

Određivanje termodinamičkih parametara pri procesiranju ultrazvukom visoke snage

Bošnjak, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:270195>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PREHRAMBENO-BIOTEHNOLOŠKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, srpanj 2016.god.

Ivana Ivanković

657/PI

**ODREĐIVANJE
TERMODINAMIČKIH
PARAMETARA PRI
PROCESIRANJU ULTRAZVUKOM
VISOKE SNAGE**

Rad je izrađen u Laboratoriju za procesno-prehrambeno inženjerstvo na Zavodu za prehrambeno tehnološko inženjerstvo Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Anet Režek Jambrak, Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te uz pomoć doc.dr.sc. Antonio Petošić, te poslijedoktoranda dr.sc. Marka Horvata s Fakulteta elektrotehnike i računarstva.

Od srca zahvaljujem svojoj mentorici izv.prof.dr.sc. Anet Režek Jambrak na trudu i pomoći, te na pruženom iskustvu i brojnim savjetima prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem svim kolegama i kolegicama Laboratorija za procesno-prehrambeno inženjerstvo, te kolegama s FER-a koji su na bilo koji način pomogli pri izvođenju ovoga rada. A posebno zahvaljujem doc.dr.sc. Antoniu Petošiću na uloženom trudu, znanju i iskustvu da pomogne u bilo kojem trenutku.

Zahvaljujem svojim roditeljima Dinki i Miljenku, svojoj braći i zaručniku Filipu, na potpori koju su mi pružali i vjerovali u mene pri ostvarenju mojih ciljeva.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Diplomski rad

Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Zavod za prehrambeno tehnološko inženjerstvo
Laboratorij za procesno-prehrambeno inženjerstvo

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti

Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

ODREĐIVANJE TERMODINAMIČKIH PARAMETARA PRI PROCESIRANJU ULTRAZVUKOM VISOKE SNAGE

Ivana Ivanković, 657/PI

Sažetak: Primjena ultrazvuka visokog intenziteta smatra se novom ne-termalnom metodom obrade hrane, pri čemu je samo trajanje tretiranja vrlo kratko i provodi se pri sobnoj temperaturi te na taj način dolazi do minimalnog procesiranja hrane i očuvanja njezinih karakteristika. Cilj ovoga rada je utvrditi optimalne termodinamičke parametre obrade pri kojima će se dobiti zadovoljavajući rezultati obrade, sa smanjenom potrošnjom energije u kraćem vremenu obrade. Ispitivanja su vršena na tri različita uzorka voda, sok jabuka i mlijeko, korištene su ultrazvučne sonde promjera 12,7 i 19,1 mm pri amplitudama 1%, 10%, 50%, 75% i 100%, u trajanju od 3,6 i 9 minuta (9 minuta samo za amplitudu 75%). Određivana je promjena temperature pri različitoj amplitudi i vremenu tretiranja za sva tri uzorka, određivan je koeficijent elektroakustičkog iskorištenja, mjerenje raspodjele tlaka i isijane akustične snage, te promjena reoloških parametara prilikom ultrazvučnog tretiranja. Rezultati istraživanja su pokazali da su uspješno karakterizirani termodinamički parametri ultrazvučnog tretiranja, te da su optimirani parametri ultrazvučne obrade za uzorke mlijeka, soka od jabuke i vode. Reološkim parametrima utvrđeno je da tretiranje ultrazvukom uzrokuje neznatne promjene na ispitivanim uzorcima.

Ključne riječi: *ultrazvuk visoke snage, termodinamički parametri, voda, sok jabuka, mlijeko*

Rad sadrži: 76 stranica, 18 slika, 24 tablica, 25 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u: Knjižnica Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta, Kačićeva 23, Zagreb

Mentor: *izv.prof.dr.sc. Anet Režek Jambrak*

Pomoćpri izradi: *doc.dr.sc. Antonio Petošić*

Stručno povjerenstvo za ocjenu i obranu:

1. Prof.dr.sc.Zoran Herceg
2. Izv.prof.dr.sc.Anet Režek Jambrak
3. Doc.dr.sc.Antonio Petošić
4. Doc.dr.sc. Mario Ščetar (zamjena)

Datum obrane: 05. Srpnja, 2016

BASIC DOCUMENTATION CARD

Graduate Thesis

University of Zagreb
Faculty of Food Technology and Biotechnology
Department of food technology engineering
Laboratory for process-food engineering

Scientific area: Biotechnical Sciences

Scientific field: Food Technology

DETERMINATION OF THERMODYNAMIC PARAMETERS IN THE PROCESSING OF HIGH POWER ULTRASOUND

Ivana Ivanković, 657/PI

Abstract: The application of high power ultrasound is considered as a new non-thermal method of food processing, whereas duration of treatment is very short and it is conducted under room temperature, thus there is minimal food processing and preservation of all its characteristics. The aim of this study was to determine the optimum thermodynamic parameters that will get satisfactory results of treatment, with reduced power consumption in the shorter processing time. The examination was conducted with three different samples: water, apple juice and milk. There were used ultrasound probes that have diameters 12,7 and 19,1 mm with amplitude 1%, 10%, 50%, 75% and 100%, for a time period of 3,6 and 9 minutes (9 minutes only for 75% amplitude). Change in temperature was determined for different amplitudes and different times of treatment for all three samples. Investigated electroacoustic efficiency factor, measuring distribution of pressure, and radiation of acoustic power, statistical data processing and determination of changes in rheological parameters during ultrasonic treatment. The results showed that ultrasound treatment causes slight changes in the analysed samples.

Keywords: *high power ultrasound, thermodynamics parameters, water, apple juice, milk*

Thesis contains: 76 pages, 18 figures, 24 tables, 25 references

Original in: Croatian

Graduate Thesis in printed and electronic (pdf format) version is deposited in: Library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, Kačićeva 23, Zagreb.

Mentor: *Anet Režek Jambrak, Associate professor*

Technical support and assistance: *Antonio Petošić, Assistant professor*

Reviewers:

1. PhD. Zoran Herceg, Full professor
2. PhD. Anet Režek Jambrak, Associate professor
3. PhD. Antonio Petošić, Assistant professor
4. PhD. Mario Ščetar, Assistant professor (substitute)

Thesis defended: 05. Srpnja, 2016

Sadržaj

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | UVOD | 1 |
| 2. | TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1. | ULTRAZVUK | 2 |
| 2.1.1. | Podjela ultrazvuka | 2 |
| 2.1.2. | Karakteristike zvučnog vala | 4 |
| 2.2. | UREĐAJI I SUSTAVI ZA PRODUKCIJU ULTRAZVUKA | 6 |
| 2.3. | KAVITACIJA | 9 |
| 2.4. | TERMODINAMIČKI PARAMETRI | 12 |
| 2.5. | PRIMJENA ULTRAZVUKA U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI | 16 |
| 3. | EKSPERIMENTALNI DIO | 20 |
| 3.1. | MATERIJALI | 20 |
| 3.2. | METODE | 20 |
| 3.2.1. | Kalorimetrijska metoda | 24 |
| 3.2.2. | Metoda određivanja koeficijenta elektroakustičkog iskorištenja | 26 |
| 3.2.3. | Metoda mjerenja prostorne raspodjele tlaka u malom sonoreaktoru i određivanja isijane akustičke snage | 32 |
| 3.2.4. | Reološka analiza soka jabuke | 33 |
| 3.2.5. | Dizajn eksperimenta | 36 |
| 4. | REZULTATI I RASPRAVA | 39 |
| 4.1. | KALORIMETRIJSKA METODA | 39 |
| 4.2. | METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA ELEKTROAKUSTIČNOG ISKORIŠTENJA | 42 |
| 4.3. | REZULTATI MJERENJA PROSTORNE RASPODJELE TLAKA U MALOM SONOREAKTORU I ODREĐIVANJE ISIJANE AKUSTIČKE SNAGE | 46 |
| 4.4. | REZULTATI STATISTIČKE OBRADE PODATAKA | 47 |
| 4.5. | REZULTATI REOLOŠKIH PARAMETARA | 71 |
| 5. | ZAKLJUČCI | 73 |
| 6. | LITERATURA | 74 |

1. UVOD

U posljednje vrijeme u prehrambenoj industriji sve se više nastoje istražiti postupci minimalne obrade hrane. Svrha takve obrade je da se u što većoj mjeri očuvaju izvorne karakteristike, trajnost i kvaliteta hrane. Postupci minimalne obrade hrane mogu u potpunosti zamijeniti neke konvencionalne postupke, te dolazi do očuvanja kvalitete hrane, smanjuje se trajanje procesa i samim time se postiže ušteda energije. A jedna od tehnika koja se koristi za minimalnu obradu hrane je ultrazvuk. Istraživanja su pokazala učinkovito djelovanje ultrazvuka na očuvanje organoleptičkih i nutritivnih svojstava hrane u kratkom vremenu trajanja procesa (svega nekoliko minuta) pri sobnoj temperaturi. Ultrazvuk visokog intenziteta se koristi u prehrambenoj industriji za obradu hrane pri čemu izaziva mehaničke, kemijske i biokemijske promjene hrane, a to se primjenjuje kod ekstrakcije, zamrzavanja, sušenja, emulgiranja, inaktivacija mikroorganizama i enzima i sličnih načinima obrade.

Svrha istraživanja je bila ispitati djelovanje ultrazvuka visokog intenziteta u različitom vremenu trajanja tretiranja na vodi, soku i mlijeku. Odrediti promjene temperature i energije koje su se prenijele u sustava nakon mehaničkog tretmana. S ciljem da se navedenim uzorcima ne promijene početne karakteristike, ali da se zadovolji obrada s tehnološkog i sigurnosnog aspekta. Odrediti termodinamičke parametre koji utječu na proces obrade, utvrditi optimalne parametre obrade s ciljem maksimalnog očuvanja proizvoda. Utvrdite će se kalorimetrijske promjene, elektroakustički koeficijent iskorištenja, metodom statističke obrade podataka odrediti optimalne parametre tretiranja, te utjecaj ultrazvuka na reološke parametre.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. ULTRAZVUK

Procesiranje hrane ultrazvukom smatra se jednim od novih postupaka obrade hrane. Glavna obilježja tog postupka je dobivanje minimalno procesirane hrane jer dolazi do minimalnog povećanja temperature i relativno je kratko vrijeme obrade (1-10min) (Herceg i sur., 2009). To je tehnologija koja se koristi u svrhu smanjenja obrade hrane i samim time povećanjem kvalitete i sigurnosti prehrambenih proizvoda (Awad i sur., 2012). Osnovna svojstva ultrazvučnih valova je manja brzina (100 000 puta) nego kod elektromagnetskog vala i daje mogućnost prikazivanja informacije u stvarnom vremenu. Osim toga omogućava lako prodiranje ultrazvučnog polja u različite tipove materijala. Ostali tipovi zračenja to ne uspijevaju. Izvori ultrazvučnog vala su jeftiniji, ali su dosta osjetljivi tako da se pomoću njih dobro mogu karakterizirati različiti materijali (Petošić, 2008).

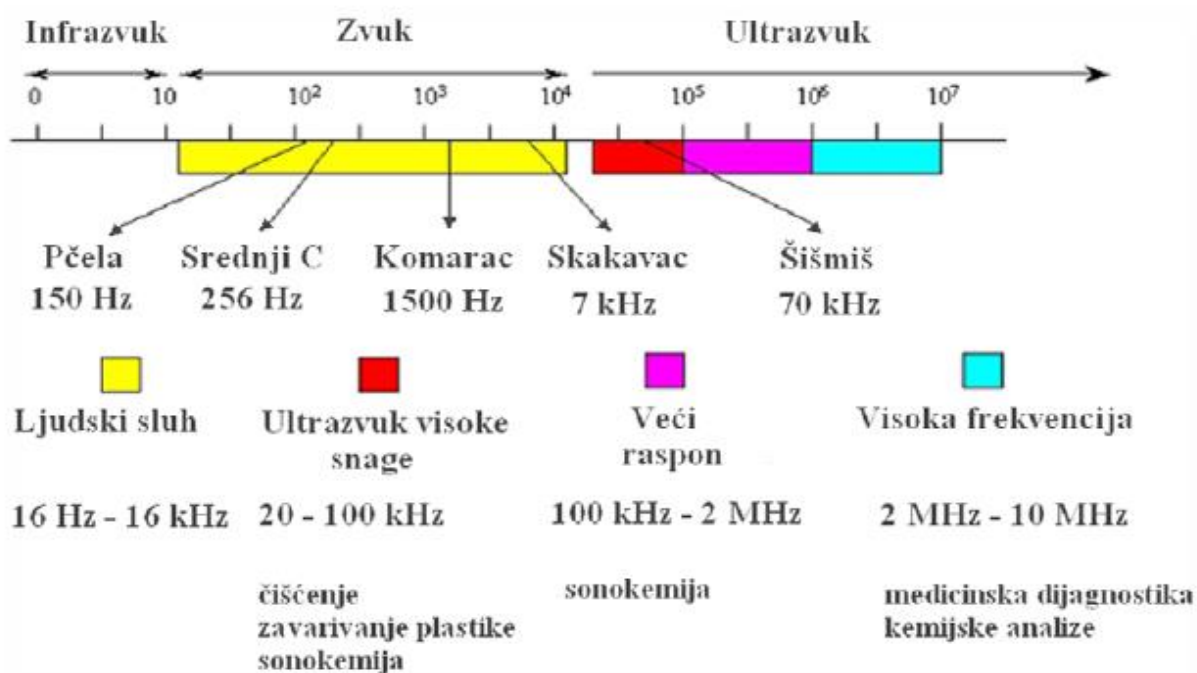
2.1.1. Podjela ultrazvuka

Pod ultrazvukom podrazumijevamo zvučne valove s frekvencijama iznad granica ljudskog sluha (Awad i sur., 2012). Ultrazvuk se može definirati kao širenje poremećaja (tlaka, pomaka, titrajne brzine) u mediju izazvano nekom vanjskom pobudom u frekvencijskom području iznad 20 kHz pa sve do 1 GHz (Petošić, 2008).

Razlikujemo dijagnostički ultrazvuk i ultrazvuk visoke snage. Dijagnostički ultrazvuk: ultrazvučni valovi niskog intenziteta, visoke frekvencije i niske energije. Ultrazvuk visoke snage: ultrazvučni valovi visokog intenziteta, niske frekvencije i visoke energije. Ultrazvuk se dijeli na određena područja zvuka prema frekvencijama (slika 1) (Herceg i sur., 2009). Na temelju raspona frekvencija primjenu ultrazvuka u obradi hrane možemo podijeliti na ultrazvuk niskog i visokog intenziteta (Awad i sur., 2012).

Ultrazvučni valovi niskog intenziteta imaju frekvencije od 1-10 MHz, te vrlo male razine snage ispod $1\text{W}/\text{cm}^2$ i ne uzrokuju fizikalna i kemijska oštećenja materijala kroz koji prolaze (Herceg i sur., 2009), a koji se koriste za ne razornu analizu prehrambenih proizvoda,

kontrolu kvalitete hrane, emulgiranje masti (Awad i sur., 2012), površinsko čišćenje, djelovanje na enzime, ekstrakcija potpomognuta ultrazvukom, filtracija, proces sušenja, zamrzavanja, ubrzanja kemijskih reakcija i drugo (Herceg i sur., 2009). Za razliku od toga ultrazvučni valovi visokog intenziteta frekvencije od 20-100 kHz i visoke razine snage u rasponu od 10-1000 W/cm² (Herceg i sur., 2009) uzrokuju fizička, mehanička, kemijska i biokemijska oštećenja materijala kroz koji prolaze. Koristi se za promjenu teksture hrane, emulgiranje, za sprječavanje pjenjenja, promjene funkcionalnih svojstava proteina u hrani, inaktivaciju ili ubrzanje enzimske aktivnosti, inaktivaciju mikroorganizama (Awad i sur., 2012).

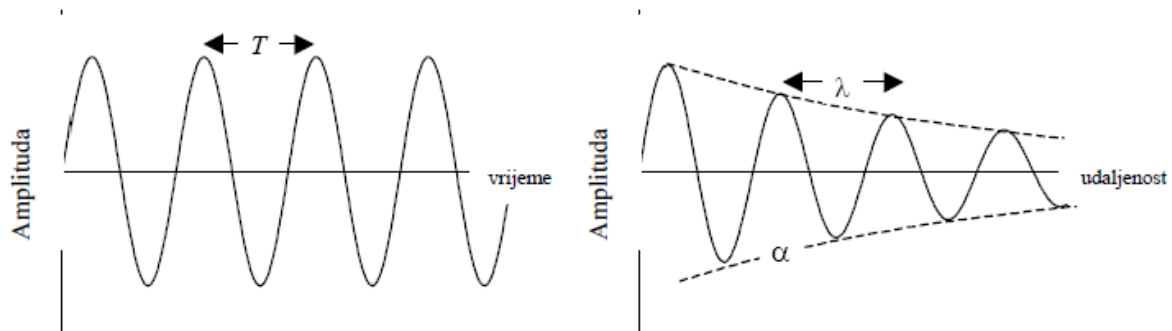


Slika 1. Područja podjele zvuka prema frekvencijama (Povey i Mason, 1998)

2.1.2. Karakteristike zvučnog vala

Zvučni val karakterizira amplituda (A), frekvencija (f), valna duljina te koeficijent atenuacije odnosno prigušenja (α) koji ovisi o svojstvima materijala kroz koji ultrazvuk prolazi. Amplituda se smanjuje s povećanjem udaljenosti od izvora ultrazvuka zbog atenuacije (slika 2) (Herceg i sur., 2009).

Val se zbog gubitaka u mediju prigušuje zbog toga je na većim frekvencijama potrebno uzeti u obzir koeficijent prigušenja. Gušenje u mediju je posljedica viskoznosti, termalnog odvođenja topline i procesima koji se odvijaju na molekularoj razini. Koeficijent prigušenja je frekvencijski ovisan i povezan je s viskoelastičnim svojstvima medija u kojemu se val širi (Petošić, 2008).



Slika 2. Smanjenje amplitude (McClements, 1995)

Amplituda ultrazvuka (lijevo), te promjena amplitude u nekom vremenu tijekom prolaska ultrazvuka kroz materijal (desno). T je udaljenost između susjednih maksimuma, λ je valna duljina i α je koeficijent atenuacije (Režek Jambrak, 2008).

Koeficijent atenuacije koji predstavlja smanjenje amplituda ultrazvučnog vala prilikom njegovog prolaska kroz materijal dan je izrazom:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad /1/$$

A_0 je početna amplituda zvučnog vala, $a\alpha x$ predstavlja prijeđenu udaljenost. Najvažniji uzroci atenuacije su adsorpcija i raspršivanje.

Adsorpcija je uzrokovana fizikalnim mehanizmom koji pretvara ultrazvučnu energiju u toplinu, a raspršivanje se pojavljuje u heterogenim materijalima poput emulzija, suspenzija i pjena (Herceg i sur., 2009).

Frekvencija je obrnuto proporcionalna veličini mjehurića, povećanjem snage ultrazvuka stvaraju se mjehurići, dolazi do kavitacije te povećanja tlaka i temperature. Dakle povećanjem intenziteta dolazi do pojave kavitacije (Patist i Bates, 2008).

Impedancija (admitancija) zvučnog vala predstavlja omjer zvučnog tlaka i brzine titranja čestica medija, kompleksna je veličina i sastoji se od realnog i imaginarnog dijela. Može se napisati:

$$Z_{sp} = R + jX \quad /2/$$

Gdje R predstavlja specifični akustički otpor (Ns/m^3), a X specifičnu akustičku reaktanciju (Ns/m^3).

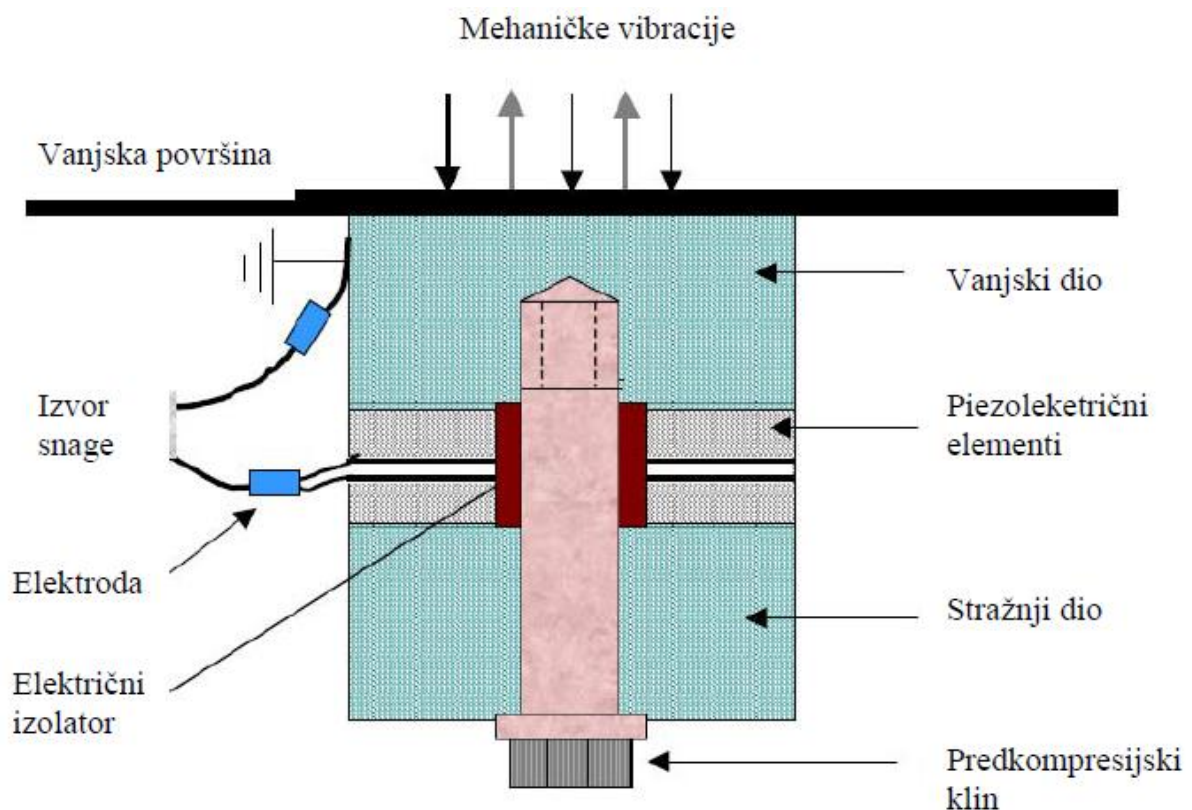
Dolazi do izražaja pri širenju ultrazvuka kroz medij, prilikom prijelaza ultrazvuka iz izvora u pretvornik i obrnuto te pri prijelazu ultrazvuka iz jednog medija u drugi (Petošić, 2008)

2.2. UREĐAJI I SUSTAVI ZA PRODUKCIJU ULTRAZVUKA

Prilikom prolaska ultrazvučnog vala kroz medij dolazi do nastanka longitudinalnih valova koji uzrokuju nastajanje kompresija i ekspanzija dijelova medija. U ovisnosti o primijenjenoj frekvenciji i amplitudi zvučnog vala mogu se postići različiti učinci fizikalni, kemijski i biokemijski učinci. Zvučni val najbolje je postići metodom elektrostriktivne transformacije materijala putem kojeg će se stvoriti val (Režek Jambrak, 2008). Ta se metoda temelji na elastičnoj deformaciji feroelektričnih materijala unutar električnog polja visoke frekvencije, koja je uzrokovana uzajamnim privlačenjem polariziranih molekula u električnom polju. Za polarizaciju molekula primjenjuje se izmjenična struja visoke frekvencije putem dviju elektroda od feroelektričnog materijala. Tada se, nakon konverzije u mehaničko titranje, zvučni valovi prenose do pojačala koji širi zvuk, te konačno do medija koji se tretira (Herceg i sur., 2009). U prehrambenoj industriji najčešće se upotrebljava ultrazvuk pokretan električnom snagom (Režek Jambrak, 2008). Osnovne komponente uređaja koji se koriste za tretiranje ultrazvučnim valovima su generator snage koji osigurava elektricitet pretvaraču na željenoj ultrazvučnoj frekvenciji pretvarajući električnu energiju u mehaničke vibracije (Herceg i sur., 2009). Glavna funkcija generatora snage je pretvaranje standardne električne frekvencije (od 50-60 Hz) u visoko primjenjivu frekvenciju (iznad 20 kHz) koja je potrebna za ultrazvučno prenošenje kroz seriju oscilirajućih, pojačavajućih i podudarnih krugova (Režek Jambrak, 2008). Iduća komponenta koja je potrebna za rad ultrazvuka su ultrazvučni pretvarači koji pretvaraju električnu ili mehaničku energiju u energiju zvuka. Postoje dva osnovna tipa pretvarača koji se upotrebljavaju, a to su magnetostriktivni pretvarač i piezoelektrični pretvarač (Herceg i sur., 2009).

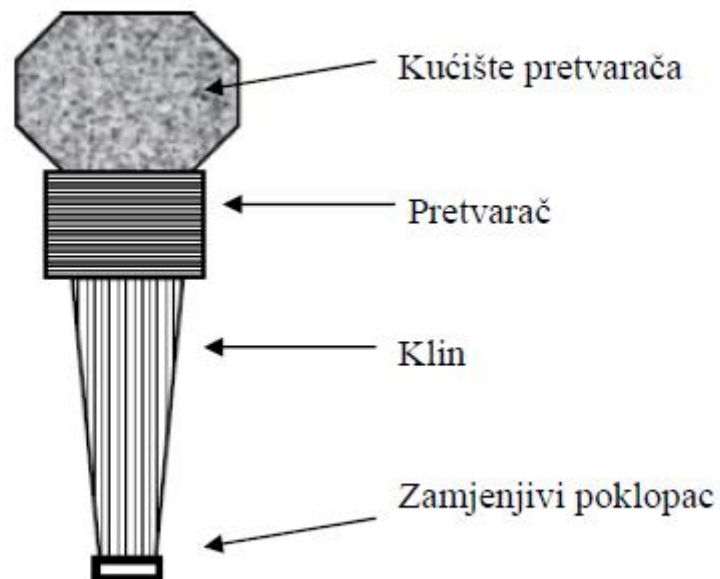
Magnetostriktivni pretvarač je u najjednostavnijem obliku solenoid s navojem sastavljen kao laminat s više slojeva magnetostriktivnih materijala i od jezgre koju čini metalna traka od bakra. Prilikom propuštanja struje kroz navoj, stvara se magnetno polje koje uzrokuje smanjenje dimenzija jezgre, isključivanjem struje jezgra se vraća u svoj prvobitni oblik. Bitno je da je pretvarač čvrsto vezan za membranu jer će bilo kakva praznina između pretvarača i membrane dovesti do gubitka akustične energije zbog zraka koji uzrokuje vrlo nisku akustičnu impedanciju i visoku akustičnu apsorpciju (Režek Jambrak, 2008).

Piezoelektrični pretvarači su najčešće upotrebljavana vrsta pretvarača. Što se tiče njihove konstrukcije upotrebljava se piezoelektrična keramika, koja se širi i skuplja u promjenjivom električnom polju, uzrokujući tlačne valove koji se šire kroz medij. Za primjenu pretvarača zahtijevaju se određena svojstva keramičkog materijala kako bi mogao ostati stabilan u ovisnosti o vremenu, mehaničkom stresu, električnom polju i temperaturi. Budući da su keramički materijali krhki obično se stavljaju u „sendvič“ između bloka metala (slika 3). Uspoređujući ih sa magnetnorestriktivnim pretvaračima, piezoelektrični pretvarači osiguravaju višu elektromagnetsku konverziju. Djelotvornost im je veća od 95% te mogu djelovati u cijelom ultrazvučnom području, malih su dimenzija, lagani i jeftini. Ipak, manje su izdržljivi jer se piezoelektrični materijal s vremenom troši, te će stvorena vibracijska energija biti sve slabija (Herceg i sur., 2009).



Slika 3. Piezoelektrični pretvarač u obliku sendviča (Režek Jambrak, 2008)

Sustavi za produkciju ultrazvuka visoke snage mogu biti dizajnirani u obliku sonde (slika 4). U njemu su jedan ili više metalnih klinova vezani na pretvarač kako bi se osigurao intenzitet visoke snage. Bitno je osigurati točnu amplitudu kretanja vrhova klina, koji ovisi o njegovom obliku i dimenzijama. Za ujednačen cilindrični klin nema porasta amplitude, a klin jednostavno djeluje kao produžetak za prijenos zvučne energije. U nekim slučajevima, ako je potrebno osigurati veći unos ultrazvučne energije moguće je serijski povezati sonde. Za to su potrebni višestruki klinovi kako bi se omogućio veći stupanj pojačanja (Režek Jambrak, 2008).



Slika 4. Ultrazvučna sonda (Režek Jambrak, 2008)

2.3.KAVITACIJA

Pod pojmom kavitacija podrazumijeva se formiranje šupljina u tekućinama. Te su šupljine ispunjene plinovima prethodno otopljenima u tekućini (Petošić, 2008). Prilikom prolaska ultrazvučnog vala tekućim medijem dolazi do nastajanja izmjenični ciklusa ekspanzije i kompresije (Suslick, 1989). Ekspanzioni vrtlozi izazivaju negativne tlakove u tekućini. Kada je taj tlak nizak toliko da svlada intramolekularne sile doći će do formiranja malih mjehurića. Tijekom idućih ciklusa ekspanzije i kompresije mjehurići će se širiti i skupljati. Taj nastanak i formiranje mjehurića plina (slika 5) nazivamo kavitacijom (Herceg i sur., 2009). Mjehurići nastali kavitacijom su nestabilni i osciliraju. Veličina mjehurića će ovisiti o intenzitetu ultrazvuka (Suslick, 1989).



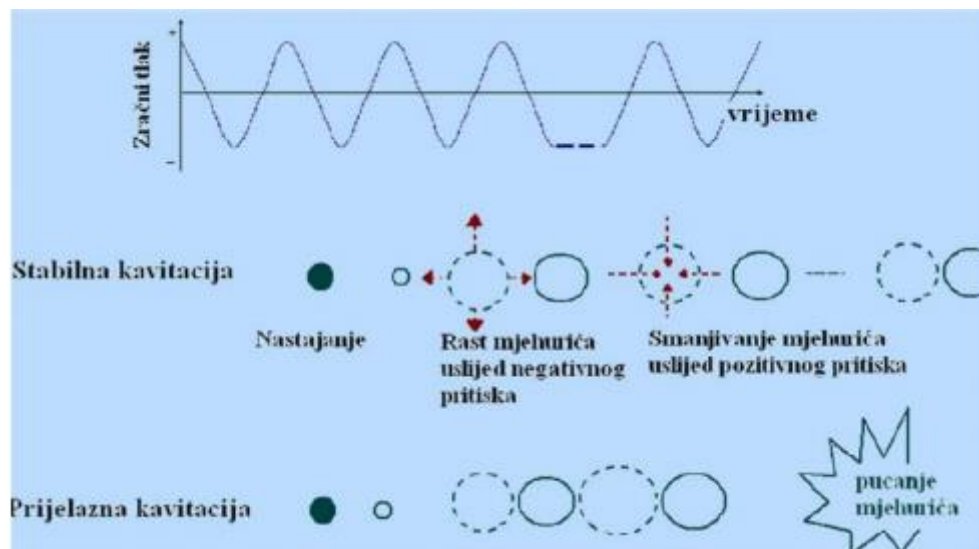
Slika 5. Kavitacijski mjehurić (Suslick, 1989)

Kavitacija koja nastaje djelovanjem ultrazvuka niskog intenziteta, visoke frekvencije od 1 do 10 MHz i male razine snage $> 1\text{W}/\text{cm}^2$ naziva se stabilna kavitacija (slika 4). Jer formirani mjehurići neznatno osciliraju tijekom vrtloga i dolazi do minimalne promjene promjera mjehurića (Herceg i sur., 2009). Ukoliko maksimalni polumjer mjehurića ne prelazi kritičnu vrijednost pod utjecajem vanjskoga dinamičkog tlaka tada mjehurić oscilira kao nelinearni oscilator (Petošić, 2008).

Ultrazvuk djeluje tako da mjehurići vibriraju unutar stabilne kavitacije, uzrokujući jaka mikrostrujanja u tekućem mediju (Herceg i sur., 2009). Frekvencija ultrazvuka je odlučujući faktor kavitacije (Režek Jambrak, 2008). Pri frekvenciji od oko 1 MHz, kavitacija je manje moguća, a na frekvencijama višim od 2,5 MHz neće doći do kavitacije (Herceg i sur., 2009). Prolaskom ultrazvuka visokog intenziteta, koji koristi frekvencije od 20-100 kHz i visoke

razine snage kroz tekući medij dolazi do snažnog osciliranja mjehurića (Herceg i sur., 2009). Kao rezultat oscilacija tlaka u mediju mjehurići osciliraju te uvijek u fazi ekspanzije malo više narastu nego što se smanje tijekom faze kompresije (Drmić i Režek Jambrak, 2010)

Tijekom svakog ciklusa ekspanzije i kompresije veličina mjehurića se stalno povećava. Nakon brojnih ciklusa ekspanzije i kompresije mjehurići dosegne određenu kritičnu veličinu para kondenzira (Herceg i sur., 2009), a mjehurići se urušavaju pri čemu dolazi do nastanka ekstremno velikih temperatura 5500 °C i tlakova do 50 MPa (Ganesan i sur., 2015). To je takozvana prijelazna kavitacija (slika 6) (Herceg i sur., 2009).



Slika 6. Stabilna i prijelazna kavitacija (Kujipers, 2002)

Prag kavitacije ovisi o frekvenciji ultrazvučnog vala, amplitudi i početnom polumjeru mjehurića. Promjene tlaka koje su potrebne da bi došlo do kavitacije ovise o brojnim karakteristikama tekućeg medija kroz koji prolaze kao što su: tlak pare, intramolekularne sile i koncentracija krute tvari, a također ovisi i o udjelu otopljenog plina. Bitni čimbenici su i hidrostatski tlak i temperatura. Visok hidrostatski tlak može uzrokovati difuziju plina i na taj način smanjiti kavitaciju, a isto tako povećanjem temperature se smanjuje kavitacija. Učinak ultrazvuka prilikom procesiranja hrane ovisit će o broju mjehurića i jačini njihove implozije.

Kako bi djelotvornost ultrazvuka bila optimalna potrebno je odabrati odgovarajuće parametre kao što su snaga, amplituda, frekvencija, te obrada pri optimalnoj temperaturi i tlaku (Herceg i sur., 2009).

2.4. TERMODINAMIČKI PARAMETRI

Svaki sustav sadrži određenu količinu energije – unutarnju energiju koja je funkcija stanja tog sustava i uključuje sve moguće oblike energije tog sustava. Kod kemijske reakcije dolazi do promjene unutarnje energije ΔU . Ako se reakcija provodi pri konstantnom volumenu onda sustav ne vrši nikakav rad, promjena unutarnje energije jednaka je toplini reakcije (Filipović i Lipanović, 1973):

$$\Delta U = Q_{(v=konst.)} \quad /3/$$

Ako se reakcija vrši pri konstantnom tlaku onda zbog promjene volumena ΔV sustav vrši rad W protiv tlaka okoline koji je jednak (Filipović i Lipanović, 1973):

$$W = p \Delta V \quad /4/$$

U tom slučaju promjena unutarnje energije jednaka je zbroju oslobođene topline i izvršenog rada ($W < 0$) i ova jednadžba predstavlja prvi zakon termodinamike (Filipović i Lipanović, 1973):

$$\Delta U + p\Delta V = Q_{(p=konst.)} \quad /5/$$

$\Delta U + p\Delta V$ -predstavlja promjenu određene funkcije stanja sustava, koja je jednaka toplini reakcije pri konstantnom tlaku. To je termodinamička funkcija entalpija ili sadržaj topline H .

$$\Delta H = Q_{(p=konst.)} \quad /6/$$

tj. promjena entalpije sustava jednaka je toplini reakcije pri konstantnom tlaku. Odnos između promjene entalpije i promjene unutarnje energije je (Filipović i Lipanović, 1973):

$$\Delta H = \Delta U + p\Delta V \quad /7/$$

Energija koja se pretvori u rad nazivamo slobodnom energijom kemijske reakcije. Dakle, reakcijski rad promjena je funkcije stanja i naziva se Gibbsova slobodna energija. Što je

temperatura sustava veća to je gibanje molekula sustava veće. Mjera za nered molekula je funkcija stanje sustava koja se naziva entropija i označava se sa S, a njezina promjena s ΔS . Dakle, promjena entalpije jednaka je promjeni Gibbsove energije i promjeni vezane energije, tj. umnošku temperature i promjene entropije (Filipović i Lipanović, 1973):

$$\Delta rH = \Delta rG + T\Delta rS \quad /8/$$

Zvučnim se valom prenosi mehanička energija. Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu veličine 1 m^2 , okomito postavljenu na smjer širenja zvuka naziva se intenzitet zvuka (Petošić, 2008). Intenzitet zvuka je direktno proporcionalan kvadratu amplitude i kvadratu frekvencije. Dakle, intenzitet ultrazvuka je snaga po jedinici površine:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P_a}{4\pi \cdot r^2} \quad /9/$$

Općenito:

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho \cdot v \cdot A^2 \quad /10/$$

Gdje je I intenzitet, P je snaga, S je površina, v i p su vrijednosti brzine čestice odnosno tlaka, A je amplituda, c je brzina širenja, ρ_0 je gustoća (Petošić, 2008).

Snaga (P) zvuka definirana je kao količina energije koja u sekundi prostruji kroz površnu veličine S, izražava se vatima (W), te se računa kao umnožak intenziteta i veličine površine na kojoj taj intenzitet djeluje (Petošić, 2008).

Promjene čestica u prostoru moguće je mjeriti kao promjena lokalnoga tlaka. Zvučni val čine naizmjenična zgušnjenja i razrjeđenja čestica u sredstvu u kojem se val širi. Posljedica toga je pravilno mijenjanje tlaka, odnosno uzastopni niz područja višeg i nižeg tlaka. Promjenu tlaka definiramo jednadžbom (Petošić, 2008):

$$p_a = p_{a0} \sin(\omega t - kr) \quad /11/$$

Veličina P_a je akustički tlak (Petošić, 2008).

Najveći problem u analizi parametara koji utječu na pojavu kavitacije je određivanje praga kavitacije tj. minimalnog dinamičkog tlaka, pomaka, isijane akustičke snage ili intenziteta potrebnih da nastane kavitacija u tekućem mediju u kojem su prisutni mjehurići ili zraka ili ishlapljenih para same tekućine.

Osim ovih vrijednosti parametara akustičkog polja koji određuju prag kavitacije potrebno je razmotriti i vrijednosti električnih veličina napona, struje i snage na ultrazvučnom izvoru kojima se postižu vrijednost akustičkih parametara potrebnih za uočavanje pojave kavitacije. Prag pojave efekta kavitacije ovisi o temperaturi medija, količini prisutnih nečistoća u fluidu i o obliku vrha sonde kojom se pobuđuje odnosno tretira medij (slika 7). Dokazano je da se kod vrhova s zaobljenijim krajem teže postiže kavitacijski efekt.



Slika 7. Oblici vrha sonde

a) vrh s oštrim bridovima

b) vrh sa zaobljenim bridovima

Postoji nekoliko uvjeta kako odrediti početak kavitacije, ali najjednostavniji način je vidljivost mjehurića (Petošić, 2008).

Intenzitet ultrazvuka direktno je proporcionalan amplitudi ultrazvučnih valova. Pri većim amplitudama povećava se djelotvornost ultrazvuka tako i opseg veličine mjehurića u tekućini koji podliježu kavitaciji. Amplituda ultrazvučnog vala ima glavni učinak na inaktivaciju mikroorganizama.

Isto tako znatno je veća inaktivacija mikroorganizama povećanjem tlaka. Uzrok toga je veći intenzitet implozije mjehurića, dok je slabiji letalni učinak pri višem statičkom tlaku posljedica smanjenja broja mjehurića koji podliježu kavitaciji (Herceg i sur., 2009).

Povećanjem temperature dolazi do povećanja broja kavitacijskih mjehurića, ali se letalnost ultrazvuka smanjuje pri višim temperaturama, što je posljedica povećanja tlaka pare. Što je veći tlak pare manja je mogućnost kavitacije (Herceg i sur., 2009). Kavitacija se bolje postiže na nižim temperaturama, zbog toga je bitno postići dobar odnos između temperature i kavitacije (Muthukumarantetal i sur, 2006).

Energija koja je potrebna za formiranje mjehurića kavitacije u tekućem mediju je razmjerna površinskoj napetosti i tlaku pare. Zbog toga, što je veća površinska napetost tekućine, biti će veća energija potrebna za stvaranje kavitacijskih mjehurića, a posljedica toga će biti veća energija udarnog vala koji se proizvodi kada mjehurić implodira (Drmić i Režek Jambrak, 2010).

2.5. PRIMJENA ULTRAZVUKA U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI

Kavitacija je fenomen koji izaziva kemijske i fizikalne promjene u različitim prehrambenim sustavima kao na primjer promjene na ugljikohidratima, proteinima, lipidima i drugim komponentama. Kavitacija može djelovati povoljnije pri obradi hrane od konvencionalnih tehnika obrade. Kemijski učinci uzrokovani ultrazvukom ne događaju se zbog interakcije molekula, nego zbog fenomena kavitacije i formiranja kolapsa mjehurića u tekućinama (Awad i sur., 2012).

Procesi u kojima se može primijeniti ultrazvuk:

➤ Čišćenje

Kada mjehurići nastali kavitacijom implodiraju blizu čvrste površine očistit će ju (Awad i sur., 2012). Čišćenje površina se smatra jednom od najraširenijih primjena ultrazvuka. Čišćenje ultrazvukom podrazumijeva vibracije i strujanje tekućine frekvencije 20-200 kHz za uklanjanje čestica i nečistoća s površina (Kentish i Feng, 2014).

➤ Emulgiranje

Ukoliko mjehurić implodira blizu fazne granice dviju tekućina koje se ne miješaju, val koji nastaje može omogućiti učinkovito miješanje slojeva (Herceg i sur., 2009). Emulgiranje ultrazvukom može poboljšati kvalitetu dobivenih proizvoda (Awad i sur., 2012). Osim toga ultrazvuk se može koristiti i za razbijanje emulzija i odvajanja uljne i vodne faze (Kentish i Feng, 2014).

➤ Kristalizacija i zamrzavanje

Dokazano je da ultrazvuk visoke snage poboljšava nukleaciju kristala u otopini pri zamrzavanju. Veličina kristala dobivenih ultrazvučnom obradom je uglavnom manja (Kentish i Feng, 2014). Zbog toga se ultrazvuk može upotrebljavati pri zamrzavanju hrane. Veličina kristala leda uvelike utječe na kvalitetu zamrznutih proizvoda, te je poznato da veliki kristali unutar tkiva uzrokuju mehanička oštećenja materijala i gubitak teksture i na taj način umanjuju kvalitetu proizvoda (Herceg i sur., 2009).

➤ Viskoznost

Pokazalo se da sile smicanja u tekućini izazvane akustičnom kavitacijom djeluju vrlo učinkovito u smanjenju viskoznosti u nizu prehrambenih proizvoda (Kentish i Feng, 2014).

➤ Sprječavanje pjenjenja ili otpjenjavanje

Pjene su termodinamički nestabilni koloidni sustavi u kojima je plinovita faza, kao odvojena faza raspršena u tekućoj fazi. Proces otpjenjavanja podrazumijeva uklanjanje mjehurića i zraka iz tekućine (Awad i sur., 2012).

➤ Sušenje

Sušenje ili dehidracija je najstarija metoda konzerviranja hrane. Temelji se na korištenju toplinske energije, ali unatoč tome toplina uzrokuje nepoželjne promjene okusa, boje i drugih svojstava hrane. Sušenje ultrazvukom je obećavajuća tehnologija jer može biti korištena na niskoj temperaturi (Awad i sur., 2012), ali se u znatnoj mjeri skraćuje vrijeme sušenja (Herceg i sur., 2009), te na taj način neće doći do negativnih promjena i spriječit će se degradacija hrane koja se događa na visokim temperaturama (Awad i sur., 2012).

➤ Filtracija

Ultrazvučna filtracija se primjenjuje kako bi se stupanj protoka kroz membranu povećao (Herceg i sur., 2009).

➤ Homogenizacija

Tretiranje ultrazvukom se pokazalo vrlo uspješno u mljekarskoj industriji za homogenizaciju mlijeka, te je primijećeno da se smanjuju veličine globula mliječne masti (Herceg i sur., 2009).

➤ Depolimerizacija

Za proces depolimerizacije odgovorna je kavitacija, te se taj proces može opisati kroz dva mehanizma. Jedan od njih je mehanička degradacija polimera uzrokovana implozijom mjehurića, a drugi je kemijska degradacija kao rezultat kemijskih reakcija između polimera i molekula poput radikala nastalih tijekom procesa kavitacije (Chemat i sur., 2011).

➤ Rezanje

Upotreba ultrazvuka u rezanju hrane poboljšava cjelokupnu obradu hrane. Te se na taj način može smanjiti gubitak i troškovi rezanja (Chemat i sur., 2011). Tijekom rezanja ultrazvukom energija ultrazvuka djelomično topi materijal, ne zahtjeva oštar rub noža ni primjenu velikog pritiska (Kentish i Feng, 2014).

➤ Ekstrakcija

Ultrazvuk visoke snage zbog djelovanja kavitacije na stanični materijal dovodi do oštećenja stanične stjenke i omogućen je lakši prolaz otapala u materijal te je povećan i prijenos mase. Pucanjem staničnih stjenki dolazi do direktnog kontakta sa sadržajem stanice i ubrzava se ekstrakcija i povećava se njezina efikasnost (Drmić i Režek Jambrak, 2010).

2.5.1. Interakcija ultrazvuka i bioloških sustava

Ultrazvuk se može primjenjivati u svrhu inaktivacije mikroorganizama te na taj način očuvanja i produženja sigurnosti hrane (Kentish i Feng, 2014). Pasterizacija i sterilizacija su toplinske tehnike koje se obično upotrebljavaju u inaktivaciji mikroorganizama u hrani. Ipak učinkovitost ovih metoda zahtjeva dugotrajno izlaganje visokim temperaturama što dovodi do nepoželjnih učinaka na funkcionalna i senzorska svojstva hrane, ali i na prehrambenu vrijednost hrane (Awad i sur., 2012). Letalan učinak ultrazvuka niskog intenziteta je malen pa je za mikrobnu inaktivaciju odgovoran ultrazvuk visokog intenziteta (Herceg i sur., 2009). Ultrazvuk visoke snage je ekološki prihvatljiv i ekonomičan, smanjuje se trajanje procesa te ima mnoge prednosti u odnosu na toplinsku sterilizaciju, kao što su minimalni gubici okusa u sokovima, veća homogenost i značajne uštede energije (Awad i sur., 2012). Ekstremno visoke temperature i tlakovi koji nastaju kolapsom mjehurića mogu uzrokovati disocijaciju vodene pare na OH^- i H^+ ione. Ti radikali smatraju se odgovornima za inaktivaciju bakterijskih stanica oksidacijom (Herceg i sur., 2009). Šok valovi koji nastaju implozijom mjehurića koji podliježu kavitaciji smatraju se najvažnijim razlogom inaktivirajućeg učinka mikroorganizama (Herceg i sur., 2009). Svi navedeni mehanizmi kavitacije će uzrokovati oštećenja stanične stjenke i stanične membrane, samim time dolazi do smrti stanice (Kentish i Feng, 2014). Stopa smrtnosti mikroorganizama ovisna je o frekvenciji, amplitudi i volumenu bakterijske suspenzije. Frekvencija od oko 20 kHz se obično primjenjuje za mikrobnu

inaktivaciju, ali otpornost prema ultrazvuku se razlikuje za pojedine mikroorganizme (Awad i sur., 2012). Čimbenici koji utječu na inaktivaciju mikroorganizama tijekom obrade ultrazvukom su temperatura, amplituda, vrijeme izloženosti, vrsta mikroorganizama, volumeni sastav hrane koja se obrađuje. Korištenjem većih amplituda dolazi do povećanja stope smrtnosti, a razlog tome je povećani broj mjehurića koji nastaju tijekom kavitacije pri većim amplitudama (Ganesan i sur., 2015). Obrada ultrazvukom je ne toplinska tehnika obrade hrane koja je vrlo učinkovita u inaktivaciji mikroorganizama i enzima, koji mogu utjecati na degradaciju proizvoda, pa se na ovaj način omogućava obrada termički osjetljive hrane (Fonteles i sur., 2012).

Jedan od ciljeva prerade hrane je i smanjiti aktivnost nekih enzima koji dovode do razgradnje pojedinih komponenata i smanjenja kvalitete hrane (Kentish i Feng, 2014). Ultrazvuk proizvodi izmjenične cikluse ekspanzije i kompresije što nazivamo akustičnom kavitacijom (Fonteles i sur., 2012). Inaktivacija enzima se pripisuje djelovanju kavitacije. Sile smicanja koje nastaju uslijed kavitacije će uzrokovati razgradnju vodikovih veza i Van der Waalsovih sila (Kentish i Feng, 2014), stvaraju se visoke temperature i tlakovi pri čemu dolazi do smicanja i snažnog mikrostrujanja (Fonteles i sur., 2012) što dovodi do modifikacije strukture proteina, te će enzimska aktivnost biti izgubljena (Kentish i Feng, 2014). Peroksidaza i polifenoloksidaza su enzimi koji se nalaze u hrane i uzrokuju enzimsko posmeđivanje i gubitak nutritivne vrijednosti, oni se inače inaktiviraju toplinom pri čemu dolazi do gubitka nutritivne vrijednosti (Fonteles i sur., 2012).

3. EKSPERIMENTALNIO DIO

3.1. MATERIJALI

Ovo istraživanje je provedeno koristeći ultrazvuk visoke snage pri obradi tri različita uzorka voda, sok i mlijeko. Voda je korištena direktno iz vodovodne mreže. Sok je 100% voćni sok od jabuke (Juicy, Jamnica d.d. Zagreb). Svježe mlijeko 'z bregov 3,2% mliječne masti, (Vindija d.d. Varaždin).

3.2. METODE

Uređaj za tretiranje ultrazvukom visoke snage korišten je ultrazvučni procesor SONICATOR S-4000, (Misonix Sonicators, Newtown, Connecticut, SAD). Karakteristike procesora su 600 W maksimalne izlazne snage, frekvencije 20 kHz, 100-240 V strujnog napona, 50-60 Hz frekvencija strujne mreže (slika 8).



Slika 8. Ultrazvučni procesor, model S-4000, Misonix Sonicators

Korištene su ultrazvučne sonde promjera 12,7 i 19,1 mm koje daju različitu isijavajuću površinu. Amplitude koje su korištene su za sondu promjera 12,7 mm od 1,2; 12; 60; 90 i 120 mikrometara odgovara postocima amplitude od 1%, 10 %, 50%, 75% i 100%; sonda promjera 19,1 mm od 0,6; 6; 30; 45 i 60 mikrometara što odgovara postocima amplitude od 1%, 10%, 50%, 75% i 100%.

Posude korištene u eksperimentu su velika od 400 mL u koju je stavljeno 250 mL uzorka i mala posuda od 250 mL u koju je stavljeno 150 mL uzorka. Svaki uzorak, voda, sok i mlijeko su tretirani u velikoj i maloj posudi koristeći ultrazvuk visokog intenziteta pri amplitudama u trajanju od 3,6 i 9 minuta (9 min samo za amplitudu od 75%). Ultrazvučna sonda (promjera 12,7 mm) korištena u maloj čaši u kojoj je 150 mL uzorka uronjena je do dubine 1,5 cm u čašicu s uzorkom. Ultrazvučna sonda korištena za tretiranje u velikoj posudi je promjera 19,1 cm, a uronjena je u čašicu s uzorkom da dubine 2 cm.

Mjerenja su napravljena vanjskim uređajem pobude u svrhu karakterizacije sonoreaktora i nelinearne efekte ispod praga kavitacije i unutarnji uređaj pobude za karakterizaciju sonoreaktora u realnim uvjetima rada (Petošić, 2008).

Pri malim pobudnim snagama sonde ispod i na pragu kavitacije korišten je uređaj Keysight 33500 B-serijski valni generatori Ciprian SAD-TXP-4RF pojačalo snage. Generator je postavljen na izlazu iz kontinuiranog sinusnog signala s frekvencijom 19800 Hz, a to je frekvencija pobude odabrana od strane proizvođača. Za pobudu sonde ispod praga kavitacije za mjerenje impedancijske spektroskopije korišteno je isto pojačalo snage, zajedno s BODE Omicron 100 analizatorom implementiranim u programirano sučelje MATLAB. Impedancijska spektroskopija je korištena za mjerenje električne impedancije u opterećenim i neopterećenim uvjetima na niskoj razini pobude, bez kavitacije u mediju. Elektroakustična učinkovitost u ovim uvjetima je računata korištenjem jednadžbe (Petošić, 2008):

$$\eta_{ea} = \frac{P_{zr}}{P_{zr} + P_{mg} + P_d} = \frac{R_{zr} \cdot R_0}{R_0 \cdot (R_{zr} + R_{mg}) + 1} \approx \frac{R_{zr}}{(R_{zr} + R_{mg})} \quad /12/$$

η_{ea} definira se kao omjer isijane akustičke snage prema ukupnoj privedenoj električnoj snazi (na rezonantnoj frekvenciji).

Pri većim razinama pobude sonde došlo je do pojave kavitacije što je postignuto korištenjem uređaja Sonicator S-4000 MISONIX dizajniran da odgovara elektromehaničkim svojstva MISONIX sonde. Frekvencija pobude je 19800 Hz, što je blizu, ali i dalje izvan rezonancije u blizini najnižeg rezonantnog moda. Uređaju pobude mogu se programirati i omogućiti različite načine tretiranja medija koji se unaprijed moraju odrediti, s obzirom na amplitudu, tj ulaznu snagu i trajanje tretiranja (Petošić, 2008).

Električni parametri koji su praćeni, mjereni i snimani tijekom tretiranja su napon preko sonde i struja koja kroz nju prolazi tijekom rada. Zbog visokih radnih napona koji dosežu 800 V_{rms} napon se smanjuje korištenjem Keysight100:1 napona sonde. Struja je mjerena korištenjem strujne sonde Tektronixu kombinaciji s odgovarajućim pojačalom. Praćen je i akustični tlak unutar medija koristeći hidrofona Bruel&Kjaer 8103 koji je spojen na ulaz za punjenje Bruel&Kjaer Nexus predpojačala. Električni signal, koji predstavlja akustični tlak, a dobiven je na ovaj način je ispravljen u fazi obrade podataka, u obzir je uzet frekvencijski odziv od hidrofona i predpojačala.

Termodinamički parametar koji je mjereno tijekom ispitivanja je temperatura medija prije, tijekom i nakon tretmana. Temperatura je mjerena samo pri visokim razinama pobude, dok su ostali parametri mjereni u svim radnim uvjetima. Za mjerenje temperature i snimanje podataka korišten je vodootporni senzor temperature koji je spojen na računalo zajedno s odgovarajućim logging softverom.

Za mjerenje i praćenje napona, struje i akustičnog tlaka korišten je Keysight MSO-X 3024A osciloskop. Podaci su tada prikupljeni u obliku odgovarajućih valnih oblika pomoću prijenosnog računala i Keysight softvera. Faza obrade podataka je napravljena u MATLAB. Srednja vrijednost napona i struje izražava se kao RMS (Root-mean-square). Spektar napona i struje je izračunat iz njihovih valnih duljina zajedno s njihovim RMS vrijednostima, fazni pomak između napona i struje te RMS ulazne električne energije. Bilo je moguće dobiti apsolutni akustički tlak korištenjem Nexus predpojačala. Kalibracija je napravljena tako se postavila ulazna osjetljivost pojačala koja odgovara osjetljivosti hidrofona, a izlazna osjetljivost je postavljena na poznatu vrijednost kako bi se izbjeglo preopterećenje. Osim RMS vrijednosti akustičkog tlaka, zabilježene su i minimalne i maksimalne vrijednosti akustičkog tlaka (Petošić, 2008).

Prilikom prolaska ultrazvuka kroz medij, ultrazvučna snaga koja se smatra mehaničkom energijom dijelom se gubi u obliku topline. Kako ultrazvučno zračenje tekućine proizvodi toplinu, iz razmatranja temperature kao funkcije vremena proizlazi jednadžba akustične snage (W) (Režek Jambrak i sur., 2009a):

$$P = m \cdot C_p \cdot (dT / dt)_{t=0} \quad /13/$$

gdje je: m - masa tekućine tretirane ultrazvukom (kg), Cp - specifična toplina tekućine pri konstantnom tlaku (J/gK) i dT/dt - nagib krivulje (t = 0). Jednadžba se izražava u vatima po jedinici emitirane površine (W/cm²) ili u vatima po jedinici volumena tekućine tretirane ultrazvukom (W/cm³). Porast temperature za vrijeme tretmana ultrazvukom mjeren je s termočlankom i nakon toga je intenzitet ultrazvuka izražen u W/cm². Na osnovu izmjerenih podataka ultrazvukom visoke snage (snaga), površine sonde i volumena uzorka izračunat je intenzitet i gustoća snage za sonde od 12,7 mm i 19,1 mm prema izrazima (Režek Jambrak i sur., 2010b):

$$AI = \frac{P}{A} \quad /14/$$

$$\delta = \frac{P}{V} \quad /15/$$

gdje je: AI - ultrazvučni intenzitet (W/cm²), P - ultrazvučna snaga (W), A - površina sonde (cm²), δ - gustoća snage (W/cm³), P - ultrazvučna snaga (W) i V - volumen uzorka (cm³).

Prije svih izračuna potrebno je znati toplinski kapacitet Cp, za svaku tekućinu, odnosno uzorak, jer je Cp različit za svaku tekućinu u ovisnosti od sastava tekućine i razlikuje se u temperaturi. Primjer za toplinski kapacitet vode kojeg možemo pisati kao:

$$Cp = R * (A + B.T + C.T^2) \quad /16/$$

Gdje je:

$$R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}; A = 8,71; B = 1,25 * 10^{-3} \text{ K}^{-1}; C = -0,18 * 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

Međutim, između 20 i 50 stupnjeva toplinski kapacitet se promijenio, s 4,18 na 4,20 J.g⁻¹.K⁻¹, pa je uzeta vrijednost 4,18J.g⁻¹.K⁻¹ s pretpostavkom da je konstantna s tom malom razlikom temperature.

Za mlijeko i sok od jabuke vrijednosti toplinskog kapaciteta predložene u literaturi su:mlijeko 3,77 J.g⁻¹.K⁻¹ i sok 3,64 J.g⁻¹.K⁻¹.

Entalpija je računata prema sljedećem izrazu:

$$\Delta H = \int C_p \cdot dT \quad /17/$$

$$H = 8,314 \left[\left(A \cdot (T_2 - T_1) + \frac{B}{2} \right) \cdot (T_2^2 - T_1^2) + \left(\frac{C}{3} \right) \cdot (T_2^3 + T_1^3) \right] \quad /18/$$

Entropija je računata prema sljedećem izrazu:

$$\Delta S = \int \frac{C_p}{T} \cdot dT \quad /19/$$

$$S = 8,314 \left[A \cdot \ln(T_2 - T_1) + B(T_2 - T_1) + \left(\frac{C}{2} \right) (T_2^2 - T_1^2) \right] \quad /20/$$

Gdje je Cp izračunat na sljedeći način:

$$C_p = (A + B \cdot T + C \cdot T^2) \cdot R \quad /21/$$

3.2.1. Kalorimetrijska metoda

Kalorimetrijskom metodom određivana je izlazna akustična snaga (P_a). Kalorimetrijska metoda temelji se na apsorpciji ultrazvučne energije u tekućini i njenom zagrijavanju. Kalorimetrijska metoda je najopćenitija metoda za mjerenje akustičke snage u nelinearnom načinu rada ultrazvuka (UZ) izvora zbog toga što obuhvaća i akustičku i toplinsku energije koja se oslobađa prilikom nelinearnih efekta poput kavitacije i strujanja ispod vrha sonotrode.

Energija titranja vrha sonotrode na jednoj frekvenciji se rasprši na široko frekvencijsko područje zbog prisustva nelinearnih efekata (vidjeti spektar mjenenog zvučnog tlaka). Kod kalorimetrijskog mjerenja moraju se uzeti u obzir korekcije zbog izmjene toplinske energije sa okolinom (gubici nesavršenog kalorimetrijskog sustava).

Prilikom proučavanja toplinskih promjena nekog sustava mjeri se promjena unutrašnje energije kalorimetrijskog sustava. Unutrašnja energija predstavlja ukupnu kinetičku i potencijalnu energiju atoma ili molekula koji čine tvar koju hladimo ili zagrijavamo. Unutrašnja energija se može promijeniti dovođenjem ili odvođenjem topline iz sustava, obavljanjem rada na sustavu ili kad sustav sam vrši rad (Petošić, 2008). Matematički se piše u diferencijalnom obliku:

$$dU = dW + dQ \quad /22/$$

dU [J]- promjena unutrašnje energije sustava;

dQ [J]- dovedena ili odvedena količina topline;

dW [J]- rad koji sam sustav obavlja ili rad koji je izvršen na sustavu (način određuje predznak) (Petošić, 2008).

U kalorimetrijskim sustavima korištenim u mjerenjima mijenja se temperatura sustava (tekućina, posuda i mjerna oprema) razlog je apsorpcija akustičke energije u prostoru čije su dimenzije manje od valne duljine. Temperaturno polje zbog miješanja medija i prisutnosti radijacijske komponente zvučnog tlaka je homogeno, a to znači da svi parametri kalorimetrijskog sustava promjene temperaturu jednako. Najvažnija pretpostavka jest da je temperaturno polje unutar kalorimetra homogeno. To se lako postiže pri većoj pobudnoj snazi ultrazvučnog izvora jer se pojavljuju nelinearni efekti (akustičko strujanje i kavitacija) koji vrlo dobro miješaju vodu. Promjena unutrašnje energije sustava, ako se dovodi toplina, dana je izrazom (Petošić, 2008):

$$\Delta U = \Delta Q = \sum_{i=1}^N m_i \cdot c_i \cdot \Delta T \quad /23/$$

m_i [kg]- masa svakog pojedinačnog dijela kalorimetrijskog sustava;

c_i [J/kg °C]- specifični toplinski kapacitet pojedinog dijela kalorimetrijskog sustava;

ΔT [°C]- ukupna promjena temperature u sustavu;

N - broj elemenata korištenih u sustavu

Osim specifičnog toplinskog kapaciteta upotrebljava se i ukupni toplinski kapacitet sustava (C_{sis}) koji dobijemo množenjem pojedinačne mase elementa s njegovim specifičnim toplinskim kapacitetom prema izrazu (Petošić, 2008):

$$C_{sis} = m_i \cdot c_i \quad /24/$$

Mjereći ukupnu promjenu temperature i uz dobro poznavanje parametara sustava s točno definiranim vremenom djelovanja Δt , izlazna akustička snaga se lako računa prema izrazu (Petošić, 2008):

$$P_a = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot c_i \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad /25/$$

P_a [W]- izlazna akustička snaga;

Δt [s]- vrijeme trajanja mjerenja.

Ovo razmatranje vrijedi ukoliko je sustav bez gubitaka potpuno toplinski izoliran od okoline (Petošić, 2008).

3.2.2. Metoda određivanja koeficijenta elektroakustičkog iskorištenja

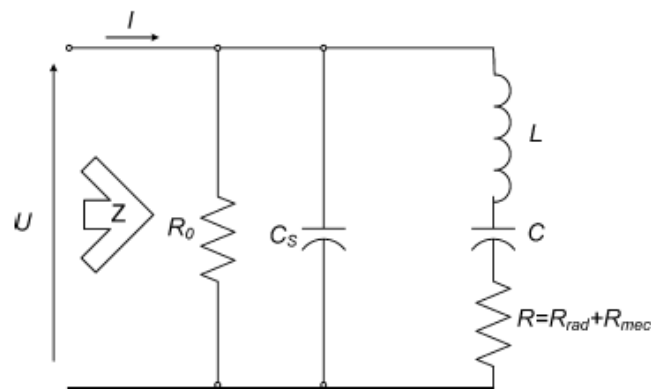
Metoda određivanja korisnosti elektroakustičke pretvorbe iz elektromehaničke karakterizacije se radi mjerenjem električne impedancije (admitancije) opterećenog i neopterećenog pretvarača u okolini rezonantne frekvencije razmatranog moda titranja pretvarača. Rezultati vrednovanja elektromehaničkog dijela ultrazvučnog izvora dobiveni su mjerenjem parametara ulazne električne admitancije (impedancije). Iz ulazne električne impedancije u opterećenom i neopterećenom stanju izračunat je koeficijent elektroakustičkog iskorištenja. Ulazna električna impedancija ovisi o razini pobude i karakteristikama akustičnog polja unutar

komplekse geometrije u kojoj se nalazi izvor. Analizirana je promjena rezonantne frekvencije, maksimalne struje i ulazne električne vodljivosti na rezonantnoj frekvenciji elektromehaničkog sustava pri različitim razinama pobude (napon na pretvaraču). To je napravljeno s obzirom na razinu pobudnog naponskog signala s kojim se izvodi mjerenje ulazne električne impedancije (Petošić, 2008). Pojačalo snage u mjernom sustavu omogućuje mijenjanje razina pobudnog napona i mjerenje parametara ulazne električne admitancije (impedancije) pri različitim pobudnim razinama. Prema nadomjesnom RLC modelu karakteristika ulazne električne admitancije odgovara isijanoj akustičkoj snazi. Postupak je taj da se ulazna električna impedancija prvo mjeri u cijelom frekvencijskom području uz odgovarajuću frekvencijsku rezoluciju. Osim rezonantne frekvencije debljinskog moda titranja uočava se mnoštvo drugih rezonantnih frekvencija. Nadomjesnu shemu treba nadopunjavati odgovarajućim parametrima u okolini drugih rezonantnih frekvencija (Petošić, 2008).

Ulazna električna impedancija se mjeri oko serijske rezonantne frekvencije u linearnom načinu rada, sa svim elementima pretvarača i zajedno s medijem. Serijska rezonantna frekvencija je frekvencija gdje električna vodljivost i pomak vrha imaju maksimalnu vrijednost jer se tu najveća snaga isijava u opteretni medij. U IEC 61088 Standard nazivna RMS vrijednost napona za karakterizaciju piezokeramičkog ultrazvučnog uređaja $U=1V$. U ovom slučaju pojačalo snage se koristi za povećanje razine pobude i ispitivanje ponašanja ultrazvučnog uređaja oko serijske rezonantne frekvencije na višim razinama pobude te razmatranja što se događa sa admitancijom kada je prisutna jaka kavitacijska aktivnost ispod vrha sonotrode. Naime kada se pojavi snažni efekt kavitacije ispod vrha sonotrode dolazi do promjene efektivne gustoće i brzine širenja zvučnog vala te se promijeni impedancija zračenja opteretnog medija. Ta pojava se preko elektromehaničkog transformatora preslikava u električni krug te se može vidjeti kako kavitacijska aktivnost utječe na opteretnu električnu admitanciju, pomak vrha sonotrode i tlak.

Ulazna električna impedancija (admitancija) određuje se kao odnos napona i struje (struje i napona) kroz piezokeramički element u frekvencijskom području oko serijske i paralelne rezonantne frekvencije u linearnom načinu rada. Paralelna rezonantne frekvencija definira se kako frekvencija na kojoj je stvarni dio ulazne električne impedancije ima maksimalnu vrijednost. RLC je oznaka za električni titrajni krug, zamišljen kao serijski spoj idealnog

otpornika (R), idealne zavojnice (L) i idealnog kondenzatora (C). Ultrazvučni uređaj se sastoji od aktivnog i pasivnog vibracijskom dijela i može se opisati s jednostavnim RLC ekvivalentnim strujnim krugom prikazan na slici 9. Mehanički elementi s kompleksnom impedancijom zračenja predstavlja neopterećeni medij koji je transformiran u krugu ultrazvučnog uređaja koristeći elektromehanički transformator. Parametri ekvivalentnog električnog kruga su određeni usklađivanjem izmjerene ulazne električne impedancije s ulaznom električnom impedancijom teorijskog modela RLC što je prikazano na slici 9. (Petošić i sur., 2011).



Slika 9. Ekvivalentni RLC strujni krug opterećenog i neopterećenog ultrazvučnog uređaja (Petošić i sur., 2011)

Ultrazvučni pretvarač pretvara energiju između električnih, mehaničkih i akustičnih oblika koji se mogu tretirati kao mreža s tri priključka koji povezuje akustične veličine na dva priključka (sprijeda i straga) na električni priključak. Stražnji vibrirajući dio je u zraku i ima duljinu četvrtinu valne duljine i predstavlja otvoreni mehanički strujni krug ($Z \rightarrow \infty$) za piezokeramičke elemente kada je pretvarač predstavljen s koncentriranim mehaničkim elementima. Konstrukcija prednjeg dijela pretvarača osigurava maksimalan pomak vrha na željenoj rezonantnoj frekvenciji. Ako se želi smanjiti radna frekvencija potrebno je smanjiti dimenzije pretvarača koji radi kao rezonator .

Induktivitet L u RLC ekvivalentnom električnom krugu elektromehaničkog analoga predstavlja učinkoviti vibrirajući materijal koji je dio uređaja. Kod opterećenog pretvarača

masa medija također vibrira s vrhom i uzrokuje povećanje efektivne vibracije materijala i smanjenjem serijske rezonantne frekvencije. Kapacitet C u ekvivalentnom električnom krugu predstavlja efektivnu elastičnost elemenata pretvarača. Električna energija se troši na elektromehaničke gubitke koji predstavljaju R_{mec} i na otpor isijavanja R_{rad} . R_{mec} predstavlja ukupne gubitke u piezokeramičkim elementima, vibrirajuće materijale i sondu. R_0 i C_s označavaju ekvivalentni otpor i kapacitet izmjeren na frekvenciji do 1 kHz dok je uređaj izvan rezonancije i vrh vibrira s neznomatnom magnitudom uspoređujući s pomakom magnitude longitudinalne vibracije na serijskoj rezonantnoj frekvenciji. Korištena električna energija P_{EL} u RLC ekvivalentnom električnom krugu, se raspršila u dielektrične gubitke R_0 , mehaničke gubitke R_{mec} i otpornost na isijavanje R_{rad} . Uz pretpostavku da je RMS vrijednost pobudnog signala U , energija raspršivanja na dielektrične gubitke dana je kao (Petošić i sur., 2011):

$$P_0 = \frac{U^2}{R_0} \quad /26/$$

Energija koja se raspršila u R_{mec} i R_{rad} dana je u sljedećim jednadžbama (Petošić i sur., 2011):

$$P_{mec} = \frac{U^2 R_{mec}}{(R_{mec} + R_{rad})^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad /27/$$

$$P_{rad} = \frac{U^2 R_{rad}}{(R_{mec} + R_{rad})^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad /28/$$

Na serijskoj rezonantnoj frekvenciji ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$) pojednostavljeno je na sljedeći način (Petošić i sur., 2011):

$$P_{mec} = \frac{U^2 R_{mec}}{(R_{mec} + R_{rad})^2} \quad /29/$$

$$P_{rad} = \frac{U^2 R_{rad}}{(R_{mec} + R_{rad})^2} \quad /30/$$

Elektroakustički faktor iskorištenja η_{eaEQ} u ovoj metodi je definiran kao omjer snage raspršene na otporu isijavanja, P_{rad} raspršeno na R_{rad} , primjenom električne energije P_{EL} u elektromehanički sustav ($\eta_{eaEQ} = P_{rad}/(P_{rad} + P_{mec} + P_0)$). Uz navedene pojmove definirana je jednadžba za elektroakustički faktor iskorištenja (Petošić i sur., 2011):

$$\eta_{eaEQ} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{mec} + \frac{(R_{mec} + R_{rad})^2}{R_0}} \quad /31/$$

Uz pretpostavku da je $R_{mec} + R_{rad} \gg \frac{(R_{mec} + R_{rad})^2}{R_0}$ dobivamo pojednostavljenu jednadžbu (Petošić i sur., 2011):

$$\eta_{eaEQ} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{mec}} \quad /32/$$

Kada vrh sonde djeluje u zraku pretpostavlja se da se sva energija raspršila u R_{mec} i da energija slabije isijava u opterećenom mediju uzrokujući da je $R_{rad} \approx 0$. Realni dio ulazne admitacije ima maksimum na serijskoj rezonantnoj frekvenciji i mehanički gubici otpora R_{mec} se određuju iz mjerenja ulazne električne impedancije u zraku, pa je izraz za serijsku rezonantnu frekvenciju dan kao (Petošić i sur., 2011):

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad /33/$$

Kada je vrh sonde opterećen, pomak vrha i provodljivost na serijskoj rezonantnoj frekvenciji se smanjio i stvarni dio električne impedancije se povećava zbog povećanja otpora isijavanja transformiranog u električni krug. Budući da je poznat stvarni dio električne impedancije na

serijskoj rezonantnoj frekvenciji opterećenog uređaja $R=R_{\text{rad}}+R_{\text{mec}}$, a gubici mehaničke otpornosti R_{mec} mjereni su u neopterećenim uvjetima, otpor isijavanja R_{rad} u ekvivalentnom RLC krugu opterećenog uređaja se lako može odrediti kao $R_{\text{rad}}=R-R_{\text{mec}}$. Induktivitet L i kapacitet C ekvivalentnog kruga su određeni mjerenjem serijske rezonantne frekvencije (17), mjerenjem statičkim kapacitetom C_s i mjerenjem paralelne rezonantne frekvencije koja je definirana kao (Petošić i sur., 2011):

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C+C_s}{LC C_s}} \quad /34/$$

RLC nadomjesni model je valjan za malu pobudnu električnu snagu to jest kada nema nelinearnih efekata u pretvaraču i okolnom mediju. Postoji problem određivanja elektroakustičkog koeficijenta iskorištenja ovakvom metodom u malom sonoreктору jer vrijednosti električne admitancije ovise o mjestu gdje se izvor nalazi u reaktoru jer na impedanciju zračenja preslikanu u električni krug djeluje utjecaj stojnih valova. Tako da ovisno o poziciji pretvarača u malom sonoreктору se dobiju različite vrijednosti impedancije zračenja preslikane u električni krug kao i koeficijenta elektroakustičkog iskorištenja. Zbog toga se prešlo na određivanje ulazne električne impedancije (admitancije) u velikoj posudi da se smanji utjecaj stojnih valova kod malih razina pobude. Kod većih razina pobude situacija je još kompliciranija jer se pojavljuju nelinearni efekti kavitacije (oscilacije mjehurića pod utjecajem ultrazvuka) i akustičko strujanje. To značajno utječe na povećanje mjerene impedancije oko pobudnog moda opterećenog pretvarača. Zbog velike promjene mjerene admitancije u kompleksnom polju zbog utjecaja stojnih valova i nelinearnih efekata (koja je direktno proporcionalan isijanoj akustičkoj snazi) prešlo se na mjerenje prostorne raspodjele zvučnog tlaka u nekoliko točaka i određivanje vremena odjeka (preslikavanje analogije iz akustike prostora) te proračun akustičke snage pod pretpostavkom da se tlak u točkama malo mjernja (barem njegova RMS vrijednost) dok je promjena kada se razmotre frekvencijske komponente dosta velika.

3.2.3. Metoda mjerenja prostorne raspodjele tlaka u malom sonoreктору i određivanja isijane akustičke snage

Mjerenje prostorne raspodjele tlaka u sonoreктору i određivanje isijane akustičke snage provedeno je za sva tri ispitivana medija.

Metoda mjerenja prostorne raspodjele tlaka unutar medija u sonoreктору temelji se na uzorkovanju tog tlaka u nekoliko diskretnih točaka. Volumen vrha sonotrode uronjenog u medij kao izvora ultrazvuka, kao i volumen hidrofona kojim mjerimo ultrazvučni tlak u mediju nije zanemariv u odnosu na volumen medija u sonoreктору pa je izbor mjernih točaka u kojima će se uzorkovati ultrazvučni tlak ograničen. Sonotroda kao generator ultrazvučnog signala pobuđena je pripadnim uređajem Misonix Sonicator 4000 na frekvenciji bliskoj frekvenciji serijske rezonancije najnižeg moda. Pobudna frekvencija, ovisno o mediju i uvjetima, kreće se u rasponu od 19 750 – 20 000 Hz. Zvučni tlak mjereno je hidrofonom Bruel&Kjaer Type 8103 i preko pripadnog pretpojačala Bruel&Kjaer Nexus doveden na osciloskop Agilent MSO-X 3024A radi mjerenja njegove efektivne vrijednosti i pohrane valnog oblika (Petošić i sur., 2011).

Mjerenje zvučnog tlaka provedeno je u šest nasumično izabranih točaka unutar medija u sonoreктору, s tim da je pri mjerenju pomicala i sonotroda kao izvor signala i hidrafon kao prijemnik. U vodi je raspodjela tlaka mjerena na četiri postavke amplitude na pogonskom uređaju Misonix, i to 1, 50, 75 i 100, dok su mjerenja u soku i mlijeku provedena na postavkama amplitude 1 i 50. Efektivne vrijednosti tlaka dobivene su izravno na osciloskopu uz kalibraciju cijelog prijemnog dijela mjernog sustava. Radi potvrde dobivenih vrijednosti, pohranjeni valni oblici dodatno su analizirani u programskom paketu MATLAB. Iz dobivenih su vrijednosti izračunane srednje vrijednosti zvučnog tlaka i pripadne standardne devijacije te, dodatno, postotne vrijednosti standardnih devijacija u odnosu na pripadne srednje vrijednosti kao mjera relativnog rasipanja zvučnog tlaka (Petošić i sur., 2011).

Određivanje isijane akustičke snage provedeno je uz pretpostavku postojanja difuznog ultrazvučnog polja unutar medija u sonoreктору. Uz tu pretpostavku može se primijeniti analogija s metodom mjerenja koja se primjenjuje za izvore čujnog zvuka, u kojoj se akustička snaga nekog izvora određuje posredno, poznavanjem vrijednosti zvučnog tlaka u

difuznom polju te vremena odjeka kao osnovnog pokazatelja akustičkih uvjeta u prostoriji, odnosno u sonorektoru (Petošić i sur., 2011).

Uz već dobivene efektivne vrijednosti zvučnog tlaka, potrebno je izmjeriti i vrijeme odjeka u mediju unutar sonorektora i samih rubnih ploha sonorektora u kojima se apsorbira zvučna energija (i ponovno emitira u okolni prostor). Inicijalna mjerenja provedena su uz sonotrodu kao izvor ultrazvučnog signala, no, kasnije je zaključeno da je zbog predugog impulsnog odziva sonotrode potrebno zamijeniti je hidrofonom koji može poslužiti i kao odašiljač, a ima dovoljno kratak impulsni odziv. Stoga su konačna mjerenja provedena metodom dva hidrofona, od kojih jedan služi kao izvor, a drugi kao prijemnik. Oba korištena hidrofona su Bruel&Kjaer Type 8103. Mjerenje je provedeno u širokom frekvencijskom području metodom prekinutog šuma. Kao pobudni signal uzet je ružičasti šum pojasne širine 200 kHz doveden iz generatora signala Keysight 33500B. Potrebni prekidi inače stalno prisutnog signala dobiveni su dovođenjem pravokutnog signala iz unutarnjeg generatora na osciloskopu koji je poslužio kao kontrolni signal za uključivanje i prekidanje osnovnog signala šuma. Mjerenja su provedena u pet nasumično izabranih točaka unutar medija u sonorektoru. Dobiveni valni oblici tlaka pohranjeni su i analizirani u programskom paketu MATLAB tako što su najprije izračunani klizajući prosjeci kvadriranih vrijednosti zvučnog tlaka. Time je dobivena zaglađena krivulja opadanja zvučne energije u sonorektoru, iz čijeg je ravnog dijela ekstrapolirana vrijednost vremena odjeka prema standardnoj definiciji (Petošić i sur., 2011).

3.2.4. Reološka analiza soka jabuke

Reologija je grana fizike koja se bavi proučavanjem deformacija i tečenja krutih i tekućih materijala podvrgnutih djelovanju sile. Nastala promjena oblika tj. deformacija odnosno svojstva tečenja određuju reološka svojstva ispitivanog materijala (Režek Jambrak, 2008).

Nakon provedenih mjerenja, odabran je sok jabuke kako bi se utvrdile moguće promjene na reološkim svojstvima soka jabuke nakon tretmana ultrazvukom visoke snage.

Reološka svojstva uzorka soka, provedena su prije i nakon ultrazvučnog tretmana. Uređaj koji je korišten je rotacioni reometar Rheometric Viscometer (Model RM 180, Rheometric

Scientific, Inc., Piscataway, USA) prikazan na slici 10, pomoću kojeg su primijenjenom smičnom brzinom (D), smičnim naprežanjem (τ) i prividnom viskoznošću (η), određivani reološki parametri koeficijent konzistencije (k) i indeks tečenja (n). Ugrađeni mikroprocesor izračunava vrijednosti za viskoznost uz pomoć izmjerene obrtajne sile, podešene brzine smicanja i mjernog sustav koji se koristi. Temperatura uzorka mjeri se senzorom Pt100 uronjenog u uzorak.

Korištena je tehnika dvostrukog cilindra za određivanje viskoznosti.

Ovaj reometar sastoji se od dvije funkcionalne jedinice: mjernog sustava i mikrokontrolne jedinice.

➤ Dijelovi mjernog sustava:

- cilindrično vreteno - rotira konstantnom kutnom brzinom, a povezano je s cilindričnim perom pomoću vratila
- vanjski nepomičan cilindar- (vodeni plašt) koji je spojen s protočnom termostatskom kupelji, a izveden je kao spremnik dvostrukih stjenki u koji se stavlja mjerna posuda sa uzorkom
- mjerna posuda u koju se stavlja uzorak određenog volumena

➤ Mikrokontrolna jedinica - omogućava trenutno očitavanje dinamičke viskoznosti, torzije, smične brzine i smičnog naprežanja.

Za mjerenje okretnog momenta koji se javlja na rotirajućem vretenu koristi se relativno okretanje mjerne osovine u odnosu na pogonsku osovinu. Potencijometar uređaja koji je povezan sa dinamometrom prima podatke o relativnom okretanju, pri čemu se okretni moment pretvara u električni signal, koji se prevodi u digitalnu vrijednost i očitava na displeju instrumenta.

Nakon što je mjerni sustav pravilno sastavljen i pričvršćen na reometar, a vodeni plašt (vanjski nepomičan cilindar) spojen s protočnom termostatskom kupelji, potrebno je mjernu posudu s uzorkom učvrstiti u vodeni plašt i uroniti vreteno u otopinu do oznake na posudi te vreteno spojiti preko produžne spojke i matice te učvrstiti na reometar. Početna kutna brzina vrtnje vretena bila je 950 s^{-1} , te se postepeno povećavala do maksimalne brzine od 1290 s^{-1} , a

potom smanjivala do 950 s^{-1} . Vrijednosti smičnog naprezanja i prividne viskoznosti očitani su na displeju instrumenta.

Prije punjenja vanjskog nepomičnog cilindra sa 32 mL soka, uzorke treba ohladiti na sobnu temperaturu. Na osnovi izmjerenih podataka (smična brzina, smično naprezanje i prividna viskoznost) izračunati su reološki parametri (koeficijent konzistencije i indeks tečenja). Koeficijent konzistencije ($k(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$) jednak je antilogaritamskoj vrijednosti konstante linearne regresije vrijednosti smičnog naprezanja i smične brzine, a indeks tečenja (n) odgovara koeficijentu linearne regresije.

Prividna viskoznost ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) pri 1290 s^{-1} (maksimalna smična brzina) izračunata je primjenom Newtonovog zakona:

$$\tau = \mu \cdot D \quad /35/$$

gdje je: τ - smično naprezanje (Pa), μ - viskozitet ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), D - smična brzina (s^{-1}).

Za izračunavanje reoloških parametara upotrijebljen je Ostwald de Waeleov zakon:

$$\tau = k \cdot D^n /36/$$

gdje je: τ - smično naprezanje (Pa), k - koeficijent konzistencije ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), D - smična brzina (s^{-1}), n - indeks tečenja (-).



Slika 10. Rotacioni reometar Rheometric Viscometer (Model RM 180, Rheometric Scientific, Inc., Piscataway, USA)

3.2.5. Dizajn eksperimenta

Nakon provedenih mjerenja, pristupilo se dizajnu eksperimenta kako bi se utvrdio statistički utjecaj amplitude (%) i vremena tretiranja na izlazne parametre, te optimalne vrijednosti amplitude i tlaka. Mjerenja su rađena na svakom sustavu (mlijeko, sok, voda). Oznake uzoraka voda V, mlijeko M, sok jabuka J.

Eksperiment je dizajniran u STATGRAPHICS Centurion (Stat Point technologies, Inc., VA 20186, USA) softveru. Eksperiment se sastoji od 20 eksperimentalnih pokusa (tablica 1). Nezavisne varijable su amplituda - X_1 (%) i vrijeme tretmana X_2 (min). Operativne varijabla amplitude razmatrana je na pet razina, a vrijeme tretiranja na dvije razine. Eksperimenti su organizirani u potpunom faktorijalnom dizajnu (uključivši faktorijalne točke, aksijalne točke i centralne točke), a ostatak uključujući replikaciju centralne točke kako bi se dobila dobra procjena eksperimentalnih grešaka. Mjereni izlazni parametri su slijedeći: entalpija, entropija, specifični toplinski kapacitet (c_p), U RMS (napon), I RMS (struja), p RMS (tlak), kalorimetrijska snaga, akustični intenzitet, akustična gustoća.

Dizajni se temelje na punom faktorijalnom dizajnu, koji je bio uvećan s centralnom i zvjezdastom točkom (Montgomery, 2001; Myers i Montgomery, 2002; Anderson-Cook i sur., 2009). Ukupan broj eksperimenata u dizajnim (N) može se izračunati kako slijedi:

$$N = N_i + N_o + N_j \quad /37/$$

gdje je $N_i - 2^n$ broj pokusa u punom faktorijalnom dizajnu, N_o - broj centralnih točaka, a $N_j - 2n$ je broj zvjezdastih točaka.

Kako bi se optimizirao ultrazvučni tretman i učinci istraživanja gore navedenih nezavisnih varijabli na izlazne parametre entalpiju, entropiju, specifični toplinski kapacitet (c_p), U RMS (napon), I RMS (struja), p RMS (tlak), kalorimetrijsku snagu, akustični intenzitet te akustičnu gustoću korišten je centralno kompozitni dizajn tipa *face centred* (ispred lica centrirana kocka) sa varijablama na više razina. Regresijski model za pokus predložen za odaziv naveden je niže (Lu i sur., 2008):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad /38/$$

gdje je β_0 vrijednost fiksnog odaziva na centralnu točku pokusa koji je točka (0, 0, 0); β_i , β_{ii} i β_{ij} , su linearni, kvadratni i unakrsno-proizvodni koeficijenti. Kod demonstracije značajnih efekata, nacrtane su 3-D površine (Khuri, 1996; Kuehl, 2000). Model je opremljen višestrukim linearnim regresijama (MLR). Analizirani su rezultati pokusa RSM metodom, metoda odzivne površine. Napravljeni su izračuni sa razinom točnosti od 95%. Izvršena je analiza varijance (ANOVA) kako bi se utvrdile statistički značajne ($p < 0,05$) razlike između apliciranih tretmana.

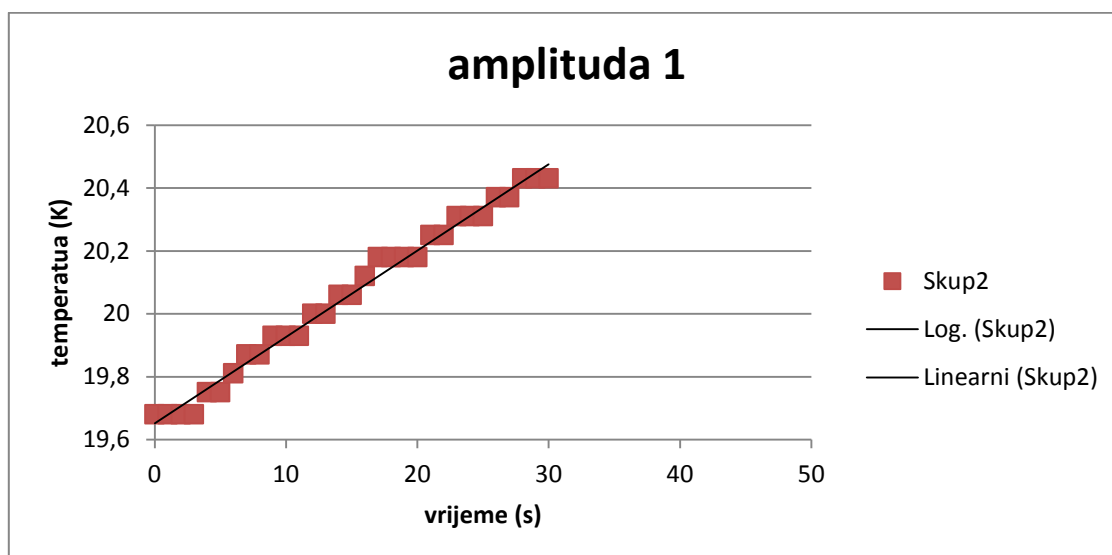
Tablica 1. Postav ultrazvučnog tretmana proveden u programu STATGRAPHICS (StatPoint technologies, Inc., VA 20186, USA)

| UZORAK | AMPLITUDA ULTRAZVUKA % | VRIJEME TRETIRANJA (min) |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| V, M, J (1) | 75 | 6 |
| V, M, J (2) | 10 | 6 |
| V, M, J (3) | 75 | 3 |
| V, M, J (4) | 50 | 6 |
| V, M, J (5) | 1 | 6 |
| V, M, J (6) | 100 | 3 |
| V, M, J (7) | 1 | 3 |
| V, M, J (8) | 50 | 3 |
| V, M, J (9) | 10 | 3 |
| V, M, J (10) | 100 | 6 |
| V, M, J (11) | 50 | 3 |
| V, M, J (12) | 100 | 6 |
| V, M, J (13) | 100 | 3 |
| V, M, J (14) | 50 | 6 |
| V, M, J (15) | 50 | 3 |
| V, M, J (16) | 75 | 6 |
| V, M, J (17) | 75 | 6 |
| V, M, J (18) | 1 | 3 |
| V, M, J (19) | 75 | 3 |
| V, M, J (20) | 1 | 6 |

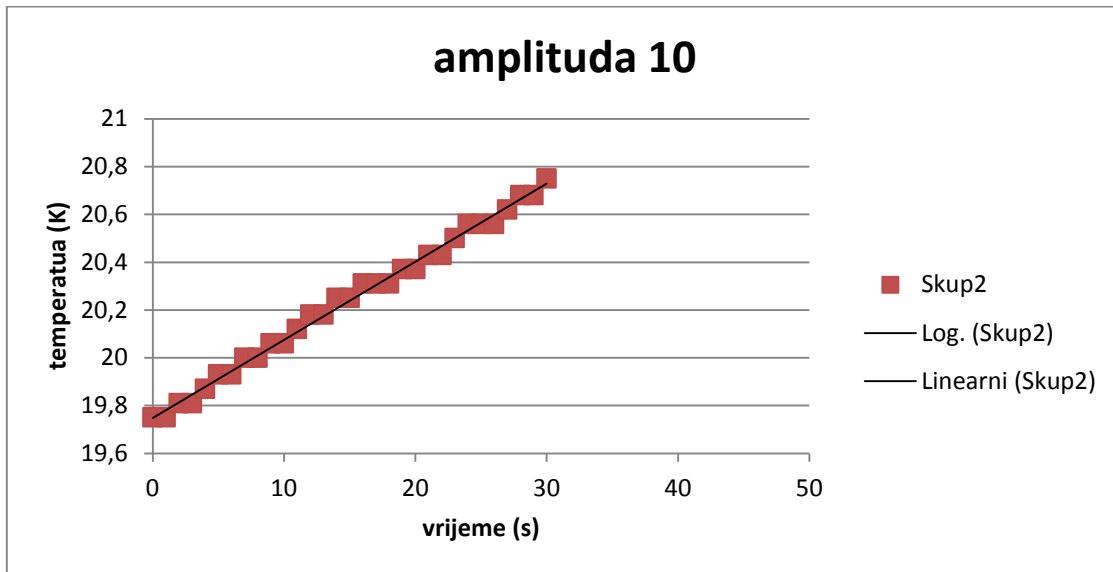
4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. KALORIMETRIJA

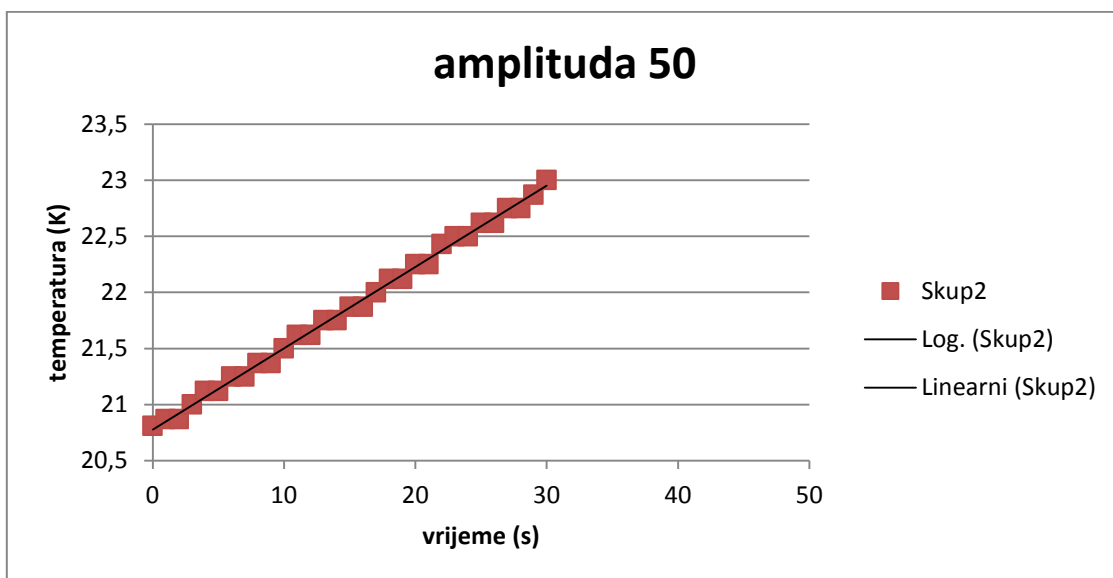
Praćenje promjena temperature prije, za vrijeme i nakon tretmana ultrazvukom. Ultrazvučna snaga koja se smatra mehaničkom energijom, dijelom se gubi u obliku topline prilikom prolaska ultrazvučnog vala kroz medij (Thompson i Doraiswamy, 1999). Rezultati promjene temperature s obzirom na određenu amplitudu i vrijeme tretiranja prikazani su na slikama 11-15. Vidljivo je da porastom amplitude dolazi do povećanja temperature sustava, isto tako porastom vremena tretiranja dolazi do povećanja temperature. Pri amplitudama od 1% korištenjem male sonde dolazi do vrlo malog povećanja temperature nekih 4,75 °C (slika 11). Pri istim uvjetima amplitude i vremena tretiranja uvijek je došlo do većeg porasta temperature u maloj posudi s malom sondom. Do najvećeg povećanja temperature došlo je pri amplitudi od 75% u trajanju od 9 min (tretman od 9 min provodio se samo pri amplitudi 75%) s malom sondom u maloj posudi (150ml). Temperatura se povećala s 13,81 °C na 56,87 °C, tj za 43,06 °C.



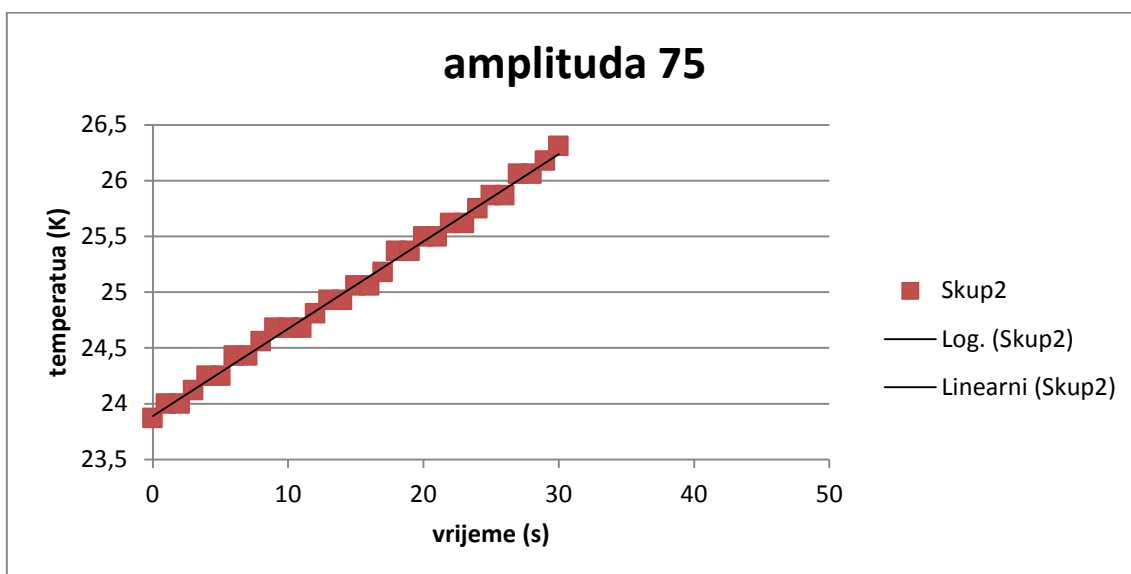
11. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana vode malom sondom, amplituda 1%, trajanje tretiranja 3 min



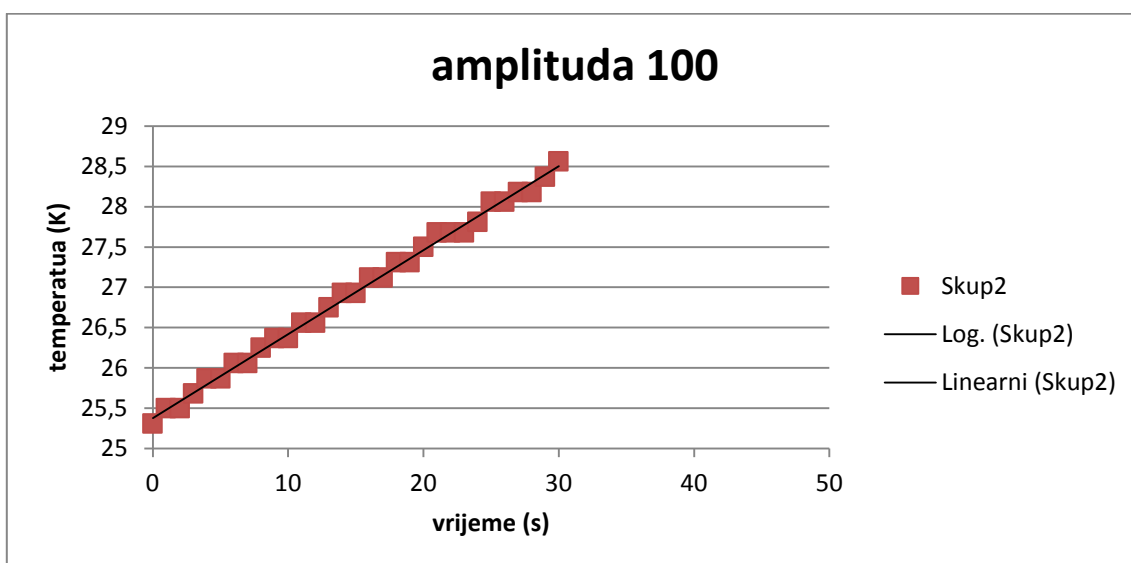
12. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana mlijeka malom sondom, amplituda 10%, trajanje tretiranja 3 min



13. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana soka malom sondom, amplituda 50%, trajanje tretiranja 3 min



14. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana vode malom sondom, amplituda 75%, trajanje tretiranja 3 min



15. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana vode malom sondom, amplituda 100%, trajanje tretiranja 3 min

4.2. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA ELEKTROAKUSTIČNOG ISKORIŠTENJA

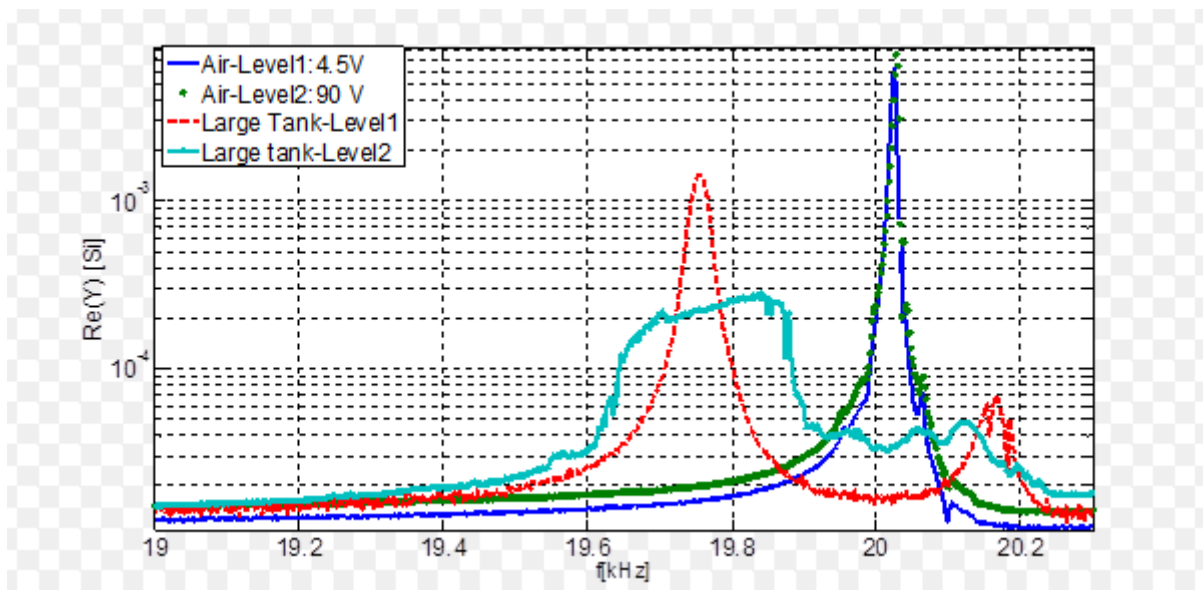
Poznajući upotrijebljenu električnu energiju (P_e) na niskim razinama pobude (U), akustična snaga (P_a) može se procijeniti na jednostavan način uz pretpostavku da se svi gubici odnose na R_{ml} . Za razmatranje dviju sonda maksimalni elektroakustični faktor iskorištenja izračunat je za malu sondu 89% i 93% za veliku sondu, što ukazuje da impedancija (veća površina zračenja) ima utjecaj na ukupne performanse. Usporedba mjerenih parametara prikazana je u tablici 2 za malu i veliku sondu s izračunatom akustičkom snagom iz RLC ekvivalentnog kruga na rezonanciji. Akustična snaga velike sonde je manja zbog pomaka vrha.

Tablica 2. Mjerni parametri ekvivalentnog RLC kruga za uređaj s velikom i malom sondom

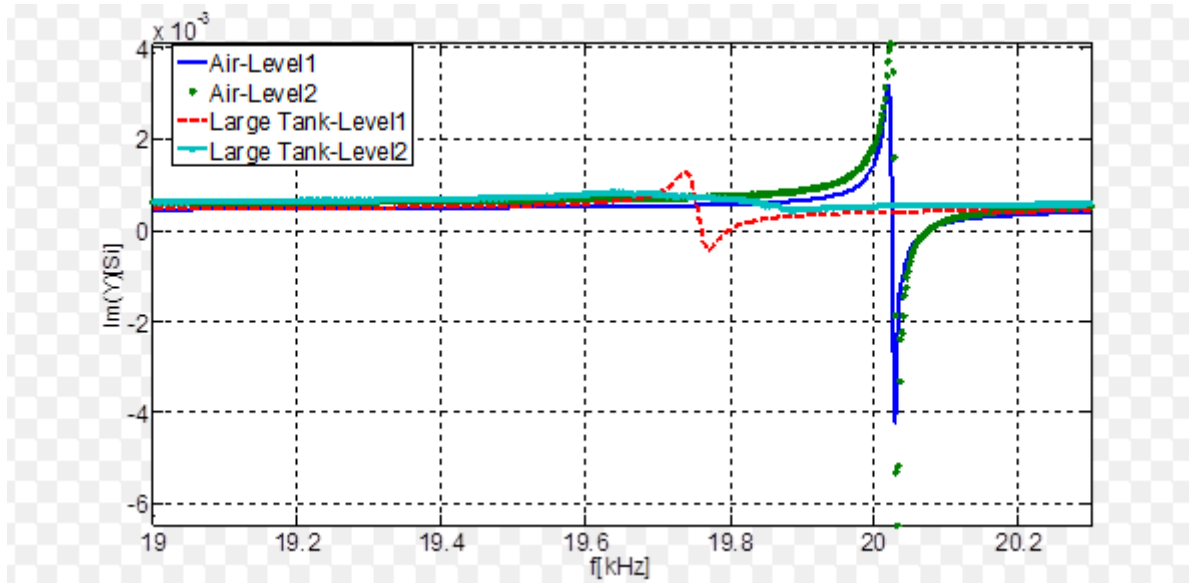
| Konfiguracija | Serijska rezonancija (zrak) [Hz] | Serijska rezonancija (voda) [Hz] | R_{ml} [Ω] | R_{rad} [Ω] | η_{ea} [%] | P_a –na rezonanciji niske razine pobude [W] |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|---|
| Mala sonda | 20029 | 19786 | 187 | 1479 | 88,7% | 10,8 mW |
| Velika sonda | 19930 | 19630 | 200 | 2150 | 93% | 8,7 mW |

Ulazna električna admitancija i drugi mjerni parametri (bočni pomak, tlak) na višim razinama pobude kada se pojavi kavitacija se znatno smanjuje na rezonantnom vrhu i rezonantni vrh je širi zbog dodatnih gubitaka koji se ne mogu objasniti (slika 16 a i b).

a) realni dio admitancije

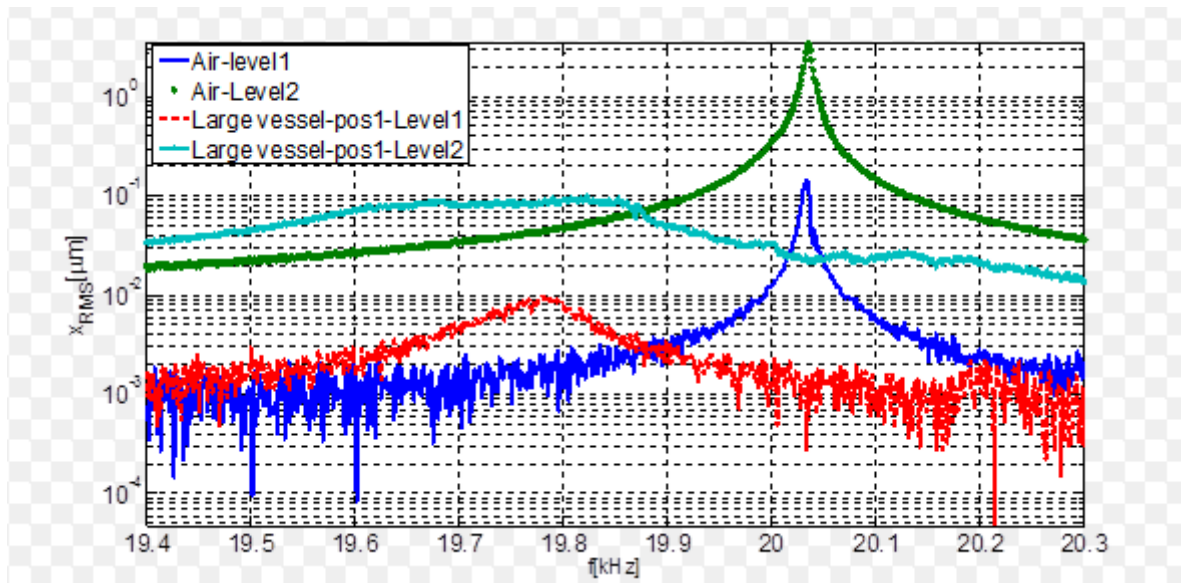


b) imaginarni dio admitancije



Slika 16. Ulazna električna admitancijana dvije različite razine konstantnog napona pobude (4.5 V i 90V) tijekom promjene frekvencije od niže prema višoj razini u određenom frekvencijskom području (mala sonda u zraku i velikoj posudi) sa kavitacijom i bez kavitacije slika 16 a- realni dio admitancije, slika 16 b- predstavlja masu dijelova pretvarača koji titraju i masu medija koji titra s vrhom u opterećenim uvjetima.

Prilikom mjerenja bočnog pomaka u zraku na dvije različite razine pobude (mala sonda) povećanje pomaka 20 puta povećava RMS pomak u zraku (slika 17) To je izravna posljedica povećanja impedancije zračenja kad se pojavi kavitacija.



Slika 17. Pomak promatran na dvije razine pobude za malu sondu u zraku i u uvjetima opterećenja u vodi u velikoj posudi kad se pojavi kavitacija

Prilikom mjerenja ulazne električne impedancije u maloj posudi na nižim razinama pobude ulazna električna admitancija mijenja oblik rezonantne krivulje i maksimalne vrijednosti zbog utjecaja stojnih valova na impedanciju zračenja u maloj posudi.

Kada se pojave nelinearni efekti rezonantna krivulja se širi i admitancija, pomak i vrhovi tlaka su smanjeni u svim konfiguracijama što je posljedica povećanja impedancije zračenja kada se pojave nelinearni efekti. Ulazna električna admitancija, tlak i pomak su vrlo slični i ne ovise o položaju kao u linearnim uvjetima u kojima je više izražen utjecaj stojnih valova na impedanciju zračenja.

Dakle, koeficijenti iskorištenja kad nema nelinearnih efekata je veći nego kalorimetrijskom i akustičnom metodom. Kada se pojavi kavitacija, javlja se problem za određivanje nadomjesnog modela zbog nelinearnih efekata te se impedancija povećava zbog nelinearnih efekata pa se smanji i amplituda titranja vrha jer se dio energije gubi oko sonde, a ne na njezino zračenje u medij. Koeficijenti iskorištenja koji su dobiveni različitim načinima

proračuna se dosta razlikuju (kalorimetrijski oko 70% za malu sonotrodu, a pri većoj privedenoj snazi zbog pojačanog strujanja se i smanjuje jer je opteretni medij zrak pa se veći dio energije troši na guranje okolnog medija i nema akustičke snage u mediju koja bi mu mogla dodatno povećati temperaturu. Povećanje temperature je i posljedica grijanja same sonotrode jer radi u neopterećenom stanju. U usporedbi sa elektromehaničkom karakterizacijom to je manji koeficijent iskorištenja. Akustičkom metodom se dobio najmanji koeficijent iskorištenja (par postotaka) jer on u sebe ne uključuje oslobođenu toplinu kao ni energiju koja se troši na pomicanje medija koja je osobito izražena pri većim razinama pobude.

Dobiveni rezultati su u korelaciji s rezultatima istraživanja provedenim u doktorskom radu Petošić, 2008.

4.3. REZULTATI MJERENJA PROSTORNE RASPODJELE TLAKA U MALOM SONOREAKTORU I ODREĐIVANJE ISIJANE AKUSTIČKE SNAGE

Dobivene vrijednosti RMS akustičkog tlaka se razlikuju ovisno o vrijednosti amplitude potencijometra (privedene električne snage) ali se kreću od 5 kPa do 10 kPa. Uz pretpostavku difuznog akustičkog polja u sonoreaktoru i mjerenog vremena odjeka sonoreaktora od 3 ms daje vrijednosti akustičke snage od nekoliko W (5W-10W) što je nekoliko puta manje od snage dobivene kalorimetrijskom metodom.

Smisao kalorimetrijske metode (3.2.1.) je određivanje sveukupne snage koja se disipira, a s ovim drugima metodama: metodom mjerenja koeficienta elektrakustičkog iskorištenja (3.2.2.) i metoda mjerenja prostorne raspodjele tlaka u malom sonoreaktoru i određivanja isijane akustičke snage (3.2.3.) mjeri se samo akustička snaga bez topline. Pa se onda dobije manji koeficijent iskorištenja.

Ovisno o stupnju pobude medija se dobije različita zračena akustička i kalorimetrijska snaga jer sonotroda odguruje medij oko sebe pri većim pobudama pa se slabije zrači u njega da se izazovu traženi efekti, implozija mali mjehurića, odnosno kavitacija.

4.4. REZULTATI STATISTIČKE OBRADÉ PODATAKA

Rezultati za statističku obradu podataka dani su u tablicama 3-8. Rezultati analize varijance za ultrazvučne parametre (U RMS, I RMS, p RMS, akustičnu gustoću, akustični intenzitet, kalorimetrijsku snagu, entalpiju i entropiju) prikazani su u tablicama 9-16. Tablica 17. prikazuje statističke parametre regresije i analize. Prikaz polinoma optimizacije (drugog reda) kojima su opisani provedeni ultrazvučni tretmani te optimalne vrijednosti analiziranih parametara i optimalni faktori ultrazvučnog tretmana nalaze se sistematizirani u tablicama 18-20. Odzivne površine u trodimenzionalnom prostoru te konturni dijagrami dani su za neke primjere prema dobivenim polinomima drugog reda za ispitivane parametre prikazani su u tablicama 21-23.

Tablica3. Rezultati za statističku obradu podataka za mlijeko 150 mL (M1-M20)

| Uzorak | amplituda % | vrijeme tretmana | Entalpija | Entropija | c_p | U RMS | I RMS | p RMS | kalorimetrijska snaga | akustični intenzitet | akustična gustoća |
|--------|-------------|------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| M1 | 75 | 6 | 22,3938 | 0,076029737 | 3,77 | 523 | 601 | 460 | 0,0559845 | 441,9476688 | 3,73E+02 |
| M2 | 10 | 6 | 8,4825 | 0,029311297 | 3,77 | 551 | 418 | 722 | 0,0209235 | 165,1723611 | 1,39E+02 |
| M3 | 75 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 548 | 613 | 721 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M4 | 50 | 6 | 16,965 | 0,058070633 | 3,77 | 540 | 536 | 900 | 0,042978 | 339,2729579 | 2,87E+02 |
| M5 | 1 | 6 | 7,3138 | 0,025390827 | 3,77 | 525 | 376 | 465 | 0,0175305 | 138,3876539 | 1,17E+02 |
| M6 | 100 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 486 | 656 | 572 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M7 | 1 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 497 | 366 | 695 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M8 | 50 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 522 | 525 | 565 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M9 | 10 | 3 | 7,2761 | 0,024760098 | 3,77 | 563 | 423 | 1189 | 0,018096 | 142,8517717 | 1,21E+02 |
| M10 | 100 | 6 | 25,2213 | 0,085177627 | 3,77 | 482 | 658 | 670 | 0,064467 | 508,9094368 | 4,30E+02 |
| M11 | 50 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 522 | 525 | 565 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M12 | 100 | 6 | 25,2213 | 0,085177627 | 3,77 | 482 | 658 | 670 | 0,064467 | 508,9094368 | 4,30E+02 |
| M13 | 100 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 486 | 656 | 572 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M14 | 50 | 6 | 16,965 | 0,058070633 | 3,77 | 540 | 536 | 900 | 0,042978 | 339,2729579 | 2,87E+02 |
| M15 | 50 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 522 | 525 | 565 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M16 | 75 | 6 | 22,3938 | 0,076029737 | 3,77 | 523 | 601 | 460 | 0,0559845 | 441,9476688 | 3,73E+02 |
| M17 | 75 | 6 | 22,3938 | 0,076029737 | 3,77 | 523 | 601 | 460 | 0,0559845 | 441,9476688 | 3,73E+02 |
| M18 | 1 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 497 | 366 | 695 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M19 | 75 | 3 | 6,1451 | 0,020785454 | 3,77 | 548 | 613 | 721 | 0,0152685 | 120,5311824 | 1,02E+02 |
| M20 | 1 | 6 | 7,3138 | 0,025390827 | 3,77 | 525 | 376 | 465 | 0,0175305 | 138,3876539 | 1,17E+02 |

Tablica 4. Rezultati za statističku obradu podataka za mlijeko 250 mL (M1-M20)

| Uzorak | amplituda % | vrijeme tretmana | Entalpija | Entropija | c _p | U RMS | I RMS | p RMS | kalorimetrijska snaga | akustični intenzitet | akustična gustoća |
|--------|-------------|------------------|-----------|-------------|----------------|--------|-------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| M1 | 75 | 6 | 12,9688 | 0,04515024 | 3,77 | 523 | 596 | 1095 | 0,058435 | 203,9467549 | 2,34E+02 |
| M2 | 10 | 6 | 5,4288 | 0,019112169 | 3,77 | 646 | 455 | 1408 | 0,0254475 | 88,81552228 | 1,02E+02 |
| M3 | 75 | 3 | 11,8001 | 0,016451127 | 3,77 | 524 | 598 | 1051 | 0,0480675 | 167,7626532 | 1,92E+02 |
| M4 | 50 | 6 | 10,1413 | 0,035538258 | 3,77 | 514 | 521 | 1164 | 0,043355 | 151,3153343 | 1,73E+02 |
| M5 | 1 | 6 | 4,7125 | 0,016415025 | 3,77 | 574 | 391 | 1311 | 0,02262 | 78,94713091 | 9,05E+01 |
| M6 | 100 | 3 | 16,0225 | 0,055473849 | 3,77 | 471 | 647 | 388 | 0,0480675 | 167,7626532 | 1,92E+02 |
| M7 | 1 | 3 | 4,7125 | 0,016451127 | 3,77 | 282,72 | 182 | 844 | 0,020735 | 72,36820334 | 8,29E+01 |
| M8 | 50 | 3 | 10,3675 | 0,035617009 | 3,77 | 515 | 526 | 713 | 0,0386425 | 134,8680153 | 1,55E+02 |
| M9 | 10 | 3 | 5,1649 | 0,017943995 | 3,77 | 685 | 478 | 1390 | 0,0197925 | 69,07873955 | 7,92E+01 |
| M10 | 100 | 6 | 15,5324 | 0,053660824 | 3,77 | 475 | 650 | 887 | 0,0650325 | 226,9730014 | 2,60E+02 |
| M11 | 50 | 3 | 10,3675 | 0,035617009 | 3,77 | 515 | 526 | 713 | 0,0386425 | 134,8680153 | 1,55E+02 |
| M12 | 100 | 6 | 15,5324 | 0,053660824 | 3,77 | 475 | 650 | 887 | 0,0650325 | 226,9730014 | 2,60E+02 |
| M13 | 100 | 3 | 16,0225 | 0,055473849 | 3,77 | 471 | 647 | 388 | 0,0480675 | 167,7626532 | 1,92E+02 |
| M14 | 50 | 6 | 10,1413 | 0,035538258 | 3,77 | 514 | 521 | 1164 | 0,043355 | 151,3153343 | 1,73E+02 |
| M15 | 50 | 3 | 10,3675 | 0,035617009 | 3,77 | 515 | 526 | 713 | 0,0386425 | 134,8680153 | 1,55E+02 |
| M16 | 75 | 6 | 12,9688 | 0,04515024 | 3,77 | 523 | 596 | 1095 | 0,058435 | 203,9467549 | 2,34E+02 |
| M17 | 75 | 6 | 12,9688 | 0,04515024 | 3,77 | 523 | 596 | 1095 | 0,058435 | 203,9467549 | 2,34E+02 |
| M18 | 1 | 3 | 4,7125 | 0,016451127 | 3,77 | 282,72 | 182 | 844 | 0,020735 | 72,36820334 | 8,29E+01 |
| M19 | 75 | 3 | 11,8001 | 0,016451127 | 3,77 | 524 | 598 | 1051 | 0,0480675 | 167,7626532 | 1,92E+02 |
| M20 | 1 | 6 | 4,7125 | 0,016415025 | 3,77 | 574 | 391 | 1311 | 0,02262 | 78,94713091 | 9,05E+01 |

Tablica 5. Rezultati za statističku obradu podataka za sok jabuka 150 mL (J1-J20)

| Uzorak | amplituda % | vrijeme tretmana | Entalpija | Entropija | c_p | U RMS | I RMS | p RMS | kalorimetrijska snaga | akustični intenzitet | akustična gustoća |
|--------|-------------|------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| J1 | 75 | 6 | 19,5832 | 0,064733528 | 3,64 | 547 | 613 | 524 | 0,050232 | 396,5364797 | 3,35E+02 |
| J2 | 10 | 6 | 7,0616 | 0,023737353 | 3,64 | 560 | 422 | 654 | 0,018018 | 142,2359112 | 1,20E+02 |
| J3 | 75 | 3 | 19,5832 | 0,065878611 | 3,64 | 514 | 594 | 383 | 0,050232 | 396,5364797 | 3,35E+02 |
| J4 | 50 | 6 | 14,56 | 0,048540525 | 3,64 | 527 | 528 | 871 | 0,037674 | 297,4023598 | 2,51E+02 |
| J5 | 1 | 6 | 6,5884 | 0,022268334 | 3,64 | 544 | 384 | 390 | 0,015834 | 124,9951947 | 1,06E+02 |
| J6 | 100 | 3 | 23,8784 | 0,079749374 | 3,64 | 484 | 655 | 601 | 0,060606 | 478,4298831 | 4,04E+02 |
| J7 | 1 | 3 | 5,2052 | 0,01757834 | 3,64 | 520 | 375 | 560 | 0,013104 | 103,4442991 | 8,74E+01 |
| J8 | 50 | 3 | 15,2516 | 0,051516963 | 3,64 | 516 | 522 | 943 | 0,039312 | 310,3328972 | 2,62E+02 |
| J9 | 10 | 3 | 6,5884 | 0,022254042 | 3,64 | 574 | 428 | 562 | 0,01638 | 129,3053738 | 1,09E+02 |
| J10 | 100 | 6 | 23,4416 | 0,076847962 | 3,64 | 472 | 652 | 232 | 0,060606 | 478,4298831 | 4,04E+02 |
| J11 | 50 | 3 | 15,2516 | 0,051516963 | 3,64 | 516 | 522 | 943 | 0,039312 | 310,3328972 | 2,62E+02 |
| J12 | 100 | 6 | 23,4416 | 0,076847962 | 3,64 | 472 | 652 | 232 | 0,060606 | 478,4298831 | 4,04E+02 |
| J13 | 100 | 3 | 23,8784 | 0,079749374 | 3,64 | 484 | 655 | 601 | 0,060606 | 478,4298831 | 4,04E+02 |
| J14 | 50 | 6 | 14,56 | 0,048540525 | 3,64 | 527 | 528 | 871 | 0,037674 | 297,4023598 | 2,51E+02 |
| J15 | 50 | 3 | 15,2516 | 0,051516963 | 3,64 | 516 | 522 | 943 | 0,039312 | 310,3328972 | 2,62E+02 |
| J16 | 75 | 6 | 19,5832 | 0,064733528 | 3,64 | 547 | 613 | 524 | 0,050232 | 396,5364797 | 3,35E+02 |
| J17 | 75 | 6 | 19,5832 | 0,064733528 | 3,64 | 547 | 613 | 524 | 0,050232 | 396,5364797 | 3,35E+02 |
| J18 | 1 | 3 | 5,2052 | 0,01757834 | 3,64 | 520 | 375 | 560 | 0,013104 | 103,4442991 | 8,74E+01 |
| J19 | 75 | 3 | 19,5832 | 0,065878611 | 3,64 | 514 | 594 | 383 | 0,050232 | 396,5364797 | 3,35E+02 |
| J20 | 1 | 6 | 6,5884 | 0,022268334 | 3,64 | 544 | 384 | 390 | 0,015834 | 124,9951947 | 1,06E+02 |

Tablica 6. Rezultati za statističku obradu podataka za sok jabuka 250 mL (J1-J20)

| Uzorak | amplituda % | vrijeme tretmana | Entalpija | Entropija | c_p | U RMS | I RMS | p RMS | kalorimetrijska snaga | akustični intenzitet | akustična gustoća |
|--------|-------------|------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| J1 | 75 | 6 | 11,6116 | 0,039279849 | 3,64 | 504 | 590 | 560 | 0,04823 | 168,3296599 | 1,93E+02 |
| J2 | 10 | 6 | 3,64 | 0,012226675 | 3,64 | 588 | 431 | 905 | 0,01792 | 60,34459502 | 6,92E+01 |
| J3 | 75 | 3 | 11,3568 | 0,03859349 | 3,64 | 492 | 584 | 2,1 | 0,0455 | 158,801566 | 1,82E+02 |
| J4 | 50 | 6 | 8,8452 | 0,029997626 | 3,64 | 487 | 507 | 429 | 0,03822 | 133,3933154 | 1,53E+02 |
| J5 | 1 | 6 | 2,9484 | 0,009890149 | 3,64 | 535 | 379 | 877 | 0,01092 | 38,11237584 | 4,37E+01 |
| J6 | 100 | 3 | 14,3052 | 0,048556293 | 3,64 | 632 | 637 | 1,37 | 0,06006 | 209,6180671 | 2,40E+02 |
| J7 | 1 | 3 | 3,8948 | 0,013321719 | 3,64 | 562 | 382 | 4,1 | 0,01547 | 53,99253243 | 6,19E+01 |
| J8 | 50 | 3 | 9,3184 | 0,031825339 | 3,64 | 488 | 510 | 2,8 | 0,03913 | 136,5693467 | 1,57E+02 |
| J9 | 10 | 3 | 4,55 | 0,015587821 | 3,64 | 632 | 443 | 3,5 | 0,0182 | 63,52062639 | 7,28E+01 |
| J10 | 100 | 6 | 13,8684 | 0,046756201 | 3,64 | 458 | 643 | 647 | 0,05642 | 196,9193418 | 2,26E+02 |
| J11 | 50 | 3 | 9,3184 | 0,031825339 | 3,64 | 488 | 510 | 2,8 | 0,03913 | 136,5693467 | 1,57E+02 |
| J12 | 100 | 6 | 13,8684 | 0,046756201 | 3,64 | 458 | 643 | 647 | 0,05642 | 196,9193418 | 2,26E+02 |
| J13 | 100 | 3 | 14,3052 | 0,048556293 | 3,64 | 632 | 637 | 1,37 | 0,06006 | 209,6180671 | 2,40E+02 |
| J14 | 50 | 6 | 8,8452 | 0,029997626 | 3,64 | 487 | 507 | 429 | 0,03822 | 133,3933154 | 1,53E+02 |
| J15 | 50 | 3 | 9,3184 | 0,031825339 | 3,64 | 488 | 510 | 2,8 | 0,03913 | 136,5693467 | 1,57E+02 |
| J16 | 75 | 6 | 11,6116 | 0,039279849 | 3,64 | 504 | 590 | 560 | 0,04823 | 168,3296599 | 1,93E+02 |
| J17 | 75 | 6 | 11,6116 | 0,039279849 | 3,64 | 504 | 590 | 560 | 0,04823 | 168,3296599 | 1,93E+02 |
| J18 | 1 | 3 | 3,8948 | 0,013321719 | 3,64 | 562 | 382 | 4,1 | 0,01547 | 53,99253243 | 6,19E+01 |
| J19 | 75 | 3 | 11,3568 | 0,03859349 | 3,64 | 492 | 584 | 2,1 | 0,0455 | 158,801566 | 1,82E+02 |
| J20 | 1 | 6 | 2,9484 | 0,009890149 | 3,64 | 535 | 379 | 877 | 0,01092 | 38,11237584 | 4,37E+01 |

Tablica 7. Rezultati za statističku obradu podataka za vodu 150 mL (V1-V20)

| Uzorak | amplituda % | vrijeme tretmana | Entalpija | Entropija | c _p | U RMS | I RMS | p RMS | kalorimetrijska snaga | akustični intenzitet | akustična gustoća |
|--------|-------------|------------------|-----------|-------------|----------------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| V1 | 75 | 6 | 22,19,58 | 0,073516178 | 4,18 | 573 | 619 | 739 | 0,057684 | 455,3637047 | 3,85E+02 |
| V2 | 10 | 6 | 7,8584 | 0,026529916 | 4,18 | 622 | 453 | 3144 | 0,020064 | 158,3873756 | 1,34E+02 |
| V3 | 75 | 3 | 19,6042 | 0,065487285 | 4,18 | 517 | 594 | 619 | 0,048906 | 386,0692279 | 3,26E+02 |
| V4 | 50 | 6 | 17,5142 | 0,058652403 | 4,18 | 589 | 559 | 1248 | 0,043263 | 341,4227785 | 2,88E+02 |
| V5 | 1 | 6 | 7,315 | 0,024721679 | 4,18 | 575 | 403 | 3536 | 0,017556 | 138,5889536 | 1,17E+02 |
| V6 | 100 | 3 | 26,125 | 0,086628762 | 4,18 | 471 | 652 | 623 | 0,065208 | 514,7589706 | 4,35E+02 |
| V7 | 1 | 3 | 6,5626 | 0,022351091 | 4,18 | 533 | 382 | 500 | 0,016929 | 133,6393481 | 1,13E+02 |
| V8 | 50 | 3 | 16,1766 | 0,054406068 | 4,18 | 500 | 514 | 527 | 0,040128 | 316,7747511 | 2,68E+02 |
| V9 | 10 | 3 | 7,8584 | 0,026642347 | 4,18 | 589 | 438 | 482 | 0,01881 | 148,4881646 | 1,25E+02 |
| V10 | 100 | 6 | 28,7166 | 0,09473298 | 4,18 | 500 | 664 | 438 | 0,072732 | 574,1542364 | 4,85E+02 |
| V11 | 50 | 3 | 16,1766 | 0,054406068 | 4,18 | 500 | 514 | 527 | 0,040128 | 316,7747511 | 2,68E+02 |
| V12 | 100 | 6 | 28,7166 | 0,09473298 | 4,18 | 500 | 664 | 438 | 0,072732 | 574,1542364 | 4,85E+02 |
| V13 | 100 | 3 | 26,125 | 0,086628762 | 4,18 | 471 | 652 | 623 | 0,065208 | 514,7589706 | 4,35E+02 |
| V14 | 50 | 6 | 17,5142 | 0,058652403 | 4,18 | 589 | 559 | 1248 | 0,043263 | 341,4227785 | 2,88E+02 |
| V15 | 50 | 3 | 16,1766 | 0,054406068 | 4,18 | 500 | 514 | 527 | 0,040128 | 316,7747511 | 2,68E+02 |
| V16 | 75 | 6 | 22,19,58 | 0,073516178 | 4,18 | 573 | 619 | 739 | 0,057684 | 455,3637047 | 3,85E+02 |
| V17 | 75 | 6 | 22,19,58 | 0,073516178 | 4,18 | 573 | 619 | 739 | 0,057684 | 455,3637047 | 3,85E+02 |
| V18 | 1 | 3 | 6,5626 | 0,022351091 | 4,18 | 533 | 382 | 500 | 0,016929 | 133,6393481 | 1,13E+02 |
| V19 | 75 | 3 | 19,6042 | 0,065487285 | 4,18 | 517 | 594 | 619 | 0,048906 | 386,0692279 | 3,26E+02 |
| V20 | 1 | 6 | 7,315 | 0,024721679 | 4,18 | 575 | 403 | 3536 | 0,017556 | 138,5889536 | 1,17E+02 |

Tablica 8. Rezultati za statističku obradu podataka za vodu 250 mL(V1-V20)

| Uzorak | amplituda % | vrijeme tretmana | Entalpija | Entropija | c_p | U RMS | I RMS | p RMS | kalorimetrijska snaga | akustični intenzitet | akustična gustoća |
|--------|-------------|------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| V1 | 75 | 6 | 12,54 | 0,04226385 | 4,18 | 506 | 584 | 364 | 0,053295 | 186,007398 | 2,13E+02 |
| V2 | 10 | 6 | 4,4308 | 0,015058472 | 4,18 | 659 | 463 | 570 | 0,01881 | 65,64966987 | 7,52E+01 |
| V3 | 75 | 3 | 12,7908 | 0,042852062 | 4,18 | 517 | 594 | 1,81 | 0,05225 | 182,3601941 | 2,09E+02 |
| V4 | 50 | 6 | 9,405 | 0,031845347 | 4,18 | 507 | 516 | 410 | 0,03971 | 138,5937475 | 1,59E+02 |
| V5 | 1 | 6 | 4,18 | 0,014231739 | 4,18 | 573 | 392 | 483 | 0,015675 | 54,70805823 | 6,27E+01 |
| V6 | 100 | 3 | 14,9226 | 0,049931499 | 4,18 | 445 | 633 | 1,29 | 0,063745 | 222,4794368 | 2,55E+02 |
| V7 | 1 | 3 | 3,6784 | 0,012415711 | 4,18 | 600 | 400 | 2,5 | 0,01463 | 51,06085434 | 5,85E+01 |
| V8 | 50 | 3 | 9,9484 | 0,033360561 | 4,18 | 500 | 518 | 1,71 | 0,040755 | 142,2409514 | 1,63E+02 |
| V9 | 10 | 3 | 4,7234 | 0,015993383 | 4,18 | 698 | 476 | 2,5 | 0,01881 | 65,64966987 | 7,52E+01 |
| V10 | 100 | 6 | 14,8808 | 0,049844168 | 4,18 | 458 | 641 | 389 | 0,06479 | 226,1266407 | 2,59E+02 |
| V11 | 50 | 3 | 9,9484 | 0,033360561 | 4,18 | 500 | 518 | 1,71 | 0,040755 | 142,2409514 | 1,63E+02 |
| V12 | 100 | 6 | 14,8808 | 0,049844168 | 4,18 | 458 | 641 | 389 | 0,06479 | 226,1266407 | 2,59E+02 |
| V13 | 100 | 3 | 14,9226 | 0,049931499 | 4,18 | 445 | 633 | 1,29 | 0,063745 | 222,4794368 | 2,55E+02 |
| V14 | 50 | 6 | 9,405 | 0,031845347 | 4,18 | 507 | 516 | 410 | 0,03971 | 138,5937475 | 1,59E+02 |
| V15 | 50 | 3 | 9,9484 | 0,033360561 | 4,18 | 500 | 518 | 1,71 | 0,040755 | 142,2409514 | 1,63E+02 |
| V16 | 75 | 6 | 12,54 | 0,04226385 | 4,18 | 506 | 584 | 364 | 0,053295 | 186,007398 | 2,13E+02 |
| V17 | 75 | 6 | 12,54 | 0,04226385 | 4,18 | 506 | 584 | 364 | 0,053295 | 186,007398 | 2,13E+02 |
| V18 | 1 | 3 | 3,6784 | 0,012415711 | 4,18 | 600 | 400 | 2,5 | 0,01463 | 51,06085434 | 5,85E+01 |
| V19 | 75 | 3 | 12,7908 | 0,042852062 | 4,18 | 517 | 594 | 1,81 | 0,05225 | 182,3601941 | 2,09E+02 |
| V20 | 1 | 6 | 4,18 | 0,014231739 | 4,18 | 573 | 392 | 483 | 0,015675 | 54,70805823 | 6,27E+01 |

Tablica 9. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost U RMS

| Analiza varijance za U RMS | | | | | | |
|----------------------------|----------------|---------------|-------------------|--------------------|------------|--------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSTUPANJE | F-Veličina | P-vrijednost |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 2420,71 | 1 | 2420,71 | 8,32 | 0,012 |
| | Sok 150 mL | 7290,06 | 1 | 7290,06 | 18,91 | 0,0007 |
| | Voda 150 mL | 13571,6 | 1 | 13571,6 | 24,6 | 0,0002 |
| | Mlijeko 250 mL | 468,696 | 1 | 468,696 | 0,06 | 0,8031 |
| | Sok 250 mL | 1585,35 | 1 | 1585,35 | 0,8 | 0,3872 |
| | Voda 250 mL | 59085,4 | 1 | 59085,4 | 40,18 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 105,453 | 1 | 105,453 | 0,36 | 0,5567 |
| | Sok 150 mL | 1122,1 | 1 | 1122,1 | 2,91 | 0,1101 |
| | Voda 150 mL | 15800,8 | 1 | 15800,8 | 28,65 | 0,0001 |
| | Mlijeko 250 mL | 18979,9 | 1 | 18979,9 | 2,62 | 0,1281 |
| | Sok 250 mL | 7956,66 | 1 | 7956,66 | 4 | 0,0653 |
| | Voda 250 mL | 81,2838 | 1 | 81,2838 | 0,06 | 0,8175 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 5001,34 | 1 | 5001,34 | 17,2 | 0,001 |
| | Sok 150 mL | 2288,4 | 1 | 2288,4 | 5,94 | 0,0288 |
| | Voda 150 mL | 3024,08 | 1 | 3024,08 | 5,48 | 0,0345 |
| | Mlijeko 250 mL | 16744,6 | 1 | 16744,6 | 2,31 | 0,151 |
| | Sok 250 mL | 13528,8 | 1 | 13528,8 | 6,8 | 0,0207 |
| | Voda 250 mL | 136,603 | 1 | 136,603 | 0,09 | 0,765 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 602,078 | 1 | 602,078 | 2,07 | 0,1722 |
| | Sok 150 mL | 32,2066 | 1 | 32,2066 | 0,08 | 0,7768 |
| | Voda 150 mL | 0,0404359 | 1 | 0,0404359 | 0 | 0,9933 |
| | Mlijeko 250 mL | 29569 | 1 | 29569 | 4,07 | 0,0631 |
| | Sok 250 mL | 4854,06 | 1 | 4854,06 | 2,44 | 0,1407 |
| | Voda 250 mL | 1220,69 | 1 | 1220,69 | 0,83 | 0,3777 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 262,813 | 1 | 262,813 | 0,9 | 0,3579 |
| | Sok 150 mL | 81,897 | 1 | 81,897 | 0,21 | 0,6519 |
| | Voda 150 mL | 413,542 | 1 | 413,542 | 0,75 | 0,4012 |
| | Mlijeko 250 mL | 5181,16 | 1 | 5181,16 | 0,71 | 0,4123 |
| | Sok 250 mL | 724,749 | 1 | 724,749 | 0,36 | 0,5558 |
| | Voda 250 mL | 1697,89 | 1 | 1697,89 | 1,15 | 0,3008 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 4071,15 | 14 | 290,797 | | |
| | Sok 150 mL | 5397,24 | 14 | 385,517 | | |
| | Voda 150 mL | 7722,2 | 14 | 551,586 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 101597 | 14 | 7256,96 | | |
| | Sok 250 mL | 27861,1 | 14 | 1990,08 | | |
| | Voda 250 mL | 20587,4 | 14 | 1470,53 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 11523,8 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 15171,8 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 38322 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 166853 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 60688,8 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 88973,8 | 19 | | | |

Tablica 10. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost I RMS

| Analiza varijance za I RMS | | | | | | |
|----------------------------|----------------|---------------|-------------------|--------------------|------------|--------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSTUPANJE | F-Veličina | P-vrijednost |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 203925 | 1 | 203925 | 3059,57 | 0 |
| | Sok 150 mL | 189278 | 1 | 189278 | 2174,12 | 0 |
| | Voda 150 mL | 172339 | 1 | 172339 | 1428,4 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 262587 | 1 | 262587 | 85,08 | 0 |
| | Sok 250 mL | 163943 | 1 | 163943 | 1163,97 | 0 |
| | Voda 250 mL | 134064 | 1 | 134064 | 472,86 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 38,8635 | 1 | 38,8635 | 0,58 | 0,4578 |
| | Sok 150 mL | 326,576 | 1 | 326,576 | 3,75 | 0,0732 |
| | Voda 150 mL | 3462,04 | 1 | 3462,04 | 28,69 | 0,0001 |
| | Mlijeko 250 mL | 8789,02 | 1 | 8789,02 | 2,85 | 0,1136 |
| | Sok 250 mL | 9,35071 | 1 | 9,35071 | 0,07 | 0,8004 |
| | Voda 250 mL | 47,0767 | 1 | 47,0767 | 0,17 | 0,6898 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 1353,77 | 1 | 1353,77 | 20,31 | 0,0005 |
| | Sok 150 mL | 689,615 | 1 | 689,615 | 7,92 | 0,0138 |
| | Voda 150 mL | 584,253 | 1 | 584,253 | 4,84 | 0,0451 |
| | Mlijeko 250 mL | 11577,1 | 1 | 11577,1 | 3,75 | 0,0732 |
| | Sok 250 mL | 48,7305 | 1 | 48,7305 | 0,35 | 0,5658 |
| | Voda 250 mL | 69,0176 | 1 | 69,0176 | 0,24 | 0,6294 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 57,2615 | 1 | 57,2615 | 0,86 | 0,3697 |
| | Sok 150 mL | 1,76442 | 1 | 1,76442 | 0,02 | 0,8888 |
| | Voda 150 mL | 5,97433 | 1 | 5,97433 | 0,05 | 0,8271 |
| | Mlijeko 250 mL | 15895,9 | 1 | 15895,9 | 5,15 | 0,0396 |
| | Sok 250 mL | 143,042 | 1 | 143,042 | 1,02 | 0,3307 |
| | Voda 250 mL | 124,581 | 1 | 124,581 | 0,44 | 0,5182 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 64,4697 | 1 | 64,4697 | 0,97 | 0,3421 |
| | Sok 150 mL | 20,7697 | 1 | 20,7697 | 0,24 | 0,6328 |
| | Voda 150 mL | 114,264 | 1 | 114,264 | 0,95 | 0,347 |
| | Mlijeko 250 mL | 1857,4 | 1 | 1857,4 | 0,6 | 0,4508 |
| | Sok 250 mL | 120,708 | 1 | 120,708 | 0,86 | 0,3703 |
| | Voda 250 mL | 372,335 | 1 | 372,335 | 1,31 | 0,271 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 933,121 | 14 | 66,6515 | | |
| | Sok 150 mL | 1218,83 | 14 | 87,0593 | | |
| | Voda 150 mL | 1689,12 | 14 | 120,652 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 43209 | 14 | 3086,36 | | |
| | Sok 250 mL | 1971,88 | 14 | 140,849 | | |
| | Voda 250 mL | 3969,2 | 14 | 283,514 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 218743 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 202779 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 188584 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 362667 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 172794 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 142917 | 19 | | | |

Tablica 11. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost p RMS

| Analiza varijance za p RMS | | | | | | |
|----------------------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------|------------|--------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSUPANJE | F-Veličina | P-vrijednost |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 22955,2 | 1 | 22955,2 | 0,64 | 0,4381 |
| | Sok 150 mL | 69077,4 | 1 | 69077,4 | 2,37 | 0,146 |
| | Voda 150 mL | 5,65E+06 | 1 | 5,65E+06 | 173,3 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 502154 | 1 | 502154 | 13,53 | 0,0025 |
| | Sok 250 mL | 40202 | 1 | 40202 | 5,27 | 0,0377 |
| | Voda 250 mL | 12103,7 | 1 | 12103,7 | 15,5 | 0,0015 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 24805,8 | 1 | 24805,8 | 0,69 | 0,4207 |
| | Sok 150 mL | 61515,1 | 1 | 61515,1 | 2,11 | 0,1683 |
| | Voda 150 mL | 6,26E+06 | 1 | 6,26E+06 | 191,91 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 597797 | 1 | 597797 | 16,11 | 0,0013 |
| | Sok 250 mL | 2,11E+06 | 1 | 2,11E+06 | 276,96 | 0 |
| | Voda 250 mL | 897688 | 1 | 897688 | 1149,94 | 0 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 8739,97 | 1 | 8739,97 | 0,24 | 0,63 |
| | Sok 150 mL | 440856 | 1 | 440856 | 15,13 | 0,0016 |
| | Voda 150 mL | 420242 | 1 | 420242 | 12,89 | 0,003 |
| | Mlijeko 250 mL | 76123 | 1 | 76123 | 2,05 | 0,174 |
| | Sok 250 mL | 63567,5 | 1 | 63567,5 | 8,33 | 0,012 |
| | Voda 250 mL | 1211,39 | 1 | 1211,39 | 1,55 | 0,2333 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 50348,3 | 1 | 50348,3 | 1,4 | 0,2569 |
| | Sok 150 mL | 11507,1 | 1 | 11507,1 | 0,39 | 0,5399 |
| | Voda 150 mL | 7,48E+06 | 1 | 7,48E+06 | 229,61 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 230,393 | 1 | 230,393 | 0,01 | 0,9383 |
| | Sok 250 mL | 54220 | 1 | 54220 | 7,1 | 0,0185 |
| | Voda 250 mL | 13700,2 | 1 | 13700,2 | 17,55 | 0,0009 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 36951,5 | 1 | 36951,5 | 1,03 | 0,3284 |
| | Sok 150 mL | 142,406 | 1 | 142,406 | 0 | 0,9453 |
| | Voda 150 mL | 46,6308 | 1 | 46,6308 | 0 | 0,9704 |
| | Mlijeko 250 mL | 22418,8 | 1 | 22418,8 | 0,6 | 0,4499 |
| | Sok 250 mL | 38,1003 | 1 | 38,1003 | 0 | 0,9447 |
| | Voda 250 mL | 434,073 | 1 | 434,073 | 0,56 | 0,4682 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 504533 | 14 | 36038,1 | | |
| | Sok 150 mL | 408055 | 14 | 29146,8 | | |
| | Voda 150 mL | 456370 | 14 | 32597,8 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 519483 | 14 | 37105,9 | | |
| | Sok 250 mL | 106850 | 14 | 7632,13 | | |
| | Voda 250 mL | 10929 | 14 | 780,64 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 646179 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 973171 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 2,03E+07 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 1,66E+06 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 2,38E+06 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 926916 | 19 | | | |

Tablica 12. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost akustičnu gustoću

| Analiza varijance za akustičnu gustoću | | | | | | |
|--|----------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSTUPANJE | <i>F-Veličina</i> | <i>P-vrijednost</i> |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 63055,4 | 1 | 63055,4 | 931,54 | 0 |
| | Sok 150 mL | 245697 | 1 | 245697 | 6192,18 | 0 |
| | Voda 150 mL | 301260 | 1 | 301260 | 4113,38 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 55382,3 | 1 | 55382,3 | 640 | 0 |
| | Sok 250 mL | 79942,6 | 1 | 79942,6 | 1613,33 | 0 |
| | Voda 250 mL | 99139,4 | 1 | 99139,4 | 16315,61 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 158323 | 1 | 158323 | 2338,96 | 0 |
| | Sok 150 mL | 34,6985 | 1 | 34,6985 | 0,87 | 0,3656 |
| | Voda 150 mL | 4233,61 | 1 | 4233,61 | 57,81 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 5366,79 | 1 | 5366,79 | 62,02 | 0 |
| | Sok 250 mL | 192,873 | 1 | 192,873 | 3,89 | 0,0686 |
| | Voda 250 mL | 14,5705 | 1 | 14,5705 | 2,4 | 0,1438 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 285,115 | 1 | 285,115 | 4,21 | 0,0593 |
| | Sok 150 mL | 340,001 | 1 | 340,001 | 8,57 | 0,011 |
| | Voda 150 mL | 374,898 | 1 | 374,898 | 5,12 | 0,0401 |
| | Mlijeko 250 mL | 770,381 | 1 | 770,381 | 8,9 | 0,0099 |
| | Sok 250 mL | 346,904 | 1 | 346,904 | 7 | 0,0192 |
| | Voda 250 mL | 59,2623 | 1 | 59,2623 | 9,75 | 0,0075 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 71733 | 1 | 71733 | 1059,74 | 0 |
| | Sok 150 mL | 208,124 | 1 | 208,124 | 5,25 | 0,038 |
| | Voda 150 mL | 1879,72 | 1 | 1879,72 | 25,67 | 0,0002 |
| | Mlijeko 250 mL | 1962,11 | 1 | 1962,11 | 22,67 | 0,0003 |
| | Sok 250 mL | 55,9473 | 1 | 55,9473 | 1,13 | 0,306 |
| | Voda 250 mL | 1,46442 | 1 | 1,46442 | 0,24 | 0,6311 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 0,811411 | 1 | 0,811411 | 0,01 | 0,9144 |
| | Sok 150 mL | 40,2586 | 1 | 40,2586 | 1,01 | 0,3309 |
| | Voda 150 mL | 51,0764 | 1 | 51,0764 | 0,7 | 0,4177 |
| | Mlijeko 250 mL | 37,049 | 1 | 37,049 | 0,43 | 0,5235 |
| | Sok 250 mL | 2,61743 | 1 | 2,61743 | 0,05 | 0,8215 |
| | Voda 250 mL | 5,7511 | 1 | 5,7511 | 0,95 | 0,3471 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 947,654 | 14 | 67,6895 | | |
| | Sok 150 mL | 555,5 | 14 | 39,6786 | | |
| | Voda 150 mL | 1025,35 | 14 | 73,239 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 1211,49 | 14 | 86,5351 | | |
| | Sok 250 mL | 693,72 | 14 | 49,5515 | | |
| | Voda 250 mL | 85,0689 | 14 | 6,07635 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 320840 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 260656 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 323158 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 71546,9 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 86121,7 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 104472 | 19 | | | |

Tablica 13. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost akustični intenzitet

| Analiza varijance za akustični intenzitet | | | | | | |
|---|----------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSUPANJE | <i>F-Veličina</i> | <i>P-vrijednost</i> |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 88400,4 | 1 | 88400,4 | 928,37 | 0 |
| | Sok 150 mL | 344727 | 1 | 344727 | 6449,3 | 0 |
| | Voda 150 mL | 421886 | 1 | 421886 | 4266,31 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 42280,8 | 1 | 42280,8 | 656,77 | 0 |
| | Sok 250 mL | 60889,6 | 1 | 60889,6 | 1607,78 | 0 |
| | Voda 250 mL | 75539,9 | 1 | 75539,9 | 15643,69 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 222437 | 1 | 222437 | 2336 | 0 |
| | Sok 150 mL | 45,1066 | 1 | 45,1066 | 0,84 | 0,3738 |
| | Voda 150 mL | 5968,86 | 1 | 5968,86 | 60,36 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 4090,31 | 1 | 4090,31 | 63,54 | 0 |
| | Sok 250 mL | 147,648 | 1 | 147,648 | 3,9 | 0,0684 |
| | Voda 250 mL | 11,6157 | 1 | 11,6157 | 2,41 | 0,1432 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 399,286 | 1 | 399,286 | 4,19 | 0,0598 |
| | Sok 150 mL | 488,077 | 1 | 488,077 | 9,13 | 0,0091 |
| | Voda 150 mL | 530,053 | 1 | 530,053 | 5,36 | 0,0363 |
| | Mlijeko 250 mL | 570,745 | 1 | 570,745 | 8,87 | 0,01 |
| | Sok 250 mL | 252,037 | 1 | 252,037 | 6,66 | 0,0218 |
| | Voda 250 mL | 43,9671 | 1 | 43,9671 | 9,11 | 0,0092 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 100505 | 1 | 100505 | 1055,49 | 0 |
| | Sok 150 mL | 281,418 | 1 | 281,418 | 5,26 | 0,0377 |
| | Voda 150 mL | 2630,39 | 1 | 2630,39 | 26,6 | 0,0001 |
| | Mlijeko 250 mL | 1479,83 | 1 | 1479,83 | 22,99 | 0,0003 |
| | Sok 250 mL | 38,8053 | 1 | 38,8053 | 1,02 | 0,3286 |
| | Voda 250 mL | 1,50328 | 1 | 1,50328 | 0,31 | 0,5857 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 1,18127 | 1 | 1,18127 | 0,01 | 0,9129 |
| | Sok 150 mL | 53,9809 | 1 | 53,9809 | 1,01 | 0,332 |
| | Voda 150 mL | 68,1317 | 1 | 68,1317 | 0,69 | 0,4204 |
| | Mlijeko 250 mL | 27,3659 | 1 | 27,3659 | 0,43 | 0,525 |
| | Sok 250 mL | 1,85552 | 1 | 1,85552 | 0,05 | 0,828 |
| | Voda 250 mL | 4,42649 | 1 | 4,42649 | 0,92 | 0,3546 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 1333,1 | 14 | 95,2213 | | |
| | Sok 150 mL | 748,326 | 14 | 53,4519 | | |
| | Voda 150 mL | 1384,43 | 14 | 98,8878 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 901,283 | 14 | 64,3774 | | |
| | Sok 250 mL | 530,205 | 14 | 37,8718 | | |
| | Voda 250 mL | 67,6029 | 14 | 4,82878 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 450240 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 365693 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 452493 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 54520 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 65545,4 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 79602,4 | 19 | | | |

Tablica 14. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost kalorimetrijsku snagu

| Analiza varijance za kalorimetrijsku snagu | | | | | | |
|--|----------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSTUPANJE | <i>F-Veličina</i> | <i>P-vrijednost</i> |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 0,00141856 | 1 | 0,00141856 | 928,37 | 0 |
| | Sok 150 mL | 0,00553185 | 1 | 0,00553185 | 6449,3 | 0 |
| | Voda 150 mL | 0,00676976 | 1 | 0,00676976 | 4264,57 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,00347101 | 1 | 0,00347101 | 656,77 | 0 |
| | Sok 250 mL | 0,00497756 | 1 | 0,00497756 | 1568,02 | 0 |
| | Voda 250 mL | 0,00620139 | 1 | 0,00620139 | 15643,69 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 0,00356945 | 1 | 0,00356945 | 2336 | 0 |
| | Sok 150 mL | 7,24E-07 | 1 | 7,24E-07 | 0,84 | 0,3738 |
| | Voda 150 mL | 9,58991E-05 | 1 | 9,58991E-05 | 60,41 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,000335791 | 1 | 0,000335791 | 63,54 | 0 |
| | Sok 250 mL | 1,10722E-05 | 1 | 1,10722E-05 | 3,49 | 0,0829 |
| | Voda 250 mL | 0,00620139 | 1 | 0,00620139 | 15643,69 | 0 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 6,40735E-06 | 1 | 6,40735E-06 | 4,19 | 0,0598 |
| | Sok 150 mL | 7,83219E-06 | 1 | 7,83219E-06 | 9,13 | 0,0091 |
| | Voda 150 mL | 8,46255E-06 | 1 | 8,46255E-06 | 5,33 | 0,0367 |
| | Mlijeko 250 mL | 4,68549E-05 | 1 | 4,68549E-05 | 8,87 | 0,01 |
| | Sok 250 mL | 2,06839E-05 | 1 | 2,06839E-05 | 6,52 | 0,023 |
| | Voda 250 mL | 3,60944E-06 | 1 | 3,60944E-06 | 9,11 | 0,0092 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 0,00161281 | 1 | 0,00161281 | 1055,49 | 0 |
| | Sok 150 mL | 4,51592E-06 | 1 | 4,51592E-06 | 5,26 | 0,0377 |
| | Voda 150 mL | 4,22006E-05 | 1 | 4,22006E-05 | 26,58 | 0,0001 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,000121486 | 1 | 0,000121486 | 22,99 | 0,0003 |
| | Sok 250 mL | 2,62294E-06 | 1 | 2,62294E-06 | 0,83 | 0,3787 |
| | Voda 250 mL | 1,23E-07 | 1 | 1,23E-07 | 0,31 | 0,5857 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 1,90E-08 | 1 | 1,90E-08 | 0,01 | 0,9129 |
| | Sok 150 mL | 8,66E-07 | 1 | 8,66E-07 | 1,01 | 0,332 |
| | Voda 150 mL | 1,09184E-06 | 1 | 1,09184E-06 | 0,69 | 0,4208 |
| | Mlijeko 250 mL | 2,24658E-06 | 1 | 2,24658E-06 | 0,43 | 0,525 |
| | Sok 250 mL | 7,81E-08 | 1 | 7,81E-08 | 0,02 | 0,8776 |
| | Voda 250 mL | 3,63E-07 | 1 | 3,63E-07 | 0,92 | 0,3546 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 2,13922E-05 | 14 | 1,52802E-06 | | |
| | Sok 150 mL | 1,20084E-05 | 14 | 8,58E-07 | | |
| | Voda 150 mL | 2,22242E-05 | 14 | 1,58744E-06 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 7,39901E-05 | 14 | 5,28501E-06 | | |
| | Sok 250 mL | 0,000044442 | 14 | 3,17443E-06 | | |
| | Voda 250 mL | 5,54981E-06 | 14 | 3,96E-07 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 0,00722501 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 0,00586828 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 0,00726117 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 0,00447578 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 0,00535565 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 0,0065349 | 19 | | | |

Tablica 15. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost entalpiju

| Analiza varijance za entalpiju | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSTUPANJE | <i>F-Veličina</i> | <i>P-vrijednost</i> |
| A:Amplituda | Mlijeko 150 mL | 210,866 | 1 | 210,866 | 607,92 | 0 |
| | Sok 150 mL | 824,83 | 1 | 824,83 | 5391,3 | 0 |
| | Voda 150 mL | 1043,62 | 1 | 1043,62 | 2799,02 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 304,739 | 1 | 304,739 | 1432,66 | 0 |
| | Sok 250 mL | 291,13 | 1 | 291,13 | 5363,88 | 0 |
| | Voda 250 mL | 317,228 | 1 | 317,228 | 4339,12 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 560,324 | 1 | 560,324 | 1615,41 | 0 |
| | Sok 150 mL | 0,0655225 | 1 | 0,0655225 | 0,43 | 0,5234 |
| | Voda 150 mL | 10,9892 | 1 | 10,9892 | 29,47 | 0,0001 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,0473406 | 1 | 0,0473406 | 0,22 | 0,6444 |
| | Sok 250 mL | 1,05717 | 1 | 1,05717 | 19,48 | 0,0006 |
| | Voda 250 mL | 0,0505861 | 1 | 0,0505861 | 0,69 | 0,4195 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 1,18765 | 1 | 1,18765 | 3,42 | 0,0855 |
| | Sok 150 mL | 0,497618 | 1 | 0,497618 | 3,25 | 0,0929 |
| | Voda 150 mL | 1,23686 | 1 | 1,23686 | 3,32 | 0,09 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,0318346 | 1 | 0,0318346 | 0,15 | 0,7047 |
| | Sok 250 mL | 0,394773 | 1 | 0,394773 | 7,27 | 0,0174 |
| | Voda 250 mL | 0,721357 | 1 | 0,721357 | 9,87 | 0,0072 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 241,072 | 1 | 241,072 | 695,01 | 0 |
| | Sok 150 mL | 1,53762 | 1 | 1,53762 | 10,05 | 0,0068 |
| | Voda 150 mL | 3,26862 | 1 | 3,26862 | 8,77 | 0,0103 |
| | Mlijeko 250 mL | 1,86827E-05 | 1 | 1,86827E-05 | 0 | 0,9927 |
| | Sok 250 mL | 0,451943 | 1 | 0,451943 | 8,33 | 0,012 |
| | Voda 250 mL | 0,103445 | 1 | 0,103445 | 1,41 | 0,254 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 6,91668E-05 | 1 | 6,91668E-05 | 0 | 0,9889 |
| | Sok 150 mL | 0,158397 | 1 | 0,158397 | 1,04 | 0,3262 |
| | Voda 150 mL | 0,106372 | 1 | 0,106372 | 0,29 | 0,6016 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,0701647 | 1 | 0,0701647 | 0,33 | 0,5749 |
| | Sok 250 mL | 0,038076 | 1 | 0,038076 | 0,7 | 0,4163 |
| | Voda 250 mL | 0,0491209 | 1 | 0,0491209 | 0,67 | 0,4261 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 4,85608 | 14 | 0,346863 | | |
| | Sok 150 mL | 2,1419 | 14 | 0,152993 | | |
| | Voda 150 mL | 5,21993 | 14 | 0,372852 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 2,97791 | 14 | 0,212708 | | |
| | Sok 250 mL | 0,759863 | 14 | 0,0542759 | | |
| | Voda 250 mL | 1,02353 | 14 | 0,073109 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 1109,75 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 871,849 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 1110,76 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 321,151 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 309,417 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 337,613 | 19 | | | |

Tablica 16. Analiza varijance ultrazvučnih parametara (amplituda i vrijeme) za izlaznu vrijednost entropiju

| Analiza varijance za entropija | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| IZVOR | UZORAK | SUMA KVADRATA | STUPNJEVI SLOBODE | SREDNJE ODSTUPANJE | <i>F-Veličina</i> | <i>P-vrijednost</i> |
| A: Amplituda | Mlijeko 150 mL | 0,00234901 | 1 | 0,00234901 | 557,06 | 0 |
| | Sok 150 mL | 0,00892307 | 1 | 0,00892307 | 5106,78 | 0 |
| | Voda 150 mL | 0,0112024 | 1 | 0,0112024 | 2597,57 | 0 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,0028808 | 1 | 0,0028808 | 34,92 | 0 |
| | Sok 250 mL | 0,00332496 | 1 | 0,00332496 | 4932,13 | 0 |
| | Voda 250 mL | 0,00352536 | 1 | 0,00352536 | 4475,92 | 0 |
| B: Vrijeme tretiranja | Mlijeko 150 mL | 0,0065549 | 1 | 0,0065549 | 1554,46 | 0 |
| | Sok 150 mL | 5,18E-07 | 1 | 5,18E-07 | 0,3 | 0,5947 |
| | Voda 150 mL | 0,000105033 | 1 | 0,000105033 | 24,35 | 0,0002 |
| | Mlijeko 250 mL | 0,000139864 | 1 | 0,000139864 | 1,7 | 0,2139 |
| | Sok 250 mL | 1,61833E-05 | 1 | 1,61833E-05 | 24,01 | 0,0002 |
| | Voda 250 mL | 1,19E-07 | 1 | 1,19E-07 | 0,15 | 0,7032 |
| AA | Mlijeko 150 mL | 1,61161E-05 | 1 | 1,61161E-05 | 3,82 | 0,0709 |
| | Sok 150 mL | 1,07081E-05 | 1 | 1,07081E-05 | 6,13 | 0,0267 |
| | Voda 150 mL | 7,87051E-06 | 1 | 7,87051E-06 | 1,82 | 0,1982 |
| | Mlijeko 250 mL | 4,59531E-05 | 1 | 4,59531E-05 | 0,56 | 0,4678 |
| | Sok 250 mL | 5,83839E-06 | 1 | 5,83839E-06 | 8,66 | 0,0107 |
| | Voda 250 mL | 9,43985E-06 | 1 | 9,43985E-06 | 11,99 | 0,0038 |
| AB | Mlijeko 150 mL | 0,00270091 | 1 | 0,00270091 | 640,51 | 0 |
| | Sok 150 mL | 2,90317E-05 | 1 | 2,90317E-05 | 16,62 | 0,0011 |
| | Voda 150 mL | 3,16371E-05 | 1 | 3,16371E-05 | 7,34 | 0,017 |
| | Mlijeko 250 mL | 5,49103E-05 | 1 | 5,49103E-05 | 0,67 | 0,4282 |
| | Sok 250 mL | 5,05293E-06 | 1 | 5,05293E-06 | 7,5 | 0,016 |
| | Voda 250 mL | 1,13673E-06 | 1 | 1,13673E-06 | 1,44 | 0,2495 |
| UZORAK | Mlijeko 150 mL | 4,31E-11 | 1 | 4,31E-11 | 0 | 0,9975 |
| | Sok 150 mL | 1,84679E-06 | 1 | 1,84679E-06 | 1,06 | 0,3213 |
| | Voda 150 mL | 1,17237E-06 | 1 | 1,17237E-06 | 0,27 | 0,6102 |
| | Mlijeko 250 mL | 5,55951E-06 | 1 | 5,55951E-06 | 0,07 | 0,799 |
| | Sok 250 mL | 4,55E-07 | 1 | 4,55E-07 | 0,67 | 0,4252 |
| | Voda 250 mL | 5,39E-07 | 1 | 5,39E-07 | 0,68 | 0,4219 |
| UKUPNA POGREŠKA | Mlijeko 150 mL | 5,90355E-05 | 14 | 4,21682E-06 | | |
| | Sok 150 mL | 2,44622E-05 | 14 | 1,7473E-06 | | |
| | Voda 150 mL | 6,03773E-05 | 14 | 4,31267E-06 | | |
| | Mlijeko 250 mL | 0,00115495 | 14 | 8,24962E-05 | | |
| | Sok 250 mL | 9,43799E-06 | 14 | 6,74E-07 | | |
| | Voda 250 mL | 1,10268E-05 | 14 | 7,88E-07 | | |
| UKUPNA KOREKCIJA | Mlijeko 150 mL | 0,0127236 | 19 | | | |
| | Sok 150 mL | 0,00946475 | 19 | | | |
| | Voda 150 mL | 0,011926 | 19 | | | |
| | Mlijeko 250 mL | 0,00440265 | 19 | | | |
| | Sok 250 mL | 0,0035432 | 19 | | | |
| | Voda 250 mL | 0,00375849 | 19 | | | |

Tablica 17. Statistički parametri regresije i analize

| UZORAK | | PARAMETAR | | | | | | | |
|---|----------------|-----------|---------|---------|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| | | U RMS | I RMS | p RMS | Akustična gustoća | Akustični intenzitet | kalorimetrijska snaga | Entalpija | Entropija |
| R – kvadratna (%) | Mlijeko 150 mL | 64,6716 | 99,5734 | 21,9206 | 99,7046 | 99,7039 | 99,7039 | 99,5624 | 99,536 |
| | Sok 150 mL | 64,4257 | 99,3989 | 58,0696 | 99,7869 | 99,7954 | 99,7954 | 99,7543 | 99,7415 |
| | Voda 150 mL | 79,8492 | 99,1043 | 97,7564 | 99,6827 | 99,694 | 99,6939 | 99,5301 | 99,4937 |
| | Mlijeko 250 mL | 39,1095 | 88,0857 | 68,6411 | 98,3067 | 98,3469 | 98,3469 | 99,0727 | 73,767 |
| | Sok 250 mL | 54,0919 | 98,8588 | 95,509 | 99,1945 | 99,1911 | 99,1702 | 99,7544 | 99,7336 |
| | Voda 250 mL | 76,8613 | 97,2227 | 98,8209 | 99,9186 | 99,9151 | 99,9151 | 99,6968 | 99,7066 |
| R – kvadratna (prilagođen za stupnjeve slobode) (%) | Mlijeko 150 mL | 55,2507 | 99,4597 | 1,09936 | 99,6259 | 99,625 | 99,625 | 99,4457 | 99,4123 |
| | Sok 150 mL | 54,9393 | 99,2387 | 46,8881 | 99,7301 | 99,7408 | 99,7408 | 99,6888 | 99,6726 |
| | Voda 150 mL | 74,4756 | 98,8655 | 97,1581 | 99,5981 | 99,6125 | 99,6123 | 99,4047 | 99,3587 |
| | Mlijeko 250 mL | 22,8721 | 84,9086 | 60,2787 | 97,8552 | 97,906 | 97,906 | 98,8255 | 66,7715 |
| | Sok 250 mL | 41,8497 | 98,5545 | 94,3115 | 98,9797 | 98,9754 | 98,9489 | 99,6889 | 99,6626 |
| | Voda 250 mL | 70,6909 | 96,4821 | 98,5065 | 99,8969 | 99,8924 | 99,8924 | 99,616 | 99,6284 |

Tablica 18. Polinomi, optimalne vrijednosti i optimalni faktori za analizirani uzorak mlijeko 150 i 250 mL tretiranih ultrazvukom visoke snage

| | | | | | | | | |
|---|--|---|---|--|--|---|--|---|
| POLINOM (M 150 mL) | U RMS = 487,348 + 1,70667*amplituda + 6,68475*vrijeme tretmana - 0,0154483*amplitud a ² - 0,101977*amplituda *vrijeme tretmana | I RMS = 359,631 + 3,82161*amplituda + 2,51998*vrijeme tretmana - 0,00803733*amplituda ^2 - 0,031449*amplituda*v rijeme tretmana | p RMS = 992,533 - 3,09618*amplituda - 70,6347*vrijeme tretmana - 0,0204218*amplitud a ² + 0,932541*amplituda *vrijeme tretmana | akustična gustoća = 93,1931 - 3,04145*amplituda + 3,2624*vrijeme tretmana - 0,00368849*amplitu da ² + 1,1131*amplituda*v rijeme tretmana | akustični intenzitet = 109,771 - 3,59964*amplituda + 3,95839*vrijeme tretmana - 0,00436497*amplituda ^2 + 1,31756*amplituda*v rijeme tretmana | snaga kalom = 0,0139055 - 0,000455991*amplitu da + 0,000501436*vrijeme tretmana - 5,5294E- 7*amplituda ² + 0,000166904*amplitu da*vrijeme tretmana | entalpija = 5,34697 - 0,174098*amplituda + 0,279473*vrijeme tretmana - 0,000238058*amplitu da ² + 0,064528*amplituda*v rijeme tretmana | entropija = 0,0172992 - 0,00057553*amplitud a + 0,00119406*vrijeme tretmana - 8,76939E- 7*amplituda ² + 0,000215988*amplitu da*vrijeme tretmana |
| OPTIMALNA VRIJEDNOST | 546,853 | 659,544 | 780,31 | 439,599 | 520,443 | 0,065928 | 25,9503 | 0,0877341 |
| OPTIMALNI FAKTORI Amplituda (μ m) i Vrijeme (min) | Amplituda: 35,4319 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 1,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 |
| POLINOM (M 250 mL) | U RMS = 224,302 + 5,93336*amplituda + 56,6821*vrijeme tretmana - 0,0282668*amplitud a ² - 0,714651*amplituda *vrijeme tretmana | I RMS = 132,463 + 7,98665*amplituda + 40,474*vrijeme tretmana - 0,0235038*amplituda ² - 0,523984*amplituda*v rijeme tretmana | p RMS = 630,148 + 1,30232*amplituda + 112,381*vrijeme tretmana - 0,0602694*amplitud a ² + 0,0630827*amplitud a*vrijeme tretmana | akustična gustoća = 72,6487 + 1,27873*amplituda + 1,65326*vrijeme tretmana - 0,00606306*amplitu da ² + 0,184093*amplituda *vrijeme tretmana | akustični intenzitet = 63,1866 + 1,11371*amplituda + 1,48575*vrijeme tretmana - 0,00521868*amplituda ^2 + 0,159875*amplituda*v rijeme tretmana | snaga kalom = 0,0181043 + 0,000319101*amplitu da + 0,000425699*vrijeme tretmana - 0,00000149526*ampli tuda ² + 0,0000458077*amplit uda*vrijeme tretmana | entalpija = 4,40513 + 0,107025*amplituda + 0,0334288*vrijeme tretmana + 0,0000389753*amplit uda ² - 0,0000179637*amplit uda*vrijeme tretmana | entropija = 0,0163319 + 0,0000527715*amplit uda + 0,000212469*vrijeme tretmana + 0,0000014808*amplit uda ² + 0,0000307966*amplit uda*vrijeme tretmana |
| OPTIMALNA VRIJEDNOST | 588,341 | 660,316 | 1316,15 | 260,267 | 227,21 | 0,0651005 | 15,6872 | 0,0561698 |
| OPTIMALNI FAKTORI Amplituda (μ m) i Vrijeme (min) | Amplituda: 29,1067 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 13,9474 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 |

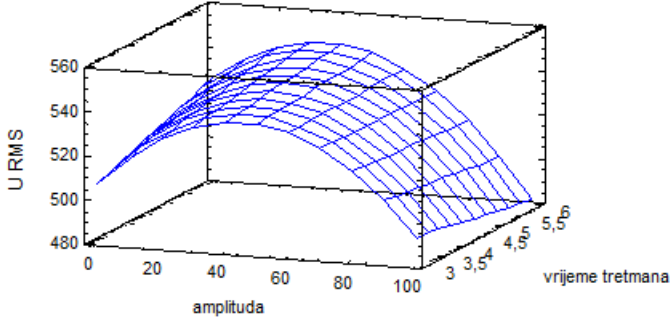
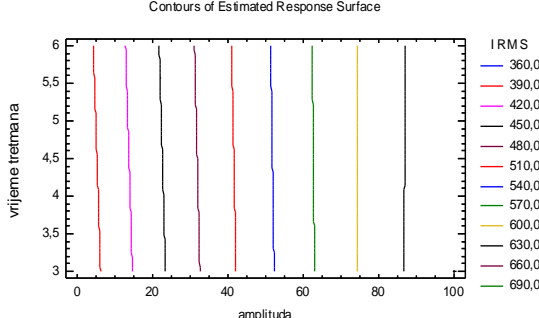
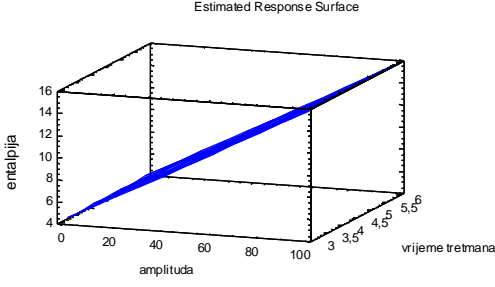
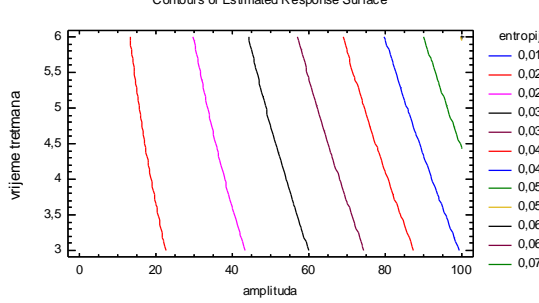
Tablica 19. Polinomi, optimalne vrijednosti i optimalni faktori za analizirani uzorak sok jabuke 150 i 250 mL tretiranih ultrazvukom visoke snage

| | | | | | | | | |
|---|---|--|--|---|--|--|--|--|
| POLINOM (J 150 mL) | $U_{RMS} = 509,723 + 0,619236 \cdot \text{amplituda} + 6,198 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,0104497 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,0235856 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $I_{RMS} = 368,494 + 3,31793 \cdot \text{amplituda} + 2,42236 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00573644 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00552048 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $p_{RMS} = 556,288 + 14,9858 \cdot \text{amplituda} - 14,5582 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,14504 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,445818 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{akustična gustoća} = 72,0719 + 3,82504 \cdot \text{amplituda} + 3,90826 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,0040279 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,0599565 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{akustični intenzitet} = 85,6367 + 4,53048 \cdot \text{amplituda} + 4,52468 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00482596 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,069719 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{snaga kalom} = 0,0108482 + 0,000573907 \cdot \text{amplituda} + 0,000573172 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 6,11337E-7 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,00000883179 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{entalpija} = 4,13825 + 0,221175 \cdot \text{amplituda} + 0,298511 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,000154095 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,00515347 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{entropija} = 0,013893 + 0,000772962 \cdot \text{amplituda} + 0,00102328 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 7,14819E-7 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,000022393 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ |
| OPTIMALNA VRIJEDNOST | 552,368 | 660,769 | 833,693 | 408,034 | 483,083 | 0,0611955 | 24,0643 | 0,080393 |
| OPTIMALNI FAKTORI Amplituda (μm) i Vrijeme (min) | Amplituda: 22,3555 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 47,0404 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 |
| POLINOM (J 250 mL) | $U_{RMS} = 566,317 - 1,51611 \cdot \text{amplituda} + 1,28966 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,0254079 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,289553 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $I_{RMS} = 394,239 + 2,50215 \cdot \text{amplituda} - 2,05308 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00152489 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,0497059 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $p_{RMS} = -734,133 - 2,48136 \cdot \text{amplituda} + 266,183 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,0550753 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,967732 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{akustična gustoća} = 67,3023 + 2,06694 \cdot \text{amplituda} - 3,64567 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00406859 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,031086 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{akustični intenzitet} = 58,4569 + 1,8011 \cdot \text{amplituda} - 3,12363 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00346794 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,0258893 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{snaga kalom} = 0,0165721 + 0,000518178 \cdot \text{amplituda} - 0,000837269 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 9,9347E-7 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00000673085 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{entalpija} = 4,53541 + 0,109666 \cdot \text{amplituda} - 0,294778 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00013725 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00279394 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $\text{entropija} = 0,0157063 + 0,000377526 \cdot \text{amplituda} - 0,00107308 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 5,2782E-7 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00000934216 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ |
| OPTIMALNA VRIJEDNOST | 585,787 | 646,71 | 854,73 | 231,699 | 202,283 | 0,0579626 | 14,0834 | 0,0477641 |
| OPTIMALNI FAKTORI Amplituda (μm) i Vrijeme (min) | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 1,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 |

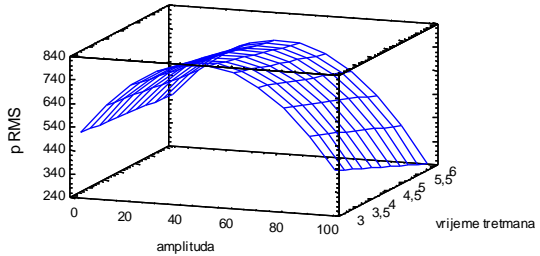
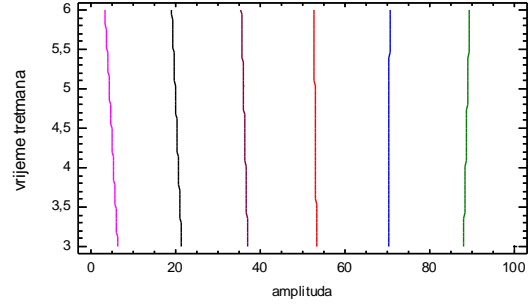
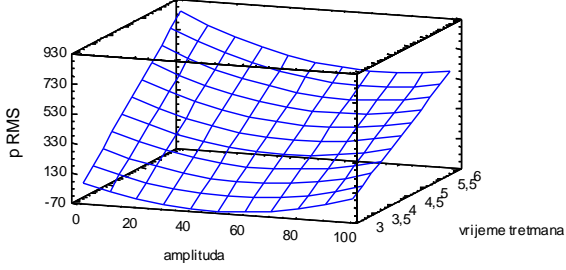
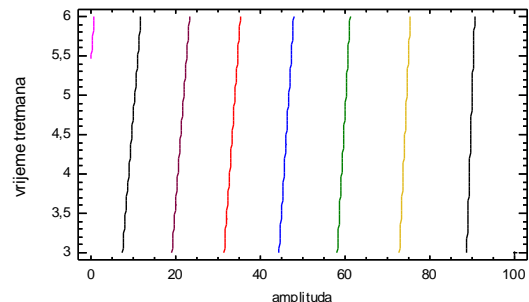
Tablica 20. Polinomi, optimalne vrijednosti i optimalni faktori za analizirani uzorak vode 150 i 250 mL tretiranih ultrazvukom visoke snage

| | | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|---|---|---|--|
| POLINOM (V 150 mL) | $U \text{ RMS} = 479,363 + 0,46955 \cdot \text{amplituda} + 18,7464 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,0120126 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,000835717 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $I \text{ RMS} = 353,1 + 3,21584 \cdot \text{amplituda} + 9,3077 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00528007 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,0101583 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $p \text{ RMS} = -2207,58 + 21,766 \cdot \text{amplituda} + 948,044 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,141608 \cdot \text{amplituda}^2 - 11,3701 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | akustična gustoća = $106,602 + 2,24826 \cdot \text{amplituda} + 0,626051 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,00422956 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,180187 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | akustični intenzitet = $126,029 + 2,6585 \cdot \text{amplituda} + 0,783757 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,0050292 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,21315 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | snaga kalom = $0,01596 + 0,000336937 \cdot \text{amplituda} + 0,000100325 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 6,35462 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,0000269982 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | entalpija = $6,13342 + 0,146845 \cdot \text{amplituda} + 0,11605 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,00024294 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00751377 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | entropija = $0,0209882 + 0,000505188 \cdot \text{amplituda} + 0,000351355 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 6,12831 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,0000233762 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ |
| OPTIMALNA VRIJEDNOST | 596,528 | 671,635 | 3434,37 | 485,591 | 574,764 | 0,0728092 | 28,4518 | 0,0937692 |
| OPTIMALNI FAKTORI Amplituda (μm) i Vrijeme (min) | Amplituda: 19,7458 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 1,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 |
| POLINOM (V 250 mL) | $U \text{ RMS} = 651,726 - 2,45523 \cdot \text{amplituda} - 8,6804 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,0025531 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,145204 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $I \text{ RMS} = 420,659 + 2,30022 \cdot \text{amplituda} - 3,36812 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00181476 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,0463875 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | $p \text{ RMS} = -488,471 + 0,722336 \cdot \text{amplituda} + 166,184 \cdot \text{vrijeme tretmana} + 0,00760292 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,486451 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | akustična gustoća = $55,7975 + 2,14714 \cdot \text{amplituda} + 0,316568 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00168162 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00502932 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | akustični intenzitet = $48,8076 + 1,86911 \cdot \text{amplituda} + 0,252094 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00144845 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,0050956 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | snaga kalom = $0,0139844 + 0,000535538 \cdot \text{amplituda} + 0,0000722302 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 4,1501 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00000146 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | entalpija = $3,50006 + 0,137884 \cdot \text{amplituda} + 0,0338849 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00018553 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,00133669 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ | entropija = $0,0116182 + 0,000464858 \cdot \text{amplituda} + 0,000172184 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 6,71153 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,00000443102 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$ |
| OPTIMALNA VRIJEDNOST | 623,668 | 640,157 | 506,441 | 258,613 | 225,804 | 0,0646975 | 15,1338 | 0,0505798 |
| OPTIMALNI FAKTORI Amplituda (μm) i Vrijeme (min) | Amplituda: 1,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 1,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 6,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 | Amplituda: 100,0 Vrijeme: 3,00 |

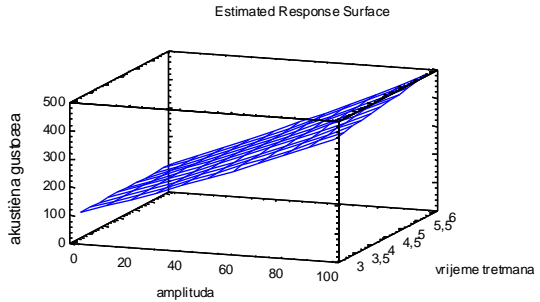
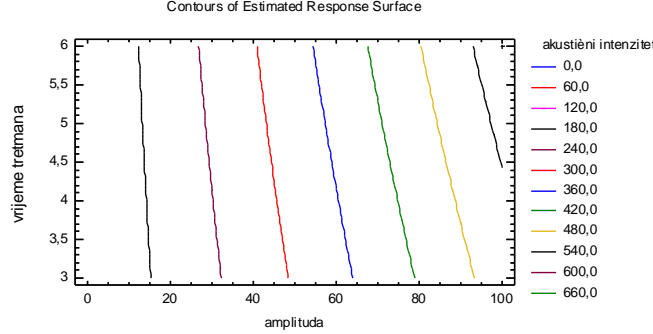
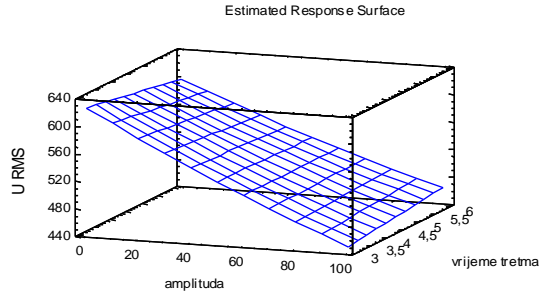
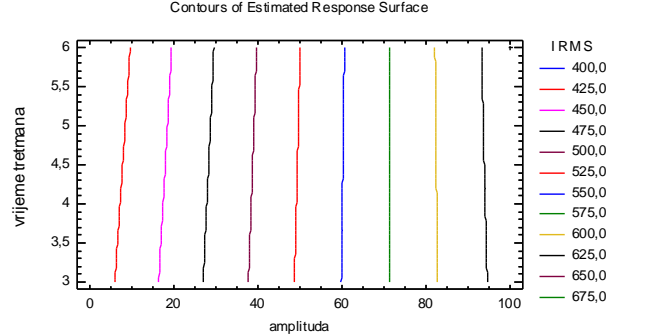
Tablica 21. 3 D i konturni dijagrami za analizirani uzorak mlijeko 150 i 250 mL

| M 150 mL | U RMS | I RMS |
|----------|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface</p>  | <p style="text-align: center;">Contours of Estimated Response Surface</p>  |
| M 250 mL | entalpija | entropija |
| | <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface</p>  | <p style="text-align: center;">Contours of Estimated Response Surface</p>  |

Tablica 22. 3 D i konturni dijagrami za analizirani uzorak sok jabuka 150 i 250 mL

| J 150 mL | p RMS | Kalorimetrijska snaga |
|----------|--|---|
| | <p data-bbox="683 450 862 466">Estimated Response Surface</p>  <p data-bbox="470 598 504 646">p RMS</p> <p data-bbox="616 726 705 742">amplituda</p> <p data-bbox="896 710 1008 726">vrijeme tretmana</p> | <p data-bbox="1433 446 1702 462">Contours of Estimated Response Surface</p>  <p data-bbox="1265 550 1299 678">vrijeme tretmana</p> <p data-bbox="1534 766 1624 782">amplituda</p> <p data-bbox="1803 486 1904 502">snaga kalom</p> <ul data-bbox="1803 510 1904 758" style="list-style-type: none"> 0,0 0,008 0,016 0,024 0,032 0,04 0,048 0,056 0,064 0,072 0,08 0,088 |
| J 250 mL | <p data-bbox="705 949 884 965">Estimated Response Surface</p>  <p data-bbox="481 1101 515 1149">p RMS</p> <p data-bbox="638 1244 728 1260">amplituda</p> <p data-bbox="929 1228 1041 1244">vrijeme tretmana</p> | <p data-bbox="1433 933 1702 949">Contours of Estimated Response Surface</p>  <p data-bbox="1265 1037 1299 1165">vrijeme tretmana</p> <p data-bbox="1534 1260 1624 1276">amplituda</p> <p data-bbox="1803 981 1904 997">snaga kalom</p> <ul data-bbox="1803 1005 1904 1244" style="list-style-type: none"> 0,0 0,006 0,012 0,018 0,024 0,03 0,036 0,042 0,048 0,054 0,06 0,066 |

Tablica 23. 3 D i konturni dijagrami za analizirani uzorak voda 150 i 250 mL

| V 150 mL | akustična gustoća | akustični intenzitet |
|----------|---|--|
| | <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface</p>  <p>A 3D surface plot showing the relationship between amplitude (0 to 100), treatment time (3 to 5.5), and acoustic density (0 to 500). The surface is a blue mesh that slopes upwards as both amplitude and treatment time increase.</p> | <p style="text-align: center;">Contours of Estimated Response Surface</p>  <p>A contour plot showing acoustic intensity levels across amplitude (0 to 100) and treatment time (3 to 6). The contours are colored lines representing intensity values from 0.0 to 660.0. The intensity generally increases with both amplitude and treatment time.</p> |
| V 250 mL | U RMS | I RMS |
| | <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface</p>  <p>A 3D surface plot showing the relationship between amplitude (0 to 100), treatment time (3 to 5.5), and U RMS (440 to 640). The surface is a blue mesh that shows a slight dip in the middle before rising again as amplitude and treatment time increase.</p> | <p style="text-align: center;">Contours of Estimated Response Surface</p>  <p>A contour plot showing I RMS levels across amplitude (0 to 100) and treatment time (3 to 6). The contours are colored lines representing I RMS values from 400.0 to 675.0. The values generally increase with both amplitude and treatment time.</p> |

Prema dobivenim rezultatima statističke analize za izlaznu vrijednost U RMS (tablica 9), vidljivo je da amplituda ima značajan utjecaj na uzorke vode od 150 mL (V1-V20), soka jabuke (J1-J20) od 150 mL i mlijeka (M1-M20) od 150 mL. Vrijeme tretiranja se pokazalo kao značajan faktor na izlaznu vrijednost U RMS kod tretirana uzorka vode 150 mL (V1-V20). Kvadratna vrijednost amplitude značajno je utjecala na U RMS kod tretiranja uzoraka vode 150 mL (V1-V20), soka jabuke 150 mL (J1-J20) i mlijeka 150 mL (M1-M20) i sok jabuka 250 mL (J1-J20).

Dobiveni rezultati statističke analize za izlaznu vrijednost I RMS (tablica 10), amplituda ima značajan utjecaj za sve tretirane uzorke voda 150 mL (V1-V20), sok 150 mL (J1-J20), mlijeko 150 mL (M1-M20), voda 250 mL (V1-V20), sok 250 mL (J1-J20) i mlijeko 250 mL (M1-M20). Vrijeme tretiranja je imalo značajan utjecaj na I RMS vrijednost kod tretirane vode 150 mL (V1-V20). Značajan utjecaj je imala i kvadratna vrijednost amplitude za uzorke vode 150 mL (V1-V20), soka jabuke 150 mL (J1-J20) i mlijeka 150 mL (M1-M20). Interakcija amplitude i vremena tretiranja se pokazala statistički značajnom kod tretiranog uzorka mlijeka 250 mL (M1-M20).

Kod analize ultrazvučnih parametara za p RMS (tablica 11) vrijednost statistički značajni su se pokazali: amplituda i vrijeme tretiranja kod uzoraka voda 150 (V1-V20), voda 250 mL (V1-V20), sok 250 mL (J1-J20) i mlijeko 250 mL (M1-M20). Kvadratna vrijednost amplitude za uzorke sok 150 mL (J1-J20), voda 150 mL (V1-V20) i sok 250 mL (J1-J20), a interakcija amplitude i vremena tretiranja kod uzoraka vode 150 mL (V1-V20), sok 250 mL (J1-J20) i voda 250 mL (V1-V20) su statistički značajno utjecali za izlaznu vrijednost p RMS.

Na akustičnu gustoću (tablica 12) i akustični intenzitet (tablica 13) su značajan utjecaj imali: amplituda na svim uzorcima, vrijeme tretiranja na vodu 150 (V1-V20) i mlijeko 250 mL (M1-M20). Kvadratna vrijednost amplitude imala je značajan utjecaj na uzorke voda 150 mL (V1-V20), sok 150 mL (J1-J20), voda 250 mL (V1-V20), sok 250 mL (J1-J20) i mlijeko 250 mL (M1-M20), a interakcija amplitude i vremena tretiranja za uzorke voda 150 mL (V1-V20), sok 150 mL (J1-J20), mlijeko 150 (M1-M20) i mlijeko 250 mL (M1-M20).

Dobiveni rezultati statističke analize za izlaznu vrijednost kalorimetrijska snaga (tablica 14), pokazali su da značajan utjecaj ima amplituda na svim uzorcima, vrijeme tretiranja na uzorke mlijeko 150 mL (M1-M20), voda 150 mL (V1-V20) i mlijeko 250 mL (M1-M20). Kvadratna vrijednost amplitude ima značajan utjecaj na uzorke voda 150 mL (V1-V20), sok 150 mL (J1-J20), voda 250 mL (V1-V20), sok 250 mL (J1-J20) i mlijeko 250 mL (M1-M20), a interakcija

amplitude i vremena tretiranja za uzorke voda 150 mL (V1-V20), sok 150 mL (J1-J20), mlijeko 150 mL (M1-M20) i mlijeko 250 mL (M1-M20).

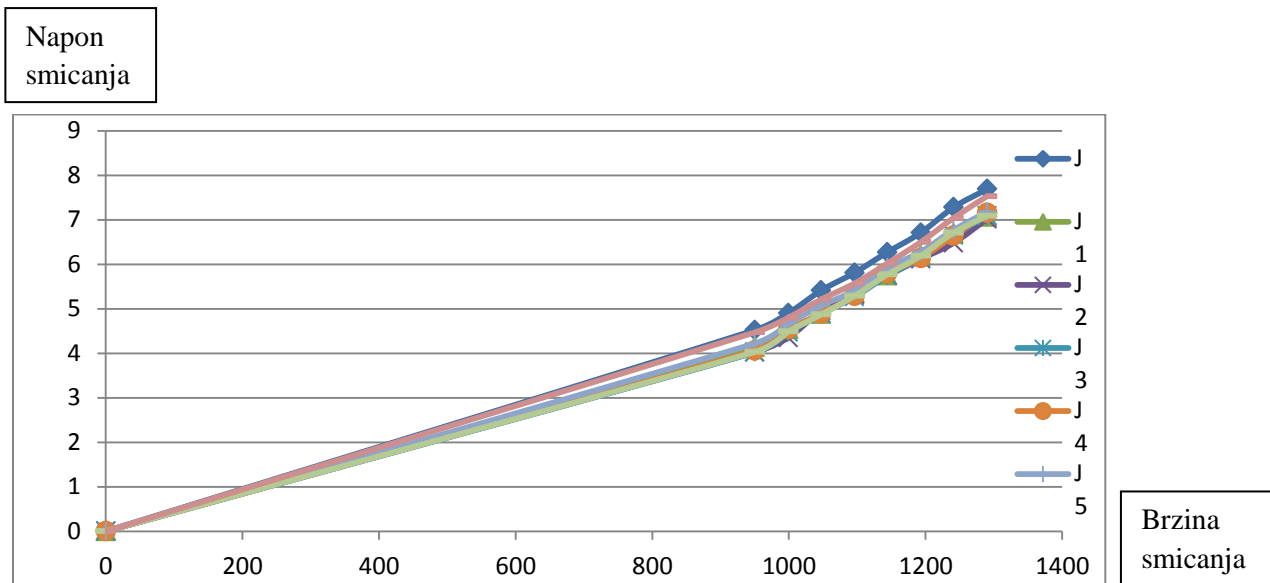
Na entalpiju (tablica 15) i entropiju (tablica 16) značajan su utjecaj imali amplituda za sve uzorke, vrijeme tretiranja na uzorke voda 150 mL (V1-V20) i sok 250 mL (J1-J20), kvadratna vrijednost amplitude na vodu 250 mL (V1-V20) i sok 250 mL (J1-J20), a interakcija amplitude i vremena tretiranja značajno je utjecala na uzorke voda 150 mL (V1-V20), sok 150 mL (J1-J20), mlijeko 150 mL (M1-M20) i sok 250 mL (J1-J20).

U tablicama 21-23 su prikazani 3D grafovi za pojedine uzorke koji opisuju utjecaj amplitude i vremena tretiranja na izlazne vrijednosti. Za 3D prikaz za mlijeko 150 mL (M1-M20) vidljivo je povećanjem amplitude do oko 50 % dolazi do povećanja napona, a zatim počinje padati, dok porastom vremena tretiranja se povećava. Kod mlijeka 250 mL (M1-M20) vidi se da se povećanjem temperature i vremena tretiranja povećava entalpija. Kod soka jabuke 150 mL (J1-J20), 3D graf prikazuje da porastom amplitude raste tlak, a onda počinje padati nakon 50 %, dok porastom vremena tretiranja također pada. 3D graf kod sok jabuka 250 mL (J1-J20) vidljivo je da tlak pada s početne vrijednosti povećanjem temperature, a zatim opet raste, a neznatno se povećava tijekom vremena tretiranja. Akustična gustoća prikazana na 3D grafu za vodu 150 mL (V1-V20) raste porastom amplitude i vremena tretiranja, a U RMS kod vode 250 mL (V1-V20) porastom amplitude napon pada, ali raste tijekom vremena tretiranja.

4.5. REZULTATI REOLOŠKIH PARAMETARA

Tablica 24. Reološki parametri netretiranog i ultrazvučno tretiranog soka jabuke

| UZORAK | PRIVIDNA VISKOZNOST μ (mPas) | KOEFICIJENT KONZISTENCIJE k (Pasⁿ)x10⁻⁵ | INDEKS TEČENJA n | KOEFICIJENT DETERMINACIJE R² |
|--------------------|--|--|---------------------------------|--|
| J (netretirani) | 6 | 2,692 | 1,754 | 0,999 |
| J1 | 5 | 2,265 | 1,767 | 0,999 |
| J2 | 5 | 1,667 | 1,808 | 0,994 |
| J3 | 5 | 1,330 | 1,841 | 0,999 |
| J4 | 6 | 1,629 | 1,813 | 0,998 |
| J5 | 6 | 3,055 | 1,727 | 0,998 |
| J6 | 6 | 3,350 | 1,719 | 0,997 |
| J7 | 5 | 1,253 | 1,851 | 0,998 |



Slika 18. Ovisnost napona smicanja o brzini smicanja netretiranog ultrazvučno tretiranog soka jabuke

Rezultati ispitivanih reoloških parametara iz tablice 24 i grafičkog prikaza na slici 18 ukazuju na to da nije došlo do nikakvih značajnih promjena i da temperatura nema utjecaj na reološke parametre koeficijent konzistencije (k) i indeks tečenja (n). Vidljivo je da nije toliko energije dovedeno u sustav da bi došlo do promjena na viskoznosti.

5. ZAKLJUČCI

- Upotreba ultrazvuka je kraći proces obrade hrane koji traje nekoliko minuta, te na taj način troši manje energije u odnosu na neke tradicionalne načine obrade koji mogu trajati i do nekoliko sati.
- Na temelju dobivenih rezultata zaključujemo da dolazi do neznatnog povećanja temperature koja bi mogla narušiti senzorska i nutritivna svojstva proizvoda, poput nekih drugih metoda kao na primjer pasterizacija.
- Koeficijenti iskorištenja se razlikuju dobiveni različitim razmatranjima snage. Iz dobivenih rezultata utvrđeno je da je koeficijent elektroakustičkog iskorištenja veći elektromehaničkom metodom, nego kalorimetrijskom i akustičnom metodom.
- Ovisno o stupnju pobude medija dobije se različita zračena akustička i kalorimetrijska snaga, jer sonotroda odguruje medij oko sebe pri većim pobudama pa dolazi do zračenja medija (potrebno da se izazovu traženi efekti, implozija mali mjehurića, odnosno kavitacija)
- Statističkom analizom je utvrđeno da su statistički značajan utjecaj za pojedine uzorke imali amplituda, vrijeme tretiranja, njihova interakcija i kvadratna vrijednost amplitude.
- Utvrđeno je da prilikom tretmana ultrazvukom ne dolazi do reoloških promjena.

6. LITERATURA

- Anderson-Cook, C. M., Borror, C. M., Montgomery, D. C. (2009) Response surface design evaluation and comparison. *J. Stat. Plan. Infer.* **139**, 629-641.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., Youssef, M. M. (2012) Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food. Res. Int.* **48**, 410-427.
- Chemat, F., Zill-e-Huma, Khan, M. K. (2011) Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem.* **18**, 813-835.
- Drmić, H., Režek Jambrak, A. (2010) Ultrazvučna ekstrakcija bioaktivnih spojeva. *Croat. J. Food Sci. Technol.* **2**, 22-33.
- Filipović, I., Lipanović, S. (1973) Opća i anorganska kemija, 6 izd., Školska knjiga, Zagreb.
- Fonteles, T. V., Costa, M. G. M., Tibério de Jesus, A. L., Alcântara de Miranda, M. R., Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S. (2012) Power ultrasound processing of cantaloupe melon juice: Effects on quality parameters. *Food. Res. Int.* **48**, 41-48.
- Ganesan, B., Martini, S., Solorio, J., Walsh, M. K. (2015) Determining the Effects of High Intensity Ultrasound on the Reduction of Microbes in Milk and Orange Juice Using Response Surface Methodology. *Int. J. Food Sci. Tech.* <<http://www.hindawi.com/journals/ijfs/2015/350719/>>. Pristupljeno 21. travnja 2016.
- Herceg, Z., Režek Jambrak, A., Rimac Brnčić, S., Krešić, G. (2009) Procesi konzerviranja hrane: Novi postupci. Tehnička knjiga. Zagreb, 53-68.
- Kentish, S., Feng, H. (2014) Applications of Power Ultrasound in Food Processing. *Food Sci. Technol.*, **5**, 263-284.
- Khuri, A.I., Cornell, J. A. (1996) Response Surfaces: Design and Analyses, 2. izd., Marcel Dekker, New York.
- Kuehl, R. O. (2000) Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and Analysis, 2. izd., Duxbury Press, Pacific Grove, C. A, 2-225.
- Kuijpers, M. W., van Eck, D., Kemmere, M.F., Keurentjes, J. T. (2002) Cavitation-induced reactions in high-pressure carbon dioxide. *Science*, **6**, 1969-71.

- Lu, C. H., Engelmann, N. J., Lila, M. A., Erdman, J. W. Jr. (2008) Optimization of lycopene extraction from tomato cell suspension culture by response surface methodology. *J. Agric. Food Chem.* **56**, 7710-7714.
- Montgomery, D. C. (2001) *Design and Analysis of Experiments*, 5. izd., John Wiley & Sons, New York, 672.
- Muthukumar, S., Kentish, S. E., Stevens, G. W., Ashokkumar, M. (2006) Application of ultrasound in membrane separation processes: a review. *Rev. Chem. Eng.* **22**, izd.3, 155–194.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. (2002) *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 2. izd., John Wiley & Sons, USA.
- Patist A. and Bates D. 2008. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innov. Food Sci. Emerg.* **9**, 147– 154.
- Petošić, A. (2008) Vrednovanje točkastog izvora ultrazvuka u linearnom i nelinearnom načinu rada, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb.
- Petošić, A., Svilar, D., Ivančević, B. (2011) Comparison of measured acoustic power results gained by using three different methods on an ultrasonic low-frequency device. *Ultrason. Sonochem.* **18**, 567-576.
- Povey, M. J. W., Mason, T. J. (1998) *Ultrasound in Food Processing* [online] Blackie Academic & Professional,
https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=eyCB2vJQA9cC&oi=fnd&pg=PR11&dq=mason+1998+ultrasound&ots=RK_PISixJD&sig=hJLp_p-42K4E4L4-HdlwKF6a08&redir_esc=y#v=onepage&q=mason%201998%20ultrasound&f=false
 > Pristupljeno 14. travnja 2016.
- Režek Jambrak, A., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Rimac Brnčić, S., Bosiljkov, T., Čvek, D., Tripalo, B., Gelo, J. (2010b) Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydr. Polym.* **79** (1), 91-100.
- Režek Jambrak, A., Lelas, V., Mason, T. J. Krešić, G., Badanjak, M. (2009a) Physical properties of ultrasound treated soy proteins. *J. Food. Eng.* **93**, 386-393.
- Režek Jambrak, A. (2008) Utjecaj ultrazvuka na fizikalna i funkcionalna svojstva proteina sirutke, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnoški fakultet, Zagreb.

- Suslick, K. S. (1989) The Chemical Effects of Ultrasound. *Sci. Am.* 80-86.
- Thompson, L. H. i Doraiswamy, L. K. (1999) Sonochemistry: science and engineering. *Industry Engineering and Chemistry Research*, 38, 1215-1249.