

Dielektrična svojstva hrane

Radalj, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Food Technology and Biotechnology / Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:159:595992>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International](#)/[Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology and Biotechnology](#)



**Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Sveučilišni prijediplomski studij Prehrambena tehnologija**

Iva Radalj
0058220656

Dielektrična svojstva hrane

ZAVRŠNI RAD

Predmet: Fizikalna svojstva složenih sustava - hrane

Mentor: prof.dr.sc. Anet Režek Jambrak

Zagreb, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Završni rad

Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Sveučilišni prijediplomski studij Prehrambena tehnologija

Zavod za opće programe
Laboratorij za održivi razvoj

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

Dielektrična svojstva hrane

Iva Radalj, 0058220656

Sažetak:

Dielektrična svojstva hrane su svojstva kojima se opisuju interakcije komponenata hrane s električnim poljima. S inženjerskog stajališta, dielektrična svojstva su najvažnija fizička svojstva povezana s radiofrekvencijskim i mikrovalovnim zagrijavanjem te predstavljaju važan alat za identifikaciju kvalitete prehrambenih materijala i poboljšanje učinkovitosti proizvodnje. Kemijski sastav hrane, frekvencija, sadržaj vlage, uvjeti skladištenja, gustoća, promjena faze i temperatura glavni su faktori koji utječu na dielektrična svojstva prehrambenog materijala. Izbor metode mjerenja dielektričnih svojstava ovisi o prirodi dielektričnog prehrambenog materijala, frekvenciji od interesa te potrebnom stupnju točnosti. U ovom radu opisane su sljedeće mjerne tehnike: metoda slobodnog prostora, metoda prijenosne linije i linije refleksije, koaksijalna sonda, rezonantne metode, metoda vremenske domenske reflektometrije i metoda paralelnih ploča.

Ključne riječi: mjerne tehnike, metoda slobodnog prostora, metoda prijenosne linije i linije refleksije, koaksijalna sonda, rezonantne metode, metoda vremenske domenske reflektometrije i metoda paralelnih ploča

Rad sadrži: 30 stranica, 3 slike, 47 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je u tiskanom i elektroničkom obliku pohranjen u knjižnici Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 23, 10 000 Zagreb

Mentor: prof.dr.sc. Anet Režek Jambrak

Pomoć pri izradi: prof.dr.sc. Anet Režek Jambrak

Datum obrane: 17. lipnja 2024.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Undergraduate thesis

University of Zagreb
Faculty of Food Technology and Biotechnology
University undergraduate study Food Technology

Department of General Programs
Laboratory for Sustainable Development

Scientific area: Biotechnical Sciences
Scientific field: Food Technology

Dielectric properties of foods
Iva Radalj, 0058220656

Abstract: Dielectric properties of foods are used to explain interactions of foods with electric fields. For engineering point of view, dielectric properties are the foremost important physical properties related to radio frequency and microwave heating and serve as a crucial tool for identifying the quality of food materials and enhancing production efficiency. The chemical composition of food, frequency, moisture content, storage conditions, density, phase change and temperature are the main factors that influence the dielectric properties of food material. The selection of a method for measuring the dielectric properties depends on the nature of the dielectric food material, the frequency of interest and the required level of accuracy. In this paper, the following measurement techniques are described: free-space method, transmission/reflection line, coaxial probe, resonant methods, time domain reflectometry and parallel plate method.

Keywords: measurement techniques, free-space transmission method, transmission/reflection line, coaxial probe, resonant methods, time-domain reflectometry and parallel plate method

Thesis contains: 30 pages, 3 figures, 47 references

Original in: Croatian

Thesis is deposited in printed and electronic form in the Library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Kačićeva 23, 10 000 Zagreb

Mentor: Anet Režek Jambrak, PhD, Full Professor

Thesis defended: June 17, 2024

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1.. DIELEKTRIČNA SVOJSTVA HRANE	2
2.1.1. POLARIZACIJA	3
2.1.2. COLE-COLE DIJAGRAM	4
2.1.3. DEBYEV MODEL	4
2.2.. UTJECAJ SASTAVA HRANE NA DIELEKTRIČNA SVOJSTVA	5
2.2.1. UTJECAJ UGLJIKOHIDRATA	6
2.2.2. UTJECAJ PROTEINA	6
2.2.3. UTJECAJ LIPIDA	6
2.2.4. UTJECAJ OTOPINE SOLI	7
2.3.. FAKTORI KOJI UTJEČU NA DIELEKTRIČNA SVOJSTVA HRANE	7
2.3.1. FREKVENCIJA	7
2.3.2. SADRŽAJ VLAGE	8
2.3.3. UVJETI SKLADIŠTENJA	9
2.3.4. GUSTOĆA	9
2.3.5. PROMJENA FAZE	9
2.3.6. TEMPERATURA	10
2.4.. INDUSTRIJSKA PRIMJENA DIELEKTRIČNIH SVOJSTAVA	11
2.5.. METODE ZA ODREĐIVANJE DIELEKTRIČNIH SVOJSTAVA HRANE	12

2.5.1. METODA SLOBODNOG PROSTORA (<i>FREE-SPACE TRANSMISSION METHOD, FSTM</i>)	13
2.5.2. METODA PRIJENOSNE LINIJE I LINIJE REFLEKSIJE (<i>TRANSMISSION/REFLECTION LINE, TRL</i>)	15
2.5.3. KOAKSIJALNA SONDA (<i>COAXIAL PROBE, CP</i>)	16
2.5.4. REZONANTNE METODE (<i>RESONANT METHODS, RM</i>)	18
2.5.5. METODA VREMENSKE DOMENSKE REFLEKTOMETRIJE (<i>TIME DOMAIN REFLECTOMETRY, TDR</i>)	20
2.5.6. METODA PARALELNIH PLOČA (<i>PARALLEL PLATE METHOD, PPM</i>)	20
3.ZAKLJUČCI.....	21
4.POPIS LITERATURE	23

1. UVOD

U suvremenom kontekstu u kojem se prehrambena industrija kontinuirano razvija i teži inovativnim pristupima unaprjeđenju procesa proizvodnje i kvalitete proizvoda, istraživanje dielektričnih svojstava hrane postalo je istaknuto područje interesa. Razumijevanje dielektričnih svojstava omogućuje precizniju kontrolu procesa, što rezultira unaprjeđenjem dizajna proizvoda, optimizacijom procesa proizvodnje te osigurava visoku razinu kvalitete i sigurnosti proizvoda.

Dielektrična svojstva hrane omogućuju objašnjenje interakcija hrane s električnim poljima. Posjeduju ih materijali koji sadrže dipolne molekule koje se podvrgavanjem djelovanju pulsirajućeg elektromagnetskog polja polariziraju, što dovodi do međusobnog trenja molekula te razvijanja topline. Količina proizvedene topline ovisi o sljedećim dielektričnim svojstvima hrane: relativnoj dielektričnoj konstanti, relativnom faktoru gubitka dielektričnosti te kutu gubitka.

Za određivanje vrijednosti dielektričnih svojstava hrane važno je uzeti u obzir nekoliko čimbenika uključujući kemijski sastav hrane, frekvenciju, sadržaj vlage, uvjete skladištenja, gustoću, promjenu faze te temperaturu.

Prilikom mjerenja dielektričnih svojstava hrane, ključno je odabrati prikladnu metodu koja će osigurati precizna i pouzdana mjerenja. Odabir opreme za mjerenje i dizajn držača uzorka ovise o različitim faktorima, uključujući tip hrane koja se ispituje, raspon frekvencija koji se koristi, potrebnu razinu točnosti za mjerenja, obuhvat istraživanja te dostupnost resursa i opreme za provedbu studija.

U ovom radu opisana su dielektrična svojstva hrane, utjecaj sastava hrane i ostalih faktora na dielektrična svojstva, primjena u industriji te metode pomoću kojih se određuju dielektrična svojstva hrane. Za svaku od navedenih metoda, uključujući metodu slobodnog prostora, metodu prijenosne linije i linije refleksije, koaksijalnu sondu, rezonantne metode, metodu vremenske domenske reflektometrije (TDR) i metodu paralelnih ploča, navedene su prednosti i nedostaci njihove primjene.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Dielektrična svojstva hrane

Biološki materijali, poput hrane, posjeduju sposobnost pohranjivanja i otpuštanja energije iz vanjskog električnog polja. Kada se hrana stavi u električno polje, dio električnog naboja ne prolazi kroz materijal, već se samo pomakne iz ravnotežnog položaja uzrokujući dielektričnu polarizaciju. Na taj način, prehrambeni proizvod ima sposobnost pohranjivanja energije primjenom vanjskog polja, zbog čega se može definirati kao dielektrik. Dielektrični materijali sami po sebi ne provode električnu struju zbog čega se smatraju izolatorima po svojim električnim svojstvima.

Dielektričnost možemo izraziti na sljedeće načine:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad [1]$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad [2]$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \quad [3]$$

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad [4]$$

Gdje su ε' realni dio dielektričnosti ili dielektrična konstanta, ε'' imaginarni dio dielektričnosti ili faktor gubitka, ε_0 je dielektričnost vakuum ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m), δ je kut gubitaka, a $\operatorname{tg} \delta$ je faktor disipacije D (Rupčić sur., 2018).

Kompleksna veličina koja opisuje interakciju materijala s električnim poljem je permitivnost (ε_r) i sastoji se od realnog i imaginarnog dijela. Relativna permitivnost ili kompleksna relativna dielektričnost izražava brzinu prodiranja energije u materijal te predstavlja omjer između električnog kapaciteta materijala (hrane) i električnog kapaciteta zraka ili vakuum pri uvjetima kod kojih se vrši ispitivanje. Realni dio permitivnosti ε' , odnosno dielektrična konstanta je mjera za količinu energije iz vanjskog električnog polja pohranjenu u materijalu. Količina energije koju će materijal izgubiti kada se stavi u izmjenično električno polje predstavlja imaginarni dio i može se klasificirati kao faktor gubitka dielektričnosti (Brodie i sur., 2015). Imaginarni dio kompleksne dielektričnosti ε'' je uvijek veći od nule i manji je od ε' (Agilent Technologies, 2006). Učinci koji pridonose tim parametrima su gubitak i provodljivost.

Kada se razmatra kompleksna permitivnost, relativni gubici materijala su omjer izgubljene energije prema pohranjenoj energiji i nazivaju se tangensom gubitka ($\tan\delta$). Tangens gubitka predstavlja faktor smanjenja kuta od 90° te odnos između napona i jakosti struje koji je povezan s impedancijom i provođenjem materijala. Stavljanjem dielektričnog materijala u kondenzator, dolazi do smanjenja kuta od 90° , što se izražava tangensom tog kuta. Porastom tangensa kuta dolazi do povećanja izgubljene energije unutar samog materijala.

2.1.1. Polarizacija

Dielektrična svojstva imaju materijali koji sadrže elementarne električne dipole (molekule). Podvrgavanjem takvih materijala djelovanju pulsirajućeg elektromagnetskog polja, dolazi do polarizacije dipolnih molekula brzinom koja ovisi o primijenjenoj frekvenciji, što dalje dovodi do međusobnog trenja molekula i razvoja topline.

Pojam polarizacije označava razmještanje pozitivnog i negativnog naboja koji čine dielektrični materijal, odnosno povećanje električnog dipolnog momenta ili usmjeravanje čestica u smjeru vanjskog električnog polja na način da se na međusobno suprotnim stranama tijela pojavljuje jednaka količina električnog naboja suprotnog predznaka. Kada se električno polje ukloni, atomi se vraćaju u izvorno stanje nakon određenog vremena nazvanog vrijeme relaksacije.

Pojavljuje se nekoliko vrsti polarizacija, a to su sljedeće (Brodie i sur., 2015) :

Elektronska polarizacija nastaje kada električno polje djeluje na dielektrik, uzrokujući pomak položaja elektrona u molekulama ili atomima unutar dielektrika, obično u vanjskim ljuskama elektronskih omotača. Elektroni ne napuštaju svoje atome ili molekule, osim ako električno polje nije dovoljno jako da izazove proboj dielektrika. Kada se to dogodi, molekule ili atomi postaju dipoli, usmjereni prema smjeru električnog polja.

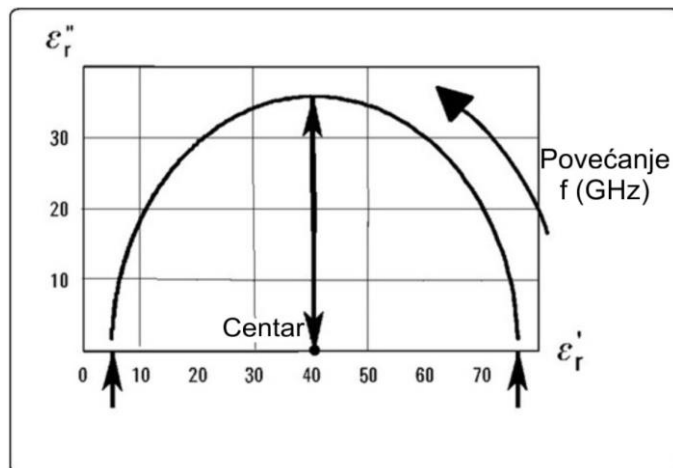
Orijentacijska polarizacija pretežno se pojavljuje kod plinovitih i tekućih dielektrika kada električno polje utječe na polarne molekule, one koje nisu električki neutralne, primjerice molekule vode te ih usmjerava u smjeru polja. U krutim dielektricima, polarne molekule teže mijenjaju svoj položaj jer su čvrsto vezane za susjedne molekule putem međumolekulskih sila. Orijentacijska polarizacija se javlja samo u materijalima koji imaju trajni dipolni

moment koji se formira uslijed redistribucije elektrona i neravnoteže u distribuciji naboja.

Ionska polarizacija nastaje kada električno polje utječe na ionske kristale uzrokujući pomak pozitivnih i negativnih iona u dielektriku za male udaljenosti. Pomaci se odvijaju u suprotnim smjerovima u odnosu na njihove početne položaje unutar kristalne rešetke.

2.1.2. Cole-Cole dijagram

Permitivnost se također može prikazati na Cole-Cole dijagramu iscrtavanjem imaginarnog dijela (ϵ'') na vertikalnoj osi i realnog dijela (ϵ') na horizontalnoj osi, pri čemu frekvencija predstavlja neovisni parametar (Slika 1). Materijal koji ima jednu relaksacijsku frekvenciju pojavit će se kao polukrug sa centrom koji leži na horizontalnoj osi $\epsilon'' = 0$ te vrhom faktora gubitka u točki $1/\tau$. Kod materijala s višestrukim relaksacijskim frekvencijama rezultat je luk sa središtem koji leži ispod horizontalne $\epsilon'' = 0$ osi (Agilent Technologies, 2006).



Slika 1. Cole Cole dijagram (Kumari, 2018)

2.1.3. Debye model

Debye model opisuje dielektrična svojstva polariziranih molekula u smislu permitivnosti kao funkcije frekvencije. Rotacija dipola traje sve dok ne nastupi pojava relaksacije. Vrijeme relaksacije je vrijeme koje je potrebno molekularnim dipolima da postanu orijentirani prema električnom polju i strogo je ovisno o frekvenciji. Na radiofrekvencijama dipoli prate vanjsko polje, ali ne osciliraju dovoljno brzo da bi proizveli

značajno stvaranje topline. S druge strane, na višim frekvencijama dipoli reagiraju na električno polje, ali ne mogu pratiti brze promjene polja, što uzrokuje pojavu relaksacijskih fenomena. Osim toga, pri visokim frekvencijama dielektrična konstanta ima vrijednost ϵ_{∞} , a faktor gubitka doseže maksimum na frekvenciji relaksacije. Ova Debyeova interpretacija varijacije relativne dielektrične konstante i faktora gubitka s frekvencijom ima ograničenja, te može doći do velikih odstupanja u smislu rotacije dipola nasuprot trenju u mediju. Unatoč tome, Debyeova jednadžba najbolje opisuje varijaciju dielektričnih svojstava s frekvencijom tekuće vode koja predstavlja najbolji primjer polarnog materijala.

Specifično, kada se uzima u obzir hrana u procesu apsorpcije energije, pojavljuju se određeni mehanizmi koji ovise o obliku, volumenu, površini, dielektričnim svojstvima i konfiguraciji opreme. Uglavnom je riječ o dva mehanizma: dipolnoj relaksaciji i ionskoj vodljivosti. Glavna komponenta hrane na koju navedeni mehanizmi imaju najviše utjecaja je voda. Collie i sur., (1948) opisali su povezanost rotacije dipola u biološkim materijalima s pozitivnim i negativnim nabojem na vodikovim i kisikovim atomima molekula vode. Voda nastoji pratiti električno polje, a takvo rotacijsko kretanje molekula rezultira proizvodnjom topline i migracijom iona pod utjecajem električnog polja.

Navedeni mehanizmi simboliziraju sve gubitke energije koji se uzimaju u obzir u parametru faktora gubitka. Smanjenje i povećanje faktora gubitka također je povezano s ionskom vodljivošću na nižim frekvencijama, s relaksacijom vezane vode te s relaksacijom slobodne vode u gornjem dijelu raspona frekvencija.

2.2.Utjecaj sastava hrane na dielektrična svojstva

Utjecaj ugljikohidrata, lipida, proteina i sadržaja soli na dielektrična svojstva nudi objašnjenje interakcija između hranjivih i nehranjivih komponenti hrane te njihovih međusobnih molekularnih odnosa, i elektromagnetskih polja, što može biti od velikog značaja za formuliranje funkcionalne hrane. Nadalje, kemijski sastav utječe na termička svojstva hrane, poput toplinske vodljivosti (λ) i specifičnog toplinskog kapaciteta (Cp), koja su povezana s dielektričnim svojstvima. Dielektrična i termička svojstva mogu se koristiti za predviđanje brzine zagrijavanja, čime se omogućava opisivanje svojstava prehrambenih materijala prilikom izlaganja mikrovalnoj obradi. Prethodno navedeni sastojci hrane važni su parametri za dizajniranje i poboljšanje kvalitete hrane prilikom pripreme u mikrovalnoj

pečnici kao i za razvoj novih postupaka pripreme same hrane (Sablani, 2017).

2.2.1. Utjecaj ugljikohidrata

Na dielektrična svojstva otopina ugljikohidrata uvelike utječe sadržaj slobodne vode. Razlog tomu leži u prisustvu vodikovih veza i interakciji vode s hidroksilnim grupama što se očituje u dielektričnim svojstvima hrane visokog sadržaja šećera, maltodekstrina, hidrolizata škroba i laktoze, kao i proizvoda na bazi disaharida. Ugljikohidrati imaju nisku dielektričnu aktivnost na mikrovalnim frekvencijama zbog odsustva dipolne polarizacije u navedenom rasponu frekvencija (Zhang i sur., 2007). Nakon vezanja škroba i molekula vode putem vodikovih veza, dolazi do smanjenja polarizacije, što rezultira smanjenjem dielektričnih svojstava.

2.2.2. Utjecaj proteina

Dielektrična svojstva proteina ovise o njihovim nepolarnim/hidrofobnim pobočnim ograncima. Povećanjem sadržaja proteina dolazi do porasta vrijednosti dielektrične konstante i faktora gubitka. Porast dielektričnih svojstava s udjelom proteina također je zabilježen kod proteina mlijeka i soje (Zhu i sur., 2015).

Denaturacijom proteina, odnosno gubitkom njihove native konformacije zbog razaranja nekovalentnih veza unutar molekule proteina, dolazi do oslobađanja vode i otopljenih iona. Posljedično tome, njihova pokretljivost raste te rezultira porastom dielektričnih svojstava. Slobodne aminokiseline i polipeptidi doprinose povećanju faktora gubitka dielektričnosti u odnosu na konstantu dielektričnosti (Sablani, 2017).

2.2.3. Utjecaj lipida

U usporedbi s molekulom vode, masti imaju vrlo niska dielektrična svojstva. Masnoće se smatraju inertnima u mikrovalnom polju zbog nepolarnih molekula koje imaju nisku interakciju s polarizirajućim elektromagnetskim valovima (Zhang i sur., 2007). Dokazano je da povećani udio masti u mesu rezultira nižim dielektričnim svojstvima u odnosu na nemasno meso. Osim toga, povećanjem sadržaja masti smanjuju se dielektrična konstanta i faktor gubitka, jer dolazi do razrjeđenja omjera vode unutar prehranbenog sustava. Nadalje, većim udjelom masti ne samo da se smanjuje interakcija između hrane i elektromagnetskog vala,

već i dolazi do pada toplinske vodljivosti (Sablani, 2017).

2.2.4. Utjecaj otopine soli

Sol je jedna od glavnih komponenata u prehrambenim sustavima odgovorna za ionsku provodljivost. Dodatak soli uzrokuje smanjenje dielektrične konstante te povećanje faktora gubitka. U prvom slučaju, sol uzrokuje vezanje vode te smanjenje dostupne količine slobodne vode potrebne za polarizaciju, prilikom čega nastupa pad dielektrične konstante. S druge strane, povećanje faktora gubitka proizlazi iz dodatka nabijenih čestica u sustav čime se povećava migracija naboja. Koncentracija soli manja od 1% dovodi do smanjenja faktora gubitka s porastom temperature, dok ista koncentracija iznad 1% uzrokuje povećanje, jer je ionski gubitak dominantan pri većim koncentracijama (Nelson, 2005).

Ahmed i sur. (2008) odredili su dielektrična svojstva soljenog i nesoljenog maslaca u mikrovalnom frekvencijskom području. Rezultati su pokazali značajnu ovisnost o soli među istraživanim temperaturama, dok je za frekvenciju samo faktor gubitka smanjen s povećanjem tog parametra.

2.3. Faktori koji utječu na dielektrična svojstva hrane

Poznavanje dielektričnih svojstava hrane je važna stavka za identifikaciju kvalitete prehrambenih materijala i poboljšanje ravnomjernosti dielektričnog zagrijavanja. Glavni faktori koji utječu na dielektrična svojstva prehrambenih materijala uključuju frekvenciju, promjenu faze, temperaturu, gustoću, uvjete skladištenja te sadržaj vlage kao dominantni faktor.

2.3.1. Frekvencija

Dielektrična konstanta i faktor gubitka smanjuju se s povećanjem frekvencije. Navedena svojstva dielektričnih materijala mogu se objasniti mehanizmom polarizacije i ionske provodljivosti. Postavljanjem dielektričnog materijala u električno polje, dielektrik se polarizira i prati vanjsko polje. Budući da je dielektrična permitivnost mjera ukupne polarizacije, pri niskoj frekvenciji polarizacija slijedi promjene u polju bez ikakvog zastoja, stoga dielektrična konstanta materijala pokazuje veću vrijednost (Quan i sur., 2017).

Kako frekvencija raste, orijentacija dipola ne prati brzu promjenu polja te kao rezultat nastupaju oscilacije koje kasne za poljem. S obzirom na to da konstanta dielektričnosti i faktor gubitka ovise o ukupnoj polarizaciji, ukupna polarizacija dielektričnog materijala smanjuje se s povećanjem frekvencije.

Na niskim frekvencijama (<200 MHz), ionska provodljivost igra ključnu ulogu, dok su i ionska provodljivost i rotacija dipola slobodne vode značajne na mikrovalnim frekvencijama. Primjerice, u jajima je ionska provodljivost bila dominantan mehanizam dielektrične disperzije na frekvencijama manjim od 200 MHz, dok je ionička provodljivost dominirala sve do 300 MHz u mangoima (Sosa-Morales i sur., 2009).

Za čiste tekućine s polariziranim molekulama, kao što su alkoholi ili voda, polarizacijska disperzija dominira frekvencijskim karakteristikama dielektričnih svojstava. Matematički model koji je razvio Debye (1929.) može se koristiti za opisivanje općeg frekvencijski ovisnog svojstva čistih tekućina. Na temelju toga, Liu i sur. (2009) koristili su se modificiranom Debyejevom jednažbom kako bi istražili frekvencijski ovisno svojstvo faktora gubitka u tijestu. U rasponu od 1 do 1800 MHz, ionska provodljivost pokazala je glavni doprinos, dok je relaksacija dipola slobodne vode bila umjerena pri visokofrekventnim vrijednostima.

2.3.2. Sadržaj vlage

Sadržaj vlage predstavlja ključni faktor koji utječe na vrijednosti dielektrične konstante i faktora gubitka. Dielektrična svojstva higroskopskih materijala značajno su povezana s udjelom vlage jer utječu na način zadržavanja vode u strukturi materijala. Voda u hrani može biti prisutna kao slobodna i vezana. Slobodna voda nalazi se unutar kapilarnih prostora, dok se vezana voda adsorbira na površini prehrambenog materijala. Kemijski vezana voda ima manji utjecaj u usporedbi sa slobodnom vodom gdje polarne molekule mogu slobodno usmjeravati svoju orijentaciju pod djelovanjem električnog polja.

Povećanje razine vlage u prehrambenim materijalima rezultira povećanjem broja dipola, što dovodi do ukupnog povećanja polarizacije. Stoga, povećanjem vlage, dielektrična konstanta i faktor gubitka se također povećavaju (Wang i sur., 2008).

2.3.3. Uvjeti skladištenja

Uvjeti i vrijeme skladištenja mogu uzrokovati promjenu dielektričnih svojstava hrane. Ukoliko se hrana čuva u vlažnom okruženju, lako će apsorbirati vlagu, dok će s druge strane, u suhom okruženju moći izgubiti vlagu. Tijekom proučavanja dielektričnih svojstava manga tijekom vremena skladištenja od 0, 4, 8, 16 dana pri temperaturi od 21°C utvrđeno je da i dielektrična konstanta i faktor gubitka opadaju s povećanjem vremena skladištenja, zbog smanjenog udjela vlage i povećanog pH-vrijednosti uočenog tijekom tog razdoblja. Istovremeno, električna provodljivost manga povećala se s povećanjem temperature tijekom vremena skladištenja (Sosa-Morales i sur., 2010).

Nadalje, metodom otvorene koaksijalne sonde proučavana su dielektrična svojstva ljuski jaja. Mjerenja su obavljena na netaknutim jajima u frekvencijskom rasponu od 10 do 1800 MHz nakon skladištenja na 22 °C tijekom 1, 2, 4, 8 i 15 dana. Oba dielektrična svojstva, dielektrična konstanta i faktor gubitka, povećala su se tijekom vremena skladištenja. Vrijednost faktora gubitka povećala se za 22% od prvog do petnaestog dana pri 20 MHz. Određena dielektrična svojstva mogu se koristiti za predviđanje osnovnih parametara kvalitete te općenito za procjenu svježine proizvoda (Ragni i sur., 2007).

2.3.4. Gustoća

Količina mase po jedinici volumena (gustoća) ima određeni utjecaj na interakciju između elektromagnetskog polja i uključene mase. Prilikom istraživanja utjecaja gustoće i sadržaja vlage na dielektrična svojstva zrna kave uočene su niže vrijednosti permitivnosti pri nižoj gustoći, dok su veće vrijednosti permitivnosti postignute pri većoj gustoći (Berbert i sur., 2001). Sličan zaključak donesen je i kada je riječ o brašnu od slanutka čija dielektrična konstanta i faktor gubitka rastu s povećanjem gustoće i sadržaja vlage (Guo i sur., 2008).

2.3.5. Promjena faze

Promjena faze odgovorna je za vrlo oštru promjenu dielektričnih svojstava hrane. Iz navedenog razloga je precizno određivanje dielektričnih svojstava smrznutih i djelomično smrznutih proizvoda važno za određivanje brzine i ravnomjernosti zagrijavanja tih proizvoda tijekom odmrzavanja u mikrovalnoj pećnici. Konstanta dielektričnosti i faktor gubitka

značajno se povećavaju tijekom topljenja leda. Stoga dijelovi smrznutih proizvoda koji se prvi odmrzavaju mogu početi ključati apsorbirajući više energije mikrovalova i brže se zagrijavati, dok će drugi dijelovi istog proizvoda još uvijek ostati smrznuti (Meda i sur., 2017).

2.3.6. Temperatura

Utjecaj temperature na dielektrična svojstva hrane ovisi o mnogim faktorima, uključujući primjenjene frekvencije i sastav hrane, posebno sadržaj vlage i soli (Tang, 2005). Stoga, ovisnost dielektrične konstante o temperaturi vrlo je kompleksna te se može povećavati ili smanjivati, ovisno o materijalu. Općenito, faktor gubitka raste s porastom temperature na niskim frekvencijama zbog ionske provodljivosti, dok opada s porastom temperature na visokim frekvencijama zbog disperzije slobodne vode.

Ukoliko je voda prisutna u namirnici u vezanom obliku, slijedi porast dielektričnih svojstava s porastom temperature. Suprotno tomu, ako je u materijalu prisutna slobodna voda tada dielektrična svojstva opadaju s porastom temperature. Faktor gubitka otopine soli sastavljen je od dvije komponente: dipolnog gubitka i ionskog gubitka. Dipolni gubitak se smanjuje s povećanjem temperature na frekvencijama koje se koriste u mikrovalnoj obradi. Za razliku od dipolnog gubitka, faktor gubitka uzrokovan ionskom provodljivošću raste s povećanjem temperature zbog smanjenja viskoznosti tekućine i povećane pokretljivosti iona. Na višim temperaturama, ioni postaju pokretniji i manje čvrsto vezani za vodu, što rezultira povećanjem faktora gubitka uzrokovanog ionskim gubitkom.

Everard i sur. (2006.) provodili su mjerenje dielektričnih svojstava 16 prerađenih sireva u frekvencijskom rasponu od 0,3 do 3 GHz. Autori su utvrdili da dielektrična konstanta raste pri niskim temperaturama dok ne dostigne minimum pri visokim temperaturama, dok se faktor gubitka za srednje-vlažne uzorke smanjivao pri niskim temperaturama i povećavao pri visokim temperaturama. Primjerice, u čistoj vodi porast temperature dovodi do povećanja frekvencije kod koje se pojavljuje relaksacijski fenomen i porasta faktora gubitka.

2.4. Industrijska primjena dielektričnih svojstava

Praktična važnost mjerenja dielektričnih svojstava proizlazi iz njihove ključne uloge u proračunima povezanim s procesima grijanja visokih frekvencija i mikrovalova pomoću kojih se ostvaruje adekvatan odabir odgovarajućih materijala za spremnike, pakiranje hrane, posuđa za kuhanje kao i dizajn mikrovalne i radiofrekvencijske opreme za grijanje. Zbog njihovog utjecaja na razinu interakcije između hrane i elektromagnetske energije visoke frekvencije, ključna su i u odabiru namirnica i obroka namijenjenih pripremi u mikrovalnoj pećnici. Nadalje, poznavanje dielektričnih svojstava čini osnovu za razumijevanje utjecaja različitih varijabli proizvoda, poput sastava i geometrije, kao i ostalih karakteristika poput mikrovalne snage, frekvencije i temperature, na procese grijanja hrane. Također, pružaju dublji uvid u razumijevanju svojstava prehrambenih materijala u radiofrekvencijskim područjima tijekom mikrovalnog procesiranja, grijanja i hlađenja.

Primjenu također pronalaze u procesima sušenja voća pružajući visoku kvalitetu proizvoda uz nisku potrošnju energije.

Radiofrekventno elektromagnetsko zračenje osigurava zaštitu prehrambenim materijalima od prisutnih insekata u sušenom voću (Alfaifi i sur., 2013). Zastupljena su u procesima pasterizacije, sterilizacije, temperiranja i koncentriranja tekućih namirnica, primjerice voćnih sokova.

Apliciraju se u identifikaciji, obradi i nadzoru kvalitete masti i ulja, unaprjeđujući ih tijekom procesa proizvodnje i skladištenja (Lizhi i sur., 2008). Mjerenje dielektričnih svojstava ima i druge primjene koje nisu povezane s mikrovalovnim zagrijavanjem hrane, a mogu biti od istraživačkog interesa u granama poljoprivrede i prehrambene industrije

Ovisnost dielektričnih svojstava o vlažnosti u određenim frekvencijskim rasponima iskorištava se za razvoj online mjerača vlage, koji se mogu primjenjivati ne samo u procesima sušenja, već i u drugim operacijama u prehrambenoj industriji (Berbert i sur., 2002). Dielektrična svojstva žitarica i drugih poljoprivrednih proizvoda imaju značajnu primjenu u brzom i nedestruktivnom mjerenju vlage u materijalima. Sadržaj vlage jedna je od najbitnijih karakteristika poljoprivrednih proizvoda jer o njemu ovisi žetva, skladištenje i obrada. Moguće je primijeniti selektivno dielektrično grijanje kako bi se kontrolirali insekti koji napadaju pohranjenu žitaricu (Nelson, 1996). Nelson (1965.) je sugerirao da podaci o dielektričnim svojstvima igraju ključnu ulogu u istraživanju tretmana sjemena s ciljem poboljšanja klijanja.

Dielektrična mjerenja također se mogu koristiti za mjerenje aktivnosti vode, budući da je pokretljivost vode povezana s aktivnošću vode (a_w), a dielektrična svojstva vode variraju s njezinom pokretljivošću. Primjena dielektričnih parametara prilagođena je istraživanju i procjeni aspekata kvalitete vode (Venkatesh i Raghavan, 2004). Predloženo je da se dielektrično svojstvo umjetno onečišćene vode i onečišćene vode prikupljene s različitih industrijskih lokacija može povezati s detekcijom onečišćivača u vodi na frekvencijama od 2.685 GHz, temeljeno na mjerenju kompleksne permitivnosti onečišćene vode na 27°C. Ova tehnika također može biti upotrebljena za procjenu mješavina ulja i vode u prehrambenim aplikacijama.

2.5. Metode za određivanje dielektričnih svojstava hrane

Za precizno određivanje dielektričnih svojstava prehrambenih materijala ključno je odabrati odgovarajuću metodu. Odabir metode za mjerenje ovisi o brojnim faktorima, uključujući svojstva i strukturu dielektričnog materijala, raspon frekvencija, stupanj točnosti i ograničen broj uzoraka. Izbor opreme i držača uzorka trebao bi se temeljiti na dielektričnom materijalu koji se mjeri, opsegu istraživanja, dostupnosti uređaja i ekonomskim resursima za istraživanje (Venkatesh i Raghavan, 2005).

Također, potrebna je i programska podrška za pretvaranje izmjerenih podataka s instrumenta u najprikladniju fizičku veličinu, omogućujući izdvajanje svojstava od interesa. Automatizirani mrežni analizatori mogu pružiti preciznu i korisnu analizu za većinu prehrambenih proizvoda, ali s ograničenjem primjene zbog visokih troškova opreme.

Vektorski mrežni analizatori su skupi, ali vrlo svestrani jer se oslanjaju na tehnike uskog opsega detekcije. Iz toga proizlazi povećana preciznost i dinamički raspon za mjerenja selektivna prema frekvenciji.

Skalarni mrežni analizatori obično koriste tehnike širokopojasnog detektiranja pri kojem su smanjeni troškovi eliminiranjem potrebne IF (*intermediate frequency*) sekcije koja je nužna u slučaju uskopojasnog testiranja.

Mjerni sustavi koji koristi skalarnu mrežnu (*scalar network*) ili analizatore impedancije (*impedance analyzers*), primjenjuju se zbog svoje točnosti, jednostavnosti rada, jednostavne pripreme uzorka, praktične kontrole temperature i pristupačnosti vlasništva nad opremom. Osim toga, analizatori impedancije (*impedance analyzers*) i LCR mjerači (*LCR*

meters) koriste se za mjerenje svojstava materijala na nižim frekvencijama.

Na frekvencijama iznad 200 MHz i u mikrovalnom području, primjenjuju se tehnike prijenosne linije i rezonantne šupljine, dok su na frekvencijama mikrovalova, obično od 1 GHz i više, korištene tehnike prijenosne linije, rezonantne šupljine i slobodnog prostora.

Tehnike mjerenja dielektričnih svojstava mikrovalova mogu se klasificirati kao mjerenje refleksije ili prijenosa korištenjem rezonantnih ili nerezonantnih sustava, s otvorenim ili zatvorenim strukturama za osjetljivost svojstava uzoraka materijala.

Metode zatvorenih struktura uključuju mjerenja prijenosa putem valovoda i koaksijalnih linija te mjerenja refleksije s kratko spojenim valovodima ili koaksijalnim linijama.

Mjerenje prijenosa u slobodnom prostoru i mjerenje otvorenih koaksijalnih linija ili valovoda čine metode otvorenih struktura.

Rezonantne strukture mogu uključivati zatvorene rezonantne šupljine ili otvorene rezonantne strukture koje se koriste kao uređaji s dva priključka za mjerenja prijenosa ili kao uređaji s jednim priključkom za mjerenja refleksije. Razvojem odgovarajuće opreme za reflektometriju u vremenskoj domeni ostvareno je mjerenje dielektričnih svojstava hrane na širokom rasponu frekvencija.

U ovom radu opisane su sljedeće metode za određivanje dielektričnih svojstava:

2.5.1. Metoda slobodnog prostora (*Free-Space Transmission Method, FSTM*)

FSTM je potpuno bezkontaktna i često nedestruktivna metoda koja omogućuje određivanje kompleksne permeabilnosti (μ_r) i kompleksne permitivnosti (ϵ_r). Namijenjena je za precizna, točna i reproducirajuća mjerenja pri širokom rasponu frekvencija (od 5 GHz do 330 GHz). Budući da ne zahtjeva posebnu pripremu uzorka, pogodna je za određivanje svojstava prehrambenih materijala pri visokim temperaturama kao i za nehomogene dielektrike (Venkatesh i Raghavan, 2005). Također, tehnika se može lako primijeniti u industrijske svrhe zbog kontinuiranog praćenja i kontrole određenih svojstava materijala, primjerice određivanje udjela vlage i mjerenje gustoće.

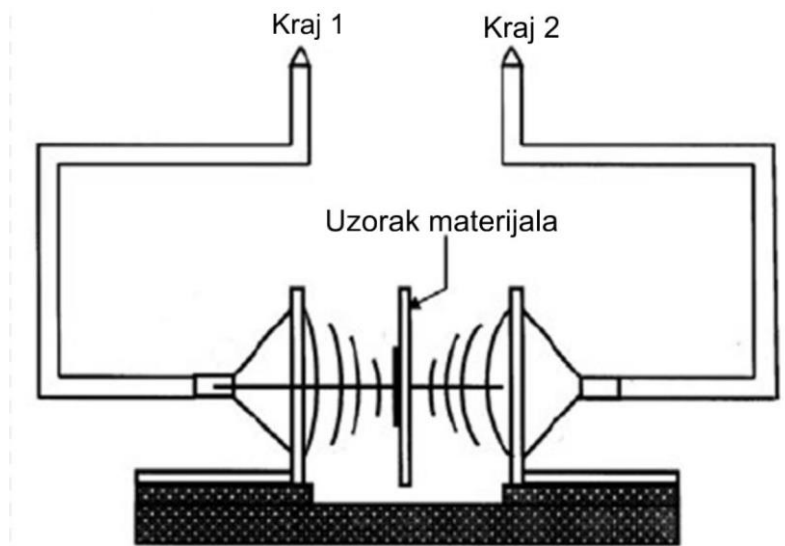
Kim i sur. (2006) mjerili su sadržaj vlage u praškastoj hrani, poput pšeničnog brašna, mlijeka u prahu i kave u prahu. U frekvencijskom rasponu od 1 do 15 GHz mjerene su mikrovalne apsorpcije, faze pomaka i gustoća vlage te su korelirane s koeficijentom korelacije većim od 0,91.

Oprema za mjerenje vrijednosti dielektrične konstante uključuje vektorski mrežni analizator, mjerni pribor (dvije antene, tunele, lukove), programsku podršku (*software*) i računalo. Mrežni analizator namijenjen je za precizna mjerenja S-parametara odnosno koeficijenta refleksije i transmisije uzorka mjenog prehrambenog materijala u slobodnom prostoru. No, zbog pojave višestrukih refleksija između leća antena, dolazi do razlike između izmjerenih S-parametara i teorijskih S-parametara mjenog uzorka u slobodnom prostoru te je potrebno provesti kalibraciju vektorskog mrežnog analizatora.

Postoji nekoliko metoda kalibracije koje se mogu koristiti ovisno o željenoj točnosti, poput GRL (*Gated Reflected Line*), TRM (*Thru Reflect Match*), TRL (*Thru Reflect Line*) te LRL (*Line Reflect Line*) koja omogućuje najvišu kvalitetu kalibracije (Agilent Technologies, 2006). Line standard postiže se razdvajanjem fokalnih ravnina dviju antena na približno četvrtinu valne duljine na sredini frekvencijskog pojasa. Po završetku postupka, antene se vraćaju na izvornu poziciju. Reflect standard može se dobiti postavljanjem metalne ploče poznate debljine na držač uzorka na referentnoj ravnini između antena. Nakon provedene kalibracije, uzorak koji mora biti velik, ravan i tanak postavlja se između dvije antene, odašiljačke i prijemne, spojene na mrežni vektorski analizator, te se mjere pojačanje i fazni pomak mjenog signala (Slika 2).

Inicijalno se mjere S-parametri bez uzorka, a zatim s uzorkom. Dielektrična svojstva određuju se postupkom obrade izmjerenih koeficijenta refleksije i prijenosa pomoću programske podrške i računala. Izvori pogreške mogu uključivati višestruke refleksije između površine uzorka i antena te difrakciju na rubovima uzorka. Vremenskim ograničavanjem i odgovarajućom debljinom samog uzorka moguće je eliminirati navedene pogreške (Brodie i sur., 2015).

FSTM predstavlja nedestruktivnu tehniku koja omogućava precizno mjerenje dielektričnih svojstava na visokim frekvencijama i u nepogodnim uvjetima, poput visokih temperatura te istovremeno mjerenje i magnetskih i električnih svojstava. Nasuprot tome, prema Zaiki i sur. (2013) metoda sadrži nekoliko nedostataka. Zahtijeva da uzorak bude odgovarajućih dimenzija, gdje minimalna poprečna dimenzija uzorka treba biti tri puta veća od širine snopa antene u fokusu. Također, moguća je pojava višestrukih refleksija elektromagnetskog vala između antena i površina uzorka mjenog materijala. Difrakcija na rubu uzorka također može biti problematična. Nadalje, ova metoda zahtijeva posebne kalibracijske mjere kako bi se osigurala točnost i pouzdanost mjerenja.



Slika 2. Shema metode slobodnog prostora za mjerenje refleksije i prijenosa gdje su krajevi 1 i 2 povezani s Vektorskim Mrežnim Analizatorom (Molnar C, 2008)

2.5.2. Metoda prijenosne linije i linije refleksije (*Transmission/Reflection Line, TRL*)

Za provođenje mjerenja korištenjem TRL potrebno je precizno oblikovati uzorak kako bi u potpunosti ispunio poprečni presjek zatvorene prijenosne linije, obično koaksijalne ili pravokutne valovodne cijevi. Zatim se pomoću vektorskog mrežnog analizatora mjere koeficijenti refleksije i/ili prijenosa opterećene linije. Iz izmjerenih reflektiranih i prijenosnih S-parametara se matematičkim proračunom koristeći računalni program dobiju kompleksni dielektrični parametri prehrambenog materijala.

Iako je priprema uzorka zahtjevna i dugotrajna, nužna je kako bi se osiguralo čvrsto uklapanje uzorka u valovod ili koaksijalnu liniju bez stvaranja zračnih praznina. Priprema uključuje obradu uzorka mjernog materijala u pravokutni oblik koji se postavlja na koplanarnu liniju. Ključno je da uzorak materijala ima dva paralelna ruba koji su okomiti na širenje vala. Materijal treba imati manju duljinu od koplanarne linije, ali istovremeno mora biti dovoljno širok da pokrije dvije temeljne ploče, uz ograničenje unutar polja (Kassem i Vigneras, 2016). Metoda je primjenjiva za sve tekuće i čvrste materijale.

U usporedbi s metodom koaksijalne sonde, TRL je preciznija i osjetljivija, međutim ima uži raspon frekvencija.

Za uspješno provedeno mjerenje potrebno je postići maksimalno električno polje, što se može postići otvorenim ili nekim drugim kapacitivnim završetkom, dok se kalibracija može izvršiti pomoću završetaka kratkog spoja, otvorenog kruga ili otpora od 50Ω (Brodie i

sur., 2015).

Dielektrična svojstva vlage grožđa, varirajući od 15 do 80% i na temperaturama od 25–80°C pri 2.45 GHz, izmjerena su pomoću tehnike otvorene koaksijalne prijenosne linije. Nadalje, navedena tehnika primijenjena je za procjenu indeksa zrenja ploda kivija (Ragni i sur., 2012) i svježine jaja (Ragni i sur., 2010).

Metodu odlikuje jednostavnost izvođenja, mogućnost mjerenja uzoraka sa srednjim do visokim gubicima, prilagodljivost za mjerenje u vakuumu te široki opseg frekvencija (100 MHz – 110 GHz). Nedostaci uključuju ograničenja točnosti mjerenja zbog efekata zračnih praznina između materijala koji se ispituje i koplanarnih linija, ograničenost točnosti kada je duljina uzorka višekratnik polovice valne duljine u materijalu te zahtjev za preciznim oblikom uzorka.

2.5.3. Koaksijalna sonda (*Coaxial Probe, CP*)

CP otvorenog kraja koristi se već godinama kao nedestruktivni način mjerenja dielektričnih svojstava hrane, najčešće u svrhu ispitivanja tekućina i polu-krutina (praškastih medija) u širokom frekvencijskom rasponu pri visokim temperaturama. Mjeri se koeficijent refleksije (Γ), a dielektrična svojstva se izračunavaju na temelju faze i amplitude reflektiranog signala na završetku koaksijalne linije koja je u kontaktu s uzorkom koji se mjeri. Tipične sonde otvorenog kraja koriste koaksijalnu liniju promjera 3,5 mm.

Ukoliko je riječ o tekućem materijalu, sondu je potrebno uroniti u medij, odnosno izbjeći prislanjanje na površinu tekućine s ciljem eliminiranja stvaranja mjehurića na mjestu dodira. Spomenuti zračni jastuci, odnosno mjehurići predstavljaju primarnu poteškoću prilikom mjerenja jer uzrokuju pogreške i odstupanja od očekivanih rezultata (Santos i sur., 2009). U slučaju krutih materijala, površina treba biti ravna kao površina sonde kako prilikom dodirivanja ne bi došlo do stvaranja zračnog razmaka koji također negativno utječe na rezultate samog mjerenja (Slika 3).

Uspješno provođenje mjerenja zahtjeva određenu debljinu uzorka veću od 1 cm, kako bi se spriječilo raspršivanje vala iz koaksijalne sonde kroz tanki materijal.

Sustav za mjerenje permitivnosti i ispitivanje uzoraka sastoji se od tri osnovna dijela: vektorskog mrežnog analizatora, koaksijalne sonde i programske podrške. Koeficijent refleksije mjeri se pomoću vektorskog mrežnog analizatora. Samojoj uporabi analizatora prethodi kalibracija kako bi mjerenja koeficijenta refleksije bila usklađena s ravninom otvora

sonde. Permitivnost se naposljetku izračunava iz koeficijenta refleksije na otvoru sonde putem jednadžbi putem programske podrške.

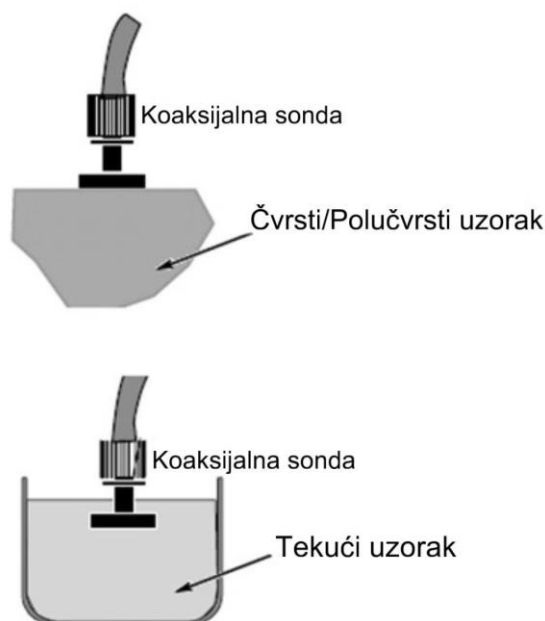
Iako je metoda prilično jednostavna za upotrebu i omogućuje mjerenje dielektričnih svojstava u širokom rasponu frekvencija (500 MHz - 110 GHz), ima ograničenu točnost zbog pogreški koje se javljaju pri vrlo niskim i visokim frekvencijama, kao i kod niskih vrijednosti dielektrične konstante i faktora gubitaka. Metoda je najpogodnija za materijale sa faktorom gubitaka većim od 1 pri frekvencijama između 915 i 2450 MHz.

Tumačenje rezultata za materijale s manjim gubicima, poput masti i ulja, treba obavljati s posebnim oprezom.

CP u osnovi predstavlja modifikaciju metode prijenosne linije (Venkatesh i Raghavan, 2005). Postoje razne varijacije osnovne sonde, na primjer, sonde s eliptičnim vrhom i sondom s koničnim vrhom. Otvorene koaksijalne sonde uspješno su korištene za mjerenje permitivnosti tekućih i polutvrđih materijala s relativno visokim gubicima, uključujući većinu prehrambenih materijala, posebno voće i povrće. Wang i sur. (2003) mjerili su dielektrična svojstva voćnih proizvoda korištenjem navedene metode u rasponu frekvencija između 1 i 1800 MHz pri temperaturama između 20 i 60°C.

Nelson i Bartley (2000.) koristili su CP zajedno s analizatorom mreže i uređajem za kontrolu temperature uzorka kako bi mjerili dielektrična svojstva prehrambenih materijala poput makarona i siras naglaskom na njihovu ovisnost o frekvenciji i temperaturi.

Prednosti ove metode uključuju mogućnost mjerenja bez potrebe za obradom uzorka, rutinsko mjerenje dielektričnih svojstava različitih uzoraka nakon kalibracije te provođenje mjerenja u kontroliranoj temperaturnoj okolini. Međutim, nedostaci uključuju ograničenost na mjerenje refleksije, kao i osjetljivost na zračne praznine između sonde i uzorka koje mogu prouzročiti potencijalna odstupanja.



Slika 3. Metoda koaksijalne sonde za čvrste/polučvrste uzorke i tekuće uzorke (Jilani MT, 2012)

2.5.4. Rezonantne metode (*Resonant Methods, RM*)

Iako rezonantna mjerenja odlikuju visoka preciznost i podrška za mjerenje na visokim temperaturama prilikom određivanja dielektričnih svojstava hrane, ograničena su u smislu manjeg frekvencijskog područja (od 50 MHz do više od 100 GHz). RM je prikladna za prehrambene materijale s niskim gubicima dielektričnosti i niskim faktorom gubitaka te predstavlja TM (transverzalnu magnetnu) ili TE (transverzalnu električnu) propagaciju vala (Shyam i sur., 2011).

Dvije su vrste često korištenih RM: metoda perturbacije te metoda mjerenja niskih gubitaka. Popularnost metode perturbacije, osobito kod transverzalnog magnetskog vala, jest na vrhuncu zbog njene pogodnosti za sva mjerenja permitivnosti, mjerenja materijala s magnetskim svojstvima kao i materijala srednje do visoke razine gubitaka. Veliku primjenu ima i kod homogenih prehrambenih materijala. Mjerenje se provodi umetanjem uzorka kroz središte valovoda (pravokutnog ili kružnog), koji je prethodno pretvoren u šupljinu. Promjene u središnjoj frekvenciji i širini, uzrokovane umetanjem uzorka, pružaju podatke potrebne za izračun dielektrične konstante. Variranje faktora Q (omjer pohranjene i disipirane energije) koristi se za procjenu dielektričnih gubitaka. Određivanje vrijednosti dielektrične konstante i

gubitaka omogućava proučavanje fizikalnih svojstava hrane, kao i kontrolu kvalitete, praćenje sastava te optimizaciju procesa proizvodnje.

Vektorski mrežni analizator (VNA) primjenjuje se u svrhu olakšanja mjerenja, automatski prikazujući promjene u frekvenciji i širini. Veličina šupljine mora biti dizajnirana za frekvenciju od interesa, pri čemu je odnos inverzan (viša frekvencija, manja šupljina). Svaka šupljina zahtijeva kalibraciju, ali sam izračun je brz (Venkatesh i Raghavan, 2005).

Priprema uzorka je relativno jednostavna, a permitivnost velikog broja uzoraka moguće je odrediti u kratkom vremenu. Ova se metoda lako prilagođava visokim (do +140 °C) ili niskim (-35°C) temperaturama te se koristi za određivanje dielektričnih svojstava mnogih poljoprivredno-prehrambenih proizvoda pri širokom rasponu frekvencija, temperatura i sastava. Priprema čvrstih uzoraka obično uključuje formiranje, obradu ili prešanje u obliku šipki ili štapića. Nakon toga, pripremljeni uzorci umetnu se u cijevi ili cijevi za testiranje koje su prozirne za mikrovalove. Ova priprema osigurava odgovarajuću veličinu i oblik uzorka prije nego što se umetne u šupljinu za mjerenje, čime se omogućuje analiza dielektričnih svojstava hrane. Priprema tekućih uzoraka započinje pipetiranjem željene tekućine u držače za uzorke u obliku epruveta. Pipete od 200 μL su prikladne za dielektrične materijale s niskim gubicima, dok su pipete od 10 μL pogodne za materijale s visokim gubicima.

Pomoću navedene tehnike, dielektrična svojstva α -D-glukoze vodene otopine pri 2450 MHz mjerena su u koncentracijama od 10 do 60% u rasponu temperatura od 0 do 70 °C (Liao i sur., 2001).

Sharma i Prasad (2002) primijenili su metodu perturbacije šupljine kako bi izmjerili dielektrična svojstva češnjaka pri temperaturama u rasponu od 35 do 75°C te odabranim razinama vlažnosti.

Priprema polutvrđih uzoraka uključuje ili punjenje uzorka u tekućem stanju i zatim stvrdnjavanje, ili primjenu vakuumske tlaka na jednom kraju uz istovremeno prisiljavanje uzorka u tanki cilindrični držač. Budući da mjerenje temperature može biti izazovno zbog specifičnosti materijala poput sira i maslaca, ključna je primjena odgovarajućih pričvršćivača kako bi se uzorci održali pod različitim uvjetima. S obzirom na teškoće u rukovanju polutvrđim uzorcima s visokim gubicima, poput kečapa od rajčice, određene metode mjerenja nisu prikladne za sve uvjete, posebno pri visokim temperaturama.

Metoda mjerenja niskih gubitaka primjenjuje se kod materijala s niskim gubicima pomoću većih uzoraka u odnosu na prethodno spomenutu metodu.

Rezonantne karakteristike, koje ovise o materijalu unutar šupljine, omogućuju praćenje faktora kvalitete i rezonantne frekvencije kako bi se odredili dielektrični parametri materijala. Dielektrična svojstva mogu se odrediti započevši s mjerenjem rezonantne frekvencije i faktora kvalitete prazne šupljine u metalu. Nadalje, mjerenje je potrebno ponoviti nakon ispunjavanja šupljine ispitivanim materijalom. Uzorak hrane se u obliku čvrste šipke postavlja duž sredine šupljine. Slijedi izračun kompleksne permitivnosti (ϵ_r) ili permeabilnosti (μ_r) koristeći frekvenciju, faktor kvalitete i volumen uz pomoć programske podrške (Brodie i sur., 2015).

Prednosti RM uključuju mogućnost mjerenja vrlo malih uzoraka te korištenje približnih izraza za polje u uzorku i šupljini u metalu. Međutim, nedostaci obuhvaćaju potrebu za visokofrekvencijskom razlučivošću vektorskog mrežnog analizatora i ograničenost na usko frekvencijsko područje.

2.5.5. Metoda vremenske domenske reflektometrije (*Time Domain Reflectometry, TDR*)

TDR razvijena je 1980-ih godina i pokriva frekvencijski raspon od 10 MHz do 10 GHz. Prolazak elektromagnetskih valova kroz uzorak hrane rezultira refleksijom čije se karakteristike analiziraju za izračun dielektričnih svojstava hrane. Brzina mjerenja i točnost metode su poprilično visoke, uz greške od svega nekoliko postotaka. Uzorci koji se koriste su vrlo male veličine, a mjereni materijal, odnosno hrana mora biti homogena. Unatoč visokim troškovima, ova metoda omogućuje napredna istraživanja interakcije između elektromagnetske energije i materijala u opsežnom frekvencijskom rasponu.

Dielektrična svojstva smjese meda i vode proučavana su i dokumentirana primjenom ove tehnike u frekvencijskom rasponu od 10 MHz do 10 GHz pri temperaturi od 25°C, prema istraživanju koje su proveli Puranik i sur. (1991). Miura i sur. (2001) ispitivali su mikrovalna dielektrična svojstva tekuće i čvrste hrane pomoću navedene metode te dokazali da se primjenjuje za određivanje kvalitete hrane, praćenje svježine i kontrolu procesa proizvodnje.

2.5.6. Metoda paralelnih ploča (*Parallel Plate Method, PPM*)

PPM kondenzatora uključuje postavljanje tankog ravnog uzorka dielektričnog materijala, ploče debljine manje od 10 mm, između dvije paralelne ploče sa svrhom formacije kondenzatora. Unutar kondenzatora s paralelnim pločama, kapacitivnost je direktno

proporcionalna površini provodnih ploča te obrnuto proporcionalna udjeljenosti između ploča. Za provođenje mjerenja obično je potreban LCR mjerač ili analizator impedancije (Agilent-Technologies, 2006). Dielektrična konstanta i tangens dielektričnog gubitka mogu se izračunati uzimajući u obzir fizičke dimenzije materijala. Za mjerenje dielektrične konstante, nužno je umetnuti uzorak unutar držača te korištenjem vrijednosti kapaciteta izračunati permitivnost. Tipično se koristi u ograničenom frekvencijskom rasponu od 20 Hz do 1 GHz.

Navedenu metodu odlikuje visoka preciznost mjerenja i jednostavna priprema uzorka. Unatoč spomenutoj točnosti, pojava zračnih razmaka može uzrokovati pogrešne rezultate ukoliko nije provedena kalibracija. Daljnji problemi prilikom mjerenja nastaju uslijed efekta polarizacije elektroda koji se može umanjiti primjenom elektroda s velikom mikroskopskom površinom ili povećanjem frekvencije.

Kapacitivna tehnika pronalazi primjenu u procjeni vode u pšenici (Berbert i Stenning, 1996) te vode i gustoće u suncokretu (Sacilik i sur., 2007).

Ragni i sur. (2006, 2008) koristili su jednostavnu dielektričnu tehniku, koja se oslanjala na oscilator radiofrekvencije u obliku sinusnog vala uz primjenu paralelnih ploča kondenzatora za procjenu kvalitete jaja tijekom skladištenja.

Prednosti PPM uključuju visoku točnost mjerenja i pogodnost za materijale s visokim gubicima, dok nedostaci obuhvaćaju ograničen raspon frekvencija, pojavu zračnih razmaka i efekt polarizacije elektroda.

3. ZAKLJUČCI

Na temelju informacija predstavljenih u ovom završnom radu mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Dielektrična svojstva raznovrsnih prehrambenih materijala potrebna su kako bi se razumjela njihova svojstva prilikom izlaganja elektromagnetskom zračenju
2. Porastom frekvencije, dielektrična konstanta materijala opada, dok se faktor gubitka povećava. U slučaju povećanja temperature, dielektrična konstanta također raste za materijale s niskom permitivnošću, ali ova je veza obrnuta za materijale s visokom permitivnošću.

3. Odabir odgovarajuće metode za mjerenje dielektričnih svojstava prehrambenih materijala ključan je korak u istraživanju i analizi. Različiti se čimbenici, poput svojstava materijala, raspona frekvencija, dostupnosti opreme i ekonomskih resursa, trebaju uzeti u obzir prilikom odabira metode.
4. Programska podrška je ključna za interpretaciju i analizu izmjerenih podataka, omogućujući pretvaranje podataka u korisne fizičke veličine i izdvajanje relevantnih svojstava.
5. Unatoč visokim troškovima, vektorski mrežni analizatori koriste se za analizu dielektričnih svojstava prehrambenih materijala zbog njihove preciznosti, svestranosti i mogućnosti selektivnog mjerenja prema frekvenciji.
6. Na nižim i srednjim frekvencijama češće se primjenjuju rezonantne metode mjerenja dielektričnih svojstava, dok se na višim frekvencijskim područjima preferira upotreba metode prijenosne linije i linije refleksije, slobodnog prostora i koaksijalna sonda.
7. Metoda slobodnog prostora, koaksijalna sonda i metoda paralelnih ploča (elektroda) pokazale su se učinkovitima za materijale s visokim gubicima, dok rezonantne šupljine pružaju veću točnost za materijale s niskom permitivnosti
8. Koaksijalna sonda predstavlja nerezonantnu tehniku mjerenja pogodnu za široki raspon frekvencija i uzorke visokih gubitaka, no zahtjeva ponovljene kalibracije zbog mogućih pogrešaka uzrokovanih zračnim razmacima
9. Metoda prijenosne linije koristi se za mjerenje električnih i magnetskih svojstava u visokofrekventnom području. Prikladna je za čvrste i tekuće uzorke, ali priprema samih uzoraka prilično je zahtjevna u usporedbi s drugim metodama
10. Metoda slobodnog prostora predstavlja bezkontaktno mjerenje malih i ravnih uzoraka. Kod velikih uzoraka nastupaju problemi zbog difrakcije s rubova uzoraka uzrokujući pogreške tijekom mjerenja
11. Poznavanje dielektričnih svojstava ključno je za kontrolu kvalitete proizvoda, izgradnju pećnica za grijanje i dizajn opreme, optimizaciju procesa te osiguranje sigurnosti i učinkovitosti unutar industrije

4. POPIS LITERATURE

Agilent Technologies (2006) Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials Application Note. INC, 5989-2589EN. http://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf

Ahmed J, Ramaswamy HS, Raghavan VGS (2008) Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH. *LWT- Food Science and Technology*, **41(1)**, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.01.017>

Alfaifi B, Tang J, Jiao Y, Wang S, Rasco B, Sablani S (2013) Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Dielectric properties. In *LWT-Food Science and Technology*, **50(2)**, 746-754. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.012>

Berbert PA, Queiroz DM, Sousa EF, Molina MB, Melo EC, Faroni LRD (2001) Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **80(1)**, 65-80. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0689>

Berbert PA, Queiroz DM, Melo EC (2002) Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, **83(4)**, 449–462. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0135>

Berbert PA, Stenning BC (1996) On-line Moisture Content Measurement of Wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **65(4)**, 287 – 296. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0102>

Brodie G, Jacob MV, Farrell P (2015) Microwave and Radio-Frequency Technologies in Agriculture: An Introduction for Agriculturalists and Engineers, Warsaw/Berlin. *De Gruyter Open Ltd*, 52-77. <https://doi.org/10.1515/9783110455403>

Collie CH, Hasted JB, Ritson DM (1948) The dielectric properties of water and heavy water. *Proceedings of the Physical Society*, **60(2)**, 145-160. <https://doi.org/10.1088/0959-5309/60/2/304>

dos Santos JCA, Aguiar A, Costa Dias MH, Borgeos LEP (2009) Using the Coaxial Probe Method for Permittivity Measurements of Liquids at High Temperatures. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, **8(1)**, 83. https://www.researchgate.net/publication/236616868_Using_the_Coaxial_Probe_Method_for_Permittivity_Measurements_of_Liquids_at_High_Temperatures

Everard CD, Fagan CC, O'Donnell CP, O'Callaghan DJ, Lyng JG (2006) Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3 GHz. *Journal of Food Engineering*, **75(3)**, 415–422. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.027>

Guo W, Tiwari G, Tang J, Wang S (2008) Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour. *Biosystems Engineering*, **101(2)**, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.07.002>

Jilani MT (2012) Metoda koaksijalne sonde za čvrste/polučvrste uzorke i tekuće uzorke, http://www.iteejournal.org/archive/vol1no1/v1n1_1.pdf. Pristupljeno 20. travnja 2024.

Kassem H, Vigneras V (2016) Non-Destructive Measurements of Dielectric Constant of Thin dielectric Films with metallic backing using Coplanar transmission line. 3rd International Conference on *Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*. <https://www.proceedings.com/content/031/031590webtoc.pdf>

Kim KB, Park SG, Kim JY, Kim JH, Lee CJ, Kim MS, i sur. (2006) Measurement of Moisture Content in Powdered Food Using Microwave Free-Space Transmission Technique. *Key Engineering Materials*, 321-323, 1196-1200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.321-323.1196>

Kumari C (2018) Cole Cole diagram, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20926.72008> . Pristupljeno 20. travnja 2024.

Liao X, Raghavan VGS, Meda V, Yaylayan VA (2001) Dielectric Properties of Supersaturated a-D-glucose Aqueous Solutions at 2450 MHz. *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **36(3)**, 131-138. <https://doi.org/10.1080/08327823.2001.11688455>

Liu Y, Tang J, Mao Z (2009) Analysis of bread loss factor using modified Debye equations. *Journal of Food Engineering*, **93(4)**, 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.012>

Lizhi Hu, 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(2)**, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.035>

Meda V, Orsat V, Raghavan V (2017) Microwave heating and the dielectric properties of foods in The microwave processing of foods. *Elsevier*, 23-43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00002-4>

Miura N, Yagihara S, Hayashi Y, Miyairi H, Asano M, Yamada G, i sur. (2001) Microwave dielectric study on water structure and physical properties of aqueous system using time domain reflectometry with flat end cells. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, **2(1)**, 15– 30. <https://doi.org/10.1023/a:1010162025428>

Molnar C (2008) Shema metode slobodnog prostora za mjerenje refleksije i prijenosa gdje su krajevi 1 i 2 povezani s Vektorskim Mrežnim Analizatorom, [https://www.academia.edu/30744174/The Measurement of Dielectric Properties Related to Agricultural Products](https://www.academia.edu/30744174/The_Measurement_of_Dielectric_Properties_Related_to_Agricultural_Products) . Pristupljeno 1. svibnja 2024.

Nelson SO (1965) Dielectric Properties of Grain and Seed in the 1 to 50-MC Range. *In Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, **8(1)**, 38–43.<https://doi.org/10.13031/2013.40421>

Nelson SO (1996) Review and Assessment of Radio-frequency and Microwave Energy for Stored grain Insect Control.*In Transactions of the ASAE*, **39(4)**, 1475–1484. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*. <https://doi.org/10.13031/2013.27641>

Nelson SO (2005) Dielectric spectroscopy of fresh fruit and vegetable tissues from 10 to 1800 MHz. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **40(1)**, 31-47.<https://doi.org/10.1080/08327823.2005.11688523>

Nelson, SO, Bartley PG (2000) Measuring frequency and temperature dependent dielectric properties of food materials.*Transactions of the ASAE*, **43(6)**, 1733– 1736.American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <https://doi.org/10.13031/2013.3075>

Puranik S, Kumbhakarne A, Mehrotra S (1991) Dielectric properties of honey-water mixtures between 10 MHz and 10 GHz using time domain technique. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **26(4)**, 196-201.https://scholar.google.co.in/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=Hoay480AAA&citation_for_view=Hoay480AAA&2osOgNQ5qMEC

Quan, B, Liang X, Ji G, Cheng Y, Liu W, Ma J, i sur. (2017) Dielectric polarization in electromagnetic wave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, **728**, 1065-1075.<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.082>

Ragni L, Al-Shami A, Mikhaylenko G, Tang, J (2007) Dielectric characterization of hen eggs during storage. *Journal of Food Engineering*, **82(4)**, 450-459.<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.063>

Ragni L, Berardinelli A, Guarnieri A (2008) A dielectric technique based on a one-chip network analyser to predict the quality indices of shell eggs. *Biosystems Engineering*, **100(4)**, 470-478.<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.04.015>

Ragni L, Cevoli C, Berardinelli A (2010) A waveguide technique for non-destructive determination of egg quality parameters. *Journal of Food Engineering*, **100(2)**, 343–348.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.020>

Ragni L, Cevoli C, Berardinelli A, Silaghi FA (2012) Non-destructive internal quality assessment of “Hayward” kiwifruit by waveguide spectroscopy”. *Journal of Food Engineering*, **109(1)**, 32-37.<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.002>

Ragni L, Gradari P, Berardinelli A, Giunchi A, Guarnieri A (2006) Predicting quality parameters of shell eggs using a simple technique based on the dielectric properties. *Biosystem Engineering*, **94 (2)**, 255-262.<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.03.003>

Rupčić S, Mandrić Radivojević V, Srnović M, Benšić G (2018) Measuring the Dielectric Constant of Paper Using a Parallel Plate Capacitor. *IJECEs*, **9(1)**.<https://doi.org/10.32985/ijeces.9.1.1>

Sablani S (2017) Effect of food chemical compositions on the dielectric and thermal properties of instant noodles with chicken meat, egg yolk and seaweed enrichment. *International Journal of Food Engineering*, **3(2)**.<https://doi.org/10.18178/ijfe.3.2.101-106>

Sacilik K, Tarimci C, Colak A (2007) Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range. *Journal of Food Engineering*, **78(4)**, 1111-1116. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.022>

Sharma GP, Prasad S (2002) Dielectric properties of garlic (*Allium Sativum L.*) at 2450 MHz as function of temperature and moisture content. *Journal of Food Engineering*, **52(4)**, 343-348.[https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(01\)00125-x](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(01)00125-x)

Shyam NJ, Basediya AL, Sharma R, Jaiswal P, Kumar R, Bhardwaj R (2011) Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods. *Journal of Food Science and Technology*, **48(4)**, 387-411.<https://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>

Sosa-Morales ME, Tiwari G, Wang S, Tang J, López-Malo A, García HS (2009) Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfecting mangoes, relation between dielectric properties and ripening. *Biosystems Engineering*, **103(3)**, 297-303. Elsevier BV.<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.015>

Sosa-Morales ME, Valerio-Junco L, López-Malo A, García HS (2010) Dielectric properties of foods, reported data in the 21st century and their potential applications. *LWT-Food Science and Technology*, **43(8)**, 1169-1179.<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.03.017>

Tang J (2005) Dielectric properties of food In H. Schubert and Regier M. (eds.), In *The Microwave Processing of Foods*. Elsevier, 22-38.<https://doi.org/10.1533/9781845690212.1.22>

Venkatesh M, Raghavan GSV (2004) An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems engineering*, **88** (1), 1-18.<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007>

Venkatesh MS, Raghavan GSV (2005) An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, **47**(7), 15-30.https://www.researchgate.net/publication/235435108_An_Overview_of_Dielectric_Properties_Measuring_Techniques

Wang Y, Tang J, Rasco B, Kong F, Wang S (2008) Dielectric properties of salmon fillet as a function of temperature and composition. *Journal of food engineering*, **87**(2), 236-246.<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.034>

Wang Y, Wig T, Tang J, Hallberg LM (2003) Dielectric properties of food relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization. *Journal of Food Engineering*, **57**(3), 257-268.[https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(02\)00306-0](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(02)00306-0)

Zaiki A, Zaki FAM, Baba NH, Zoolfakar AS, Bakar RA (2013) A free-space method for complex permittivity measurement of bulk and thin film dielectrics at microwave frequencies, Malaysia. *The Electromagnetics Academy*, **51**, 307-328.
<https://doi.org/10.2528/pierb13031509>

Zhang L, Lyng J, Brunton NP (2007) The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency

heating. *Journal of Food Engineering*, **80(1)**, 142-151.<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.016>

Zhu X, Guo W, Jia Y, Kang F (2015) Dielectric properties of raw milk as functions of protein content and temperature. *Food and bioprocess technology*, **8(3)**, 670-680.<https://doi.org/10.1007/s11947-014-1440-5>

Izjava o izvornosti

Ja _____ Iva Radalj _____ izjavljujem da je ovaj završni rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio/la drugim izvorima, osim onih koji su u njemu navedeni.

Vlastoručni potpis