

Ugljični otisak odabranih toplinskih i netoplinskih procesa obrade hrane

Stanić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:089273>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-04**



Repository / Repozitorij:

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



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

Ana Stanić
0058221861

**UGLJIČNI OTISAK ODABRANIH TOPLINSKIH I
NETOPLINSKIH PROCESA OBRADE HRANE**

ZAVRŠNI RAD

Naziv znanstveno-istraživačkog projekta: Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ) - Digitalizacija netoplinskih ekstrakcija proteina iz biljnih nusproizvoda i elektroformiranje kao izlazni proizvod (DEEP)
IP-2022-10-2207

Mentor: prof. dr. sc. Anet Režek Jambrak

Zagreb, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Završni rad

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

Zavod za opće programe
Laboratorij za održivi razvoj

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

Ugljični otisak odabranih toplinskih i netoplinskih procesa obrade hrane

Ana Stanić, 0058221861

Sažetak: Toplinska obrada najzastupljenija je metoda procesiranja hrane u prehrambenoj industriji. Uporabom topline postiže se sigurnost uništavanjem mikroorganizama, ali je moguća degradacija visokovrijednih komponenti hrane i nastanak nepoželjnih produkata koji dovode do promjene okusa i mirisa. Netoplinske tehnike procesiranja hrane poput ultrazvuka i pulsirajućeg električnog polja osiguravaju znatno manju potrošnju energije i vode te smanjen utjecaj na nutritivna i senzorska svojstva namirnice. Procjenom ugljičnog otiska omogućuje se kvantifikacija količine stakleničkih plinova koje emitira određena aktivnost ili proizvodni proces. Cilj je ovog istraživanja analizirati utjecaj odabranih toplinskih i netoplinskih procesa obrade, na emisije ugljičnog otiska u prehrambenoj industriji. U svrhu boljeg razumijevanja, uspoređene su potrošnje električne energije pasterizacije i ultrazvuka te je na temelju podataka izračunat ugljični otisak svakog procesa.

Ključne riječi: ugljični otisak, procjena životnog ciklusa, pasterizacija, ultrazvuk

Rad sadrži: 29 stranica, 11 slika, 2 tablice, 48 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: prof. dr. sc. Anet Režek Jambrak

Komentor: /

Pomoć pri izradi: /

Datum obrane: 16. srpnja 2024.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Undergraduate thesis

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

Department of general programs
Laboratory for Sustainable Development

Scientific area: Biotechnical Sciences
Scientific field: Food Technology

Carbon footprint of selected thermal and nonthermal food processing processes

Ana Stanić, 0058221861

Abstract: Heat treatment is the most common method of food processing in the food industry. The use of heat provides safety by destroying microorganisms, but the degradation of high-value food components and creation of undesirable products that lead to changes in taste and smell are possible. Nonthermal food processing techniques such as ultrasound and pulsed electric field ensure significantly lower consumption of energy and water and a reduced impact on the nutritional and sensory properties of food. By estimating the carbon footprint, it is possible to quantify the amount of greenhouse gases emitted by a certain activity or production process. The aim of this research is to examine the impact of selected thermal and nonthermal processes on carbon footprint, in the food industry. For the purpose of better understanding, pasteurization and ultrasound power consumption were compared and the carbon footprint for each process was calculated, based on the data.

Keywords: carbon footprint (CF), life cycle assessment (LCA), pasteurization, ultrasound

Thesis contains: 29 pages, 11 figures, 2 tables, 48 references

Original in: Croatian

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

Mentor: Anet Režek Jambrak, PhD, Full Professor

Co-mentor: /

Technical support and assistance: /

Thesis defended: July 16, 2024

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. UGLJIČNI OTISAK	2
2.2. PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA PROIZVODA	4
2.2.1. Definiranje cilja i opsega	5
2.2.2. Analiza inventara	5
2.2.3. Procjena utjecaja životnog ciklusa	6
2.2.4. Tumačenje	6
2.3. UTJECAJ UGLJIČNOG OTISKA NA PROIZVODNJU HRANE	6
2.4. TOPLINSKI I NETOPLINSKI PROCESI U OBRADI HRANE	8
2.4.1. Pasterizacija	9
2.4.2. Ultrazvuk	11
2.4.2.1. Mehanizam djelovanja ultrazvuka	12
2.4.2.2. Podjela ultrazvučnih uređaja	13
2.4.2.3. Primjena ultrazvuka	15
2.5. POVEZANOST NETOPLINSKIH PROCESA I UGLJIČNOG OTISKA	17
3. METODA IZRAČUNA UGLJIČNOG OTISKA	19
4. PERSPEKTIVA I CILJEVI ZA BUDUĆNOST	22
5. ZAKLJUČCI	23
6. LITERATURA	24

1. UVOD

Prehrambena industrija jedna je od najvažnijih gospodarskih grana, a primarni joj je cilj prerada hrane za ljudsku potrošnju. Lanac opskrbe hranom, koji podrazumijeva sve ključne korake od proizvodnje hrane do distribucije, značajno doprinosi ukupnoj emisiji stakleničkih plinova. Rastuće emisije ugljičnog dioksida (CO₂) temeljni su uzrok globalnih klimatskih promjena što dovodi do ugrožavanja prirodnih resursa i narušavanja zdravstvenog standarda svjetskog stanovništva. Smanjenje emisije ugljičnog dioksida predstavlja ozbiljan globalni izazov s obzirom na to da demografski rast iziskuje i veću potražnju sa hranom.

Kako bi umanjile negativan utjecaj na okoliš, prehrambene industrije učestalije su orijentirane prema uvođenju alternativnih i održivijih tehnologija u procesima prerade hrane. Osim smanjenog utjecaja na okoliš, nekonvencionalne metode ističu se u skraćenom vremenu obrade, smanjenoj upotrebi štetnih otapala, ali i očuvanju svih nutritivnih i senzorskih karakteristika proizvoda.

Osnovni je cilj ovog završnog rada razraditi i ispitati utjecaj odabranih procesa zastupljenih u prehrambenoj industriji, na emisije ugljičnog dioksida. Na primjeru odabranih toplinskih i netoplinskih procesa obrade hrane razmotrit će se ključne razlike u emisiji stakleničkih plinova. Naposljetku, iskazana su predviđanja na koji će se način u budućnosti razvijati tehnologije usmjerene na poboljšanje energetske učinkovitosti i smanjenog utjecaja na okoliš.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. UGLJIČNI OTISAK

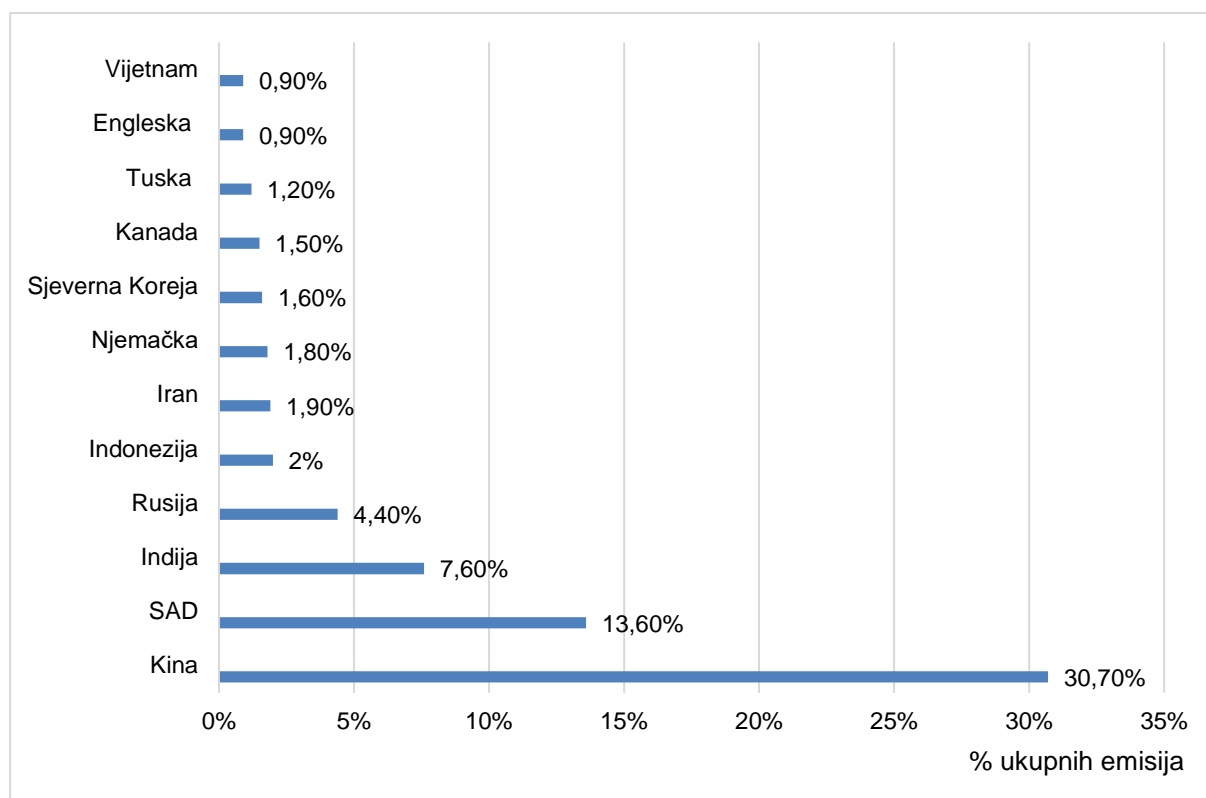
Ekološki otisak na jednostavan način opisuje utjecaj određenog proizvoda ili usluge na okoliš (Karwacka i sur., 2020). Unutar proučavanog ekološkog otiska razvile su se pojedinačne domene usmjerene na različite aspekte potrošnje resursa i utjecaja na okoliš poput ugljičnog otiska, vodenog otiska, energetskog otiska, biološkog otiska i mnogih drugih koji nastoje podrobnije opisati složene interakcije između ljudskih aktivnosti i ekosustava.

Ugljični otisak (engl. *Carbon Footprint*, CF) predstavlja ukupnu količinu emisije stakleničkih plinova koja je izravno ili neizravno uzrokovana određenom aktivnošću ili je akumulirana tijekom proizvodnih postupaka. Isto tako, ugljični otisak koristi se kao mjerilo razine klimatskih promjena i održivog razvoja (Yang i Meng, 2020). Staklenički plinovi (engl. *Greenhouse gasses*, GHG) su plinoviti spojevi koji imaju sposobnost emitiranja ultraljubičastog zračenja unutar određenog toplinskog infracrvenog raspona. U kategoriji stakleničkih plinova koji na poseban način sudjeluju u procesima prerade hrane nalaze se ugljikov dioksid (CO₂), metan (CH₄), dušikov oksid (N₂O) i fluorirani plinovi. Ovi plinovi zagrijavaju Zemljinu površinu apsorbirajući energiju i usporavajući brzinu izlaska energije u svemir čime se stvara „efekt staklenika“. Potencijalom globalnog zatopljenja (engl. *Global Warming Potential*, GWP) može se procijeniti utjecaj stakleničkih plinova na globalno zagrijavanje u odnosu na ugljikov dioksid (CO₂). Jednostavnije rečeno, GWP mjeri koliko topline zadržava određeni plin u atmosferi u usporedbi s ugljičnim dioksidom kojem je dodijeljen GWP 1.

Mjera kojom se objedinjuju djelovanja svih stakleničkih plinova, a posebice ugljičnog dioksida koji se smatra najzastupljenijim stakleničkim plinom izražava se kao ekvivalent CO₂ (CO₂-eq). Iako je ugljični dioksid uzet kao referentna vrijednost, ova jedinica omogućava jednostavnu konverziju ostalih stakleničkih plinova u ekvivalentnu količinu ugljičnog dioksida. Također, olakšana je međusobna usporedba emisija stakleničkih plinova prema njihovom doprinosu ukupnom ugljičnom otisku. Na temelju podataka o emisiji pojedinog stakleničkog plina i pripadajućem potencijalu globalnog zatopljenja (GWP_{*i*}), ukupni ugljični otisak računa se prema jednadžbi 1.

$$\text{Ugljični otisak (kgCO}_2\text{-eq)} = \sum_i (\text{emisija stakleničkog plina}_i \times \text{GWP}_i) \quad [1]$$

Sukladno podacima iz 2022. godine koji su predočeni slikom 1, zemlje koje se ističu s najvećim emisijama ugljičnog dioksida su Kina, Sjedinjene Američke Države i Indija. Kina čini gotovo 30,7 % ukupnih globalnih emisija, Sjedinjene Američke Države oko 13,6 %, a emisije Indije iznosile su 7,6 %. Od europskih država prednjači Njemačka s 1/4 ukupnih emisija ugljika cijele Europske Unije.



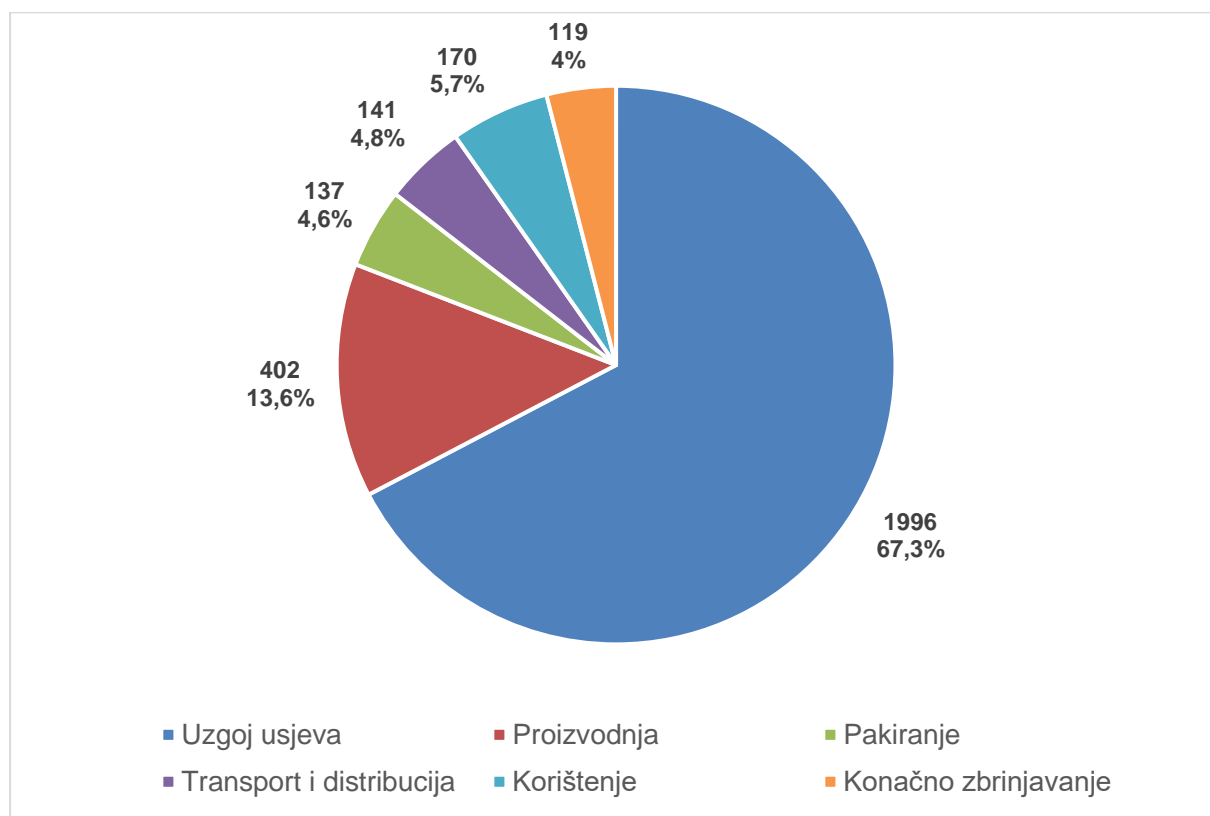
Slika 1. Prikaz ukupnih emisija za 2022. godinu po odabranim zemljama (prema Statista, 2024)

Charles (2021) u raznim provedenim istraživanjima naglašava kako cjelokupna proizvodnja hrane doprinosi s čak 37 % globalnih emisija stakleničkih plinova (GHG). Također, autor stavlja naglasak na to da hrana životinjskog podrijetla proizvodi dvostruko više emisije ugljika od biljne hrane.

Potrošnja električne energije, posebice za toplinske procese obrade hrane, vodeći je uzrok emisije CO₂ u prehrambenoj industriji (Yudhistira i sur., 2023). Potrošnja energije u prehrambenom sektoru vezana je za cjelokupan proces obrade hrane od sirove namirnice do krajnjeg proizvoda. Tijekom obrade, potrošnja obuhvaća nekoliko oblika energije poput toplinske energije (pasterizacija, sterilizacija, blanširanje, kuhanje), električne energije (tijekom rada transportnih linija i uređaja), hlađenja (tijekom prerade, skladištenje) i rasvjete (Dalsgaard i Abbotts, 2003). Porast svjetskog stanovništva zahtjeva i značajno veću potražnju za hranom te je u tim uvjetima naglasak na preispitivanju i istraživanju utjecaja opskrbe

hranom na okoliš.

Poljoprivreda kao primarni korak u cjelokupnom poljoprivredno-prehrambenom sektoru najviše pridonosi antropogenim emisijama stakleničkih plinova (67,3 %). Uzgoj biljaka i stoke te ostale poljoprivredne aktivnosti poput oranja, gnojenja i navodnjavanja značajno doprinose povećanju ugljičnog otiska. Naime, strojevi koji se koriste u poljoprivredi troše znatnu količinu električne energije i goriva, a upotreba gnojiva, pesticida i ostalih kemijskih sredstava djeluju štetno po okoliš. Drugi najveći zagađivači su procesi prerade i obrade sirovina unutar tvornica, sa značajnih 13,6 %. Ostali procesi također doprinose emisiji, no sa znatno manjim udjelom (slika 2).



Slika 2. Emisije stakleničkih plinova za svaki korak proizvodni korak, izražene u kgCO₂-eq (prema Monforti-Ferrario, 2015)

2.2. PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA PROIZVODA

Metoda kojom se može procijeniti cjelokupni utjecaj proizvoda na okoliš naziva se procjena životnog ciklusa proizvoda (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA). LCA temelji se na procjeni utjecaja proizvoda na okoliš u svim njegovim životnim fazama („od kolijevke do groba“). Proučavanje životnog ciklusa može se podijeliti na pet osnovnih faza: ekstrakcija sirovine iz okoliša, proizvodnja, transport i distribucija, korištenje te naposljetku konačno zbrinjavanje (recikliranje) (slika 3).



Slika 3. Prikaz životnog ciklusa proizvoda (prema Nabipour Afrouzi i sur., 2023)

LCA je standardiziran postupak utemeljen od Međunarodne organizacije za standardizaciju (engl. *International Standards Organisation*, ISO) koja je objedinila i izdala seriju normi (ISO 14040/4, 2006) kojima su regulirane smjernice za procjenu ekoloških aspekata proizvoda i usluga te preporuke za učinkovito korištenje resursa i smanjenje štetnih utjecaja na okoliš. Isto tako, norme osiguravaju da LCA bude potpun te proveden precizno i dosljedno. Procjena životnog ciklusa proizvoda od ključne je važnosti za prehrambenu industriju kako bi se pravovremeno identificirali i kvantificirali utjecaji na okoliš povezani sa proizvodnjom, preradom, transportom i konačnim zbrinjavanjem (Shabir i sur., 2023).

Osnovne četiri komponente koje su iscrpno definirane i opisane u normi ISO 14044, 2006 su definicija cilja i opsega, analiza inventara, procjena utjecaja životnog ciklusa i interpretacija (tumačenje).

2.2.1. Definiranje cilja i opsega

Definiranjem cilja i opsega određuje se svrha provođenja analize kao i razlozi zbog kojih se provodi. Važno je temeljito definirati funkcionalnu jedinicu koja se analizira i odrediti granice sustava unutar kojeg će se pratiti svi procesi i moguće promjene. Moguća je i međusobna usporedba više funkcionalnih jedinica na temelju odabranog predmeta istraživanja. Prvim korakom potrebno je definirati ciljanu grupu (proizvođači, potrošači) na koju se odnosi istraživanje. Važan je i stručni tim koji će svoje znanje i stručnost uspješno primijeniti za poboljšanje cjelokupnog sustava kako bi se postigla maksimalna učinkovitost.

2.2.2. Analiza inventara

Analiza inventara daje uvid u sve ulazne (sirovine, energija) i izlazne (emisije, otpad) jedinice nekog procesa. Potrebno je detaljno analizirati i obraditi materijale, procese i svu energiju uključenu u proces. Ukoliko neki od primarnih podataka nisu dostupni, utoliko se poseže za LCA softverskim alatima poput *GaBi*, *SimaPro*, *Umberto* i *Ecoinvent* koji mogu pomoći u popunjavanju praznina i eventualnih nedoumica. Ovaj korak može biti dugotrajan zbog složene analize u koju je potrebno uključiti složene konstrukcije proizvodnih procesa. Nakon dobivenih rezultata analiza, shematski se prikazuju svi energetski i materijalni tokovi

unutar unaprijed definiranih granica.

2.2.3. Procjena utjecaja životnog ciklusa

Treća komponenta uključuje procjenu utjecaja životnog ciklusa proizvoda na okoliš. U ovom je koraku nužno odabrati utjecaj nad kojim će se mjerenja provoditi, a potom klasificirati podatke u posebne ekološke kategorije. Kategorije su formirane na temelju specifičnih indikatora poput emisije stakleničkih plinova (kgeq-CO_2), potrošnje vode (m^3), kiselih kiša (kgeq-SO_2), eutrofikacije (kgeq-PO_4^{3-}), transformacije zemljišta ($\text{m}^2/\text{god.}$) i mnogih drugih.

2.2.4. Tumačenje

U posljednjoj se komponenti tumače i uspoređuju dobiveni rezultati u skladu sa zadanim početnim ciljem i opsegom. Dobiveni rezultati poslužit će u donošenju odluka oko unaprjeđenja i implementacije održivijih tehnoloških proizvodnih postupaka što će u konačnici dovesti do smanjenja ugljičnog otiska. Ukoliko se uoče problemi ili eventualni nedostaci, utoliko se može pravovaljano pristupiti rješavanju i uklanjanju istih. Tim stručnjaka nakon završene analize utemeljuje konačne naputke za smanjenje emisije ugljikovog dioksida i poboljšanje ekološkog utjecaja analizirane funkcionalne jedinice.

2.3. UTJECAJ UGLJIČNOG OTISKA NA PROIZVODNJU HRANE

Proizvodnja hrane podrazumijeva niz koraka, a svaki od tih koraka zahtjeva korištenje energije i resursa na različitim razinama (Nabipour Afrouzi i sur., 2023). Ugljični otisak može biti varijabilan ovisno o prehrambenoj namirnici. Najveći uzrok varijabilnosti proizlazi iz različitih tehnoloških procesa prerade i uvjeta uzgoja pojedine sirovine. Tetteh i sur. (2021) navode kako prerađena hrana ima znatno veće emisije ugljika od svježije hrane zato što je podvrgnuta dodatnim tehnološkim postupcima obrade (mehanički, fizikalni, toplinski postupci obrade, pakiranje, transport).

Na temelju provedenih istraživanja, Karwacka i sur. (2020) donose zaključke kako je uzgoj biljaka znatno manje štetan za okoliš u odnosu na proizvodnju mesa i ostalih životinjskih prerađevina. Pretpostavlja se da mesna industrija doprinosi gotovo 15 % globalnih emisija stakleničkih plinova (Majot i Kuyek, 2017). Tablica 2 prikazuje odabrane proizvode prehrambene industrije i pripadajuće ugljične otiske. Od svih vrsta mesa, govedina i janjetina najviše doprinose ugljičnom otisku dok piletina, riba i svinjetina imaju značajno manji otisak. Glavni izvor emisije metana je proizvodnja i prerada govedine. Metan ima daleko snažniji učinak staklenika od ugljikovog dioksida, ali se u atmosferi zadržava kraći vremenski period. Kako bi se pridonijelo smanjenju emisije metana i drugih stakleničkih plinova prisutni su alternativni izvori proteina koji mogu zamijeniti meso i mesne prerađevine (Aggarwal, 2019).

To su proteini biljnog podrijetla (tofu, grah, grašak, orašasti plodovi) koji imaju značajno manji ugljični otisak. Osim toga, proteinski bogati mliječni proizvodi također u velikoj mjeri pridonose emisiji ugljičnog dioksida. U alternativnim mogućnostima su biljni napitci proizvedeni iz žitarica, mahunarki, orašastih plodova i pseudožitarica.

Mliječna industrija jedna je od energetski najzahtjevnijih prehrambenih industrija. Postupci tijekom obrade mlijeka koji zahtijevaju energiju su deaeracija, filtracija, baktofugacija, homogenizacija, pasterizacija i sterilizacija. Samo mliječna industrija čini 4% svih antropogenih emisija stakleničkih plinova u svijetu (Shabir i sur., 2023).

Transport proizvoda ima značajan utjecaj na ugljični otisak. Naime, hrana prevezena zrakoplovom stvara 1130 gCO₂-eq po toni kilometru, dok je pomorski transport sa samo 23 gCO₂-eq po toni kilometru najučinkovitiji u kontekstu emisija CO₂ (Ritchie, 2020).

Tablica 1. Ugljični otisak za različite vrste prehrambenih proizvoda (*prema* Shabir i sur., 2023)

Prehrambeni proizvod	Ugljični otisak (kgCO ₂ -eq/kg proizvoda)	Referenca
Govedina	18,21	Forero-Cantor i sur., 2020
Piletina	4,02	
Jaja	3,02	
Riba	2,83	
Svinjetina	4,97	
Janjetina	22,95	
Sir tipa Cheddar	8,60	Kim i sur., 2013
Sir tipa Mozzarella	7,28	
Pića	1-1,5	Saxe, 2010
Proizvodi od žitarica	<1	Vetter i sur., 2017
Riža	5,65	
Mlijeko	2,4	

2.4. TOPLINSKI I NETOPLINSKI PROCESI U OBRADI HRANE

U prehrambenoj se industriji procesi mogu podijeliti na toplinske i netoplinske. Za bolje razumijevanje navedenih procesa važno je uočiti najznačajnije razlike i specifičnosti u njihovom korištenju.

Toplinski procesi zastupljeniji su u prehrambenoj industriji zbog znatno manjih investicijskih ulaganja, zajamčene mikrobiološke sigurnosti, lakše kontrole i nadzora te široke primjenjivosti na različit spektar proizvoda. Najčešće tradicionalne toplinske metode koje se primjenjuju su pasterizacija, sušenje (dehidracija), sterilizacija, blanširanje i kuhanje. Uslijed tretiranja hrane toplinom razvijaju se poželjna svojstva namirnica, ali su moguće određene negativne posljedice u vidu toplinske degradacije pojedinih termolabilnih komponenti hrane. Nadalje, moguće su reakcije razgradnje šećera i polihidroksilnih spojeva pri čemu nastaju produkti štetni za ljudsko zdravlje. Tijekom prerade može doći do reakcija enzimskog i neenzimskog posmeđivanja čiji produkti mogu značajno utjecati na promjenu boje i okusa. Primjerice, promjena okusa kod proizvoda tretiranih toplinom najbolje je uočljiva kod mlijeka u kojem se s povišenjem temperature postiže denaturacija termolabilnih proteina sirutke i nepoželjni priokus. Konvencionalni postupci u obradi hrane nisu se pokazali učinkovitima u kontekstu energetskih zahtjeva i gospodarenja otpadom (Picart-Palmade, 2019). S ciljem savladavanja svih nedostataka konvencionalnih metoda toplinske obrade, poseže se za inovativnijim i novijim rješenjima koja će zadržati sve izvorne funkcionalne prednosti proizvoda (Đekić i sur., 2018).

Toplinski postupak pasterizacije sveprisutan je u prehrambenim industrijama. Primjenom ove uvriježene metode postiže se značajna eliminacija mikroorganizama iz prehrambenih proizvoda, čime se osigurava zdravstvena ispravnost i prihvatljivost za konzumaciju.

Novija znanstvena istraživanja usmjerena su na razvoj alternativnih netoplinskih procesa u obradi hrane. Ovi su postupci još uvijek na razini laboratorijskih istraživanja, no sve je veća njihova primjena i u industrijskom mjerilu. „Zelene tehnologije“ pružaju brojne prednosti u odnosu na konvencionalne toplinske tretmane u obradi hrane. U prehrambenoj industriji glavni je naglasak na procesiranju visokim hidrostatskim tlakom, ultrazvukom, pulsirajućim električnim poljem, ionizirajućim zračenjem i primjenom plazme. Netermalne tehnike obrade hrane sve su više cijenjene među potrošačima zbog smanjenog utjecaja na nutritivna i senzorska svojstva namirnica. Tijekom netermalne obrade, hrana je visokim temperaturama izložena vrlo ograničeno vrijeme, odnosno oko jedne minute (Bhaskar Jadhav i sur., 2021). Međutim, nedostatak netoplinskih procesa je u znatno većim ulaganjima i troškovima u procesnu opremu. No, glavni razlozi zbog kojih netoplinski procesi postaju predmetom

zanimanja su znatno smanjene potrošnje energije i vode, velika učinkovitost proizvodnje i jednostavnost upotrebe. Netermički postupci mogu se primijeniti na različite vrste namirnica, poput voća, povrća, mesa i mesnih prerađevina, mlijeka i mliječnih proizvoda, ali i mnogih drugih. Primjenom alternativnih tehnologija u prehrambenoj industriji, posebice kod sezonskih proizvoda, omogućila bi se brža prerada velike količine proizvoda neposredno nakon berbe čime bi se potrošačima tijekom cijele godine omogućilo konzumiranje visokokvalitetnih proizvoda produljene trajnosti (Aganović i sur., 2017). Također, važno je pazljivo pratiti i optimizirati procesne parametre tijekom obrade kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i izbjegli mogući problemi koji bi unazadili kvalitetu proizvoda.

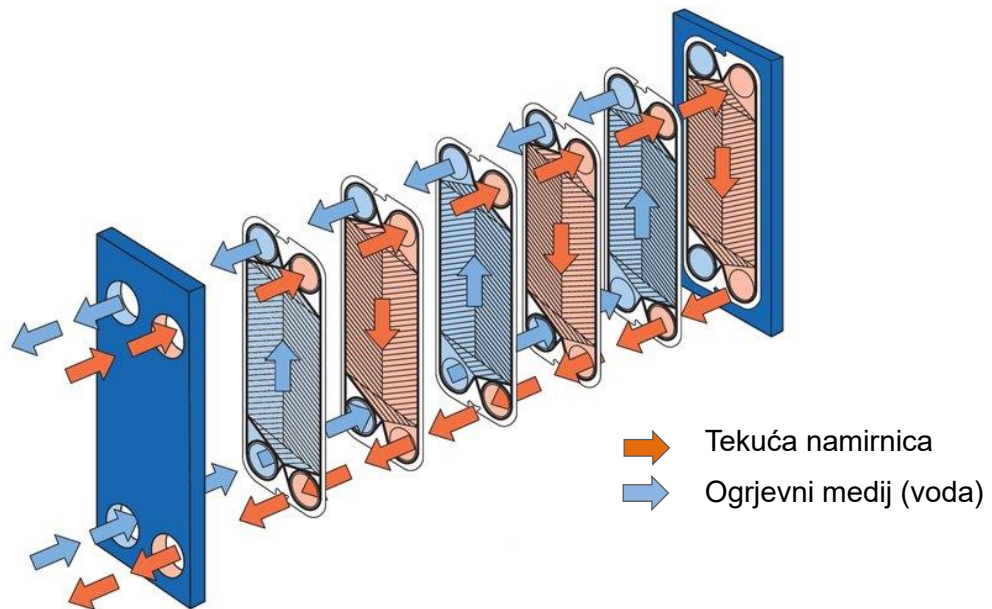
Općenito se kod netermalnih metoda pasterizacije upotrebljava termin „hladna pasterizacija“ zbog korištenja znatno drugačijih procesnih uvjeta, a ponajprije zbog niže temperature. Kao alternativa pasterizaciji razmotrit će se učinak i rad netermalne tehnologije u obradi hrane. Važno je da one kao valjane alternative zadovoljavaju uvjete koji podrazumijevaju mikrobiološku ispravnost, jednostavnost uporabe, osiguravanje dobrih senzorskih svojstva te da se tijekom procesa ne stvaraju štetni nusprodukti koji bi mogli narušiti zdravlje potrošača.

2.4.1. Pasterizacija

Pasterizacija je termički postupak obrade namirnica na temperaturama nižim od 100 °C. Francuski kemičar Louis Pasteur je u 19. stoljeću na temelju provedenih mikrobioloških istraživanja postavio temelje ovog procesa smatrajući da će hrana nad kojom se provodi toplinska obrada imati dulji rok trajanja i biti sigurnija za konzumaciju. Danas se toplinski postupak pasterizacije provodi u svrhu uništavanja patogenih mikroorganizama i spora te inaktivacije enzima. Pasterizacija se najčešće provodi nad tekućim proizvodima prehrambene industrije u kojoj posebno valja istaknuti voćne sokove, mlijeko, pivo i vino. Kod postupka pasterizacije, osim temperature, određuje se i minimalno trajanje obrade koje je potrebno kako bi se uništili patogeni mikroorganizmi i postigla maksimalna djelotvornost. Postoje osnovna tri tipa pasterizacije: niska, dugotrajna (63-65 °C/30 minuta); srednja, kratkotrajna (72 °C/15 sekundi i visoka, dugotrajna (82 °C/20 sekundi). Djelotvornost pasterizacije važno je provjeriti testom na prisutnost enzima fosfataze i peroksidaze.

Izmjenjivači topline jedni su od najčešćih dijelova industrijske opreme. Koriste se za procese pasterizacije, a mogu biti pločaste, cijevne i spiralne konstrukcijske izvedbe. Pločasti izmjenjivači sastoje se od tankih naboranih ploča koje su grupirane u cjelinu, a nalaze se između dva okvira. Voda koja služi kao ogrjevnj medij i tekuća namirnica uvode se u izmjenjivač pomoću razdvojenog cijevnog sustava. Bez direktnog kontakta, voda predaje toplinu na hladniju namirnicu (slika 4). Prijenos topline osigurava zagrijana voda, a energija

se dobiva korištenjem različitih izvora energije poput prirodnog plina, ugljena ili električne energije (Yildirim, 2015). Nakon završenog postupka, svaka od tekućina izlazi na suprotnim krajevima. Pločasti izmjenjivači češći su u prehrambenoj industriji zbog kraćeg kontakta ogrjevnog medija s namirnicom i veće površine izmjene topline. Slijedi hlađenje pasteriziranog mlijeka pomoću ulaznog sirovog mlijeka u odjeljku za regeneraciju te naposljetku i hladnom vodom čime je postupak hlađenja dovršen. Gotov proizvod napušta pasterizator i sprema se u posebne spremnike iz kojih će ići u nastavak proizvodnog procesa.



Slika 4. Shematski prikaz prijenosa topline u pločastom izmjenjivaču topline (Walraven, 2014)

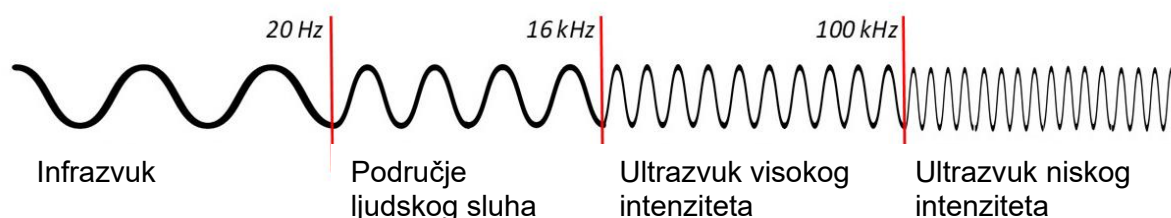
U mliječnoj industriji pasterizacija je obavezan postupak u obradi mlijeka. Najčešće se provodi srednja kratkotrajna pasterizacija kako bi se minimizirale moguće promjene na mlijeku uslijed djelovanja povišene temperature.

Karahmet i sur. (2022) na temelju provedenih istraživanja postavili su energetske bilancu za pasterizirana mlijeka s različitim udjelom mliječne masti (0,9 %, 1,5 %, 2,8 %, 3,2 %). Istraživanje je provedeno u petnaest serija za svaku grupu mlijeka. Svaka je serija imala istu količinu mlijeka, odnosno oko 6000 litara. Najmanje vrijednosti utroška energije zabilježene su kod mlijeka s najnižim udjelom mliječne masti, 72,95 kWh. Kod mlijeka s 1,5 % mliječne masti zabilježeno je 73,43 kWh utroška energije, a slična vrijednost uočena je i kod mlijeka s 2,8 % mliječne masti i time utroškom od 73,39 kWh. Najveća zabilježena potrošnja je kod mlijeka s 3,2 % mliječne masti, 73,98 kWh. Uočljivo je da dobiveni rezultati ne pokazuju preveliku razliku u potrošnji energije ovisno o vrsti pasteriziranog mlijeka. Minimalne razlike u potrošnji energije nastale su zbog toga što mlijeko s više masti ima viši toplinski kapacitet pa

time i manje provodi toplinu. Ipak, može se zaključiti kako je potrošnja energije za jednu šaržu pasterizacije mlijeka izrazito visoka. Isto tako može se javiti varijabilnost u potrošnji energije ovisno o vrsti pasterizacije. Energetska potrošnja srednje kratkotrajne pasterizacije, razumljivo, bit će znatno niža od potrošnje visoke dugotrajne pasterizacije. Presudni su faktori više temperature pasterizacije i različita vremena izlaganja na zadanim temperaturama. Smanjenje potrošnje energije u procesu pasterizacije može se postići optimizacijom procesnih parametara.

2.4.2. Ultrazvuk

Ultrazvuk (engl. *Ultrasound*, US) je novija tehnologija koja se počela intenzivnije primjenjivati u obradi prehrambenih namirnica. Ultrazvuk se može definirati kao zvučni val čija je frekvencija viša od gornjeg praga osjetljivosti ljudskog sluha koji iznosi oko 20 kHz. Zvučni val podrazumijeva prijenos mehaničke energije kroz prostor titranjem čestica elastičnog sredstva. Ovisno o frekvencijskom rasponu djelovanja, razlikuju se ultrazvuk niskog i visokog intenziteta (slika 5).



Slika 5. Područja podjele zvuka prema frekvencijama (*prema Cebrián, 2022*)

Ultrazvuk niskog intenziteta odnosi se na djelovanje frekvencije iznad 100 kHz i snage niže od 1 W cm^{-1} . Za ultrazvuk niskog intenziteta uvriježen je naziv dijagnostički ultrazvuk jer se u svrhu određivanja različitih prehrambenih svojstava (sastav, struktura, viskoznost, protok, zrelost, prisutnost stranih tijela) koristi analitičkim (dijagnostičkim) metodama. Često se primjenjuje u neinvazivnim analizama poput kontrole svježine voća i povrća, proizvoda na bazi žitarica i mliječnih proizvoda, a korisnim se pokazao i u kontroli patvorenja meda (Awad i sur., 2012).

Nasuprot tome, ultrazvuk visokog intenziteta djeluje u rasponu niske frekvencije (20-100 kHz) i visoke snage (više od 1 W cm^{-1}). Uzrokuje znatna fizikalna, mehanička i kemijska oštećenja tkiva što omogućuje razbijanje staničnih stijenki nepoželjnih mikroorganizama. Osim za inaktivaciju mikroorganizama i inhibiciju enzima, ultrazvuk visokog intenziteta se u prehrambenoj industriji primjenjuje i za ekstrakciju aktivnih sastojaka iz različitih matrica,

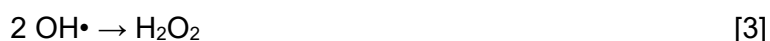
homogenizaciju, emulgiranje, filtraciju, zamrzavanje, pakiranje, kristalizaciju, a često se koristi i kao pripremna operacija prije sušenja. Primjenom ultrazvuka visokog intenziteta osiguravaju se poboljšana senzorska i nutritivna svojstva proizvoda, ali je osigurano i smanjenje potrošnje energije.

2.4.2.1. Mehanizam djelovanja ultrazvuka

Osnovni princip rada ultrazvuka temelji se na fenomenu kavitacije. Tijekom tretmana ultrazvukom dolazi do širenja zvučnih valova u tekućoj namirnici i stvaranja longitudinalnih valova. Posljedično nastaju promjenjivi ciklusi kompresije i ekspanzije koje dovode do stvaranja negativnog tlaka. Promjene tlaka dovode do kavitacije, odnosno stvaranja mjehurića plina (džepova plina) u tretiranom mediju. Kada energija ultrazvuka nije dovoljna za zadržavanje plinske faze, tada dolazi do iznenadne kondenzacije i implozije mjehurića. Kondenzirane molekule sudaraju se velikom brzinom pri čemu nastaju šok (udarni) valovi visoke temperature i tlaka. Šok valovi stvaraju područja visoke temperature (5500 K) i tlaka (50 MPa) što dovodi do oštećenja stanične membrane. Javlja se mikrostrujanje koje uzrokuje znatna oštećenja mikroorganizama i dodatno pospješuje prijenos mase. Implozije mjehurića i ekstremne temperature mogu dovesti do disocijacije molekula vode i tvorbe hidroksilnih radikala (OH•) i atoma vodika (H⁺) koji su odgovorni za inaktivaciju mikroorganizama (jednadžba 2).

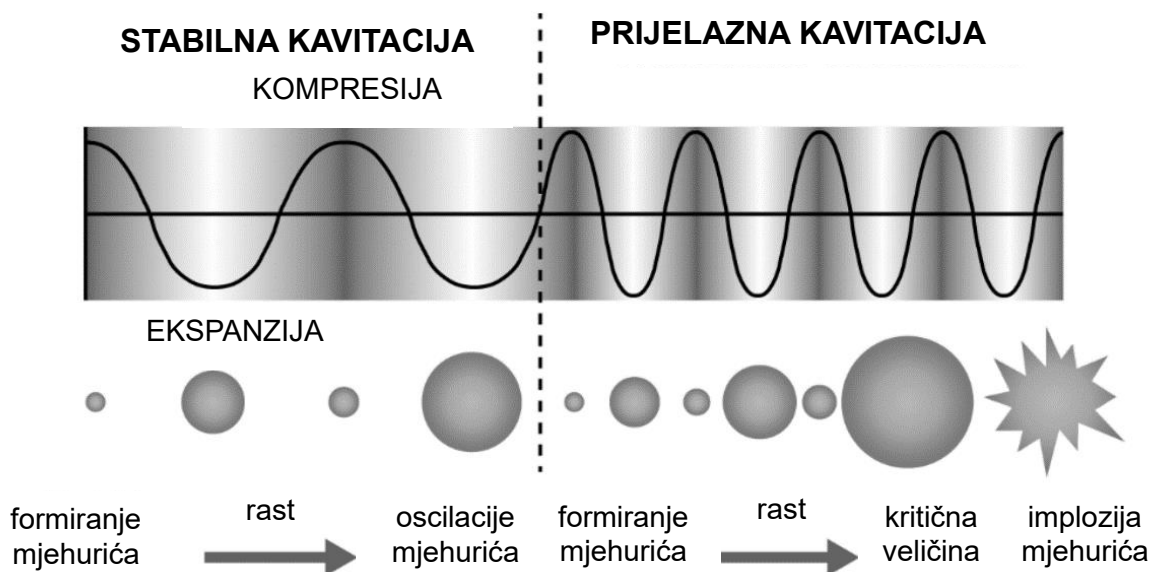


Hidroksilni radikali vrlo su reaktivni i lako dovode do cijepanja (lize) stanica, degradacije polimera ili oksidacije lipida. Reakcijom dva hidroksilna radikala nastaje vodikov peroksid (H₂O₂) koji djeluje kao baktericid (jednadžba 3). Nastali vodikov peroksid može se kvantificirati jodometrijskom titracijom. Vodikov peroksid dodaje se u kiselu sredinu koja sadrži kalij-jodid (KI), a pritom dolazi do oksidacije jodidnih iona (I⁻) u molekularni jod (I₂) (jednadžba 4). Molekularni jod prelazi u trijodidni anion (I₃⁻) u suvišku jodidnih iona (jednadžba 5) (Awtrey i Connick, 1951).



Razlikuju se stabilna i prijelazna kavitacija (slika 6). Stabilna kavitacija rezultira rastom mjehurića te njihovim otapanjem u tekućini, a nastaje djelovanjem ultrazvuka niskog

intenziteta. Ovi su mjehurići stabilni i njihov je životni vijek znatno dulji pa time dolazi do prijenosa mase. Prijelazna ili kratkotrajna kavitacija karakteristična je za djelovanje ultrazvuka visokog intenziteta. Ovi mjehurići imaju kratak životni vijek (jedan ili više zvučnih ciklusa) te neće doći do prijenosa mase.

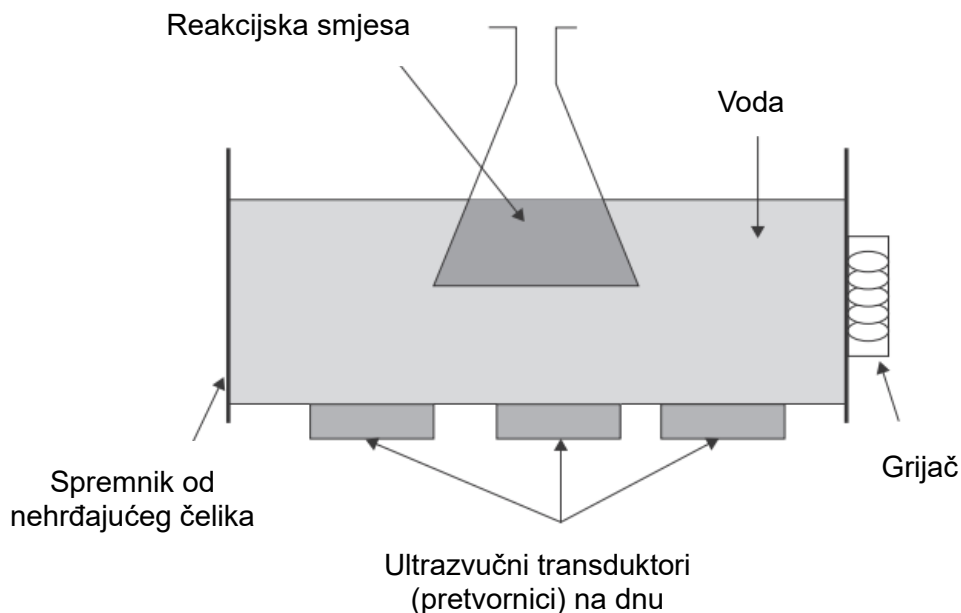


Slika 6. Prikaz stabilne i prijelazne kavitacije (prema Pirsahab i Moradi, 2020)

2.4.2.2. Podjela ultrazvučnih uređaja

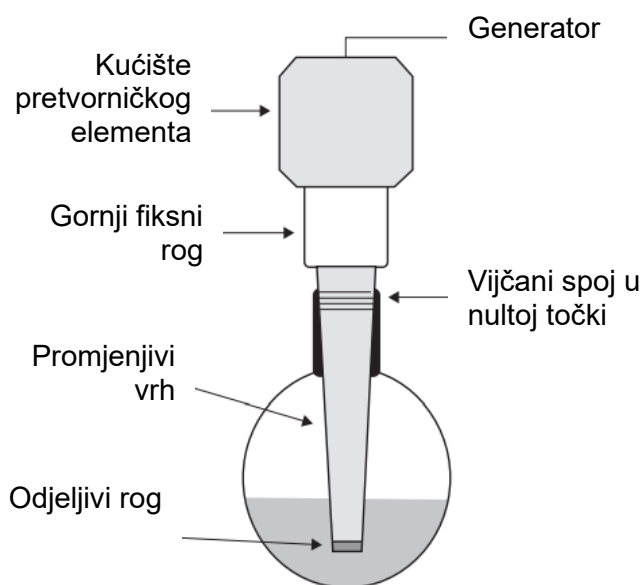
Ultrazvučne kupelji i ultrazvučne sonde najsvremeniji su i najučestaliji ultrazvučni uređaji u upotrebi. Glavne su komponente uređaja generator koji visokonaponsku izmjeničnu struju pretvara u visoku frekvenciju te ultrazvučni transduktor (pretvornik) koji visoku frekvenciju konvertira u mehaničke oscilacije. Postoje sva tipa pretvarača koja su u upotrebi, magnetostruktivni i piezoelektrični. Navedene se oscilacije prenose na materijal pomoću sonde.

Ultrazvučne kupelji najčešće se koriste u laboratorijskim uvjetima zbog lake dostupnosti i pristupačne cijene. Ultrazvučni pretvornici nalaze se na dnu spremnika (slika 7). Iako su predviđene za laboratorijsku primjenu, moguće je i uvećanje („scale-up“) i prevođenje u industrijsko mjerilo. Prednosti ovakvog tipa uređaja su termostatski kontrolirano grijanje i promjenjiva snaga te mogućnost obrade većeg broja uzoraka istovremeno.



Slika 7. Ultrazvučna kupelj (prema Paniwnyk, 2014)

Osim kupelji, sustavi mogu biti oblikovani i u obliku sonde koje se direktno uranjaju u medij nad kojim se provodi tretman (slika 8). Ultrazvučne sonde imaju jedan ili više metalnih klipova povezanih na transdudtor koji osiguravaju intenzitet visoke snage. Ovakav je sustav češći u upotrebi zbog jačeg ultrazvučnog intenziteta koji se isporučuje kroz manju površinu (vrh sonde) za razliku od kupelji koja ima veću površinu (Chemat i sur., 2017).



Slika 8. Ultrazvučna sonda (prema Paniwnyk, 2014)

2.4.2.3. Primjena ultrazvuka

Kao alternativni postupak pasterizacije uzet je primjer tretiranja hrane ultrazvukom kao metode koja je sveprisutnija u prehrambenoj industriji. Osim uništenja mikroorganizama i enzima, osnovni je zadatak ultrazvuka zadržati nepromijenjenu prehrambenu vrijednost, poželjna organoleptička svojstva (okus, miris, boja, tekstura) i smanjiti potrošnju energije.

Jedna od važnijih uloga ultrazvuka u prehrambenoj industriji pripisuje se inaktivaciji mikroorganizama i enzima. Enzimska i mikrobna inaktivacija ovisi o prirodi enzima, procesnim parametrima (temperatura, tlak, snaga tretiranja, ultrazvučna frekvencija) i karakteristikama medija (viskoznost, pH, broj mikroorganizama). Prethodno navedeni mehanički, toplinski i kemijski učinci kavitacije glavni su razlozi uništavanja mikroorganizama, razaranja stanične strukture i inaktivacije enzima.

Učinak ultrazvuka povezan je sa staničnom građom te odnosom površine i volumena stanice mikroorganizama (Abrahamsen, 2022). Gram-negativne bakterije otpornije su od Gram-pozitivnih zbog debljeg sloja peptidoglikana u staničnoj stijenci dok vegetativne stanice lakše podliježu oštećenjima u usporedbi sa sporama. Stoga je važan nastanak već prethodno spomenutih hidroksilnih radikala i vodikovog peroksida što u konačnici dovodi do oksidacije unutarstaničnih aminokiselina kao što su fenilalanin, triptofan, histidin, metionin i cistein. Vodikov peroksid pokazao se dobrim u uništavanju bakterija, kvasaca i virusa te njegova učinkovitost ovisi o primijenjenoj koncentraciji. Oksidacijom su najviše pogođeni osnovni gradivni dijelovi mikroorganizama poput DNA, polisaharida, proteina i lipida. Hidroksilni radikali dovode do lipidne peroksidacije koja će prouzročiti promjenu permeabilnosti membrane i pospješiti istjecanje intracelularnog sadržaja. Djelovanjem slobodnih radikala kod oksidacije lipida može uzrokovati pojavu neugodnog okusa i mirisa.

Učinak kavitacije modificirat će strukturu enzima i time promijeniti njegovu funkcionalnost, stabilnost i aktivnost. Područja visokih temperatura (5000 K) i tlaka djelovat će razorno na sekundarnu strukturu proteina čime će doći do precipitacije hidrofobnih i hidrofilnih aminokiselina. Hidrofobne aminokiseline okrenut će se prema vanjskom dijelu (vodenom mediju), za razliku od hidrofilnih afiniteta prema kojem se tekući medij smanjuje (Rathnakumar i sur., 2023). Kavitacijski učinak primjenjiv je pri inaktivaciji endogenih enzima mlijeka. Enzimi, lipaze, peroksidaze i fosfataze u najvećoj mjeri uzrokuju promjene na mlijeku, stoga ih je važno tijekom ultrazvučnog tretmana inaktivirati.

Ultrazvučne tehnike nerijetko se kombiniraju s ostalim režimima, poput temperature, tlaka ili temperature i tlaka zajedno kako bi se postigla maksimalna učinkovitost. Termosonifikacija koristi kombinaciju ultrazvuka i topline što pogoduje inaktivaciji mikroorganizama prisutnih u hrani. U usporedbi s klasičnim toplinskim metodama obrade, termosonifikacija ima neznatan utjecaj na nutritivne karakteristike proizvoda, a smanjeno je i

vrijeme obrade te energetske troškovi (Abdulstar, 2023). Scudino i sur. (2023) usporedili su sustav termosonifikacije sa srednjom kratkotrajnom pasterizacijom u mljekarskoj industriji. Rezultati istraživanja potvrdili su da je termosonifikacija kao nova tehnologija bolji izbor. Kombinacijom ultrazvuka i topline postignuta je veća mikrobná inaktivacija, a promjena na nutritivnom sastavu i boji krajnjeg proizvoda nije bilo. Isto tako, kombinacijom dvaju tretmana krajnji proizvod imao je produljeni rok trajanja. Kombinacija ultrazvuka i topline inaktivirala je patogene mikroorganizme *Listeria monocytogenes*, *Escheherichia coli*, *Sallmonella spp.* i *Staphylococcus aureus* koji predstavljaju prijjetnju mliječnoj industriji. Manosonifikacija kombinira ultrazvuk i tlak što djeluje na inaktivaciju enzima i mikroorganizama. Naposljetku, sinergijom ultrazvuka s toplinom i tlakom (monotermosonifikacija) omogućuje se povećanje aktivnosti kavitacije (Meullemiestre i sur., 2017) te se postiže djelotvorno uklanjanje enzima otpornih na toplinu u mnogo kraćem vremenskom intervalu nego kod termičkih tretmana (Ravikumar, 2017). Monotermosonifikacija odgovara kinetici prvoga reda. Piyasena i sur. (2003) navode kako samostalno proveden ultrazvučni tretman (20 kHz) na sobnoj temperaturi neće uništiti enteropatogenu bakteriju *Listeria monocytogenes* koja ukoliko dospije u mlijeko, utoliko predstavlja jedan od najvećih izazova mljekarske industrije. Vrijeme decimalne redukcije, odnosno vrijeme potrebno da se broj preživjelih mikroorganizama smanji za 90 %, odnosno na 1/10 početnog broja, za samostalni ultrazvučni tretman iznosilo je 4,3 minute. U kombinaciji s povišenim tlakom od 200 kPa vrijeme decimalne redukcije značajno se smanjuje na 1,5 minutu.

Iako se ultrazvučna obrada pokazala učinkovitom u redukciji broja mikroorganizama prisutnih u mlijeku, postoje određene neželjene posljedice ovog tretmana. Negativan učinak najviše se odražava na senzorska svojstva, ponajprije okus i miris. Stvaranje slobodnih radikala rezultira tvorbom neželjenih hlapljivih spojeva koji mlijeku daju nepoželjni metalni priokus. Tijekom obrade ultrazvukom dolazi do smanjenja globula masti prisutnih u mlijeku i povećanja ukupne površine globula. Veća površina globula i povećanje udjela slobodnih zasićenih masnih kiselina dovodi do lipolitičke užeglosti (Carillo-Lopez i sur., 2021).

Još jedna od primjena ultrazvuka je i ekstrakcija. Ekstrakcija je tehnološka operacija izdvajanja jedne ili više komponenti iz smjese tvari koje se razlikuju po nejednolikoj topivosti u različitim otapalima. Klasična ekstrakcija koristi razna toksična, zapaljiva i hlapljiva otapala koja dodatno sudjeluju u zagađenju okoliša. To je brza i učinkovita metoda za razdvajanje i koncentriranje tvari. Osnovne konvencionalne metode ekstrakcije su: Soxhlet ekstrakcija, maceracija i vodena destilacija.

Soxhlet metoda predstavlja proces kontinuirane ekstrakcije vrućim otapalom (Baruškin i Kralj, 2020). Osnovni princip navedene metode je višekratna kontinuirana ekstrakcija uzorka u specijaliziranoj aparaturi po Soxhlet-u s odgovarajućim otapalom (najčešće heksan).

Ekstrakcija po Soxhlet-u može trajati i nekoliko sati te troši znatne količine energije i otapala.

Maceracija je postupak natapanja krutih tvari u tekućini (voda, etanol) s ciljem ekstrahiranja željenih komponenti. Postupak je čest u proizvodnji alkoholnih pića tijekom kojeg se potapanjem biljnih plodova, cvjetova ili listova u destilatu ili alkoholu postiže ekstrakcija arome, boje i okusa. Uzorak se prije postupka ekstrakcije mora usitniti kako bi se povećala kontaktna površina s otapalom.

Vodena destilacija je postupak u kojem se biljni materijal zagrijava u vodi do temperature koje su više od točke vrelišta. Smjesa pare i esencijalnih ulja prolazi kondenzatorom gdje se hladi i ukapljuje (prevodi u tekuće stanje). Smjesa ulja i vode dolazi na separator na kojem se zbog razlika u gustoći lako odvaja eterično ulje od hidrolata.

Kao alternativa klasičnim ekstrakcijama koristi se ekstrakcija potpomognuta ultrazvukom (engl. *Ultrasound assisted extraction*, UAE) koja ima prednost u vidu smanjene potrošnje energije, skraćenog trajanja obrade uz visoku ponovljivost i smanjene upotrebe otapala. Ultrazvučni tretman najčešće se kombinira sa „zelenim“ otapalima poput vode, etanola, terpena i superkritičnih fluida (sc-CO₂) koji su odlična zamjena organskim otapalima i čija je upotreba znatno sigurnija i prihvatljivija za ekološke standarde. Isto tako, mehaničkim učincima ultrazvuka omogućeno je bolje prodiranje otapala u stanične strukture i poboljšanje prijenos mase.

Chemat i sur. (2017) u istraživanju su usporedili potrebe za energijom u slučajevima klasične ekstrakcije i ultrazvučno potpomognute ekstrakcije masti i ulja iz sjemenki uljarica. Najprije je provedena maceracija u točki vrenja otapala, a potom ekstrakcija po Soxhlet-u. Električna energija korištena za mehaničko miješanje i grijanje prilikom maceracije iznosila je 6 kWh, a za ekstrakciju po Soxhlet-u 8 kWh. Potrebe za električnom energijom za napajanje ultrazvuka iznosile su znatno manjih 0,25 kWh. Nadalje, uspoređivali su emisije ugljika ovisno o provedenom tretmanu. Emisije ugljika veće su u slučaju ekstrakcije po Soxhlet-u sa čak 6400 gCO₂ na 100 g ekstrahiranog spoja i maceracije (3600 gCO₂/100 g ekstrahiranog krutog materijala). Ekološki prihvatljivija UAE emitirala je 200 gCO₂/100 g ekstrahiranog krutog materijala što je značajno manje u odnosu na konvencionalne metode ekstrakcije.

2.5. POVEZANOST NETOPLINSKIH PROCESA I UGLJIČNOG OTISKA

U svrhu poboljšanja i unaprjeđenja procesa u prehrambenoj industriji, razvijene su brojne netermalne tehnologije koje su sigurne, pouzdane i ekološki održive (Yudhistira i sur., 2023). Sistematičnim prikazom u Tablici 2 prikazane su karakteristike pojedinog netoplinskog procesa koje utječu na smanjenje ugljičnog otiska.

Tablica 2. Osnovna obilježja izdvojenih netoplinskih tehnika u prehrambenoj industriji za smanjenje ugljičnog otiska (prema Yudhistira i sur., 2023)

Netoplinska tehnika	Osnovna obilježja za smanjenje ugljičnog otiska	Referenca
Hladna plazma (engl. <i>Cold plasma</i>)	- bez upotrebe otapala - ne-toksičnost - kratko vrijeme obrade	(Zhang i sur., 2022)
	- inaktivacija mikroorganizama	(Hernández-Torres i sur., 2022)
	- djelovanje reaktivnih kisikovih vrsta (ROS)	(Coutinho i sur., 2018)
	- smanjena potrošnja vode i energije - inertnost prema procesnoj opremi	(Cullen i sur., 2018)
Visoki tlak (engl. <i>High-pressure process, HPP</i>)	- ne-toksičnost - kratko vrijeme obrade - visoka učinkovitost	(Ali i sur., 2021)
	- inaktivacija mikroorganizama	(Zhang i sur., 2022)
	- smanjeno vrijeme kuhanja - modifikacija škroba - poboljšana ultrafiltracija	(Sonawane i sur., 2020)
	- smanjena potrošnja vode	(Cacace i sur., 2020)
Pulsirajuće električno polje (engl. <i>Pulsed electric field, PEF</i>)	- bez upotrebe otapala - ne-toksičnost - kratko vrijeme obrade	(Ali i sur., 2021)
	- inaktivacija mikroorganizama - poboljšani prijenos mase	(Toepfl i sur., 2005)
	- mehanizam elektroporacije	(Capodaglio i sur., 2021)

3. METODA IZRAČUNA UGLJIČNOG OTISKA

Ugljični otisak za proizvodne postupke pasterizacije i ultrazvuka određen je pomoću CCaLC2 alata (The University of Manchester, Manchester, Velika Britanija). CCaLC2 pripada drugoj generaciji CCaLC alata kojim se na jednostavan način može procijeniti utjecaj pojedinog proizvodnog koraka na životnu sredinu. Osim emisije ugljičnog dioksida moguće je odrediti i vodeni otisak, potencijal eutrofikacije, potencijal acidifikacije te mnoge druge (Anđelić i Rajaković-Ognjanović, 2019).

Ovaj alat pruža detaljnu analizu životnog ciklusa proizvoda (slika 9), uključujući sirovine (engl. *Raw materials*), proizvodnju (engl. *Production*), skladištenje (engl. *Storage*), transport, upotrebu (engl. *Use*) i upravljanje otpadom (engl. *Waste Management*). Za svaku od navedenih faza potrebno je unijeti podatke na temelju kojih se izvode izračuni. Obuhvaćene su tri baze podataka, *Ecoinvent*, CCaLC baza i Korisnička baza podataka.



Slika 9. Prikaz sučelja programa CCaLC2

Osim za cijeli životni ciklus proizvoda, izračune je moguće provesti i za svaki proces pojedinačno. Za prethodno opisane postupke pasterizacije i ultrazvuka izračunat je ugljični otisak samo proizvodnog dijela i to na temelju različitih potrošnji električne energije.

Prema podacima, ukupna potrošnja energije za postupak pasterizacije mlijeka za jednu litru mlijeka iznosila je 12 kWh (Al-Hilphy i sur., 2021), a za ultrazvučni tretman obrade mlijeka 0,4 kWh (Carillo-Lopez i sur., 2021).

Prema podacima za potrošnju energije izračunat je ugljični otisak za postupak

pasterizacije (slika 10). Ugljični otisak iznosio je 6,71 kgCO₂ fu⁻¹ („fu“ označava funkcionalnu jedinicu, u ovom slučaju jednu litru mlijeka).

Functional unit: 1 LITRA MLJEKA
Stage: PASTERIZACIJA

Total carbon footprint for stage: 6.71 kg CO2 eq. / f.u.
Total water usage for stage: 24.0 litres water / f.u.
Total water footprint (stress-weighted) for stage: 0.661 litres water eq. / f.u.

Energy	Amount (kWh/f.u.)	CO2 eq. (kg/kWh energy)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (litres/kWh energy)	Water usage (litres/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (litres eq./f.u.)	Database section
Electricity (high voltage) - Eur...	12.0	0.559	6.71	2.00	24.0	0.661	CCaLC/Energy
Total:	12.0	Total:	6.71	Total:	24.0	0.661	

Direct emissions	Amount (kg/f.u.)	CO2 eq. (kg/kg GHG)	CO2 eq. (kg/f.u.)
Total:	0.00	Total:	0.00

Packaging	Amount (kg/f.u.)	CO2 eq. (kg/kg packaging)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (litres/kg packaging)	Water usage (litres/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (litres eq./f.u.)	Database section
Total:	0.00	Total:	0.00	Total:	0.00	0.00	

Waste	Amount (kg/f.u.)	CO2 eq. (kg/kg waste)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (litres/kg waste)	Water usage (litres/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (litres eq./f.u.)	Database section
Total:	0.00	Total:	0.00	Total:	0.00	0.00	

Material outputs	Amount (kg)	Destination
Total:	0.00	

Slika 10. Numerički prikaz izračunatog ugljičnog otiska za postupak pasterizacije za jednu litru mlijeka

Functional unit: 1 LITRA MLJEKA

Stage: ULTRAZVUČNI TRETMAN OBRADJE MLJEKA

Total carbon footprint for stage: **0,224** **kg CO₂ eq. / f.u.**
Total water usage for stage: **0,801** **litres water / f.u.**
Total water footprint (stress-weighted) for stage: **0,022** **litres water eq. / f.u.**

Energy	Amount (kWh/f.u.)	CO ₂ eq. (kg/kWh energy)	CO ₂ eq. (kg/f.u.)	Water usage (litres/kWh energy)	Water usage (litres/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (litres eq./f.u.)	Database section
Electricity (high voltage) - Eur...	0,400	0,559	0,224	2,00	0,801	0,022	CCaLC/Energy
Total:	0,400	Total:	0,224	Total:	0,801	0,022	

Direct emissions	Amount (kg/f.u.)	CO ₂ eq. (kg/kg GHG)	CO ₂ eq. (kg/f.u.)
Total:	0,00	Total:	0,00

Packaging	Amount (kg/f.u.)	CO ₂ eq. (kg/kg packaging)	CO ₂ eq. (kg/f.u.)	Water usage (litres/kg packaging)	Water usage (litres/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (litres eq./f.u.)	Database section
Total:	0,00	Total:	0,00	Total:	0,00	0,00	

Waste	Amount (kg/f.u.)	CO ₂ eq. (kg/kg waste)	CO ₂ eq. (kg/f.u.)	Water usage (litres/kg waste)	Water usage (litres/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (litres eq./f.u.)	Database section
Total:	0,00	Total:	0,00	Total:	0,00	0,00	

Material outputs	Amount (kg)	Destination
Total:	0,00	

Slika 11. Numerički prikaz izračunatog ugljičnog otiska za ultrazvučni tretman obrade jedne litre mlijeka

Ugljični otisak za ultrazvučni tretman jedne litre mlijeka iznosi 0,224 kgCO₂ fu⁻¹ (slika 11). Prema rezultatima dobivenima pomoću alata CCaLC2 vidljiv je uvećani ugljični otisak pasterizacije u odnosu na tretman ultrazvukom. Time je neosporno kako su nove i alternativne metode procesiranja hrane pomoću ultrazvuka znatno okolišno prihvatljivije od konvencionalnih metoda.

4. PERSPEKTIVA I CILJEVI ZA BUDUĆNOST

Kako bi se omogućilo što efikasnije smanjenje ugljičnog otiska, važno je kreirati i razviti održive programe koji će podupirati ekološki prihvatljive načine obrade hrane. Iako je prehrambena industrija sve više okrenuta „zelenim“ tehnologijama, još uvijek se poseže za provjerenim konvencionalnim toplinskim postupcima prerade.

Rastuća populacija, potrošnja energenata, prehrana temeljena na mesu i upotreba toplinskih procesa u preradi hrane učestalije doprinose klimatskim promjenama. Noviji mehanizmi koji signaliziraju da je određeni proizvod u skladu sa ekološkim standardima imaju oznaku održivosti (Shabir i sur., 2023). Te oznake pružaju potrošačima uvid u svaki proizvodni korak te utjecaj pojedinog proizvoda na ugljični otisak.

Četvrta industrijska revolucija, poznatija kao Industrija 4.0, temelji se na najnovijoj digitalnoj tehnologiji i međusobnoj komunikaciji. Predviđa bolju produktivnost, efikasnost i autonomiju tvornica koje će se lakše nositi s izazovima modernog tržišta. Integracija naprednih digitalnih tehnologija može biti od pomoći u smanjenju propusta u proizvodnji te u boljem praćenju vremena ciklusa i potrošnje energije (Baruškin i Kralj, 2021). Naglasak je i na uvođenju aditivnih i modernih tehnologija koje su ekološki prihvatljive, ekonomski isplative i sigurne za potrošače. Jedan od ciljeva Industrije 4.0 je implementacija održive proizvodnje koja nastoji optimizirati potrošnju energije i smanjiti količinu otpada tijekom obrade. Inovativnim alatima poput naprednih senzora (*hi-tech* senzori), internet stvari (engl. *Internet of Things*, IoT) i umjetne inteligencije moguće je pratiti potrošnju energije i omogućiti učinkovitiju i bolju uporabu resursa. Internet stvari omogućavaju novu dimenziju povezanosti (Baruškin i Kralj, 2021) i analize velikog broja podataka. Ovaj tehnološki novitet pruža pametno upravljanje električnim mrežama što podrazumijeva optimizaciju potrošnje energije i bolje iskorištenje resursa.

Napredak je uložen i u održivom upravljanju cijelim opskrbnim lancem. Digitalne tehnologije omogućuju neprestano praćenje svih komponenti opskrbnog lanca što je posebno obuhvaćeno *Blockchain* tehnologijom. Time je omogućena transparentnost i dosljednost jer se industrijama pruža mogućnost nadziranja sirovine prije dolaska u tvornicu na daljnju preradu. Naposljetku, potrošači na jednostavan način mogu biti upoznati s podrijetlom hrane i svim proizvodnim postupcima.

5. ZAKLJUČCI

1. Novi tehnološki netoplinski pristup obradi hrane pronalazi mjesto u suvremenim prehrambenim postrojenjima zbog smanjenog utroška energije pri procesiranju, očuvanja nutritivnog profila namirnice te smanjenih troškova prerade.
2. Analizom utjecaja na okoliš pomoću CCaLC2 alata ustanovljeno je da je ultrazvučni tretman obrade mlijeka ($0,224 \text{ kgCO}_2 \text{ fu}^{-1}$) znatno ekološki prihvatljiviji od konvencionalnog postupka pasterizacije ($6,71 \text{ kgCO}_2 \text{ fu}^{-1}$).
3. Procjena životnog ciklusa proizvoda omogućuje sveobuhvatnu analizu i identifikaciju ekoloških utjecaja pojedinog proizvoda ili usluge tijekom cijelog životnog vijeka, od nabave sirovine do konačnog zbrinjavanja.
4. Ekstrakcija potpomognuta ultrazvukom predstavlja inovativan i održiv pristup za izdvajanje bioaktivnih komponenti iz različitih materijala. Prednosti korištenja ultrazvuka nad konvencionalnim metodama su smanjena upotreba toksičnih otapala, povećana efikasnost, kraće vrijeme obrade te manji ugljični otisak.
5. Buduća istraživanja trebala bi se fokusirati na ekološku i energetske optimizaciju procesa u prehrambenoj industriji kako bi se postigla maksimalna kvaliteta i sigurnost prehrambenih proizvoda uz minimalne troškove obrade i što bolju učinkovitost provedenih tretmana.

6. LITERATURA

Abdulstar AR, Altemimi AB, Al-Hilphy AR (2023) Exploring the Power of Thermosonication: A Comprehensive Review of Its Applications and Impact in the Food Industry. *Foods* **12**, 1459. <https://doi.org/10.3390/foods12071459>

Abrahamsen RK, Narvhus JA (2022) Can ultrasound treatment replace conventional high temperature short time pasteurization of milk? A critical review. *Int Dairy J* **131**. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105375>

Aganović K, Smetana S, Grauwet T, Toepfl S, Mathys A, Van Loey A i sur. (2017) Pilot scale thermal and alternative pasteurization of tomato and watermelon juice: An energy comparison and life cycle assessment. *J Clean Prod* **141**, 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.015>

Aggarwal S (2019) Food and climate change. *Jindal Glob Law Rev* **10**, 121–127. <https://doi.org/10.1007/s41020-019-00083-4>

Al-Hilphy AR, Abdulstar AR, Gavahian M (2021) Moderate electric field pasteurization of milk in a continuous flow unit: Effects of process parameters, energy consumption, and shelf-life determination. *Innov Food Sci Emerg* **67**, 102568. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102568>

Ali A, Wei S, Liu Z, Fan X, Sun Q, Xia Q i sur. (2021). Non-thermal processing technologies for the recovery of bioactive compounds from marine by-products. *LWT*, **147**, 111549. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111549>

Anđelić N, Rajaković-Ognjanović V (2019) Primena i mogućnosti programskog paketa „CCaLC2“ za procenu uticaja proizvodnih procesa u industriji na životnu sredinu. *Vodoprivreda* **51**, 251-258.

Awad TS, Moharram HA, Shaltout OE, Asker D, Youssef MM (2012) Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Res Int* **48**, 410–427. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>

Awtrey AD, Connick RE (1951) The Absorption Spectra of I_2 , I_3^- , I^- , IO_3^- , $S_4O_6^{2-}$ and $S_2O_3^{2-}$. *J Am Chem Soc* **73**, 1842-1843. <https://doi.org/10.1021/ja01148a504>

Baruškin J, Kralj M (2020) Primjena elemenata Industrije 4.0 u biotehničkim znanostima: aditivne tehnike u kreiranju kapsula s biljnim materijalom i jestivih hidrokoloidnih gelova s biljnim ekstraktima (znanstveni rad), Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Cacace F, Bottani E, Rizzi A, Vignali G (2020) Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods. *Innov Food Sci Emerg Technol* **60**, 102281. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102281>

Capodaglio AG (2021) Pulse Electric Field Technology for Wastewater and Biomass Residues' Improved Valorization. *Processes* **9**, 736. <https://doi.org/10.3390/PR9050736>

Carillo-Lopez LM, Garcia-Galicia IA, Tirado-Gallegos JM, Sanchez-Vega R, Huerta-Jimenez M, Ashokkumar M i sur. (2021) Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrason Sonochem* **73**, 105467. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105467>

Cebrián D (2022) How ultrasound works in food processing. <https://innovativefoodprocessing.no/en/artikkel/how-ultrasound-works-food-processing>.
Pristupljeno 3. srpnja 2024.

Coutinho NM, Silveira MR, Rocha RS, Moraes J, Ferreira MVS, Pimentel TC i sur. (2018) Cold plasma processing of milk and dairy products. *Trends Food Sci Technol* **74**, 56–68. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2018.02.008>

Charles K (2021) Food production emissions make up more than a third of global total. <https://www.newscientist.com/article/2290068-food-production-emissions-make-up-more-than-a-third-of-global-total/>.
Pristupljeno 14. lipnja 2024.

Chemat F, Rombaut N, Sicaire AG, Meullemiestre A, Fabiano-Tixier AS, Abert-Vian M (2017) Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrason Sonochem* **34**, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>

Cullen PJ, Lalor J, Scally L, Boehm D, Milosavljević V, Bourke P i sur. (2018) Translation of plasma technology from the lab to the food industry. *Plasma Process Polym* **15**, 1-11.

10.1002/ppap.201700085

Dalsgaard H, Abbotts W (2003) 8-Improving energy efficiency. U Mattsson B, Sonesson U (ured.) *Environmentally-Friendly Food Processing*. Woodhead Publishing, str. 116-129.

Đekić I, Sanjuán N, Clemente G, Režek Jambrak A, Djukić-Vuković A, Vrabič-Brodnjak U i sur. (2018) Review on environmental models in the food chain - Current status and future perspectives. *J Clean Prod* **176**, 1012–1025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.241>

Forero-Cantor G, Ribal J, Sanjuán N (2020) Levying carbon footprint taxes on animal-sourced foods. A case study in Spain. *J Clean Prod*, **243**, 118668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118668>

Hernández-Torres CJ, Reyes-Acosta YK, Chávez-González ML, Dávila-Medina MD, Kumar Verma D, Martínez-Hernández JL i sur. (2022) Recent trends and technological development in plasma as an emerging and promising technology for food biosystems. *Saudi J Biol Sci* **29**, 1957–1980. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.023>

ISO 14040:2006 Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework.

ISO 14044:2006 Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines

Karahmet E, Isaković S, Toroman A (2021) Energy balance of milk pasteurization process. U: Conference 1st International Conference on Chemo and Bioinformatics, Kragujevac.

Karwacka M, Ciużyńska A, Lenart A, Janowicz M (2020) Sustainable Development in the Agri-Food Sector in Terms of the Carbon Footprint: A Review. *Sustainability* **12**, 6463. <https://doi.org/10.3390/su12166463>

Kim D, Thoma G, Nutter D, Milani F, Ulrich R, Norris G (2013) Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *Int J Life Cycle Assess*, **18**, 1019-1035. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0553-9>

Majot J, Kuyek D (2017) Big meat and big dairy's climate emissions put Exxon Mobil to shame. <https://www.theguardian.com/commentisfree/2017/nov/07/big-meat-big-dairy-carbon-emissions-exxon-mobil>. Pristupljeno 16. lipnja 2024.

Monforti-Ferrario F, Dallemand J-F, Pinedo Pascua I, Motola V, Banja M, Scarlat N i sur. (2015) Energy use in the EU food sector: State of play and opportunities for improvement. <https://doi.org/10.2790/158316>

Nabipour Afrouzi H, Ahmed J, Mobin Siddique B, Khairuddin N, Hassan A (2023) A comprehensive review on carbon footprint of regular diet and ways to improving lowered emissions. *Results Eng* **18**, 101054. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101054>

Paniwnyk L (2014) Application of Ultrasound. U: Sun DW (ured.) Emerging Technologies for Food Processing, 2.izd., Academic Press, str. 271–291.

Picart-Palmade L, Cunault C, Chevalier-Lucia D, Belleville MP, Marchesseau S (2019) Potentialities and limits of some non-thermal technologies to improve sustainability of food processing. *Front Nutr* **5**. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00130>

Pirsaheb M, Moradi N (2020) Sonochemical degradation of pesticides in aqueous solution: Investigation on the influence of operating parameters and degradation pathway-a systematic review. *RSC Adv* **10**, 7396–7423. <http://dx.doi.org/10.1039/C9RA11025A>

Rathnakumar K, Kalaivendan RGT, Eazhumalai G, Raja Charles AP, Verma P, Rustagi S i sur. (2023) Applications of ultrasonication on food enzyme inactivation- recent review report (2017–2022). *Ultrason Sonochem* **96**. <https://doi.org/10.1016%2Fj.ultsonch.2023.106407>

Ravikumar M (2017) Ultrasonication: An Advanced Technology for Food Preservation. *Int J Pure Appl Biosci* **5**, 363–371. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.5481>

Ritchie H (2020) You want to reduce the carbon footprint of your food? Focus on what you eat, not whether your food is local. <https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local>. Pristupljeno 13. lipnja 2024.

Saxe H (2010) LCA-based Comparison of the Climate Footprint of Beer vs. Wine & Spirits, Institute of Food and resource Economics, Kopenhagen.

Scudino H, Guimarães JT, Silva Moura R, Luis P. A. Ramos G, Pimentel TC, Cavalcanti RN i sur. (2023) Thermosonication as a pretreatment of raw milk for Minas frescal cheese production. *Ultrason Sonochem* **92**, 106260. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106260>

Shabir I, Dash KK, Dar AH, Pandey VK, Fayaz U, Srivastava S i sur. (2023) Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods* **7**, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100215>

Statista (2024) Distribution of carbon dioxide emissions worldwide in 2022, by select country. <https://www.statista.com/statistics/271748/the-largest-emitters-of-co2-in-the-world/>.

Pristupljeno 25. lipnja 2024.

Tetteh EK, Amankwa MO, Yeboah C (2021) Emerging carbon abatement technologies to mitigate energy-carbon footprint- a review. *Cleaner Mater* **2**, 100020. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2021.100020>

Toepfl S, Heinz V, Knorr D (2005) Overview of Pulsed Electric Field Processing for Food. *Emerg Technol Food Process*, 69–97. <https://doi.org/10.1016/B978-012676757-5/50006-2>

Vetter SH, Sapkota TB, Hillier J, Stirling CM, Macdiarmid JI, Aleksandrowicz L i sur. (2017) Greenhouse gas emissions from agricultural food production to supply Indian diets: Implications for climate change mitigation. *Agric Ecosyst Environ* **237**, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.024>

Walraven D (2014) Optimization of the Energy Conversion Starting from Low-Temperature Heat: Application to Geothermal Binary Cycles, KU Leuven, Arenberg Doctoral School.

Yang Y, Meng G (2020) The evolution and research framework of carbon footprint: Based on the perspective of knowledge mapping. *Ecol Indic* **112**, 106125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106125>

Yildirim N, Genc S (2015) Thermodynamic analysis of a milk pasteurization process assisted by geothermal energy. *Energy* **90**, 987–996. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.003>

Yudhistira B, Punthi F, Gavahian M, Chang CK, Hazeena SH, Hou CY i sur. (2023) Nonthermal technologies to maintain food quality and carbon footprint minimization in food processing: A

review. *Trends Food Sci Technol* **141**, 104205. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104205>

Zhang A, Sutar PP, Bian Q, Fang X, Ni J, Xiao H (2022) Pesticide residue elimination for fruits and vegetables: the mechanisms, applications, and future trends of thermal and non-thermal technologies. *J Futur Foods* **2**, 223-240. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.06.004>

Izjava o izvornosti

Ja Ana Stanić izjavljujem da je ovaj završni rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u njegovoj izradi nisam koristila drugim izvorima, osim onih koji su u njemu navedeni.


Vlastoručni potpis