

# 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:* **2025-03-04**



*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 OBRADJE 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).

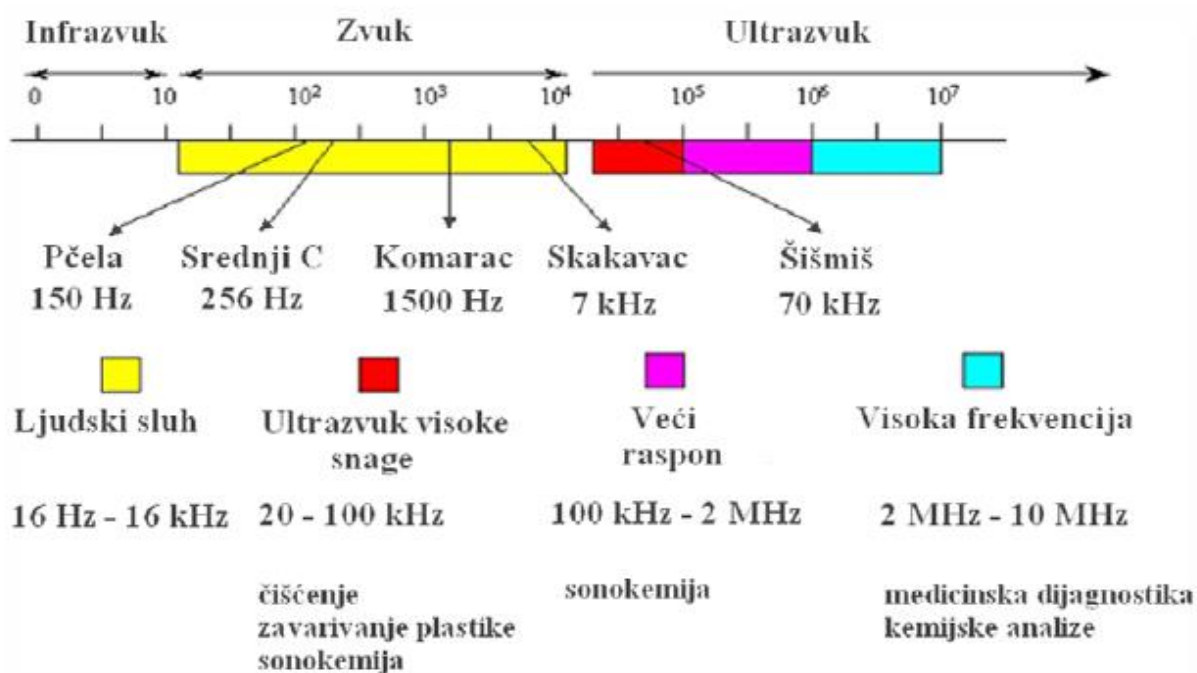
#### 2.1.1. Podjela ultrazvuka

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/cm<sup>2</sup> (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).

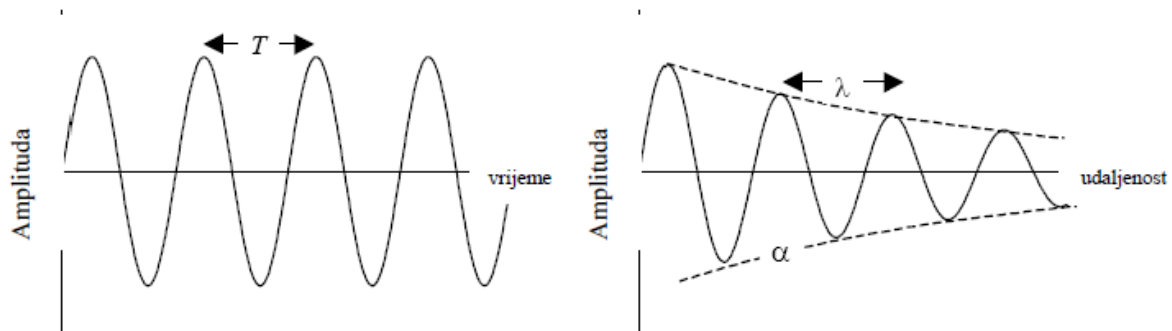


Slika 1. Područja podjele zvuka prema frekvencijama (Povey i Mason, 1998)

### 2.1.2. Karakteristike zvučnog vala

Zvučni val karakterizira amplituda ( $A$ ), frekvencija ( $f$ ), valna duljina te koeficijent atenuacije odnosno prigušenja ( $\alpha$ ) 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,  $\lambda$  je valna duljina i  $\alpha$  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 ( $\text{Ns/m}^3$ ), a  $X$  specifičnu akustičku reaktanciju ( $\text{Ns/m}^3$ ).

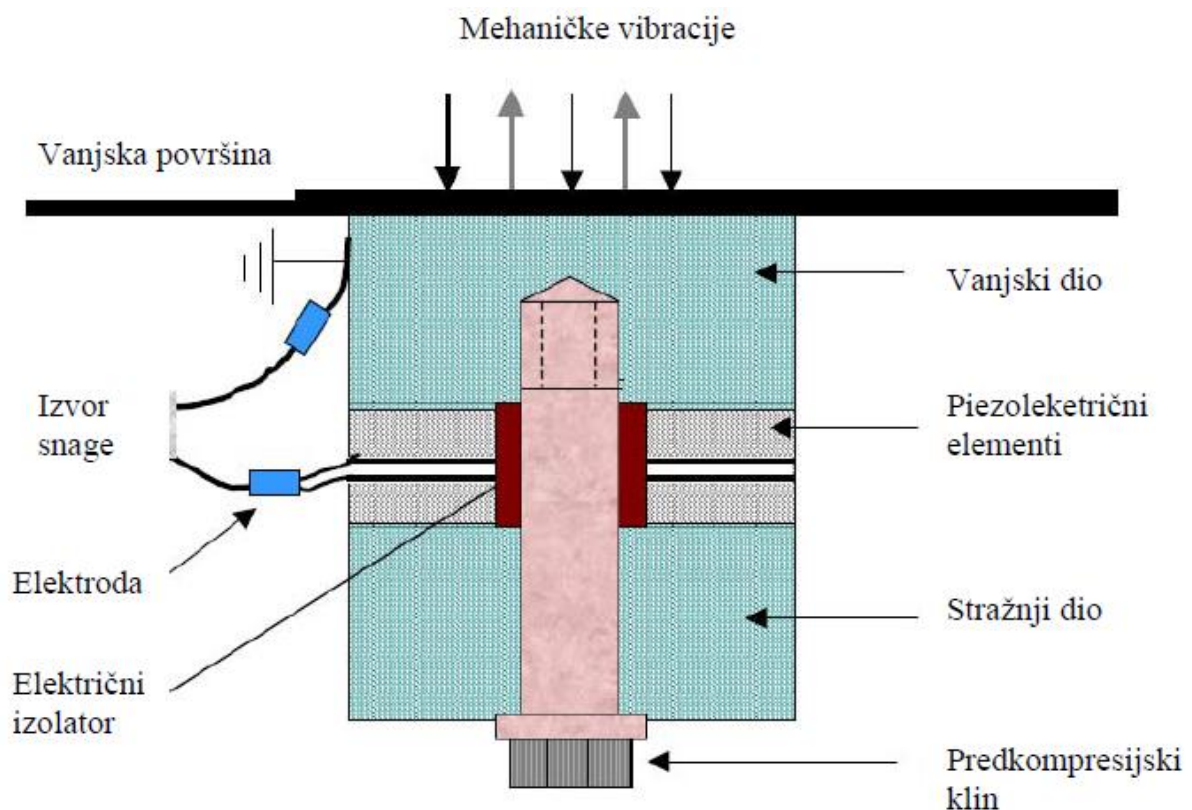
Dolazi do izražaja pri širenju ultrazvuka kroz medij, prilikom prijelaza ultrazvuka iz izvora u pretvornik i obrnuto te pri prijelazu ultrazvuka iz jednog medija u drugi (Petošić, 2008)

## 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).

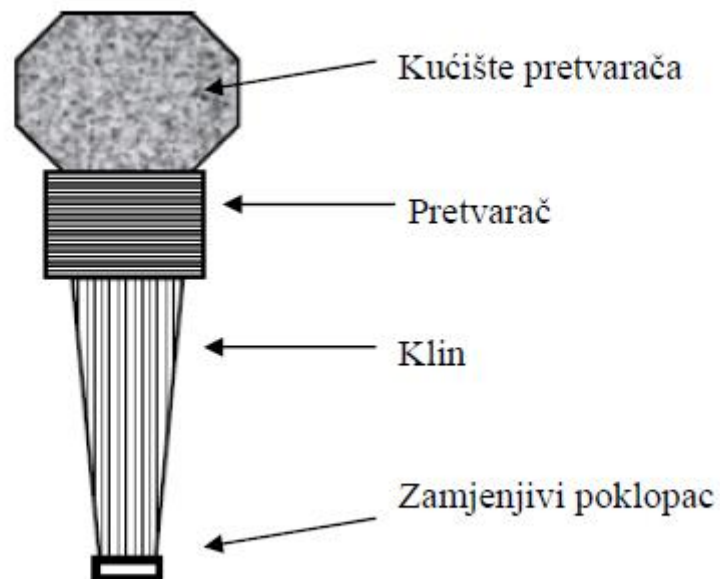
Magnetostriktivni pretvarač je u najjednostavnijem obliku solenoid s navojem sastavljen kao laminat s više slojeva magnetostriktivnih materijala i od jezgre koju čini metalna traka od bakra. Prilikom propuštanja struje kroz navoj, stvara se magnetno polje koje uzrokuje smanjenje dimenzija jezgre, isključivanjem 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).



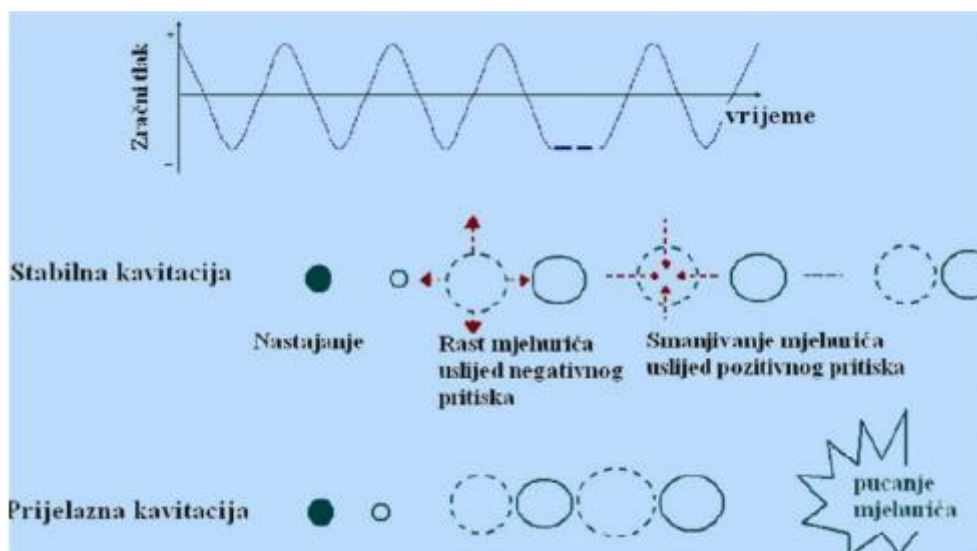
Slika 5. Kavitacijski mjehurić (Suslick, 1989)

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 tvar, 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  $\Delta U$ . 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  $\Delta V$  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  $\Delta S$ . 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  $1 \text{ m}^2$ , 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,  $\rho_0$  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 zgušnjavanja 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  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}^+$  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 do 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):

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

$\eta_{ea}$  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<sub>rms</sub> 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/cm<sup>2</sup>) ili u vatima po jedinici volumena tekućine tretirane ultrazvukom (W/cm<sup>3</sup>). Porast temperature za vrijeme tretmana ultrazvukom mjeren je s termočlankom i nakon toga je intenzitet ultrazvuka izražen u W/cm<sup>2</sup>. 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/cm<sup>2</sup>), P - ultrazvučna snaga (W), A - površina sonde (cm<sup>2</sup>), δ - gustoća snage (W/cm<sup>3</sup>), P - ultrazvučna snaga (W) i V - volumen uzorka (cm<sup>3</sup>).

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<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, pa je uzeta vrijednost 4,18J.g<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> i sok 3,64 J.g<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

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<sub>a</sub>). 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;

$\Delta T$  [°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  $\Delta t$ , 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;

$\Delta t$ [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

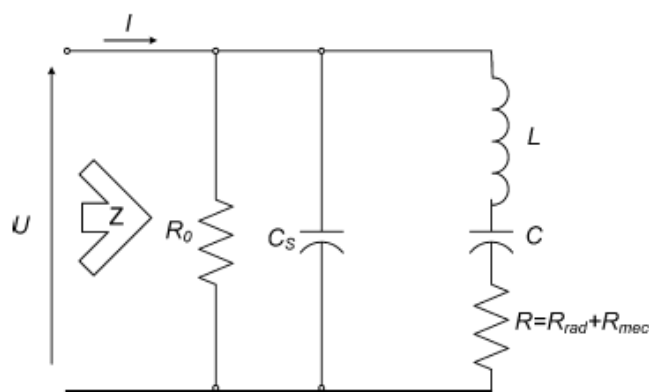
Metoda određivanja korisnosti elektroakustičke pretvorbe iz elektromehaničke karakterizacije se radi mjerenjem električne impedancije (admitancije) opterećenog i neopterećenog pretvarača u okolini rezonantne frekvencije razmatranog moda titranja pretvarača. Rezultati vrednovanja elektromehaničkog dijela 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 neznatnom 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  $\eta_{eaEQ}$  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  $R_{\text{mec}}$  mjereni su u neopterećenim uvjetima, otpor isijavanja  $R_{\text{rad}}$  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 sonoreaktoru 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 sonoreaktoru 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 hidrofon 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 impulsnii odziv. Stoga su konačna mjerenja provedena metodom dva hidrofona, od kojih jedan služi kao izvor, a drugi kao prijelnik. 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 točkaka 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 ( $\tau$ ) i prividnom viskoznošću ( $\eta$ ), 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  $950 \text{ s}^{-1}$ , te se postepeno povećavala do maksimalne brzine od  $1290 \text{ s}^{-1}$ , a

potom smanjivala do  $950 \text{ s}^{-1}$ . 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  $1290 \text{ s}^{-1}$  (maksimalna smična brzina) izračunata je primjenom Newtonovog zakona:

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

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

Za izračunavanje reoloških parametara upotrijebljen je Ostwald de Waeleov zakon:

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

gdje je:  $\tau$  - smično naprezanje (Pa),  $k$  - koeficijent konzistencije ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ),  $D$  - smična brzina ( $\text{s}^{-1}$ ),  $n$  - 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  $\beta_0$  vrijednost fiksnog odaziva na centralnu točku pokusa koji je točka (0, 0, 0);  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  i  $\beta_{ij}$ , 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.

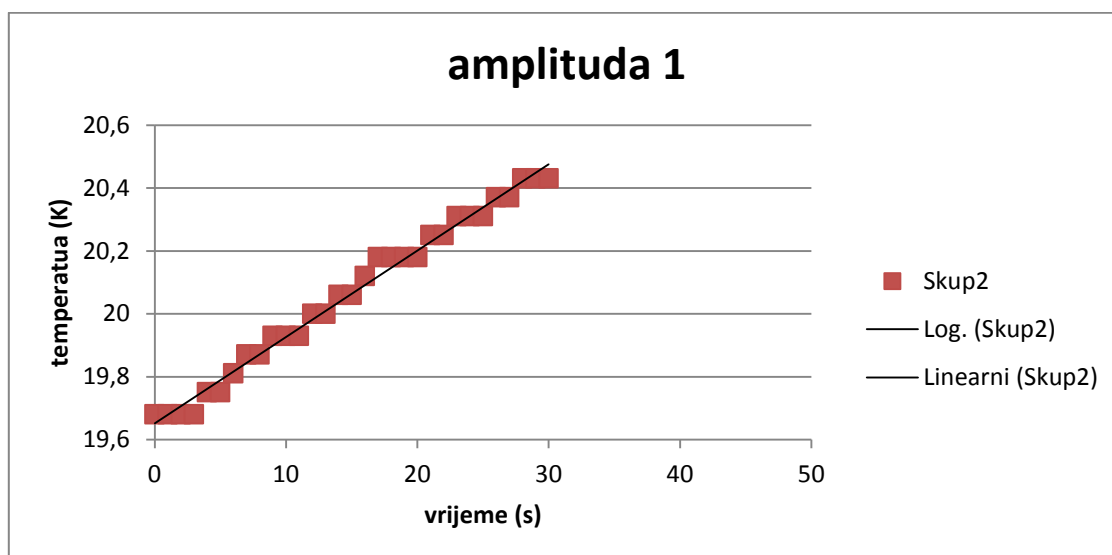
Tablica 1. Postav ultrazvučnog tretmana proveden u programu STATGRAPHICS (StatPoint technologies, Inc., VA 20186, USA)

<b>UZORAK</b>	<b>AMPLITUDA ULTRAZVUKA %</b>	<b>VRIJEME TRETIRANJA (min)</b>
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

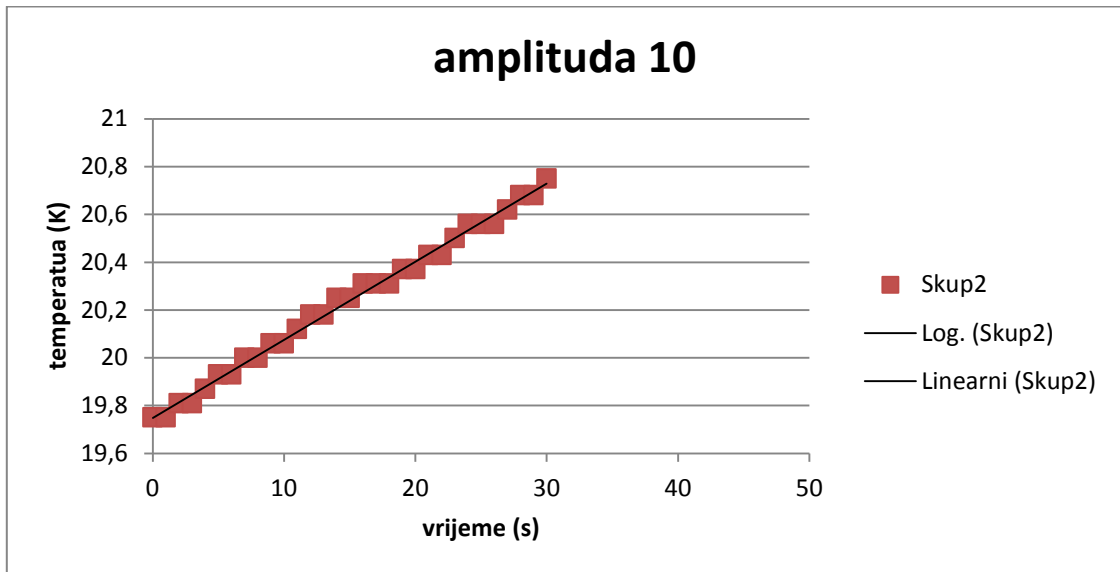
## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. KALORIMETRIJA

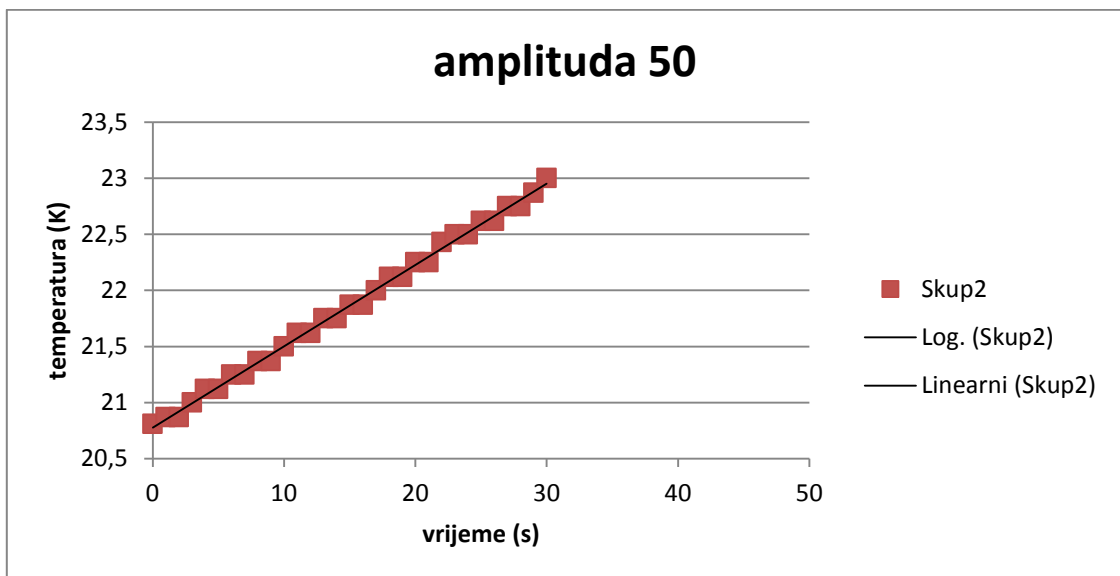
Praćenje promjena temperature prije, za vrijeme i nakon tretmana ultrazvukom. Ultrazvučna snaga koja se smatra mehaničkom energijom, dijelom se gubi u obliku topline prilikom prolaska ultrazvučnog vala kroz medij (Thompson i Doraiswamy, 1999). Rezultati promjene temperature s obzirom na određenu amplitudu 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

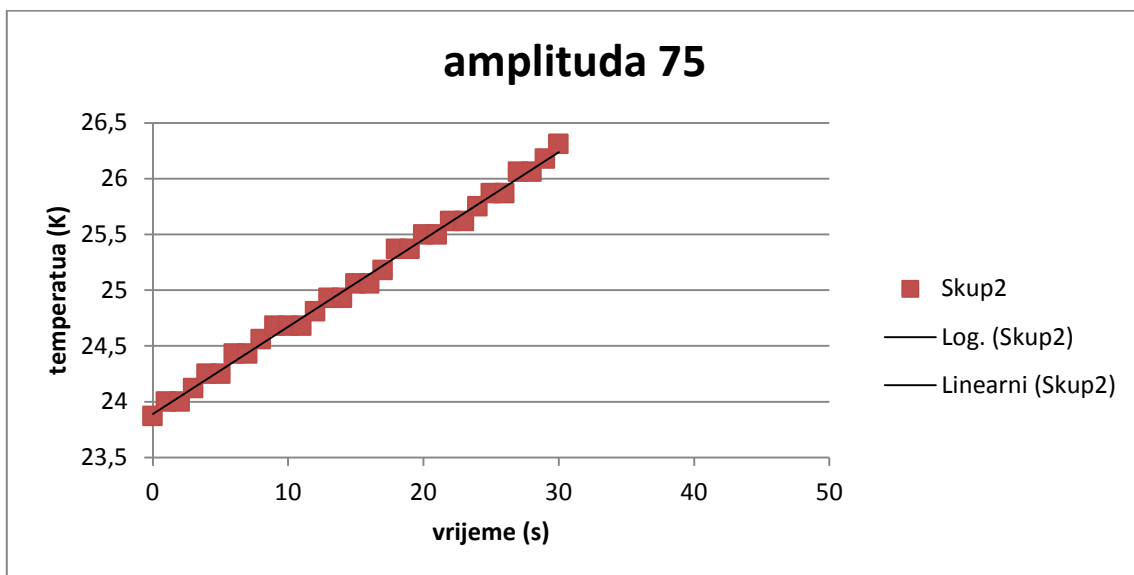


12. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana mlijeka malom sondom, amplituda 10%, trajanje tretiranja 3 min

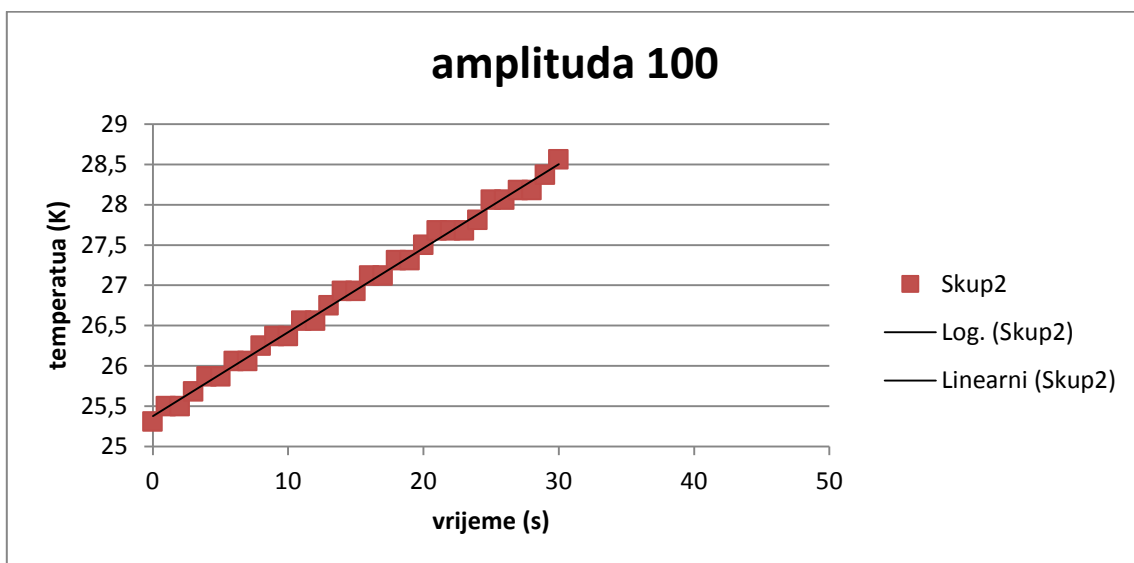


13. Grafički prikaz porasta temperature tijekom ultrazvučnog tretmana soka malom sondom, amplituda 50%, trajanje tretiranja 3 min





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

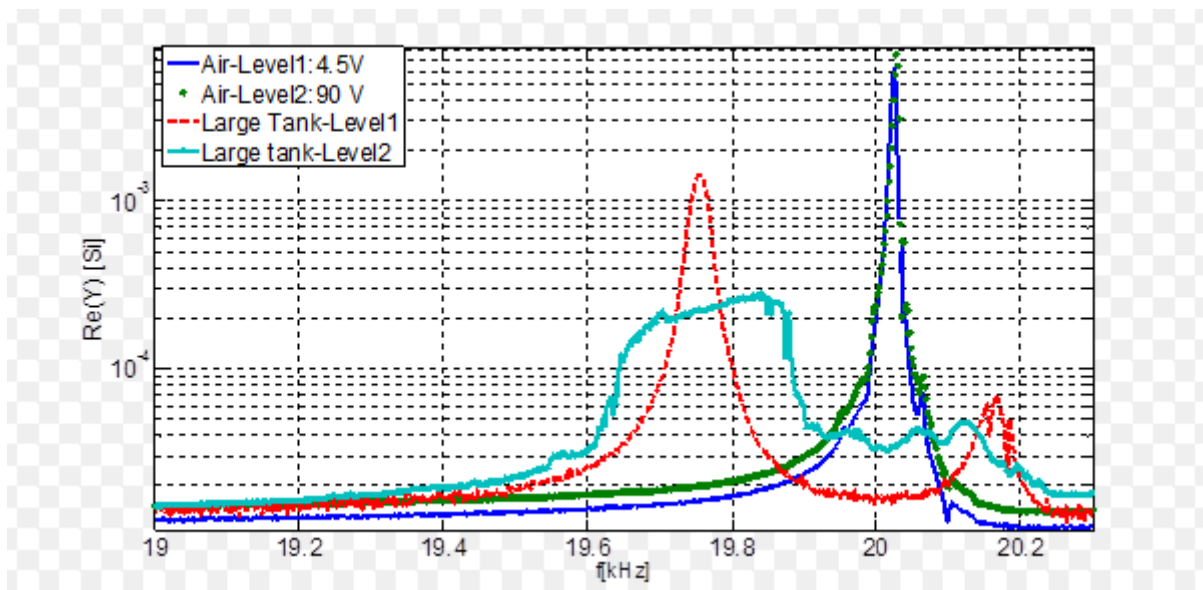
Poznajući upotrijebljenu električnu energiju ( $P_e$ ) na niskim razinama pobude ( $U$ ), akustična snaga ( $P_a$ ) može se procijeniti na jednostavan način uz pretpostavku da se svi gubici odnose na  $R_{ml}$ . Za razmatranje dviju sonda maksimalni elektroakustični faktor iskorištenja izračunat je za 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

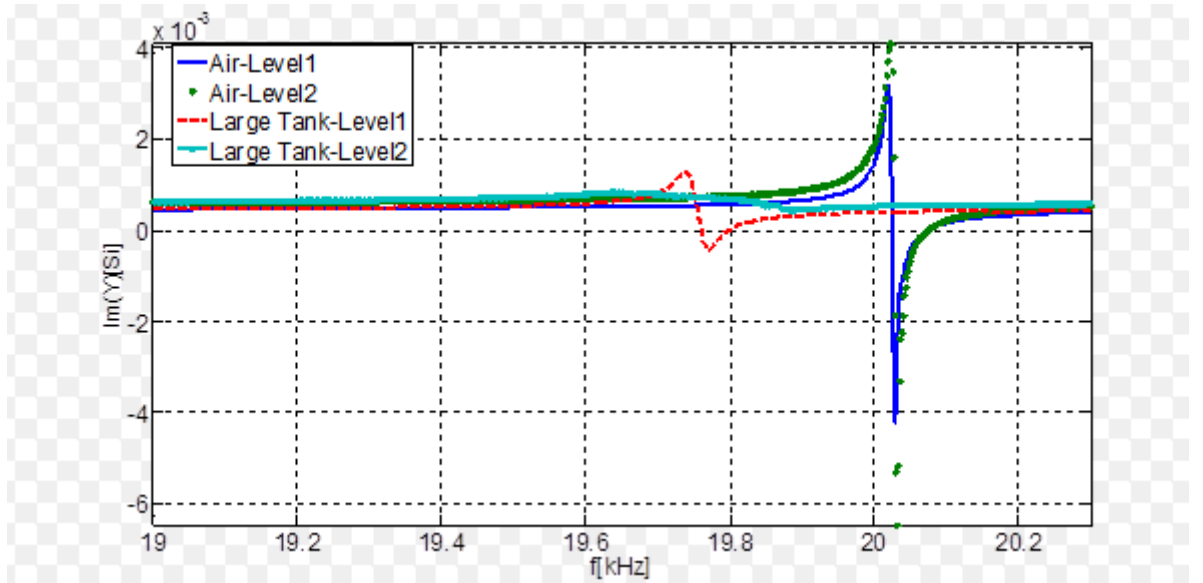
Konfiguracija	Serijska rezonancija (zrak) [Hz]	Serijska rezonancija (voda) [Hz]	$R_{ml}$ [ $\Omega$ ]	$R_{rad}$ [ $\Omega$ ]	$\eta_{ea}$ [%]	$P_a$ –na rezonanciji niske razine pobude [W]
Mala sonda	20029	19786	187	1479	88,7%	10,8 mW
Velika sonda	19930	19630	200	2150	93%	8,7 mW

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

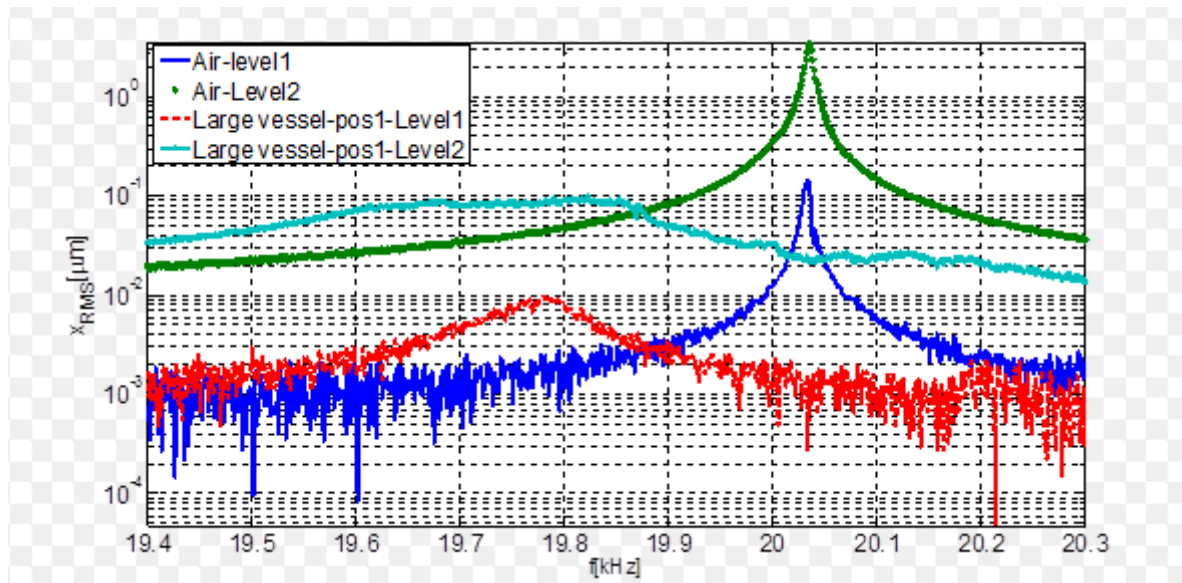


b) imaginarni dio admitancije



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 sonoreктору i mjerenog vremena odjeka sonorektora 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 koeficijenta elektrakustičkog iskorištenja (3.2.2.) i metoda mjerenja prostorne raspodjele tlaka u malom sonoreктору 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 <sub>p</sub>	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 <sub>p</sub>	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 <sub>p</sub>	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	<i>F-Veličina</i>	<i>P-vrijednost</i>
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</i> -vrijednost
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 <sup>2</sup> - 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 <sup>2</sup> + 0,932541*amplituda *vrijeme tretmana	akustična gustoća = 93,1931 - 3,04145*amplituda + 3,2624*vrijeme tretmana - 0,00368849*amplitu da <sup>2</sup> + 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 <sup>2</sup> + 0,000166904*amplitu da*vrijeme tretmana	entalpija = 5,34697 - 0,174098*amplituda + 0,279473*vrijeme tretmana - 0,000238058*amplitu da <sup>2</sup> + 0,064528*amplituda*v rijeme tretmana	entropija = 0,0172992 - 0,00057553*amplitud a + 0,00119406*vrijeme tretmana - 8,76939E- 7*amplituda <sup>2</sup> + 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 (μm) 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 <sup>2</sup> - 0,714651*amplituda *vrijeme tretmana	I RMS = 132,463 + 7,98665*amplituda + 40,474*vrijeme tretmana - 0,0235038*amplituda <sup>2</sup> - 0,523984*amplituda*v rijeme tretmana	p RMS = 630,148 + 1,30232*amplituda + 112,381*vrijeme tretmana - 0,0602694*amplitud a <sup>2</sup> + 0,0630827*amplitud a*vrijeme tretmana	akustična gustoća = 72,6487 + 1,27873*amplituda + 1,65326*vrijeme tretmana - 0,00606306*amplitu da <sup>2</sup> + 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 <sup>2</sup> + 0,0000458077*amplit uda*vrijeme tretmana	entalpija = 4,40513 + 0,107025*amplituda + 0,0334288*vrijeme tretmana + 0,0000389753*amplit uda <sup>2</sup> - 0,0000179637*amplit uda*vrijeme tretmana	entropija = 0,0163319 + 0,0000527715*amplit uda + 0,000212469*vrijeme tretmana + 0,0000014808*amplit uda <sup>2</sup> + 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 (μm) 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

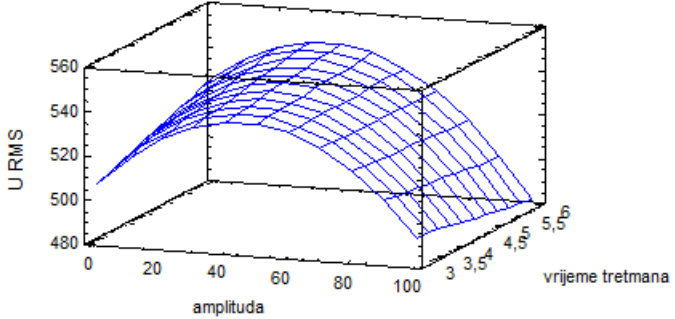
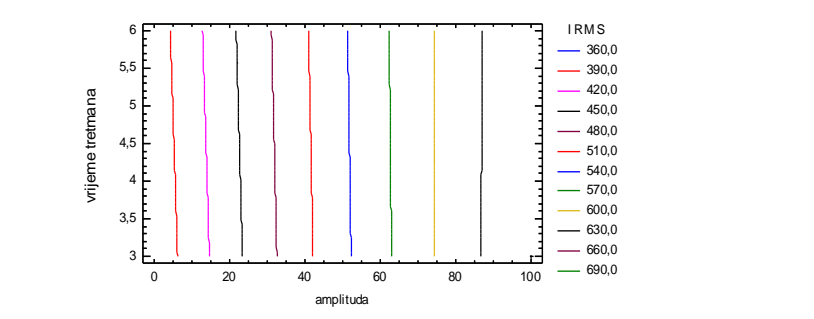
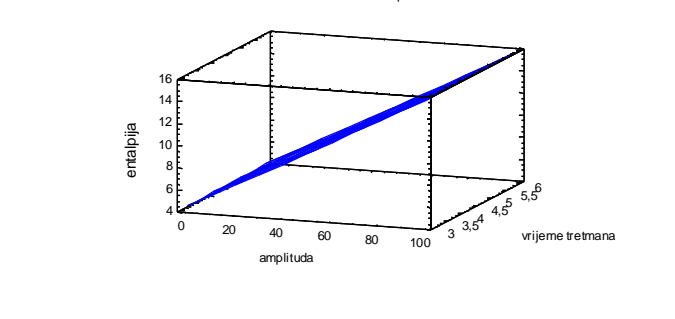
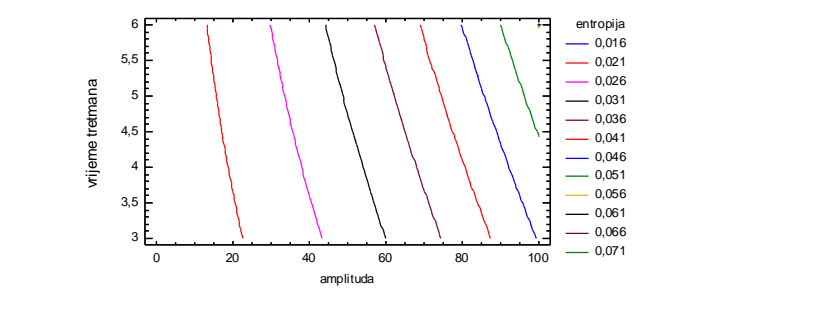
POLINOM (J 150 mL)	$U_{RMS} = 509,723 + 0,619236 \cdot \text{amplituda} + 6,198 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,0104497 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,0235856 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$I_{RMS} = 368,494 + 3,31793 \cdot \text{amplituda} + 2,42236 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00573644 \cdot \text{amplituda}^2 + 0,00552048 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$p_{RMS} = 556,288 + 14,9858 \cdot \text{amplituda} - 14,5582 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,14504 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,445818 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$\text{akustična gustoća} = 72,0719 + 3,82504 \cdot \text{amplituda} + 3,90826 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,0040279 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,0599565 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$\text{akustični intenzitet} = 85,6367 + 4,53048 \cdot \text{amplituda} + 4,52468 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,00482596 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,069719 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$\text{snaga kalom} = 0,0108482 + 0,000573907 \cdot \text{amplituda} + 0,000573172 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 6,11337E-7 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,00000883179 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$\text{entalpija} = 4,13825 + 0,221175 \cdot \text{amplituda} + 0,298511 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 0,000154095 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,00515347 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$	$\text{entropija} = 0,013893 + 0,000772962 \cdot \text{amplituda} + 0,00102328 \cdot \text{vrijeme tretmana} - 7,14819E-7 \cdot \text{amplituda}^2 - 0,000022393 \cdot \text{amplituda} \cdot \text{vrijeme tretmana}$
OPTIMALNA VRIJEDNOST	552,368	660,769	833,693	408,034	483,083	0,0611955	24,0643	0,080393
OPTIMALNI FAKTORI Amplituda ( $\mu\text{m}$ ) 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 ( $\mu\text{m}$ ) 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



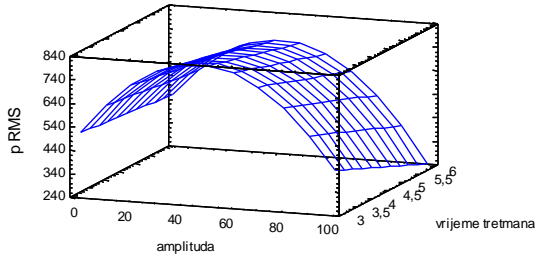
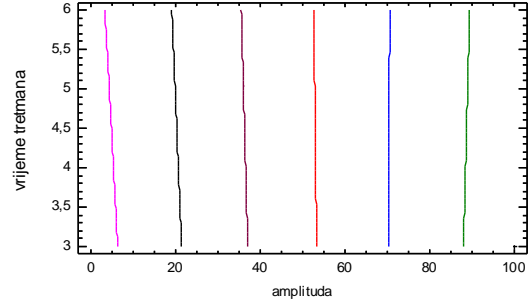
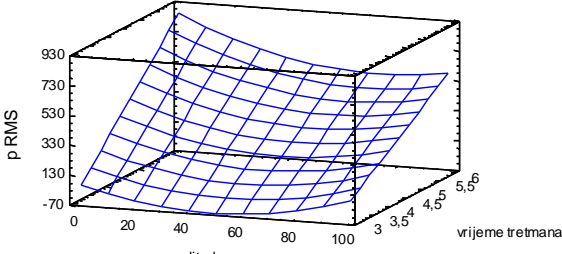
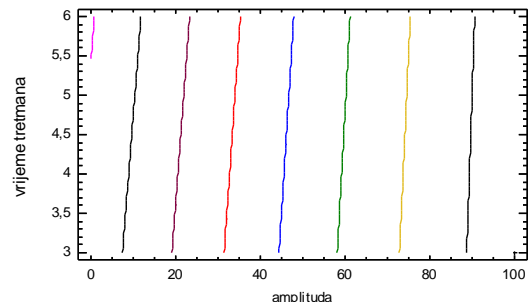
Tablica 20. Polinomi, optimalne vrijednosti i optimalni faktori za analizirani uzorak vode 150 i 250 mL tretiranih ultrazvukom visoke snage

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 ( $\mu\text{m}$ ) 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 ( $\mu\text{m}$ ) 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

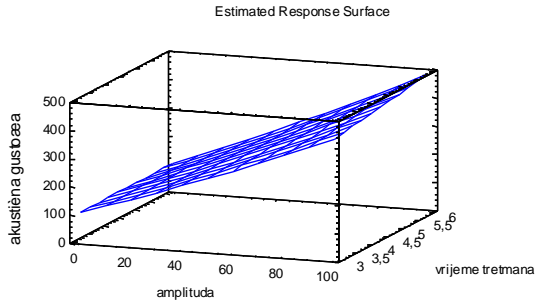
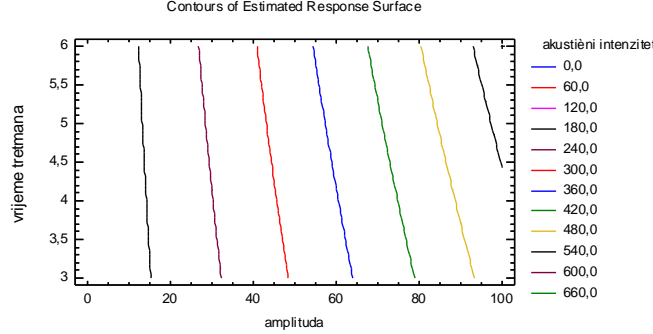
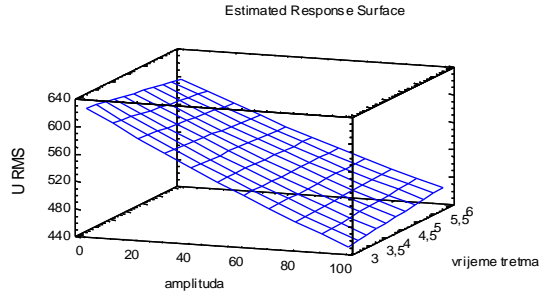
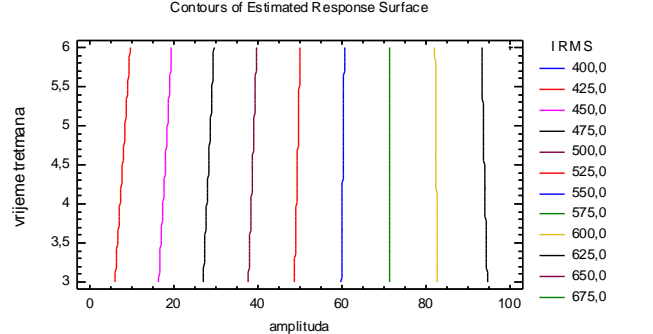
Tablica 21. 3 D i konturni dijagrami za analizirani uzorak mlijeko 150 i 250 mL

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"> <li>0,0</li> <li>0,008</li> <li>0,016</li> <li>0,024</li> <li>0,032</li> <li>0,04</li> <li>0,048</li> <li>0,056</li> <li>0,064</li> <li>0,072</li> <li>0,08</li> <li>0,088</li> </ul>
J 250 mL	<p data-bbox="705 949 884 965">Estimated Response Surface</p>  <p data-bbox="481 1109 515 1157">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 1252" style="list-style-type: none"> <li>0,0</li> <li>0,006</li> <li>0,012</li> <li>0,018</li> <li>0,024</li> <li>0,03</li> <li>0,036</li> <li>0,042</li> <li>0,048</li> <li>0,054</li> <li>0,06</li> <li>0,066</li> </ul>

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

V 150 mL	akustična gustoća	akustični intenzitet
	 <p>Estimated Response Surface</p> <p>Y-axis: akustična gustoća (0 to 500) X-axis: amplituda (0 to 100) Z-axis: vrijeme tretmana (3 to 5.5)</p>	 <p>Contours of Estimated Response Surface</p> <p>Y-axis: vrijeme tretmana (3 to 6) X-axis: amplituda (0 to 100)</p> <p>akustični intenzitet</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 0,0</li> <li>— 60,0</li> <li>— 120,0</li> <li>— 180,0</li> <li>— 240,0</li> <li>— 300,0</li> <li>— 360,0</li> <li>— 420,0</li> <li>— 480,0</li> <li>— 540,0</li> <li>— 600,0</li> <li>— 660,0</li> </ul>
V 250 mL	U RMS	I RMS
	 <p>Estimated Response Surface</p> <p>Y-axis: U RMS (440 to 640) X-axis: amplituda (0 to 100) Z-axis: vrijeme tretmana (3 to 5.5)</p>	 <p>Contours of Estimated Response Surface</p> <p>Y-axis: vrijeme tretmana (3 to 6) X-axis: amplituda (0 to 100)</p> <p>I RMS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 400,0</li> <li>— 425,0</li> <li>— 450,0</li> <li>— 475,0</li> <li>— 500,0</li> <li>— 525,0</li> <li>— 550,0</li> <li>— 575,0</li> <li>— 600,0</li> <li>— 625,0</li> <li>— 650,0</li> <li>— 675,0</li> </ul>

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).

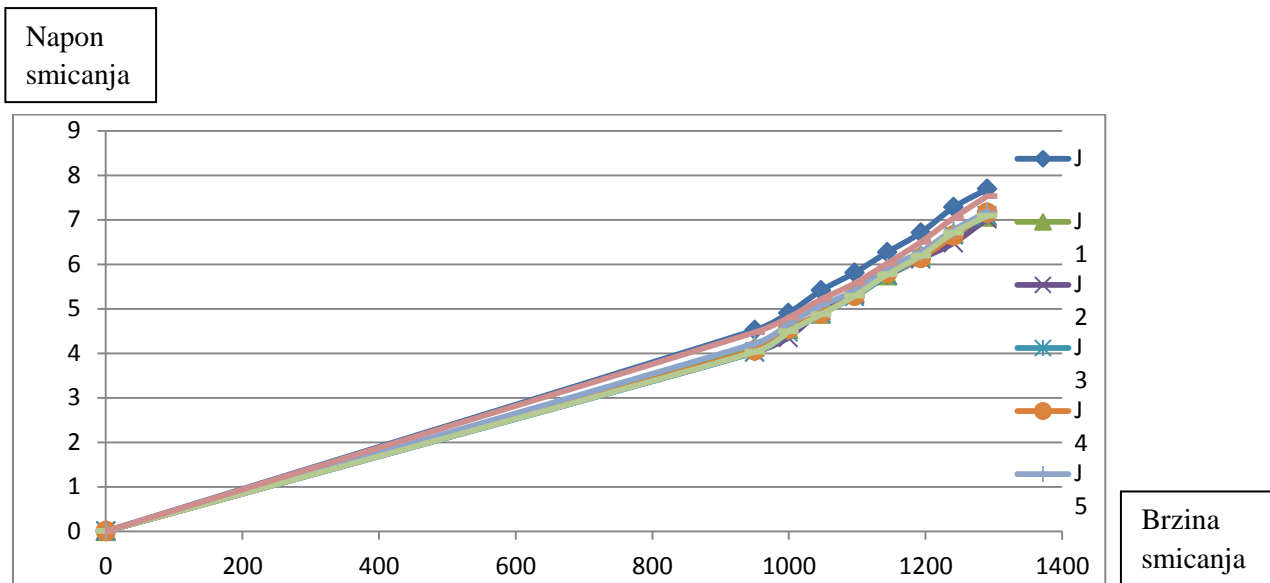
Na entalpiju (tablica 15) i entropiju (tablica 16) značajan su utjecaj imali amplituda za sve uzorke, vrijeme tretiranja na uzorke voda 150 mL (V1-V20) i sok 250 mL (J1-J20), kvadratna vrijednost amplitude na vodu 250 mL (V1-V20) i sok 250 mL (J1-J20), a interakcija amplitude i vremena tretiranja značajno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

<b>UZORAK</b>	<b>PRIVIDNA VISKOZNOST <math>\mu</math> (mPas)</b>	<b>KOEFICIJENT KONZISTENCIJE k (Pas<sup>n</sup>)x10<sup>-5</sup></b>	<b>INDEKS TEČENJA n</b>	<b>KOEFICIJENT DETERMINACIJE R<sup>2</sup></b>
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](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.