar je podano v enačbi 31.

Faktor izgub olja se spreminja s frekvenco in temperaturo. Krivulja odvisnost faktorja izgub od frekvence, podane na logaritemski skali je oblikovana kot bolj ali manj pravilna črka U. Oblika krivulje v obliki črke U je najbolj pravilna pri temperaturi 20 °C. Z naraščajočo temperaturo narašča ϵ'' pri nizkih frekvencah. Sprememba ϵ'' je največja pri temperaturah od 40 do 50 °C in najmanjša od 20 do 30 °C, nasprotno pa se pri visokih frekvencah ϵ'' z naraščajočo temperaturo zmanjšuje. Sprememba ϵ'' pri 2 MHz je največja pri spremembi temperature od 20 do 30 °C in najmanjša od 40 do 50 °C.

Pri določanju faktorja izgub oleinski kislini smo dobili nesmiselne in neponovljive rezultate. Faktor izgub pa je podobno ponovljivo kot za sončnično olje določen še za modelne lipidne zmesi do sestave 60 % oleinske kisline in 40 % olja. Vrednosti faktorja izgub so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 20°C je ϵ'' 0,020 pri 50 Hz in 0,011 pri 2MHz (olje 0,055 in 0,024). Pri 50 °C je vrednost faktorja izgub pri 50 Hz 0,085 in pri 2 MHz 7×10^{-4} (olje 0,216 in 0,0045).

Vrednosti faktorja izgub sintetičnega nasičenega triglicerida so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 20 °C in pri 50 Hz je ϵ'' 0,017, pri 20 °C in 2MHz pa 0,016 (olje 0,055 in 0,024). Pri 50 °C je vrednost faktorja izgub pri 50 Hz 0,046 in pri 2 MHz 0,0017 (olje 0,216 in 0,0045). Iz opisanega lahko sklepamo, da pri vseh temperaturah in frekvencah faktor izgub sončničnega olja narašča z naraščajočim jodovim številom. Pri 50 Hz bi spremembo jodovega števila najprej zaznali pri temperaturi 50°C vendar zaradi velike eksperimentalne napake pri teh temperaturah le spremembe jodovega števila več kot 10. Pri 2 MHz je najbolj učinkovito slediti faktorju izgub pri 20 °C, kjer lahko določimo zaznamo že spremembe jodovega števila okrog 1.

Potek krivulje ϵ'' v odvisnosti od frekvence za starano olje žafranike se nekoliko razlikuje od krivulj za olje in sintetični nasičeni triglicerid. Oblika črke U se ohranja, desni krak pri višjih frekvencah pa je bolj izrazit. Vrednosti faktorja izgub pri nizkih frekvencah so v primerjavi s sončničnim oljem manjše: pri 50 Hz in pri 20 °C ϵ'' enak 0,027, pri 50 °C pa 0,104 Hz (olje 0,055 in 0,216). Pri visokih frekvencah pa se trend obrne in so vrednosti faktorja izgub v primerjavi s sončničnim oljem večje. Pri 2 MHz in pri 20°C je ϵ'' enak 0,109, pri 50 °C pa 0,028. (olje 0,024 in 0,0045). Tako se v spektru faktorja izgub staranje olja, ki smo ga določili s peroksidnim številom in p-anizidinsko vrednostjo, kaže predvsem pri višjih frekvencah, kjer ta faktor s staranjem olja narašča.

7 VIRI

- Agilent Technologies. 2000. Agilent 16452A liquid test fixture operation and service manual. 3rd ed. Kobe, Agilent Technologies: 48 str.
- Agilent Technologies 2006. Agilent E4980A Precision LCR meter 20 Hz to 2 MHz data sheet. Kobe, Agilent Technologies: 35 str.
- Ahmed J., Ramaswamy H.S., Raghavan V.G.S. 2007. Dielectric properties of butter in MW frequency range as affected by salt and temperature. *Journal of Food Engineering*, 82: 351-358
- Akoh C.C., Min D.D. 2008. Food lipids, chemistry, nutrition and biotechnology. 3rd ed. New York, CRC Press: 3-4, 125-195
- AOAC Official method 993.20. Iodine value of fats and oils. 1999. V: Official methods of analysis of AOAC international. Cunniff P. (ed.). Vol. 2. 16th ed. Gaithersburg, AOAC International, Chapter 41: 7-9
- AOAC Official method 965.33. Peroxide value of oils and fats. 1999. V: Official methods of analysis of AOAC international. Cuniff P. (ed.). Vol. 2. 16th ed. Gaithersburg, AOAC International, Chapter 41: 9B-9B
- Boyer R.F. 2005. Temelji biokemije. Ljubljana, Študentska založba: 207-225
- Brulc L. 2010. Vpliv rastlinskih olj na debelino maščobnega sloja na ustnih površinah. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo: 68 str.
- Cert A., Moreda W., Perez-Comino M.C. 2000. Chromatographic analysis of minor constituents in vegetable oils. *Journal of Chromatography A*, 881: 131-148
- Che Man Y.B., Mirghani M.E.S. 2000. Rapid method for determining moisture content in crude palm oil by fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77, 6: 631-637
- Datta A.K., Sumnu G., Gaghavan G.S.V 2005. Dielectric properties of food. V: Engineering properties of foods. 3rd ed. Rao M.A., Rizvi S.S.H., Datta A.K. (eds.). New York, Taylor & Francis group: 501-566
- El-Shami S.M., Zaki Solim I., El-Anwar I.M., Haasan El-Mallah M. 1992. Dielectric properties for monitoring the quality of heated oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 69: 872-875

- Gertz C. 2000. Chemical and physical parameters as quality indicators of used frying fats. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102: 566-572
- Guo W., Zhu X., Liu Y., Zhuang H., 2010. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing. *Journal of Food Engineering*, 97, 2: 275-281
- Holtz E., Ahrne L., Rittenauer M., Rasmuson A., 2010. Influence of dielectric and sorption properties on drying behavior and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials. *Journal of Food Engineering*, 97, 2: 144-153
- ISO 660. Animal and vegetable fats and oils – Determination of acid value and acidity. 2nd ed. 1996: 8 str.
- Klofutar C., Rudan-Tasič D. 1999. Characteristics of vegetable oils of some Slovene manufacturers. *Acta Chimica Slovenica*, 46, 4: 521-551
- Lizhi H., Toyoda K., Ihara I. 2008. Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *Journal of Food Engineering*, 88: 151-158
- Lizhi H., Toyoda K., Ihara I. 2010. Discrimination of olive oil adulterated with vegetable oil using dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 96: 167-171
- Marmesat S., Rodrigues E., Velasco J., Dobargenes C. 2007. Quality of used frying fats and oils: Comparison of rapid tests based on chemical and physical oil properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 42: 601-608
- Marra F., Zhang L., Lyng J.G. 2009. Radio frequency treatment of food: Review of recent advances. *Journal of Food Engineering*, 91, 4: 497-508
- Merck. 2009. Oleic acid vegetable extra pure Ph Eur, BP, NF K40386671: Certificate of analysis. Darmstadt, Merck KGaA: 2 str.
- MicrocalTM. 1995. Origin the ultimate solution: labtalkTM manual. Northampton, MicrocalTM Software, Inc.: 195 str.
- Nikolič V. 2006. Oksidativna stabilnost olja navadnega rička (*Camelina Sativa*). Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo: 59 str.
- O'Brien R.D. 2004. Fats and oils, formulating and processing for application. 2nd ed. New York, CRC Press: 175-202
- Paquot C., Hautfenne A. 1992. Standard methods for the analysis of oils, fats and derivatives. 7th ed. Oxford, Blackwell Scientific Publications: 73-211

- Patterson H.B.W. 1989. Handling and storage of oilseeds, oils, fats and meal. Essex, Elsevier: 1-86
- Petrov O.V., Hay J., Mastikhin I.V., Balcom B.J. 2008. Fat and moisture content determination with unilateral NMR. Food Research International, 41: 758-764
- Pomeranz Y., Meloan C.E. 1994. Food analysis: Theory and practice. New York, Chapman & Hall: 567-732
- Saad B., Tatt Wai W., Peng Lim B. 2008. Comparative study on oxidative decomposition behavior in vegetable oils and its correlation with iodine value using thermogravimetric analysis. Journal of Oleo Science, 57, 4: 257-261
- Sahin S., Gülüm Sumnu S. 2006. Physical properties of foods, New York, Springer Science+Business Media, LLC.: 157-192
- Sigma – Aldrich. 2010. Safflower seed oil from *Carthamus tinctorius* seed. Traufkirchen, Sigma – Aldrich Chemie GmbH: 1 str.
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?lang=en&N4=S8281>
(januar 2010)
- Skoog D.A., Holler F.J., Nieman T.A. 1998. Principles of instrumental analysis. 5th ed. Orlando, Harcourt brace & Company: A1-A25
- Sosa-Morales M.E., Valerio-Junco L., Lopez-Malo A., Garcia H.S. 2010. Dielectric properties of foods: Reported data in 21st century and their potential applications. Food Science and Technology, 44, 8: 1169-1179
- Šuhle P., Kralj A., 1991. Sistemi industrijske elektronike: gradniki in sestavi. Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo: 41-43

ZAHVALA

Za strokovno vodenje in pomoč se zahvaljujem mentorici doc. dr. Nataši Šegain s Katedre za biokemijo in kemijo živil na Biotehniški fakulteti.

Za somentorstvo se zahvaljujem prof. dr. Nataši Poklar-Ulrih s Katedre za biokemijo in kemijo živil na Biotehniški fakulteti.

Za recenzije se zahvaljujem doc. dr. Rajku Vidrihu s Katedre za tehnologije, prehrano in vino na Biotehniški fakulteti.

Zahvaljujem se tudi tehnični sodelavki ge. Andreji Habjan in vsem zaposlenim na Katedre za biokemijo in kemijo živil na Biotehniški fakulteti.

Za izkazano podporo, spodbudo in razumevanje se zahvaljujem tudi staršem, Primožu in Roku, Anžetu pa za pomoč pri oblikovanju diplome.

Najlepša hvala vsem.

PRILOGE

Priloga A: Meritve kapacitivnosti zraka v odvisnosti od frekvence in temperature.

f (kHz)	$C_p \cdot 10^{11}$ (F)			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,2536	3,2774	3,3443	3,3889
0,150	3,2532	3,2629	3,3007	3,3347
0,250	3,2490	3,2537	3,2862	3,3167
0,350	3,2464	3,2499	3,2761	3,3031
0,450	3,2439	3,2466	3,2704	3,2954
0,550	3,2450	3,2470	3,2692	3,2935
0,650	3,2454	3,2469	3,2679	3,2904
0,750	3,2452	3,2463	3,2665	3,2876
0,850	3,2448	3,2456	3,2650	3,2866
0,950	3,2444	3,2449	3,2638	3,2840
1,00	3,2457	3,2464	3,2656	3,2855
2,00	3,2449	3,2443	3,2603	3,2771
3,00	3,2451	3,2439	3,2589	3,2745
4,00	3,2450	3,2434	3,2578	3,2730
5,00	3,2452	3,2434	3,2575	3,2722
6,00	3,2450	3,2430	3,2569	3,2714
7,00	3,2450	3,2429	3,2565	3,2709
8,00	3,2450	3,2428	3,2562	3,2705
9,00	3,2450	3,2426	3,2559	3,2701
10,0	3,2449	3,2425	3,2557	3,2698
20,0	3,2449	3,2420	3,2545	3,2681
30,0	3,2448	3,2418	3,2540	3,2673
40,0	3,2448	3,2417	3,2537	3,2670
50,0	3,2448	3,2416	3,2535	3,2666
60,0	3,2445	3,2412	3,2531	3,2662
70,0	3,2446	3,2413	3,2531	3,2661
80,0	3,2446	3,2413	3,2531	3,2661
90,0	3,2445	3,2412	3,2529	3,2658
100	3,2445	3,2411	3,2528	3,2657
200	3,2444	3,2410	3,2525	3,2653
300	3,2444	3,2409	3,2524	3,2651
400	3,2444	3,2409	3,2523	3,2650
500	3,2442	3,2406	3,2520	3,2647
600	3,2441	3,2406	3,2519	3,2646
700	3,2440	3,2405	3,2518	3,2645
800	3,2439	3,2403	3,2517	3,2643
900	3,2439	3,2403	3,2517	3,2643
1000	3,2439	3,2403	3,2516	3,2643
1100	3,2439	3,2403	3,2517	3,2643
1200	3,2436	3,2400	3,2513	3,2639
1300	3,2436	3,2400	3,2514	3,2640
1400	3,2434	3,2398	3,2512	3,2638
1500	3,2436	3,2400	3,2513	3,2639
1600	3,2434	3,2399	3,2512	3,2638
1700	3,2436	3,2401	3,2513	3,2639
1800	3,2432	3,2396	3,2509	3,2635
1900	3,2434	3,2398	3,2511	3,2637
2000	3,2433	3,2398	3,2511	3,2636

Priloga B: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec sončničnega olja.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,0909	3,0081	2,9004	2,8248	54,58	91,43	142,06	215,6
0,150	3,0903	3,0213	2,9396	2,8693	19,10	31,41	48,14	74,68
0,250	3,0938	3,0313	2,9528	2,8840	11,27	18,72	29,46	44,69
0,350	3,0960	3,0343	2,9617	2,8958	8,058	13,31	21,09	31,94
0,450	3,0983	3,0375	2,9668	2,9026	6,382	10,41	16,49	24,99
0,550	3,0977	3,0378	2,9686	2,9050	5,257	8,607	13,58	20,50
0,650	3,0976	3,0379	2,9698	2,9077	4,472	7,287	11,47	17,39
0,750	3,0976	3,0383	2,9709	2,9101	3,884	6,341	9,982	15,10
0,850	3,0979	3,0389	2,9723	2,9110	3,437	5,618	8,809	13,35
0,950	3,0981	3,0394	2,9733	2,9132	3,030	5,006	7,863	11,91
1,00	3,0973	3,0385	2,9721	2,9123	3,156	5,015	7,730	11,57
2,00	3,0980	3,0403	2,9769	2,9197	1,671	2,575	3,941	5,854
3,00	3,0978	3,0407	2,9781	2,9220	1,152	1,746	2,653	3,941
4,00	3,0978	3,0411	2,9790	2,9233	0,8479	1,259	1,942	2,903
5,00	3,0976	3,0411	2,9794	2,9240	0,7657	1,098	1,618	2,387
6,00	3,0978	3,0415	2,9800	2,9247	0,5945	0,8404	1,270	1,913
7,00	3,0978	3,0416	2,9804	2,9252	0,5481	0,7437	1,103	1,654
8,00	3,0978	3,0418	2,9806	2,9256	0,5790	0,7364	1,039	1,508
9,00	3,0979	3,0419	2,9809	2,9259	0,5312	0,6648	0,9264	1,335
10,0	3,0980	3,0420	2,9812	2,9262	0,5338	0,6224	0,8476	1,230
20,0	3,0979	3,0424	2,9822	2,9277	0,5542	0,5032	0,5442	0,6859
30,0	3,0979	3,0426	2,9826	2,9284	0,7056	0,5435	0,5297	0,5816
40,0	3,0978	3,0426	2,9828	2,9286	0,7019	0,4786	0,3831	0,3838
50,0	3,0978	3,0426	2,9829	2,9290	0,8467	0,5663	0,4246	0,3839
60,0	3,0980	3,0429	2,9833	2,9293	0,9411	0,5960	0,4209	0,3571
70,0	3,0980	3,0429	2,9833	2,9293	1,047	0,6488	0,4382	0,3457
80,0	3,0980	3,0429	2,9834	2,9294	1,164	0,7066	0,4641	0,3476
90,0	3,0979	3,0430	2,9835	2,9296	1,277	0,7683	0,4935	0,3569
100	3,0979	3,0430	2,9835	2,9296	1,385	0,8210	0,5171	0,3587
200	3,0978	3,0429	2,9836	2,9299	2,947	1,801	1,189	0,8678
300	3,0976	3,0428	2,9836	2,9299	4,220	2,500	1,584	1,092
400	3,0974	3,0427	2,9836	2,9299	5,504	3,199	2,009	1,323
500	3,0977	3,0430	2,9839	2,9302	6,763	3,866	2,328	1,516
600	3,0975	3,0429	2,9839	2,9303	8,161	4,715	2,844	1,857
700	3,0972	3,0428	2,9838	2,9302	9,407	5,377	3,221	2,059
800	3,0971	3,0428	2,9838	2,9303	10,58	6,015	3,535	2,231
900	3,0967	3,0426	2,9836	2,9301	12,07	6,968	4,166	2,658
1000	3,0964	3,0424	2,9835	2,9300	13,19	7,527	4,434	2,770
1100	3,0962	3,0423	2,9836	2,9301	14,35	8,167	4,769	2,977
1200	3,0959	3,0422	2,9834	2,9300	15,56	8,841	5,161	3,216
1300	3,0957	3,0421	2,9835	2,9301	16,65	9,400	5,417	3,303
1400	3,0953	3,0420	2,9834	2,9300	17,91	10,16	5,887	3,584
1500	3,0948	3,0418	2,9832	2,9299	19,07	10,79	6,163	3,765
1600	3,0945	3,0415	2,9830	2,9297	20,22	11,44	6,555	3,927
1700	3,0939	3,0412	2,9829	2,9296	21,00	11,55	6,398	3,660
1800	3,0939	3,0415	2,9832	2,9300	21,74	11,94	6,493	3,659
1900	3,0932	3,0410	2,9830	2,9298	22,99	12,77	7,022	3,959
2000	3,0926	3,0407	2,9827	2,9296	24,33	13,62	7,629	4,447

Priloga C: Dielektrična konstanta v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec oleinske kisline.

f (kHz)	ϵ'			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	2,4012	2,3681	2,3196	2,2921
0,150	2,4004	2,3788	2,3494	2,3279
0,250	2,4019	2,3837	2,3587	2,3387
0,350	2,4042	2,3870	2,3665	2,3490
0,450	2,4057	2,3891	2,3703	2,3541
0,550	2,4059	2,3897	2,3721	2,3564
0,650	2,4055	2,3898	2,3730	2,3586
0,750	2,4056	2,3900	2,3739	2,3604
0,850	2,4059	2,3906	2,3751	2,3613
0,950	2,4060	2,3910	2,3759	2,3630
1,00	2,4055	2,3903	2,3750	2,3624
2,00	2,4060	2,3917	2,3788	2,3684
3,00	2,4058	2,3921	2,3798	2,3703
4,00	2,4060	2,3925	2,3806	2,3714
5,00	2,4057	2,3924	2,3808	2,3719
6,00	2,4059	2,3927	2,3813	2,3725
7,00	2,4059	2,3928	2,3816	2,3730
8,00	2,4059	2,3930	2,3818	2,3733
9,00	2,4060	2,3930	2,3820	2,3735
10,0	2,4060	2,3931	2,3822	2,3738
20,0	2,4061	2,3935	2,3831	2,3750
30,0	2,4060	2,3936	2,3834	2,3755
40,0	2,4060	2,3936	2,3835	2,3757
50,0	2,4060	2,3937	2,3837	2,3760
60,0	2,4063	2,3940	2,3841	2,3764
70,0	2,4062	2,3940	2,3841	2,3764
80,0	2,4062	2,3939	2,3840	2,3764
90,0	2,4062	2,3940	2,3842	2,3766
100	2,4063	2,3941	2,3842	2,3767
200	2,4063	2,3942	2,3845	2,3770
300	2,4061	2,3941	2,3844	2,3770
400	2,4061	2,3940	2,3844	2,3770
500	2,4063	2,3943	2,3847	2,3773
600	2,4062	2,3942	2,3846	2,3773
700	2,4063	2,3943	2,3847	2,3774
800	2,4063	2,3943	2,3848	2,3774
900	2,4061	2,3941	2,3846	2,3772
1000	2,4061	2,3941	2,3846	2,3773
1100	2,4061	2,3941	2,3846	2,3773
1200	2,4060	2,3941	2,3846	2,3773
1300	2,4061	2,3942	2,3847	2,3774
1400	2,4061	2,3942	2,3847	2,3774
1500	2,4060	2,3941	2,3846	2,3773
1600	2,4059	2,3940	2,3846	2,3772
1700	2,4058	2,3939	2,3845	2,3772
1800	2,4059	2,3941	2,3846	2,3773
1900	2,4058	2,3939	2,3845	2,3772
2000	2,4056	2,3937	2,3843	2,3771

Priloga D: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec sintetičnega nasičenega triglicerida.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,879	3,789	3,653	3,546	17,48	21,779	30,78	45,81
0,150	3,876	3,801	3,696	3,602	7,402	8,959	11,28	16,67
0,250	3,882	3,813	3,714	3,622	3,982	4,565	6,488	9,615
0,350	3,885	3,817	3,726	3,637	2,626	3,224	4,524	6,760
0,450	3,888	3,821	3,732	3,646	2,120	2,571	3,597	5,303
0,550	3,887	3,821	3,734	3,649	1,779	2,150	2,991	4,368
0,650	3,887	3,821	3,735	3,652	1,529	1,816	2,535	3,744
0,750	3,887	3,822	3,737	3,655	1,345	1,599	2,237	3,271
0,850	3,887	3,823	3,738	3,656	1,170	1,428	1,953	2,879
0,950	3,888	3,823	3,740	3,659	1,038	1,230	1,726	2,555
1,00	3,887	3,822	3,738	3,658	1,400	1,618	2,074	2,868
2,00	3,888	3,824	3,744	3,667	0,7856	0,8689	1,112	1,493
3,00	3,887	3,825	3,746	3,670	0,5407	0,6073	0,7484	1,007
4,00	3,887	3,825	3,747	3,671	0,3525	0,3807	0,4891	0,6832
5,00	3,887	3,825	3,747	3,672	0,3739	0,3873	0,4704	0,6234
6,00	3,887	3,826	3,748	3,673	0,1948	0,2087	0,2655	0,3969
7,00	3,887	3,826	3,749	3,674	0,1850	0,1877	0,2458	0,3421
8,00	3,887	3,826	3,749	3,674	0,2676	0,2549	0,2911	0,3726
9,00	3,887	3,826	3,749	3,675	0,2331	0,2122	0,2453	0,3222
10,0	3,887	3,826	3,750	3,675	0,2410	0,2122	0,2344	0,2979
20,0	3,888	3,827	3,751	3,677	0,2531	0,1788	0,1503	0,1956
30,0	3,888	3,827	3,751	3,678	0,3753	0,2624	0,1851	0,1876
40,0	3,888	3,827	3,752	3,678	0,3007	0,1503	0,0738	0,0443
50,0	3,888	3,827	3,752	3,679	0,4140	0,2190	0,1193	0,0767
60,0	3,888	3,828	3,752	3,679	0,4486	0,2199	0,0976	0,0349
70,0	3,888	3,828	3,752	3,679	0,5142	0,2451	0,0975	0,0214
80,0	3,888	3,828	3,752	3,679	0,5877	0,2814	0,1114	0,0195
90,0	3,888	3,828	3,753	3,680	0,6572	0,3130	0,1199	0,0136
100	3,888	3,828	3,753	3,680	0,7207	0,3361	0,1259	0,0029
200	3,888	3,828	3,753	3,680	2,002	1,221	0,7753	0,5153
300	3,888	3,828	3,753	3,680	2,890	1,722	1,060	0,6693
400	3,888	3,828	3,753	3,680	3,771	2,208	1,321	0,8028
500	3,888	3,828	3,753	3,680	4,740	2,790	1,700	1,049
600	3,888	3,828	3,753	3,680	5,639	3,317	2,002	1,219
700	3,888	3,828	3,753	3,681	6,513	3,830	2,298	1,397
800	3,888	3,828	3,753	3,681	7,383	4,289	2,515	1,454
900	3,887	3,828	3,753	3,680	8,234	4,771	2,784	1,616
1000	3,887	3,828	3,753	3,680	9,055	5,219	3,005	1,699
1100	3,887	3,828	3,753	3,680	9,814	5,641	3,254	1,854
1200	3,887	3,827	3,753	3,680	10,73	6,165	3,561	2,039
1300	3,887	3,828	3,753	3,680	11,16	6,475	3,635	2,000
1400	3,887	3,827	3,753	3,680	11,78	6,368	3,295	1,506
1500	3,886	3,827	3,752	3,680	12,46	6,741	3,562	1,525
1600	3,886	3,827	3,752	3,680	13,12	7,058	3,625	1,569
1700	3,886	3,827	3,752	3,680	13,98	7,601	3,955	1,721
1800	3,886	3,827	3,752	3,680	14,94	8,088	4,172	1,829
1900	3,886	3,826	3,752	3,680	15,55	8,352	4,248	1,759
2000	3,885	3,826	3,752	3,679	16,04	8,519	4,230	1,691

Priloga E: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube za vzorec nativnega olja žafranike.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,2176	3,1519	3,0517	2,9841	23,67	37,56	53,49	73,49
0,150	3,2147	3,1618	3,0911	3,0290	8,117	13,09	18,88	27,69
0,250	3,2208	3,1726	3,1057	3,0467	4,908	7,575	11,25	15,99
0,350	3,2228	3,1760	3,1150	3,0590	3,353	5,229	7,83	11,29
0,450	3,2254	3,1794	3,1204	3,0662	2,721	4,114	6,184	8,881
0,550	3,2250	3,1796	3,1222	3,0686	2,272	3,464	5,106	7,336
0,650	3,2247	3,1798	3,1235	3,0717	1,958	2,958	4,358	6,235
0,750	3,2247	3,1802	3,1247	3,0740	1,732	2,577	3,810	5,418
0,850	3,2251	3,1809	3,1261	3,0750	1,522	2,262	3,356	4,789
0,950	3,2253	3,1813	3,1271	3,0773	1,350	2,022	2,994	4,276
1,00	3,2245	3,1804	3,1259	3,0764	1,668	2,335	3,246	4,474
2,00	3,2252	3,1823	3,1309	3,0843	0,9776	1,279	1,726	2,329
3,00	3,2249	3,1827	3,1322	3,0866	0,6996	0,8918	1,184	1,586
4,00	3,2250	3,1831	3,1331	3,0880	0,5113	0,6314	0,8544	1,155
5,00	3,2248	3,1831	3,1335	3,0888	0,5028	0,5990	0,7539	0,9937
6,00	3,2250	3,1835	3,1342	3,0896	0,3610	0,4132	0,5394	0,7528
7,00	3,2249	3,1836	3,1345	3,0901	0,3290	0,3876	0,4897	0,6639
8,00	3,2249	3,1838	3,1348	3,0905	0,4065	0,4423	0,5067	0,6593
9,00	3,2250	3,1839	3,1351	3,0908	0,3799	0,3946	0,4427	0,5853
10,0	3,2250	3,1840	3,1353	3,0912	0,3813	0,3746	0,4253	0,5378
20,0	3,2250	3,1844	3,1364	3,0926	0,4026	0,3107	0,3099	0,3386
30,0	3,2251	3,1847	3,1369	3,0933	0,4725	0,3691	0,3129	0,3458
40,0	3,2250	3,1846	3,1370	3,0936	0,4554	0,2866	0,2100	0,1801
50,0	3,2250	3,1847	3,1372	3,0939	0,5721	0,3517	0,2406	0,1954
60,0	3,2252	3,1849	3,1375	3,0943	0,6479	0,3789	0,2421	0,1737
70,0	3,2252	3,1850	3,1376	3,0944	0,7364	0,4142	0,2478	0,1583
80,0	3,2251	3,1850	3,1376	3,0945	0,8353	0,4665	0,2665	0,1615
90,0	3,2252	3,1850	3,1377	3,0946	0,9289	0,5103	0,2856	0,1634
100	3,2253	3,1851	3,1378	3,0947	1,021	0,5506	0,2979	0,1612
200	3,2252	3,1852	3,1378	3,0947	2,438	1,480	0,9544	0,6450
300	3,2250	3,1852	3,1380	3,0951	3,558	2,114	1,322	0,8539
400	3,2249	3,1850	3,1379	3,0950	4,657	2,707	1,649	1,044
500	3,2252	3,1850	3,1380	3,0952	5,670	3,305	1,986	1,215
600	3,2249	3,1854	3,1384	3,0955	6,904	4,077	2,491	1,574
700	3,2248	3,1852	3,1383	3,0955	7,937	4,655	2,821	1,723
800	3,2246	3,1851	3,1382	3,0954	8,899	5,174	3,085	1,853
900	3,2244	3,1851	3,1383	3,0955	10,15	5,993	3,657	2,282
1000	3,2241	3,1849	3,1381	3,0954	11,13	6,511	3,908	2,379
1100	3,2239	3,1846	3,1379	3,0953	12,08	7,011	4,175	2,494
1200	3,2237	3,1846	3,1379	3,0952	13,09	7,588	4,500	2,661
1300	3,2235	3,1845	3,1380	3,0953	14,01	8,083	4,735	2,734
1400	3,2232	3,1843	3,1377	3,0952	14,99	8,643	5,090	2,947
1500	3,2227	3,1839	3,1375	3,0950	15,98	9,229	5,379	3,129
1600	3,2226	3,1840	3,1375	3,0950	16,70	9,545	5,442	3,291
1700	3,2222	3,1837	3,1373	3,0948	17,43	9,791	5,478	3,029
1800	3,2222	3,1839	3,1376	3,0952	18,10	10,05	5,465	2,773
1900	3,2215	3,1834	3,1372	3,0948	19,11	10,67	5,879	3,045
2000	3,2210	3,1831	3,1370	3,0946	20,15	11,40	6,401	3,471

Priloga F: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec kontrolirano staranega olja žafranike.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,8805	3,7825	3,6452	3,5383	26,99	44,14	70,31	104,3
0,150	3,8781	3,7986	3,6904	3,5941	9,426	15,40	24,54	38,25
0,250	3,8843	3,8102	3,7082	3,6139	5,537	9,256	14,75	22,10
0,350	3,8873	3,8147	3,7197	3,6289	3,922	6,613	10,44	15,64
0,450	3,8899	3,8182	3,7259	3,6375	3,175	5,235	8,179	12,35
0,550	3,8894	3,8186	3,7282	3,6401	2,710	4,365	6,726	10,16
0,650	3,8889	3,8187	3,7294	3,6435	2,369	3,727	5,790	8,675
0,750	3,8890	3,8192	3,7309	3,6465	2,124	3,253	5,008	7,563
0,850	3,8894	3,8200	3,7326	3,6475	1,878	2,922	4,428	6,644
0,950	3,8898	3,8206	3,7339	3,6506	1,704	2,605	3,971	6,008
1,00	3,8887	3,8194	3,7324	3,6492	2,102	2,985	4,264	6,173
2,00	3,8895	3,8217	3,7383	3,6585	1,390	1,715	2,317	3,232
3,00	3,8891	3,8220	3,7398	3,6612	1,184	1,286	1,640	2,231
4,00	3,8893	3,8226	3,7409	3,6630	1,053	1,032	1,235	1,665
5,00	3,8890	3,8227	3,7414	3,6638	1,189	1,042	1,139	1,437
6,00	3,8892	3,8231	3,7421	3,6647	1,128	0,8740	0,9145	1,130
7,00	3,8893	3,8233	3,7426	3,6654	1,230	0,8888	0,8605	1,050
8,00	3,8892	3,8234	3,7429	3,6659	1,411	0,9994	0,9142	1,040
9,00	3,8893	3,8236	3,7433	3,6662	1,509	0,9909	0,8713	0,9535
10,0	3,8893	3,8237	3,7435	3,6667	1,632	1,041	0,8635	0,9720
20,0	3,8893	3,8237	3,7435	3,6666	2,823	1,543	0,9806	0,8675
30,0	3,8893	3,8242	3,7448	3,6684	4,180	2,203	1,327	1,011
40,0	3,8892	3,8245	3,7454	3,6693	5,281	2,687	1,485	1,017
50,0	3,8889	3,8244	3,7456	3,6696	6,546	3,345	1,837	1,197
60,0	3,8888	3,8245	3,7458	3,6699	7,729	3,936	2,126	1,339
70,0	3,8887	3,8246	3,7461	3,6704	8,907	4,546	2,442	1,505
80,0	3,8884	3,8246	3,7463	3,6705	10,07	5,159	2,767	1,677
90,0	3,8880	3,8244	3,7461	3,6705	11,19	5,762	3,089	1,847
100	3,8880	3,8246	3,7464	3,6708	12,29	6,352	5,082	2,548
200	3,8877	3,8245	3,7464	3,6709	22,76	12,509	10,54	5,060
300	3,8877	3,8245	3,7465	3,6707	31,29	17,713	15,19	6,988
400	3,8838	3,8230	3,7460	3,6709	38,82	22,411	19,47	8,798
500	3,8798	3,8213	3,7455	3,6707	45,70	26,839	23,68	10,59
600	3,8757	3,8193	3,7445	3,6703	52,03	30,935	27,60	12,25
700	3,8719	3,8177	3,7440	3,6701	57,78	34,718	31,28	13,81
800	3,8679	3,8156	3,7429	3,6697	63,27	38,341	34,75	15,26
900	3,8641	3,8137	3,7420	3,6692	68,39	41,780	38,13	16,71
1000	3,8603	3,8117	3,7410	3,6688	73,18	45,014	41,27	18,08
1100	3,8564	3,8096	3,7398	3,6680	77,61	48,090	44,38	19,47
1200	3,8525	3,8075	3,7386	3,6674	82,02	51,170	47,50	20,79
1300	3,8488	3,8055	3,7375	3,6666	85,97	53,862	50,10	21,76
1400	3,8451	3,8035	3,7364	3,6663	89,44	56,19	52,14	22,58
1500	3,8417	3,8017	3,7355	3,6656	93,03	58,82	54,78	23,78
1600	3,8379	3,7995	3,7342	3,6649	96,48	61,27	57,28	24,88
1700	3,8340	3,7972	3,7328	3,6641	99,92	63,88	60,02	26,07
1800	3,8305	3,7954	3,7318	3,6635	103,4	66,41	62,56	27,18
1900	3,8270	3,7933	3,7306	3,6628	106,2	68,55	64,72	28,08
2000	3,8239	3,7917	3,7298	3,6624	109,0	70,48	66,73	28,29

Priloga G: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 2b.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	2,6944	2,6371	2,5574	2,4971	20,02	34,95	53,45	83,85
0,150	2,6938	2,6458	2,5878	2,5379	6,293	13,49	19,74	25,89
0,250	2,6962	2,6537	2,5999	2,5519	4,101	6,704	11,12	16,25
0,350	2,6982	2,6567	2,6079	2,5626	2,614	4,696	7,655	11,59
0,450	2,7000	2,6592	2,6122	2,5683	2,165	3,764	6,028	9,066
0,550	2,7001	2,6607	2,6142	2,5708	1,846	3,115	5,012	7,509
0,650	2,6996	2,6607	2,6151	2,5732	1,622	2,738	4,258	6,452
0,750	2,6999	2,6612	2,6163	2,5754	1,409	2,364	3,713	5,583
0,850	2,7001	2,6617	2,6173	2,5761	1,245	2,104	3,276	4,897
0,950	2,7003	2,6622	2,6183	2,5780	1,072	1,831	2,925	4,358
1,00	2,6997	2,6613	2,6173	2,5774	1,405	2,119	3,105	4,489
2,00	2,7002	2,6629	2,6215	2,5839	0,8119	1,138	1,644	2,316
3,00	2,7001	2,6632	2,6225	2,5859	0,5704	0,7849	1,112	1,578
4,00	2,7001	2,6636	2,6234	2,5871	0,3513	0,5166	0,7700	1,100
5,00	2,6999	2,6636	2,6237	2,5877	0,3959	0,4934	0,6888	0,9644
6,00	2,7001	2,6639	2,6242	2,5884	0,2229	0,2852	0,4566	0,6837
7,00	2,7002	2,6641	2,6246	2,5889	0,2122	0,2730	0,4054	0,5886
8,00	2,7001	2,6642	2,6248	2,5892	0,2703	0,3182	0,4285	0,5913
9,00	2,7002	2,6643	2,6250	2,5895	0,2450	0,2534	0,3617	0,5136
10,0	2,7002	2,6644	2,6252	2,5898	0,2496	0,2686	0,3607	0,4769
20,0	2,7003	2,6648	2,6262	2,5911	0,2311	0,1863	0,2088	0,2577
30,0	2,7003	2,6649	2,6265	2,5917	0,3389	0,2607	0,2262	0,2355
40,0	2,7001	2,6649	2,6266	2,5918	0,2198	0,1144	0,0652	0,0585
50,0	2,7003	2,6651	2,6269	2,5922	0,3093	0,1678	0,1027	0,0738
60,0	2,7005	2,6654	2,6272	2,5926	0,3747	0,2017	0,1090	0,0704
70,0	2,7005	2,6653	2,6273	2,5926	0,3652	0,1685	0,0603	0,0065
80,0	2,7003	2,6652	2,6271	2,5925	0,4216	0,1905	0,0629	0,0065
90,0	2,7006	2,6655	2,6274	2,5929	0,4710	0,2105	0,0632	-0,0063
100	2,7005	2,6654	2,6274	2,5929	0,5119	0,2244	0,0609	-0,0252
200	2,7004	2,6655	2,6276	2,5931	1,519	0,9458	0,6100	0,4167
300	2,7004	2,6655	2,6276	2,5933	2,129	1,258	0,7702	0,4775
400	2,7002	2,6654	2,6276	2,5932	2,764	1,606	0,9633	0,5813
500	2,7003	2,6657	2,6279	2,5935	3,297	1,888	1,083	0,6280
600	2,7004	2,6657	2,6278	2,5935	3,819	2,135	1,174	0,5974
700	2,7003	2,6657	2,6279	2,5936	4,690	2,716	1,610	0,9186
800	2,7002	2,6647	2,6279	2,5936	5,235	3,005	1,754	1,009
900	2,7001	2,6646	2,6277	2,5934	5,930	3,433	2,001	1,138
1000	2,6999	2,6645	2,6277	2,5935	6,313	3,566	1,974	1,030
1100	2,6998	2,6644	2,6276	2,5934	6,873	3,857	2,126	1,122
1200	2,6997	2,6645	2,6277	2,5935	7,492	4,198	2,285	1,187
1300	2,6998	2,6646	2,6277	2,5935	7,763	4,207	2,153	0,9613
1400	2,6997	2,6646	2,6277	2,5935	8,308	4,540	2,329	1,055
1500	2,6994	2,6644	2,6276	2,5934	8,855	4,858	2,513	1,175
1600	2,6993	2,6645	2,6276	2,5934	9,233	4,973	2,467	1,024
1700	2,6991	2,6643	2,6274	2,5932	9,831	5,292	2,566	1,052
1800	2,6991	2,6645	2,6275	2,5934	10,47	5,715	2,913	1,285
1900	2,6991	2,6645	2,6276	2,5932	10,22	5,199	2,273	1,247
2000	2,6987	2,6642	2,6273	2,5932	10,91	5,553	2,414	0,6907

Priloga H: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 2c.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	2,8677	2,8165	2,7411	2,6856	23,22	41,71	62,27	97,56
0,150	2,8621	2,8293	2,7760	2,7277	7,764	12,96	21,04	33,59
0,250	2,8668	2,8384	2,7888	2,7429	4,697	7,909	12,61	19,22
0,350	2,8686	2,8414	2,7973	2,7542	3,159	5,450	8,939	13,65
0,450	2,8707	2,8442	2,8021	2,7604	2,533	4,342	6,956	10,714
0,550	2,8705	2,8447	2,8040	2,7628	2,147	3,617	5,803	8,827
0,650	2,8701	2,8447	2,8050	2,7653	1,810	3,074	4,914	7,523
0,750	2,8702	2,8452	2,8061	2,7677	1,589	2,686	4,291	6,515
0,850	2,8705	2,8457	2,8073	2,7684	1,403	2,355	3,772	5,771
0,950	2,8708	2,8463	2,8084	2,7706	1,219	2,090	3,368	5,120
1,00	2,8701	2,8454	2,8073	2,7699	1,445	2,265	3,467	5,170
2,00	2,8706	2,8471	2,8117	2,7768	0,7882	1,191	1,793	2,646
3,00	2,8705	2,8474	2,8129	2,7790	0,5407	0,8066	1,206	1,779
4,00	2,8705	2,8478	2,8138	2,7802	0,3658	0,5532	0,8502	1,277
5,00	2,8703	2,8479	2,8141	2,7810	0,3704	0,4997	0,7354	1,0692
6,00	2,8705	2,8482	2,8147	2,7817	0,2352	0,3364	0,5323	0,8089
7,00	2,8705	2,8484	2,8151	2,7822	0,2118	0,2953	0,4566	0,6898
8,00	2,8705	2,8484	2,8153	2,7825	0,2596	0,3097	0,4655	0,6672
9,00	2,8706	2,8486	2,8156	2,7828	0,2336	0,2701	0,4012	0,5796
10,0	2,8706	2,8487	2,8158	2,7831	0,2460	0,2612	0,3761	0,5308
20,0	2,8707	2,8491	2,8168	2,7845	0,2465	0,2073	0,2378	0,3014
30,0	2,8707	2,8493	2,8172	2,7851	0,3088	0,2394	0,2677	0,2847
40,0	2,8706	2,8493	2,8174	2,7854	0,2802	0,1634	0,1159	0,1139
50,0	2,8706	2,8493	2,8175	2,7856	0,3686	0,2166	0,1444	0,1181
60,0	2,8708	2,8496	2,8178	2,7860	0,4102	0,2231	0,1327	0,0940
70,0	2,8708	2,8497	2,8180	2,7862	0,4590	0,2412	0,1266	0,0743
80,0	2,8707	2,8496	2,8179	2,7861	0,5223	0,2707	0,1369	0,0704
90,0	2,8709	2,8498	2,8181	2,7865	0,5803	0,2975	0,1443	0,0662
100	2,8708	2,8497	2,8181	2,7864	0,6311	0,3172	0,1473	0,0577
200	2,8708	2,8498	2,8183	2,7867	1,606	0,9716	0,6237	0,4247
300	2,8706	2,8497	2,8183	2,7868	2,286	1,344	0,8256	0,5396
400	2,8705	2,8497	2,8183	2,7868	2,977	1,719	1,0293	0,6341
500	2,8707	2,8499	2,8186	2,7871	3,616	2,055	1,184	0,6881
600	2,8706	2,8499	2,8186	2,7871	4,395	2,542	1,501	0,8977
700	2,8705	2,8498	2,8185	2,7872	5,058	2,892	1,682	0,9993
800	2,8705	2,8498	2,8185	2,7871	5,693	3,236	1,863	1,083
900	2,8702	2,8496	2,8184	2,7870	6,506	3,738	2,181	1,284
1000	2,8700	2,8495	2,8183	2,7869	7,020	3,954	2,246	1,262
1100	2,8699	2,8494	2,8183	2,7869	7,652	4,303	2,436	1,350
1200	2,8698	2,8494	2,8183	2,7869	8,331	4,692	2,657	1,482
1300	2,8697	2,8495	2,8184	2,7871	8,810	4,882	2,687	1,407
1400	2,8696	2,8494	2,8183	2,7870	9,464	5,250	2,880	1,499
1500	2,8692	2,8491	2,8181	2,7868	10,05	5,566	3,039	1,570
1600	2,8688	2,8488	2,8179	2,7867	10,56	5,777	3,095	1,521
1700	2,8686	2,8486	2,8177	2,7865	11,20	6,177	3,312	1,662
1800	2,8688	2,8490	2,8182	2,7870	11,14	5,804	2,828	1,075
1900	2,8685	2,8489	2,8181	2,7869	11,87	6,282	3,126	1,234
2000	2,8680	2,8485	2,8177	2,7866	12,70	6,854	3,484	1,524

Priloga I: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 2d.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	2,9814	2,9065	2,8088	2,7370	31,16	56,55	86,58	133,22
0,150	2,9786	2,9177	2,8464	2,7822	13,57	19,38	30,53	47,44
0,250	2,9826	2,9273	2,8591	2,7969	7,118	11,715	18,64	27,89
0,350	2,9848	2,9302	2,8675	2,8082	4,940	8,211	13,103	19,90
0,450	2,9870	2,9332	2,8724	2,8147	3,891	6,480	10,322	15,585
0,550	2,9867	2,9337	2,8743	2,8171	3,220	5,344	8,492	12,832
0,650	2,9864	2,9337	2,8754	2,8198	2,731	4,508	7,205	10,897
0,750	2,9864	2,9341	2,8766	2,8221	2,394	3,944	6,260	9,462
0,850	2,9868	2,9347	2,8779	2,8229	2,102	3,486	5,534	8,336
0,950	2,9870	2,9352	2,8789	2,8251	1,857	3,081	4,924	7,448
1,00	2,9862	2,9344	2,8778	2,8243	2,037	3,216	4,970	7,352
2,00	2,9868	2,9360	2,8823	2,8315	1,094	1,667	2,534	3,746
3,00	2,9867	2,9365	2,8835	2,8337	0,7692	1,139	1,713	2,511
4,00	2,9867	2,9368	2,8844	2,8349	0,5345	0,8015	1,234	1,825
5,00	2,9865	2,9369	2,8848	2,8357	0,5142	0,7069	1,038	1,522
6,00	2,9867	2,9372	2,8854	2,8364	0,3680	0,5132	0,7893	1,191
7,00	2,9867	2,9374	2,8857	2,8369	0,3446	0,4511	0,6841	1,021
8,00	2,9867	2,9375	2,8860	2,8372	0,3841	0,4670	0,6636	0,9565
9,00	2,9868	2,9376	2,8863	2,8376	0,3651	0,4346	0,5902	0,8470
10,0	2,9868	2,9377	2,8865	2,8379	0,3572	0,4000	0,5382	0,7731
20,0	2,9868	2,9381	2,8875	2,8393	0,3683	0,3238	0,3525	0,4281
30,0	2,9869	2,9384	2,8880	2,8400	0,4746	0,3945	0,3407	0,3417
40,0	2,9867	2,9383	2,8881	2,8402	0,4558	0,2895	0,2206	0,2153
50,0	2,9868	2,9383	2,8883	2,8405	0,5762	0,3603	0,2535	0,2203
60,0	2,9870	2,9386	2,8886	2,8408	0,6509	0,3840	0,2515	0,1948
70,0	2,9869	2,9386	2,8886	2,8410	0,7319	0,4190	0,2585	0,1786
80,0	2,9869	2,9386	2,8886	2,8410	0,8211	0,4654	0,2823	0,1828
90,0	2,9870	2,9388	2,8888	2,8412	0,9108	0,5127	0,3007	0,1861
100	2,9870	2,9387	2,8888	2,8412	0,9923	0,5516	0,3121	0,1840
200	2,9869	2,9388	2,8890	2,8416	2,279	1,398	0,9130	0,6337
300	2,9867	2,9387	2,8890	2,8416	3,270	1,951	1,231	0,8095
400	2,9865	2,9386	2,8890	2,8416	4,248	2,497	1,573	0,9900
500	2,9868	2,9389	2,8893	2,8419	5,194	3,016	1,826	1,132
600	2,9866	2,9388	2,8892	2,8419	6,310	3,683	2,259	1,428
700	2,9865	2,9387	2,8892	2,8419	7,255	4,204	2,534	1,585
800	2,9863	2,9387	2,8892	2,8419	8,145	4,695	2,805	1,724
900	2,9860	2,9384	2,8890	2,8418	9,330	5,436	3,288	2,054
1000	2,9858	2,9383	2,8889	2,8417	10,17	5,841	3,474	2,083
1100	2,9857	2,9383	2,8889	2,8417	11,05	6,355	3,752	2,238
1200	2,9854	2,9381	2,8889	2,8417	11,98	6,891	4,076	2,435
1300	2,9852	2,9381	2,8889	2,8418	12,77	7,275	4,222	2,4524
1400	2,9850	2,9380	2,8889	2,8417	13,78	7,854	4,552	2,624
1500	2,9846	2,9377	2,8885	2,8415	14,58	8,327	4,805	2,753
1600	2,9842	2,9375	2,8884	2,8413	15,50	8,770	5,015	2,797
1700	2,9838	2,9373	2,8883	2,8412	15,86	9,311	5,332	2,983
1800	2,9839	2,9376	2,8886	2,8416	16,43	9,097	4,947	2,441
1900	2,9834	2,9373	2,8885	2,8416	17,45	9,706	5,325	2,753
2000	2,9828	2,9369	2,8881	2,8413	18,62	10,46	5,806	3,113

Priloga J: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3a.

f (kHz)	ε'				$\varepsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,7101	3,6246	3,5038	3,4096	40,117	60,288	82,81	125,9
0,150	3,7107	3,6436	3,5484	3,4626	14,76	21,29	29,70	41,95
0,250	3,7153	3,6551	3,5658	3,4838	8,419	12,689	17,83	25,42
0,350	3,7183	3,6593	3,5767	3,4978	6,053	8,951	12,90	18,23
0,450	3,7209	3,6629	3,5828	3,5060	4,806	7,053	10,05	14,28
0,550	3,7204	3,6633	3,5850	3,5088	3,979	5,803	8,275	11,72
0,650	3,7198	3,6632	3,5862	3,5120	3,359	4,949	7,016	9,964
0,750	3,7201	3,6639	3,5877	3,5150	2,939	4,297	6,073	8,661
0,850	3,7204	3,6646	3,5892	3,5159	2,597	3,792	5,377	7,643
0,950	3,7208	3,6653	3,5906	3,5187	2,307	3,350	4,793	6,796
1,00	3,7198	3,6641	3,5891	3,5176	2,673	3,663	5,037	6,940
2,00	3,7206	3,6662	3,5948	3,5265	1,405	1,894	2,578	3,529
3,00	3,7202	3,6666	3,5962	3,5292	0,9705	1,291	1,736	2,375
4,00	3,7204	3,6672	3,5973	3,5308	0,6822	0,9056	1,253	1,703
5,00	3,7202	3,6673	3,5978	3,5317	0,6234	0,8067	1,074	1,437
6,00	3,7203	3,6677	3,5985	3,5326	0,4271	0,5560	0,7807	1,078
7,00	3,7204	3,6679	3,5990	3,5332	0,3908	0,4920	0,6786	0,9199
8,00	3,7204	3,6680	3,5993	3,5337	0,4308	0,5146	0,6876	0,9032
9,00	3,7205	3,6682	3,5996	3,5341	0,3905	0,4479	0,5983	0,7710
10,0	3,7205	3,6683	3,5999	3,5344	0,3779	0,4313	0,5665	0,7149
20,0	3,7205	3,6688	3,6011	3,5362	0,3239	0,3262	0,3362	0,4039
30,0	3,7206	3,6691	3,6018	3,5370	0,4339	0,3283	0,3076	0,3351
40,0	3,7205	3,6691	3,6020	3,5374	0,3715	0,2269	0,1659	0,1571
50,0	3,7206	3,6692	3,6022	3,5378	0,4876	0,2930	0,1965	0,1647
60,0	3,7208	3,6694	3,6024	3,5380	0,5305	0,2945	0,1744	0,1196
70,0	3,7208	3,6696	3,6027	3,5384	0,5957	0,3204	0,1699	0,1001
80,0	3,7206	3,6694	3,6025	3,5382	0,6758	0,3520	0,1834	0,0915
90,0	3,7209	3,6697	3,6028	3,5386	0,7499	0,3858	0,1871	0,0828
100	3,7208	3,6696	3,6029	3,5386	0,8181	0,4141	0,1897	0,0715
200	3,7207	3,6696	3,6030	3,5389	2,114	1,298	0,8293	0,5630
300	3,7207	3,6697	3,6031	3,5392	3,048	1,826	1,128	0,7069
400	3,7205	3,6696	3,6031	3,5391	3,952	2,321	1,394	0,8463
500	3,7208	3,6699	3,6034	3,5394	4,985	2,958	1,821	1,098
600	3,7206	3,6697	3,6033	3,5394	5,937	3,494	2,102	1,284
700	3,7207	3,6698	3,6034	3,5395	6,880	4,025	2,390	1,452
800	3,7207	3,6698	3,6034	3,5396	7,743	4,450	2,585	1,459
900	3,7204	3,6696	3,6032	3,5394	8,680	4,985	2,899	1,643
1000	3,7201	3,6694	3,6032	3,5393	9,521	5,461	3,145	1,763
1100	3,7200	3,6693	3,6030	3,5392	10,44	5,978	3,434	1,914
1200	3,7200	3,6693	3,6029	3,5391	11,41	6,528	3,742	2,049
1300	3,7200	3,6694	3,6032	3,5393	12,12	6,860	3,885	2,088
1400	3,7197	3,6691	3,6030	3,5392	12,40	6,707	3,455	2,172
1500	3,7193	3,6689	3,6027	3,5389	13,22	7,190	3,815	1,703
1600	3,7192	3,6688	3,6026	3,5389	14,02	7,598	3,984	1,844
1700	3,7190	3,6687	3,6026	3,5388	15,00	8,099	4,238	1,926
1800	3,7191	3,6688	3,6027	3,5390	15,82	8,591	4,401	1,952
1900	3,7186	3,6683	3,6022	3,5385	16,53	8,855	4,500	1,898
2000	3,7182	3,6680	3,6020	3,5384	17,11	9,167	4,569	1,897

Priloga K: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3b.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,5761	3,5014	3,3737	3,2886	53,95	78,42	117,8	161,7
0,150	3,5755	3,5107	3,4199	3,3388	17,34	27,06	40,28	56,18
0,250	3,5816	3,5217	3,4364	3,3576	10,64	16,08	23,69	33,70
0,350	3,5841	3,5254	3,4466	3,3712	7,450	11,33	16,88	23,99
0,450	3,5868	3,5291	3,4526	3,3791	5,848	8,913	13,22	18,78
0,550	3,5864	3,5295	3,4547	3,3818	4,844	7,343	10,871	15,46
0,650	3,5858	3,5295	3,4559	3,3850	4,098	6,255	9,213	13,08
0,750	3,5861	3,5301	3,4573	3,3878	3,573	5,418	8,008	11,36
0,850	3,5862	3,5306	3,4588	3,3887	3,151	4,780	7,066	10,02
0,950	3,5866	3,5313	3,4601	3,3913	2,802	4,249	6,290	8,932
1,00	3,5857	3,5303	3,4587	3,3903	3,067	4,469	6,424	8,930
2,00	3,5864	3,5323	3,4642	3,3989	1,617	2,304	3,269	4,544
3,00	3,5861	3,5327	3,4656	3,4015	1,112	1,554	2,200	3,045
4,00	3,5862	3,5332	3,4666	3,4030	0,7674	1,104	1,577	2,213
5,00	3,5861	3,5333	3,4671	3,4039	0,7200	0,9655	1,340	1,839
6,00	3,5862	3,5337	3,4678	3,4048	0,5063	0,7039	1,010	1,430
7,00	3,5863	3,5339	3,4682	3,4054	0,4612	0,6134	0,8698	1,226
8,00	3,5863	3,5340	3,4686	3,4058	0,5025	0,6267	0,8457	1,154
9,00	3,5863	3,5342	3,4689	3,4062	0,4554	0,5461	0,7319	1,015
10,0	3,5864	3,5343	3,4691	3,4065	0,4399	0,5197	0,6705	0,9254
20,0	3,5864	3,5348	3,4703	3,4082	0,3858	0,3565	0,3986	0,4963
30,0	3,5865	3,5351	3,4709	3,4091	0,4867	0,3806	0,3940	0,4088
40,0	3,5864	3,5351	3,4712	3,4094	0,4434	0,2843	0,2238	0,2235
50,0	3,5865	3,5352	3,4713	3,4097	0,5633	0,3509	0,2550	0,2258
60,0	3,5865	3,5353	3,4716	3,4100	0,6214	0,3574	0,2304	0,1771
70,0	3,5868	3,5356	3,4719	3,4103	0,7007	0,3875	0,2282	0,1548
80,0	3,5864	3,5353	3,4717	3,4102	0,7889	0,4310	0,2431	0,1476
90,0	3,5867	3,5356	3,4720	3,4105	0,8707	0,4668	0,2536	0,1426
100	3,5867	3,5356	3,4720	3,4106	0,9518	0,5017	0,2587	0,1289
200	3,5865	3,5356	3,4721	3,4109	2,322	1,415	0,9123	0,6270
300	3,5865	3,5356	3,4722	3,4110	3,330	1,981	1,230	0,7944
400	3,5863	3,5354	3,4721	3,4110	4,336	2,529	1,520	0,9444
500	3,5865	3,5357	3,4725	3,4113	5,448	3,208	1,957	1,226
600	3,5863	3,5356	3,4724	3,4114	6,489	3,784	2,282	1,421
700	3,5864	3,5357	3,4725	3,4114	7,526	4,362	2,604	1,609
800	3,5863	3,5357	3,4725	3,4114	8,385	4,761	2,755	1,590
900	3,5860	3,5354	3,4723	3,4112	9,424	5,360	3,136	1,852
1000	3,5858	3,5353	3,4722	3,4112	10,38	5,914	3,451	2,018
1100	3,5856	3,5352	3,4721	3,4111	11,38	6,438	3,716	2,135
1200	3,5854	3,5350	3,4720	3,4110	12,38	6,966	3,977	2,241
1300	3,5855	3,5352	3,4721	3,4111	13,23	7,420	4,193	2,341
1400	3,5853	3,5350	3,4720	3,4111	13,48	7,933	4,441	2,434
1500	3,5848	3,5347	3,4718	3,4109	14,65	7,913	4,183	2,143
1600	3,5847	3,5346	3,4717	3,4108	15,49	8,449	4,540	2,337
1700	3,5845	3,5344	3,4716	3,4107	16,45	8,908	4,732	2,331
1800	3,5845	3,5346	3,4717	3,4109	17,37	9,309	4,772	2,208
1900	3,5838	3,5340	3,4712	3,4104	18,14	9,667	5,017	2,319
2000	3,5834	3,5337	3,4711	3,4103	18,89	10,07	5,190	2,447

Priloga L: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3c.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,4268	3,3527	3,2389	3,1542	50,66	81,34	122,2	175,3
0,150	3,4254	3,3662	3,2813	3,2064	17,27	27,33	42,49	59,54
0,250	3,4303	3,3763	3,2971	3,2247	10,64	16,83	24,95	35,90
0,350	3,4325	3,3799	3,3071	3,2377	7,504	11,79	17,76	25,64
0,450	3,4352	3,3835	3,3128	3,2453	5,887	9,281	13,88	20,01
0,550	3,4348	3,3837	3,3148	3,2478	4,897	7,645	11,458	16,48
0,650	3,4343	3,3838	3,3161	3,2510	4,120	6,467	9,700	13,94
0,750	3,4345	3,3843	3,3174	3,2536	3,575	5,631	8,422	12,12
0,850	3,4348	3,3849	3,3189	3,2546	3,168	4,963	7,430	10,70
0,950	3,4351	3,3856	3,3201	3,2571	2,826	4,431	6,624	9,539
1,00	3,4343	3,3845	3,3188	3,2562	3,071	4,596	6,696	9,473
2,00	3,4349	3,3865	3,3240	3,2644	1,608	2,361	3,408	4,817
3,00	3,4347	3,3869	3,3254	3,2669	1,109	1,597	2,293	3,219
4,00	3,4348	3,3874	3,3263	3,2683	0,7927	1,135	1,649	2,347
5,00	3,4346	3,3874	3,3268	3,2692	0,7227	0,9850	1,397	1,953
6,00	3,4348	3,3879	3,3275	3,2700	0,5219	0,7357	1,071	1,528
7,00	3,4348	3,3880	3,3279	3,2706	0,4670	0,6336	0,9068	1,310
8,00	3,4348	3,3882	3,3282	3,2710	0,5190	0,6443	0,8884	1,222
9,00	3,4349	3,3883	3,3285	3,2714	0,4775	0,5672	0,7716	1,067
10,0	3,4349	3,3884	3,3287	3,2717	0,4593	0,5318	0,7110	0,9707
20,0	3,4349	3,3889	3,3299	3,2733	0,4417	0,3921	0,4361	0,5381
30,0	3,4350	3,3891	3,3305	3,2742	0,5533	0,4173	0,4064	0,4366
40,0	3,4349	3,3892	3,3307	3,2745	0,5103	0,3333	0,2606	0,2558
50,0	3,4349	3,3893	3,3309	3,2748	0,6433	0,4108	0,2904	0,2484
60,0	3,4350	3,3895	3,3312	3,2752	0,7114	0,4244	0,2753	0,2147
70,0	3,4352	3,3896	3,3313	3,2753	0,7955	0,4610	0,2811	0,1939
80,0	3,4349	3,3894	3,3312	3,2753	0,8952	0,5084	0,2976	0,1935
90,0	3,4351	3,3896	3,3314	3,2755	0,9903	0,5542	0,3138	0,1876
100	3,4351	3,3897	3,3315	3,2756	1,075	0,5901	0,3220	0,1796
200	3,4350	3,3896	3,3316	3,2760	2,513	1,537	0,9965	0,6772
300	3,4349	3,3896	3,3317	3,2760	3,609	2,155	1,338	0,8631
400	3,4346	3,3894	3,3315	3,2760	4,690	2,742	1,656	1,025
500	3,4349	3,3897	3,3319	3,2765	5,902	3,466	2,053	1,178
600	3,4348	3,3897	3,3319	3,2764	7,025	4,097	2,472	1,527
700	3,4348	3,3897	3,3319	3,2763	8,133	4,728	2,827	1,704
800	3,4347	3,3896	3,3318	3,2764	9,050	5,153	2,990	1,737
900	3,4344	3,3894	3,3317	3,2762	10,23	5,872	3,464	2,079
1000	3,4342	3,3893	3,3317	3,2762	11,31	6,481	3,790	2,224
1100	3,4339	3,3891	3,3315	3,2761	12,33	7,021	4,056	2,316
1200	3,4337	3,3890	3,3315	3,2761	13,35	7,566	4,344	2,450
1300	3,4336	3,3890	3,3314	3,2760	14,35	8,102	4,586	2,529
1400	3,4334	3,3890	3,3315	3,2761	15,35	8,641	4,841	2,632
1500	3,4330	3,3887	3,3312	3,2758	15,95	8,884	4,949	2,834
1600	3,4328	3,3886	3,3312	3,2758	17,04	9,472	5,183	2,665
1700	3,4324	3,3883	3,3310	3,2757	17,95	9,906	5,301	2,674
1800	3,4325	3,3885	3,3312	3,2759	18,78	10,19	5,292	2,450
1900	3,4317	3,3879	3,3307	3,2754	19,67	10,71	5,643	2,699
2000	3,4314	3,3877	3,3306	3,2753	20,66	11,29	5,971	2,882

Priloga M: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 3d.

f (kHz)	ε'				$\varepsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,2767	3,2115	3,1112	3,0325	48,48	75,14	113,3	165,4
0,150	3,2749	3,2251	3,1490	3,0803	15,65	26,32	38,71	56,34
0,250	3,2798	3,2340	3,1637	3,0986	9,49	15,03	23,11	33,85
0,350	3,2820	3,2374	3,1732	3,1112	6,612	10,68	16,40	24,16
0,450	3,2846	3,2409	3,1788	3,1185	5,265	8,397	12,83	18,93
0,550	3,2840	3,2411	3,1807	3,1209	4,372	6,961	10,585	15,50
0,650	3,2838	3,2413	3,1820	3,1241	3,708	5,879	8,965	13,16
0,750	3,2839	3,2417	3,1832	3,1265	3,199	5,093	7,794	11,43
0,850	3,2842	3,2424	3,1847	3,1274	2,823	4,503	6,862	10,08
0,950	3,2845	3,2429	3,1858	3,1298	2,503	4,005	6,139	9,025
1,00	3,2836	3,2419	3,1845	3,1289	2,787	4,223	6,242	8,981
2,00	3,2843	3,2439	3,1896	3,1368	1,490	2,194	3,193	4,566
3,00	3,2841	3,2443	3,1909	3,1393	1,028	1,480	2,148	3,062
4,00	3,2841	3,2447	3,1918	3,1407	0,7207	1,060	1,544	2,232
5,00	3,2840	3,2448	3,1923	3,1415	0,6855	0,9340	1,312	1,861
6,00	3,2842	3,2452	3,1929	3,1423	0,4995	0,6846	1,018	1,453
7,00	3,2842	3,2453	3,1933	3,1428	0,4520	0,5902	0,8614	1,240
8,00	3,2842	3,2454	3,1936	3,1432	0,5088	0,6148	0,8430	1,165
9,00	3,2842	3,2456	3,1939	3,1436	0,4685	0,5403	0,7399	1,029
10,0	3,2843	3,2457	3,1941	3,1439	0,4574	0,5157	0,6868	0,9485
20,0	3,2843	3,2461	3,1953	3,1455	0,4655	0,4059	0,4324	0,5173
30,0	3,2844	3,2464	3,1958	3,1463	0,5992	0,4700	0,4142	0,4229
40,0	3,2842	3,2464	3,1960	3,1465	0,5805	0,3715	0,2814	0,2688
50,0	3,2842	3,2465	3,1961	3,1468	0,7111	0,4451	0,3133	0,2654
60,0	3,2845	3,2467	3,1964	3,1472	0,8039	0,4820	0,3179	0,2406
70,0	3,2845	3,2468	3,1966	3,1473	0,9033	0,5261	0,3268	0,2284
80,0	3,2843	3,2467	3,1965	3,1474	1,011	0,5831	0,3506	0,2297
90,0	3,2844	3,2468	3,1966	3,1475	1,112	0,6330	0,3727	0,2290
100	3,2845	3,2468	3,1968	3,1477	1,211	0,6803	0,3887	0,2256
200	3,2843	3,2468	3,1969	3,1480	2,719	1,664	1,080	0,7366
300	3,2841	3,2468	3,1968	3,1480	3,934	2,332	1,472	0,9546
400	3,2840	3,2467	3,1969	3,1480	5,095	2,970	1,804	1,122
500	3,2843	3,2471	3,1973	3,1485	6,272	3,603	2,149	1,302
600	3,2840	3,2469	3,1971	3,1484	7,644	4,450	2,700	1,671
700	3,2839	3,2468	3,1971	3,1483	8,814	5,090	3,032	1,832
800	3,2838	3,2467	3,1971	3,1484	9,880	5,639	3,316	1,955
900	3,2835	3,2466	3,1970	3,1482	11,23	6,490	3,900	2,378
1000	3,2832	3,2464	3,1968	3,1481	12,37	7,098	4,200	2,490
1100	3,2830	3,2463	3,1967	3,1481	13,45	7,665	4,478	2,609
1200	3,2828	3,2462	3,1967	3,1481	14,59	8,298	4,827	2,787
1300	3,2825	3,2461	3,1968	3,1482	15,66	8,861	5,102	2,879
1400	3,2824	3,2460	3,1966	3,1480	16,74	9,442	5,434	3,079
1500	3,2818	3,2456	3,1962	3,1477	17,90	10,10	5,784	3,262
1600	3,2817	3,2457	3,1964	3,1479	18,67	10,40	5,812	3,149
1700	3,2812	3,2453	3,1962	3,1477	19,64	10,80	5,904	3,008
1800	3,2812	3,2455	3,1965	3,1480	20,39	11,13	5,957	2,868
1900	3,2804	3,2450	3,1960	3,1476	21,54	11,81	6,367	3,139
2000	3,2800	3,2447	3,1958	3,1474	22,63	12,51	6,827	3,479

Priloga N: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5, a.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,7238	3,6363	3,5022	3,4027	24,93	46,32	72,01	105,0
0,150	3,7246	3,6500	3,5482	3,4585	9,551	15,68	23,17	35,45
0,250	3,7303	3,6607	3,5653	3,4786	5,850	9,557	14,44	21,34
0,350	3,7331	3,6649	3,5761	3,4928	4,070	6,656	10,17	15,08
0,450	3,7356	3,6685	3,5822	3,5009	3,239	5,264	8,062	11,84
0,550	3,7353	3,6689	3,5844	3,5037	2,739	4,374	6,648	9,745
0,650	3,7346	3,6688	3,5856	3,5070	2,368	3,710	5,641	8,262
0,750	3,7348	3,6695	3,5872	3,5099	2,070	3,280	4,921	7,210
0,850	3,7352	3,6702	3,5887	3,5108	1,865	2,898	4,355	6,368
0,950	3,7355	3,6708	3,5900	3,5136	1,665	2,580	3,878	5,677
1,00	3,7345	3,6697	3,5886	3,5125	2,058	2,912	4,135	5,844
2,00	3,7353	3,6718	3,5942	3,5214	1,279	1,634	2,196	3,039
3,00	3,7349	3,6721	3,5956	3,5240	1,056	1,209	1,550	2,077
4,00	3,7351	3,6727	3,5967	3,5257	0,9168	0,9370	1,152	1,523
5,00	3,7348	3,6728	3,5972	3,5266	1,005	0,9305	1,054	1,334
6,00	3,7350	3,6732	3,5979	3,5274	0,9249	0,7486	0,8271	1,038
7,00	3,7350	3,6733	3,5984	3,5280	0,9897	0,7513	0,7678	0,9254
8,00	3,7350	3,6735	3,5987	3,5285	1,146	0,8430	0,8198	0,9292
9,00	3,7351	3,6736	3,5990	3,5289	1,207	0,8269	0,7551	0,8368
10,0	3,7351	3,6738	3,5993	3,5293	1,313	0,8566	0,7496	0,7903
20,0	3,7351	3,6737	3,5993	3,5292	2,205	1,234	0,8090	0,6601
30,0	3,7350	3,6742	3,6005	3,5310	3,250	1,738	1,050	0,7575
40,0	3,7350	3,6745	3,6010	3,5318	4,022	2,080	1,168	0,7319
50,0	3,7348	3,6744	3,6012	3,5322	4,997	2,591	1,444	0,8833
60,0	3,7347	3,6745	3,6015	3,5325	5,887	3,034	1,658	0,9756
70,0	3,7347	3,6747	3,6017	3,5328	6,780	3,497	1,896	1,093
80,0	3,7346	3,6747	3,6020	3,5331	7,670	3,965	2,141	1,224
90,0	3,7341	3,6745	3,6017	3,5329	8,533	4,426	2,387	1,351
100	3,7342	3,6747	3,6020	3,5333	9,378	4,874	2,621	1,472
200	3,7339	3,6747	3,6020	3,5333	17,62	9,735	5,529	3,293
300	3,7340	3,6746	3,6020	3,5333	24,41	13,83	7,957	4,720
400	3,7312	3,6736	3,6018	3,5335	30,43	17,54	10,22	6,097
500	3,7283	3,6723	3,6013	3,5334	36,03	21,15	12,50	7,537
600	3,7252	3,6708	3,6007	3,5331	41,18	24,43	14,58	8,851
700	3,7225	3,6697	3,6004	3,5332	45,93	27,51	16,55	10,12
800	3,7195	3,6681	3,5996	3,5328	50,40	30,37	18,34	11,19
900	3,7167	3,6668	3,5989	3,5325	54,66	33,20	20,19	12,41
1000	3,7139	3,6654	3,5982	3,5322	58,64	35,82	21,89	13,52
1100	3,7108	3,6637	3,5972	3,5316	62,48	38,42	23,61	14,62
1200	3,7079	3,6620	3,5964	3,5311	66,24	40,97	25,27	15,70
1300	3,7050	3,6605	3,5954	3,5306	69,51	43,20	26,70	16,63
1400	3,7022	3,6590	3,5946	3,5301	72,33	44,88	27,55	17,60
1500	3,6996	3,6577	3,5940	3,5299	75,47	47,18	29,19	18,09
1600	3,6966	3,6560	3,5931	3,5293	78,49	49,27	30,59	19,03
1700	3,6936	3,6542	3,5920	3,5286	81,45	51,41	31,95	19,92
1800	3,6909	3,6528	3,5912	3,5281	84,40	53,50	33,35	20,78
1900	3,6881	3,6513	3,5903	3,5276	86,90	55,31	34,53	21,49
2000	3,6857	3,6500	3,5897	3,5274	89,30	57,03	35,69	22,24

Priloga O: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5b.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,5699	3,4835	3,3646	3,2758	37,61	58,11	88,01	126,8
0,150	3,5658	3,4990	3,4087	3,3257	12,27	19,62	29,94	44,39
0,250	3,5713	3,5112	3,4247	3,3454	7,242	11,82	18,15	26,10
0,350	3,5739	3,5149	3,4350	3,3589	5,059	8,326	12,84	18,73
0,450	3,5766	3,5185	3,4410	3,3668	4,031	6,586	10,06	14,60
0,550	3,5761	3,5189	3,4430	3,3695	3,368	5,424	8,300	12,05
0,650	3,5755	3,5189	3,4443	3,3727	2,909	4,622	7,044	10,19
0,750	3,5758	3,5195	3,4457	3,3754	2,547	4,034	6,122	8,866
0,850	3,5760	3,5200	3,4471	3,3764	2,251	3,577	5,424	7,834
0,950	3,5764	3,5207	3,4484	3,3790	2,002	3,181	4,822	6,985
1,00	3,5755	3,5196	3,4470	3,3780	2,373	3,471	5,038	7,079
2,00	3,5762	3,5217	3,4525	3,3866	1,388	1,883	2,637	3,645
3,00	3,5758	3,5221	3,4538	3,3891	1,085	1,346	1,826	2,488
4,00	3,5760	3,5225	3,4549	3,3907	0,8896	1,020	1,344	1,822
5,00	3,5757	3,5226	3,4554	3,3915	0,928	0,9596	1,189	1,556
6,00	3,5759	3,5230	3,4561	3,3924	0,8064	0,7665	0,9265	1,226
7,00	3,5760	3,5232	3,4565	3,3930	0,8339	0,7339	0,8362	1,069
8,00	3,5760	3,5233	3,4568	3,3934	0,9638	0,7990	0,8513	1,050
9,00	3,5760	3,5235	3,4571	3,3938	0,9734	0,7707	0,7860	0,9468
10,0	3,5760	3,5236	3,4574	3,3942	1,043	0,7839	0,7574	0,8867
20,0	3,5760	3,5236	3,4573	3,3941	1,609	0,985	0,7251	0,6333
30,0	3,5760	3,5240	3,4585	3,3958	2,295	1,331	0,875	0,6698
40,0	3,5760	3,5243	3,4591	3,3966	2,818	1,510	0,893	0,6000
50,0	3,5758	3,5243	3,4593	3,3969	3,499	1,870	1,091	0,7032
60,0	3,5758	3,5243	3,4595	3,3972	4,106	2,171	1,227	0,7523
70,0	3,5758	3,5244	3,4597	3,3975	4,724	2,482	1,387	0,8258
80,0	3,5759	3,5247	3,4600	3,3978	5,343	2,810	1,556	0,9144
90,0	3,5754	3,5244	3,4597	3,3977	5,952	3,129	1,726	1,000
100	3,5756	3,5246	3,4600	3,3980	6,542	3,439	1,886	1,079
200	3,5754	3,5246	3,4601	3,3981	12,58	7,004	4,045	2,453
300	3,5754	3,5246	3,4601	3,3980	17,62	9,99	5,805	3,488
400	3,5736	3,5239	3,4599	3,3983	22,17	12,75	7,46	4,475
500	3,5718	3,5231	3,4597	3,3982	26,49	15,48	9,20	5,563
600	3,5698	3,5221	3,4592	3,3980	30,48	17,98	10,75	6,547
700	3,5681	3,5215	3,4592	3,3982	34,20	20,35	12,24	7,487
800	3,5661	3,5205	3,4587	3,3980	37,65	22,47	13,51	8,215
900	3,5642	3,5196	3,4582	3,3978	41,09	24,70	14,97	9,184
1000	3,5623	3,5187	3,4578	3,3976	44,31	26,78	16,33	10,06
1100	3,5602	3,5175	3,4571	3,3972	47,41	28,79	17,59	10,83
1200	3,5581	3,5164	3,4565	3,3969	50,43	30,76	18,83	11,60
1300	3,5561	3,5153	3,4559	3,3965	53,18	32,57	20,01	12,34
1400	3,5541	3,5142	3,4553	3,3962	55,95	34,38	21,16	13,05
1500	3,5523	3,5134	3,4549	3,3959	58,06	35,59	21,74	13,32
1600	3,5503	3,5123	3,4543	3,3957	60,62	37,41	23,00	14,17
1700	3,5480	3,5111	3,4536	3,3952	63,16	39,07	24,08	14,73
1800	3,5461	3,5100	3,4530	3,3949	65,43	40,62	24,90	15,21
1900	3,5440	3,5088	3,4523	3,3944	67,61	42,06	25,93	15,82
2000	3,5423	3,5081	3,4520	3,3944	69,68	43,53	26,88	16,50

Priloga P: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5, c.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,4147	3,3403	3,2278	3,1470	40,54	62,09	94,48	141,6
0,150	3,4127	3,3561	3,2714	3,1967	12,90	21,87	34,31	48,12
0,250	3,4188	3,3660	3,2867	3,2144	7,894	12,82	19,71	28,90
0,350	3,4213	3,3695	3,2965	3,2274	5,473	9,107	14,05	20,64
0,450	3,4239	3,3731	3,3023	3,2350	4,430	7,187	11,04	16,16
0,550	3,4235	3,3734	3,3042	3,2375	3,658	5,952	9,102	13,33
0,650	3,4231	3,3734	3,3055	3,2406	3,115	5,042	7,691	11,26
0,750	3,4233	3,3740	3,3068	3,2432	2,727	4,412	6,699	9,790
0,850	3,4235	3,3746	3,3083	3,2442	2,425	3,873	5,916	8,641
0,950	3,4238	3,3752	3,3095	3,2467	2,149	3,463	5,283	7,726
1,00	3,4230	3,3742	3,3082	3,2458	2,486	3,739	5,456	7,777
2,00	3,4236	3,3761	3,3134	3,2540	1,412	1,984	2,833	3,994
3,00	3,4233	3,3765	3,3147	3,2565	1,053	1,391	1,933	2,688
4,00	3,4234	3,3770	3,3157	3,2579	0,8218	1,038	1,424	1,990
5,00	3,4232	3,3771	3,3162	3,2588	0,8257	0,9578	1,250	1,680
6,00	3,4234	3,3774	3,3168	3,2596	0,6937	0,7483	0,9673	1,312
7,00	3,4234	3,3776	3,3172	3,2601	0,6910	0,6878	0,8665	1,150
8,00	3,4234	3,3777	3,3175	3,2606	0,7860	0,7446	0,8636	1,104
9,00	3,4235	3,3779	3,3178	3,2609	0,7840	0,6974	0,7849	0,9853
10,0	3,4235	3,3780	3,3181	3,2613	0,8176	0,6917	0,7502	0,9169
20,0	3,4235	3,3780	3,3181	3,2613	1,146	0,7548	0,6117	0,5993
30,0	3,4235	3,3784	3,3192	3,2629	1,589	0,9737	0,7060	0,6110
40,0	3,4235	3,3786	3,3198	3,2637	1,891	1,065	0,6698	0,4881
50,0	3,4234	3,3786	3,3199	3,2639	2,340	1,313	0,7939	0,5447
60,0	3,4234	3,3787	3,3201	3,2642	2,724	1,495	0,8839	0,5762
70,0	3,4234	3,3789	3,3204	3,2646	3,123	1,695	0,9818	0,6124
80,0	3,4235	3,3790	3,3205	3,2647	3,530	1,907	1,095	0,6703
90,0	3,4232	3,3788	3,3204	3,2647	3,929	2,113	1,201	0,7208
100	3,4233	3,3789	3,3206	3,2649	4,316	2,313	1,300	0,7673
200	3,4233	3,3790	3,3207	3,2651	8,541	4,815	2,845	1,776
300	3,4233	3,3790	3,3207	3,2651	12,11	6,904	4,060	2,494
400	3,4222	3,3786	3,3207	3,2653	15,39	8,832	5,203	3,146
500	3,4212	3,3782	3,3205	3,2652	18,59	10,82	6,301	3,789
600	3,4199	3,3775	3,3203	3,2652	21,55	12,65	7,558	4,626
700	3,4191	3,3774	3,3205	3,2656	24,37	14,38	8,611	5,248
800	3,4179	3,3768	3,3201	3,2653	26,92	15,89	9,498	5,755
900	3,4167	3,3762	3,3199	3,2652	29,62	17,63	10,66	6,540
1000	3,4155	3,3756	3,3195	3,2651	32,14	19,19	11,62	7,119
1100	3,4141	3,3749	3,3192	3,2648	34,51	20,66	12,50	7,633
1200	3,4128	3,3742	3,3188	3,2646	36,87	22,12	13,40	8,191
1300	3,4115	3,3735	3,3184	3,2644	39,10	23,53	14,26	8,693
1400	3,4102	3,3728	3,3180	3,2643	41,27	24,88	15,07	9,160
1500	3,4089	3,3722	3,3176	3,2640	42,87	25,85	15,96	9,767
1600	3,4077	3,3716	3,3174	3,2639	45,09	27,28	16,51	9,955
1700	3,4063	3,3708	3,3168	3,2634	47,07	28,45	17,17	10,32
1800	3,4049	3,3701	3,3165	3,2634	48,75	29,47	17,70	10,45
1900	3,4034	3,3693	3,3161	3,2630	50,62	30,69	18,53	11,05
2000	3,4024	3,3689	3,3160	3,2631	52,46	31,95	19,29	11,52

Priloga Q: Dielektrična konstanta in faktor dielektrične izgube v odvisnosti od frekvence in temperature za vzorec 5d.

f (kHz)	ϵ'				$\epsilon'' \cdot 10^3$			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,050	3,4147	3,3403	3,2278	3,1470	43,97	69,64	106,0	153,4
0,150	3,4127	3,3561	3,2714	3,1967	14,93	23,89	37,11	54,67
0,250	3,4188	3,3660	3,2867	3,2144	8,709	14,41	22,01	32,24
0,350	3,4213	3,3695	3,2965	3,2274	6,055	10,130	15,71	23,12
0,450	3,4239	3,3731	3,3023	3,2350	4,852	7,960	12,30	18,05
0,550	3,4235	3,3734	3,3042	3,2375	4,005	6,626	10,11	14,82
0,650	3,4231	3,3734	3,3055	3,2406	3,396	5,578	8,561	12,57
0,750	3,4233	3,3740	3,3068	3,2432	2,991	4,869	7,464	10,93
0,850	3,4235	3,3746	3,3083	3,2442	2,636	4,287	6,566	9,633
0,950	3,4238	3,3752	3,3095	3,2467	2,344	3,817	5,856	8,622
1,00	3,4230	3,3742	3,3082	3,2458	2,590	4,001	5,960	8,572
2,00	3,4236	3,3761	3,3134	3,2540	1,433	2,101	3,059	4,363
3,00	3,4233	3,3765	3,3147	3,2565	1,020	1,447	2,075	2,935
4,00	3,4234	3,3770	3,3157	3,2579	0,7573	1,053	1,532	2,160
5,00	3,4232	3,3771	3,3162	3,2588	0,7488	0,9383	1,292	1,802
6,00	3,4234	3,3774	3,3168	3,2596	0,5828	0,7265	1,002	1,413
7,00	3,4234	3,3776	3,3172	3,2601	0,5716	0,6501	0,8799	1,233
8,00	3,4234	3,3777	3,3175	3,2606	0,6375	0,6774	0,8569	1,160
9,00	3,4235	3,3779	3,3178	3,2609	0,6200	0,6236	0,7681	1,021
10,0	3,4235	3,3780	3,3181	3,2613	0,6333	0,5996	0,7220	0,9361
20,0	3,4235	3,3780	3,3181	3,2613	0,7886	0,5968	0,5204	0,5947
30,0	3,4235	3,3784	3,3192	3,2629	1,049	0,7334	0,5831	0,5369
40,0	3,4235	3,3786	3,3198	3,2637	1,183	0,7145	0,4872	0,3951
50,0	3,4234	3,3786	3,3199	3,2639	1,450	0,8629	0,5655	0,4240
60,0	3,4234	3,3787	3,3201	3,2642	1,665	0,9637	0,6045	0,4200
70,0	3,4234	3,3789	3,3204	3,2646	1,896	1,075	0,6542	0,4320
80,0	3,4235	3,3790	3,3205	3,2647	2,132	1,199	0,7186	0,4595
90,0	3,4232	3,3788	3,3204	3,2647	2,368	1,320	0,7785	0,4853
100	3,4233	3,3789	3,3206	3,2649	2,598	1,434	0,8346	0,5067
200	3,4233	3,3790	3,3207	3,2651	5,348	3,092	1,899	1,243
300	3,4233	3,3790	3,3207	3,2651	7,673	4,415	2,653	1,671
400	3,4222	3,3786	3,3207	3,2653	9,871	5,687	3,367	2,071
500	3,4212	3,3782	3,3205	3,2652	11,99	6,897	4,085	2,481
600	3,4199	3,3775	3,3203	3,2652	14,19	8,263	4,945	3,045
700	3,4191	3,3774	3,3205	3,2656	16,16	9,422	5,618	3,431
800	3,4179	3,3768	3,3201	3,2653	18,01	10,47	6,216	3,760
900	3,4167	3,3762	3,3199	3,2652	20,09	11,81	7,113	4,379
1000	3,4155	3,3756	3,3195	3,2651	21,90	12,86	7,711	4,665
1100	3,4141	3,3749	3,3192	3,2648	23,63	13,86	8,265	4,988
1200	3,4128	3,3742	3,3188	3,2646	25,39	14,91	8,895	5,349
1300	3,4115	3,3735	3,3184	3,2644	27,05	15,87	9,426	5,616
1400	3,4102	3,3728	3,3180	3,2643	28,70	16,87	10,04	6,013
1500	3,4089	3,3722	3,3176	3,2640	30,39	17,91	10,66	6,335
1600	3,4077	3,3716	3,3174	3,2639	31,79	18,65	11,06	6,496
1700	3,4063	3,3708	3,3168	3,2634	33,22	19,40	11,35	6,541
1800	3,4049	3,3701	3,3165	3,2634	34,45	20,07	11,64	6,556
1900	3,4034	3,3693	3,3161	3,2630	36,05	21,10	12,32	7,020
2000	3,4024	3,3689	3,3160	3,2631	37,62	22,20	13,06	7,591