

Primjena visokog tlaka u postupcima obrade hrane

KUI – 2/2011
Prispjelo 1. ožujka 2010.
Prihvaćeno 28. lipnja 2010.

G. Krešić,^{a*} V. Lelas,^b A. Režek Jambrak^b i Z. Herceg^b

^a Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu, Opatija, Katedra za hranu i prehranu, Sveučilište u Rijeci, Primorska 42, 51 410 Opatija.

^b Prehrambeno-bioteknološki fakultet, Zavod za prehrambeno-tehnološko inženjerstvo, Laboratorij za procesno-prehrambeno inženjerstvo, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb.

Obrada visokim tlakom podrazumijeva podvrgavanje tekuće ili čvrste hrane, s ambalažom ili bez nje, djelovanju tlaka od 100 do 800 MPa (1200 MPa). Temperatura obrade može se kretati od ispod 0 °C do iznad 100 °C, a vrijeme izloženosti djelovanju tlaka, ovisno o cilju obrade, može varirati od nekoliko sekundi do preko 20 minuta. Zbog djelovanja visokog tlaka dolazi do smanjenja obujma sustava i pospešivanja onih reakcija koje vode smanjenju obujma. Potencijal primjene visokog tlaka u obradi hrane je u inaktivaciji mikroorganizama, modifikaciji funkcionalnih svojstava biopolimera, postizanju funkcionalnosti proizvoda te zadržavanju čimbenika kvalitete (boja, aroma, nutritivni sastav). Komponente odgovorne za specifičnu nutritivnu vrijednost i organoleptičke značajke hrane praktički su neosjetljive na djelovanje tlaka. Cilj rada je, polazeći od teorijskih principa djelovanja visokog tlaka, uzimajući u obzir njegove prednosti i nedostatke, prikazati mogućnosti primjene u postupcima obrade hrane. U radu su također opisani tipovi uređaja za tretiranje visokim tlakom koji se mogu primijeniti u obradi hrane. Osim sposobnosti uništavanja mikroorganizama pri sobnoj temperaturi što ovu tehnologiju čini danas jedinom komercijalno primjenjivom alternativom termičkom tretiranju, u radu su prikazane i specifične mogućnosti primjene visokog tlaka u preradi mlijeka, mesa te voća i povrća. S obzirom na trend rastuće potražnje za hranom bez dodataka koja u velikoj mjeri ima zadržane značajke kvalitete (boja, aroma, nutritivni sastav, tekstura), uz ujedno zajamčenu mikrobiološku stabilnost, može se očekivati da će metoda obrade hrane visokim tlakom u budućnosti naći svoju širu primjenu i to upravo za proizvode koji zahvaljujući svojoj dodanoj vrijednosti imaju istaknuto mjesto na tržištu.

Ključne riječi: *Visoki tlak, prerada mesa, prerada mlijeka, prerada voća i povrća*

Uvod

Danas smo svjedoci porasta zahtjeva potrošača za nutritivno vrijednom, minimalno obrađenom hranom, bez suvišnih aditiva, koja uz zajamčenu mikrobiološku stabilnost ima i zadržane značajke svježine (boja, tekstura, vitamini, minerali).¹ Ovakav trend nameće potrebu za razvojem i primjenom naprednih tzv. netermičkih tehnologija obrade hrane. U ove tehnologije nove generacije ubrajaju se: visoki hidrostatski tlak, ultrazvuk, pulsirajuće električno polje, pulsirajuće svjetlo, oscilirajuće magnetsko polje i dr. Upravo je primjenom ovih tehnologija moguće postići očuvanje organoleptičkih i nutritivnih značajki na dulji rok uz zajamčenu sigurnost proizvoda.² Razvoj i primjena novih netermičkih metoda obrade hrane, među kojima prednjači metoda primjene visokog hidrostatskog tlaka, predstavlja velik izazov upravo za one segmente prehrambene industrije koji žele osvojiti i zadržati poziciju na tržištu te se usmjeriti na proizvodnju i plasman hrane prema kojoj potrošači imaju pozitivan stav te ju traže i cijene.³

Princip djelovanja visokog tlaka

Postupci obrade hrane visokim hidrostatskim tlakom podrazumijevaju podvrgavanje tekuće ili čvrste hrane, s ambalažom ili bez nje, djelovanju tlaka od 100 do 800 MPa (1200 MPa). Temperatura obrade može se kretati od ispod 0 °C do iznad 100 °C, a vrijeme izloženosti djelovanju tlaka može varirati od nekoliko sekundi do preko 20 minuta.⁴

Kao posljedica djelovanja visokog tlaka dolazi do smanjenja obujma sustava na koji se tlak primjenjuje. Sukladno *Le Chatelier-Braunovom* zakonu, u uvjetima ravnoteže, zbog djelovanja povišenog tlaka na zatvoreni sustav bit će pospešene one reakcije koje vode smanjenju obujma, dok će nasuprot tome one reakcije koje vode povećanju obujma sustava biti potisnute.⁵ Upravo su zbog ovog fenomena nekovalentne kemijske veze (vodikove, ionske i hidrofobne) osjetljive na djelovanje visokog tlaka dok su nasuprot tome kovalentne veze neosjetljive na djelovanje tlaka. Posljedično, komponente hrane velike molekulske mase u kojima je tercijarna struktura od presudne važnosti za izražavanje funkcionalnih svojstava (npr. bjelančevine, enzimi i polisaharidi) podložne su promjenama konformacije i funkcionalnih svojstava zbog tretiranja visokim tlakom. Nasuprot tome, kao glavna prednost djelovanja visokog tlaka ističe se činjenica da su komponente hrane koje su odgovorne za

*Autor za korespondenciju: dr. sc. Greta Krešić,
e-pošta: Greta.Kresic@fthm.hr

specifičnu nutritivnu vrijednost i organoleptičke značajke hrane (npr. vitamini i komponente arome), zahvaljujući malom udjelu sekundarne, tercijarne i kvaterne strukture praktički neosjetljive na djelovanje visokog tlaka.⁶

Kao termodinamička veličina, tlak može utjecati na konformaciju makromolekula, temperature faznih prijelaza vode i lipida te na kinetiku kemijskih reakcija. Mada visoki tlak ne može razoriti kemijske veze u hrani, neke reakcije koje uključuju razbijanje kemijskih veza mogu pod njegovim djelovanjem biti ubrzane ili usporene. Zbog djelovanja visokog tlaka ravnoteža kemijskih reakcija pomiče se prema "kompaktnom stanju" (stanje manjeg obujma), a brzina kemijskih reakcija se povećava ili smanjuje ovisno o tome je li "aktivacijski obujam reakcije" (razlika obujma aktivacijskog kompleksa i obujma reaktanata) pozitivan ili negativan. Energija kompresije 1 litre vode pri 400 MPa je 19,2 kJ, što je manje u usporedbi s energijom potrebnom za zagrijavanje jedne litre vode od 20 °C na 25 °C (20,9 kJ). Manja količina energije uključena u tretiranje visokim tlakom objašnjava činjenicu da su kovalentne veze manje osjetljive na djelovanje visokog tlaka u usporedbi s drugim kemijskim vezama. Dodatna pogodnost ovog postupka sa stanovišta potrošnje energije je da nakon postizanja željenog tlaka održavanje tretiranog materijala pod postignutim tlakom ne zahtijeva dodatno dovodjenje energije, a vrijeme tretiranja ne ovisi o dimenzijama uzorka.^{7,8} Jedno od najvažnijih svojstava djelovanja visokog tlaka je upravo njegovo brzo i ravnomjerno širenje kroz sustav, što posljedično minorizira utjecaj mase i geometrije uzorka koji se obrađuje. Upravo zato, namirnica koja se obrađuje zadržava svoj oblik i kod ekstremnih tlakova.

Zbog djelovanja visokog tlaka tijekom faze kompresije dolazi do povišenja temperature unutar tretiranog uzorka. Ta pojava se naziva adijabatsko zagrijavanje. Intenzitet povišenja temperature ovisi o sastavu uzorka. Za vodu i namirnice koje sadrže zamjetan udjel vode iznosi približno 3 °C/100 MPa, dok za uzorke koji sadrže veću količinu masti, povišenje temperature tijekom tretiranja može biti tri puta veće (tablica 1).

Tijekom faze kompresije također može doći do snižavanja pH ovisno o primijenjenom tlaku. Tako je primjerice pokazano sniženje pH kod tretiranja soka od jabuke za 0,2 sa svakih 100 MPa porasta tlaka.¹⁰

Namirnice koje se obrađuje visokim tlakom trebaju u prvilu biti pakirane u fleksibilnu ambalažu (vrećice ili plastične boce) koja mora imati mogućnost podnošenja otprilike 15 %-tnog smanjenja obujma u fazi kompresije te povratka u prvobitno stanje u fazi dekompresije. Kao ambalažni materijal za primjenu ove tehnologije najčešće se upotrebljavaju etilen/vinil-alkoholni kopolimer (E/VAL) i poli(vinil-alkohol) (PVAL).

Povijesni razvoj i potencijal primjene visokog tlaka u postupcima obrade hrane

Premda je činjenicu da visoki hidrostatski tlak uništava mikroorganizme i doprinosi konzerviranju hrane otkrio Hite još 1899. godine, istraživanja na tom polju su dugo vremena bila sporadična, a uključivala su dokaz o koagulaciji bjelanjka jajeta, djelovanje visokog tlaka na kazein mli-

Tablica 1 – Adijabatsko zagrijavanje tijekom kompresije različitih sustava hrane⁹

Table 1 – Adiabatic heating during compression of different food systems⁹

Hrana pri 25 °C Food at 25 °C	Porast temperature na svakih 100 MPa / °C Increase in temperature for each 100 MPa / °C
voda water	≈ 3,0
sok od naranče orange juice	≈ 3,0
pire od rajčice tomato purée	≈ 3,0
mlijeko, w(mliječna mast) = 2 % milk, w(milk fat) = 2 %	≈ 3,0
losos salmon	≈ 3,2
pileća mast chicken fat	≈ 4,5
goveđa mast beef fat	≈ 6,3
maslinovo ulje olive oil	8,7 do <6,3 ^a
sojino ulje soy oil	9,1 do <6,2 ^a

^aZamijećeno je smanjenje porasta temperature s porastom tlaka

^aDecrease in temperature increase with elevated pressure was observed

jeka i primjenu visokog tlaka u postupcima omekšavanja mesa. Razlog zastoju istraživanja uglavnom je bio nedostatak odgovarajuće opreme pa je zanimanje istraživača godinama bilo usmjereno na pronalaženje procesnih rješenja. Zanimanje znanstvene i stručne javnosti za primjenu ove tehnologije u postupcima obrade hrane ponovno je ojačalo posljednjih 20-tak godina. Buđenje zanimanja u najvećoj mjeri je posljedica uspješne primjene ove tehnologije u drugim industrijskim postupcima, kao što su: proizvodnja keramike, dobivanje različitih slitina te općenito primjena u metalurškoj i kemijskoj industriji. Upravo su saznanja o mogućnostima primjene visokog tlaka u proizvodnji polimernih spojeva (npr. polietilena male gustoće) te njegova primjena u reaktorima za proizvodnju kvarcnih kristala 1970-ih i 1980-ih godina bila glavni poticaj za eksperimentiranje s mogućnošću primjene ove tehnologije i u postupcima obrade hrane.

Prvi komercijalni prehrambeni proizvodi obrađeni ovom tehnologijom pojavili su se na tržištu 1990. godine od strane japanskog proizvođača Meidi-ya. Linija revolucionarnih proizvoda obrađenih ovom tehnologijom sastojala se od džemova, želea i voćnih umaka proizvedenih po prvi put bez primjene povišene temperature.¹¹ Ostali trenutačno komercijalno dostupni proizvodi ove tehnologije na svjetskom tržištu su: voćni sokovi, voćne pulpe, rižini kolači i sirove lignje (Japan), sokovi naranče i jabuke (Portugal i Francuska), kamenice, kuhana šunka, pire avokada, polugotova i gotova mesna jela te pire od rajčice (SAD).¹²

Zahvaljujući specifičnom principu djelovanja, ova tehnologija je komercijalno jednako primjenjiva i za tekuće i za čvrste namirnice, uz ispunjavanje važnog preduvjeta da namirnica koja se obrađuje sadrži određenu količinu vode. Primjerice, osušeni proteini, osušeni škrob ili bakterijske spore u suhom stanju su potpuno neosjetljivi na djelovanje visokog tlaka. Drugi važan preduvjet za primjenu ove tehnologije je da u teksturi hrane nisu prisutni unutarnji zračni džepovi. Biološki materijal koji sadrži zarobljeni zrak (npr. jagode) bit će smrskan djelovanjem povišenog tlaka, a suha tvar neće sadržavati dovoljnu količinu vlažnosti da bi se osiguralo antimikrobno djelovanje visokog tlaka. Ova tehnologija kao alternativa termičkoj pasterizaciji primjenjiva je za namirnice niske pH-vrijednosti u kojima preživljavanje spora ne čini tehnološki problem. U hrani male kiselosti (povrće, mlijeko ili juhe) primjena ove tehnologije s ciljem mikrobiološke stabilizacije nije moguća bez primjene povišene temperature upravo zbog nemogućnosti uništavanja spora.

Potencijal primjene visokog tlaka u komercijalne svrhe je u sljedećim područjima obrade hrane:¹³

- inaktivacija mikroorganizama i enzima
- modifikacija funkcionalnih svojstava biopolimera
- zadržavanje značajke kvalitete (boja, aroma, nutritivna vrijednost)
- postizanje funkcionalnosti prehrambenih proizvoda

Premda je tehnologija visokog hidrostatskog tlaka danas skuplja i do pet puta u usporedbi s tradicionalnom termičkom obradom (npr. sterilizacijom ili drugim postupcima termičke obrade), svoju primjenu nalazi za proizvode koji zahvaljujući dodanoj vrijednosti predstavljaju posebnu tržišnu nišu. Cijena komercijalnih uređaja kreće se od 500 000 \$ do 2 500 000 \$, ovisno o obujmu materijala koji se tretira, mogućnosti postizanja tlaka te stupnju automatizacije.¹⁴ Ovisno o veličinama postupka i opremi koja se upotrebljava, trošak obrade visokim tlakom iznosi 0,05 \$ – 0,5 \$ po litri ili kilogramu obrađene namirnice, pri čemu je najniži trošak usporediv s troškovima termičkog tretiranja.¹⁵ Visoka kapitalna ulaganja mogu se isplatiti planiranjem obrade sa što većim iskorištenjem kapaciteta, što je posebno važno kod planiranja obrade namirnica sezonskog karaktera (npr. voće i povrće).¹⁶

Neke od prednosti primjene visokog hidrostatskog tlaka u usporedbi s termičkim tretiranjem su:

- smanjenje utroška toplinske energije, jer se obrada odvija pri sobnoj temperaturi
- eliminiranje utjecaja veličine i geometrije uzorka te skraćivanje vremena tretiranja, jer je širenje tlaka ravnomjerno kroz namirnicu koja se obrađuje
- ne mijenjaju se kovalentne veze, čime ostaju sačuvane komponente arome namirnica
- obrada je ekonomična sa stanovišta potrošnje energije. U trenutku postizanja željenog tlaka, pumpa se zaustavlja, zatvaraju se ventili, a tlak unutar cilindra se održava bez potrebe za daljnjim dovodenjem energije
- postupak obrade je ekološki prihvatljiv, jer koristi samo električnu energiju te nema otpadnih produkata.

Ograničenja primjene ove tehnologije su sljedeća:

- većina namirnica obrađenih ovom tehnologijom mora se skladištiti i distribuirati na niskoj temperaturi da bi se zadržala organoleptička i nutritivna svojstva
- enzimi iz hrane i bakterijske spore su otporni na djelovanje povišenog tlaka, što zahtijeva primjenu vrlo visokih tlakova za njihovu inaktivaciju (preko 1200 MPa), čime se znatno poskupljuje cjelokupna obrada.

Uređaji za tretiranje visokim tlakom

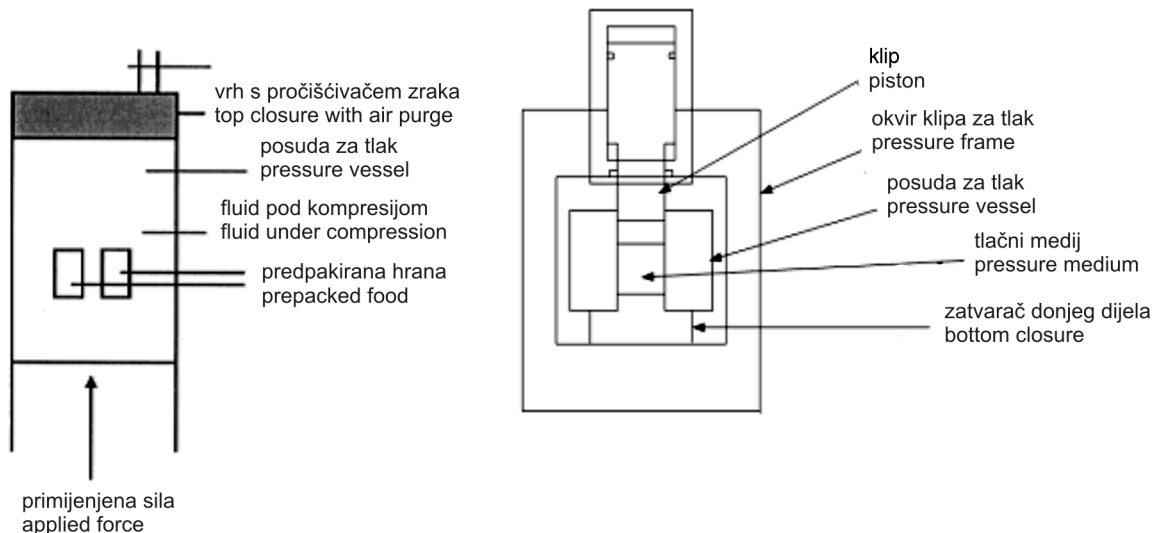
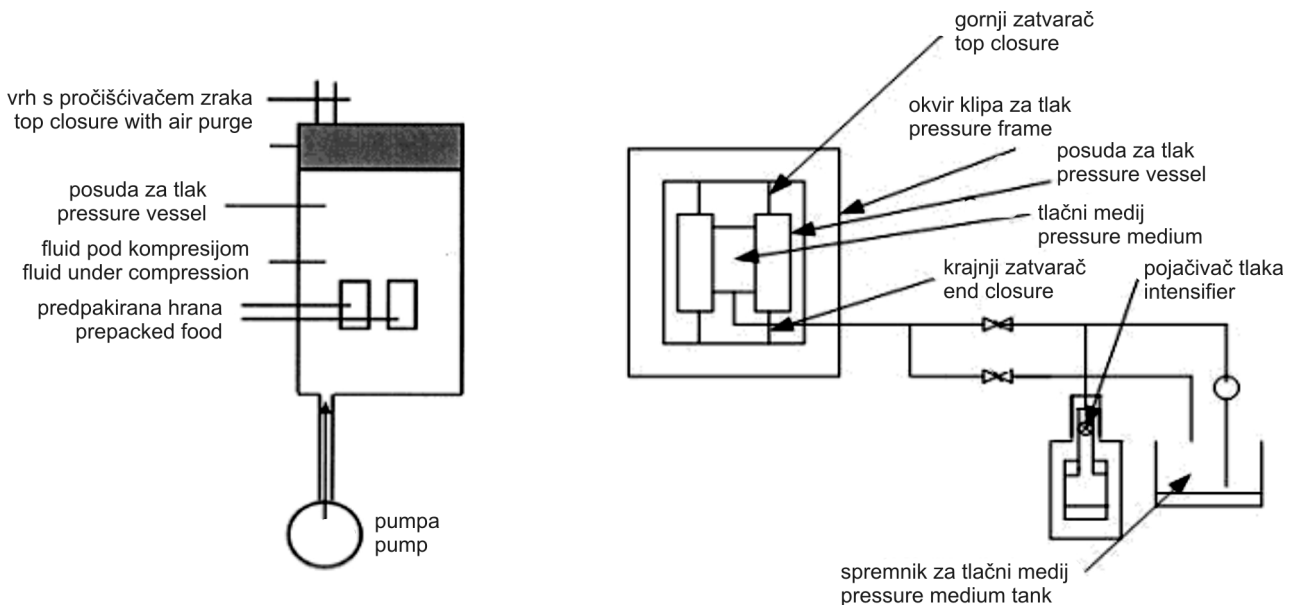
Uređaj za tretiranje visokim tlakom sastoji se od sljedećih dijelova: tlačni spremnik, uređaj za generiranje tlaka, uređaj za kontrolu postupka i rukovanje s uzorkom. Najvažniji dio uređaja je spremnik koji je obično monolitni, cilindričnog oblika izrađen od legiranog čelika koji može izdržati velika naprezanja. Debljina stijenke cilindra ujedno određuje i maksimalni radni tlak. Ovisno o unutarnjem promjeru spremnika, obično su spremnici u jednom bloku prikladni za postizanje tlakova od 400 do 900 MPa. Visoki tlak može se generirati na dva načina: izravnom i posrednom kompresijom. U uređajima s izravnom kompresijom, medij za prijenos tlaka u spremniku se komprimira pomoću klipa pokretanog niskotlačnom pumpom (slika 1). Pri posrednoj kompresiji upotrebljava se pojačivač tlaka, koji pumpa medij za prijenos tlaka iz rezervoara u zatvoreni visokotlačni spremnik (iz kojeg je prethodno uklonjen zrak) sve do postizanja željenog tlaka (slika 2). Većina industrijskih hladnih, toplih i vrućih izostatičnih sustava primjenjuje metodu posredne kompresije.¹⁷

U postupcima obrade hrane visoki tlak se može primijeniti kao šaržni (konvencionalni), polukontinuirani i kontinuirani sustav. Šaržni sustav se primjenjuje za tekuće i čvrste namirnice koje su pakirane u odgovarajuću ambalažu. Cjelokupno trajanje obrade čini zbroj trajanja sljedećih faza: punjenje spremnika tlačnim medijem i materijalom koji se tretira, zatvaranje, kompresija, zadržavanje postignutog tlaka, dekompresija, otvaranje spremnika i vađenje tretiranog materijala iz spremnika. Polukontinuirani i kontinuirani sustavi primjenjuju se za namirnice koje se mogu pumpati (npr. voćni sokovi). U takvim sustavima uzorak se pumpa u visokotlačni spremnik i komprimira upotrebom plutajućeg klipa koji odvaja proizvod od medija za prijenos tlaka.¹⁹ Nakon tretiranja proizvod se mora aseptično puniti u ambalažu.

Kao medij za prijenos tlaka u obradi hrane obično se upotrebljavaju: voda, smjesa vode i glikola, silikonska ulja, otopina natrijeva benzoata, razrijeđeni etanol ili inertni plinovi.

Mogućnosti primjene visokog tlaka u pojedinim granama prehrambene industrije

Jedan od najvećih potencijala primjene visokog tlaka u gotovo svim granama prehrambene industrije je postizanje mikrobne stabilizacije proizvoda. Pri sobnoj temperaturi, primjena visokog tlaka od 400 do 900 MPa uzrokuje inaktivaciju vegetativnih mikroorganizama, smanjuje enzimsku aktivnost uz istodobno zadržavanje sadržaja vitamina te očuvanje svojstava malih molekula odgovornih za okus i

Slika 1 – Generiranje visokog tlaka izravnom kompresijom¹⁷Fig. 1 – Direct method for generation of high isostatic pressure¹⁷Slika 2 – Generiranje visokog tlaka posrednom kompresijom¹⁷Fig. 2 – Indirect method for generation of high isostatic pressure¹⁷

boju namirnice. Tako pasterizirani proizvod ima produljenu trajnost pri temperaturi skladištenja od 4 do 6 °C.²⁰ Bakterije, kvasci i plijesni su relativno osjetljivi na djelovanje tlaka nižeg od 700 MPa, dok su bakterijske spore znatno otpornije, pa je za njihovo uništavanje nužna primjena tlaka od 900 do 1200 MPa.²¹ Visoki hidrostatski tlak uzrokuje smanjenje broja mikroorganizama mehanizmima koji uključuju: oštećivanje stanične stijenke i membrane, inhibiciju sinteze proteina, uništenje ribosoma, inaktivaciju staničnih enzima ili promjene na razini genetskog mehanizma.²² Učinkovitost mikrobne inaktivacije zbog djelovanja visokog tlaka ovisi o međudjelovanju nekoliko čimbenika kao što su:²³

- trajanje tretiranja i intenzitet primijenjenog tlaka
- vrsta mikroorganizama (gram-pozitivne bakterije su otpornije na djelovanje visokog tlaka u usporedbi s gram-negativnim bakterijama)

- temperatura tretiranja
- sastav medija koji se tretira (npr. visoka koncentracija soli ili šećera, niska aktivnost vode i ostale značajke hrane mogu znatno utjecati na osjetljivost mikroorganizama prema djelovanju visokog tlaka).

Fenomen faznog prijelaza vode pri povišenom tlaku također može imati primjenu u prehrambenoj industriji i to pri postupcima zamrzavanja i odmrzavanja hrane. Porastom tlaka dolazi do snižavanja ledišta vode s 0 °C koliko iznosi pri atmosferskom tlaku, na –21 °C pri tlaku od 210 MPa. Ukoliko se provede zamrzavanje hrane pod uvjetima povišenog tlaka, voda ostaje u tekućem stanju. Nakon otpuštanja tlaka, dolazi do brze i ravnomjerne kristalizacije vode i nastanka malih kristala leda, što pozitivno utječe na konzistenciju i teksturu proizvoda koji se tretira (adijabsko hlađenje). Taj fenomen omogućava također i skladištenje

tekućih namirnica na temperaturi ispod 0 °C u tekućem stanju.

Mada tehnologija primjene visokog tlaka još uvijek ima ograničenu komercijalnu primjenu, brojna su istraživanja usmjerena na njezino iskorištavanje u preradi mlijeka, mesa, voća i povrća.

Mogućnosti primjene visokog tlaka u preradi mlijeka

Mogućnosti primjene visokog tlaka u preradi mlijeka uključuju: postupke obrade mlijeka koji se primjenjuju pri proizvodnji različitih mliječnih proizvoda (vrhnje, jogurt, sir i dr.), mikrobnu stabilizaciju mlijeka i mliječnih proizvoda te proizvodnju mliječnih proizvoda promijenjene teksture. Primjena visokog hidrostatskog tlaka u mljekarskoj industriji istražena je najviše radi inaktivacije mikroorganizama i nativnih enzima, produljenja trajnosti sira, skraćivanja zrenja sireva na svega tri dana te, radi sprječavanja prekomjernog zakiseljavanja jogurta, produljenjem trajnosti na više od dva tjedna obradom visokim tlakom od 250 MPa u 15 min pri 4 °C.²⁴ Istraživanja o uništavanju patogenih mikroorganizama, koji mogu negativno djelovati na mikrobiološku kvalitetu mlijeka, pokazala su da je učinke visokog tlaka od 400 do 600 MPa moguće usporediti s učinkom pasterezacije na 72 °C za 15 s. Budući da je prilikom obrade mlijeka važno i zadržavanje nutritivnih značajki, pokazano je da tretiranje mlijeka na 400 MPa (za 30 min pri 25 °C) ne uzrokuje osjetan gubitak vitamina B₁ i B₆.²⁵ Enzimi mlijeka u pravilu pokazuju veliku otpornost na djelovanje povišenog tlaka. Međutim, tlak od 400 MPa pri 40 – 60 °C u 15 min smanjuje proteolitičku aktivnost uz istodobno zadržavanje ili poboljšanje organoleptičkih značajki mlijeka, pa se taj postupak može smatrati prikladnim za proizvodnju mlijeka dobrih organoleptičkih značajki uz ujedno produljenu trajnost.²⁶

Osim uništavanja nepoželjnih mikroorganizama ključni učinci koji određuju mogućnost komercijalne primjene ove tehnologije uključuju djelovanje visokog tlaka na kazeinske micelle, ravnotežu minerala i konformaciju proteina mlijeka.

Visoki tlak uzrokuje smanjenje dimenzije micela proporcionalno vremenu tretiranja i intenzitetu primijenjenog tlaka, što za posljedicu ima promjenu boje mlijeka i promijenjena svojstva grušanja mlijeka. Do promjene boje zbog djelovanja tlaka dolazi zbog smanjenja komponente L^* (svjetlina) uz istodobno povećavanje udjela žute komponente (b^*). Posljedično, dolazi do smanjenja mutnoće i promjene vizualnog izgleda mlijeka.²⁷ Kazeinske micelle se razbijaju pri tlaku višem od 200 MPa. Brzina i intenzitet razaranja rastu s porastom tlaka, što je posljedica povećane topljivosti kalcijeva fosfata. Produljenim tretiranjem na 250 – 300 MPa dolazi do udruživanja kazeinskih micela kroz hidrofobne veze. Ovaj proces se ne događa pri tlaku većem od 300 MPa, što u tako obrađenom mlijeku vodi k nastajanju malih micela. Ovako stvorene kazeinske micelle smanjenog promjera imaju bolja svojstva grušanja zahvaljujući konformacijskim promjenama i promijenjenom obliku od sferičnih prema obliku lanca ili nakupina. Općenito, većina rezultata ističe da su svojstva grušanja poboljšana nakon tretiranja tlakom od 100 do 500 MPa za 30 min, mada tlak veći od 300 MPa ujedno i produljuje vrijeme grušanja.²⁸

Zbog djelovanja visokog tlaka na mlijeko dolazi od pomaka ravnoteže minerala koja je određena topljivošću i stupnjem ionizacije mineralnih soli. Ova promjena u ravnoteži minerala usko je vezana s promjenom pH. Visoki tlak djeluje na ravnotežu minerala na dva načina: utječe na raspodjelu koloidne i difuzibilne faze te utječe na ionizaciju. Koncentracija kalcija, magnezija i fosfora u difuzibilnoj fazi povećava se nakon tretiranja tlakom od 300 MPa, ali je uočen pad vrijednosti pri tlaku od 400 MPa.²⁹

Jedna od bitnih promjena uzrokovana visokim tlakom je promjena konformacije proteinskih frakcija mlijeka. Tlak viši od 100 MPa, odnosno 400 MPa uzrokuje denaturaciju dva najvažnija proteina mlijeka: β -laktoglobulina i α -laktalbumina. Veća stabilnost α -laktalbumina pod djelovanjem tlaka objašnjava se rigidnijom molekulskom strukturom koja je posljedica prisutnosti više intramolekulskih disulfidnih mostova, kao i činjenice da β -laktoglobulin posjeduje slobodnu sulfhidrilnu skupinu koja sudjeluje u reakcijama izmjene sulfhidril-disulfid. Najveći dio denaturiranog β -laktoglobulina u mlijeku veže se na kazeinske micelle, premda manji dio ostaje vezan za globule mliječne masti. Na globule mliječne masti veže se i denaturirani oblik β -laktalbumina. Ostali proteini mlijeka denaturiraju se u znatno manjoj mjeri, tako da je pokazano da je goveđi serum albumin stabilan pri tlaku 100 – 400 MPa.²⁹ Proteini sirutke, koji se denaturiraju zbog djelovanja visokog tlaka, vežu se s modificiranim kazeinskim micelama, što ima za posljedicu postizanje agregirane forme drugačije od one koja je dobivena termičkim tretiranjem. Tretiranje visokim tlakom pospješuje kiselu koagulaciju i nastanak gela čija struktura je uvelike određena različitim veličinom micela i stupnjem denaturacije proteina sirutke.³⁰ U proizvodnji jogurta, gdje mlijeko koagulira pri višim vrijednostima pH, nastaje gel veće čvrstoće te se sinereza javlja u manjoj mjeri.^{22,24,31}

Visoki tlak uzrokuje porast pH mlijeka, skraćuje vrijeme zgrušavanja i povećava iskorištenje postupka čime ima izražen potencijal u proizvodnji sira. Mogućnosti primjene visokog tlaka kod proizvodnje sira usmjerene su na: proizvodnju sira od mlijeka obrađenog visokim tlakom, ubrzavanje zrenja sira i inaktivaciju ili smanjenje broja patogenih mikroorganizama u siru.

Tretiranje mlijeka tlakom manjim od 200 MPa nema utjecaja na nastajanje gruša, dok primjena tlaka od 300 do 400 MPa povećava prinos gruša za čak 20 % uz istodobno smanjenje gubitka proteina u sirutki i obujma sirutke.²⁹ Prinos sira tipa Cheddar (čedar) proizvedenog iz mlijeka obrađenog visokim tlakom (tri puta po 1 min na 568 MPa) veći je za 7 % u usporedbi sa sirom proizvedenim iz sirovog ili pastereziranog mlijeka. Nema razlike u okusu, ali je sir proizveden iz mlijeka tretiranog visokim tlakom mekše, kremastije konzistencije. Drugačija tekstura pripisuje se većem udjelu vode.³⁰ Mikrobiološka kvaliteta sira proizvedenog iz mlijeka obrađenog visokim tlakom (500 MPa, 15 min na 20 °C) jednaka je onoj sira proizvedenog iz pastereziranog mlijeka (72 °C u 15 s).²⁸

Za vrijeme zrenja sira udjel slobodnih masnih kiselina veći je u siru proizvedenom od mlijeka obrađenog visokim tlakom nego u siru proizvedenom od pastereziranog mlijeka. Razlog tome je veće inaktiviranje lipaze tijekom pasterezacije nego tijekom obrade visokim tlakom. Budući da je zrenje sira vrlo skup proces, komercijalno su zanimljivi postupci

koji ubrzavaju zrenje. Ubrzavanje zrenja sira pod djelovanjem visokog tlaka patentirani je postupak. Najbolji rezultati postignuti su kada su uzorci sira Cheddar izloženi tlaku od 50 MPa, za tri dana pri 25 °C. Tako obrađeni sirevi su s obzirom na udjel slobodnih aminokiselina i okus bili jednaki sirevima koji su podvrgnuti zrenju od šest mjeseci.³²

Mogućnosti primjene visokog tlaka u preradi mesa

Istraživanja utjecaja visokog tlaka na meso i mesne prerađevine usmjerena su na praćenje promjena boje, teksture, nutritivne vrijednosti i funkcionalnih svojstava važnih za komercijalnu primjenu.

Boja mesa koja se u sustavu CIELAB opisuje sljedećim značajkama: L^* (svjetlina), a^* (crvena komponenta) i b^* (žuta komponenta) zamjetno se mijenja zbog djelovanja visokog tlaka. Promjenama boje je podložnije mišićno tkivo crvenog mesa kao što su svinjetina, govedina i dr. Promjena boje mesa zbog djelovanja visokog tlaka posljedica je dviju pojava. Prvo, porast L^* vrijednosti do kojeg dolazi pri tlakovima 250 – 350 MPa, što ima za posljedicu da meso postaje svjetlije i više ružičasto. Ova promjena je posljedica denaturacije mioglobina i miofibrilarnih proteina. Druga pojava očituje se gubitkom crvene boje (smanjena a^* vrijednosti) do kojeg dolazi zbog oksidacije mioglobina pri tlakovima višim od 400 MPa. Pritom, vrijednost za b^* ostaje konstantna, a meso poprima smeđu boju. Intenzitet i pojava bilo koja od ova dva stupnja promjene boje u znatno većoj mjeri ovisi o intenzitetu primijenjenog tlaka nego o vremenu tretiranja.³³ Dok netretirani uzroci mesa tijekom skladištenja mijenjanju boju u sivo-smeđu zbog djelomične oksidacije oksimioglobina u metmioglobin, u uzorcima svježeg mesa obrađenih pri visokim tlakom od 500 MPa tijekom skladištenja nema promjene L^* , a^* i b^* vrijednosti.³⁴ Mada obrada visokim tlakom uzrokuje vidljive promjene boje sirovog mesa, nakon kuhanja razlika u boji u usporedbi s netretiranim uzorcima osjetno se gubi. Stoga postupak obrade svježeg crvenog mesa očituje prihvatljivu metodu obrade samo kada se meso nakon tretiranja još i termički obrađuje (kuha) prije plasiranja na tržište (npr. u obliku gotovih i polugotovih jela). Do opisanih neželjenih promjena boje ne dolazi ukoliko se visokim tlakom obrađuje bijelo meso ili mesne prerađevine iz skupine dimljenih proizvoda.

Kada se različito mišićno tkivo podvrgne djelovanju visokog tlaka, kao rezultat dobiva se meso promijenjene, nježnije teksture. Modifikacija teksture mesa zbog djelovanja visokog tlaka ovisi o vremenu *post mortem* kada je tlak apliciran. Ukoliko se visoki tlak primijeni u vrijeme rane faze *pre-rigor*, dolazi do kontrakcije mišića i njihovog skraćivanja za 35 – 50 %. Kada se visoki tlak primijeni u *post-rigor*-fazi, nema kontrakcije, ali su uočljive jake modifikacije strukture sarkomera. Ukoliko se meso u *pre-rigor*-fazi podvrgne djelovanju tlaka, nastala struktura će biti vrlo nježna i stisnuta, ali učinak će izostati ako se tretiranje visokim tlakom kombinira s komercijalnim postupcima zrenja mesa (npr. *post-rigor* pri niskoj temperaturi). Međutim, tako obrađeno meso je nakon kuhanja mekše, s većim udjelom vode u usporedbi s mesom koje nije tretirano visokim tlakom.³³ Činjenica da zbog djelovanja visokog tlaka meso ne postaje žilavije već mekše objašnjava se razaranjem strukture sarkomera. Učinkovitost primjene visokog tlaka u postupcima omekšavanja mesa znatno je bolja ukoliko se

postupak provodi u kombinaciji s povišenom temperaturom ili ukoliko se aplicira tlak od najmanje 500 MPa. Međutim, ovi postupci uzrokuju promjenu izgleda i boje mesa, što ih čini neprihvatljivim za crvena mesa.³⁵

Mada su dokazi o utjecaju visokog tlaka na nutritivnu vrijednost mesa ograničeni, pokazano je da visoki tlak može uzrokovati promjene na polisaharidima mesa, dok udjel vitamina i minerala ostaje nepromijenjen. Nužno je provesti istraživanja o eventualnoj modifikaciji probavljivosti proteina kao i o promjeni bioraspoloživosti nutrijenata mesa nakon obrade visokim tlakom.¹²

Za mesnu industriju od presudne su važnosti funkcionalna svojstva miofibrilarnih proteina mesa koja uključuju svojstvo vezanja vode, želiranja i emulgiranja. Visoki tlak može uzrokovati promjenu funkcionalnosti proteina mesa, što može biti zanimljivo u sustavima gdje se očekuje isticanje svojstva želiranja, bubrenja i vezanja vode te u sustavima gdje se želi postići smanjenje udjela natrija. Moguće je da tlak djeluje na razbijanje veza dvovalentih kationa (Ca^{2+} , Mg^{2+})-protein kroz pojavu elektrostrikcije. Nakon otpuštanja tlaka, vjerojatnost ponovnog stvaranja mostova je reducirana zbog promijenjene konformacije proteina radi tretiranja i dodatka NaCl. Posljedično, dolazi do povećanja sposobnosti zadržavanja vode (npr. bubrenje tkiva) i modifikacije topljivosti nakon otpuštanja tlaka.

*Martino i sur.*³⁶ su pokazali mogućnosti očuvanja strukture mesa prilikom smrzavanja pod povišenim tlakom, što se objašnjava promijenjenim faznim dijagramom vode. Postupak odmrzavanja mesa je također brži 2 – 5 puta ukoliko se provede pod povišenim tlakom u usporedbi s konvencionalnim postupcima, a na ovaj način su zadržane i poželjne organoleptičke značajke mesa.^{37,38}

Sa stanovišta mikrobne inaktivacije i postizanja sigurnosti mesa i mesnih prerađevina, a uzimajući u obzir troškove postupka, najbolji rezultati "pasterizacije" pod djelovanjem tlaka postižu se pri tlaku 400 – 600 MPa; 0 – 70 °C, 1 – 10 min. Tlak može inaktivirati i parazite prisutne u sirovom mesu (ili ribi). Primjerice, učinkovita inaktivacija *Trichinella spiralis* može se postići pri tlaku većem od 175 MPa, 10 min pri 25 °C.³⁹

Budućnost primjene tehnologije visokog tlaka u mesnoj industriji je u njegovoj kombinaciji s drugim postupcima obrade kao što je npr. prethodno pakiranje u vakuumu, zagrijavanje na umjerenim temperaturama i odgovarajuće hladno skladištenje. Ovakvi kombinirani postupci mogu se primijeniti na široku paletu mesnih proizvoda kao što su dimljeni i sušeni mesni proizvodi, gotova jela, mehanički otkošteno meso i dr.

Primjena visokog tlaka u preradi voća i povrća

Visoki tlak se u preradi voća i povrća ponajviše primjenjuje s ciljem inaktivacije mikroorganizama i enzima te produljenja stabilnosti proizvoda. Prednost ove metode u usporedbi s termičkim tretiranjem je zadržavanje boje i nutritivnih značajki specifičnih za pojedinu prerađevinu od voća ili povrća. Ispitivanja tržišta pokazala su da potrošači upravo kod odabira voćnih sokova visoko cijene očuvane nutritivne specifičnosti, što ukazuje na poticaj za uvođenje po-

stupaka obrade hrane visokim tlakom kao tehnologije orijentirane ispunjavanju zahtjeva i očekivanja potrošača.⁴⁰

Utjecaj visokog tlaka na mikrobiološku stabilnost, organoleptička i nutritivna svojstva soka od naranče predmet je velikog znanstvenog zanimanja. *Bull i sur.*⁴¹ su pokazali da se brojnost aerobnih bakterija, kvasaca i gljivica može sniziti ispod razine detekcije ako se sok tretira pri tlaku od 600 MPa, za 1 min pri 20 °C. Boja, indeks posmeđivanja, kiselost, sadržaj askorbinske kiseline i β -karotena su u tako obrađenom proizvodu ostali sačuvani tijekom skladištenja od 12 mjeseci pri 4 i 10 °C. Zadržavanje folata u narančinom soku pokazano je nakon tretiranja na 600 MPa, u 5 min pri 25 °C.⁴² Zadovoljavajuća mikrobiološka stabilnost tijekom hladnog skladištenja uz istodobno zadržavanje antioksidacijske aktivnosti, vitamina C i β -karotena, pokazana je pri tlakovima od 500 do 600 MPa, pri sobnoj temperaturi uz promjenjivo vrijeme tretiranja od 1,5 do 5 min.^{43–45} Tretiranje soka od naranče od 200 do 500 MPa nije uzrokovalo zamjetne gubitke vitamina (C, B₁, B₂, B₆ i niacina), šećera (glukoze, fruktoze, saharoze) niti organskih kiselina (jabučne i limunske).⁴⁶

Visoki tlak utječe na teksturu voća i povrća čineći ih mekšim i elastičnijim. Promjene teksture vezane su uz transformacije polimera stanične stijenke zbog enzimskih i neenzimskih reakcija.⁴⁷ Intenzitet promjene teksture ovisi o primijenjenom tlaku i vremenu tretiranja. Pri tlaku od 100 MPa, promjena teksture se odvija u dvije faze: prvo dolazi do naglog gubitka teksture zbog djelovanja tlaka, dok se struktura postupno mijenja tijekom faze zadržavanja tlaka. Povrće i voće tretirano na ovaj način je mekše i svjetlije boje u usporedbi sa sirovim. Promjene su bile najuočljivije na kruškama obrađenim tlakom od 100 MPa, dok su promjene na celeru uočene pri tlaku iznad 200 MPa. Kod većine voća i povrća postupni povratak teksture zabilježen je pri zadržavanju 30 do 60 min na tlakovima od 100 do 200 MPa.⁴⁸

Spektrofotometrijske analize su potvrdile da tretiranje visokim tlakom u pravilu ne uzrokuje zamjetne promjene boje voća i povrća. Kada se zeleno povrće obrađuje visokim tlakom i niskom temperaturom, nema promjena na klorofilu, tj. zadržana je zelena boja. Postojanost pod djelovanjem tlaka potvrđena je i za antocijan i karotene. Pigmente tvori (klorofil a i b iz brokule; likopen i β -karoten iz rajčice) i antioksidacijski kapacitet ostaju sačuvani pri tretiranju tlakom 500 – 800 MPa, pri 27 °C.⁴⁹ Općenito, do promjene boje dolazi samo u postupcima u kojima se visoki tlak kombinira s temperaturom višom od 50 °C. Međutim komponente boje voća i povrća obrađenog visokim tlakom podložne su degradacijama tijekom skladištenja. Posljedica je to nepotpune inaktivacije enzima i mikroorganizama koje mogu uzrokovati neželjene kemijske reakcije (enzimske i neenzimske) u matriksu hrane.⁵⁰ Istraživanja promjena antimutagene aktivnosti sokova voća i povrća pokazala su da visoki tlak za razliku od termičke obrade ne smanjuje antimutagena svojstva sokova od: jagode, grejpa, mrkve, špinata, kelja i cvjetače. Gubitak antimutagene aktivnosti uočen je samo kod soka rajčice pri ekstremnim tlakovima. Sva ispitivanja su provedena pri tlakovima od 400 do 800 MPa, na temperaturi 25 – 50 °C, u 10 min.⁵¹

Zaključak

Postupci obrade hrane primjenom visokog tlaka predmet su sve većeg zanimanja znanstvene i stručne javnosti i to upravo kao odgovor na trend rastućih zahtjeva potrošača za visokokvalitetnom, mikrobiološki sigurnom hranom, bez dodataka, koja im zadržane značajke kvalitete (boja, okus, nutritivni sastav, tekstura). Uništavanje mikroorganizama i inaktivacija enzima na niskim ili umjerenim temperaturama bez promjene organoleptičkih i nutritivnih svojstava pokazuje da visoki tlak ima mogućnost primjene u razvoju nove generacije proizvoda. Osim inaktivacije mikroorganizama i enzima, visoki tlak ima potencijal primjene u modifikaciji funkcionalnih svojstava biopolimera te postizanju funkcionalnosti proizvoda. U skladu s principima djelovanja visokog tlaka, upravo su komponente hrane velike molekulske mase podložne promjenama konformacije i funkcionalnih svojstava. Nasuprot tome, kao jedna od bitnih prednosti ove tehnologije ističe se neosjetljivost malih molekula, koje su odgovorne za organoleptičke značajke, na djelovanje visokog tlaka, što doprinosi postizanju poželjnih atributa za potrošače.

Mada visoka inicijalna kapitalna ulaganja mogu činiti ograničenje primjene ove tehnologije, to se može vremenom ublažiti smanjenjem operativnih troškova budući da je potrošnja energije manja kod primjene visokog tlaka nego pri termičkom tretiranju. Visoki tlak iskazuje jedinu komercijalno primjenjivu alternativu termičkoj obradi mada nije realno očekivati da će ju ikad u potpunosti zamijeniti. Ipak, rezultati brojnih istraživanja pokazuju da postoji mogućnost primjene u preradi mlijeka, mesa, voća i povrća. Upravo se u tim segmentima obrade hrane u budućnosti može očekivati komercijalna primjena tehnologije visokog tlaka i to za proizvode dodane vrijednosti.

Popis simbola

List of symbols

- a^* – crveno-purpurna komponenta
– red-purple component
- b^* – žuto-plava komponenta
– yellow-blue component
- L^* – svjetloća boje
– colour lightness value

Literatura

References

1. A. E. Sloan, What consumers want – and don't want – on food and beverage labels, *Food Technol.* **57** (2003) 26–36.
2. C. P. Dunne, R. A. Kluter, Emerging non-thermal processing technologies: criteria for success, *Austr. J. Dairy Technol.* **56** (2001) 109–112.
3. M. F. Patterson, D. A. Ledward, N. Rogers, High pressure processing, u J. G. Brennan (ur.), *Food processing handbook*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Berkshire/Wokingham, 2006, str. 173–200.
4. G. Krešić, Procesiranje hrane visokim tlakom, u Z. Herceg (ur.) *Konzerviranje hrane – novi postupci*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2009., str. 108–130.

5. P. Butz, B. Tauscher, Food chemistry under high hydrostatic pressure, u N. Isaacs (ur.), High pressure, The Royal Soc. Chem., Cambridge, 1998, str. 133–144.
6. A. T. Balci, R. A. Wilbey, High pressure processing of milk the first 100 years in the development of a new technology, *Int. J. Dairy Technol.* **52** (1999) 149–155.
7. J. C. Cheftel, Effects of high hydrostatic pressure on food constituents: An overview, u C. Balny, R. Hayashi, K. Heremans, P. Masson (ur.) High pressure and biotechnology, John Libbey Eurotext, Montrouge, 1992, str. 195–208.
8. B. Taucher, Pasteurization of food by hydrostatic pressure: Chemical aspects, *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* **200** (1995) 3–13.
9. E. Ting, V. M. Balasubramaniam, Determining thermal effects in high pressure processing, *J. Food Technol.* **56** (2002) 31–35.
10. K. Heremans, The effects of high pressure on biomaterials, u M. E. G. Hendrickx, D. Knorr (ur.) Ultra high pressure treatments of foods, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2001, str. 23–51.
11. B. R. Thakur, P. E. Nelson, High pressure processing and preservation of foods, *Food Rev. Int.* **14** (1998) 427–447.
12. M. Hugas, M. Garriga, J. M. Monfort, New mild technologies in meat processing: High pressure as a model technology, *Meat Sci.* **62** (2001) 359–371.
13. D. Knorr, Novel approaches in food-processing technology: New technologies for preserving foods and modifying function, *Food Biotechnol.* **10** (1999) 485–491.
14. M. E. G. Hendrickx, D. Knorr, A. V. Loey, V. Heinz, Ultra high pressure treatments of foods, Kluwer Academic Plenum Publishers, 2005, str. 297–309.
15. V. M. Balasubramaniam, High pressure food preservation, u D. Heldman (ur.) Encyclopedia of Agriculture, Food and Biological Engineering, Marcel Dekker, Inc. New York, 2003, str. 490–496.
16. J. A. Torres, G. Velasquez, Commercial opportunities and research challenges in the high pressure processing of foods, *J. Food Eng.* **67** (2005) 95–112.
17. B. Mertens, Hydrostatic pressure treatment of food: Equipment and processing, u G. W. Gould (ur.) New methods of food preservation, Blackie, Academic and Professional. Chapman & Hall, London, 1995, str. 135–158.
18. M. Yaldagard, S. A. Mortazavi, F. Tabatabaie, The principles of ultra high pressure technology and its application in food processing/preservation: A review of microbiological and quality aspects, *Afr. J. Biotechnol.* **7** (2008) 2739–2767.
19. R. Van den Berg, H. Hoogland, H. L. M. Lelieveld, L. V. Schepdael, High pressure equipment designs for food processing applications, u M. E. G. Hendrickx and D. Knorr, (ur.) Ultra high pressure treatments of foods, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2001, str. 297–313.
20. J. C. Cheftel, High Pressure, microbial inactivation and food preservation, *Food Sci. Technol.* **1** (1995) 75–90.
21. H. Alpas, N. Kalchayanand, B. Bozoglu, Interaction of high hydrostatic pressure, pressurization temperature and pH on the death and injury of pressure-resistant and pressure-sensitive strains of foodborne pathogens, *Int. J. Food Microbiol.* **60** (2000) 33–42.
22. T. Huppertz, M. A. Smiddy, V. K. Uphadhyay, A. L. Kelly, High-pressure-induced changes in bovine milk: A review, *Int. J. Dairy Technol.* **59** (2006) 58–66.
23. D. I. Stewart, A. L. Kelly, T. P. Guinee, T. P. Beresford, High pressure processing: Review of application to cheese manufacture and ripening, *Austr. J. Dairy Technol.* **61** (2006) 170–178.
24. R. Fandino-Lopez, High pressure-induced changes in milk proteins and possible application in dairy technology, *Int. Dairy J.* **16** (2006) 1119–1131.
25. I. Sierra, V. C. Vidal, F. R. Lopez, Effects of high pressure on the vitamin B1 and B6 content of milk, *Milchwissenschaft* **55** (2000) 365–367.
26. M. R. Garcia Risco, A. Olano, M. Ramos, R. Lopez Fandino, Miscellar changes induced by high pressure. Influence in the proteolytic activity and organoleptic properties of milk, *J. Dairy Sci.* **83** (2000) 2184–2198.
27. E. C. Needs, High pressure processing of dairy products, u M. R. G. Hendrickx and D. Knorr, D. (ur.) Ultra high pressure treatment of foods, Springer, Berlin, 2002, str. 239–241.
28. M. Buffa, A. J. Trujillo, B. Guamis, Rennet coagulation properties of raw, pasteurised and high pressure treated goat milk, *Milchwissenschaft* **56** (2001) 243–246.
29. T. Huppertz, A. Kelly, P. F. Fox, Effects of high pressure on constituents and properties of milk, *Int. Dairy J.* **12** (2002) 561–572.
30. M. A. Drake, S. L. Harrison, M. Asplund, G. Barbosa-Canovas, B. G. Swanson, High pressure treatment of milk and effects on microbiological and sensory quality of Cheddar cheese, *J. Food Sci.* **62** (1997) 843–860.
31. S. G. Anema, Effect of pH and pressure treatment on the acid gelation of skim milk, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **11** (2010) 265–273.
32. H. Yokoyama, N. Sawamura, N. Motobayashi, Method for accelerating cheese ripening, *Eur. Pat. Appl.* **A1** (1992) 469–857.
33. J. C. Cheftel, J. Culioli, Effects of high pressure on meat: A review, *Meat Sci.* **46** (1997) 211–236.
34. A. Carlez, T. Veciana-Nogues, J. C. Cheftel, Changes in colour and myoglobin of minced beef meat due to the high pressure processing, *Lebensm. Wiss. Technol.* **28** (1995) 528–538.
35. A. Suzuki, M. Watanabe, K. Iwamura, Y. Ikeuchi, M. Saito, Effect of high pressure treatment on the ultrastructure and myofibrillar protein of beef skeletal muscle, *Agric Biol. Chem.* **54** (1990) 3085–3091.
36. N. Martino, L. Otero, P. D. Sanz, N. E. Zaritzky, Size and location of ice crystals in pork frozen by high-pressure-assisted freezing as compared to classical methods, *Meat Sci.* **50** (1998) 303–313.
37. E. Haack, V. Heinz, Mit Hochdruckbehandlung die Lebensmittelsicherheit verbessern, *Fleischwirtschaft* **81** (2001) 119–123.
38. Y. Zhao, R. A. Flores, D. G. Olson, High hydrostatic pressure effects on rapid thawing of frozen beef, *J. Food Sci.* **63** (1998) 272–275.
39. Y. Ohnishi, T. Ono, T. Shigehisa, Histochemical and morphological studies on *Trichinella spiralis* larvae treated with high hydrostatic pressure, *J. Parasitol.* **24** (1994) 425–427.
40. R. Deliza, A. Rosenthal, F. B. D. Abadio, C. H. O. Silva, C. Castillo, Application of high pressure technology in fruit juice processing: Benefits perceived by consumers, *J. Food Eng.* **67** (2005) 241–246.
41. M. K. Bull, K. Zerdin, E. Howe, D. Goicoechea, P. Paramanandhan, R. Stockman, J. Sellahewa, E. A. Szabo, R. L. Johnson, C. M. Stewart, The effect of high pressure processing on the microbial, physical and chemical properties of Valencia and Navel orange juice, *Innov. Food. Sci. Emerg. Technol.* **5** (2004) 135–149.
42. P. Butz, Y. Serfert, A. G. Fernandez, S. Dieterich, R. Lindauer, A. Bogner, B. Tauscher, Influence of high-pressure treatment at 25 °C and 80 °C on folates in orange juice and model media, *J. Food Sci.* **69** (2004) 117–121.

43. M. E. Parish, Orange juice quality after treatment by thermal pasteurization or isostatic high pressure, *LWT-Food Sci. Technol.* **31** (1998) 439–442.
44. A. Fernandez Garcia, P. Butz, A. Bognar, B. Tauscher, Antioxidative capacity, nutrient content and sensory quality of orange juice and an orange lemon carrot juice product after high-pressure treatment and storage in different packaging, *Eur. Food Res. Technol.* **213** (2001) 290–296.
45. C. M. Sanchez, L. Plaza, B. Ancos, M. P. Cano, Effect of high pressure processing on health promoting attributes of freshly squeezed orange juice (*Citrus sinensis* L) during chilled storage, *Eur. Food Res. Technol.* **19** (2003) 151–160.
46. G. Donsi, G. Ferrari, M. di Matteo, High pressure stabilization of orange juice: Evaluation of the effects of process conditions, *Ital. J. Food Sci.* **2** (1996) 99–106.
47. D. N. Sila, T. Duvetter, A. De Roeck, I. Verlent, C. Smout, G. K. Moates, B. P. Hills, K. K. Waldron, M. Hendrickx, A. Van Loey, Texture changes of processed fruits and vegetables: potential use of high pressure processing, *Trends Food Sci. Technol.* **19** (2008) 309–319.
48. S. Basak, H. S. Ramaswamy, Ultra high-pressure treatment of orange juice: A kinetic study on inactivation of pectin methyl esterase, *Food Res. Int.* **29** (1996) 601–607.
49. P. Butz, R. Edenharder, A. Fernandez Garcia, H. Fister, C. Merkel, B. Tauscher, Changes in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment, *Food Res. Int.* **35** (2002) 295–300.
50. I. Oey, M. Lille, A. V. Loey, M. Hendrickx, Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavor of fruit and vegetable-based food products: A review, *Trends Food Sci. Technol.* **19** (2008) 320–328.
51. P. Butz, R. Edenharder, H. Fister, B. Taucher, The influence of high pressure processing on antimutagenic activities of fruit and vegetable juices, *Food Res. Int.* **30** (1997) 287–291.

SUMMARY

Application of High Pressure in Food Processing

G. Krešić,^{a*} V. Lelas,^b A. Režek Jambrak,^b and Z. Herceg^b

In high pressure processing, foods are subjected to pressures generally in the range of 100 – 800 (1200) MPa. The processing temperature during pressure treatments can be adjusted from below 0 °C to above 100 °C, with exposure times ranging from a few seconds to 20 minutes and even longer, depending on process conditions. The effects of high pressure are system volume reduction and acceleration of reactions that lead to volume reduction. The main areas of interest regarding high-pressure processing of food include: inactivation of microorganisms, modification of biopolymers, quality retention (especially in terms of flavour and colour), and changes in product functionality. Food components responsible for the nutritive value and sensory properties of food remain unaffected by high pressure. Based on the theoretical background of high-pressure processing and taking into account its advantages and limitations, this paper aims to show its possible application in food processing. The paper gives an outline of the special equipment used in high-pressure processing. Typical high pressure equipment in which pressure can be generated either by direct or indirect compression are presented together with three major types of high pressure food processing: the conventional (batch) system, semicontinuous and continuous systems. In addition to looking at this technology's ability to inactivate microorganisms at room temperature, which makes it the ultimate alternative to thermal treatments, this paper also explores its application in dairy, meat, fruit and vegetable processing. Here presented are the effects of high-pressure treatment in milk and dairy processing on the inactivation of microorganisms and the modification of milk protein, which has a major impact on rennet coagulation and curd formation properties of treated milk. The possible application of this treatment in controlling cheese manufacture, ripening and safety is discussed. The opportunities for its application within the meat processing sector are also discussed, particularly the specific effects of high pressure on the colour, texture, nutritive value and functional properties of fresh and processed meat. This paper also considers the possibilities of implementing high-pressure technology in fruit and vegetable processing with the aim to maintain microbiological safety, nutritive value, "fresh-like" appearance and antimutagenic properties. The intention of this paper is to broaden the knowledge of experts and technologists regarding implementation possibilities of high pressure, as one of the emerging technologies in the various food-processing sectors. Given the trend of growing consumer preferences for fresh-like, additive-free and microbiologically safe food, high pressure processing is likely to find its future application in food processing for niche products with added value.

^a Faculty of Tourism and Hospitality Management, Opatija, Department of Food and Nutrition, Primorska 42, PO Box 97, 51 410 Opatija, Croatia.

^b Faculty of Food Technology and Biotechnology, Department of Food Engineering, Laboratory for Food Processing, University of Zagreb, Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb, Croatia.

Received March 1, 2010

Accepted June 28, 2010