

Princip rada i primjena visokih tlakova u prehrambenoj industriji

KUI – 24/2010
Prispjelo 25. siječnja 2010.
Prihvaćeno 24. ožujka 2010.

T. Bosiljkov,* B. Tripalo, D. Ježek, M. Brnčić i S. Karlović

Prehrambeno–biotehnološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, Zagreb, Hrvatska

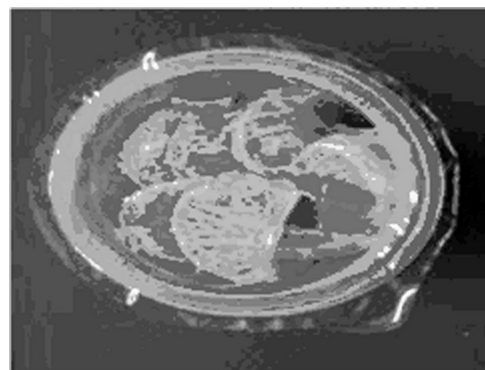
Primjena visokog tlaka kao nove netoplinke metode obrade namirnica u prehrambenoj industriji nalazi sve veću primjenu u svim fazama proizvodnje. Ova nova tehnologija doživljava svoj najveći tehnološki napredak tijekom devedesetih godina prošlog stoljeća. Glavna prednost obrade visokim tlakom u odnosu na konvencionalne metode obrade je u kraćem vremenu obrade koja se u većini slučajeva kreće u vremenskom intervalu od nekoliko sekundi do 30 minuta. Obrada čvrste ili tekuće namirnice s ambalažnim materijalom ili bez njega provodi se pri temperaturama koje su u rasponu 5 – 90 °C, pri tlakovima 50 – 1000 MPa. Tlakovi se jednoliko prenose po cijelom obujmu namirnice neovisno o njezinim dimenzijama i obliku. Sve navedene veličine procesa zajednički pridonose očuvanju karakteristika obrađenog proizvoda u smislu minimalnih promjena teksturnih, senzorskih, organoleptičkih i nutritivnih svojstava. Cilj ovoga rada je prikazati princip rada uređaja visokog tlaka i njegov učinak na široki spektar operacija u modernoj prehrambenoj industriji.

Ključne riječi: *Visoki tlak, cilindar, prehrambena tehnologija*

Uvod

Većina novijih znanstvenih istraživanja usmjerena k razvoju novih tehnika obrade hrane s ciljem unapređenja i poboljšanja tradicionalnih toplinskih procesa dovela je do razvoja niza novih netoplinskih metoda obrade namirnica. Primjena ultrazvuka visokog intenziteta, oscilirajućih magnetskih polja, pulsirajućih električnih polja, mikrovalova, pulsirajućeg svjetla, hladne plazme i visokog hidrostatskog tlaka samo su neke od postojećih tehnika kojima je zajedničko da tijekom obrade postoji potpuna kontrola temperature procesa gdje dolazi do neznatnog povišenja temperature u usporedbi s konvencionalnim toplinskim procesima. Važno je napomenuti da je vrijeme obrade vrlo kratko i iznosi najčešće od nekoliko sekundi do 30 minuta, pri čemu se izgled, aroma, okus i miris tako obrađenog proizvoda vrlo malo mijenjaju u odnosu na njegove karakteristike prije obrade.^{1,2} Nagla ekspanzija tehnologije primjene visokih tlakova počela je tijekom 1990–ih, kada tehnologija primjene visokog tlaka postaje jedna od suvremenih tehnika obrade namirnica u modernoj prehrambenoj industriji. Konvencionalne toplinske metode obrade kao što su pasterizacija i sterilizacija temelje se isključivo na povećanju mikrobiološke stabilnosti gotovog proizvoda, koji nakon obrade pokazuje osjetna odstupanja u organoleptičkim i senzorskim obilježjima.³ Obrada namirnica visokim tlakovima je nova i vrlo zanimljiva alternativna metoda koja dovodi do minimalnih promjena nutritivnih, senzorskih, organoleptičkih i teksturnih karakteristika tako obrađene namirnice (slika 1).

Prednosti utjecaja visokih tlakova uključuju povećanu sigurnost tehnološkog procesa, manji utrošak energije, veću



Slika 1 – Voće u vakuumiranoj plastičnoj ambalaži prije obrade visokim tlakom⁵

Fig. 1 – Packaging product before high-pressure processing⁵

mikrobiološku sigurnost i kao posljedicu toga povećanu dugotrajnost kao i vrijeme skladištenja tako dobivenog visokokvalitetnog gotovog proizvoda.⁴ U tablici 1 su prikazane prednosti obrade namirnica visokim tlakovima u odnosu na konvencionalne toplinske metode.

Princip obrade namirnica visokim tlakom

Postrojenja za obradu visokim tlakom prikazana na slici 2 mogu biti kontinuirana i diskontinuirana (šaržna). Diskontinuirani postupak obrade visokim tlakom najčešće se navodi pod terminom “Visoki hidrostatski tlak” (engl. “High Hydrostatic Pressure – HHP”). Utjecaj visokog tlaka koji se prenosi kroz namirnicu isključivo ovisi o obujmu radne posude i geometriji namirnice koja se obrađuje.⁶

* Autor za korespondenciju: Tomislav Bosiljkov, e-pošta: tbosilj@pbf.hr

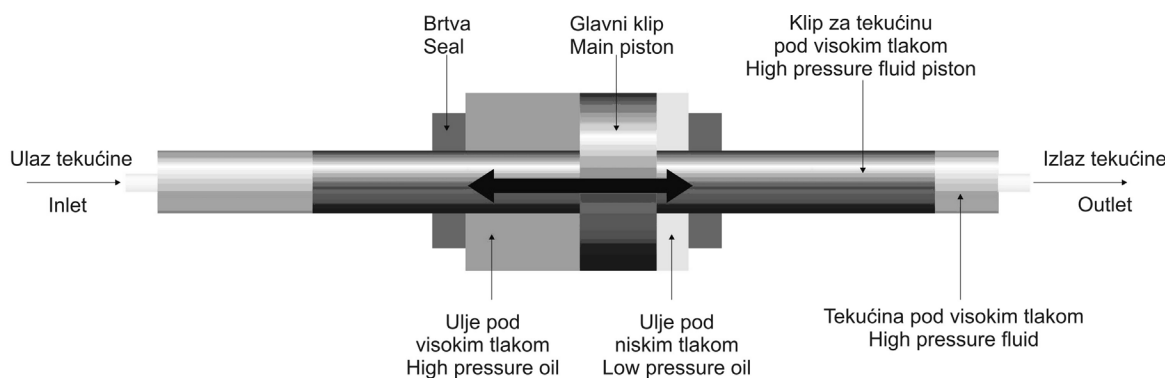
T a b l i c a 1 – Prednosti obrade namirnica visokim tlakovima u odnosu na konvencionalne toplinske metode

T a b l e 1 – Comparison of conventional heat processing and high-pressure processing methods

Obrada visokim tlakom High pressure processing	Konvencionalna toplinska obrada Conventional heat processing
Obrada pri nižim temperaturama – energetski povoljno. Low temperature processing – energy-efficient.	Zagrijavanje i brzo hlađenje namirnica – energetski nepovoljno. Warming and fast cooling of the foodstuffs – energy-intensive.
Minimalne promjene na organoleptičkim svojstvima. Dolazi do stvaranja stabilnih emulzija. Minimal changes in organoleptic properties. Stability of formed emulsion.	Izrazite promjene na organoleptičkim i teksturalnim svojstvima namirnica. Stvaranje nestabilnih emulzija zbog čega je nužan dodatak emulgatora. Significant changes in organoleptic and textural properties of the food. Instability of the formed emulsion requires addition of emulsifier.
Obraduje se ambalažni materijal, što znatno umanjuje troškove obrade. Processing is conducted in the packaging material – low cost energy treatment.	Obvezna prilagodba veličine ambalaže tijekom obrade. Adaptation of packaging size during the process.
Niska koncentracija otpadnih produkata. Low concentration of waste products.	Visoka koncentracija otpadnih produkata. High concentration of waste products.
Visokoučinkovita selektivna inaktivacija mikroorganizama tako obrađenih namirnica. Highly efficient selective inactivation of microorganisms in treated food.	U pojedinim slučajevima, potreba za dodatnim i vrlo skupim mikrobiološkim analizama. In some cases requires very expensive microbiological analysis.
Velike mogućnosti razvijanja potpuno novih prehrambenih proizvoda. Developing of brand new foodstuffs.	Modifikacija i unaprjeđenje svojstava već postojećeg proizvoda. Modification and improvement of existing foodstuffs.

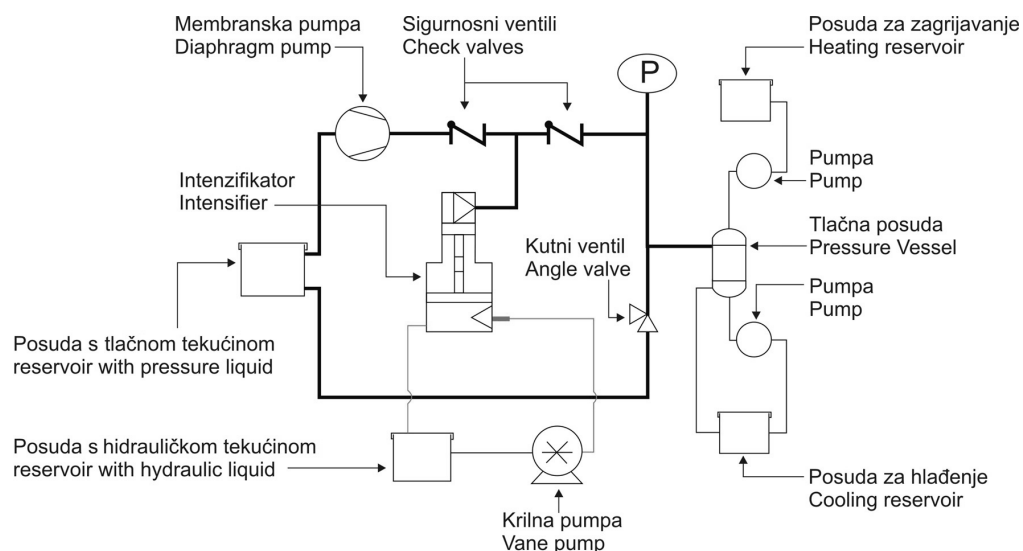
Slika 2 – Postrojenje za obradu hrane visokim tlakovima u diskontinuiranom postupku (a)⁵ i kontinuiranom postupku (b)⁵Fig. 2 – High-pressure food processing unit – discontinuous procedure (a)⁵ and continuous procedure (b)⁵

Mehanizam direktne metode obrade visokim tlakovima temelji se na principu da se ulje pod tlakom od 20 MPa dovodi na površinu klipa (omjer radne površine koji se prenosi s ulja na klip iznosi 30:1) i preko medija koji je najčešće voda, prenosi radni tlak na namirnicu koja se obrađuje (slika 3). Željenu vrijednost radnog tlaka u cilindru moguće je ostvariti i indirektnom metodom kod koje se transport već djelomično stlačene radne tekućine (voda ili smjesa vode i glikola) ostvaruje pomoću pumpe iz tzv. posude s tlačnom



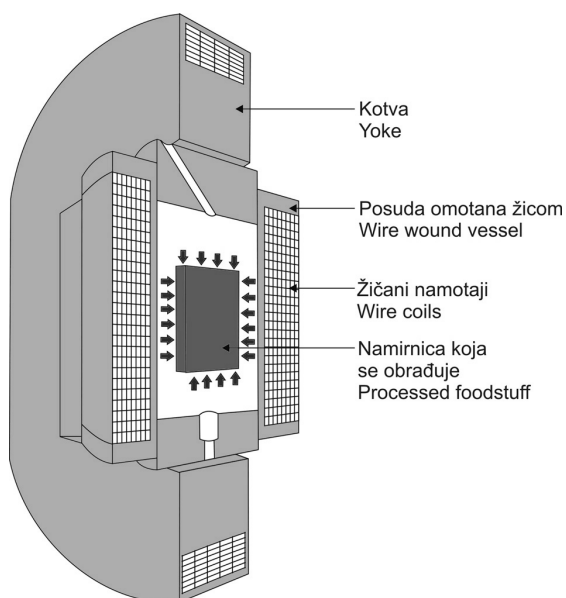
Slika 3 – Visokotlačna pumpa

Fig. 3 – High pressure pump



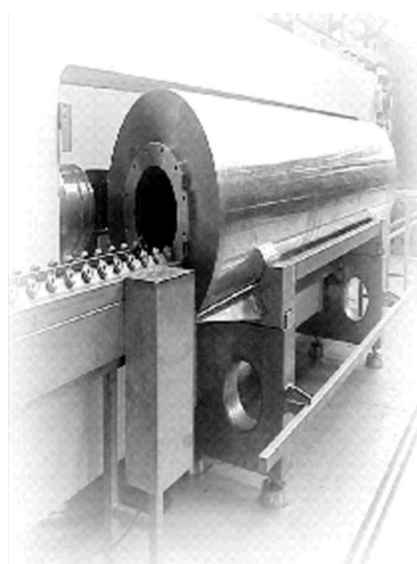
Slika 4 – Shema kontinuiranog procesa obrade visokim tlakovima

Fig. 4 – Scheme of high-pressure continuous process



Slika 5 – Tlačni cilindar sa žičnim namotajima

Fig. 5 – Wire-wound high-pressure cylinder

Slika 6 – Industrijski radni cilindar za obradu visokim tlakovima⁵Fig. 6 – Industrial high-pressure cylinder⁵

tekućinom u radni cilindar (slika 4). Nakon toga, maksimalni potrebni radni tlak, koji ovisi o vrsti namirnice i željenom učinku obrade, postiže se mehanizmom direktne metode, tj. djelovanjem klipa.⁶

Prenaprezanja uzrokovana visokim tlakovima u smislu povećanja sigurnosti tijekom postupka obrade moguće je svesti na najmanju moguću mjeru sigurnosnim namotima žice od nehrđajućeg čelika, čime se smanjuje zamor materijala uzrokovanih tlačnim ciklusima (slika 5). Namoti se postavljaju s vanjske strane tlačnog cilindra (po principu sigurnosne zavojnice), čime se osim sigurnosti, znatno povećavaju i troškovi tako konfiguriranog postupka.⁷

Kod industrijskih i laboratorijskih uređaja maksimalni radni tlak proporcionalan je obujmu radnog cilindra prikazanog na slici 6, tako da npr. maksimalni tlakovi do 400 MPa po-

državaju obujme do 25 L. Maksimalni primijenjeni tlakovi u prehrambenoj industriji tijekom obrade u rasponu su 200 – 1000 MPa s vremenom zadržavanja do 15 min što ovisi o fizikalno-kemijskim svojstvima namirnice koja se obrađuje.^{8–10}

Obrada visokim tlakovima i utjecaj na kvalitetu crvenog mesa

Najveće promjene primjenom visokih tlakova događaju se unutar molekuskog sustava obrađenog mesa što izravno utječe na njegovu boju i svojstva tijekom operacije smržavanja. Obrada mesa i mesnih proizvoda visokim tlakom obavlja se isključivo kao diskontinuirani proces. Tlačni medij je voda koja ispunjava radni cilindar u kojem se nalazi namirnica omotana plastičnom vakuumskom ambalažom.



Slika 7 – Namirnica u plastičnoj vakuumskoj ambalaži prije obrade visokim tlakovima⁵

Fig. 7 – Packaging product before high-pressure processing⁵

Tlak se povećava postupno u vrijednostima koje ne prelaze $100 - 200 \text{ MPa min}^{-1}$. U trenutku postizanja maksimalnog (radnog) tlaka, ventil se tlačnog cilindra automatski zatvara čime se tlak u cilindru održava konstantnim.⁸

Utjecaj visokih tlakova na osnovne sastojke namirnica

Utjecaj visokog tlaka temelji se na Le Chatelierovom načelu smanjenja radnog obujma kako se tlak povećava. Za vrijeme obrade, promjene obujma namirnice dovode do kemijskih reakcija koje izravno utječu na intramolekulske interakcije unutar namirnice. Najčešće dolazi do pucanja slabih vodikovih, ionskih i hidrofobnih veza, dok je učinak na jake kovalentne veze vrlo ograničen i u većini slučajeva one ostaju nepromijenjene. Najjači utjecaj visokih tlakova na sastojke mesa je na mastima, proteinima, enzimima i vodi.¹⁰ Meso i mesne proizvode karakterizira visoki udjel vode. Udjel vode u namirnici pri tlaku od 600 MPa i $22 \text{ }^\circ\text{C}$ smanjuje se za oko 15 %. Tijekom primjene visokih tlakova mora se uzeti u obzir i dio gubitaka koji se ostvaruju za savladavanje otpora koji pruža plastična vakuumska ambalaža. Bez obzira na povećanje temperature $2 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$ tijekom adijabatske kompresije za svakih 100 MPa , gubitak energije prijenosom topline između obrađene namirnice i okolne vode u cilindru, neizbježan je. Reverzibilnu disocijaciju vode uzrokovanu visokim tlakovima moguće je izazvati smanjenjem pH za 0,73 kada se tlak povećava $0,1 - 100 \text{ MPa}$.^{11,12} Struktura proteinskih lanaca, pH i temperatura okolnog medija imaju najizraženiji utjecaj na proteine mesa obrađenog visokim tlakom. Tercijarna i kvaterna struktura proteinskih lanaca mijenja se tek primjenom tlakova koji su viši od 100 MPa , dok primarna i sekundarna struktura ostaju nepromijenjene.¹³ Najizraženije promjene događaju se na endogenim enzimima mesa. Utjecaj visokih tlakova na enzimsku aktivnost je dvojak, jer enzimi reagiraju drugačijim mehanizmom nakon ekstrakcije iz namirnice, ali generalno gledajući visoki tlak učinkovito djeluje na aktiva-

ciju i inaktivaciju enzima koja ovisi isključivo o vrijednosti tlaka u cilindru.¹⁴ Zbog postmortalne glikolize nije moguće odrediti rezidualni glikogen kao jedini polisaharid mišićnog tkiva. Iz tog razloga, nakon primjene visokog tlaka nisu uočene promjene na ugljikohidratima. Posljedica utjecaja visokog tlaka na lipide je oksidacija slobodnih masnih kiselina kao i povišenje tališta.¹⁵ Promjene na boji govedeg mesa interpretiranih preko *L*, *a* i *b* vrijednosti pokazuju najveće odstupanje u povećanju svjetloće boje (eng. Lightness) *L* nakon obrade tlakom $250 - 350 \text{ MPa}$. Vrijednost *a* (plavo-zelena/crveno-purpurna komponenta; eng. *blue-green/red-purple component*) smanjuje se kada se meso izlaže tlakovima višim od $400 - 500 \text{ MPa}$, dok vrijednost *b* (žuto-plava komponenta; eng. *yellow/blue component*) ostaje nepromijenjena. Konačni proizvod postaje svijetlosmeđe boje.¹⁶

Utjecaj visokih tlakova na smrzavanje i odmrzavanje namirnica

Duboko smrzavanje pri visokim tlakovima postiže se postupnim povećanjem tlaka do 220 MPa i snižavanjem temperature od početnih $0 \text{ }^\circ\text{C}$ do konačnih $-22 \text{ }^\circ\text{C}$. Kod namirnica s velikim udjelom vode, kao što je meso, smanjenjem tlaka na atmosferski se postiže vrlo učinkovito odmrzavanje. Tehnika brzog smrzavanja dovodi do formiranja velikog broja malih kristala leda, dok sporim smrzavanjem dolazi do stvaranja manjeg broja većih kristala leda. Kod tehnike sporog smrzavanja dolazi do narušavanja teksture smrznute namirnice, čime se osim teksturnih narušavaju i organoleptička svojstva. Prednost smrzavanja visokim tlakom do 220 MPa je ta da voda u namirnici tijekom obrade ostaje u tekućem stanju. Smanjenjem tlaka se u vrlo kratkom vremenskom intervalu stvaraju vrlo mali homogeni kristali leda koji ne narušavaju teksturu namirnice.^{17,18}

Utjecaj visokih tlakova na mikroorganizme

Otpornost bakterija, enzima i toksina tijekom istraživačke faze primjene visokih tlakova proučavana je na mesu, mlijeku, voću, voćnim sokovima i povrću. Prva industrijska primjena kontinuiranog procesa obrade visokim tlakom bila je na voćnim sokovima. Kvaliteta mikrobiološke obrade ponajprije ovisi o primijenjenoj temperaturi, tlaku, trajanju obrade, vrsti mikroorganizma i uvjetima okoliša u kojima se razmnožava promatrani mikroorganizam.¹⁹ Budući da je temperatura jedan od ključnih faktora inaktivacije, iznimno je važno postavljanje temperaturnih senzora koji će u svakom trenutku prikazati vrijednosti temperature unutar same namirnice koja se obrađuje, a ne radnu temperaturu cilindra ili temperaturu okolnog medija u kojem se izvodi obrada.²⁰ Upravo iz tog razloga sve je veći interes prema razvoju i primjeni kompjutorskih simulacija i matematičkih modela koji s vrlo velikom točnošću predviđaju idealnu temperaturu obrade. *Denys i sur.*,²¹ kao i *Hartmann i sur.*²² su istražili utjecaj prijenosa topline i tvari na inaktivaciju bakterije *Escherichia coli* u pakiranom mlijeku. Dobiveni rezultati temeljeni na računalnoj simulaciji pokazali su da geometrija radnog cilindra, položaj pakiranog mlijeka unutar cilindra kao i kemijski sastav ambalažnog materijala imaju najveći utjecaj na stupanj inaktivacije. Gram-pozitiv-

ne bakterije, kao što su *Listeria monocytogenes* i *Staphylococcus aureus*, pokazuju veću otpornost na utjecaj visokih tlakova nego gram-negativne, poput *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Yersinia enterocolitica*, *Vibrio parahaemolyticus*. Vegetativne se stanice uspješno inaktiviraju već kod temperature od 23 °C i tlaka 400 – 600 MPa, za razliku od spora koje pokazuju puno veću otpornost na njegov utjecaj.²³ Stoga je potrebno primijeniti znatno ekstremnije uvjete obrade povišenjem temperature preko 70 °C i tlaka do 1000 MPa, čime se postiže visok stupanj inaktivacije izraženih većim brojem decimalnih redukcija. Primjena nižih temperatura do 40 °C i "nižih" tlakova do 250 MPa potiče inaktivaciju spora koja se zbiva u dva stupnja: prvi stupanj potiče rast i razvijanje spora, dok u drugom stupnju obrade dolazi do njihove inaktivacije. Uspješno se inaktiviraju i neke vrste parazita kao što je *Trichinella spiralis*, dok je mogućnost inaktivacije virusa visokim tlakovima vrlo ograničena.¹² Izloženost utjecaju visokog tlaka 400 – 600 MPa u vremenskom intervalu do 5 min pokazala se kao vrlo učinkovita vrijednost za inaktivaciju širokog spektra parazita i mikroorganizama čiji štetni utjecaj ima najizraženiji učinak na kvarenje namirnica.²⁴ Toplinska obrada najvažniji je korak u tehnološkom postupku obrade mlijeka s ciljem uništenja patogenih mikroorganizama. Utjecaj na prirodnu mikrofluoru mlijeka samo je jedan od nepoželjnih popratnih učinaka uzrokovanih toplinskom obradom. Najizraženije promjene vezane su uz promjenu okusa, gubitak vitamina i enzimsko posmeđivanje mlijeka (Maillardova reakcija).²⁵ Na inaktivaciju nepoželjnih mikroorganizama velik utjecaj imaju vrijednost tlaka u cilindru, vrijeme obrade i temperatura.²⁶ Produljena održivost namirnica može se postići pasterizacijom i sterilizacijom mlijeka primjenom visokog tlaka. Srednja, kratkotrajna pasterizacija mlijeka (72 °C, 15 s) osigurava trajnost ohlađenog mlijeka tijekom skladištenja do 20 dana. Visokokratkotrajna pasterizacija (89 °C, 1 s) zbog nešto više temperature obrade ima negativan utjecaj na nutritivna svojstva, ali osigurava trajnost i do 30 dana. Najbolji učinak postiže se primjenom obrade visokim tlakom od 580 MPa u trajanju 3 – 5 min pri temperaturi od 55 °C, čime se trajnost ohlađenog mlijeka produljuje i do 45 dana.^{27,28} Sterilizaciju prehrambenih proizvoda nije moguće postići primjenom tlakova nižih od 500 MPa. Iz tog je razloga najčešća industrijska primjena vezana uz tlakove 500 – 600 MPa u trajanju do 15 minuta nakon čega je obrađenu namirnicu potrebno ohladiti na odgovarajuću temperaturu skladištenja kako bi se osigurali uvjeti maksimalne održivosti gotovog proizvoda. Učinkovitost utjecaja visokih tlakova kao nove netoplinske metode može se unaprijediti u kombinaciji s drugim metodama kao što je primjena ultrazvuka visokog intenziteta, pulsnih električnih polja i pulsirajućeg svjetla.^{1,2,29} Prednost postupka oguščivanja mlijeka (proizvodnja mlijeka u prahu) visokim tlakovima u usporedbi s konvencionalnim metodama oguščivanja, kao što su dehidracija višestupanjskim isparivačkim stanicama, sušenje raspršivanjem u struji toplog zraka, vakuumsko sušenje, sušenje na valjcima, sušenje u fluidiziranom sloju itd., je u znatno nižoj temperaturi obrade, čime se osigurava veća kvaliteta gotovog proizvoda u smislu očuvanja visokonutritivnih sastojaka mlijeka kao što su mineralne tvari, masti, proteini i laktoza.^{30,31} Pri tlaku 482 – 655 MPa u vremenskom intervalu 1 – 10 min temperatura obrade iznosi samo 45 – 75 °C, dok Δt ulaznog i izlaznog zraka tijekom sušenja u fluidiziranom sloju iznosi visokih 170 °C.³²

Kontinuirani proces obrade visokim tlakovima primjenjuje se samo u postrojenjima čija je glavna primjena homogenizacija tekućih namirnica. Homogenizacija mlijeka visokim tlakovima se događa zbog visokosmičnih naprezanja koja dostižu svoj maksimum u trenutku postizanja maksimalnog tlaka (1. stupanj – kompresija). Smanjenje maksimalnog radnog tlaka na atmosferski također zamjetno utječe na smanjenje veličine masnih globula (2. stupanj – dekompresija).²⁰

Zaključci

Primjena tehnike obrade namirnica visokim tlakovima kao nove netoplinske metode u prehrambenoj industriji pokazala se kao vrlo zanimljiva i učinkovita metoda u širokom spektru svih proizvodnih faza. Namirnice obrađene visokim tlakovima zadržavaju svoja teksturna i senzorska svojstva jer se obrada vrši pri znatno nižim temperaturama i u vrlo kratkom vremenskom intervalu. Vremenom obrade od samo nekoliko sekundi postiže se minimalna degradacija osnovnih sastojaka obrađenog proizvoda čime on u potpunosti zadržava svoja funkcionalna svojstva. Takvom se obradom ne stvaraju nepoželjni kemijski spojevi i slobodni radikali. Najvišu razinu postojanosti nakon obrade zadržavaju vitamini, dok tekstura i okus proizvoda ostaju nepromijenjeni. Promatrajući obradu visokim tlakovima s energetskog stajališta, ova je tehnologija među onima s najnižim energetskim utroškom po jedinici obrađenog proizvoda u usporedbi s ostalim postojećim toplinskim i netoplinskim metodama.

Popis simbola

List of symbols

- a – plavo-zelena/crveno-purpurna komponenta
– blue-green/red-purple component
- b – žuto-plava komponenta
– yellow-blue component
- L – svjetloća boje
– colour lightness value
- ϑ, t – Celzijeva temperatura, °C
– Celsius temperature, °C

Literatura

References

1. M. Brnčić, B. Tripalo, A. Penava, D. Karlović, D. Ježek, D. Vikić Topić, S. Karlović, T. Bosiljkov, Primjena ultrazvuka visokog intenziteta pri obradi hrane, *Hrv. časopis za prehramb. tehnol., biotehnol. i nutricion.* **4** (2009) 32–37.
2. T. Bosiljkov, M. Brnčić, B. Tripalo, S. Karlović, M. Ukrainczyk, D. Ježek, S. Rimac Brnčić, Impact of ultrasound-enhanced homogenization on physical properties of soybean milk, *Chemical Engineering Transactions* **17** (2009) 1029–1034.
3. S. Ravishankar, N. Maks, *Basic Food Microbiology*, u G. Tewari and V. K. Juneja (ur.), *Advances in Thermal and Non-Thermal Food Preservation*. Blackwell Publ., New York, 2007., str. 3–35.
4. N. Datta, H. C. Deeth, *UHT and Aseptic Processing of Milk and Milk Products*, u G. Tewari and V. K. Juneja (ur.), *Advances in Thermal and Non-Thermal Food Preservation*. Blackwell Publ., New York, 2007., str. 63–91.

5. URL: <http://www.nchyperbaric.com/index.htm> (15. 12. 2008.)
6. M. F. Patterson, A. Dave, L. Rogers, N. Rogers, High pressure processing, u Brennan J. G. (ur.), *Food Processing Handbook*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2006., str. 173–188.
7. J. M. Alegre, P. Bravo, M. Preciado, M. Solaguren–Beascoa, Simulation procedure of high pressure vessels using the wire winding technique, *Eng. Fail. Anal.* **17** (2010) 61–69.
8. C. Tonello, Les e´quipements pour les traitements hautes pressions des aliments, Traitements ionisants et hautes pressions des aliments, u M. Federighi and J. L. Tholozan (ur.), Editions Polytechnica, Economica, Paris, 2001., str. 151–161.
9. D. Knorr, Advantages and limitations of non-thermal food preservation methods, u: VTT Symp. 148, *New Shelf-Life Technologies and Safety Assessments*, Technical Research Center of Finland, 1995., str. 7–12.
10. G. Tewari, High-Pressure Processing of Foods, u G. Tewari and V. K. Juneja (ur.), *Advances in Thermal and Non-Thermal Food Preservation*. Blackwell Publ., New York, 2007., str. 203–241.
11. R. Hayashi, High pressure in food processing and preservation: principle, application and development, *High Press. Res.* **7** (1991) 15–21.
12. J. C. Cheftel, E. Dumay, Les hautes pressions: principes et potentialite´s, *La conservation des aliments*, 1997., str. 195–216.
13. V. B. Galazka, I. G. Sumner, D. A. Ledward, Changes in protein-protein and protein polysaccharide interactions induced by high pressure, *Food Chem.* **57** (1996) 393–398.
14. M. Hendrickx, L. Ludikhuyze, I. Van den Broeck, C. Weemaes, Effects of high pressure on enzymes related to food quality, *Trends Food Sci. Tech.* **9** (1998) 197.
15. R. A. Lawrie, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, *Meat Sci.*, 1998., str. 336.
16. S. Jung, M. Ghoul, M. De Lamballerie–Anton, Changes in lysosomal enzyme activities and shear values of high pressure treated meat during ageing, *Meat Sci.* **56** (2000) 239.
17. P. D. Sanz, C. De Elvira, M. Martino, N. Zaritzky, L. Otero, J. A. Carrasco, Freezing rate simulation as an aid to reducing crystallization damage in foods, *Meat Sci.* **52** (1999) 275–278.
18. M. 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.
19. M. F. Patterson, M. Quinn, R. Simpson, A. Gilmour, Effects of high pressure on vegetative pathogens, u D. A. Ledward, D. E. Johnston, R. G. Earnshaw, A. P. M. Hasting (ur.), *High Pressure Processing of Foods*. Nottingham University Press, Nottingham, 1995., str. 47–63.
20. R. T. Toledo, *Fundamentals of food process engineering*, Heat transfer, Springer science + Business Media, LLC, New York, 2007., str. 223–230.
21. S. Denys, A. M. Van Loey, M. E. Hendrickx, A modeling approach for evaluation process uniformity during batch high hydrostatic pressure processing: combination of a numerical heat transfer model and enzyme inactivation kinetics, *Innov. Food Sci. Emerg.* **1** (2000) 5–19.
22. C. Hartmann Delgado, A. Szymczyk, Convective and diffusive transport effects in a high-pressure induced inactivation process of packed food, *J. Food Eng.* **59** (2003) 33–44.
23. F. Moermann, High hydrostatic pressure inactivation of vegetative microorganisms, aerobic and anaerobic spores in pork Marengo, a low acidic particulate food product, *Meat Sci.* **69** (2005) 225.
24. R. M. Uresti, G. Velazquez, J. A. Ramirez, M. Vazquez, J. A. Torres, Effect of high pressure treatments on mechanical and functional properties of restructured products, *Agriculture* **84** (2004) 41–49.
25. H. S. Ramaswamy, H. Jin, S. Zhu, Effects of fat, casein and lactose on high-pressure destruction of *Escherichia coli* K12 (ATCC – 29055) in milk, *Food Bioprod. Process.* **87** (2009) 1–6.
26. M. F. Patterson, A review – microbiology of pressure-treated foods, *J. Appl. Microbiol.* **98** (2005) 1400–1409.
27. H. Chen, D. G. Hoover, Modeling the combined effect of high hydrostatic pressure and mild heat on the inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* Scott A in whole milk, *Innov. Food Sci. Emerg.* **4** (2003) 25–34.
28. G. Tovar-Hernandez, H. R. V. Pe˜na, G. Velazquez, J. A. Ramirez, J. A. Torres, Effect of combined thermal and high pressure processing on the microbial stability of milk during refrigerated storage, in: IFT Annual Meeting. New Orleans, LA: Institute of Food Technologists, 2005.
29. J. Yuste, M. Cappellas, R. Pla, D. Y. C. Fung, M. Mor-Mur, High pressure processing for food safety and preservation: a review, *J. Rapid Meth. Aut. Mic.* **9** (2001) 1–10.
30. P. A. Vazquez-Landaverde, G. Velazquez, J. A. Torres, M. C. Qian, Quantitative determination of thermally derived volatile compounds in milk using solid-phase microextraction and gas chromatography, *J. Dairy Sci.* **88** (2005) 64–72.
31. G. Contarini, M. Povoio, R. Leardi, P. M. Toppino, Influence of heat treatment on the volatile compounds of milk, *J. Agric. Food Chem.* **45** (1997) 71–77.
32. M. Carić, Lj. Gregurek, Retrospektiva razvoja tehnologije koncentriranih i sušenih mliječnih proizvoda, *Mljekarstvo* **4** (2003) 293–307.

SUMMARY**The Working Principle and Use of High Pressures in the Food Industry***T. Bosiljkov, B. Tripalo, D. Ježek, M. Brnčić, and S. Karlović*

High pressure in the food industry, as a new non-thermal method, is applied in many phases of food processing. This new non-thermal technology was developed in the 1990s. The main advantages of high-pressure processing are in the short time of processing which is between a few seconds and 30 minutes. Processing of solid or liquid food products with or without packaging happens in the temperature interval 5 – 90 °C, and pressures 50 – 1000 MPa. The driving pressure is distributed uniformly through the whole product independently of its quantity and shape. These processing characteristics combined with improved food microbiological safety, less energy expenditure, low concentration of waste products and longer shelf life make high-pressure processing a very promising novel food technology. Combined with lower cost of treatment (but unfortunately higher initial cost of equipment) compared to traditional processing technologies, it is also economically profitable. The main purpose of such treated food products are in preservation of sensory, nutritive and textural properties. As the temperature increase is very low, there are no significant changes in sensory properties, in contrast to conventional thermal processing (sterilization, pasteurization). However, with the combination of heating or cooling and high pressure, modification of existing and creation of new food products is possible. Today, high pressure is used for the treatment of meat products (inactivation of microorganisms), freezing and defrosting of foodstuffs, production of fruit juices (pasteurization), processing of oysters, modification of milk characteristics (foaming) etc. The main purpose of this work is to present the working principle and application of high pressure in the food industry.

*Faculty of Food Technology and Biotechnology,
University of Zagreb, Pierottijeva 6,
Zagreb, Croatia*

*Received January 25, 2010
Accepted March 24, 2010*