



UNIVERZITET U NOVOM SADU
Tehnološki fakultet

**UTICAJ DODATKA BILJNIH PROTEINSKIH
KONCENTRATA U HRANU ZA ŽIVOTINJE NA
KVALITET PELETA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: Prof. dr Ljubinko Lević

Kandidat: Radmilo Čolović

Novi Sad, 2013 godine

Najiskrenije se zahvaljujem dr Jovanki Lević, na nesebičnoj i svesrdnoj pomoći i podršci, razumevanju, korisnim savetima, stručnom usmeravanju i ukazanom poverenju tokom čitavog perioda naše saradnje, kao i na tome što me je motivisala da se bavim naučnim radom.

Veliku zahvalnost dugujem i svome mentoru prof. dr Ljubinku Leviću na stručnim savetima, korisnim sugestijama i pomoći, kako tokom izrade doktorske disertacije, tako i tokom čitavog perioda naše saradnje.

Posebno se zahvaljujem dr Radetu Jovanoviću na pomoći i konstruktivnim savetima tokom izrade doktorske disertacije.

Iskreno se zahvaljujem prof. dr Nenadu Đorđeviću i docent doc. dr Bojani Ikonić na velikoj pomoći tokom izrade i pisanja teze.

Veliko hvala mojim kolegama i prijateljima dipl. inž. Đuru Vukmiroviću, Albertu Kormanjošu i doc. dr Oskaru Beri, kao i koleginicama dr Aleksandri Torbici i Jeleni Tomić na nesebičnoj i dragocenoj pomoći pruženoj u toku eksperimentalnog dela rada.

Zahvaljujem se svim kolegama iz „centra“ i sa Naučnog instituta za prehrambene tehnologije u Novom Sadu na saradnji i pomoći.

Neizmerno hvala tetki Zori i Vladu, i Ceci i Gagi, na svemu što su učinili za mene.

Najveću zahvalnost dugujem mojoj porodici, mami tati i bratu, koja mi je tokom svih ovih godina pružila ogromnu ljubav, podršku i razumevanje...

...kao i mojoj supruzi Dušici Čolović, ne samo nesebičnoj pomoći i podršci tokom izrade ove doktorske disertacije, nego na ljubavi, strpljenju i snazi koju mi pruža.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Radmilo R. Čolović, dipl.inž.
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Prof. dr Ljubinko Lević, redovni profesor
Naslov rada: NR	UTICAJ DODATKA BILJNIH PROTEINSKIH KONCENTRATA U HRANU ZA ŽIVOTINJE NA KVALITET PELETA
Jezik publikacije: JP	srpski, latinica
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2013
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Bulevar cara Lazara 1, Novi Sad

Fizički opis rada: FO	6 poglavlja, 137 strana, 17 tabela, 61 slika, 182 literaturna navoda
Naučna oblast: NO	Biotehničke nauke
Naučna disciplina: ND	Tehnologija hrane za životinje
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	hrana za životinje, peletiranje, suncokretova sačma, sojina sačma, kvalitet peleta
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta
Važna napomena: VN	
<p>Izvod: IZ</p> <p>Suncokretova sačma ima manju zastupljenost u peletiranim smešama za ishranu životinja od sojine sačme zbog većeg udela sirovih vlakana. Sirova vlakna depresivno deluju na svarljivost obroka i proizvodne rezultate, a mogu da imaju negativan uticaj na fizički kvalitet peleta. Pri peletiranju smeša za ishranu životinja u poslednje vreme značajna pažnja se posvećuje funkcionalnim promenama makronutrijenata, jer se smatra da ove promene pozitivno utiču na fizički kvalitet peleta. Razvojem modernih analitičkih tehnika, posebno termalne analize, moguće je opisati promene na skrobu u procesu peletiranja, nastale usled uticaja toplote i vlage. Sa druge strane, promene na proteinskoj komponenti u procesu peletiranja nisu dovoljno objašnjene. Najčešće se tumačenja svode na pretpostavke, bez objašnjenja o promenama u veličini molekula proteina, kao i njihovoj koncentraciji. Inovativan pristup ove doktorske disertacije je usmeren na opisivanje uticaja dodatka sojine i suncokretovih sačmi različitog sadržaja proteina u smeše na bazi kukuruza na tehnološke parametre procesa peletiranja, funkcionalne promene makronutrijenata (želatinizaciju skroba i denaturaciju i degradaciju proteina) i fizički kvalitet peleta. U okviru svake smeše takođe je ispitivan uticaj procesnih parametara, prečnika otvora sita mlina čekićara (2, 3 i 4 mm), vremena produženog kondicioniranja parom (bez produženog kondicioniranja, 5 i 10 minuta) na fizički kvalitet peleta. Istraživanja su pokazala da temperatura peletiranja, specifična potrošnja električne energije i udeo prašine u peletama</p>	

zavise od sirovinskog sastava smeša, prečnika otvora sita mlina čekićara i vremena zadržavanja u kondicioneru, pri čemu temperatura peletiranja i specifična potrošnja električne energije rastu, a udeo prašine u peletama opada sa porastom koncentracije proteina u smešama. Dokazano je i da proces peletiranja utiče na funkcionalne promene makronutrijenata, želatinizaciju skroba i strukturne promene na proteinima. Takođe je dokazano i da za optimalno vreme zadržavanja materijala u kondicioneru, smanjenje prečnika otvora sita mlina čekićara i povećanje sadržaja proteina u smešama utiču na poboljšanje fizičkog kvaliteta peleta, tj. tvrdoće peleta i stepena otiranja peleta. Optimalni uslovi procesa peletiranja određeni su metodom željene funkcije. Dat je predlog opsega procesnih parametara za dobijanje peleta minimalnog stepena otiranja uz optimalnu specifičnu potrošnju električne energije.

Istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji dala su doprinos novim saznanjima o uticaju dodatka sačme različitog sadržaja proteina (37,3, 40,3 и 42,6 %) na fizički kvalitet peleta. Kvalitet peleta sa dodatkom suncokretove sačme je poređen sa kvalitetom peleta sa dodatkom sojinom sačmom, kao i kvalitetom peleta od čistog kukuruza, u cilju objašnjenja uticaja izvora i koncentracije proteina. Ispitivanja su vršena ne samo za standardno vreme kondicioniranja, nego uz primenu najsavremenijih postupaka termičke obrade hrane za životinje, tj. uz upotrebu produženog kondicioniranja od 5 i 10 minuta. Doprinos nauci je dat i time što je pokazano da proces peletiranja utiče ne samo na denaturaciju i degradaciju proteina, nego i na njihovo povezivanje.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP	09.03.2012.
Datum odbrane: DO	

<p>Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO</p>	<p>predsednik: Prof. dr Nenad Đorđević, redovni profesor, Poljoprivredni fakultet, Beograd</p> <p>član: Prof. dr Ljubinko Lević, redovni profesor, Tehnološki fakultet, Novi Sad – mentor rada</p> <p>član: dr Jovanka Lević, naučni savetnik, Naučni Institut za prehrambene tehnologije u Novom Sadu, Novi Sad</p> <p>član: dr Bojana Ikonić, docent, Tehnološki fakultet, Novi Sad</p>
---	---

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNOLOGY**

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	Doctoral thesis
Author: AU	Radmilo R. Čolović
Mentor: MN	Prof. Ljubinko Lević, PhD, Full professor
Title: TI	The effect of addition of plant protein concentrates in animal feed on pellet quality
Language of text: LT	Serbian, latin
Language of abstract: LA	eng. / srp.
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	AP Vojvodina
Publication year: PY	2013
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Physical description: PD	6 chapters, 137 pages, 17 tables, 61 pictures, 182 references
Scientific field SF	Biotechnical sciences
Scientific discipline SD	Feed technology
Subject, Key words SKW	animal feed, pelleting, sunflower meal, soybean meal, pellet quality
UC	

Holding data: HD	
Note: N	
<p data-bbox="230 346 365 378">Abstract:</p> <p data-bbox="230 378 284 409">AB</p> <p data-bbox="230 409 1299 1690">Sunflower meal has a lesser presence in pelleted compound feed than soybean meal due to a higher proportion of raw fiber. Raw fiber has depressing effect on the digestibility and production results, and can have a negative impact on the physical quality of the pellets. Lately, considerable attention is paid to the functional changes of macronutrients in pelleting of animal feed. It is believed that these changes have a positive impact on the physical quality of the pellets. With the development of modern analytical techniques, especially the thermal analysis, it is possible to describe the changes of starch in pelleting process, caused by the impact of heat and moisture. On the other hand, changes of the protein components in the pelleting process are not sufficiently explained. The most common interpretation is reduced to the presumption, with no explanation of changes in the size of protein molecules, as well as in their concentration. The innovative approach of this dissertation is focused on describing the effect of the addition of soybean meal and sunflower meals, with different protein content, in mixtures based on corn, on the technological parameters of the pelleting process, functional changes of macronutrients (starch gelatinization, and protein denaturation and degradation), and physical quality of the pellets. Within each of the mixtures, the influence of process parameters, the diameter of the hammer mill sieve openings (2, 3 and 4 mm), duration of long term steam conditioning (without extended conditioning, 5 and 10 minutes) on the physical quality of the pellets was also investigated. Studies have shown that pelleting temperatures, the specific power consumption and the proportion of dust in pellets were dependent of composition of the mixtures, the diameter of the hammer mill sieve openings, and residence time in the conditioner. Pelleting temperature and specific power consumption increased, and the extent of fines in pellets decreased with increasing of concentration of protein in the diets. Additionally, it is proved that pelleting process affects functional changes of macronutrients, starch gelatinization and structural changes in proteins. It is also proved that for the optimal retention time of material in conditioner, decrease of diameter of the hammer mill sieve openings and increase of protein content in the diets had positive effect on the physical quality of pellets, i.e. pellet hardness and degree of abrasion of pellets. The optimum process conditions in pelleting process were determined by the method of desired function. A proposal has been made for setting the range of process parameters for obtaining the minimum degree of abrasion of pellets, with optimal specific energy consumption.</p> <p data-bbox="230 1690 1299 1892">The research within this Ph.D. thesis contributed to the knowledge about the effects of addition of sunflower meal with different protein content (37.3, 40.3 and 42.6 %) on the physical quality of the pellets. Quality of pelleted mixtures with sunflower meal added were compared with the quality of pelleted mixtures with soybean meal added and quality of pelleted corn, in order to explain the effects of starch concentration, protein concentration and protein source.</p>	

<p>Studies were performed not only for the standard time of conditioning, but with the use of modern techniques for heat treatment of animal feed, i.e. with the use of long term conditioning process for a 5 or 10 minutes. Additional contribution to science has been given with showing that the pelleting process causing not only the denaturation and degradation of proteins, but also synthesis of proteins.</p>	
Accepted on Scientific Board on: AS	09.03.2012.
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>president: Prof dr Nenad Đorđević, full professor, Faculty of Agriculture, Belgrade</p> <p>member: Prof. dr Ljubinko Lević, full professor, Faculty of Technology, Novi Sad</p> <p>member: dr Jovanka Lević, principal research fellow, Institute of Food Technology, Novi Sad</p> <p>member: dr Bojana Ikonić, assistant professor, Faculty of Technology, Novi Sad</p>

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	PREGLED LITERATURE.....	4
2.1	Peletiranje.....	4
2.2	Mehanizmi povezivanja čestica u peleti.....	7
2.3	Faktori koji utiču na fizički kvalitet peleta.....	10
2.3.1	Veličina čestica.....	10
2.3.2	Fizičko-hemijski sastav smeše.....	12
2.3.2.1	Vlaga.....	13
2.3.2.2	Skrob.....	14
2.3.2.3	Proteini.....	15
2.3.2.4	Masti.....	16
2.3.2.5	Vlakna.....	17
2.3.2.6	Prosti šećeri i neorganske materije.....	18
2.3.3	Faze tehnološkog procesa peletiranja.....	19
2.3.3.1	Predkondicioniranje.....	20
2.3.3.2	Peletiranje.....	22
2.3.3.3	Sušenje/Hlađenje.....	24
2.3.4	Funkcionalne promene makronutrijenata.....	24
2.3.4.1	Želatinizacija skroba.....	25
2.3.4.2	Denaturacija i degradacija proteina.....	26
2.4.	Izvori proteina u peletiranim smešama.....	29
2.5	Tipovi pelet presa.....	33
2.5.1	Pelet prese sa cilindričnom matricom.....	34
2.5.2	Pelet prese sa ravnom matricom.....	35
2.6.	Matematičko modelovanje procesa peletiranja.....	37
2.6.1	Spencer - Heckel-ov model.....	37
2.6.2	Walker-ov model.....	38
2.6.3	Sonnergaard-ov model.....	38
2.6.4	Modeli odzivne površine.....	39
3.	MATERIJAL I METODE.....	41
3.1	Materijal.....	41

3.2	Tehnološki proces peletiranja.....	43
3.3	Metode za fizičko-hemijske analize sirovina i peleta.....	47
3.4	Statistička obrada eksperimentalnih podataka.....	52
4.	REZULTATI I DISKUSIJA.....	55
4.1	Fizičko-hemijski i granulometrijski sastav eksperimentalnih smeša...	55
4.2	Parametri tehnološkog procesa peletiranja.....	61
4.2.1	Temperatura matrice pelet prese i temperatura peleta.....	61
4.2.2	Specifična potrošnja energije u procesu peletiranja.....	67
4.2.3	Udeo prašine u peletama.....	73
4.3	Funkcionalne promene makronutrijenata.....	77
4.3.1	Želatinizacija skroba.....	77
4.3.2	Strukturne promene proteina.....	82
4.3	Fizičke karakteristike peleta.....	95
4.3.1	Prečnik peleta.....	95
4.3.2	Tvrdoća peleta.....	97
4.3.3	Otiranje peleta.....	102
4.4	Matematičko modelovanje i optimizacija otiranja peleta.....	108
5.	ZAKLJUČCI.....	115
6.	LITERATURA.....	118

1. Uvod

Proces peletiranja praškastih materijala je danas gotovo neizbežna faza u mnogim proizvodnim pogonima u industriji hrane za životinje, prehrambenoj industriji, hemijskoj industriji, metalurgiji, energetske industriji, itd. U tehnologiji proizvodnje hrane za životinje peletiranje se prvi put uvodi početkom 20. veka. Iako ovaj tehnološki proces znatno poskupljuje postupak proizvodnje, u Evropi i Severnoj Americi danas se na tržištu preko 80 % hrane za živinu nalazi u peletiranoj formi.

Termin peletiranje označava proces aglomeracije manjih čestica u veće pod dejstvom mehaničkog tretmana, u kombinaciji sa vlagom, temperaturom i pritiskom. Peletiranje je složen tehnološki proces na koji mogu da utiču različiti faktori.

Sastav peletirane smeše prvenstveno je određen nutritivnim zahtevima životinje. Izbor sastojaka smeše je u određenoj meri fleksibilan, pa je, pre određivanja formulacije, potrebno poznavati tehnološki uticaj pojedinačnih komponenata smeše na kvalitet peleta. Ukoliko se peletira smeša čiji odabir i odnos sastojaka nije tehnološki prihvatljiv, mogu se dobiti nekvalitetne pelete sledećih karakteristika:

1. Lošeg fizičkog kvaliteta – proizvedene pelete su neotporne na mehaničke uticaje, pa prilikom njihove manipulacije dolazi do abrazije i lomljenja peleta.
2. Lošeg nutritivnog kvaliteta – stepen promena nutritivnih sastojaka peletirane smeše nije optimalan, pa se dobijaju pelete lošeg nutritivnog kvaliteta.
3. Lošeg mikrobiološkog kvaliteta – temperatura peletiranja nije dovoljno visoka za odgovarajuću redukciju broja mikroorganizama.

U smešama za ishranu monogastričnih životinja najveći udeo imaju žitarice, koje se koriste kao izvori energije. Na našem podneblju se od žitarica najčešće koristi kukuruz, kako zbog visoke svarljivosti organske materije tako i zbog velikih prinosa. Udeo kukuruza u smešama za ishranu monogastričnih životinja je preko 50 %. Sledeću grupu hraniva predstavljaju proteinska hraniva, kao što su sačme leguminoza i uljarica. Kod nas se za ishranu životinja od proteinskih hraniva najčešće koriste sojina i suncokretova sačma. Po *Pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (2010)* sojin koncentrat se definiše kao proizvod koji sadrži preko 63 %

proteina. Međutim, zbog velike koncentracije proteina u sojinoj i suncokretovoj sačmi u odnosu na ostale sirovine koji se koriste u ishrani životinja (sojina sačma sadrži od 40 do 50 % proteina, a suncokretova sačma od 33 do 48 % proteina) ove sirovine se mogu nazvati opštim imenom biljni proteinski koncentraciji.

Sojina sačma ima veću zastupljenost u smešama za ishranu životinja od suncokretove sačme, iako u Srbiji od ukupne proizvodnje sačmi većina otpada upravo na suncokretovu sačmu. Razlog za manju zastupljenost suncokretove sačme u peletiranim smešama za ishranu monogastričnih životinja je veći udeo sirovih vlakana, koja depresivno deluju na svarljivost obroka i proizvodne rezultate.

Na tehnološki proces peletiranja utiče veliki broj parametara, a prihvatljiva je ona kombinacija parametara pri kojoj se dobijaju pelete:

- dobrog izgleda (boja, tekstura, itd.);
- bez prašine;
- sa površinom bez pukotina;
- uniformne dužine;
- sa tvrdoćom i otpornošću ka mehaničkim uticajima.

Iako ne postoje opšte prihvaćene preporuke kako podesiti parametre procesa peletiranja, potrebno je znati kako variranje ovih parametara utiče na fizičko-hemijske promene sastojaka smeše koja se peletira. U poslednjoj deceniji značajna pažnja se posvećuje promenama na skrobnoj i proteinskoj komponenti u tehnološkom procesu peletiranja, jer se smatra da one imaju uticaj na kvalitet peleta. Razvojem modernih analitičkih tehnika, posebno termalne analize, u potpunosti su opisane promene na skrobu nastale usled uticaja toplote i vlage.

Sa druge strane, promene na proteinskoj komponenti u procesu peletiranja nisu dovoljno objašnjene. Najčešće se tumačenja svode na pretpostavke, bez objašnjenja o promenama u veličini molekula proteina, kao i njihovoj koncentraciji.

Osnovni cilj ove doktorske disertacije je bio ispitivanje uticaja dodatka biljnih proteinskih hraniva, suncokretove i sojine sačme, u hranu za životinje, na fizički kvalitet peleta. Drugi cilj je bio ispitivanje uticaja različitih procesnih parametara (prečnika otvora sita mlina čekićara, vremena produženog kondicioniranja parom i koncentracije proteina i sirovih vlakana u suncokretovoj sačmi) na fizički kvalitet

peleta i optimizacija tehnološkog procesa peletiranja. Treći cilj je bio ispitivanje uticaja tehnoloških parametara procesa peletiranja na funkcionalne promene makronutrijenata, želatinizaciju skroba i strukturne promene proteina.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Peletiranje

Peletiranje, tj. aglomeracija praškastih smeša, uz dodatak vode ili pare, na povišenoj temperaturi, je jedan od najčešće primenjivanih termičkih procesa za proizvodnju hrane za životinje. Uvođenje tehnološkog procesa peletiranja u proces proizvodnje hrane za životinje rezultovalo je poboljšanjem nutritivnog i fizičkog kvaliteta proizvoda u odnosu na do tada korišćene smeše za ishranu životinja u praškastoj formi. Po Behnke-u (1994) prednosti peletirane hrane u odnosu na hranu za životinje u praškastoj formi su:

- smanjenje gubitaka proizvoda;
- redukovanje selektivne ishrane životinja;
- sprečavanje naknadne segregacije (raslojavanja) proizvoda;
- povećanje konzumacije hrane;
- smanjenje konverzije hrane;
- redukovanje broja mikroorganizama;
- povećanje svarljivosti hrane;
- povećanje nasipne mase proizvoda;
- povećanje protočnosti proizvoda;
- olakšavanje transporta i skladištenja proizvoda;
- smanjenje transportnih troškova;
- omogućenje preciznog doziranja lekova;
- olakšavanje promena u sastavu smeše;
- poboljšanje senzornih osobina hrane.

Sa druge strane, proces peletiranja ima i određene nedostatke, kao što su:

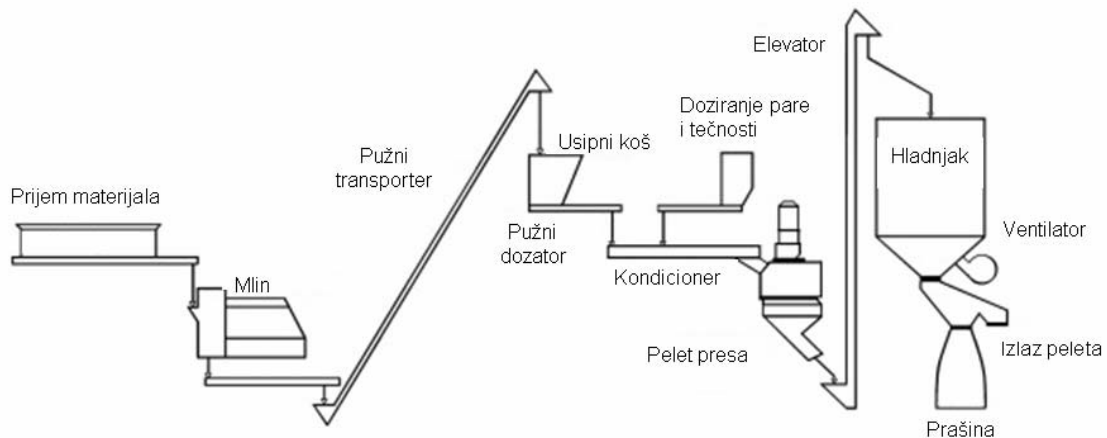
- velika investiciona ulaganja;
- povećanje troškova održavanja uređaja;

- troškovi proizvodnje i doziranja vodene pare;
- troškovi angažovanja dodatne radne snage;
- troškovi dodatnog mlevenja materijala pre procesa peletiranja;
- destrukcija termolabilnih komponenata;
- dodatno usitnjavanje čestica prilikom peletiranja;
- teškoće u usvajanju tvrdih peleta od strane mlađih kategorija životinja;
- mogućnost rekontaminacije nedovoljno osušenih peleta.

Usled termo-mehaničkog uticaja u toku procesa peletiranja može da dođe do degradacije aminokiselina, u prvom redu lizina, arginina, cisteina, serina i treonina (*Svihus and Zimonja, 2011*). Takođe, povišene temperature mogu da izazovu narušavanje trodimenzionalne strukture proteinskih molekula, pa tako u procesu peletiranja može da dođe do inaktivacije enzima. U procesu peletiranja dolazi i do degradacije vitamina, kao što su vitamin K, vitamin C i vitamin E. Kompleks vitamina B je otporniji na uticaj povišenih temperatura, mada peletiranje dovodi do redukcije piridoksina (B6) i folne kiseline (B9) u iznosu od 25 do 35 % (*Marchetti et al., 1999; Timmons, 2008*).

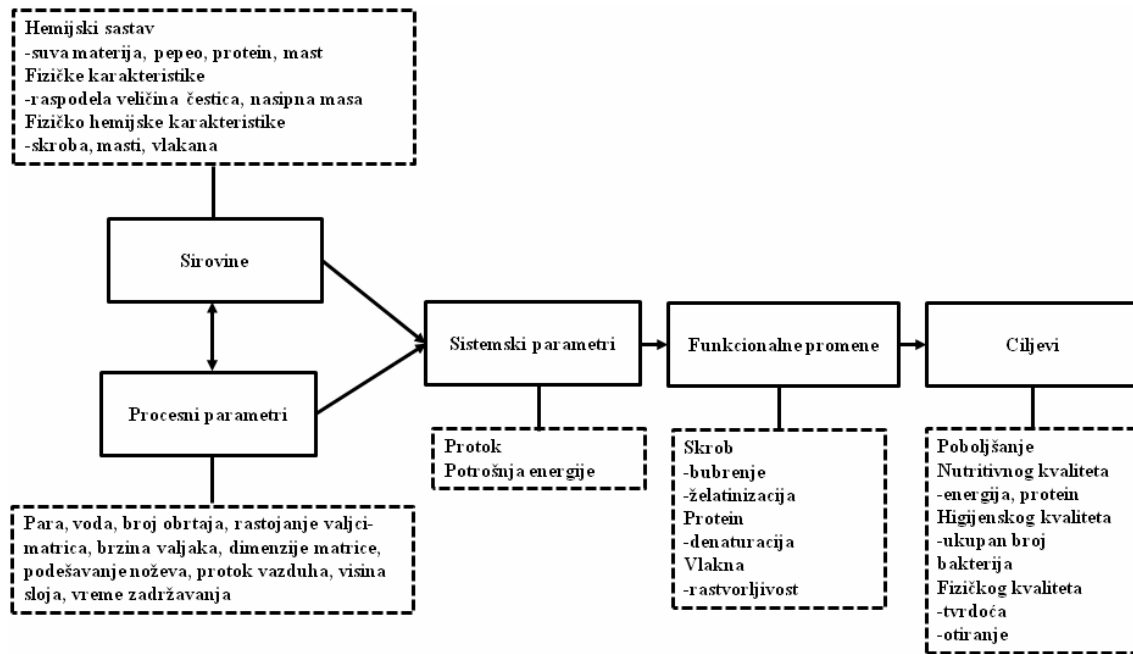
Uticaj tehnološkog procesa peletiranja na kvalitet proizvoda određen je izborom opreme, procesnim parametrima, kao i kombinacijom i redosledom procesne opreme (*Van Zuilichem and van der Poel, 1993*).

Na Slici 1 prikazan je tehnološki dijagram uobičajenog procesa proizvodnje peleta. Tehnološki proces proizvodnje peleta počinje mlevenjem pojedinačnih sirovina ili kompletnih smeša na mlinu. Samleveni materijal se transportuje do uređaja koji se naziva kondicioner, gde se u materijal dodaju vodena para i/ili voda. U ovom uređaju se mogu dodavati i drugi tipovi tečnosti. Kondicioniran materijal se zatim peletira na pelet presi. Pelete je posle izlaska iz pelet prese potrebno ohladiti, a ukoliko vlaga peleta velika, pelete se pre hlađenja potrebno osušiti. Za tu svrhu se koristi hladnjak/sušnica. Ohlađene pelete se na kraju prosejavaju, kako bi se iz njih izdvojila prašina, koja se vraća u proces na ponovnu preradu (*Behnke, 2001*).



Slika 1. Tehnološki dijagram procesa proizvodnje peleta (Caroll and Finnan, 2012)

Thomas et al. (1997) dali su šematski prikaz odnosa između karakteristika sirovina, procesnih parametara i promena u kvalitetu proizvoda (Slika 2):



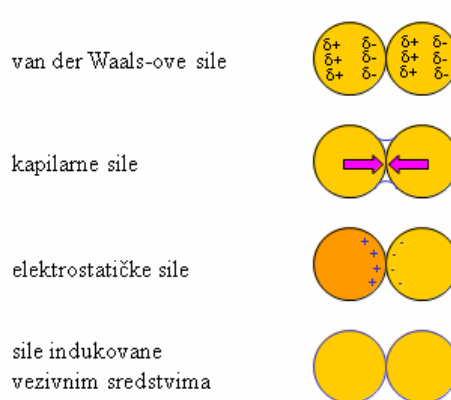
Slika 2. Šematski prikaz odnosa između karakteristika sirovina, procesnih parametara i promena u kvalitetu proizvoda.

Ovi autori su predstavili tehnološki proces peletiranja kao odnos uticaja fizičkih i hemijskih karakteristika sirovina, procesnih parametara (parametara kondicionera, pelet prese i hladnjaka/sušnice), sistemskih parametara (protoka

materijala i potrošnje energije) i funkcionalnih promena makronutrijenata (želatinizacije skroba, denaturacije proteina i rastvorljivosti vlakana) na nutritivni, higijenski i fizički kvalitet peleta. Promena svakog od ovih faktora u tehnološkom procesu peletiranja utiče na promenu kvaliteta peleta.

2.2. Mehanizmi povezivanja čestica u peleti

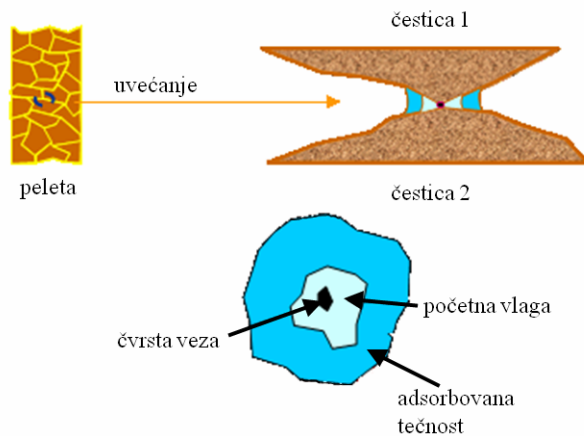
Celovitost peletiranog proizvoda zavisi od načina povezivanja čestica koje čine peletu. Po *Kirchner (2009)* povezivanje čestica u peleti ostvareno je posredstvom fizičkih i hemijskih veza (Slika 3).



Slika 3. Sile koje utiču na povezivanje čestica u peleti.

Po *Rumpf-u (1962)* i *Pietsch-u (2002)* sile koje povezuju pojedinačne čestice u peleti mogu se podeliti u pet grupa:

- čvrsto-čvrsto veze;
- sile privlačenja između čvrstih čestica;
- sile mehaničkog povezivanja;
- adhezione i kohezione sile;
- međupovršinske sile i kapilarni pritisak.



Slika 4. Vezivne sile u peleti.

Na Slici 4 dat je model na kome je prikazan način povezivanja čestica u peletu. Ova slika je grafički prikaz teorijskog pristupa *Rumpf-a (1958)*, proširenog od strane *Friedrich-a (1964)* i *Friedrich-a (1977)*, koji su opisali faktore koji utiču na nastanak pojedinih sila.

Veze tipa čvrsto-čvrsto, koje se najčešće formiraju posle sušenja/hlađenja peleta, se usled primene visokih pritisaka i temperatura, mogu obrazovati na sledeći način (*Kaliyan and Morey, 2009*):

- difuzijom molekula sa jedne na drugu stranu čestice, prema površini kontakta;
- kristalizacijom pojedinih sastojaka;
- hemijskom reakcijom;
- ukrućivanjem pomoćnih sredstava koja potpomažu povezivanje čestica;
- očvršćavanjem otopljenih komponenti.

Viskozna sredstva, koja potpomažu povezivanje čestica (kao što je melasa), stvaraju čvrsto-čvrsto veze adhezijom na površinu čestica i naknadnim očvršćavanjem posle hlađenja. Tanki adsorpcioni slojevi ovih sredstava na površini čestica su nepokretni i mogu formirati jake veze između susednih čestica ujednačavanjem nejednake površine čestica ili povećavanjem kontaktne površine između čestica (*Pietsch, 2002*).

Mehaničke sile se takođe mogu javiti u toku tehnološkog procesa peletiranja. Tokom procesa kompresije, vlakna, pljosnate čestice, kao i krupnije čestice mogu se međusobno ispreplitati, što rezultuje mehaničkim povezivanjem čestica.

Adhezione sile, tj. sile koje uzrokuju međusobnu adheziju čvrstih čestica, se javljaju ukoliko su čestice blizu jedna drugoj, dok prisustvo tečnosti, kao što je slobodna voda, uzrokuje kohezione sile između čestica (Kirchner, 2009). Adhezione sile se mogu obrazovati:

- molekulskim povezivanjem hemijskim vezama (slobodnim hemijskim vezama, vodoničnim vezama, Van der Waals-ovim vezama);
- elektrostatičkim privlačenjem;
- magnetnim privlačenjem.

Po Rumpf-u (1958) u poroznim aglomeratima, kao što su pelete, mogu se razlikovati tri faze: voda, vazduh i čestice (čvrsta faza). Ove čestice mogu se međusobno povezati preko sloja tečnosti. Sila koja povezuje čestice (Δp) može se opisati Laplasovom jednačinom:

$$\Delta p = 2 \times \left(\frac{\gamma}{r} \right) \quad /1/$$

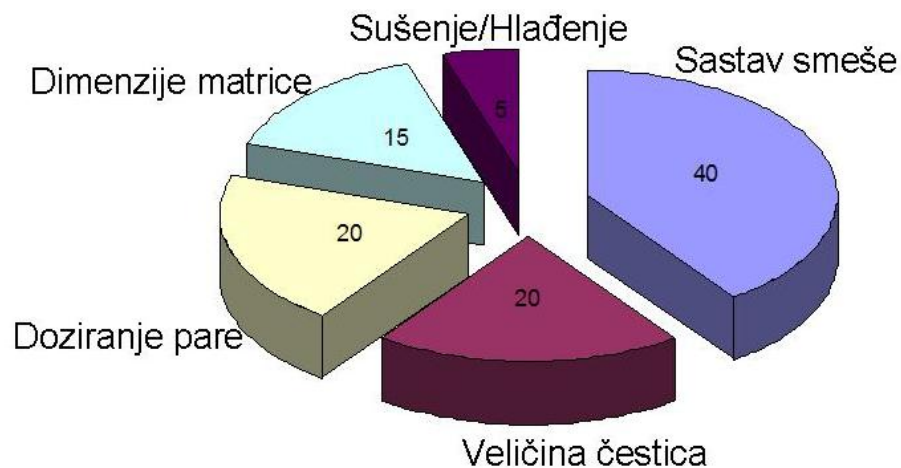
gde su:

- Δp (N) – sila koja povezuje čestice,
- γ (Nm^{-1}) – površinski napon tečnosti,
- r (m) – prečnik susedne čestice.

Ova jednačina važi za idealan slučaj kada su susedne čestice istog prečnika. Iz navedene jednačine može se zaključiti da se smanjenjem prečnika čestica povećava sila koja povezuje čestice. Ova tvrdnja je u skladu sa generalno prihvaćenim principom, da se smanjenjem veličine čestica poboljšava fizički kvalitet peleta (Payne, 1978).

2.3. Faktori koji utiču na fizički kvalitet peleta

Faktori procesa proizvodnje peleta, koji utiču na fizički kvalitet peleta su dimenzije matrice, vreme i temperatura kondicioniranja, protok, veličina čestica sastojaka smeše i sastav smeše (Slika 5). Najveći uticaj na fizički kvalitet peleta ima sastav smeše (čak 40 %), dok najmanji uticaj ima tehnološka operacija sušenja/hlađenja peleta (5 %) (Reimer, 1992).



Slika 5. Uticaj pojedinih faktora na fizički kvalitet peleta.

2.3.1. Veličina čestica

Oblik i veličina čestica komponenata koje ulaze u sastav smeša za ishranu životinja zavise od upotrebljenog uređaja za mlevenje. Mnogi autori ističu da se struktura mliva može povezati kako sa nutritivnim, tako i sa fizičkim kvalitetom peleta. Stoga je bitno da se parametri procesa mlevenja podese tako da se dobije proizvod željenih fizičkih karakteristika. Za mlevenje komponenata smeše koja se peletira koriste se mlinovi čekićari i mlinovi sa valjcima (Hamilton and Kennie, 1997; Heimann, 2002; Amerah et al., 2011).

U tehnologiji hrane za životinje za mlevenje sirovina najčešće se koriste mlinovi čekićari. Pri upotrebi mlinova čekićara dobija se veći udeo sitnijih čestica, kao i šira raspodela veličina čestica, u poređenju sa mlinovima sa valjcima (Svihus et

al., 2004). Veći udeo sitnijih čestica omogućava bolje povezivanje čestica u peleti zbog veće specifične površine čestica (odnos površine i zapremine čestica), odnosno veće površine kontakta između čestica u peleti. Takve pelete obično imaju niže vrednosti abrazije, jer su čestice u njima bolje povezane. U praksi se najčešće koriste mlinovi čekićari sa promerom otvora sita u opsegu od 3 do 4,5 mm (Koch, 2002; Kaliyan and Morey, 2009). Sa druge strane, za dobijanje finijeg mliva potrebna je veća potrošnja energije u procesu mlevenja, a takođe finije mlivo uzrokuje veće trenje u kanalima matrice pelet prese (Stelte et al., 2011; Reece et al., 1986a).

Osim mlinova čekićara, za mlevenje komponenata smeše koja se peletira koriste se i mlinovi sa valjcima. Njihova glavna prednost u odnosu na mlinove čekićare je to što imaju manju potrošnju energije za istu količinu materijala i razvijaju manje prašine pri mlevenju, dok je nedostatak ovih mlinova nemogućnost dovoljnog usitnjavanja vlaknastih materijala (Löwe, 2009).

Stevens (1987) je ispitivao uticaj veličine čestica na fizički kvalitet peleta. Pri upotrebi smeša na bazi kukuruza i soje nije primećen uticaj veličine čestica na kvalitet peleta. Kada je kukuruz zamenjen pšenicom, pelete napravljene od smeša sa sitnijim česticama, kao i sa česticama srednje krupnoće imale su manju abraziju u odnosu na pelete od čestica veće krupnoće.

Payne (2006) je dao preporuke kakva treba da bude raspodela veličina čestica da bi se dobile kvalitetne pelete. Ove preporuke su prikazane u Tabeli 1:

Tabela 1. Preporučena raspodela veličina čestica materijala za proizvodnju kvalitetnih peleta

Veličina otvora sita (mm)	Procenat materijala zadržan na situ
3,0	do 1 %
2,0	do 5 %
1,0	oko 20 %
0,5	oko 30 %
0,25	oko 24 %
< 0,25	ne manje od 20 %

Svihus et al. (2004) poredili su fizički kvalitet peleta dobijenih iz materijala koji je samleven na mlinu čekićaru sa kvalitetom peleta dobijenih iz materijala mlevenog na mlinu sa valjcima. Parametri mlevenja (veličina otvora na situ mlina čekićara, kao i razmak između valjaka na mlinu sa valjcima) bili su podešeni tako da se dobije

mlivo sa istim geometrijskim prečnikom, a raspodela veličina čestica bila je različita. Granulometrijska analiza mliva pokazala je da se upotrebom mlina čekićara dobija veći udeo sitnijih čestica, što je bilo i očekivano. Poređenjem abrazije peleta za upotrebu različitih uređaja za mlevenje *Svihus et al. (2004)* su pokazali da se kvalitetnije pelete dobijaju sa upotrebom mlina čekićara. Poređenje tvrdoće peleta pokazalo je da nema značajne razlike u tvrdoći peleta između mlina čekićara i mlina sa valjcima.

Iako se u praksi žele dobiti što finije čestice, kako bi se izbegla pojava tzv. „slabih tačaka“ u peleti, tj. mesta na kojima bi moglo da dođe do pucanja pelete kada se upotrebljavaju komponente sa krupnijim česticama, istraživanja nekih autora pokazuju sasvim suprotno, tj. da grubo mlevenje kukuruza može pozitivno da utiče na fizički kvalitet peleta (*Reece et al., 1986b*).

Zarate et al. (2004) ispitivali su uticaj različitih tipova kukuruza na fizički kvalitet peleta. Autori su zaključili da su pelete sa voštanim kukuruzom i visokoulnim kukuruzom imale bolji kvalitet od normalnog kukuruza i kukuruza zubana. Ova poboljšanja su delom pripisana povećanju udela krupnih čestica u smeši u slučajevima kada je korišćen voštani kukuruz.

Murphy et al. (2009) ispitivali su uticaj veličine otvora sita na mlinu čekićaru na fizički kvalitet peleta za ishranu prasadi. Eksperimentalne smeše korišćene u ovom istraživanju su se razlikovale u skrobnoj komponenti (pšeinca ili sirak) i u prečniku otvora sita čekićara korišćenom za mlevenje ovih komponenti (2 i 3 mm). Kod obe žitarice abrazija (otiranje) peleta bila je veća pri upotrebi sita čekićara sa veličinom otvora sita od 2 mm. Smanjenje prečnika otvora sita mlina čekićara je kod smeša na bazi pšenice uzrokovalo smanjenje abrazije peleta za oko 3 %, dok je kod smeša na bazi sirka ovo smanjenje bilo oko 4 %.

2.3.2 Fizičko-hemijski sastav smeše

Odabir komponenti od kojih će se proizvoditi smeše za ishranu životinja zavisi od hemijskog sastava i fizičkih karakteristika tih komponenti. Pri određivanju optimalnog sastava smeše, prvenstveno se vodi računa o zadovoljenju svih nutritivnih potreba gajene životinje, uz obavezno praćenje minimalnih i maksimalnih vrednosti parametara kvaliteta i hemijskog sastava smeše, koje su propisane

Pravilnikom o kvalitetu hrane za životinje (2010). Iako su prisutna određena ograničenja, u ishrani životinja je poznata široka lepeza hraniva koje mogu da se koriste u pripremi smeša (*Dorđević and Dinić, 2011*).

Svako od hraniva ima specifičan uticaj na kvalitet peletirane smeše. Kako je već navedeno, kvalitet peleta zavisi od fizičkih karakteristika hraniva, međutim, još je veći uticaj njihovog hemijskog sastava. Konstituenti hrane za životinje sa najizraženijim uticajem na tehnološke karakteristike peletiranog proizvoda su: masti, skrob, proteini, vlakna, prosti šećeri, neorganske materije i vlaga (*Thomas et al., 1998; Behnke, 2001; Loar and Corzo, 2011*).

2.3.2.1 Vlaga

Sve komponente koje se koriste u ishrani životinja imaju određeni stepen vlažnosti. Vlažnost materijala može se naknadno povećati dodatkom vode, u procesu mešanja ili predkondicioniranja, ili dodatkom vodene pare, u procesu predkondicioniranja. Kao što je već navedeno, voda može da posredstvom kohezivnih sila poveže čestice u peleti. Prisustvo vode omogućava rastvorljivost pojedinih komponenti, kao što su mono- i disaharidi, koje imaju pozitivno dejstvo na povezivanje čestica u peleti. Voda je neophodna i za želatinizaciju skroba i denaturaciju proteina, procesa koji se povezuju sa poboljšanim kvalitetom peleta (*Fairchild and Greer, 1999; Hott et al. 2008*).

U literaturi se može pronaći čitav niz radova koji su se bavili problematikom uticaja vlage materijala na kvalitet peleta i proces peletiranja. *Buchanan and Moritz (2009)* ispitivali su uticaj povećanja vlage materijala za 2 i 4 % dodatkom vode na fizički kvalitet peleta. U oba slučaja kvalitet peleta je bio bolji u poređenju sa kontrolnim uzorkom. Sa druge strane, kapacitet pelet prese računat na suhu materiju je bio smanjen. Takođe, trenje u kanalima matrice bilo je smanjeno, što je uticalo na smanjenje temperature matrice. Ovo je primećeno i od strane *Vukmirovića et al. (2010)* koji su ispitivali uticaj dodatka vode prilikom kondicioniranja parom na tvrdoću i otiranje peleta. Povećanje vlažnosti materijala uslovalo je slabiji intenzitet otiranja peleta, a tvrdoća peleta je takođe bila manja. Potrošnja energije u procesu peletiranja se značajno smanjila povećanjem vlažnosti sa 15,97 na 19,40 %. Dalje povećanje vlage na 21,88 % nije značajno smanjilo potrošnju energije.

Jedan od efekata parnog predkondicioniranja je povećanje vlažnosti materijala, koje dalje direktno ili indirektno utiče na povezivanje čestica u peleti, kao i na potrošnju energije u procesu peletiranja. *Lucht (2009)* je izveo empirijski proračun po kome se može predvideti vlaga materijala u zavisnosti od temperature materijala u procesu kondicioniranja parom. Po njemu se za svako povećanje temperature od 10°C vlažnost materijala poveća za 0,7 %.

Fairchild and Greer (1999) su dodavali vodu i vodenu paru u smešu na bazi kukuruza i sojine sačme. Dodatkom vode, vlaga smeše je bila podešena na 12, 13, 13, 14,5 i 15 %. Ovi autori su pokazali da je uticaj dodatka vode na poboljšanje fizičkog kvaliteta peleta bilo dvostruko veće u poređenju sa dodatkom vodene pare. Dodatak vode uticao je i na smanjenje potrošnje električne energije prilikom peletiranja, usled smanjenja trenja između peletirane smeše i zidova kanala matrice pelet prese.

Lundblad et al. (2009) su zapazili slične efekte dodatkom vode u glavnu mešalicu prilikom peletiranja hrane za prasid. U ovom istraživanju peletirane su dve različite smeše. Smeša 1 je napravljena na bazi ječma, ovsa i sojine sačme, dok je smeša 2 napravljena na bazi kukuruza i sojine sačme. U smešu 1 je u mešalicu (pre kondicioniranja parom i peletiranja) dodato 120 g vode/kg peletiranog materijala. Dodatak vode u glavnu mešalicu doveo je do poboljšanja PDI (indeksa trajnosti peleta, eng. *pellet durability index*) za 10-15 % i čvrstoću peleta za 15 %. U smešu 2 je na isti način dodato 30 g vode/kg peletiranog materijala, pri čemu je PDI povećan za 5-8 %.

2.3.2.2 Skrob

Skrob je glavni sastojak žitarica i izvor energije koja je neophodna za normalno funkcionisanje životinjskog organizma. Skrob se sastoji od smeše dva polisaharida: amiloze i amilopektina. Amiloza je linearna frakcija skroba koja se sastoji od molekula α -D-glukoze povezanih α -1,4-glikozidnim vezama. Amilopektin, je visokorazgranati polisaharid čiji su linearni makromolekularni polimeri α -D-glukoze povezani sa α -1,6-glikozidnim vezama (*Radosavljević et al., 2009*).

Skrob se u biljkama nalazi u obliku granula. Na povišenoj temperaturi i pri dovoljnoj vlazi materijala dolazi do želatinizacije skroba. Hlađenjem želatiniziranog skroba uspostavljaju se nove veze, što potpomaže povezivanje čestica i pozitivno

utiče na fizički kvalitet peleta. Uz denaturaciju proteina, želatinizacija skroba je opšte prihvaćena kao jedna od reakcija koja poboljšava kvalitet peleta (*Maier et al., 1999*). Preduslov za proces želatinizacije je prisustvo vode. Po Lund-u (1984), za potpunu želatinizaciju potrebno je 300 g vode po 1000 g skrobne sirovine. Kako je u procesu peletiranja vlažnost materijala mnogo manja od pomenute vrednosti (od 2 do 4 % u obliku pare), želatinizacija skroba je upitna.

Do želatinizacije skroba može da dođe u kondicioneru i posle toga u samoj pelet presi, ili se u smešu koja se peletira može dodavati već pre-želatiniziran skrob. *Wood (1987)* je pokazao da fizički kvalitet peleta zavisi od količine pre-želatiniziranog skroba dodatog u smešu, pri čemu se kvalitet peleta poboljšava sa povećanjem količine pre-želatiniziranog skroba.

Svihus et al. (2004) su određivali stepen želatinizacije skroba u peletiranoj hrani za brojlere. Autori su zaključili da je nizak sadržaj vode glavni uzrok niskog stepena želatinizacije skroba u peletiranim uzorcima i na osnovu izvršenih merenja pretpostavili da skrob nije hemijski konstituent sa najvećim uticajem na kvalitet peleta. *Gilpin et al. (2002)* su došli do negativne korelacije između stepena želatinizacije i fizičkog kvaliteta peleta, tj. povećanjem stepena želatinizacije skroba kvalitet peleta se pogoršavao.

Zimonja and Svihus (2009) su u svojim eksperimentima peletirali dve različite smeše. Jedina razlika između ovih smeša bila je to što je u jednu dodato 20 % čistog pšeničnog skroba, dok je druga smeša bila bez dodatog skroba. Autori su primetili da su pelete od smeše sa dodatim skrobom bile lošijeg kvaliteta od peleta bez dodatog skroba. Bolji kvalitet peleta od smeše bez dodatog skroba objašnjen je većim sadržajem proteina u datoj smeši.

2.3.2.3 Proteini

Proteinska makrokomponenta ima sposobnost da plasticizira u procesu proizvodnje peletirane hrane za životinje, što dovodi do poboljšanja fizičkog kvaliteta peletiranog proizvoda. Tokom procesa peletiranja kombinovano dejstvo toplote, vlage i trenja uzrokuje denaturaciju proteina, čime se poboljšavaju funkcionalna svojstva proteina, što ima pozitivan uticaj na kvalitet peleta.

Winowski je još 1988. godine izveo eksperiment u kojem je želeo da ispita uticaj koncentracije proteina na fizički kvalitet peleta. U svojim ispitivanjima,

povećavao je sadržaj proteina u smeši zamenom dela kukuruza sa pšenicom, pri čemu je, kako je i pretpostavljeno, dobijen kvalitetniji proizvod. *Buchanan and Moritz (2009)* su izveli slična istraživanja dodavajući protein u formi sojine sačme u početnu smešu, kako bi pozitivno uticali na fizički kvalitet peleta. *Briggs et al. (1999)* su takođe povećavali sadržaj proteina dodatkom sojine sačme u smeše na bazi kukuruza. Poređenjem smeša sa i bez dodatog kukuruza došli su do zaključka da povećanje koncentracije proteina u smeši pozitivno utiče na fizički kvalitet peleta. *Moran (1989)* je slične rezultate dobio dodatkom proteina iz ječma i raži, dok je *Cavalcanti (2004)* primetio negativan uticaj dodatka proteina izdvojenog iz kukuruza na fizički kvalitet peleta.

Wood (1987) je svojim rezultatima pokazao da se dodatkom sirovog proteina u smeše dobijaju kvalitetnije pelete u poređenju sa peletama od smešama u kojima je dodat denaturisan protein. Po njemu, proces peletiranja utiče na denaturaciju proteina, a, posle hlađenja peleta, veze između proteinskih molekula se ponovo uspostavljaju, čime se poboljšava fizički kvalitet peleta. Proces je daleko slabijeg intenziteta, kada se u smeše dodaje već denaturisan protein.

Prema *Howell-u (1991)*, interakcije koje mogu da utiču na mehaničku stabilnost proteina, a time i na fizički kvalitet peleta uključuju kovalentne veze, elektrostatičke interakcije, Van der Waals-ove sile, vodonične veze i entropične faktore. Promene u strukturi proteina su rezultat promene u kombinaciji ovih faktora.

2.3.2.4 Masti

Minimalan sadržaj masti u peletiranim smešama za ishranu monogastričnih životinja po *Pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (2010)* kreće se od 5 do 7 %. Povećanje sadržaja masti u smeši dovodi do narušavanja fizičkog kvaliteta peleta. Raloga za to je lubrikativni efekat masti u kanalima pelet prese, pri čemu se smanjuje trenje između smeše koja se peletira i zidova pelet prese. Usled smanjenog trenja, kompakcija čestica je slabijeg intenziteta, pa su i veze između čestica slabije. Takođe, usled smanjenja trenja dolazi i do pada temperature matrice pelet prese, pa su i fizičko-hemijske promene pojedinih makro komponenata slabije izražene (*Richardson and Day, 1976; Cavalcanti, 2004*).

Negativan uticaj dodatka masti na kvalitet peleta može se objasniti i njenim hidrofobnim osobinama. Voda i para potpomažu povezivanje pojedinačnih čestica,

kao i fizičko-hemijske promene ostalih makrokomponentata, kao što su skrob, protein i vlakna, pa bi dodatak masti mogao da ometa povezivanje komponenti rastvorljivih u vodi. Pojedini autori pokazali su da dodatak masti inhibira želatinizaciju skroba, ili je pomera ka većim temperaturama (*Salmon, 1985, Larsson, 1980*).

Catala-Gregori et al. (2009) ispitivali su uticaj dodatka masti na fizički kvalitet peleta. Ovi autori su pokazali da se kvalitet peleta povećava sa smanjenjem količine masti koje se dodaje u smešu za peletiranje. Takođe su pravljenе smeše sa istim sadržajem masti, s tim što je u pojedinim slučajevima mast u tečnom obliku dodavana naknadno na pelete. Ovakve pelete imale su bolji kvalitet u poređenju sa peletama kod kojih je mast dodavana u smešu pre peletiranja.

Sa druge strane primećeno je da dodatak masti utiče na povećanje kapaciteta pelet prese i smanjenje energije potrebne za proces peletiranja. Ovo se može povezati sa lubrikativnim efektom dodatka masti u smešu, što utiče na smanjenje trenja, a time i na smanjenje otpora pri prolasku materijala kroz kanale matrice pelet prese (*Walter, 1990*).

2.3.2.5 Vlakna

Vlakna su jedna od kompleksnijih hemijskih komponentata smeše koja se peletira. U zavisnosti od rastvorljivosti u vodi, vlakna se mogu podeliti na rastvorljiva i nerastvorljiva. Svaki od ovih tipova vlakana ima svoj uticaj na kvalitet peleta (*Frølich, 1990, Lo, 1990*).

Vlakna rastvorljiva u vodi utiču na povećanje viskoziteta hrane, što pozitivno utiče na integritet peleta. Naime, viskozni materijali mogu da oblože površinu čestica, čime se omogućuje njihovo bolje povezivanje. Međutim, stepen rastvorljivosti vlakana zavisi i od parametara procesa proizvodnje peleta, kao što su vlaga, temperatura, pritisak pare, itd. Veoma mali broj radova bavi se uticajem rastvorljivih vlakana na fizički kvalitet peleta (*Serena and Bach-Knudsen, 2007; Kaliyan and Morey, 2010*).

Sa druge strane, vlakna nerastvoljiva u vodi negativno utiču na kvalitet peleta. Ona mogu da se obaviju oko čestica i usled elastičnosti i otpora kompakciji sprečavaju njihovo povezivanje. Takođe, prisustvo krupnijih vlakana u smeši može da stvori tzv. slabe tačke u peleti, pri čemu na tim mestima dolazi do pucanja pelete (*Kaliyan and Morey, 2009*). U cilju smanjenja elastičnosti vlakana, hranivu sa visokim

sadržajem vlakana, na primer pšeničnoj slami, često se dodaju hemijski agensi, kao što su natrijum hidroksid, kalcijum dioksid ili urea. Dodatak ovih hemijskih jedinjenja razara strukturu ćelijskog zida i razdvaja lignin od celuloze, usled čega se smanjuje elastičnost vlakana i poboljšavaju fizičke karakteristike peletiranog materijala, pre svega otiranje peleta (*Thomas et al.*, 1998).

Zimonja et al. (2008) su ispitivali uticaj dodatka rastvorljivih i nerastvorljivih vlakana iz pšenice i ovsa na fizički kvalitet peleta. Dodatak fino mlevene ljuske ovsa uticao je na smanjenje stepena otiranja peleta, dok ovaj uticaj nije primećen kada je dodata grubo mlevena ljuska. Dodatak ljuske ovsa je uzrokovao povećanje tvrdoće i elastičnosti peleta.

Buchanan and Moritz (2009) su dodatkom čiste celuloze (5 %) u smešu na bazi kukuruza i sojine sačme smanjili otiranje peleta sa 18 na 11 %. Dodatak ljuske ovsa u smešu na bazi istih sirovina u iznosu od 2 i 4 % imao je negativan uticaj na fizički kvalitet peleta.

Hill and Pulkinen (1988) su u svojim eksperimentima ispitivali proces peletiranja lucerke. Povećavanjem sadržaja sirovih vlakana sa 18,5 % na 26,5 %, uspeali su da smanje otiranje peleta za oko 5 %. *Angulo et al. (1995)* su povećavanjem sadržaja sirovih vlakana takođe dobili kvalitetnije pelete.

2.3.2.6 Prosti šećeri i neorganske materije

Dodatak mono- i disaharida u čvrstoj formi u smešu koja se peletira pokazuje dvojak uticaj na proces peletiranja. S jedne strane, može da utiče na povećanu potrošnju energije pelet prese usled intenzivnijeg trenja na međupovršini smeša - površina kanala matrice, a sa druge strane dovodi do uspostavljanja čvrstih veza između čestica. Uključivanje prostih šećera u vidu dodataka kao što je na primer melasa, pokazuje pozitivan uticaj na fizički kvalitet peleta, jer usled rekristalizacije posle hlađenja peleta dolazi do uspostavljanja čvrsto-čvrsto veza između čestica, ili stvaranja staklaste strukture koja povezuje čestice (*Friedrich and Robohm, 1982; Thomas et al., 1998*).

Aumaitre et al. (1978) su ispitivali uticaj dodatka različitih količina glukoze, saharoze i melase na kvalitet peleta i nisu primetili značajnu razliku u otiranju peleta između različitih dodataka. Prema prikazanim rezultatima, tvrdoća peleta je kod svih grupa bila mala, verovatno zbog činjenice da u procesu proizvodnje peleta nije

korišćen postupak kondicioniranja parom, koji je neophodan za dovoljno rastvaranje prostih šećera. *Čolović et al. (2011)*, ispitivali su uticaj dodatka do 9 % melase šećerne repe na fizički kvalitet peleta od različitih frakcija pšeničnog zrna. Tvrdoća peleta je opadala sa porastom koncentracije melase, dok nije primećen uticaj koncentracije melase na stepen otiranja peleta. Dodatak melase snizio je potrošnju energije u procesu peletiranja usled lubrikativnog efekta melase u kanalima matrice pelet prese.

Negativna karakteristika uključivanja šećera u smeše ogleda se u povećanom riziku od Maillard-ove reakcije, u kojoj se slobodna aldehidna grupa aminokiselina povezuje sa karbonilnom grupom prostih šećera. Pomenuta reakcija se pospešuje povećanjem vlažnosti materijala. Maillard-ova reakcija može da poboljša fizički kvalitet peleta, ali i da negativno utiče na njihov nutritivni kvalitet (*Van Barneveld, 1993; Hendriks et al., 1994*).

Neorganske materije takođe mogu da utiču na fizički kvalitet peleta. Primećeno je da fizičke i hemijske osobine soli fosfora i kalcijuma (npr. dikalcijum fosfata ili defluorizovanog fosfata) utiču na stepen otiranja peleta (*Turner, 1995*). Bentoniti, koji predstavljaju soli hidratiranih aluminosilikata vulkanskog porekla, od čega je 50-90 % montmorilonit, mogu se dodati u smešu kako bi poboljšali kvalitet peleta, jer se ponašaju kao punioci, tj. smanjuju poroznost pelete. *Adamović et al. (2011)* ispitivali su uticaj dodatka veziva na bazi bentonita u smeše za ishranu koka nosilja na fizički kvalitet peleta. Dodatak 2 % bentonita u smešu povećao je tvrdoću peleta za oko 60 %, dok je smanjio otiranje peleta za oko 25 %.

2.3.3 Faze tehnološkog procesa peletiranja

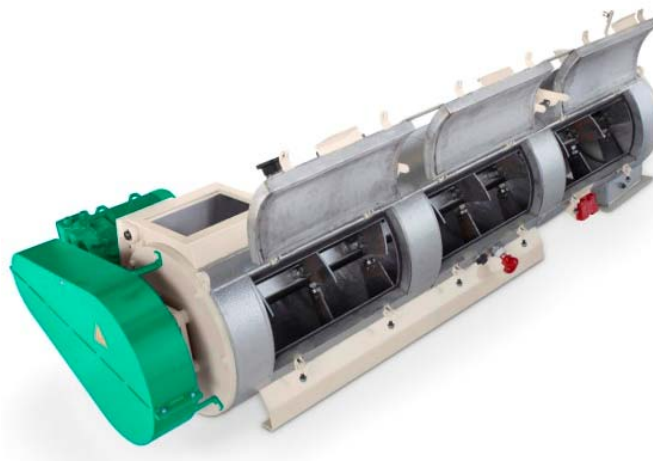
Linija za proizvodnju peletirane hrane za životinje obuhvata nekoliko uređaja. Izbor tipa opreme, dimenzije opreme, kao i odabir odgovarajuće kombinacije parametara svakog od ovih uređaja u mnogome utiče na kvalitet peleta. Podešavanje jednog ili više parametara peletiranja u cilju poboljšanja kvaliteta konačnog proizvoda izuzetno je težak i zahtevan zadatak kojem prethode iscrpna ispitivanja. Tehnološki postupak peletiranja se ne može shvatiti kao kombinacija različitih uređaja, kao što su kondicioner ili pelet presa, nego kao celovit sistem, čiji učinak zavisi od svih pojedinačnih faza u procesu (*Thomas et al., 1997*).

2.3.3.1 Predkondicioniranje

Pod predkondicioniranjem se smatra proces oblikovanja hrane u rasutoj formi, uz pomoć toplote, vode i pritiska u toku određenog vremena, do fizičkog stanja u kojem je materijal pogodniji za sabijanje. Predkondicioniranjem materijala omogućuje se povećanje proizvodnog kapaciteta, a takođe se pozitivno utiče na fizički, nutritivni i higijenski status hrane (Thomas et al., 1997; Sredanović and Lević, 2000).

Toplota i vlaga u procesu predkondicioniranja materijala omogućuju oslobađanje i aktiviranje prirodnih veziva i prirodnih lubrikanata, aktiviranje vezivnih sredstava dodatih u hranu i uzrokuju plastičnu deformaciju termoplastičnih čestica, pri čemu se uspostavljaju čvrste veze između čestica u peleti. Skrobna i proteinska komponenta hrane za životinje su najpodložnije ovim termoplastičnim promenama (Grover and Mishra, 1996).

Za dodavanje vode, pare i drugih tečnosti pre peletiranja uglavnom se koriste kontinualni kondicioneri cilindričnog oblika (Slika 6). Oni se sastoje od centralne osovine na kojoj se nalaze lopatice, koje omogućavaju mešanje pare i tečnosti sa materijalom koji se kondicionira. U zavisnosti od nagiba lopatica, brzine obrtanja osovine, protoka materijala i nivoa punjenja, zavisi i vreme zadržavanja materijala u kondicionerima. Najsavremeniji modeli ovih uređaja su dvoosovinski kontinualni kondicioneri, koji obezbeđuju veću kontaktnu površinu između materijala sa parom i tečnim dodacima (Oechsner de Coninck and Bouvier, 1995; Hertzal, 2010).



Slika 6. Dvoosovinski diferencijalni kondicioner (Anonymous (a), 2012)

Maksimalno vreme zadržavanja u kontinualnom kondicioneru je oko 240 sekundi, što često nije dovoljno da se obezbedi mikrobiološka ispravnost proizvoda. Zbog toga se za dobijanje bezbedne hrane uvodi faza higijenzacije, tokom koje se hrana zadržava na povišenoj temperaturi i do 10 minuta u uređajima koji se nazivaju higijenzizeri. Za higijenzaciju hrane se u poslednje vreme koriste šaržni kondicioneri, koji konstrukcijski predstavljaju dvoosovinske lopataste mešalice, u koje je moguće direktno dodavati paru i tečnost u cilju kondicioniranja. Preko duplih zidova (plašta) između kojih prolazi para, kondicionirani materijal je moguće zadržavati na željenoj temperaturi, bez daljeg direktnog kontakta pare i materijala, čime se dobija isti efekat kao i prilikom kontinualnog higijenziranja (*Čabarkapa et al., 2010*).

Postupak kondicioniranja ispituje se već dugi niz godina. *Beumer (1980)* je vršio ispitivanja u cilju povećanja dodatka pare i tečnosti prilikom produženog kondicioniranja (i do 20 minuta). Ovaj autor je pokazao da se prilikom produženog kondicioniranja može dodati veća količina pare i tečnosti, bez negativnog uticaja na kapacitet uređaja i kvalitet hrane za životinje. Prema *Benhke-u (1994)*, svrha produženog kondicioniranja je produženje vremena kontakta između materijala i pare i tečnosti, čime vlaga i toplota mogu da prodru do centra svake čestice. *Briggs et al. (1999)* su promenom nagiba lopatica uticali na vreme zadržavanja hrane u predkondicioneru. Produženjem vremena zadržavanja u kondicioneru sa 5 na 15 sekundi smanjeno je otiranje peleta, kao i procenat prašine prilikom peletiranja.

Kvalitet vodene pare (stepen suvoće pare) je važna karakteristika vodene pare koja može da utiče na stepen otiranja peleta. Para dobrog kvaliteta, tj. suvozasićena para, čiji je stepen suvoće 1, ima dovoljno energije da izazove povišenje temperature hrane za životinje prilikom predkondicioniranja (*Gilpin, 2002*). U tehnologiji hrane za životinje najčešće se koristi suvozasićena vodena para. Primena suvozasićene pare omogućuje homogeniju distribuciju pare i materijala, a takođe i bolje iskorišćenje toplote, u poređenju sa dodatkom tople vode i tzv. „mokre pare“. Dodatak suvozasićene pare ima za posledicu poboljšan fizički kvalitet peleta, manji otpor prilikom presovanja, manje habanje u kanalima matrice pelet prese i manju potrošnju električne energije pelet prese (*Feil, 2009*).

Pritisak vodene pare je bitan parametar prilikom predkondicioniranja. *Kaliyan and Morey (2009)* navode da se u praksi za predkondicioniranje koristi para pritiska

od oko 0,1 do oko 7 bara, gde se pritisci pare od 1 bara i manji smatraju niskim pritiscima. *Payne (1978)*, kao i *Maier and Gradecki (1992)* dali su preporuke vrednosti pritiska pare u zavisnosti od tipa materijala koji se kondicionira. Ove vrednosti se kreću od oko 1 bara, za skrobne sirovine i termolabilne komponente, do oko 4,5 bara, za celulozne sirovine i proteinske sirovine, u opsegu temperatura od 55 do 85°C. *Winowski (1985)* je ispitivao uticaj kondicioniranja parom na otiranje peleta od skrobnih, proteinskih i celuloznih materijala. Povećanje temperature sa 54 na 85°C poboljšalo je fizički kvalitet peleta od skrobnih i proteinskih materijala, ali je narušilo kvalitet peleta od celuloznih materijala.

2.3.3.2 Peletiranje

Posle predkondicioniranja, materijal se transportuje do komore pelet prese gde se vrši njegovo oblikovanje. Sastav smeše, proces mlevenja i proces predkondicioniranja imaju veliki uticaj na kvalitet finalnog proizvoda, međutim podešavanjem sledećih parametara pelet prese takođe može da se utiče na kvalitet peleta:

- protoka materijala
- geometrije valjaka i matrice;
- rastojanja između valjaka i matrice;
- brzine obrtanja matrice/valjaka pelet prese.

Starck (2009) je ispitivao uticaj povećanja protoka materijala na kvalitet peleta. Povećanje protoka materijala sa 500 na 1000 kg/h uslovalo je smanjenje PDI vrednosti sa 55 na 41 %, dok je dalje povećanje protoka na 1500 kg/h izazvalo smanjivanje PDI vrednosti na 30 %, čime je autor pokazao da se linearnim povećanjem protoka linearno smanjuje PDI vrednost, odnosno povećava otiranje peleta. Slične rezultate objavio je *Löwe (2009)*, koji je linearnom jednačinom prikazao odnos između protoka materijala i otiranja peleta. Smanjenjem debljine matrice povećao se nagib prave, tako da se kod tanjih matrica za isto povećanje protoka dobilo veće povećanje otiranja peleta.

Brojne publikacije bave se uticajem geometrije valjaka i matrice na kvalitet peleta. *Heffner and Pfof (1973)* su pokazali da se smanjenjem dimenzija matrice

povećava želatinizacija skroba u hrani za ishranu koka nosilja. Povećanjem odnosa dužina kanala matrice/prečnik otvora matrice (l/d odnos), kao i smanjenjem prečnika otvora matrice povećava se trenje između zidova matrice i materijala, što može da ima pozitivan efekat na fizički kvalitet peleta.

Povećanjem l/d odnosa (odnosa dužine kanala i prečnika otvora matrice) pelete koje se formiraju u kanalu matrice podvrgnute su intenzivnijem trenju. Sa produženjem vremena zadržavanja u sabijenom stanju, uticaj elastičnih komponenti u hrani za životinje slabi usled povećanja kontaktne površine između čestica materijala. U peleti se tada uspostavljaju veze između čestica, koje nadjačavaju negativan uticaj elastičnih komponenti na sabijanje materijala (*Mohsenin and Zasse, 1976*).

Faborode and Ocallaghan (1987) su ispitivali odnos (l/d)/pritisak sabijanja, odnosno ispitivali su uticaj l/d odnosa na pritisak sabijanja. Ovi autori su ustanovili da između ispitivana dva parametra postoji eksponencijalni odnos. *Franke and Rey (2006)* su predložili da se za peletiranje hrane sa povećanim sadržajem masti koriste matrice veće debljine. *Čolović et al. (2010)* su takođe ispitivali uticaj l/d odnosa na fizički kvalitet peletirane hrane za goveda i zaključili da povećanje dužine kanala matrice rezultuje većom tvrdoćom peleta.

Rastojanje između valjaka i matrice je takođe jedan od parametara peletiranja koji utiče na kvalitet peleta. Generalno, povećanje rastojanja rezultuje povećanjem tvrdoće peleta i smanjenjem otiranja peleta (*Payne, 1995; Thomas et al., 1997*). *Robohm and Apelt (1989)* i *Robohm (1992)* pokazali su da se povećanjem rastojanja između valjaka i matrice povećava kvalitet peleta. Međutim, pri postizanju kritičnog rastojanja materijal počinje da prolazi sa strane valjaka, što uzrokuje lošiji kvalitet peleta. *Miladinović and Svihus (2010)* su takođe povećavali rastojanje između valjaka i matrice. Za protok materijala od 500 kg/h povećanje rastojanja sa 0,1 na 2 mm uslovalo je povećanje PDI vrednosti sa 85,6 na 90,6 %, dok je za protok od 1000 kg/h PDI vrednost povećana sa 82,8 na 85,6 %.

Variranjem brzine obrtanja matrice, kod pelet presa sa cilindričnom matricom, odnosno brzine obrtanja valjaka, kod pelet presa sa ravnom matricom, može da se varira kvalitet peleta. *Stevens (1987)* je varirao brzinu obrtanja matrice pelet prese. Kod malih brzina obrtanja matrice (126 obrtaja/min) zapazio je pojavu zapušanja kanala matrice, dok je u opsegu brzina od 150 do 268 obrtaja/min proces peletiranja

bio nesmetan. *Thomas (1997)* je dao opseg brzina matrice za proizvodnju peleta prečnika od 3 do 6 mm, koji treba da bude oko 6-7 m/s, dok je *Heinemmans (1991)* preložio da se za materijale male nasipne mase koriste matrice manje brzine (4-5 m/s).

2.3.3.3 Sušenje/Hlađenje

Temperatura peleta na izlazu iz pelet prese je najčešće u opsegu od 60 do 95°C, sa vlagom u opsegu od 12 do 18 % (*Maier et al., 1992*). Da bi se mogle skladištiti, pelete se moraju ohladiti i mora im se ukloniti višak vlage. Hlađenje peleta se obično obavlja uz pomoć struje vazduha odmah posle izlaska iz pelet prese, do temperature koja je za oko 5°C viša od temperature okoline, i do vlage koja je za 0,5 % viša od vlage materijala pre kondicioniranja parom (*Turner, 1995*). Vreme hlađenja peleta može da varira od 4 do 15 minuta. Ukoliko pelete nisu dovoljno osušene ili su prebrzo sušene, mogu se pojaviti pukotine na njihovoj površini, što narušava njihov fizički kvalitet, usled stresa koji se javlja zbog razlike u temperaturama između unutrašnjosti i spoljašnjosti pelete (*Kirchner, 2009*).

U praksi se mogu sresti različiti tipovi sušara/hladnjaka: vertikalni, horizontalni, bunkerskog tipa, itd. Fizički kvalitet ohlađenih/osušenih peleta zavisi od osobina vazduha, tipa protoka vazduha, karakteristika materijala koji se suši/hladi, debljine sloja peleta, veličine peleta i vremena zadržavanja. *Friedrich and Robohm (1968)* su u svojim istraživanjima proizveli pelete sa najmanjim otiranjem pri brzinama vazduha od 0,74 do 0,98 m/s u horizontalnom hladnjaku sa tri pregrade. *Kirchner (2009)* je takođe ispitala uticaj brzine vazduha prilikom hlađenja na otiranje peleta. Pri brzinama strujanja vazduha od 0,08 m/s otiranje je bilo do 4,5 %, dok je pri brzinama od 2 m/s otiranje iznosilo oko 6 %.

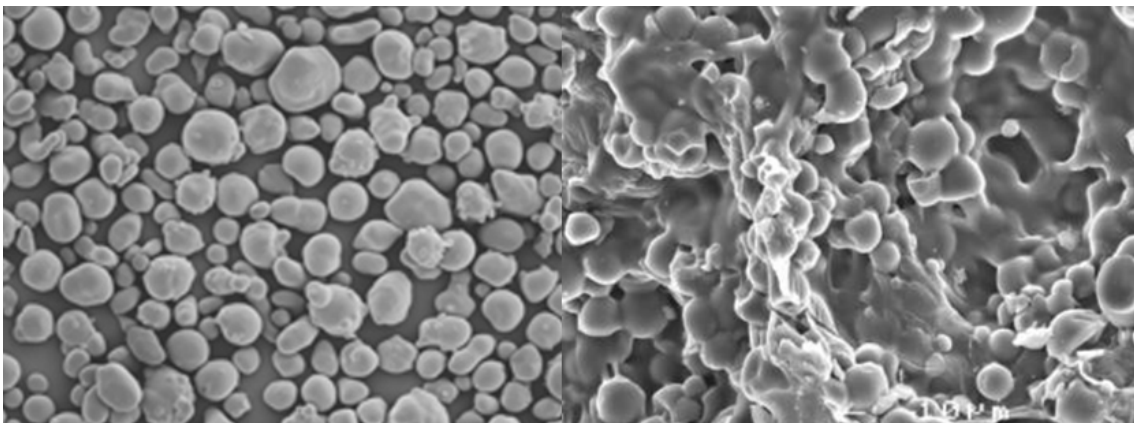
2.3.4 Funkcionalne promene makronutrijenata

U poređenju sa drugim toplotnim tretmanima, temperature koje se primenjuju u procesu peletiranja smatraju se umerenim. Međutim, primena toplote u procesu može da izazove destrukciju pojedinih nutritivnih sastojaka, kao što su vitamini i enzimi. Sa druge strane, u procesu peletiranja dolazi do fizičkih i hemijskih promena

makronutrijenata, od kojih pojedine imaju pozitivan uticaj na fizički kvalitet peleta. Intenzitet fizičkih i hemijskih promena makronutrijenata zavisi od različitih faktora. Kod sporednih proizvoda prehrambene industrije od velikog uticaja na intenzitet ovih promena je postupak dobijanja sporednih proizvoda, koji prolaze kroz nekoliko procesnih faza, pre nego što se uključe u ishranu životinja. Takođe, intenzitet fizičkih i hemijskih promena makronutrijenata u sirovinama koje se koriste u procesu proizvodnje peleta u nativnom stanju zavisi od toga koje su operacije uključene u proizvodni proces pre oblikovanja materijala na pelet presi. Smatra se da su od fizičkih i hemijskih promena makronutrijenata za kvalitet peleta najvažnije želatinizacija skroba i denaturacija proteina (Thomas et al., 1998; Svihus and Zimonja, 2011).

2.3.4.1 Želatinizacija skroba

Skrob se u nativnom stanju nalazi u polukristalnim i amornim slojevima, u obliku granula veličine od 1 do 50 μm , u zavisnosti od tipa biljnog materijala. Tako na primer, srednja veličina granula pšeničnog skroba iznosi 22 μm , a pirinčanog skroba 8 μm (Cornell et al., 1994; Donald, 2001). Na povišenim temperaturama (od 50 do 70°C) i u prisustvu vode dolazi do dezintegracije skrobnih granula, odnosno do procesa želatinizacije (Svihus et al., 2005). Na Slici 7. prikazan je izgled nativnog i želatiniziranog skroba.



Slika 7. Nativni i želatinizirani skrob (Tomanee, 2008).

Stepen želatinizacije skroba u hrani za životinje zavisi od upotrebljenog termičkog postupka. U procesu ekstrudiranja vlaga materijala se obično kreće od 20 do 25 %, a temperatura ekstrudiranja je iznad 110°C. Pod ovakvim uslovima skrob je u velikoj meri želatiniziran (Skoch *et al.*, 1983). U procesu ekspandiranja, gde se vlaga materijala kreće od 17 do 20 % stepen želatinizacije je u opsegu od 22 do 35 % (Goelma *et al.*, 1999). Po mnogim autorima, stepen želatinizacije u procesu konvencionalnog peletiranja se obično kreće od 5 do 30 % (Skoch *et al.*, 1983; Goelma *et al.*, 1999; Zimonja *et al.*, 2007).

Želatinizirani skrob ima svojstvo da se ponaša kao vezivno sredstvo u procesu peletiranja, pri čemu nastaju pelete boljeg fizičkog kvaliteta (Wood, 1987; Zimonja and Svihus, 2009). Sa druge strane, Svihus *et al.* (2005) navode da ograničena želatinizacija u procesu konvencionalnog peletiranja nije dovoljna da izazove promene u fizičkom kvalitetu peleta.

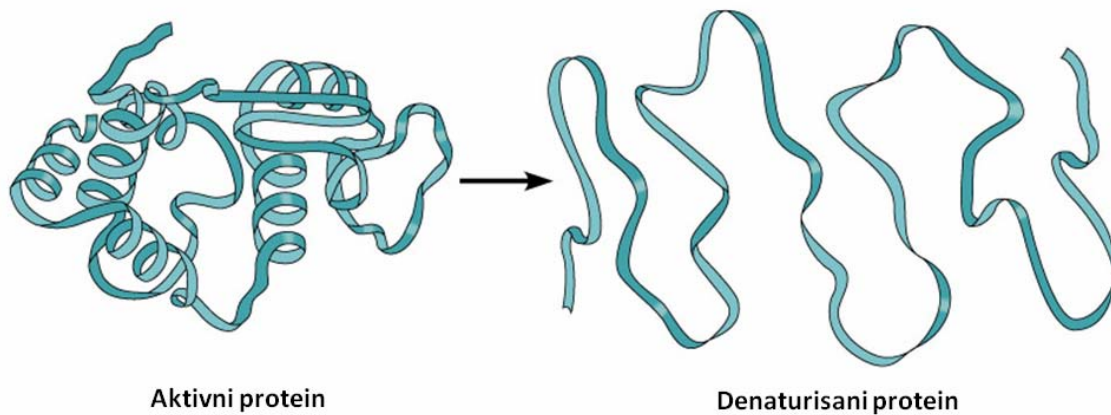
Za određivanje stepena želatinizacije skroba koristi se nekoliko metoda. Enzimska metoda se sastoji od inkubiranja skroba sa enzimom amiloglukozidazom posle čega se meri razgradnja skroba. Ova metoda je bazirana na pretpostavci da postoji linearan odnos između stepena želatinizacije i enzimske degradacije skroba (Lankhorst *et al.*, 2006). Reološka metoda je bazirana na merenju razlika u viskozitetu netretiranog i termički tretiranog uzorka (Svihus *et al.*, 2004). Obe pomenute metode su indirektno, jer ne mogu da mere promene u strukturi skroba.

Diferencijalna skenirajuća kalorimetrija (DSC) bazirana je na merenju toplotnih efekata želatinizacije skroba, odnosno promene entalpije materijala. Kada skrob želatinizira, on absorbuje toplotu, što dovodi do promene entalpije. Stepenu želatinizacije se određuje razlikom u entalpijama netretiranog i termički tretiranog uzorka (Stevnebo *et al.*, 2006). Holm *et al.* (1988) su poredili vrednosti stepena želatinizacije skroba za iste uzorke, a za različite metode i pokazali da se enzimskom metodom dobijaju veće vrednosti stepena želatinizacije u poređenju sa metodom diferencijalne skenirajuće kalorimetrije.

2.3.4.2 Denaturacija i degradacija proteina

Toplota u procesu peletiranja može da izazove destrukciju trodimenzionalne strukture proteina, a takođe može da utiče na formiranje novih kovalentnih veza, kao što su disulfidne veze, izopeptidne veze, veze nastale u Millard-ovoj reakciji, itd

(Slika 8). U prvoj (reverzibilnoj) fazi denaturacije dolazi do raskidanja vodoničnih i van der Waals-ovih veza, dok u drugoj fazi (ireverzibilnoj) dolazi do raskidanja ili uspostavljanja kovalentnih veza. Ovaj proces je olakšan u prisustvu vode (Weijers and van't Riet, 1992; Svihus and Zimonja, 2011).



Slika 8. Aktivni i denaturisani protein (Ajayi, 2008).

U toku procesa toplotne denaturacije proteina dešava se interakcija molekula vode sa proteinima preko nekovalentnih Van der Waals-ovih veza, što može da doprinese konformacionoj stabilnosti i čvršćem povezivanju unutar samih proteina. Usled interakcije između molekula vode i proteina, u prisustvu veće koncentracije vode denaturacija proteina počinje na nižim temperaturama (od 60 do 70°C), dok u prisustvu manje koncentracije vode proteini denaturišu na temperaturama koje su znatno više (iznad 100°C) (Adams, 1991; Ludikhuyse et al., 2003).

Rouilly et al. (2003) su zapazili da temperatura denaturacije proteina suncokreta varira od 120 do 190°C pri količini vlage u materijalu od 0 do 30 %. Ovo ukazuje da su proteini tipa globulina kod soje i suncokreta relativno toplotno stabilni tokom procesa peletiranja. Sa druge strane, Hosney (1994) je pokazao da se gluten iz pšenice denaturiše pri količini vlage u materijalu od 16 % čak i na sobnoj temperaturi. Iako gluten ne iziskuje toplotu da bi se denaturisao, pokazano je da zagrevanje glutena pospešuje drugu fazu procesa denaturacije preko formiranja novih kovalentnih veza (Hayta and Alpaslan, 2001). Proteini kukuruza su umreženi i ne apsorbuju lako vodu, kao što to rade pšenični proteini. Stoga iziskuju više temperature za denaturaciju (Di Gioia et al., 1998).

Stabilnost proteina na uticaj toplote u velikoj meri određena je jačinom i brojem kovalentnih veza (npr. disulfidnih veza) i prostetičkim grupama (npr. kalcijumovim jonima). Primena pritiska u proizvodnom procesu potpomaže denaturaciju proteina raskidanjem uglavnom nekovalentnih veza, mada se sulfhidrilne grupe i disulfidne veze takođe mogu raskinuti. Kombinovano dejstvo pritiska i temperature pri denaturaciji proteina može biti i sinergističko i antagonističko, što zavisi od tipa i strukture samog proteina. Osim temperature, pritiska i vlage, na denaturaciju i funkcionalne osobine proteina mogu da utiču i drugi faktori kao što su vreme zagrevanja i pH vrednost (*Renkema et al., 2000*).

Denaturisani proteini imaju jake želirajuće osobine, što doprinosi boljem kvalitetu peleta. Pokazano je da se mešanjem pšeničnog brašna sa vodom transformiše proteinski matriks pšenice u duga lepljiva vlakna, koja mogu da povežu suspenovane čestice (*Seckinger and Wolf, 1970; Bernardin and Kasarda, 1973*). Sličan efekat je zapažen kod toplotno tretiranih sojinih proteina (*Ker and Chen, 1998*). Pojedini autori, kao što su *Stevens (1987)* i *Calvacanti (2004)*, pokazali su da biljni proteini pozitivno utiču na fizički kvalitet peleta, međutim mehanizam povezivanja još uvek nije dovoljno objašnjen. *Calvacanti (2004)* je takođe saopštio da proteini kukuruza imaju negativan efekat na kvalitet peleta. *Svihus and Zimonja (2011)* su ukazali da je, s obzirom na konfrontirajuće rezultate u pogledu uticaja proteina na kvalitet peleta, potrebno ispitati uticaj hemijske modifikacije proteina, kao i izvora proteina. *Kaliyan and Morey (2010)* su upotrebom UV autofluorescencije i skenirajuće elektronske mikroskopije zaključili da čvrste veze između lignina i proteina, indukovane toplotom i vlagom, imaju važan uticaj na povezivanje čestica u peleti od biomase.

Za određivanje stepena degradacije i denaturacije proteina koriste se razne metode. Za brza određivanja stepena degradacije i denaturacije proteina koriste se metode bazirane na rastvorljivosti proteina posle toplotnog tretmana, kao npr. indeks rastvorljivosti proteina, indeks rastvorljivosti azota, rastvorljivost proteina u kalijum-hidroksidu (*Palić and Coetzee, 2009*). Često se za procenu uticaja primenjenog toplotnog tretmana na proteinsku komponentu koriste vrednost koncentracije i aktivnosti enzima, proteinskih enzimskih inhibitora i ostalih antinutritivnih faktora (*Molina and Ledward, 2003; Cowieson et al., 2005; Prasad et al., 2010*).

2.4. Izvori proteina u peletiranim smešama

Proizvodni proces u prehrambenoj industriji je postavljen tako da se pored glavnog proizvoda dobijaju i sporedni proizvodi, kojima se ne posvećuje velika pažnja. Sa druge strane, zbog svoje hranljive vrednosti, ovi sporedni proizvodi predstavljaju veliki potencijal za ishranu životinja (*Lević et al., 1992; Sredanović and Lević, 1994; Đorđević et al., 2009, Lević and Sredanović, 2011*).

U Industrijskoj proizvodnji ulja, posle izdvajanja ulja iz biljnih materijala ostaju sporedni proizvodi čiji hemijski sastav i nutritivna vrednost zavise od karakteristika početnog materijala i primenjenog tehnološkog postupka. Kod izdvajanja ulja postupkom presovanja i ekstrakcije, kao sporedni proizvodi dobijaju se sačme, koje odlikuje visok sadržaj proteina, te se shodno tome mogu smatrati proteinskim hranivima (*Lević et al., 1992; Sredanović and Lević, 1994, Lević and Sredanović, 2012*). Sačme se mogu dobiti iz raznih biljnih materijala, kao što su soja, suncokret, kikiriki, uljana repica, ogrštica, bundevino seme, lan, mak, susam, kokosov orah i dr. Od ukupne proizvodnje sačmi u Srbiji, najveći udeo imaju suncokretova i sojina sačma, što ih svrstava među najvažnija biljna proteinska hraniva kod nas. Po *Pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (2010)* sojin koncentrat sadrži preko 63 % proteina, međutim zbog velike koncentracije proteina u odnosu na ostale sirovine u smeši za ishranu životinja (sojina sačma sadrži od 40 do 50 % proteina, a suncokretova sačma od 33 do 48 % proteina) ove sirovine se ponekad nazivaju biljnim proteinskim koncentratima. Kako bi se dobile visokoproteinske sirovine i racionalnije iskoristili nutritivno vredni sastojci, tehnološki proces proizvodnje sačmi je unapređen. Nutritivna vrednost sačmi uslovljena je primenjenim tehnološkim postupkom izdvajanja ulja iz zrna, kao i primenjenim postupkom prerade sačme (*Sredanović et al., 1995, Sredanović et al., 2005; Đorđević et al., 2009; Lević and Sredanović, 2012*).

Unapređenje postupka proizvodnje suncokretove sačme je bilo potrebno zbog otklanjanja nedostataka ovog hraniva, kao što su: povećan sadržaj ljuske, koja umanjuje nutritivnu vrednost proteina suncokretog jezgra, deficit pojedinih aminokiselina i energije, smanjena digestija i absorpcija hranljivih sastojaka suncokretove sačme, itd. Aplikacijom specifičnih komponenata, kao što su aminokiseline, enzimi, masnoće i dr., uz primenu adekvatnih tehnoloških postupaka

moгу se popraviti ovi nedostaci i povećati nutritivna vrednost ovog hraniva (*Delić et al., 1992; Lević and Sredanović, 2012*). Nekoliko postupaka se pokazalo kao manje-više uspešno za uklanjanje ljuske iz suncokretove sačme (*Lević et al., 2008; Sredanović, 2007*):

- prosejavanje
- centrifugalna separacija
- frakcionisanje uz prethodnu doradu na mlinu ili drobilici
- elektrostatička separacija
- vazдушna separacija

Suncokretova sačma se u ishrani životinja koristi kao izvor proteina (aminokiselina) i energije (Slika 9). U Srbiji sadržaj sirovih proteina konvencionalne suncokretove sačme varira u granicama između 33 i 37 %, dok sadržaj sirovih vlakana varira od 18 do 23 %, a ova dva nutrijenta su inverznom odnosu. Odgovarajućom preradom suncokretova sačma može da sadrži i više od 44 % sirovih proteina, što joj omogućuje uporedivost sa sojinom sačmom. Takođe, aminokiselinski sastav suncokretove i sojine sačme je komplementaran (*Delić et al., 1992; Vilamide and San Juan, 1998; Đorđević and Dinić, 2011*).

Iako se suncokretova sačma u ishrani životinja koristi kao izvor proteina, ona takođe sadrži i značajne količine ugljenohidratnih komponenata, uglavnom nerastvorljivih neskrobnih polisaharida. Kao i sojina sačma, suncokretova sačma ima veoma mali sadržaj skroba i sirovih masti. Suncokretova sačma ne sadrži antinutritivne materije, ali sadrži nepoželjne polifenole. Ograničavajući faktor za upotrebu suncokretove sačme u ishrani životinja je ljuska. U ishrani nepreživara treba koristiti suncokretovu sačmu koja je dobijena posle prosejavanja, da bi se izbeglo negativno dejstvo celuloze na svarljivost obroka i proizvodne rezultate. Dodatkom egzogenih enzima može se uticati na povećanje usvojivosti hranljivih sastojaka suncokretove sačme (*Đorđević et al., 2009; Mushtaq, 2009; Lević and Sredanović, 2012*).



Slika 9. Suncokretova sačma (*Anonymous (b), 2012*).

Sojina sačma je sporedni proizvod nakon ekstrakcije sojinog ulja iz sojinog zrna (Slika 10). Ovo hranivo se smatra za jedno od najvažnijih u ishrani životinja. Od ukupne svetske proizvodnje proteinskih hraniva oko dve trećine otpada na sojinu sačmu (*Oil World, 2010*). *Pravilnik o kvalitetu hrane za životinje (2010)* propisuje minimalni sadržaj proteina i maksimalni sadržaj sirovih vlakana u sojinoj sačmi od oljušćenog, delimično oljušćenog i neoljušćenog sojinog zrna. Minimalni sadržaj sirovih proteina bi trebao da bude od 48, 44 i 40 %, dok bi odgovarajući maksimalni sadržaj sirovih vlakana trebao da bude 3,5, 7 i 9%, u zavisnosti od toga da li je sojina sačma I, II ili III kvaliteta.

Osim visokog sadržaja proteina, sojinu sačmu odlikuje visok sadržaj esencijalne aminokiseline lizina i nizak sadržaj metionina (*Lević et al., 1992; Sredanović et al. 2009; Serrano et al., 2012*). Uz uključivanje sintetičkog metionina, sojina sačma može da se koristi u ishrani mlađih kategorija nepreživara. Ukoliko se sojina sačma uključuje u ishranu starijih kategorija nepreživara, u smešu ne moraju da se dodaju sintetičke aminokiseline. Sojina sačma sadrži i veće količine niacina, a deficitarna je u kalcijumu, fosforu i vitaminu D. Sirova soja sadrži antinutritivne faktore, tripsin inhibitor i ureazu, te je potrebno obratiti pažnju na intenzitet termičke obrade pri inaktivaciji ovih štetnih sastojaka (*Lević et al., 1989; Moritz et al., 2001; Đorđević and Dinić, 2011*).



Slika 10. Sojina sačma (Anonymous (c), 2012).

U odnosu na druge uljane sačme, suncokretova sačma je evidentno najbogatiji izvor vitamina B grupe. U odnosu na sojinu sačmu, suncokretova sačma sadrži znatno veće količine tiamina ($33,0:3,0 \text{ mg kg}^{-1}$), niacina ($240,0:30,0 \text{ mg kg}^{-1}$) i biotina ($1,00:0,35 \text{ mg kg}^{-1}$). Između suncokretove i sojine sačme postoji razlika i u aminokiselinskom sastavu. Suncokretova sačma sadrži znatno manju količinu lizina ($1,70:2,75$), a znatno veću količinu metionina ($1,00:0,60$), arginina ($4,10:3,40$) i cistina ($0,80:0,65$), dok je količina treonina ($1,65:1,70$) i triptofana ($0,58:0,59$) u obe sačme podjednaka. Što se tiče mineralnog sastava, suncokretova sačma u poređenju sa sojinom sadrži znatno veće količine fosfora ($1,0:0,6 \%$), magnezijuma ($0,50:0,26 \%$), joda ($0,70:0,15 \text{ mg kg}^{-1}$) i selena ($0,70:0,10 \text{ mg kg}^{-1}$), a dva puta manju količinu kalijuma ($1,1:2,1 \%$). Ako se poredi moć absorpcije vode i masti, visokoproteinska suncokretova sačma ($43,6 \%$ sirovih proteina) ima slabiju moć upijanja vode od sojine sačme ($2,00:2,68 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) i veću moć upijanja masti ($2,05:1,30 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) (AEC, 1987; Sredanović et al., 2005; Lević and Sredanović, 2012).

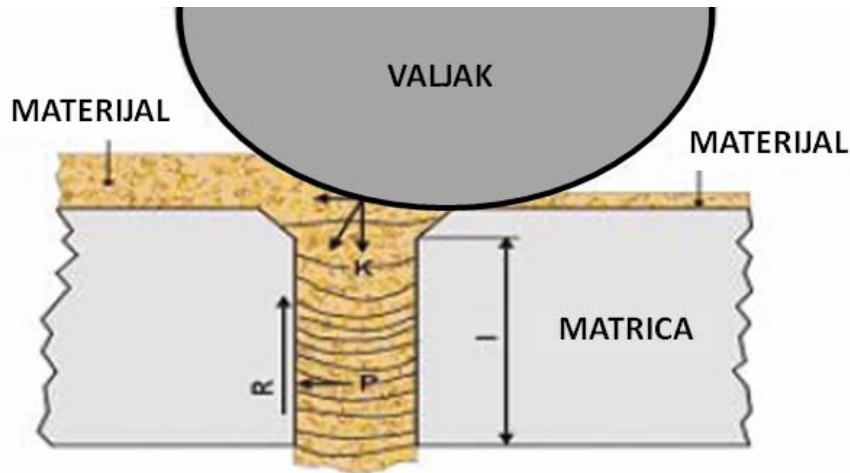
Postoji veliki broj publikacija o uticaju dodatka sojine sačme na fizički kvalitet peleta. Briggs et al. (1999) dodavali su sojinu sačmu u iznosu od 24 i 34 % u smeše na bazi kukuruza i ispitivali fizički kvalitet tako dobijenih peleta. Dodatak sojine sačme uticao je na smanjenje otiranja peleta. Wood (1987) je pokazao da su pelete sa dodatkom sirovih proteina soje imale manje otiranje u poređenju sa peletama sa

dodatkom sojinom sačmom, koja je već delimično denaturisana. Sa druge strane, broj publikacija koje se bave ispitivanjem uticaja suncokretove sačme na kvalitet peleta je ograničen. *Filipović et al. (1992)* su peletirali suncokretovu sačmu dobijenu nakon procesa ekstrakcije ulja bez prethodne dorade i postigli povećanje nasipne mase za više od 47 % (sa 380 na 520-560 kg m⁻³) uz veoma mali stepen otiranja peleta (1,8-3,08 %). *Lević i sar. (1992)* su peletirali visokoproteinsku suncokretovu sačmu sa 43,8 % sirovih proteina i postigli povećanje nasipne mase za 22 %, uz dobar fizički kvalitet peleta sa otiranjem od 2,0 %, ali sa gubitkom u sadržaju slobodnog lizina od 10 %. Naknadnim zamašćivanjem peleta, u cilju povećanja njihove energetske vrednosti, isti autori su postigli poboljšanje fizičkog kvaliteta peleta, sa stepenom otiranja od svega 0,66 %. *MacMahon and Payne (1991)* su ispitivali uticaj pojedinih sirovina koje se koriste u pripremi smeša za ishranu životinja na fizički kvalitet peleta. Ovi autori su pokazali da su pelete od čiste suncokretove sačme bile kvalitetnije od peleta od čiste sojine sačme, iako su imale manji sadržaj sirovih proteina, veći sadržaj sirovih vlakana, veći sadržaj sirove masti i veći udeo skroba.

2.5. Tipovi pelet presa

Pelet prese se obično sastoji od dva osnovna dela – matrice, najčešće sa kanalima cilindričnog oblika, i valjaka, koji potiskuju materijal kroz kanale matrice. Proces oblikovanja materijala počinje u kanalu matrice. Usled trenja između čelične površine kanala i materijala koji se peletira dolazi do pojave sile trenja i generisanja toplote. Ukoliko je pritisak koji potiskuje materijal veći nego sila trenja, materijal će biti potisnut kroz kanal, pa stoga moraju nadvladati sile trenja koje se javljaju između materijala i zida kanala matrice. Materijal u kanalu se dalje potiskuje sledećim slojem presovanog materijala. Tanak sloj koji je ostao na matrici se dalje sabija uz pomoću drugog valjka, i još jednom materijal u kanalu se dalje potiskuje. Stub materijala, koji se nalazi u kanalu, sa spoljne strane kanala izlazi iz matrice i pomoću noževa se odseca na cilindre jednakih dužina (*Pfost, 1971, Kersten et al., 2005*).

Na Slici 11 dat je princip procesa peletiranja predstavljen od strane *Kytö-a and Äijälä-e (1981)*.



Slika 11. Princip tehnološkog procesa peletiranja.

Pomenuti autori su predložili matematički model koji objašnjava princip tehnološkog procesa peletiranja. Po ovom modelu se vidi da kompresiona sila mora da nadvlada sile trenja koje se javljaju u kanalu matrice pelet prese (jednačina 1):

$$R = \mu * P * u * l < |K| \quad /2/$$

gde su:

R (N) – sila trenja,

μ (1) – koeficijent trenja,

P (N/m²) – pritisak materijala na zidove kanala matrice,

u (m) – prečnik otvora matrice

l (m) – dužina kanala otvora matrice

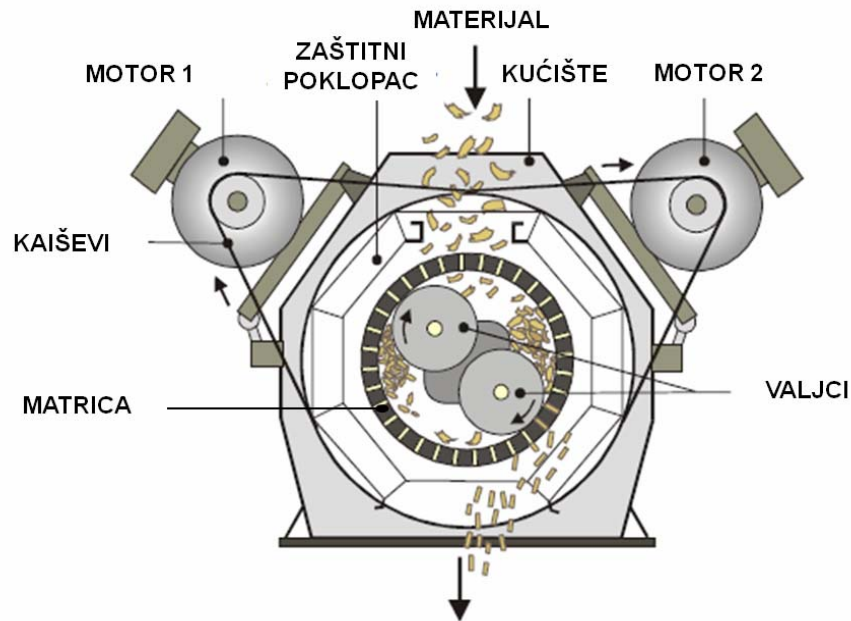
K (N) – kompresiona sila.

U praksi se mogu sresti dva različita tipa pelet presa, pelet prese sa cilindričnom matricom i pelet prese sa ravnom matricom.

2.5.1. Pelet prese sa cilindričnom matricom

Kod pelet presa sa cilindričnom matricom (Slika 12) matrica je pokretni deo, dok su ekscentrično postavljeni valjci (obično 2-3 valjka) fiksirani i mogu da se okreću samo oko svoje ose usled sila trenja koje se javljaju između valjaka i

materijala koji se peletira. Valjci su postavljeni tako da skoro dodiruju površinu matrice. Osovine na kojima se nalaze valjci i matrica pozicionirane su u horizontalnoj ravni (Thomas et al., 1997).



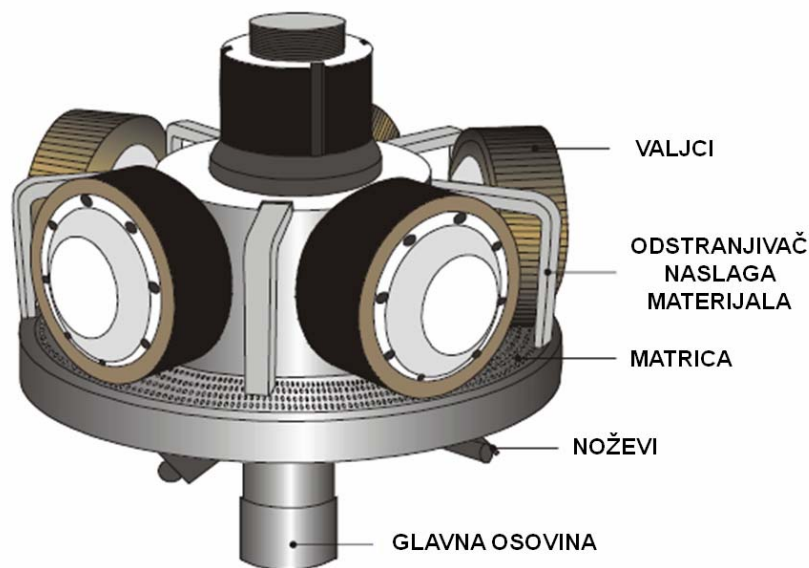
Slika 12. Pelet presa sa cilindričnom matricom (Alakangas and Paju, 2002).

Materijal, u koji je prethodno dodata para, uvodi se kroz aksijalni dovod u komoru pelet prese pod dejstvom sile gravitacije ili uz pomoć pužnog transportera. Jedan ili više raspodeljivača omogućavaju ravnomernu raspodelu preko cele površine matrice što dovodi do obrazovanja sloja specifične debljine. Tehnološki proces peletiranja počinje raspodeljivanjem materijala na površinu valjaka i matrice, a zatim utiskanjem materijala u kanale matrice. Materijal se odseca na željenu dužinu uz pomoć noževa koji su fiksirani sa spoljne strane komore za presovanje. Ove pelet prese su manje osetljive na promenu vlage materijala (Brkić and Janić, 2009, Yumak et al., 2010).

2.5.2. Pelet prese sa ravnom matricom

Pored pelet presa sa vertikalno pozicioniranom cilindričnom matricom, postoje i pelet prese sa ravnom matricom (Slika 13). Kod ovih tipova pelet presa matrica je

fiksirana i nalazi se u horizontalnoj ravni. Kroz centralni otvor na matrici prolazi glavna osovina pelet prese, na kojoj se sa gornje strane matrice nalaze valjci, dok se sa donje strane matrice nalaze noževi. Prilikom peletiranja kondicionirani materijal u slobodnom padu dolazi u komoru pelet prese, gde se na površini matrice formira sloj materijala, koji se uz pomoć valjaka raspoređuje i sabija u kanale matrice. Sa donje strane pelet prese oblikovani materijal se odseca pomoću rotirajućih noževa (Thomas et al., 1997).



Slika 13. Pelet presa sa ravnom matricom (Alakangas and Paju, 2002).

Kod pelet presa sa ravnom matricom materijal se gravitacionim putem transportuje u pelet presu, bez upotrebe dozirnog sistema, što isključuje rizik od blokiranja i zasvođavanja opreme materijalom. Komora za presovanje je velika, što je posebno neophodno za materijale koji imaju malu zapreminsku masu. Ovaj tip pelet presa je pogodan za peletiranje materijala koji se teško komprimuju, kao što su lignocelulozne sirovine (Lević et al., 1994; Spasevski, 2010; Berhmann and Berhmann, 2012).

2.6. Matematičko modelovanje procesa peletiranja

Matematičko modelovanje procesa peletiranja se može koristiti za opisivanje odnosa između procesnih parametara i parametara kvaliteta peleta, kao i u cilju optimizacije procesa peletiranja. Takođe, upotreba matematičkih modela može da pomogne u razumevanju fizičko-hemijskih promena u materijalu, koje se dešavaju prilikom procesa peletiranja (*Leuenberger and Rohera, 1986; Tumuluru et al., 2010*).

Matematički modeli se koriste za opisivanje kompakcije i oblikovanja materijala u procesu peletiranja i imaju široku primenu u oblastima prehrambene, poljoprivredne, metaloprerađivačke i farmaceutske industrije. U literaturi je opisan veliki broj jednačina koje opisuju proces peletiranja. Isto tako, brojni autori su koristili već postojeće jednačine za dobijanje empirijskih formula koje opisuju eksperimentalne podatke (*Kawakita and Ludde, 1971; Mani et al., 2004; Adapa et al., 2009*).

Tabil (1996) i *Tumuluru et al. (2010)* dali su pregled modela koji se najčešće mogu sresti u literaturi, od kojih će ovde pojedini biti opisani.

2.5.1 Spencer - Heckel-ov model

Jednačina predložena od strane *Spencer-a et al. (1950)* i *Heckel-a (1961)* se koristi za izražavanje gustine materijala, tj. kompakcije frakcija materijala u funkciji primenjenog pritiska. Za opisivanje kompacionih osobina praškastih materijala koriste se sledeće jednačine:

$$\ln \frac{1}{1 - \rho_f} = mP + b \quad /3/$$

gde se ρ_f računa iz relacije:

$$\rho_f = \frac{\rho}{\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2} \quad /4/$$

gde su:

ρ – gustina kompahovane praškaste smeše,

ρ_f – relativna gustina posle preuređivanja čestica,

ρ_1 i ρ_2 – gustina čestica komponenata smeše,

X_1 i X_2 – maseni udeli komponenata smeše,

P – primenjeni pritisak,
 m i b – konstante.

Konstante m i b opisuju 2 faze procesa kompresije, zauzimanje položaja čestica i preuređivanje čestica usled ugušćivanja. Jednačina 3 pokazuje da veće vrednosti relativne gustine rezultuju većom redukcijom zapremine materijala usled većeg preuređivanja čestica. Konstanta m je recipročna srednjoj vrednosti pritiska potrebnog da indukuje elastičnu deformaciju. Drugim rečima, veće vrednosti konstante m ukazuju da će deformacije početi pri niskim pritiscima, tj. materijal je više podložan kompakciji.

2.5.2 Walker-ov model

Walker (1923) je razvio model koji se bazira na eksperimentalnim podacima kompresibilnosti praškastih materijala, a izražava odnos zapremina (V_R) kao funkciju primenjenog pritiska (jednačina 5):

$$V_R = m \ln P + b \quad /5/$$

gde se V_R računa iz relacije:

$$V_R = \frac{V}{V_S} \quad /6/$$

gde su:

P – primenjeni pritisak (Mpa),

V_R – odnos zapremina,

V – zapremina kompahovanog materijala na pritisku P (m^3),

V_S – zapremina nekompahovanog materijala,

2.5.3 Sonnergaard-ov model

Sonnergaard-ov (2001) model je logaritamsko-eksponencijalna jednačina, koja opisuje dva simultana procesa: logaritamsko smanjenje zapremine

fragmentacijom i eksponencijalno opadanje plastične deformacije praškastih materijala (jednačina 7):

$$V = V_1 - w \log P + V_0 \exp(-P / P_m) \quad /7/$$

gde su:

V_1 – zapremina na pritisku 1 (Mpa),

P_m – srednji pritisak P (MPa),

w – konstanta.

2.5.4 Modeli odzivne površine

Proces peletiranja je kompleksan i uključuje brojne procesne parametre. Za pronalaženje optimalnih uslova i bolje razumevanje kompleksnog sistema potrebno je napraviti eksperimentalni dizajn i izvesti na odgovarajući način analizu podataka. Eksperimentalni dizajn pomaže u objašnjenju uticaja procesnih parametara na kvalitet proizvoda (*Mullen and Ennis, 1979*). Brojni autori su uspešno upotrebili različite eksperimentalne dizajne za pravljenje matematičkih modela odzivne površine, a u cilju objašnjenja pojedinih procesa (*Bandyopadhyay and Rout, 2001; Ivanov et al., 2012*).

Metodologija odzivne površine predstavlja skup matematičkih i statističkih tehnika koje se koriste za matematičko modelovanje i analiziranje problema gde je odziv zavisne promenjive uslovljen sa nekoliko parametara, sa ciljem optimizacije ove promenjive. Opšti oblik modela odzivne površine je dat jednačinom 8 (*Myers at al., 1976*).

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon \quad /8/$$

gde su:

y – odziv zavisne promenjive,

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – nezavisne promenjive, tj. procesni parametri,

ε – greška uočena u zavisno promenljivoj.

Generalno, prvi korak u modelovanju metodom odzivne površine je pronalaženje aproksimativne veze između zavisne promenjive i procesnih parametara. Za dobijanje empirijskih formula koje opisuju eksperimentalne podatke se obično koristi polinom nižeg reda. Ukoliko je moguće uspešno modelovati zavisnu promenjivu linearnom funkcijom, onda se koristi polinom prvog reda. Za ostale slučajeve se koristi polinom višeg reda. Često nije moguće primeniti jednu polinomalnu jednačinu za opisivanje funkcionalne veze između promenjivih u celom opsegu eksperimentalnih podataka. U tom slučaju se može upotrebiti nekoliko modela, od kojih svaki opisuje jedan opseg eksperimentalnih podataka. Cilj upotrebe ovih modela je pronalaženje optimalne kombinacije procesnih parametara, sa svrhom određivanja oblasti u kojoj zavisna promenjiva ima željene vrednosti (*Myers and Montgomery, 1995; Myers et al., 2009*).

3. MATERIJAL I METODE

Eksperimentalni deo ove doktorske disertacije urađen je u najvećem delu na Naučnom institutu za prehrambene tehnologije u Novom Sadu, Univerziteta u Novom Sadu, pri čemu je proces peletiranja sirovina obavljen u pilot pogonu za proizvodnju hrane za životinje, a hemijski i fizički kvalitet sirovina i gotovih proizvoda određen je u laboratorijama instituta. Step en želatinizacije skroba određen je na Tehnološkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu, na katedri za inženjerstvo materijala. Na osnovu eksperimentalnih rezultata formirani su matematički modeli, koji opisuju uticaj variranih procesnih parametara na odzivne veličine u procesu peletiranja.

3.1 Materijal

Osnovne sirovine koje su korišćene u pripremi model smeša za peletiranje su kukuruz, suncokretova sačma i sojina sačma.

U eksperimentima je korišćen kukuruz sorte „NS 300“, uzgajan na teritoriji Vojvodine.

Suncokretove sačme korišćene za pripremu smeša su dopremljene iz uljare „Victoria Oil“ a.d. iz Šida. Za ispitivanja su korišćene tri suncokretove sačme različitog sadržaja proteina: suncokretova sačma 1, sa oko 37 % proteina na s.m, suncokretova sačma 2, sa oko 40 % proteina na s.m i suncokretova sačma 3, sa oko 43 % proteina na s.m. U Tabeli 2 dat je hemijski sastav suncokretovih sačmi korišćenih u procesu peletiranja:

Tabela 2. Hemijski sastav suncokretovih sačmi korišćenih u pripremi smeša

Sadržaj (% na s.m.)	Suncokretova sačma 1	Suncokretova sačma 2	Suncokretova sačma 3
Protein	37,35	40,31	42,68
Pepeo	7,97	8,59	8,26
Sirova vlakna	20,72	19,20	17,76
Mast	2,74	2,82	3,75
Bezazotne ekstraktivne materije	31,22	29,08	27,55

Sojina sačma korišćena za pripremu smeša je nabavljena iz fabrike za preradu soje „Sojaprotein“ a.d. iz Bečeja. U Tabeli 3 dat je hemijski sastav sojine sačme korišćene u eksperimentalnim ispitivanjima:

Tabela 3. Hemijski sastav sojine sačme korišćene u pripremi smeša

Sadržaj (% na s.m.)	Sojina sačma
Protein	47,24
Pepeo	6,18
Sirova vlakna	2,68
Mast	1,29
Bezazotne ekstraktivne materije	42,59

Od osnovnih sirovina napravljeno je 5 smeša, čiji je sirovinski sastav prikazan u Tabeli 4:

Tabela 4. Sirovinski sastav smeša

Sadržaj (% m/m)	Smeša 1	Smeša 2	Smeša 3	Smeša 4	Smeša 5
Kukuruz	100	65	65	65	65
Suncokretova sačma 1	-	35	-	-	-
Suncokretova sačma 2	-	-	35	-	-
Suncokretova sačma 3	-	-	-	35	-
Sojina sačma	-	-	-	-	35

3.2 Tehnološki proces peletiranja

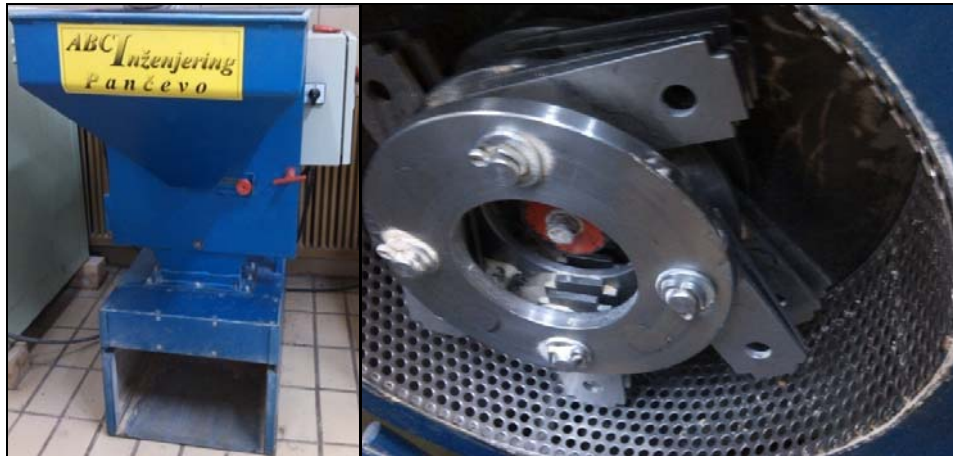
Tehnološki proces peletiranja pripremljenih smeša obavljen je u pilot pogonu za proizvodnju hrane za životinje Naučnog instituta za prehrambene tehnologije u Novom Sadu. Šematski prikaz linije za proizvodnju peleta prikazan je na Slici 14.



Slika 14. Šematski prikaz linije za proizvodnju peleta.

Za mlevenje kukuruza korišćen je laboratorijski mlin čekićar, Tip 11, „ABC Inženjering“, Pančevo, Srbija (Slika 15). Kukuruz je mleven na 3 različite granulacije, upotrebom sita sa otvorima od 2, 3 i 4 mm. Karakteristike mlina čekićara koji je korišćen u ispitivanjima su sledeće:

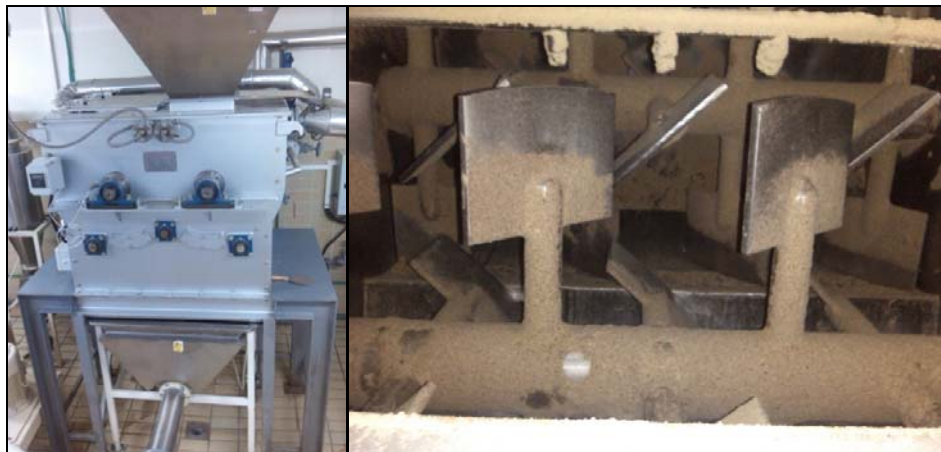
- Kapacitet: 200 kg materijala po času; snaga motora 2,2 kW; frekvencija: 50 Hz; broj obrtaja motora: 2880 o/min; broj komora za mlevenje: 1; prečnik sita: 31 cm; prečnik otvora sita: 3 različita sa otvorima od po 2, 3 i 4 mm; broj tačaka na osovini na kojoj su fiksirani čekići: 4; broj redova čekića: 4; ukupan broj čekića: 16; dužina jednog čekića: 10 cm



Slika 15. Laboratorijski mlin čekićar.

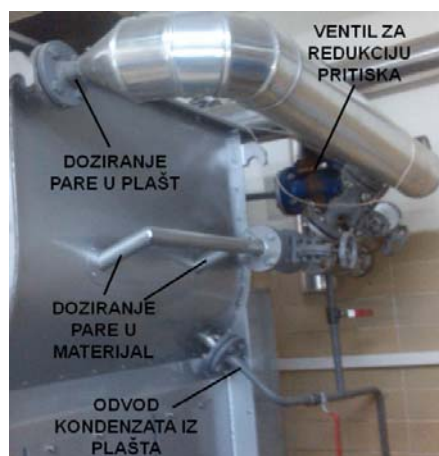
Za mešanje kukuruza samlevenog na mlinu čekićaru i sačmi, koje su dopremljene u već samlevenom obliku, i kondicioniranje smeša sa parom, korišćena je dvoosovinska lopatasta mešalica - kondicioner, sa duplim zidovima (plaštom), i sa vodovima za doziranje pare, SLHSJ0.2, "Muyang", Kina (Slika 16). Karakteristike mešalice su sledeće:

- Kapacitet: 100 kg materijala po šarži; snaga motora 2,2 kW; frekvencija: 50 Hz; vreme mešanja: 90 sekundi; stepen umešanost smeše: $\leq 5\%$; broj osovina: 2; broj lopatica po osovini: 14



Slika 16. Dvoosovinska lopatasta mešalica – kondicioner.

Sirovine su u samlevenom obliku ručno dozirane u mešalicu/kondicioner i mešane 90 sekundi. U smešu je dozirana para pritiska 2 bara kako bi se materijal kondicionirao do dostizanja temperature od 80°C. Materijal zagrejan na 80°C je ispuštan odmah iz kondicionera ili je zadržavan na toj temperaturi u trajanju od 5 i 10 minuta, radi produženog kondicioniranja parom. Da bi se sprečili gubici toplote i obezbedili konstantni uslovi prilikom zadržavanja materijala na željenoj temperaturi, u plašt je dozirana para pritiska 2 bara. Sistem za doziranje pare prikazan je na Slici 17. Za proizvodnju pare korišćen je električni parni kotao, EPK – 100, “Pobeda kotlovi”, Beograd, Srbija.



Slika 17. Sistem za doziranje pare.

Tehničke karakteristike parnog kotla korišćenog za proizvodnju pare su:

- maksimalni kapacitet kotla: 100 kg pare na sat; maksimalna produkcija toplote: 65 kW; ukupno instalisana snaga grejača: 70 kW; radni pritisak: 8 bara; ispitani pritisak: 13 bara; radna temperatura: 170 °C

Kondicionirani materijal je ispušten u koš ispod mešalice/kondicionera, odakle je ručno transportovan do usipnog koša pelet prese. Uz pomoć pužnog izuzimača, materijal je iz usipnog koša ispuštan u komoru pelet prese. Za peletiranje materijala korišćena je pelet presa sa ravnom matricom 14-175, "Amandus Kahl", Nemačka (Slika 18).



Slika 18. Pelet presa sa ravnom matricom.

Materijal je uz pomoć valjaka koji se nalaze na centralnoj osovini raspodeljivan po matrici koja je fiksirana i nalazi se u horizontalnoj ravni. Uz pomoć dva valjka materijal je raspoređen po površini matrice i presovan kroz otvore matrice. Sa donje strane matrice presovan materijal je uz pomoć rotirajućih noževa odsecan u pelete dužine oko 12 mm (Slika 19). Temperatura matrice merena je pomoću otpornog termometra koji je bio prislonjen direktno na bočnu stranu matrice.



Slika 19. Odsecanje peleta na željenu dužinu.

Tehničke karakteristike korišćene pelet prese su sledeće:

- snaga motora 3 kW; broj valjaka: 2; prečnik otvora matrice: 6 mm; dužina otvora matrice: 24 mm; odnos l/d: 4:1; rastojanje valjci-matrica: 0,5 mm; rastojanje noževi-matrica: 15 mm; brzina obrtanja osovine sa valjcima i noževima: 136 obrtaja/minut; protok materijala: 18 kg/h

Tople pelete su dozirane uz pomoć vibrodozatora u vibro sišnicu/hladnjak (model FB 500x200, "Amandus Kahl", Nemačka) gde su hladene 10 minuta. Tehničke karakteristike vibro sušnice/hladnjaka su:

- širina i dužina dehidratora: 500 mm i 2000 mm; broj otvora za inspekciju: 3; broj vibromotora: 2; snaga vibromotora: 2 x 0,3 kW; temperatura vazduha za hlađenje: 25°C; protok materijala: 18 kg/h

3.3 Metode za fizičko-hemijske analize sirovina i peleta

Vlažnost materijala je određena po AOAC 950.46 metodi za određivanje sadržaja vlage, sušenjem na 103 ± 2 °C u sušnici, do konstantne mase (AOAC, 2000). Sadržaj sirovih proteina određen je preko Kjeldahl metode (AOAC, 2000). Sadržaj sirove masti određen je uz pomoć uređaja za ekstrakciju (Soxtec System

HT, model 1043 Extraction unit, „Foss Tecator AB“, Švedska) prema proceduri proizvođača i AOCS Ba 3-38 metodi ekstrakcijom uz pomoć petroletra na 80°C (AOCS, 2001). Sadržaj sirovog pepela određen je AOAC 942.05 metodom, dok je sadržaj sirovih vlakana određen AOAC 978.10 metodom (AOAC, 2000).

Moć upijanja vode eksperimentalnih smeša je određena centrifugisanjem suspenzije, koja se sastojala od 0,5 g smeše i 10 ml destilovane vode, na brzini od 4000 obrtaja/minut, u trajanju od 10 minuta na sobnoj temperaturi. Nakon centrifugisanja supernatant je dekantovan i masa ostatka je izmerena. Moć upijanja vode je izražena kao zapremina apsorbovane vode (cm³) na masu materijala od 1 grama (Sosulski, 1962).

Granulometrijski sastav eksperimentalnih smeša je određen na Endecottsovom slogu sita sa automatskom tresilicom, a prema metodi ASAE standard S319.3 (ASAE, 2003). Za granulometrijsku analizu korišćena su sita sledećeg promera: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,630 mm, 0,800 mm, 1,000 mm, 1,250 mm, 2,000 mm i 2,500 mm. Veličina čestica izražena je preko geometrijskog srednjeg prečnika, a širina raspodele veličine čestica preko geometrijske standardne devijacije. Geometrijski srednji prečnik i geometrijska standardna devijacija su izračunati preko sledećih relacija:

$$d_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum (W_i \log d_i)}{\sum W_i} \right] \quad /9/$$

$$S_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum W_i (\log d_i - \log d_{gw})^2}{\sum W_i} \right]^{0,5} \quad /10/$$

gde su:

d_{gw} – geometrijski srednji prečnik (μm),

S_{gw} – geometrijska standardna devijacija (1),

d_i – promer i-tog sita u slogu (μm),

W_i – masa materijala na i-tom situ u slogu (g).

Temperatura toplih peleta merena je odmah na izlazu iz pelet prese. Temperatura je merena uz pomoć kontaktnog termometra, model DM-9231A, "Transfer Multisoft Elektronik", Poljska).

Specifična potrošnja energije u procesu peletiranja je izračunata preko sledeće relacije:

$$E_{sp} = \frac{E - E_0}{Q} * 1000 \quad /11/$$

gde su:

E_{sp} – specifična potrošnja energije u procesu peletiranja (kW/t/h),

E – potrošnja energije pri peletiranju materijala (kW),

E_0 – potrošnja energije za rad pelet prese bez peletiranja materijala (kW),

Q – protok materijala (kg/h).

Udeo prašine u peletama na izlazu iz pelet prese je određen prosejavanjem toplih peleta na situ promera 4,8 mm. Udeo prašine je određen množenjem odnosa mase frakcije propada i početne mase toplih peleta sa 100 i izražen je u procentima.

Želatinizacija skroba je određena metodom diferencijalne skenirajuće kalorimetrije. Ovo je termoanalitička metoda pomoću koje se razlika u količini toplote potrebnoj za povećanje temperature merenog i referentnog uzorka meri u funkciji od temperature. Za ovu svrhu se koristi uređaj koji se naziva diferencijalni skenirajući kalorimetar, koji povezuje temperature i protoke toplote sa toplotnim promenama u materijalu. Za merenje želatinizacije skroba u eksperimentalnim uzorcima korišćen je diferencijalni skenirajući kalorimetar model Q20, TA Instruments, Velika Britanija. Pelete su samlevene da mogu da prođu kroz sito promera 0,5 mm. Jedan deo uzorka pomešan je sa dva dela vode. Posle 30 minuta 15 mg suspenzije zagrevano je od 10 do 150°C sa inkrementima od 10°C/minut. Kao referentni uzorak korišćeno je silikonsko ulje. Vrednosti entalpije su određene uz pomoć kompjuterskog integratora za inverzne pikove, a procenat želatinizacije skroba izračunat je na bazi razlike u entalpijama između termički netretiranog i peletiranog uzorka:

$$EG = \frac{h_0 - h}{h_0} * 100$$

/12/

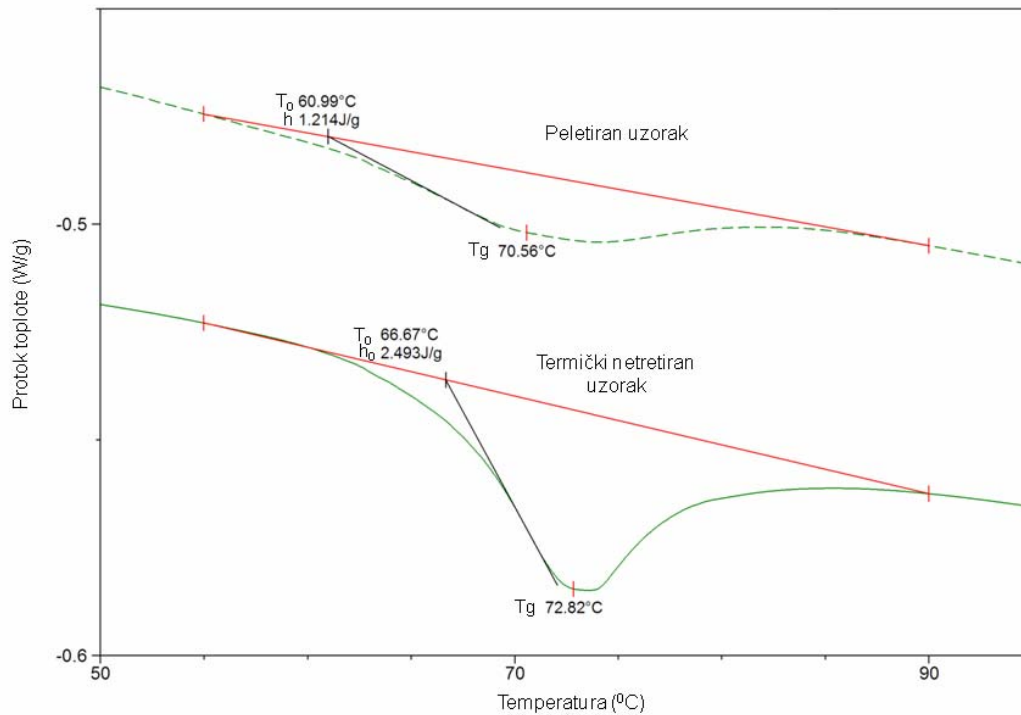
gde su:

EG – stepen želatinizacije (%),

h_0 – entalpija termički netretiranog uzorka (J/g),

h – entalpija peletiranog uzorka (J/g).

Za izračunavanje entalpije određena je temperatura na kojoj se taj proces dešava (T_g), kao i inicijalna („onset”) temperatura (T_0), koja predstavlja tačku preseka tangente na prvu polovinu pika i bazne linije (Slika 20).



Slika 20. Primer DSC termograma.

Za razdvajanje proteina i određivanje promena na proteinima u toku procesa peletiranja korišćena je metoda čip elektroforeze (eng. Lab-on-a-Chip (LoaC) electrophoresis). Separacijom polipeptida i određivanjem njihove molekulske mase,

uz pomoć ove metode se mogu videti razlike u njihovoj veličini i koncentraciji. Pre razdvajanja proteina, izvršena je ekstrakcija rastvorljivih proteina iz uzoraka. Ispitivani peletirani uzorci su usitnjeni i 30 mg uzorka rastvoreno je u 175 μ l ekstrakcionog pufera (0.125 M Tris-HCl pri pH 6,8, koji sadrži 10 % β -merkaptetoetanol, 4 % Na-dodecil sulfata i 20 % glicerola) i 175 μ l H₂O. Uzorci su toplotno denaturisani na 100°C u trajanju od 5 min, zatim ostavljeni na sobnoj temperaturi u trajanju od 20 min i promešani. Talog iz uzoraka je uklonjen centrifugisanjem pri 12000 G u trajanju od 15 minuta na sobnoj temperaturi. Supernatant, koji sadržao rastvorljive proteine iz uzoraka je upotrebljen za elektroforetsko razdvajanje (Torbica et al., 2010). Razdvajanje frakcija proteina na osnovu njihove mase je obavljeno na uređaju Agilent 2100 bioanalyzer („Agilent Technologies“, SAD) uz korišćenje „Protein 230 Plus Lab Chip“ kita. Detekcija uzoraka je omogućena pomoću laserskog fluorescentnog detektora, u intervalu talasnih dužina od 670-700 nm, u toku 45 sekundi. Kvalitativna analiza proteina je urađena određivanjem molekularnih masa razdvojenih frakcija proteina, a kvantitativna određivanjem koncentracije svake od definisanih proteinskih frakcija. Opseg molekularnih masa ispitivanih proteinskih frakcija bio je u opsegu od 4,5 do 240 kilo-Daltona (kDa). Poređenjem sastava i koncentracije proteina peletiranih i termički netretiranih uzoraka opisan je uticaj procesa peletiranja na proteinsku frakciju smeše.

Prečnik peleta određen je pomičnim kljunastim merilom.

Tvrdoća peleta je određena dijametralnom kompresijom uz pomoć analizatora teksture, model TA.HDPlus, „Stable Micro Systems Ltd“, Velika Britanija. Iz svake šarže uzeto je po petnaest peleta dužine oko 12 mm, a određivana je tvrdoća svake pelete pojedinačno. Pelete su postavljene na horizontalno na ravnu podlogu, a zatim pritisnute cilindričnom sondom prečnika 45 mm uz pomoć ćelije za opterećenje od 50 kg. Tvrdoća peleta je određena silom koja je potrebna da izazove lomljenje peleta i izražena je u kilogramima.

Otiranje peleta je određeno na uređaju prema Pfost-u, Bühler, Švajcarska (Pfost, 1963; Thomas and van der Poel, 1996). Ovaj uređaj se sastoji od dve kutije određenih dimenzija u koje je usuto po 500 g peleta koje su prosejane od prašine i sitnijih čestica. Kutije su podvrgnute rotiranju brzinom od 50 obrtaja/minut u trajanju od 10 minuta. Po isteku 10 minuta pelete su ponovo prosejane na situ promera

0,8 x d_{peleta} ((0,8 x 6 mm) = 4,8 mm). Otiranje, tj. abrazija peleta, je izraženo kao udeo prašine nastale posle „tumbanja“ peleta u odnosu na početnu masu peleta i izraženo je u procentima.

3.4 Statistička obrada eksperimentalnih podataka

U eksperimentalnom radu ispitan je uticaj sastava smeše, prečnika otvora sita mlina čekićara i dužine produženog kondicioniranja parom na zavisno promenljive veličine u procesu peletiranja. Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja pripremljeno je 5 različitih smeša. U svakoj smeši je varirana granulacija kukuruza variranjem prečnika otvora sita mlina čekićara (2, 3 i 4 mm). Smeše su kondicionirane pri tri različite dužine trajanja procesa produženog kondicioniranja parom (0, 5 i 10 min). Ukupan broj testova bio je 45 (5 x 3 x 3).

Za definisanje uticaja granulacije kukuruza i dužine trajanja procesa produženog kondicioniranja parom na promenu odzivnih veličina sistema, u okviru smeša sa dodatom suncokretovom sačmom, korišćena je metoda odzivne površine (*eng. Response Surface Methodology*). Korišćen je potpuni faktorijalni plan sa tri faktora, koncentracijom proteina (X_1), prečnikom otvora sita (X_2) i vremenom produženog kondicioniranja parom (X_3), na tri nivoa (Tabela 5). Potpuni faktorijalni plan se preporučuje za inicijalna ispitivanja i za određivanje glavnih efekata i interakcija (*Lazić, 2004*).

Na osnovu eksperimentalnih podataka formirane su funkcije koje pokazuju zavisnost odzivnih veličina od dva varirana faktora. Za dobijanje empirijskih formula na osnovu eksperimentalnih podataka korišćen je polinom drugog stepena:

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum \beta_{ki} X_i + \sum \beta_{kii} X_i^2 + \sum \beta_{kij} X_i X_j \quad /13/$$

gde su:

Y_k – odziv zavisne promenljive,

β_{kij} – regresioni koeficijenti,

X_1 – prečnik otvora sita,

X_2 – vreme produženog kondicioniranja parom.

Tabela 5. Potpuni faktorijalni plan za metodu odzivne površine

Br. eksp. (br. šarže)	Kodirane vrednosti			Ulazne veličine		
	X ₁	X ₂	X ₃	C _{prot} (%)	D (mm)	t (min)
1 (10)	-1	-1	-1	18,1	2	0
2 (11)	-1	-1	0	18,1	2	5
3 (12)	-1	-1	1	18,1	2	10
4 (13)	-1	0	-1	18,1	3	0
5 (14)	-1	0	0	18,1	3	5
6 (15)	-1	0	1	18,1	3	10
7 (16)	-1	1	-1	18,1	4	0
8 (17)	-1	1	0	18,1	4	5
9 (18)	-1	1	1	18,1	4	10
10 (19)	0	-1	-1	19,1	2	0
11 (20)	0	-1	0	19,1	2	5
12 (21)	0	-1	1	19,1	2	10
13 (22)	0	0	-1	19,1	3	0
14 (23)	0	0	0	19,1	3	5
15 (24)	0	0	1	19,1	3	10
16 (25)	0	1	-1	19,1	4	0
17 (26)	0	1	0	19,1	4	5
18 (27)	0	1	1	19,1	4	10
19 (28)	1	-1	-1	20,1	2	0
20 (29)	1	-1	0	20,1	2	5
21 (30)	1	-1	1	20,1	2	10
22 (31)	1	0	-1	20,1	3	0
23 (32)	1	0	0	20,1	3	5
24 (33)	1	0	1	20,1	3	10
25 (34)	1	1	-1	20,1	4	0
26 (35)	1	1	0	20,1	4	5
27 (36)	1	1	1	20,1	4	10

Sledeći statistički pokazatelji su korišćeni za potvrdu validnosti modela: koeficijent determinacije (R²), koren srednje vrednosti kvadrata greške (RMSE) i srednja greška odstupanja (MBE):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{pre,i} - x_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad /14/$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{pre,i} - x_{exp,i}) \quad /15/$$

gde su:

RMSE – koren srednje vrednosti kvadrata greške,

MBE – srednja greška odstupanja,

$x_{\text{exp},i}$ – eksperimentalno dobijena vrednost,

$x_{\text{pre},i}$ – vrednost izračunata na osnovu predloženog modela,

N – broj merenja,

n – broj konstanti u modelu.

Za odzive je određena značajnost pojedinačnih faktora i njihovih interakcija analizom varijanse (ANOVA) i Tukey HSD testom. Analiza varijanse je korišćena i za poređenje značajnosti razlika između eksperimentalnih rezultata za različite smeše, a iste vrednosti prečnika otvora sita i vremena produženog kondicioniranja parom. Razlike između srednjih vrednosti rezultata sa verovatnoćom od $p \leq 0,05$ su prihvaćene kao statistički značajne razlike, dok su razlike između srednjih vrednosti rezultata sa verovatnoćom u opsegu $0,05 \leq p \leq 0,10$ prihvaćene kao tendencije ka značajnim razlikama. Interval poverenja podešen je na 95 %. Regresiona analiza i analiza varijanse su urađene softverskim paketom *Statistica 10.0*. Optimizacija parametara je rađena pomoću softvetskog paketa *Design-Expert 8.1* pomoću metode željene funkcije.

REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Fizičko-hemijski i granulometrijski sastav eksperimentalnih smeša

U Tabeli 6. prikazani su rezultati ispitivanja fizičko-hemijskog sastava korišćenih smeša.

Tabela 6. Fizičko-hemijski sastav eksperimentalnih smeša

	Smeša 1	Smeša 2	Smeša 3	Smeša 4	Smeša 5
Vlaga (%)	11,30	10,28	11,00	11,31	10,35
Protein (% na s.m.)	7,87	18,10	19,08	20,06	21,42
Sirova vlakna (% na s.m.)	3,45	9,49	8,96	8,46	3,18
Mast (% na s.m.)	4,18	3,33	3,35	3,68	3,17
Pepeo (% na s.m.)	1,49	3,88	3,99	3,91	3,01
Bezazotne ekstraktivne materije (% na s.m.)	83,01	65,20	64,62	63,89	69,22
Skrob (% na s.m.)	71,34	46,49	46,77	45,88	44,59

Sve eksperimentalne smeše korišćene u ovom istraživanju su imale sličnu vlagu, koja se kretala u opsegu od 10,28 do 11,35 %. Smeša 1 se sastojala isključivo od kukuruza, tako da su u njoj od hemijskih komponenata najzastupljenije bezazotne ekstraktivne materije (83,01 %), od čega je najveći deo činio skrob (71,34 %). Sadržaj proteina je iznosio 7,87 %, a masti 4,18 %. Sadržaj sirovih vlakana i pepela u smeši 1 je bio niži u odnosu na sadržaj ovih sastojaka u ostalim smešama, i iznosio je 3,45 %, odnosno 1,49 %. Smeše 2, 3 i 4 imale su približno sličan fizičko-hemijski sastav. Sadržaj proteina se povećavao idući od smeše 2 ka smeši 4 i iznosio je 18,10 %, 19,08 % i 20,06 %. Količina ljuske u smešama uticala je i na sadržaj sirovih vlakana, pa je on iznosio 9,49 % za smešu 2, 8,96 % za smešu 3 i 8,46 % za smešu 4. Smeša 5, u kojoj je sadržaj sojine sačme iznosio 35 %, je očekivano imala visok sadržaj proteina (21,42 %) i nizak sadržaj sirovih vlakana (3,18 %). Poređenjem svih 5 smeša može se zaključiti da je smeša 1 (kukuruz) bila najbogatija skrobom, dok su ostale smeše imale približno jednak sadržaj skroba, jer sačme suncokreta i soje koje čine 35 % tih smeša ne sadrže skrob. Sadržaj proteina

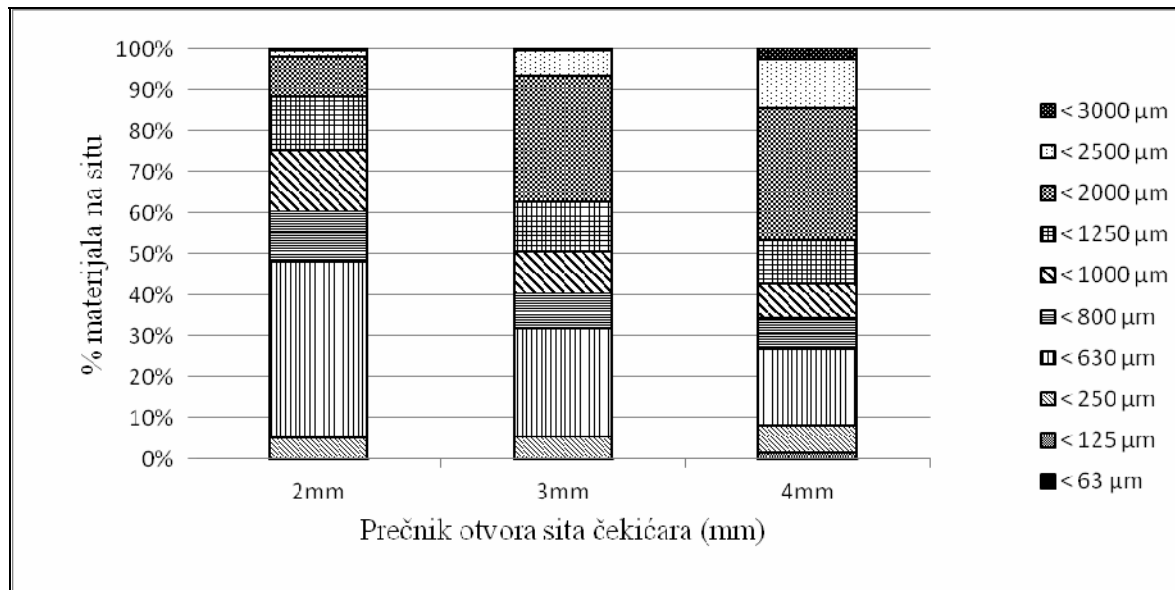
je rastao idući od smeše 1 ka smeši 5. Smeše sa suncokretovom sačmom (smeše 2, 3 i 4) imale su povećan sadržaj sirovih vlakana zbog prisustva suncokretove ljuske. Sadržaj masti se kretao u opsegu od 3,17 % (smeša 5) do 4,18 % (smeša 1).

U Tabeli 7 prikazana je moć apsorpcije vode eksperimentalnih smeša. Najveću moć apsorpcije vode imala je smeša 1 (3,50 cm³/g), zbog velikog sadržaja skroba, koji ima svojstvo da dobro apsorbuje vodu. Smeše sa suncokretovom sačmom (smeše 2-4) imale su najmanju moć apsorpcije vode (2,87-3,03 cm³/g), zbog velikog sadržaja sirovih vlakana, poreklom iz suncokretove ljuske, koja slabo apsorbuje vodu. Moć apsorpcije vode smeše 5 (3,25 cm³/g) je bila veća nego kod smeša 2-4, a manja nego kod smeše 1. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima *Hemmingsen-a et al. (2008)*, koji su utvrdili da žitarice imaju veću moć upijanja vode od sojine sačme, kao i sa istraživanja *Lević and Sredanović, (2012)* koji su pokazali da sojina sačma ima veću moć upijanja vode od suncokretove sačme.

Tabela 7. Moć apsorpcije vode eksperimentalnih smeša

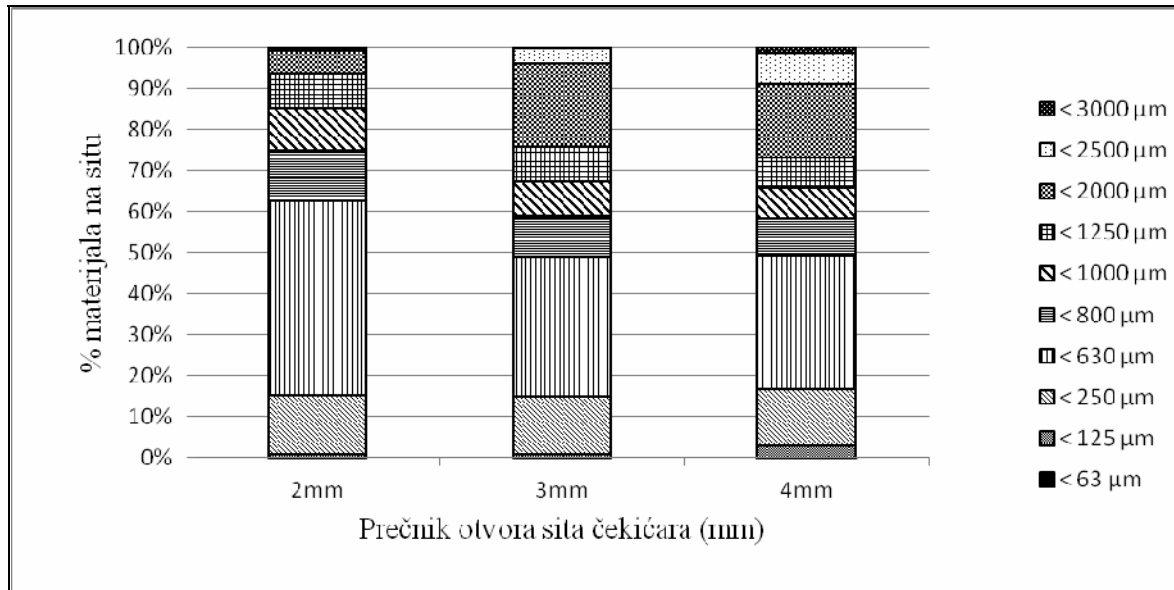
	Smeša 1	Smeša 2	Smeša 3	Smeša 4	Smeša 5
Moć apsorpcije vode (cm ³ /g)	3,50	2,87	2,94	3,03	3,25

Raspodela veličina čestica korišćenih smeša prikazana je na Slikama 21-25, a geometrijski srednji prečnik i geometrijska standardna devijacija eksperimentalnih smeša prikazani su u Tabeli 8. Mlevenjem kukuruza (smeša 1) na situ čekićaru sa prečnikom otvora od 2 mm dobijeno je mlivo sa najvećim udelom (43,11 %) frakcije koja sadrži čestice koje predstavljaju ostatak na situ od 250 μm (Slika 21). Frakcija čestica veličine manje od 800 μm, frakcija čestica veličine manje 1000 μm i frakcija čestica veličine ispod manje od 1250 μm čine takođe blizu 40,10 % ovog mliva. Povećavanjem prečnika otvora na situ mlina čekićara smanjivao se udeo čestica veličine manje od 630 μm, kao i udeo čestica veličine manje od 1000 μm. Sa druge strane sa povećanjem prečnika otvora sita čekićara očekivano se povećavao sadržaj ostatka na sitima od 2500, 2000 i 1250 μm, što je kod mliva dobijenog mlevenjem na mlinu sa prečnikom otvora sita od 4 mm činilo 46,73 % mliva. Sa povećanjem prečnika otvora sita mlina primećeno je neznatno povećanje udela najsitnijih čestica, karakterističnih za materijal mleven na mlinu čekićaru, za koje pojedini autori smatraju da imaju negativan uticaj na fizički kvalitet peleta (Löwe, 2009).



Slika 21. Raspodela veličina čestica smeše 1.

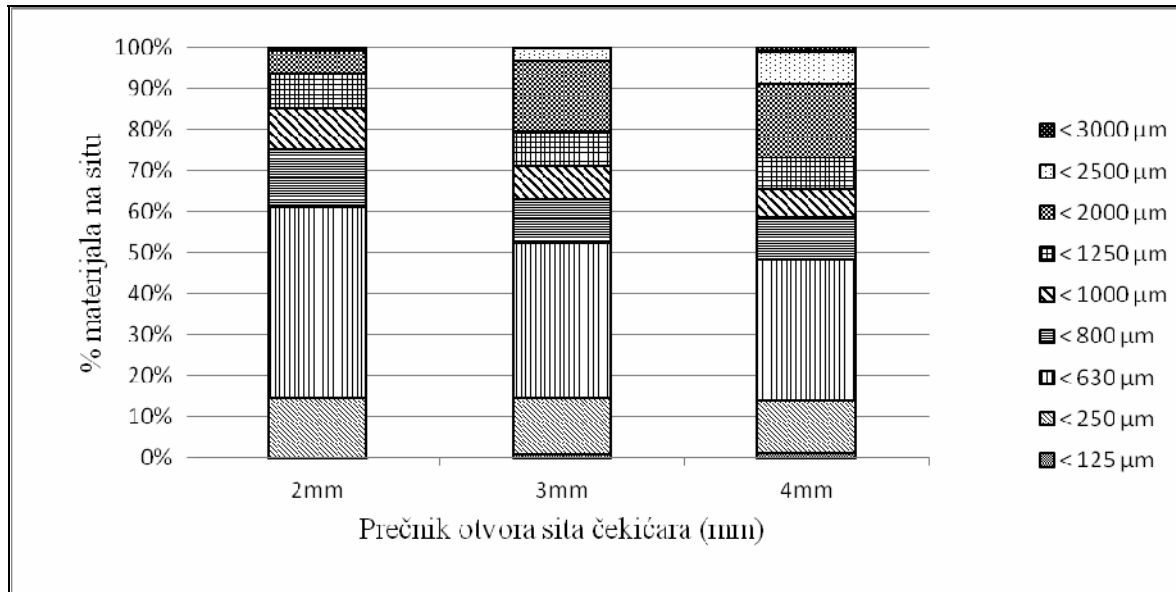
Poređenjem raspodele veličina čestica smeše 2 i smeše 1 može se videti da je kod mliva dobijenog mešanjem suncokretove sačme 1 sa kukuruzom mlevenim na situ čekićaru sa prečnikom otvora od 2 mm došlo do povećanja udela čestica koje predstavljaju ostatak na situ od od 250 μm za 4,12 % (Slika 22). Takođe je povećan udeo čestica koje predstavljaju ostatak na situ od 125 μm sa oko 4,68 % na 14,46 % od ukupne količine mliva. Ova povećanja udela čestica na sitima od 125 i 250 μm su posledica dodatka suncokretove sačme, koja je bila finije granulacije nego kukuruz. Frakcije čestica većih od 630 μm imaju isti međusobni odnos kao i kod smeše 1, s tim što im je udeo u ukupnoj količini mliva za oko 14 % manji. Povećanjem prečnika otvora na situ čekićara i kod smeše 2 je smanjen udeo čestica manjih od 630 μm , a povećan udeo čestica većih od 1250 μm . Ovo je očekivano jer je udeo kukuruza u ovoj smeši 65 %. Takođe je zapaženo povećanje udela najsitnijih čestica (ispod 125 μm), koje je takođe posledica dodatka suncokretove sačme.



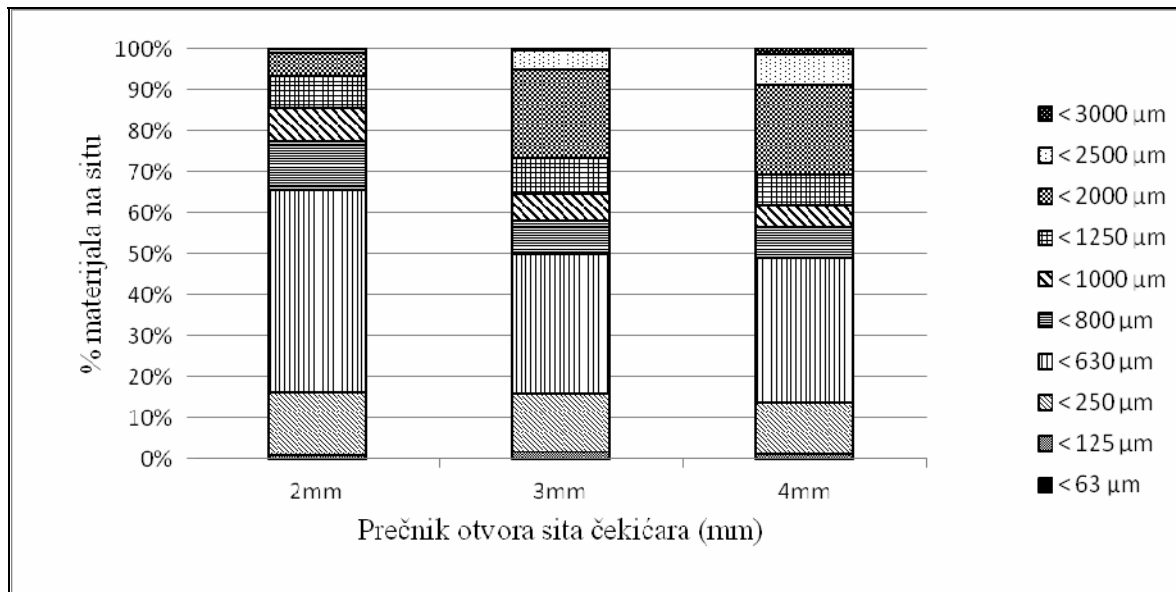
Slika 22. Raspodela veličina čestica smeše 2.

Korišćenje suncokretove sačme u smeši 3, koja je imala manji sadržaj sirovih vlakana u odnosu na suncokretovu sačmu u smeši 2, dovelo je do blagog porasta udela frakcija sa veličinom čestica između 125 i 800 μm (Slika 23), što je posledica smanjenja sadržaja ljuske u ovoj smeši u poređenju sa smešom 2. Povećanje prečnika otvora sita čekićara imalo je sličan efekat kao i kod smeša 1 i 2. Udeo čestica manjih od 125 μm , za prečnik otvora sita čekićara od 4 mm, bio je manji u odnosu na smešu 2, što je takođe posledica dodatka suncokretove sačme finije granulacije u odnosu na smešu 2.

Povećanje sadržaja proteina u smeši 4 izazvalo je dalje povećanje udela čestica koje predstavljaju ostatak na situ od od 250 μm (Slika 24). Povećan je i udeo čestica koje predstavljaju ostatak na situ od 630 μm iz razloga što je sačma 3, koja ulazi u sastav ove smeše, finije granulacije nego sačma 2, jer su sve čestice sačme 3 manje od 1 mm. Povećanje prečnika otvora sita dovelo je do smanjenja udela frakcija čestica manjih od 800 μm i povećanja udela frakcija čestica većih od 1000 μm .



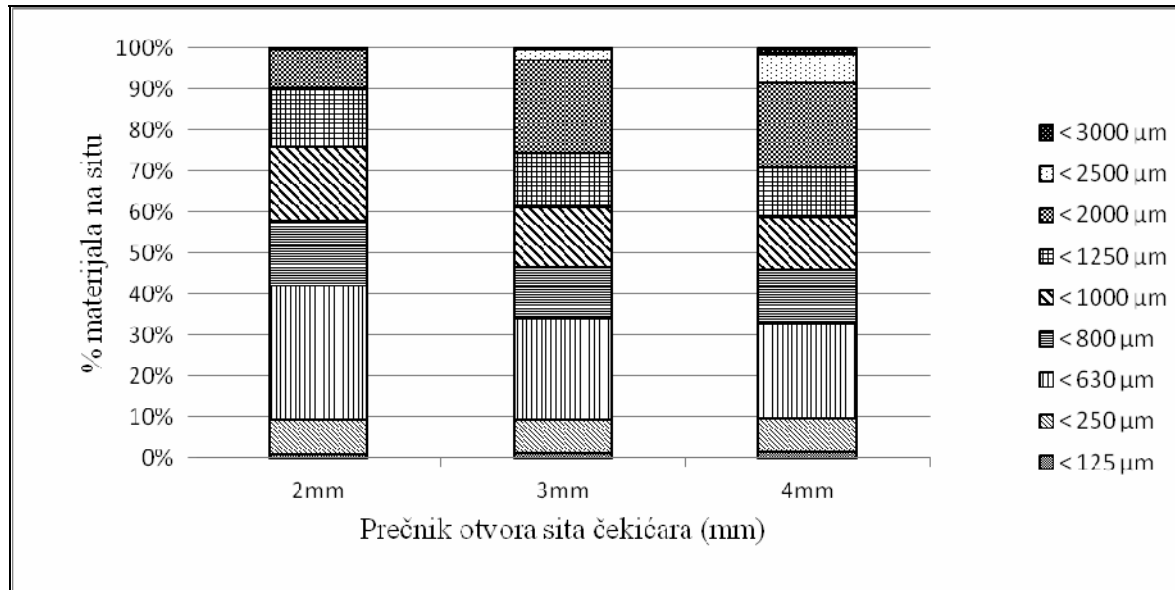
Slika 23. Raspodela veličina čestica smeše 3.



Slika 24. Raspodela veličina čestica smeše 4.

U odnosu na ostale smeše, smeša 5 je imala najmanji udeo frakcije ostatka na situ od 250 μm (Slika 25). Sa druge strane, ova frakcija je količinski bila najzastupljenija u mlivu smeše 5 (32,62 %). Frakcija ostatka na situ od 125 μm je bila zastupljenija u ukupnoj količini mliva u poređenju sa istom frakcijom u smeši 1, a manje zastupljena u poređenju sa ovom frakcijom u smešama 2-4. Obrnut slučaj bio je sa frakcijama koje su sadržavale čestice veće 250 μm , tj. njihov udeo je bio manji

u poređenju sa smešom 1, a veći u poređenju sa smešama 2-4. Ovo se može objasniti veličinom čestica sojine sačme, koja je bila manja u odnosu na veličinu čestica kukuruza, a manja u odnosu veličinu čestica suncokretove sačme.



Slika 25. Raspodela veličina čestica smeše 5.

U Tabeli 8. prikazani su geometrijski srednji prečnici i geometrijske standardne devijacije eksperimentalnih smeša. Poređenjem geometrijskih srednjih prečnika može se videti da se u okviru jedne smeše sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara povećavao i srednji prečnik mliva. Geometrijski srednji prečnik smeše 1 bio je najveći u poređenju sa ostalim smešama. Za smeše sa dodatkom suncokretovom sačmom (smeše 2-4), za isti prečnik otvora sita mlina čekićara, geometrijski srednji prečnik se smanjivao sa povećanjem sadržaja proteina u smeši. Geometrijski srednji prečnik smeše 5 bio je između vrednosti geometrijskog srednjeg prečnika smeše 1 i geometrijskih srednjih prečnika smeša 2-4, zbog dodatka sojine sačme, koja je bila finije granulacije od kukuruza, a krupnije od korišćenih suncokretovih sačmi.

Geometrijska standardna devijacija je merilo varijacije veličina čestica. Ona se kreće u opsegu od 1 do 3. Ukoliko je vrednost geometrijske standardne devijacije 1 to znači da su sve čestice određene smeše potpuno iste veličine, dok vrednost geometrijske standardne devijacije 3 znači da se čestice smeše međusobno potpuno

razlikuju po veličini (Merkus, 2009). Za svih 5 smeša može se videti da povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara dovodi do povećanja geometrijske srednje devijacije, tj. dobija se mlivo koje se sastoji od čestica koje su neujednačenije po veličini. Poređenjem geometrijskih standardnih devijacija za prečnik otvora sita čekićara od 2 mm za različite smeše može se videti da su dobijene približno slične vrednosti. Za prečnike otvora sita čekićara od 3 i 4 mm, geometrijske standardne devijacije smeša sa suncokretovom sačmom (smeše 2, 3 i 4) imaju veće vrednosti u odnosu na čist kukuruz (smeša 1) i smešu sa sojinom sačmom (smeša 5), iz razloga što postoje veće razlike u veličini čestica korišćenih suncokretovih sačmi, u poređenju sa veličinom čestica ostalih sirovina.

Tabela 8. Geometrijski srednji prečnik i geometrijska standardna devijacija eksperimentalnih smeša

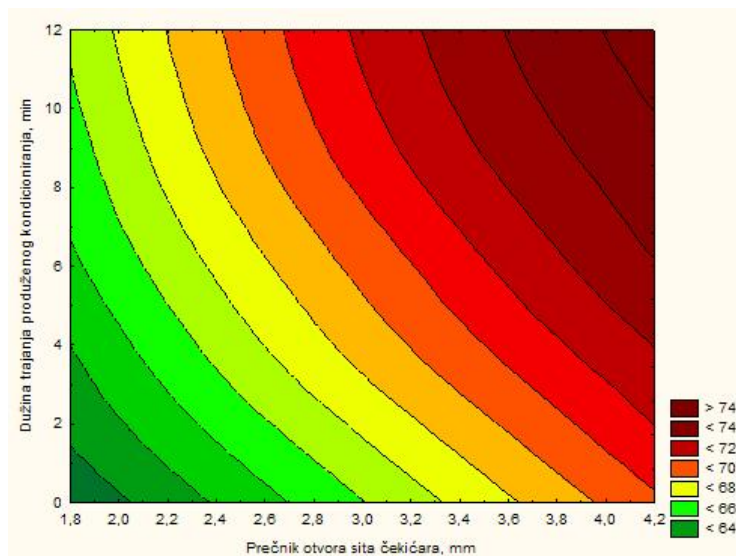
Parametar granulacije materijala	Prečnik otvora sita čekićara	Smeša 1	Smeša 2	Smeša 3	Smeša 4	Smeša 5
d_{gw} (μm)	2 mm	625,26	497,73	487,76	476,46	620,95
	3 mm	839,98	619,01	604,37	588,17	734,75
	4 mm	925,20	659,80	644,44	628,65	769,05
S_{gw} (μm)	2 mm	1,819	1,880	1,867	1,882	1,874
	3 mm	2,019	2,169	2,116	2,257	2,038
	4 mm	2,190	2,350	2,251	2,283	2,123

4.2. Parametri tehnološkog procesa peletiranja

4.2.1 Temperatura matrice pelet prese i temperatura peleta

Promena temperature matrice pelet prese u zavisnosti od tipa smeše, prečnika otvora sita mlina čekićara, kao i vremena produženog kondicioniranja parom prikazana je na Slikama 26-30. Temperaturni profil za smešu 1 (Slika 26) pokazuje da se sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara povećava i temperatura smeše za sva tri vremena produženog kondicioniranja parom. Za materijal koji nije zadržavan u kondicioneru nakon dostizanja temperature od 80°C

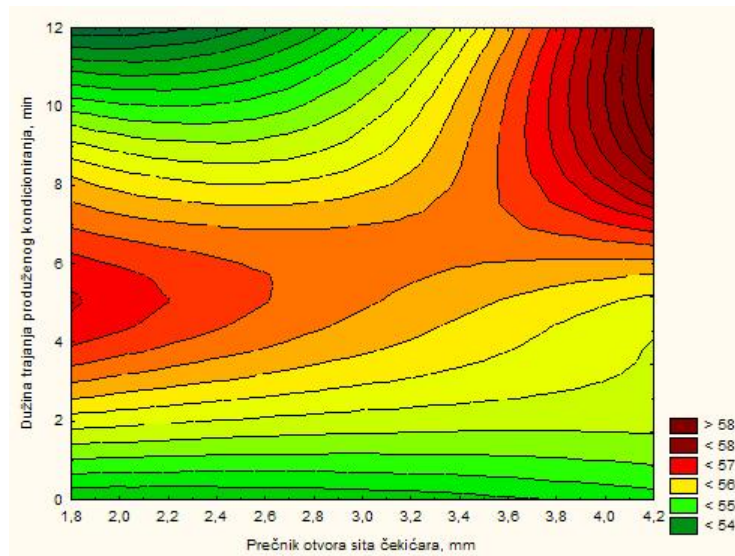
primećen je porast temperature matrice pelet prese sa povećanjem prečnika otvora sita čekićara sa 62,8°C, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm, na 69,1°C, za prečnik otvora sita čekićara od 4 mm (povećanje od 6,3°C). I za ostala vremena produženog kondicioniranja parom primećen je isti trend, pa je tako za vreme produženog kondicioniranja parom od 5 minuta sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara sa 2 na 4 mm temperatura matrice pelet prese povećana za 6,8°C, a za vreme produženog kondicioniranja parom od 10 minuta sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara sa 2 na 4 mm temperatura matrice pelet prese povećana je za 6,9°C. Manje čestice imaju veću specifičnu površinu, a time i veću površinu kontakta sa zidovima kanala matrice, što može da dovede do povećanog trenja, a time i do porasta temperature matrice. Međutim, ovde je primećen obrnuti trend, tj. povećanje temperature je izazvano dodatnim mlevenjem nedovoljno usitnjenih čestica uz pomoć valjaka pelet prese. Prikazani rezultati su u skladu sa rezultatima *Svihus-a et. al (2004)*, koji su peletirali smešu na bazi pšenice koja je mlevena na mlinu čekićaru. Smeša sa pšenicom mlevenom na situ od 6 mm je izazvala veći porast temperature matrice pelet prese nego smeša sa pšenicom mlevenom na situ od 3 mm.



Slika 26. Temperatura matrice pelet prese (°C) pri peletiranju smeše 1.

Vreme produženog kondicioniranja parom je kod smeše 1 takođe imalo uticaja na porast temperature matrice pelet prese. Produženje vremena zadržavanja

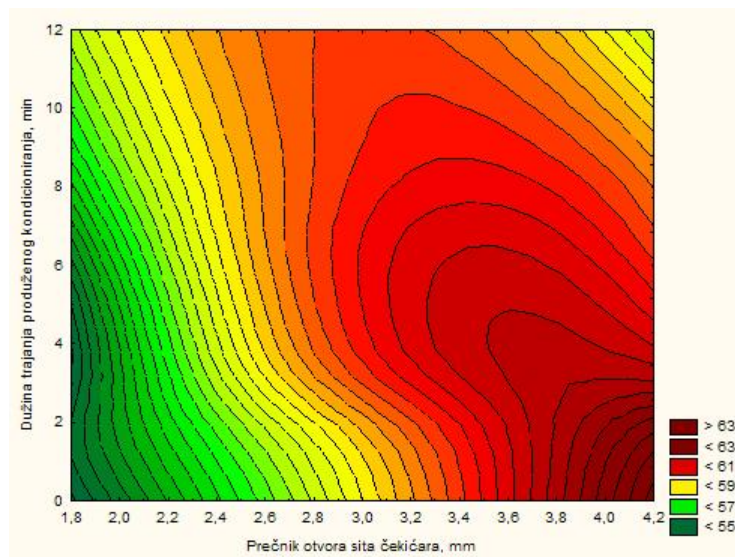
u kondicioneru je dovelo do porasta temperature matrice pelet prese, pa je tako za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm temperatura matrice pelet prese porasla sa 62,8°C, za materijal koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru, na 66,7°C, za materijal koji je naknadno zadržavan u kondicioneru u trajanju od 10 minuta. Takođe, za prečnik otvora sita od 3 mm, a za ista vremena produženog kondicioniranja parom, ove temperature su bile 65,9°C i 70,8°C, dok su za prečnik otvora sita mlina čekićara od 4 mm temperature bile 69,1°C i 73,6°C. Razlog za porast temperature matrice pelet prese sa povećanjem vremena produženog kondicioniranja parom je bolja penetracija vode, koja se posle dodavanja pare nalazila na površini čestica, u unutrašnjost čestica. Smanjenje sadržaja vode, koja ima svojstvo da deluje kao lubrikant na površini čestica, dovodi do povećanja trenja između materijala koji se peletira i zidova kanala matrice, a time i do porasta temperature. *Stivens (1987)*, kao i *Vukmirović et al. (2010)* su primetili da se temperatura matrice povećava sa snižavanjem vlage materijala, jer se kondenzovana para na površini čestica ponaša kao lubrikant, dok su *Gilpin et al. (2002)* prepostavili da su produžetak vremena kondicioniranja parom omogućava bolju penetraciju vode u čestice.



Slika 27. Temperatura matrice pelet prese (°C) pri peletiranju smeše 2.

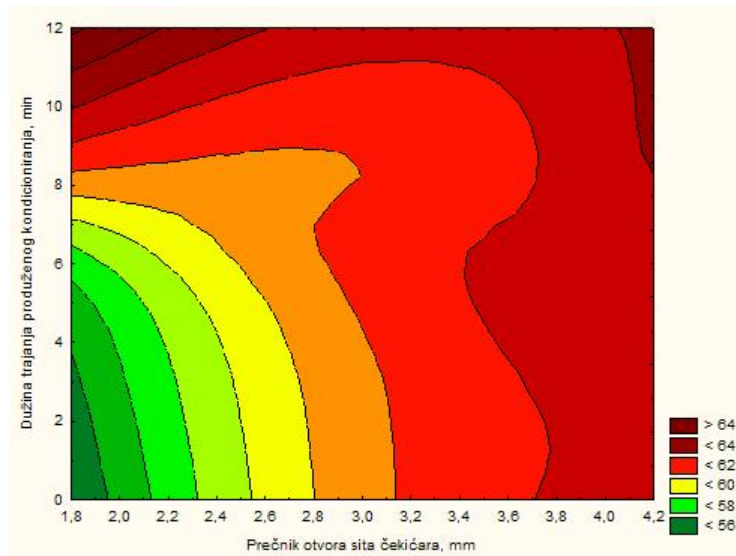
Pri peletiranju smeše 2 temperature matrice pelet prese su bile u veoma uskom intervalu (Slika 27). Minimalna temperatura postignuta pri peletiranju ove smeše je bila 54,3°C, dok je maksimalna temperatura bila 57,7°C. Povećanje

prečnika otvora mlina čekićara materijala izazvalo je blagi porast temperature matrice pelet prese, kao i kod smeše 1. Sa produženjem vremena kondicioniranja parom nije primećen trend porasta temperature, tj. nije postignuta razlika u količini površinske vlage, između ostalog zbog slabije moći apsorpcije vode, što je vodilo do ujednačavanja razlika u temperaturi između tretmana. Takođe, slabija moć apsorpcije vode smeše 2 je jedan od razloga zbog čega su temperature matrice pri peletiranju smeše 2 bile niže u poređenju sa temperaturama matrice pri peletiranju smeše 1.



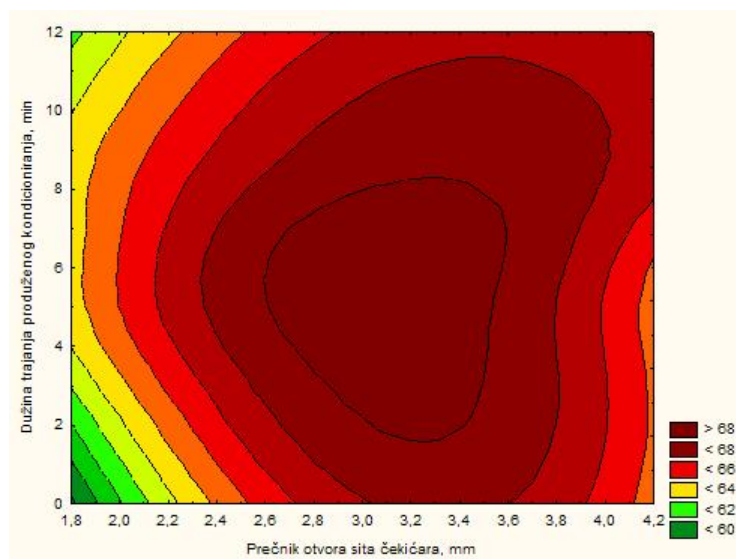
Slika 28. Temperatura matrice pelet prese ($^{\circ}\text{C}$) pri peletiranju smeše 3.

Temperature matrice pelet prese pri peletiranju smeša 3 i 4 idu u prilog pomenutoj tvrdnji (Slike 28 i 29). Povećanje sadržaja proteina i smanjenje sadržaja sirovih vlakana u ovim smešama dovelo je do porasta temperature pelet prese. Kao i pri peletiranju smeše 2, pri peletiranju smeša 3 i 4 primećen je uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na promenu temperature matrice pelet prese, kao i produžetka vremena kondicioniranja parom na porast temperature matrice pelet prese.



Slika 29. Temperatura matrice pelet prese ($^{\circ}\text{C}$) pri peletiranju smeše 4.

Pri peletiranju smeše 5 opseg temperatura matrice pelet prese bio je između $60,0^{\circ}\text{C}$ i $68,7^{\circ}\text{C}$ (Slika 30). Dodatno mlevenje materijala veće granulacije, kao i produžetak vremena produženog kondicioniranja parom na 5 minuta, uslovalo je porast temperature matrice pelet prese. Nije primećena značajna ($p > 0,05$) razlika između temperatura matrice pelet prese za vremena zadržavanja od 5 i 10 minuta.



Slika 30. Temperatura matrice pelet prese ($^{\circ}\text{C}$) pri peletiranju smeše 5.

Srednje vrednosti temperatura matrice pelet prese (za sva tri prečnika otvora sita mlina čekićara i sva tri vremena zadržavanja u kondicioneru) za različite smeše, su bile: 68,3°C, za smešu 1, 55,5°C za smešu 2, 59,1°C za smešu 3, 60,8°C za smešu 4 i 65,7°C za smešu 5. Vrednost srednje temperature matrice za različite smeše se može povezati sa sposobnošću sirovina koje sačinjavaju te smešu da apsorbuju vodu. Smeša jedan, koja se sastojala samo od kukuruza, imala je najveću moć upijanja vode, pa se pri tome usled trenja javila najviša temperatura matrice. Smeše 2-4 imale su najmanju moć upijanja vode, pri čemu je smanjenje prisustva ljuske, koja veoma sporo upija vodu, dovelo do porasta temperature matrice, što je u skladu sa rezultatima *Hemmingsen-a et al. (2008)* i *Lević and Sredanović, (2012)*.

U Tabeli 9. prikazani su rezultati merenja temperatura peleta na izlazu iz pelet prese. Ove temperature su za nekoliko stepeni niže od temperature matrice pelet prese, zbog hlađenja peleta posle izlaska iz kanala matrice pelet prese.

Tabela 9. Temperatura peleta (°C) na izlazu iz pelet prese

Prečnik otvora sita čekićara (mm)	Vreme produženog kondicioniranja (min)	Smeša 1	Smeša 2	Smeša 3	Smeša 4	Smeša 5
2 mm	0	66,4	53,9	55,0	53,0	57,7
	5	64,4	54,5	55,8	56,2	60,5
	10	66,9	53,7	56,8	60,6	59,8
3 mm	0	57,9	53,3	56,4	58,8	62,8
	5	60,0	55,2	59,3	59,8	63,3
	10	60,3	54,4	57,7	60,5	62,9
4 mm	0	62,2	54,0	62,3	61,1	64,0
	5	64,8	54,1	60,1	61,2	65,4
	10	68,5	55,5	58,9	61,5	66,0
Standardna devijacija		3,6	0,7	2,3	2,9	2,7

Očekivano, prikazani rezultati imaju isti trend kao i rezultati koji predstavljaju temperature matrice pelet prese. Kod smeša koje su bolje apsorbivale vodu prilikom kondicioniranja parom primećen je veći uticaj variranih parametara, prečnika otvora sita mlina čekićara i vremena produženog kondicioniranja parom, kao i veći porast

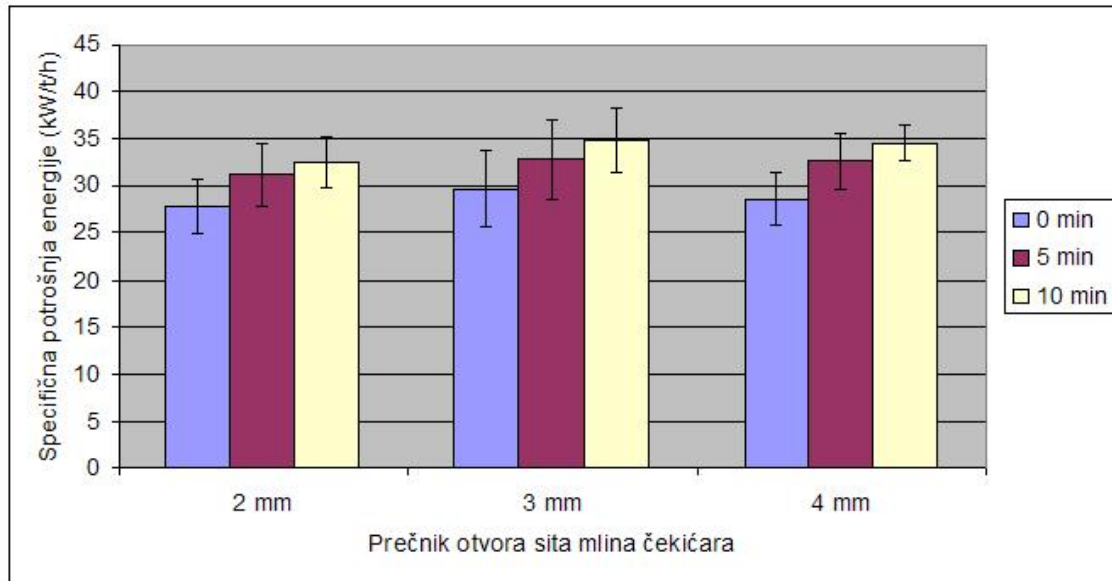
temperature, nego kod smeša sa slabijom moći apsorpcije. Najviša postignuta srednja temperatura peleta je temperatura peleta smeše 1, koja je bila 63,5°C, dok je najniža srednja temperatura bila temperatura peleta smeše 2, koja je iznosila srednja 54,3°C. Uticaj procesnih parametara na promenu temperature izražen je preko standardne devijacije rezultata. Ako se porede rezultati za smeše sa najvišim i najnižim postignutim temperaturama peleta, može se videti da su najveće vrednosti standardne devijacije (3,6°C) postignute kod smeše 1, a najmanje kod smeše 2 (0,7°C). Na osnovu rezultata iz Tabele 9 može se zaključiti da veće vrednosti standardne devijacije označavaju da je uticaj procesnih parametara na promenu temperature peleta bio veći.

4.2.2 Specifična potrošnja energije u procesu peletiranja

Na Slikama 31-35 prikazana je specifična potrošnja energije u procesu peletiranja eksperimentalnih smeša. Na Slici 31 prikazana je specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 1. Sa ove slike se može videti da povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara nije imalo značajnog uticaja na specifičnu potrošnju energije pelet prese. Za materijal koji nije zadržavan u kondicioneru posle dostizanja temperature od 80°C, sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara sa 2 mm na 3 mm, specifična potrošnja energije pelet prese se povećala sa 27,77 kW/t/h na 29,67 kW/t/h, dok je specifična potrošnja energije pelet prese za prečnik otvora sita mlina čekićara od 4 mm, a za isto vreme produženog kondicioniranja parom, iznosila 28,54 kW/t/h. Za vremena produženog kondicioniranja parom od 5 i 10 minuta takođe nije bilo značajnih ($p > 0,05$) razlika između vrednosti specifične potrošnje energije za različite prečnike otvora sita mlina čekićara.

Sa druge strane, iako nije bilo značajnih ($p > 0,05$) razlika između merenih vrednosti, specifična potrošnja energije pelet prese je rasla sa povećanjem vremena produženog kondicioniranja parom. Pri peletiranju materijala mlevenog na mlinu čekićaru sa prečnikom otvora sita od 2 mm primećen je porast specifične potrošnje energije pelet prese sa povećanjem vremena naknadnog zadržavanja u kondicioneru, sa 27,77 kW/t/h, za materijal koji nije produženo kondicioniran, na 32,54 kW/t/h, za vreme produženog kondicioniranja parom od 10 minuta. Za prečnik

otvora sita mlina čekićara od 4 mm specifična potrošnja energije je porasla sa 28,54 na 34,58 kW/t/h.

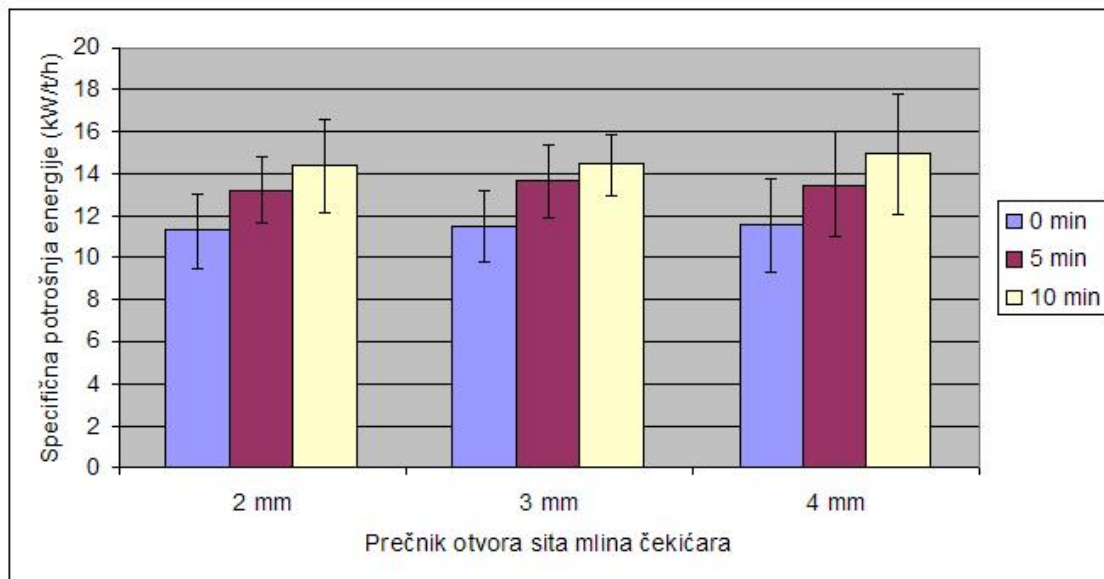


Slika 31. Specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 1.

Razlog povećanja potrošnje energije sa produženjem vremena kondicioniranja parom je povećanje trenja između materijala i zidova kanala pelet prese, kao što je primećeno i pri merenju vrednosti temperature. Uvođenje faze naknadnog zadržavanja u kondicioneru izazvalo je porast specifične potrošnje energije pelet prese, koji se, u poređenju sa potrošnjom energije za kondicioniranje bez naknadnog zadržavanja, kretao od 10 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 3 mm i vreme naknadnog zadržavanja od 5 minuta, do 21 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 4 mm i vreme naknadnog zadržavanja od 10 minuta. Razlika između vrednosti specifične potrošnje energije za vremena zadržavanja od 5 i 10 je bila manja, u poređenju sa vrednostima specifične potrošnje energije pri peletiranju materijala koji nije naknadno zadržavan i koji je zadržavan 5 minuta u kondicioneru.

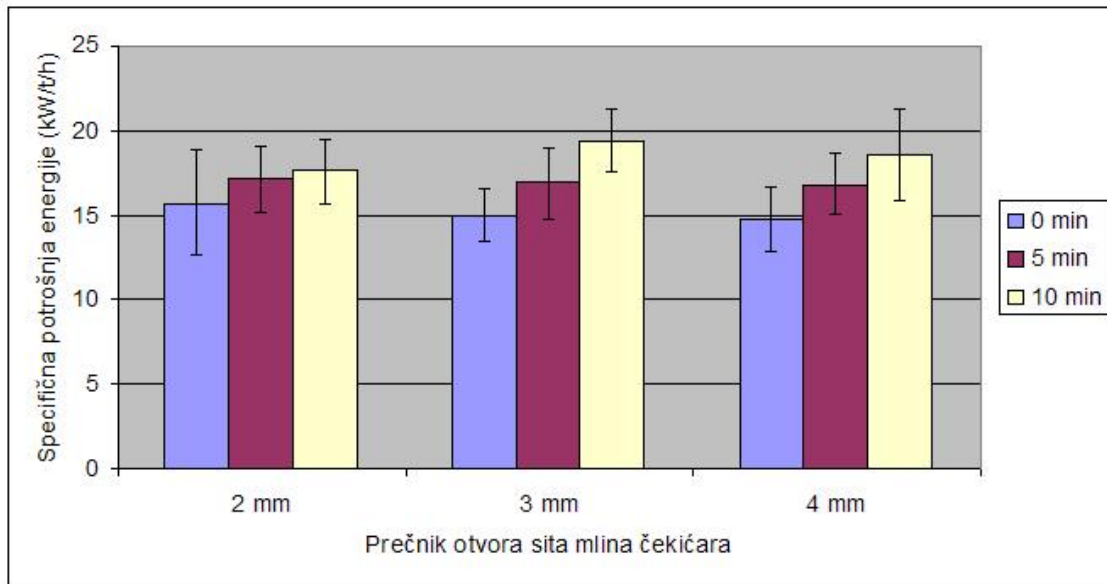
Na Slici 32 prikazana je specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 2. Kao i kod smeše 1, povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara nije imalo uticaja na specifičnu potrošnju energije. Vrednosti specifične potrošnje energije za isto vreme zadržavanja u kondicioneru, a različit prečnik otvora sita mlina čekićara bile su u uskom intervalu. Srednja vrednost standardne devijacije rezultata u okviru istog

vremena produženog kondicioniranja parom bila je $\pm 0,22$ kW/t/h. Sa druge strane, primećen je porast specifične potrošnje energije sa produženjem vremena produženog kondicioniranja parom. Poredeći specifičnu potrošnju energije pri peletiranju materijala koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru i materijala koji je zadržavan u kondicioneru u trajanju od 10 minuta, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm, specifična potrošnja je porasla sa 11,29 na 14,38 kW/t/h. Za isto vreme zadržavanja u kondicioneru za prečnik otvora sita od 3 mm specifična potrošnja energije je porasla sa 11,51 na 14,43 kW/t/h, dok je za prečnik otvora sita od 4 mm specifična potrošnja energije porasla sa 14,74 na 18,56 kW/t/h.



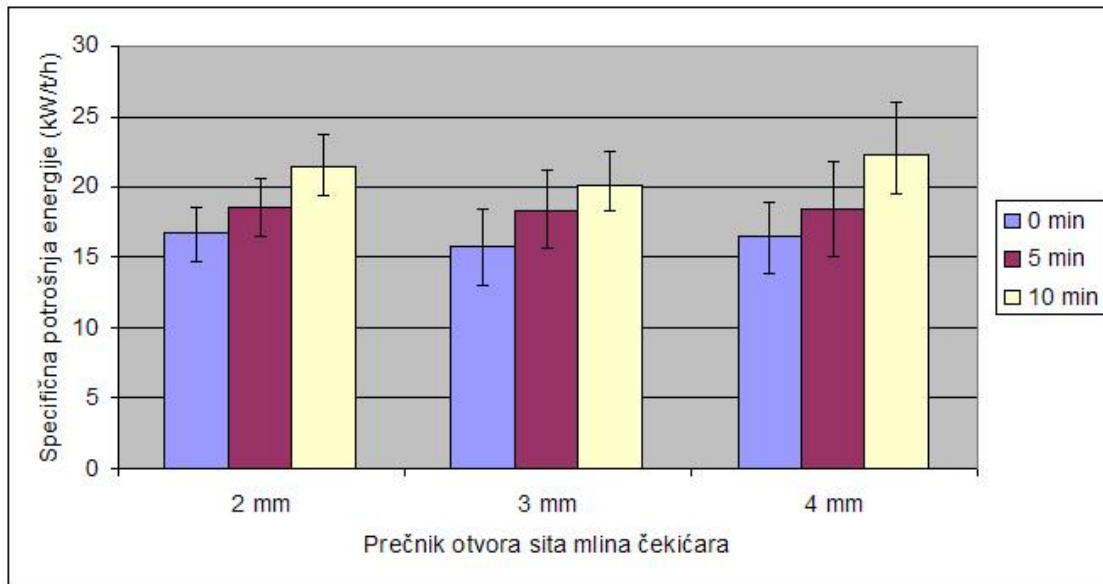
Slika 32. Specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 2.

Specifična potrošnja energije pri peletiranju smeša 3 i 4 prikazana je na Slikama 33 i 34. Pri peletiranju ovih smeša povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara nije dovelo do povećanja specifične potrošnje energije, što se može videti iz srednje vrednosti standardne devijacije rezultata u okviru istog vremena produženog kondicioniranja parom, koja je za smešu 3 iznosila $\pm 0,51$ kW/t/h, a za smešu 4 je iznosila $\pm 0,54$ kW/t/h.



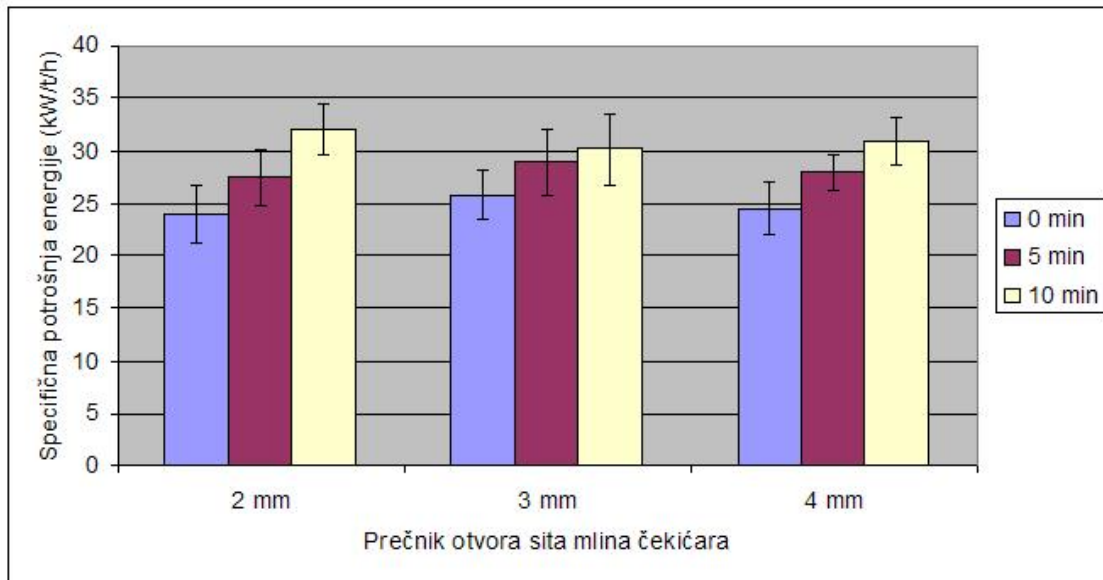
Slika 33. Specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 3.

Povećanjem vremena produženog kondicioniranja parom, usled smanjenja vlage na površini čestica, povećala se specifična potrošnja energije za presovanje takvog materijala. Kod smeše 3, za prečnik sita od 2 mm, povećanje vremena produženog kondicioniranja parom na 5 minuta dovelo je do porasta specifične potrošnje energije sa 15,73 na 17,09 kW/t/h. Produženjem vremena naknadnog zadržavanja u kondicioneru na 10 minuta, specifična potrošnja energije je porasla na 17,58 kW/t/h. Za iste procesne parametre kao i kod smeše 3 (2mm, bez naknadnog zadržavanja u kondicioneru i sa naknadnim zadržavanjem u trajanju od 5 minuta), i kod smeše 4 je došlo do porasta specifične potrošnje energije sa 16,67 na 18,51 kW/t/h, dok je za vreme zadržavanja u kondicioneru od 10 minuta specifična potrošnja energije bila 21,37 kW/t/h. Kod promene sita mlina čekićara prečnika otvora od 3 mm sa sitom prečnika otvora 4 mm takođe je došlo do veće potrošnje energije, pa je tako kod smeše 3 za vreme produženog kondicioniranja parom od 10 minuta specifična potrošnja energije povećana za oko 29 %, za prečnik otvora sita od 3 mm, tj. za oko 26 % za prečnik otvora sita od 4 mm.



Slika 34. Specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 4.

Kao i kod prethodne 4 smeše, prečnik otvora sita mlina čekićara nije značajno ($p > 0,05$) uticao na specifičnu potrošnju energije pelet prese ni pri peletiranju smeše 5 (Slika 35). Srednje vrednosti standardne devijacije rezultata pri peletiranju smeše 5 u okviru istog vremena produženog kondicioniranja parom bile veće u odnosu srednje vrednosti standardne devijacije rezultata pri peletiranju smeša 2-4 i iznosile $\pm 0,94$ kW/t/h za materijal koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru, $\pm 0,77$ kW/t/h za 5 minuta i $\pm 0,92$ kW/t/h za 10 minuta produženog kondicioniranja parom. Međutim, vrednosti specifične potrošnje energije pri peletiranju ove smeše nisu imale jasan trend promene sa promenom prečnika otvora sita mlina čekićara. Uvođenje faze naknadnog zadržavanja u kondicioneru izazvalo je porast specifične potrošnje energije pelet prese pri peletiranju smeše sa sojinom sačmom, koji se, u poređenju sa potrošnjom energije za kondicioniranje bez naknadnog zadržavanja, kretao od 12 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 3 mm, kada je vreme naknadnog zadržavanja bilo 5 minuta, do 33 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm, kada je vreme naknadnog zadržavanja bilo 10 minuta.



Slika 35. Specifična potrošnja energije pri peletiranju smeše 5.

Ako se porede srednje vrednosti specifične potrošnje energije (za sva tri prečnika otvora sita mlina čekićara i sva tri vremena zadržavanja u kondicioneru) za 5 eksperimentalnih smeša, može se videti da one imaju isti trend kao i temperature matrice pelet prese, odnosno temperature peleta. Srednje vrednosti specifične potrošnje energije bile su 29,45 kW/t/h za smešu 1, 13,16 kW/t/h za smešu 2, 16,87 kW/t/h za smešu 3, 18,65 kW/t/h za smešu 4 i 27,95 kW/t/h za smešu 5. Može se videti da je utrošak energije pri peletiranju smeše 2 za oko 50 % manji od utroška energije pri peletiranju smeše 1. Specifična potrošnja energije se može dovesti u vezu sa sposobnošću smeša da apsorbuju vodu. Stoga je utrošak energije pri peletiranju smeša sa sunokretovom sačmom, kao sirovinom koja sporije apsorbuje vodu, bio manji u poređenju sa peletiranjem čistog kukuruza, kao i peletiranjem smeše kukuruza i sojine sačme.

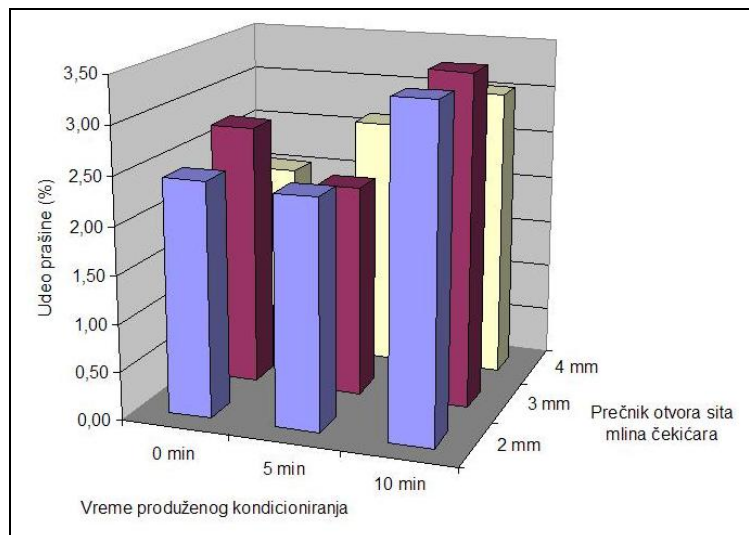
Porast sadržaja proteina, odnosno smanjenja sadržaja sirovih vlakana, u smešama sa suncokretovom sačmom izazvao je smanjenje specifične potrošnje energije u procesu peletiranja. Ovo je u suprotnosti sa rezultatima *Zimonja et al. (2008)*, koji su peletirali smeše na bazi pšenice i ovsa, i ispitivali uticaj dodatka ljuske ovsa na potrošnju energije u procesu peletiranja. Oni su zaključili da dodatak ljuske ovsa nije imao uticaja na specifičnu potrošnju energije pelet prese.

Ako se poredi potrošnja energije pri peletiranju smeša 1 i 5 može se videti da

dodatak sojine sačme uticao na smanjenje specifične potrošnje energije. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima *Briggs-a et al. (1999)*.

4.2.3 Udeo prašine u peletama

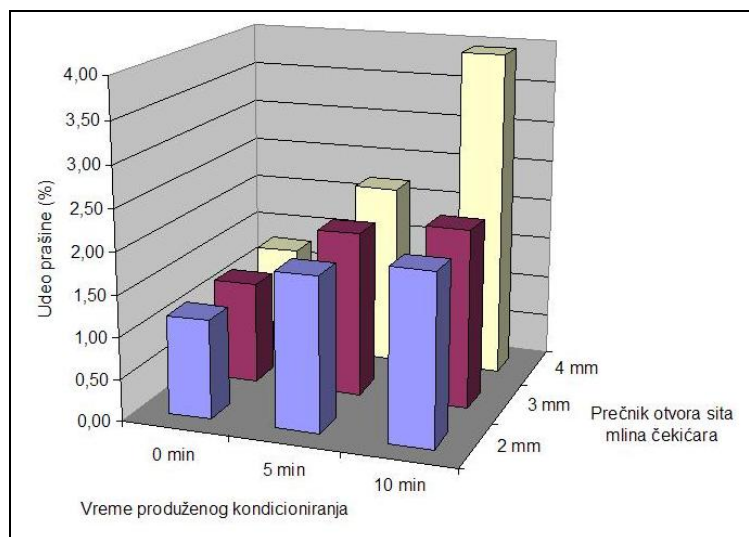
U proizvodnom procesu, pelete se moraju prosejati i prašina koja je izdvojena iz peleta mora se vratiti natrag u proizvodni proces. Povećanje udela prašine u peletama utiče na smanjenje kapaciteta proizvodnje i povećanje potrošnje energije po jedinici mase proizvoda. Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 1 prikazan je na Slici 36. Udeo prašine u peletama kretao se u opsegu od 2,04 do 3,45 %. Kod sva tri prečnika otvora sita mlina čekićara, najveći udeo prašine izmeren je za najduže vreme zadržavanja posle dostizanja maksimalne temperature kondicioniranja parom (vreme zadržavanja od 10 minuta). Nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na udeo prašine u peletama. Srednja vrednost udela peleta za prečnik otvora na situ mlina čekićara prečnika otvora od 2 mm bila je 2,74 %, za prečnik otvora od 3 mm bila je 2,80 %, dok je za prečnik otvora od 4 mm bila 2,57 %.



Slika 36. Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 1.

Na Slici 37 prikazan je udeo prašine u peletama na izlazu iz pelet prese pri peletiranju smeše 2. Pri peletiranju ove smeše primećen je porast udela prašine u

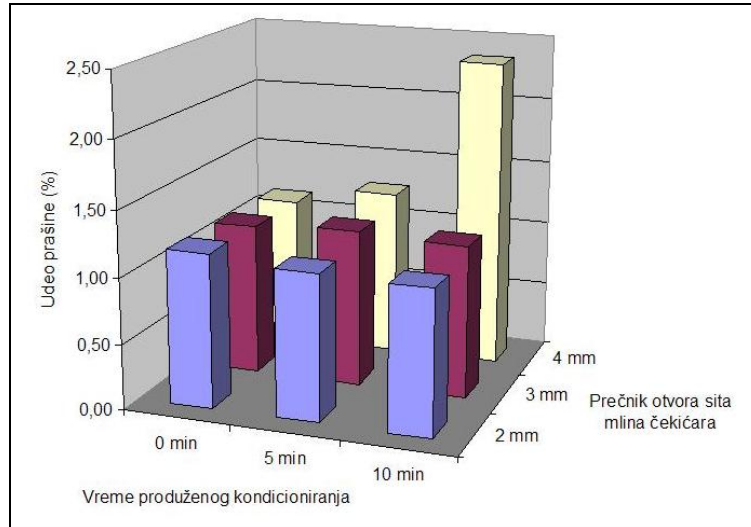
peletama sa produženjem vremena zadržavanja u predkondicioneru za sva tri prečnika otvora sita mlina čekićara. Ovi rezultati su u suprotnosti sa rezultatima *Briggs et al. (1999)*, kod kojih se udeo prašine smanjivao sa produženjem vremena kondicioniranja parom (sa 5 na 15 sekundi). Razlog za to je mnogo duže vreme zadržavanja u kondicioneruu ovom istraživanju, koje je uticalo na smanjenje površinske vlage, koja posredstvom kohezionih sila povezuje čestice u peleti (Rumpf, 1962; Pietsch, 2002). Sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara povećan je udeo prašine u peletama, iako ne značajno ($p > 0,05$).



Slika 37. Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 2.

Na Slici 38 prikazan je udeo prašine u peletama na izlazu iz pelet prese pri peletiranju smeše 3. Produženje vremena kondicioniranja parom je pri peletiranju ove smeše uticalo na povećanje udela prašine u peletama samo kod prečnika otvora sita mlina čekićara od 4 mm. Prečnik otvora sita mlina čekićara nije pokazao jasan uticaj na udeo prašine u peletama ove smeše. Poređenjem srednjih vrednosti udela prašine za prečnike otvora sita od 2 i 3 mm ($1,12 \pm 0,04$ % i $1,17 \pm 0,02$ %) može se videti da su one veome bliske. Za prečnik otvora sita od 4 mm povećana vrednost udela prašine je dobijena samo za zadržavanje materijala u kondicioneru u trajanju od 10 minuta, dok su vrednosti udela prašine za materijal koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru i materijal koji je naknadno zadržavan u trajanju od 5 minuta približno bliske vrednostima za prečnike otvora sita mlina čekićara od 2 i

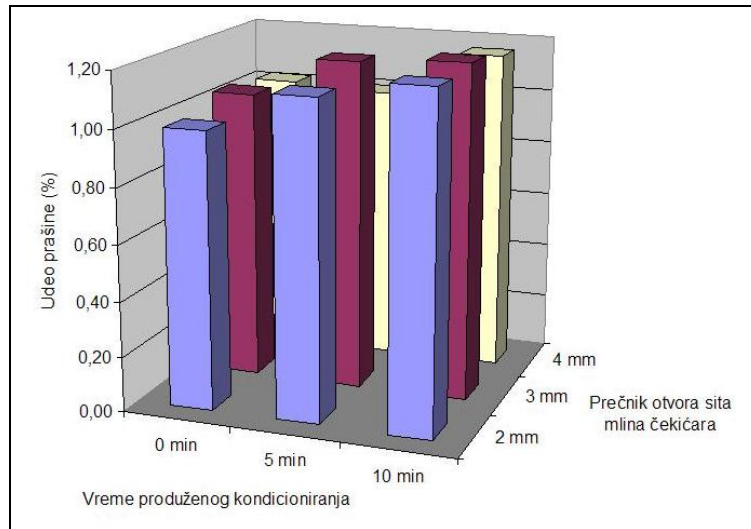
3 mm, pa je tako srednja vrednost udela prašine za ovaj prečnik otvora sita $1,59 \pm 0,66$ %.



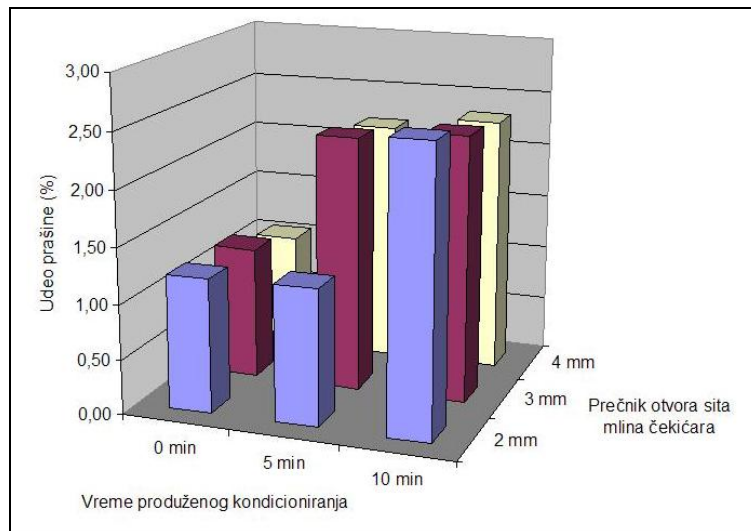
Slika 38. Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 3.

Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 4 (Slika 39) se povećavao sa vremenom produženog kondicioniranja parom, pa je tako najveći udeo prašine izmeren za vreme zadržavanja od 10 minuta. Međutim, vrednosti udela prašine u peletama smeše 4 su i za ostala vremena zadržavanja u kondicioneru bila u jako uskom intervalu vrednosti (od 0,99 do 1,20 %). Prečnik otvora sita mlina čekićara ni kod ove smeše nije pokazao jasan uticaj na kvalitet peleta.

Na Slici 40 prikazan je udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 5. Kod smeše 5 su najveće vrednosti udela prašine dobijene za vreme produženog kondicioniranja parom od 10 minuta. Duže vreme zadržavanja je i ovde uzrokovalo smanjenje površinske vode, koja je zaslužna za uspostavljanje kohezivnih sila između čestica. Prečnik otvora sita mlina čekićara ni kod smeše sa kukuruzom i sojinom sačmom nije imao uticaj na udeo prašine u peletama na izlazu iz pelet prese.



Slika 39. Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 4.



Slika 40. Udeo prašine u peletama pri peletiranju smeše 5.

Ako se porede srednje vrednosti udela prašine (za sva tri prečnika otvora sita i sva tri vremena zadržavanja u kondicioneru) za svih pet smeša, najveće vrednosti udela prašine u peletama su dobijene za smešu 1. Srednja vrednost udela prašine u smeši 1 je iznosila 2,70 %. Smeše 2-4 su imale opadajuće vrednosti udela prašine sa porastom sadržaja proteina, odnosno smanjenjem sadržaja sirovih vlakana. Njihove srednje vrednosti udela prašine su iznosile 1,98 % za smešu 2, 1,29 % za

smešu 3 i 1,10 % za smešu 4. Srednja vrednost udela prašine smeše 5 je iznosila 1,83 %.

Razlog za veliki udeo prašine u peletama smeše 1 je mali sadržaj proteina, koji utiče na bolje povezivanje peleta i visoka apsorpcija vlage kukuruza, tj. nizak sadržaj površinske vlage. Sa druge strane, iako u poređenju sa ostalim smešama smeša 5 ima najveći udeo proteina, povišen sadržaj prašine u peletama je posledica niske površinske vlage.

Opadajuća vrednost udela prašine sa porastom sadržaja proteina, odnosno smanjem sadržaja sirovih vlakana u smešama sa suncokretovom sačmom je pokazatelj da proteini imaju pozitivan uticaj, a nerastvorljiva sirova vlakna iz suncokretove ljuske negativan uticaj na povezivanje čestica u peleti. Temperature matrice pelet prese i peleta, kao i specifična potrošnja energije su pokazali da prisustvo ljuske suncokreta utiče na povećanje površinske vlage, koja može da pozitivno utiče na povezivanje čestica čestica. Međutim, negativan uticaj ljuske, usled njene elastičnosti i otpora kompresiji, je kod smeša sa suncokretovom sačmom bio intenzivniji, nego pozitivan uticaj povećane površinske vlage, na povezivanje čestica u peleti.

4.3. Funkcionalne promene makronutrijenata

4.3.1. Želatinizacija skroba

U procesu peletiranja u određenom stepenu dolazi do želatinizacije skroba. Stepem želatinizacije skroba u peletama od materijala (smeše 1-4), koji je prethodno kondicioniran parom do temperature od 80°C, a zatim peletiran, prikazan je u Tabelama 10-13. Vrednost stepena želatinizacije skroba u peletama od čistog kukuruza (Tabela 10) menjala se u zavisnosti od prečnika otvora sita mlina čekićara i vremena zadržavanja u kondicioneru posle postizanja maksimalne temperature. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara je uticalo na smanjenje stepena želatinizacije skroba. Razlog za smanjenje stepena želatinizacije skroba sa povećanjem prečnika otvora sita je smanjenje temperature matrice pelet prese, koje je bilo najintenzivnije upravo pri peletiranju ove smeše, a toplota i dovoljna vlažnost sredine su preduslovi da dođe do želatinizacije skroba (*Stevnebo, 2006*). Srednja

vrednost želatinizacije skroba u peletama za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm je iznosila 29,94 %, dok je srednja vrednost želatinizacije skroba u peletama za prečnike otvora sita mlina čekićara od 3 i 4 mm iznosila 26,45 i 23,68 %.

Tabela 10. Stepen želatinizacije skroba u peletama – smeša 1

Prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	Vreme produženog kondicioniranja parom (min)	Entalpija - h (kJ/kg)	Stepen želatinizacije skroba (%)
Termički netretiran uzorak		1,593	/
2 mm	0	1,211	23,98
	5	1,159	27,24
	10	0,978	38,61
3 mm	0	1,311	17,70
	5	1,151	27,75
	10	1,053	33,90
4 mm	0	1,278	19,76
	5	1,227	22,98
	10	1,142	28,31
Srednja vrednost		1,168	26,69
Standardna devijacija		0,105	6,60

Produženje vremena zadržavanja u kondicioneru je imalo pozitivan uticaj na stepen želatinizacije skroba. Najveće vrednosti stepena želatinizacije postignute za vreme zadržavanja od 10 minuta: 38,61 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm, 32,90 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 3 mm i 28,31 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 4 mm. Srednja vrednost stepena želatinizacije skroba u peletama (za sva tri prečnika otvora sita mlina čekićara i sva tri vremena zadržavanja u kondicioneru) smeše 1 iznosila je 26,69 %. Ovo je u skladu sa rezultatima drugih autora koji su postigli vrednosti stepena želatinizacije skroba u opsegu od 5 do 30 % za standardno vreme zadržavanja u kondicioneru. Ovi autori objašnjavaju da su razlozi za niske vrednosti stepena želatinizacije umerene temperature i niska vlaga čestica u pocesu peletiranja (< 20%) (Svihus et al., 2004; Abdolahi et al., 2013).

Stepen želatinizacije skroba u peletama smeše 2 prikazan je u Tabeli 11. Približne vrednosti stepena želatinizacije skroba za isto vreme zadržavanja u kondicioneru, a različit prečnik otvora sita mlina čekićara pokazatelj su da prečnik otvora sita nije imao značajan uticaj na stepen želatinizacije skroba. Razlog za to su male razlike između temperatura matrice pelet prese, kao i između temperatura peleta za različit prečnik otvora sita mlina čekićara, pri peletiranju ove smeše.

Tabela 11. Stepen želatinizacije skroba u peletama – smeša 2

Prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	Vreme produženog kondicioniranja parom (min)	Entalpija - h (kJ/kg)	Stepen želatinizacije skroba (%)
Termički netretiran uzorak		1,281	/
2 mm	0	1,139	11,09
	5	1,031	19,52
	10	0,973	24,04
3 mm	0	1,175	8,27
	5	1,069	16,55
	10	0,977	23,73
4 mm	0	1,182	7,73
	5	1,081	15,61
	10	1,010	21,16
Srednja vrednost		1,070	16,41
Standardna devijacija		0,080	6,27

Vreme zadržavanja u kondicioneru je, kao i kod smeše 1, imalo uticaja na stepen želatinizacije skroba. Za materijal koji je samleven na mlinu čekićaru sa prečnikom otvora sita od 2 mm, i koji nije zadržavan u kondicioneru, stepen želatinizacije skroba iznosio je 11,09 %, dok je za isti prečnik otvora sita, a vreme produženog kondicioniranja od 10 minuta stepen želatinizacije skroba iznosio 24,04 %. Za materijal koji je samleven na mlinu čekićaru sa prečnikom otvora sita od 3 mm, stepen želatinizacije skroba u peletama iznosio je 8,27 % za postupak kondicioniranja bez naknadnog zadržavanja, odnosno 23,73 % za postupak kondicioniranja sa naknadnim zadržavanjem od 10 minuta, dok je za prečnik otvora

sita mlina čekićara od 4 mm, a za isto trajanje procesa kondicioniranja želatinizacija skroba povećana sa 7,73 na 21,16 %.

Iz podataka u Tabeli 12 može se videti da je promena stepena želatinizacije u peletama smeše 3 sa promenom vremena zadržavanja u kondicioneru imala isti trend kao i kod smeša 1 i 2, tj. stepen želatinizacije skroba se povećavao sa produženjem vremena zadržavanja. Ukoliko se poredi stepen želatinizacije skroba u uzorcima koji nisu naknadno zadržavani u kondicioneru sa stepenom želatinizacije skroba u uzorcima koji su zadržavani 10 minuta, može se videti da je produženje vremena kondicioniranja dovelo do povećanja stepena želatinizacije skroba kod sva tri prečnika otvora sita mlina čekićara (za 2 mm sa 14,68 na 33,64 %, za 3 mm sa 10,76 na 30,17 %, za 4 mm sa 8,78 na 26,35 %).

Tabela 12. Stepen želatinizacije skroba u peletama – smeša 3

Prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	Vreme produženog kondicioniranja parom (min)	Entalpija - h (kJ/kg)	Stepen želatinizacije skroba (%)
Termički netretiran uzorak		1,412	/
2 mm	0	1,205	14,66
	5	1,114	21,10
	10	0,937	33,64
3 mm	0	1,260	10,76
	5	1,121	20,61
	10	0,986	30,17
4 mm	0	1,288	8,78
	5	1,165	17,49
	10	1,040	26,35
Srednja vrednost		1,120	20,40
Standardna devijacija		0,120	8,48

Veličina prečnika otvora sita mlina čekićara nije imala značajnog uticaja ($p > 0,05$) na stepen želatinizacije skroba, usled manjih razlika između temperatura matrice pelet prese pri peletiranju materijala različite granulacije. Srednje vrednosti stepena želatinizacije skroba za različit prečnik otvora sita mlina čekićara su pokazatelj da, iako razlike između mernih vrednosti nisu značajne, postoji blagi trend

smanjenja stepena želatinizacije, sa povećanjem prečnika otvora sita mlina čekićara: za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm srednja vrednost stepena želatinizacije je iznosila 23,13 %, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 3 mm srednja vrednost stepena želatinizacije je bila 20,51 %, dok je za prečnik otvora mlina čekićara od 4 mm srednja vrednost stepena želatinizacije iznosila 17,54 %.

U Tabeli 13 prikazane su vrednosti stepena želatinizacije skroba u peletama smeše 4 za različit prečnik otvor sita mlina čekićara i različito vreme zadržavanja u kondicioneru. Prečnik otvora sita mlina čekićara ni kod ove smeše nije imao značajan ($p > 0,05$) uticaj na stepen želatinizacije skroba. Sa druge strane, kao i kod smeša 1-3, duže vreme zadržavanja u kondicioneru je dovelo do većeg stepena želatinizacije. Stoga je najveći stepen želatinizacije postignut za vreme zadržavanja od 10 minuta za sve tri smeše.

Tabela 13. Stepen želatinizacije skroba u peletama – smeša 4

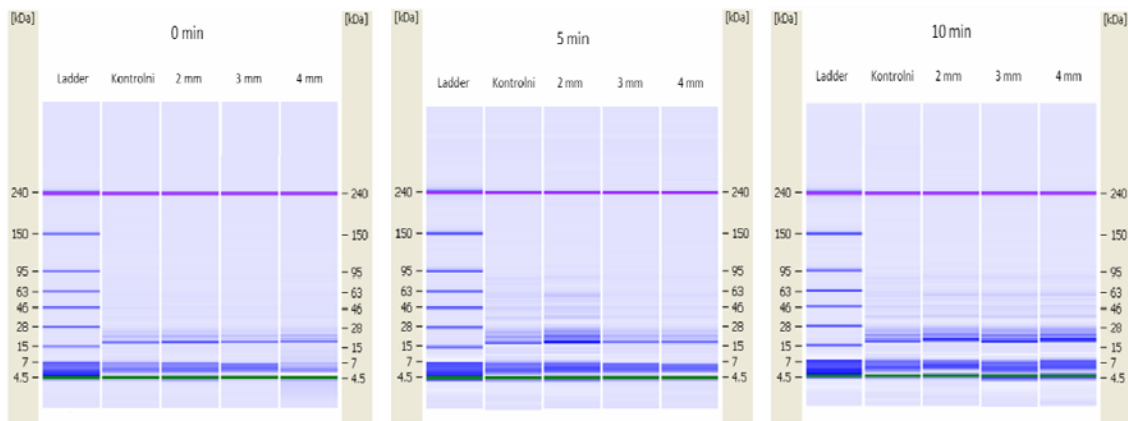
Prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	Vreme produženog kondicioniranja patom (min)	Entalpija - h (kJ/kg)	Stepen želatinizacije skroba (%)
Termički netretiran uzorak		1,446	/
2 mm	0	1,211	16,25
	5	1,139	21,23
	10	0,940	34,99
3 mm	0	1,243	14,04
	5	1,161	19,71
	10	1,008	30,29
4 mm	0	1,267	12,38
	5	1,172	18,95
	10	1,050	27,39
Srednja vrednost		1,130	21,69
Standardna devijacija		0,110	7,66

Poređenjem srednjih vrednosti stepena želatinizacije smeša 1-4 može se videti da je najveći stepen želatinizacije postignut za pelete od čistog kukuruza. Razlog za to je što su najveće temperature matrice pelet prese postignute upravo pri peletiranju čistog kukuruza. Kada se porede smeše sa suncokretovom sačmom,

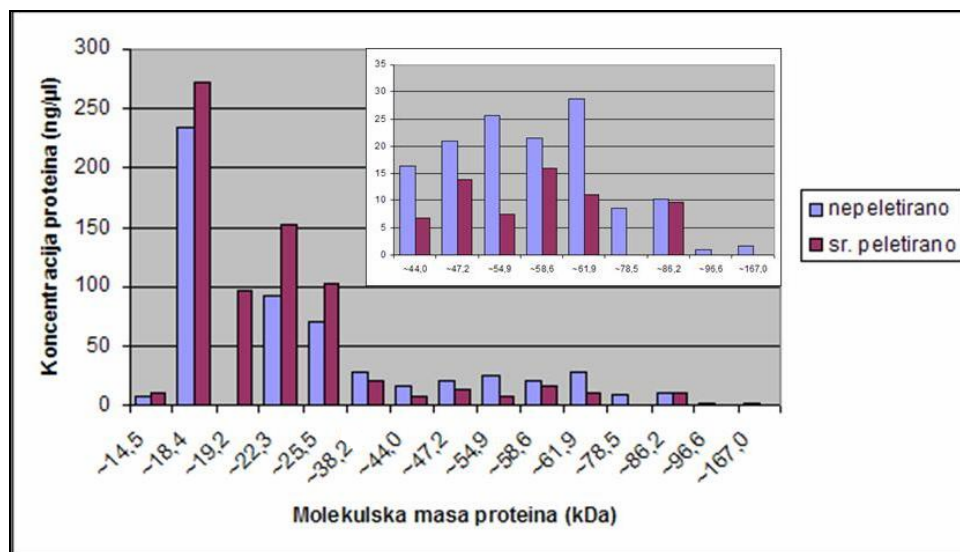
stepen želatinizacije skroba raste sa povećanjem sadržaja proteina i smanjenjem sadržaja sirovih vlakana u smešama. To se može objasniti sa temperaturom matrice pelet prese, koja se povećavala sa povećanjem sadržaja proteina i smanjenjem sadržaja sirovih vlakana u smeši, a koja je uz dovoljnu vlažnost materijala osnovni preduslov za želatinizaciju skroba. Rezultati *Zimonja et al. (2008)* imaju suprotan trend u poređenju sa rezultatima ovog istraživanja. Ovi autori su saopštili da je dodatak ljuske ovsa uticao na povećanje stepena želatinizacije skroba usled toga što je ljuska slabo absorbovala vodu, pa je skrob u smeši imao više vode na raspolaganju. Rezultati peletiranja smeša sa dodatom suncokretovom sačmom (smeše 2-4) pokazuju da je višak vode imao uticao na izjednačavanje temperatura matrice pelet prese za različite prečnike otvora sita, što je imalo uticaja na smanjenje razlika u stepenu želatinizacije skroba.

4.3.2. Strukturne promene proteina

Poređenje kvalitativnog i kvantitativnog sastava proteina peletiranih i nepeletiranih uzoraka za smeše 1-4 prikazano je na Slikama 41-44. Na ovim slikama dat je gel prikaz elektroforetski razdvojenih proteina u nepeletiranom („kontrolni uzorak“) i peletiranim uzorcima (a), kao i histogram koncentracija proteina u nepeletiranom uzorku i srednjih vrednosti koncentracija proteina (svih devet pojedinačnih merenja, koja su dobijena variranjem prečnika otvora sita čekićara i variranjem vremena produženog kondicioniranja parom) u peletiranim uzorcima (b). Na gel prikazu je sa „Kontrolni“ označen nepeletiran uzorak, dok je sa „Ladder“ označen standard, koji se sastoji od proteina poznate koncentracije i veličine. Ovaj standard omogućava kvantifikaciju rezultata, pošto se vrednosti koncentracija proteina u uzorcima određuju u odnosu na vrednosti koncentracije proteina u standardu. Poređenjem različitih frakcija proteina peletiranog kukuruza može se videti da je proces peletiranja uticao na smanjenje frakcija proteina većih od 38,2 kDa (Slika 41). Ovo smanjenje je za npr. frakciju veličine 86,2 kDa, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm i koji je zadržan u kondicioneru u trajanju od 10 minuta, iznosilo 0,81 %, dok je za frakcije proteina veličine 78,5, 96,6 i 167,0 kDa smanjenje iznosilo 100 %, tj. te proteinske frakcije iz početnog uzorka nisu registrovane u peletiranim uzorcima.



(a)



(b)

Slika 41. Slika gela elektroforetski razdvojenih proteina (a) i histogram koncentracija proteina u nepeletiranom uzorku i srednje vrednosti koncentracija proteina u peletiranim uzorcima (b) - smeša 1.

Sa druge strane, u peletiranim uzorcima dolazilo je do povećanja frakcija proteina manjih od 25,5 kDa, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm i koji je zadržan u kondicioneru u trajanju od 5 minuta više nego dvostruko povećana koncentracija proteina za frakciju proteina veličine 18,4 kDa, dok je za frakciju proteina veličine 25,5 kDa povećanje koncentracije proteina u peletiranim uzorcima bilo u opsegu od 3,25 do 123,0 %. Frakcija proteina veličine od 19,2 kDa nije

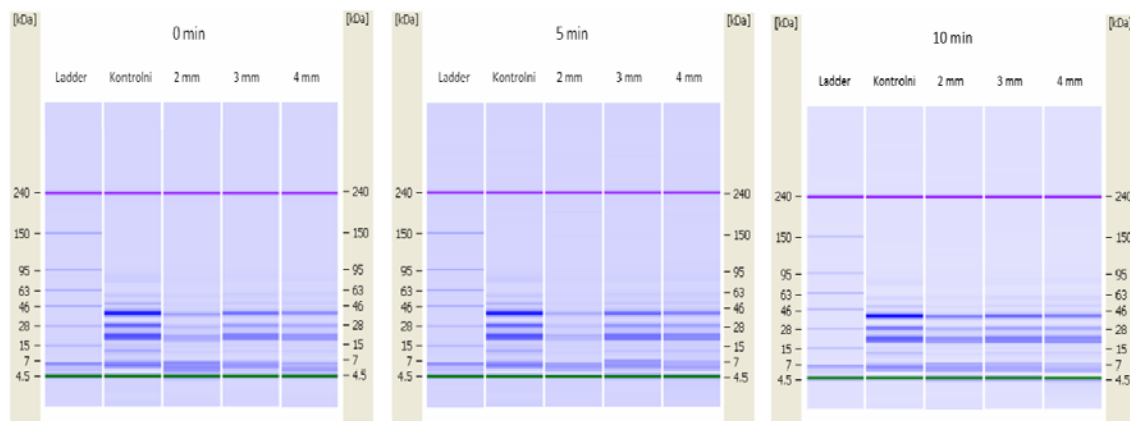
postojala u nepeletiranom uzorku smeše 1, nego je nastala u procesu peletiranja.

Poređenjem frakcija proteina nepeletiranog i peletiranih uzoraka može se videti da je u procesu peletiranja došlo do redukcije frakcija proteina velikih molekulskih masa, koje su se mogle razložiti na frakcije proteina manjih molekulskih masa. Ovo je u skladu sa rezultatima *Malumba et al. (2008)*, koji su sušenjem kukuruza na temperaturama od 54 do 130°C došli do zaključka da pri ovim temperaturama dolazi do denaturacije proteina. *Abdollahi et al. (2013)* i *Thomas et al. (1998)* su saopštili da temperature u procesu peletiranja ne dovode do raskidanja peptidnih veza, tj. do narušavanja primarne strukture proteina, nego samo do narušavanja sekundarne, tercijarne i kvaternerne strukture proteina. *Goelma et al. (1999)* su saopštili da su sile pritiska i smicanja glavni faktor koji utiče na promene na proteinima u procesu peletiranja, a ne temperatura.

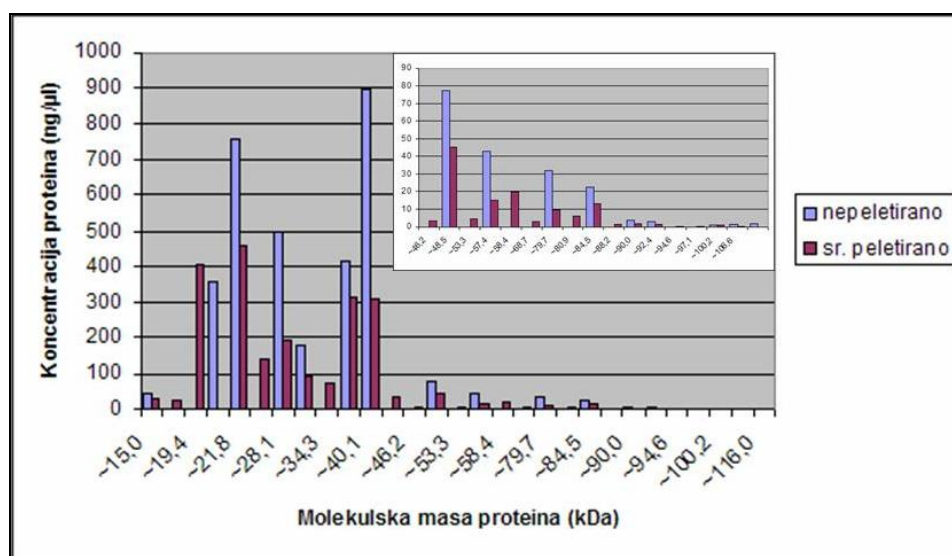
Gel prikaz elektroforetski razdvojenih proteina u nepeletiranom („kontrolni uzorak“) i peletiranim uzorcima, kao i histogram koncentracija proteina u nepeletiranom uzorku i srednjih vrednosti koncentracija proteina u peletiranim uzorcima smeše 2 prikazani su na Slici 42.

Proces peletiranja smeše 2 uticao je na smanjenje koncentracije većine frakcija proteina, za razliku od smeše 1, kod koje je došlo samo do povećanja koncentracije proteina manjih molekulskih masa. Najmanji stepen razgradnje proteina, od 0,76 %, izmeren je za frakciju proteina veličine 90,0 kDa, za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm i bez naknadnog zadržavanja u kondicioneru.

Takođe su neke frakcije proteina u procesu peletiranja potpuno nestale, kao što je frakcija proteina veličine 116,0 kDa, dok su se u peletiranom uzorku pojavile neke manje frakcije, kao što je frakcija proteina veličine 34,3 kDa. Ukoliko se vrednosti redukcije koncentracije pojedinih frakcija proteina pri peletiranju smeše 2 porede sa vrednostima redukcije koncentracije pojedinih frakcija proteina pri peletiranju smeše 1, može se primetiti da je procesu peletiranja smeše 2 došlo do interakcije između proteina kukuruza i proteina suncokretove sačme.



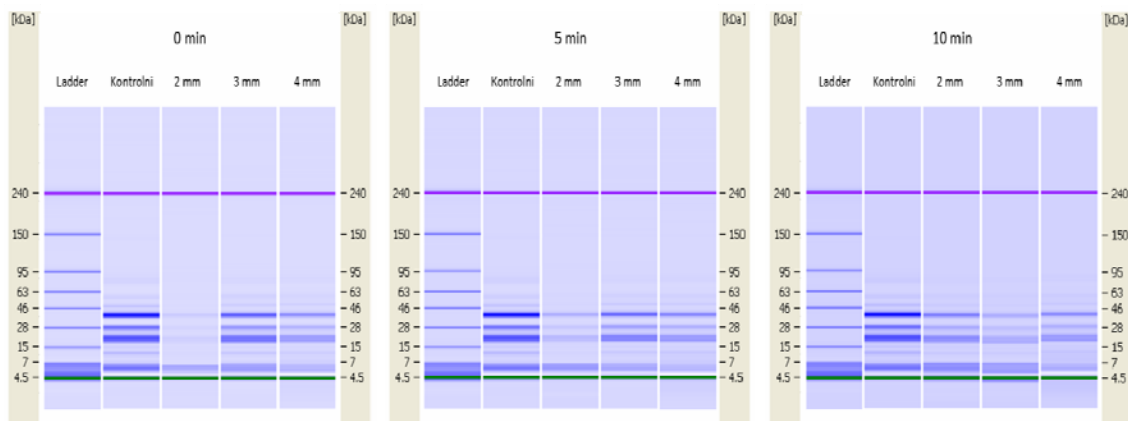
(a)



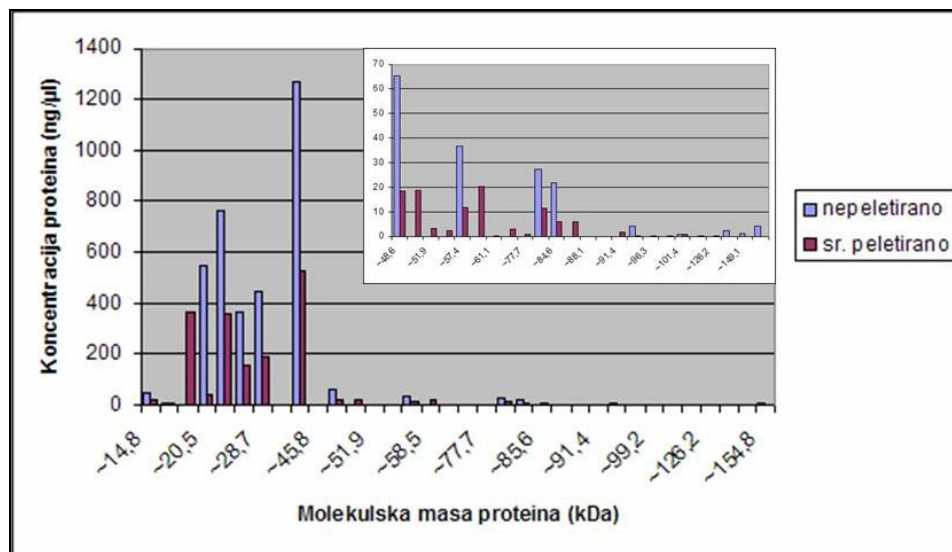
(b)

Slika 42. Slika gela elektroforetski razdvojenih proteina (a) i histogram koncentracija proteina u nepoletiranom uzorku i srednje vrednosti koncentracija proteina u peletiranim uzorcima (b) - smeša 2.

Gel prikaz elektroforetski razdvojenih proteina u nepoletiranom i peletiranim uzorcima, kao i histogram koncentracija proteina u nepoletiranom uzorku i srednjih vrednosti koncentracija proteina u peletiranim uzorcima smeše 3 prikazani su na Slici 43. U toku procesa peletiranja ove smeše je, kao i kod smeše 2, dolazilo do smanjivanja koncentracije većine proteinskih frakcija.



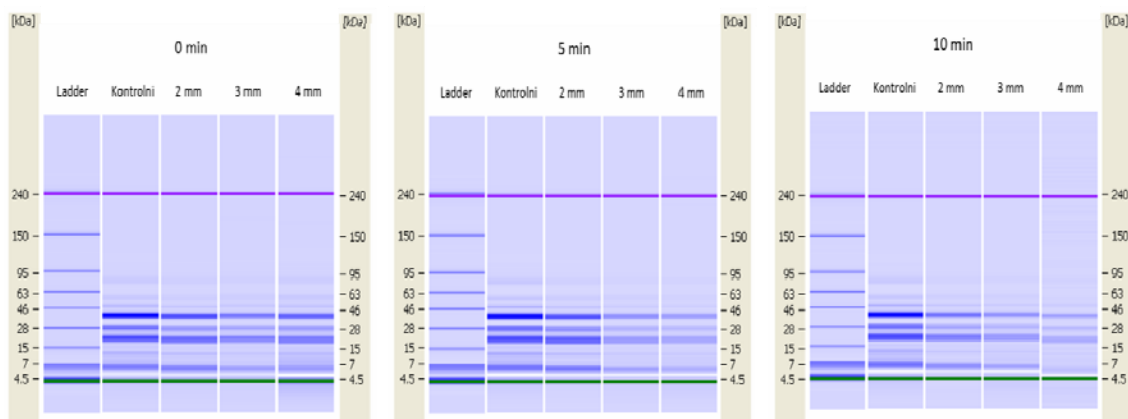
(a)



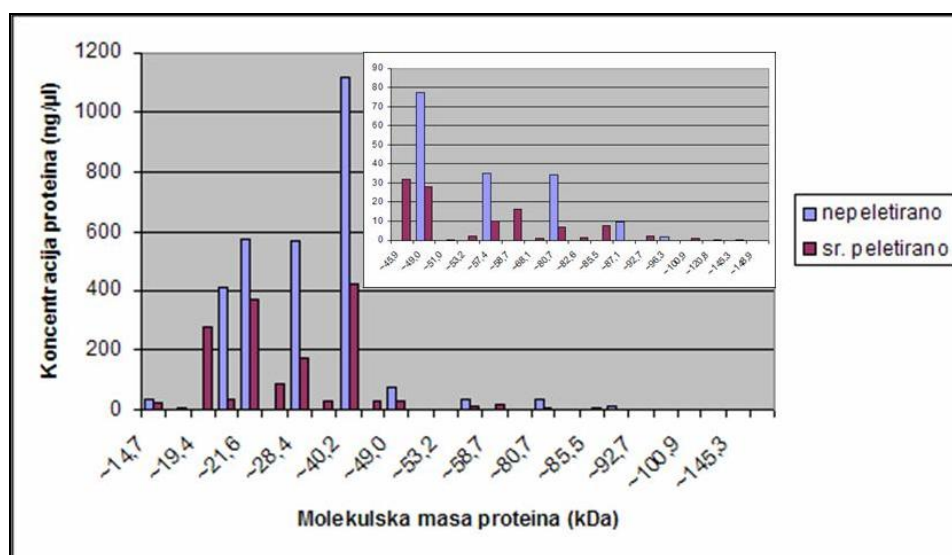
(b)

Slika 43. Slika gela elektroforetski razdvojenih proteina (a) i histogram koncentracija proteina u nepeletiranom uzorku i srednje vrednosti koncentracija proteina u peletiranim uzorcima (b) - smeša 3.

Takođe, kao i kod smeše 2, u peletiranim uzorcima nisu primećene određene frakcije proteina, kao što su frakcije proteina većih molekulskih masa (veliĉine 144,3, 149,1 i 154,8 kDa), koje su registrovane kod nepeletiranog uzorka. Sa druge strane, u peletiranom uzorku su registrovane frakcije proteina koje nisu postojale u nepeletiranom uzorku, kao npr. frakcije proteina veliĉine od 84,6 do 91,4 kDa, pa se moţe pretpostaviti da su nastale razgradnjom proteina većih molekulskih masa u procesu peletiranja.



(a)



(b)

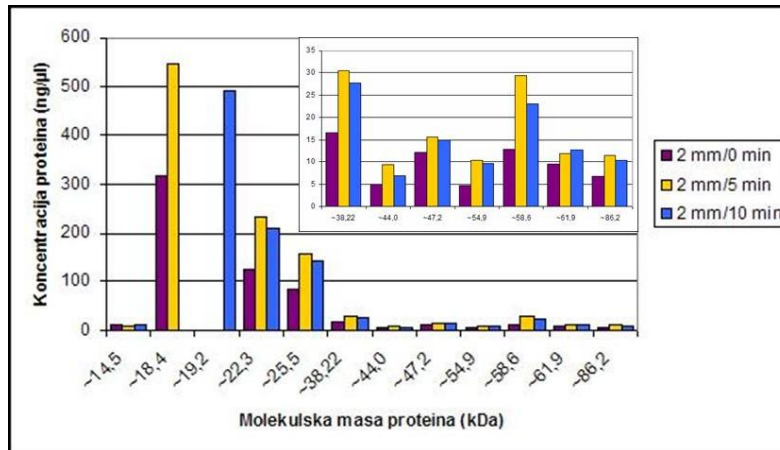
Slika 44. Slika gela elektroforetski razdvojenih proteina (a) i histogram koncentracija proteina u nepeletiranom uzorku i srednje vrednosti koncentracija proteina u peletiranim uzorcima (b) - smeša 4.

Koncentracije različitih frakcija proteina u nepeletiranom uzorku i peletiranim uzorcima smeše 4 prikazane su na Slici 44. Kao i kod smeša 2 i 3 primećena je značajna ($p < 0,05$) redukcija koncentracije proteina većine proteinskih frakcija. Međutim, kod ove smeše došlo je do pojavljivanja frakcija proteina velikih molekularnih masa, koje nisu mogle nastati kao produkti razlaganja većih proteina, jer se nisu nalazili u početnom uzorku, nego se može pretpostaviti da su nastali kao

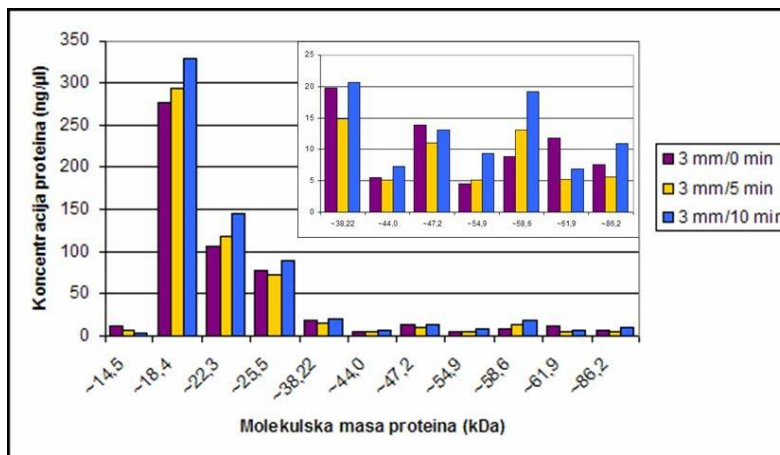
produkti povezivanja proteinskih molekula manjih molekulskih masa. To su frakcije molekula proteina veličina od 100,9 do 148,9 kDa. Veća temperatura matrice pelet prese, a time i veći pritisci i sile smicanja, u odnosu na druge dve smeše sa suncokretovom sačmom, kao i povećana koncentracija proteina, uticali su na spajanje frakcija proteina manjih molekulskih masa (*Marsman et al., 1998, Goelema et al., 1999*).

U procesu proizvodnje ulja proteini suncokretove sačme su u najvećoj meri toplotno denaturisani, pa se može pretpostaviti da su proteini u kukuruzu bili podložniji uticaju povišene temperature. Međutim, za oko 50 % manja redukcija koncentracije proteina izmerena je u peletiranom kukuruzu, nego u peletiranim smešama sa suncokretovom sačmom (u opsegu merenja od 4,5 do 240 kDa), uprkos većoj temperaturi pri peletiranju kukuruza. To je pokazatelj da su proteini iz kukuruza u procesu peletiranja mogli stupiti u interakciju i sa proteinima iz suncokretove sačme, kao i da temperatura nije jedini faktor koji utiče na denaturaciju proteina (*Goelema et al., 1999*). Pojedinačni proteinski molekuli se najčešće povezuju putem kovalentnih veza i formiraju aglomerate, a toplota i vlaga u potpomažu raskidanje i uspostavljanje veza između aglomerata (*Pirie, 2012*).

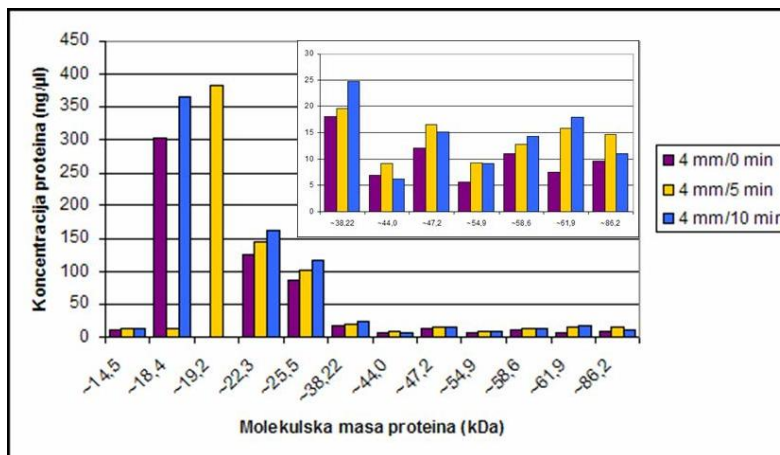
Histogrami koncentracije frakcija proteina različitih molekulskih masa u uzorcima smeše 1 za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c) prikazani su na Slici 45. Kao što se moglo videti sa Slike 41, pri peletiranju smeše 1 došlo je do redukcije koncentracije frakcija proteina većih molekulskih masa, a do povećanja koncentracije frakcija proteina manjih molekulskih masa. Maksimalna koncentracija proteina za frakcije proteina veličine 38,2 kDa i veće bila je 30,52 ng/μl, dok je maksimalna koncentracija proteina za frakcije proteina veličine 25,5 kDa i manje bila čak 364,60 ng/μl.



(a)



(b)

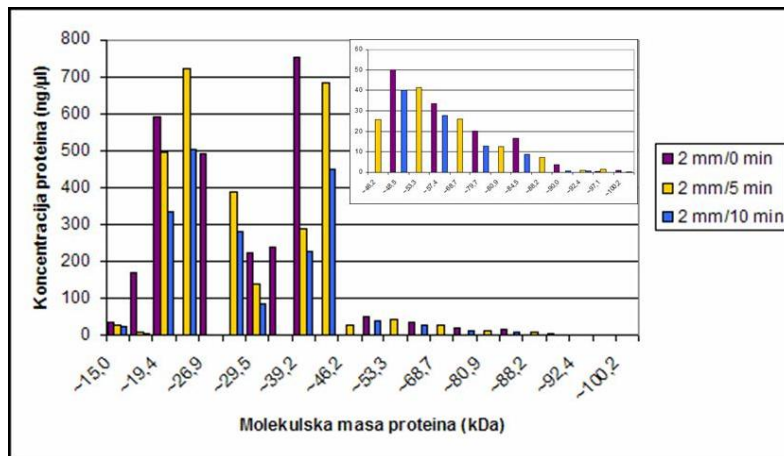


(c)

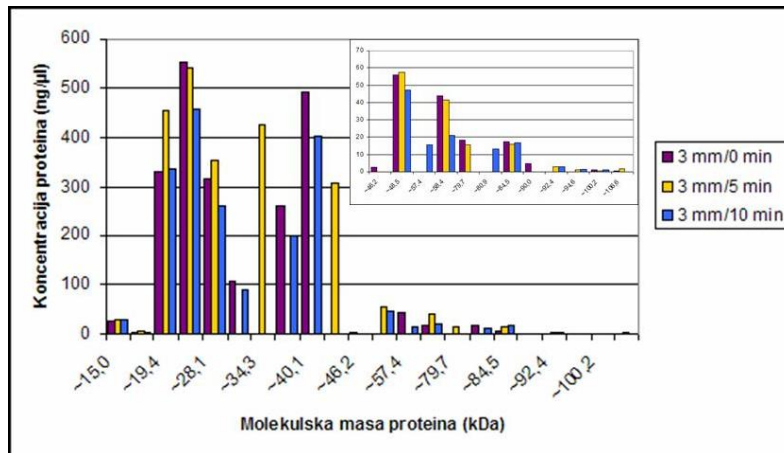
Slika 45. Histogrami koncentracije proteina u uzorcima smeše 1 za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c).

Ukoliko se porede vrednosti koncentracija proteina za istu frakciju proteina i isti prečnik otvora sita mlina čekićara može se videti da se koncentracije proteina razlikuju u zavisnosti od vremena zadržavanja materijala u kondicioneru. Najmanja koncentracija proteina izmerena je za materijal koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru. Duže vreme zadržavanja u kondicioneru (5 i 10 minuta) omogućilo veću apsorpciju vlage, koja je apsorbovana od strane skrobne makrokomponente u smeši 1 (kukuruzu), dok je vlaga proteinskoj makrokomponenti manje dostupna, usled slabije apsorpcije vode. Manja dostupnost vode proteinskoj makrokomponenti je uzrokovala manji stepen denaturacije i degradacije proteina. Ovo je u skladu sa istraživanjima *Kitabatake and Doi (1992)*, koji su pokazali da se u višku vode protein glicin iz sojine sačme denaturiše na temperaturi od 93,3°C, dok se pri vlažnosti materijala od 29% on denaturiše tek na temperaturama od preko 180°C.

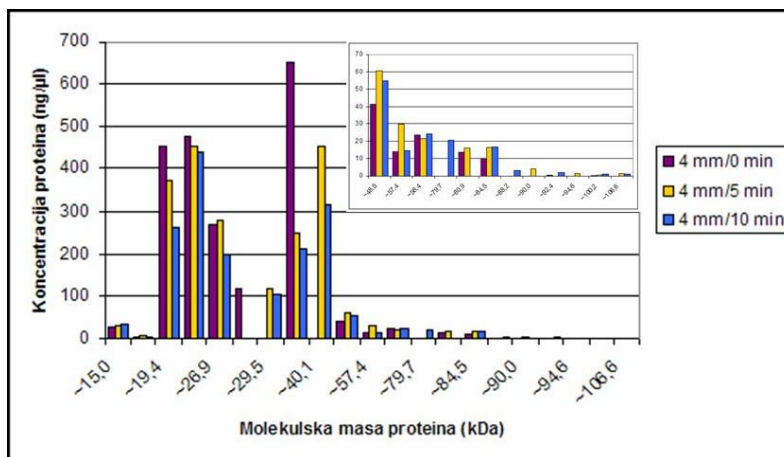
Na Slici 46. prikazani su histogrami koncentracije frakcija različitih molekulskih masa proteina u uzorcima smeše 2 za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c). Proces peletiranja smeše 2 je uticao na redukciju koncentracije većine frakcija molekulskih masa proteina, kao što je već prikazano na Slici 42. Veća koncentracija proteina je izmerena kod frakcija molekulskih masa od 40,1 kDa i manjih, pri čemu je maksimalna koncentracija proteina primećena kod frakcije proteina od 40,1 kDa, u peletama od materijala mlevenog na mlinu čekićaru prečnika otvora od 4 mm, koji je zadržan 10 minuta u kondicioneru. Koncentracija proteina ove molekulske mase je iznosila 811,50 ng/μl. Za frakcije proteina veće od 40,1 kDa maksimalna koncentracija proteina je primećena kod frakcije od 48,6 kDa i iznosila je 43,47 ng/μl. Za razliku od smeše 1, najveće promene na proteinima su postignute za najduže vreme zadržavanja. Može se pretpostaviti da je kod smeše 2, usled prisustva ljuske i smanjenja sadržaja skroba, bilo dovoljno vode za promene na proteinima kod sva tri vremena zadržavanja. Kod ove smeše, kao ni kod smeše 1 nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj prečnika otvora sita čekićara na promene u veličini i koncentraciji proteina, tako da specifična površina čestica nije bila faktor koji je uticao na promene na proteinima. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima *Goelme et al. (1999)*, koji su pokazali da na promene na proteinima u procesu peletiranja ne utiče temperatura, nego pritisci i sile smicanja.



(a)



(b)

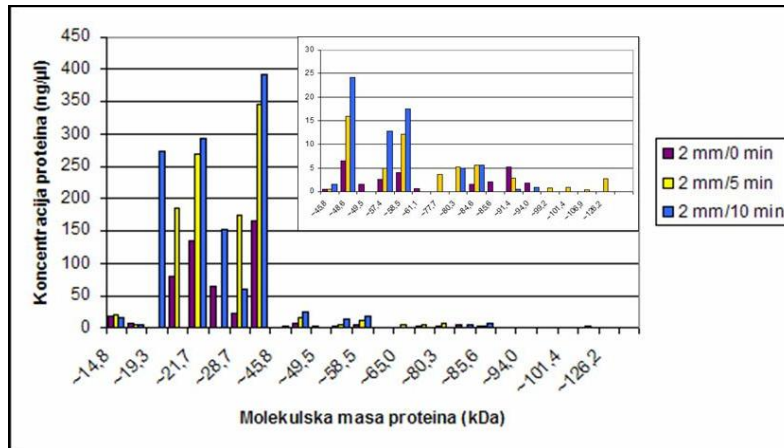


(c)

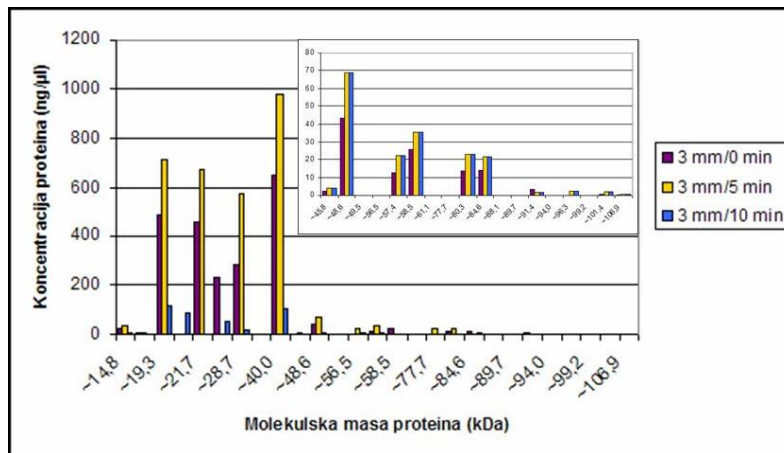
Slika 46. Histogrami koncentracije proteina u uzorcima smeše 2 za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c).

Histogrami koncentracije frakcija različitih molekulskih masa proteina u uzorcima smeša 3 i 4 za različite prečnike otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c) prikazani su na Slikama 47 i 48. I kod ove dve smeše sa suncokretovom sačmom je došlo do razgradnje većine frakcija proteina. Kod smeše 3 veće koncentracije proteina primećene su za frakcije proteina veličine 40,0 kDa i manje, pri čemu je maksimalna koncentracija proteina, u iznosu od 974,86 ng/μl, primećena kod frakcije proteina od 40,0 kDa, u peletama od materijala mlevenog na situ čekićaru prečnika otvora od 3 mm, koji je zadržan 5 minuta u kondicioneru. Merenjem koncentracije proteina većih molekulskih masa (veće od 40,0 kDa) najveća koncentracija proteina je registrovana kod frakcije proteina veličine 59,0 kDa (iznosila je 35,14 ng/μl), takođe kod materijala mlevenog na situ mlina čekićara prečnika otvora od 3 mm, koji je zadržan 5 minuta u kondicioneru. Nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na kvalitativni i kvantitativni sastav proteina kod različitih uzoraka smeše 3.

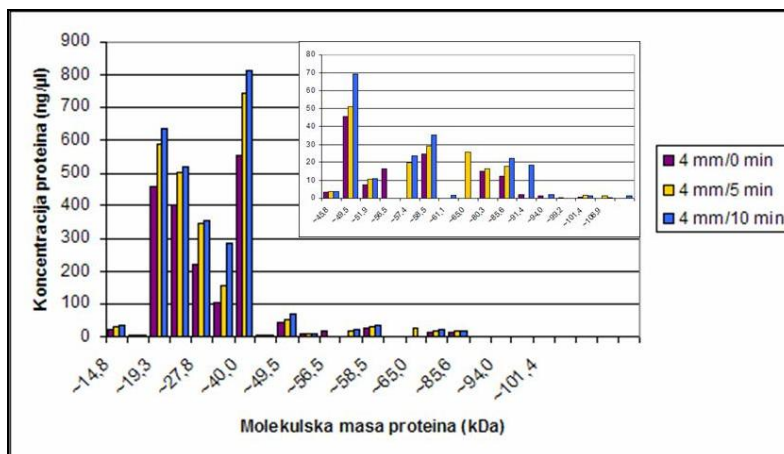
Povećanje koncentracije frakcija proteina u peletiranim uzorcima smeše 4 izmereno je za frakcije proteina veličine 45,9 kDa i manje. Maksimalna koncentracija proteina, u iznosu od 629,50 ng/μl izmerena je za frakciju proteina od 40,3 kDa, u peletama od materijala mlevenog na mlinu čekićaru sa prečnikom otvora sita od 3 mm, koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru posle dostizanja maksimalne temperature. Sa druge strane, maksimalna koncentracija proteina (58,28 ng/μl) za frakcije proteina veće od 45,9 kDa izmerena je za frakciju proteina od 49,0 kDa, u peletama od materijala mlevenog na mlinu čekićaru sa sitom prečnika otvora od 4 mm, koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru. Kod smeše 4 nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj vremena naknadnog zadržavanja u kondicioneru na kvalitativni i kvantitativni sastav proteina. Kao ni kod ostalih smeša, nije primećen ni uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na koncentraciju proteina u uzorcima.



(a)

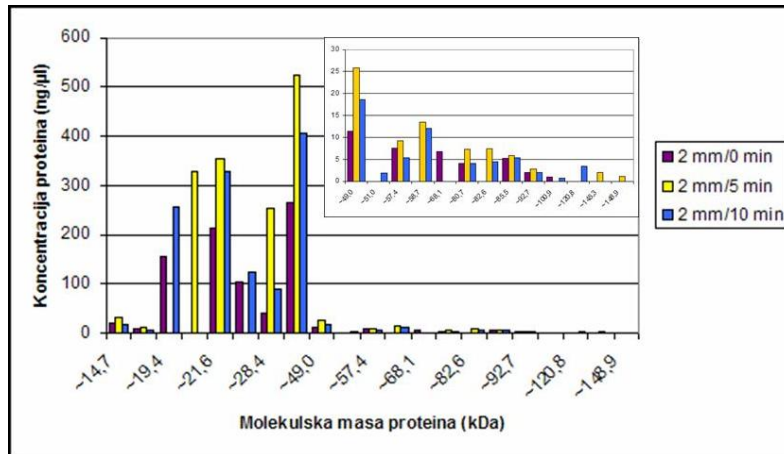


(b)

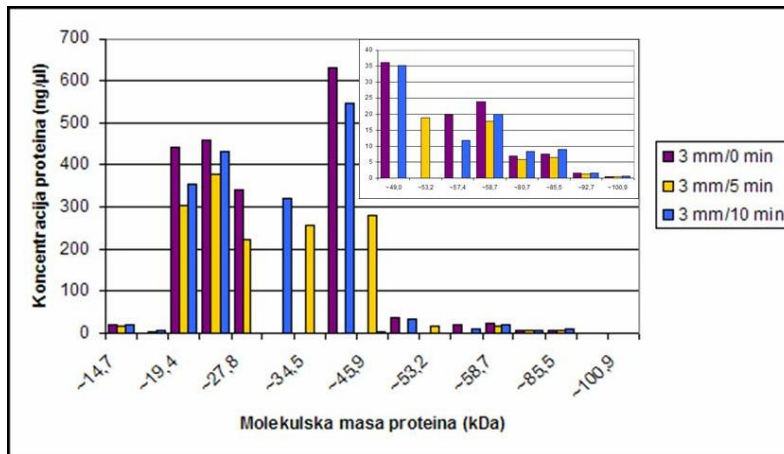


(c)

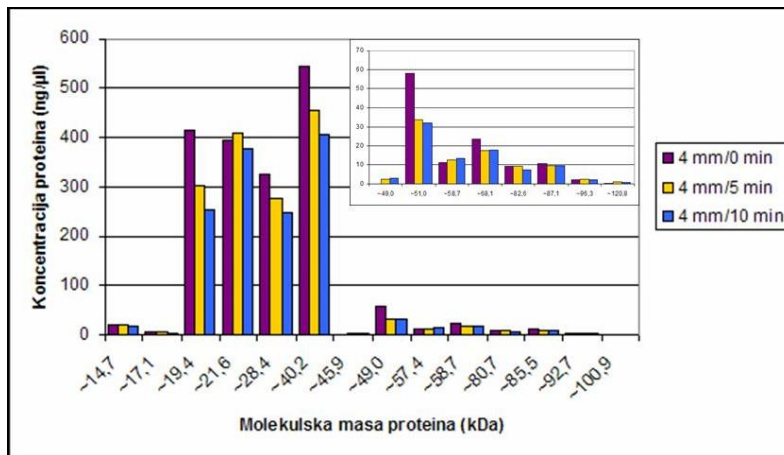
Slika 47. Histogrami koncentracije proteina u uzorcima smeše 3 za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c).



(a)



(b)



(c)

Slika 48. Histogrami koncentracije proteina u uzorcima smeše 4 za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm (a), 3 mm (b) i 4 mm (c).

Ako se poredi vrednosti ukupnih koncentracija svih frakcija proteina smeša 1-4 može se primetiti da je uticaj vremena zadržavanja u kondicioneru na redukciju koncentracije proteina u peletiranim uzorcima bio izraženiji od uticaja prečnika otvora sita mlina čekićara. Međutim, kod većine smeša razlike između koncentracija proteina u peletama iste smeše proizvedene pod različitim procesnim uslovima nisu bile značajne ($p > 0,05$). Sa druge strane, primećene su značajne ($p < 0,05$) razlike između koncentracija proteina u peletiranim i nepeletiranom uzorku. Ovo je pokazatelj da su sile pritiska i sile smicanja u procesu peletiranja imale najveći uticaj na stepen promena na proteinima, dok su vreme zadržavanja u kondicioneru i prečnik otvora sita mlina čekićara imali manji uticaj na ove promene.

4.4 Fizičke karakteristike peleta

4.4.1 Prečnik peleta

Odabir prečnika peleta zavisi od vrste i kategorije životinja za koje se hrana proizvodi. Prečnik peleta je približne veličine kao i prečnik otvora matrice pelet prese. Međutim, za dati prečnik otvora matrice, prečnik peleta može da varira u uskom intervalu u zavisnosti od sirovinskog sastava smeše koja se peletira. U Tabeli 14 prikazani su rezultati merenja prečnika peleta za svih 5 peletiranih smeša. Poređenjem vrednosti prečnika peleta za smešu 1 za različito vreme zadržavanja u kondicioneru može se primetiti da su vrednosti prečnika peleta od materijala koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru i materijala koji je zadržavan 10 minuta približno iste, dok je prečnik peleta za vreme zadržavanja od 5 minuta bio nešto manji. Ukoliko se poredi uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na prečnik peleta može se videti da su najmanje vrednosti prečnika postignute za prečnik otvora sita mlina čekićara od 3 mm, međutim nije utvrđeno da su vrednosti prečnika peleta za ovaj prečnik otvora sita mlina čekićara značajno ($p > 0,05$) manje od ostalih. Prečnik peleta ove smeše kretao se u opsegu od 5,87 do 6,04 mm.

Vrednosti prečnika peleta za smešu 2 su, kao i kod smeše 1, imale nešto manje vrednosti za vreme zadržavanja u kondicioneru od 5 minuta, a prečnici peleta napravljenih od materijala koji nije naknadno kondicioniran i peleta od materijala koji je naknadno kondicioniran u trajanju od 10 minuta su bile približno iste. Prečnik

otvora sita mlina čekićara kod ove smeše nije imao značajan ($p > 0,05$) uticaj na prečnik peleta. Prečnik peleta ove smeše se kretao u opsegu od 6,01 do 6,11 mm.

I kod smeša 3 i 4 prikazan je sličan trend promene prečnika peleta sa dužinom zadržavanja u kondicioneru. Kod smeše 3 prečnici su se kretali u opsegu od 5,97 do 6,07, a kod smeše 4 u opsegu od 5,92 do 6,05 mm. Nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na prečnik peleta napravljenih od smeša 3 i 4.

Tabela 14. Prečnik peleta (mm)

Prečnik otvora sita čekićara (mm)	Vreme produženog kondicioniranja parom (min)	Smeša 1	Smeša 2	Smeša 3	Smeša 4	Smeša 5
2 mm	0	6,03 ± 0,06	6,11 ± 0,06	6,06 ± 0,05	6,02 ± 0,07	5,84 ± 0,06
	5	5,98 ± 0,09	6,03 ± 0,05	6,01 ± 0,05	5,92 ± 0,05	5,77 ± 0,05
	10	6,03 ± 0,07	6,10 ± 0,05	6,06 ± 0,05	5,99 ± 0,07	5,77 ± 0,05
3 mm	0	5,95 ± 0,07	6,09 ± 0,08	6,03 ± 0,05	6,00 ± 0,06	5,82 ± 0,06
	5	5,87 ± 0,06	6,03 ± 0,06	5,97 ± 0,05	5,96 ± 0,09	5,77 ± 0,06
	10	5,95 ± 0,07	6,07 ± 0,06	6,04 ± 0,05	6,01 ± 0,06	5,78 ± 0,06
4 mm	0	6,03 ± 0,08	6,06 ± 0,06	6,03 ± 0,07	6,03 ± 0,08	5,84 ± 0,05
	5	5,98 ± 0,04	6,01 ± 0,06	6,00 ± 0,06	6,01 ± 0,06	5,77 ± 0,06
	10	6,04 ± 0,07	6,05 ± 0,05	6,04 ± 0,06	6,05 ± 0,05	5,74 ± 0,05
Srednja vrednost		5,98 ± 0,07 ^{ab}	6,06 ± 0,06 ^a	6,03 ± 0,05 ^a	6,00 ± 0,07 ^a	5,79 ± 0,05 ^b

-Rezultati su prikazani kao srednja vrednost 15 merenja ± standardna devijacija

-^a Različita slova označavaju značajne razlike između srednjih vrednosti prečnika

Kod smeše 5 najveći prečnik peleta je izmeren za najkraće vreme zadržavanja, dok su za vremena zadržavanja od 5 i 10 minuta prečnici imali približne vrednosti. Prečnik otvora sita mlina čekićara nije imao značajan ($p > 0,05$) uticaj na prečnik peleta napravljenih od ove smeše. Prečnik peleta se kod smeše 5 kretao u opsegu od 5,74 do 5,84 mm.

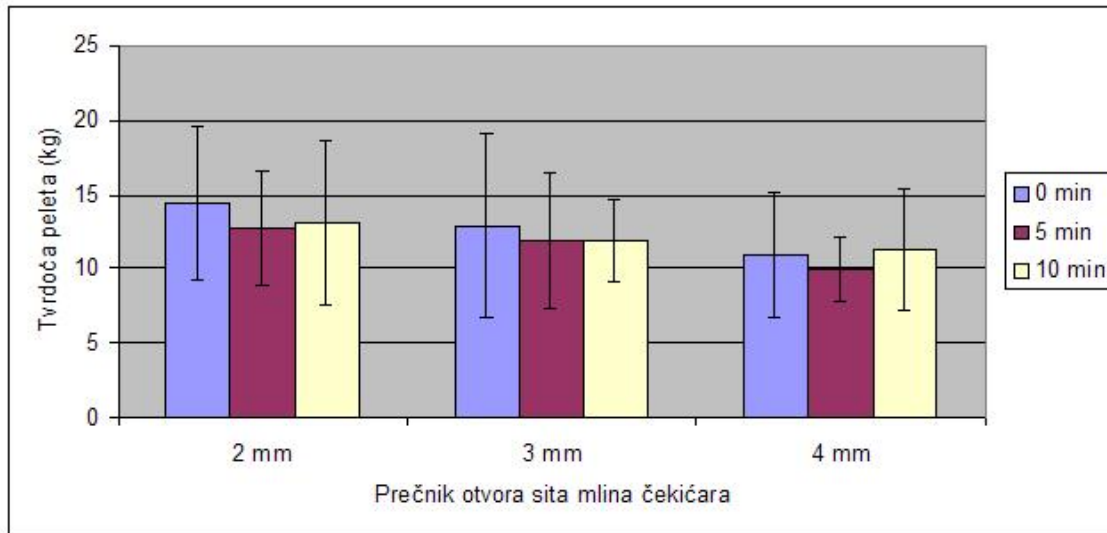
Ukoliko se porede srednje vrednosti prečnika smeša 1-5 može se videti da je najmanji prečnik, a time i najveće sabijanje materijala, postignuto za smešu sa sojinom sačmom (smeša 5). Nešto veća srednja vrednost prečnika je postignuta za

smešu 1 (peletiran kukuruz), dok su smeše sa suncokretovom sačmom imale najveće rečnike. Vrednost prečnika 2-4 je opadala sa smanjenjem sadržaja ljuske i porastom sadržaja proteina. Ovo je očekivano jer su nerastvorljiva vlakna, kao što je ljuska suncokreta, elastična i stvaraju otpor kompresiji, pa su se sa smanjenjem sadržaja nerastvorljivih vlakana u smešama sa suncokretovom sačmom čestice u peleti bolje povezivale. Prečnici peleta u smešama sa suncokretovom sačmom su bili značajno ($p < 0,05$) veći od prečnika peleta sa sojinom sačmom.

4.4.2 Tvrdoća peleta

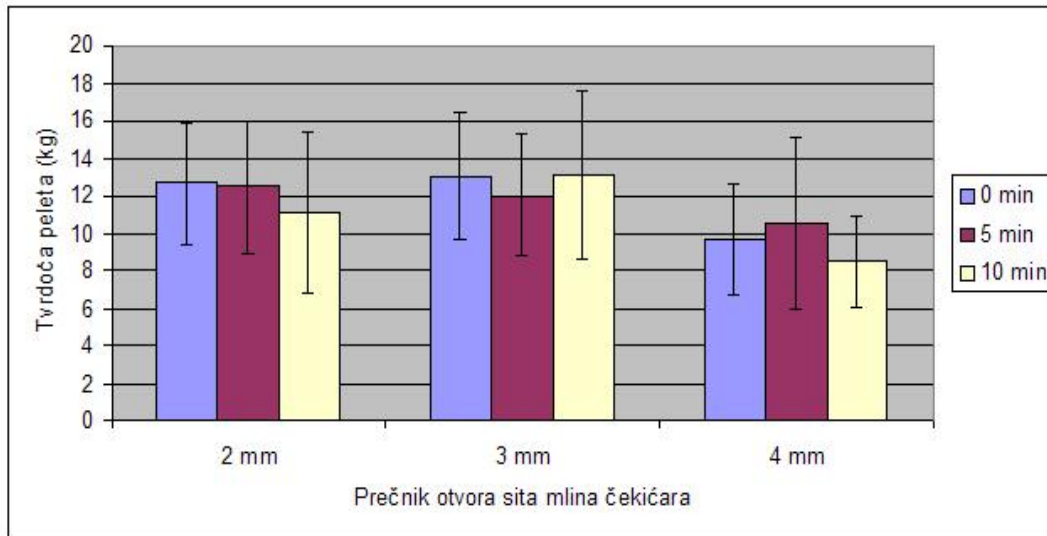
Na Slici 49 prikazane su eksperimentalne vrednosti tvrdoće peleta smeše 1. Eksperimentalne vrednosti tvrdoće peleta ove smeše kretale su se u opsegu od 9,98 do 14,48 kg. Standardne devijacije ovih rezultata su bile relativno visoke i kretale su se u opsegu od 2,15 do 6,18 kg. Sa porastom prečnika otvora sita mlina čekićara smanjivala se i tvrdoća peleta. Ovo je očekivano, jer krupnije čestice u mlivu predstavljaju „slabe tačke“, odnosno tačke gde najčešće dolazi do loma peleta, pa se sa povećavanjem njihovog udela smanjuje tvrdoća peleta. Vreme zadržavanja u kondicioneru posle postizanja maksimalne temperature je takođe imalo uticaj na tvrdoću peleta smeše 1. Najveća tvrdoća peleta je postignuta za smešu koja nije naknadno zadržavana u kondicioneru. Ovo je u suprotnosti sa rezultatima istraživanja pojedinih autora, koji su pokazali da se sa povećanjem stepena želatinizacije skroba povećava i tvrdoća peleta, međutim ovi autori su kondicionirali materijal u mnogo kraćem vremenskom intervalu (*Wood, 1987; Svihus et al, 2004*). Razlog za smanjenje tvrdoće peleta sa povećanjem vremena naknadnog zadržavanja u kondicioneru, uprkos povećanoj želatinizaciji, je smanjenje vode na površini peleta usled dugog zadržavanja materijala u kondicioneru, što je imalo negativan uticaj na „tečno priljublivanje“ čestica (*Rumpf, 1962; Aarseth and Prestløkken, 2003*). Rezultati analize strukturnih promena na proteinima su pokazali da između tretmana nije bilo značajnih ($p > 0,05$) razlika, tako da se može smatrati da je denaturacija proteina, tj. svojstvo proteina da plasticiziraju usled dejstva toplote i da povećavaju tvrdoću peleta, podjednako uticala na tvrdoću svih peleta smeše 1. To potvrđuje da je glavni faktor koji je uticao na tvrdoću peleta količina površinske vlage, a ne funkcionalne promene makronutrijenata.

Vrednosti tvrdoće peleta smeše 2 prikazane su na Slici 50. Tvrdoća peleta smeše 2 bila je u opsegu od 8,50 do 13,05 kg, a standardne devijacije eksperimentalnih rezultata u okviru jedne šarže kretale su se u opsegu od 2,42 do 4,57 kg. Sa porastom prečnika otvora sita mlina čekićara smanjivala se i tvrdoća peleta ove smeše.



Slika 49. Tvrdoća peleta – smeša 1.

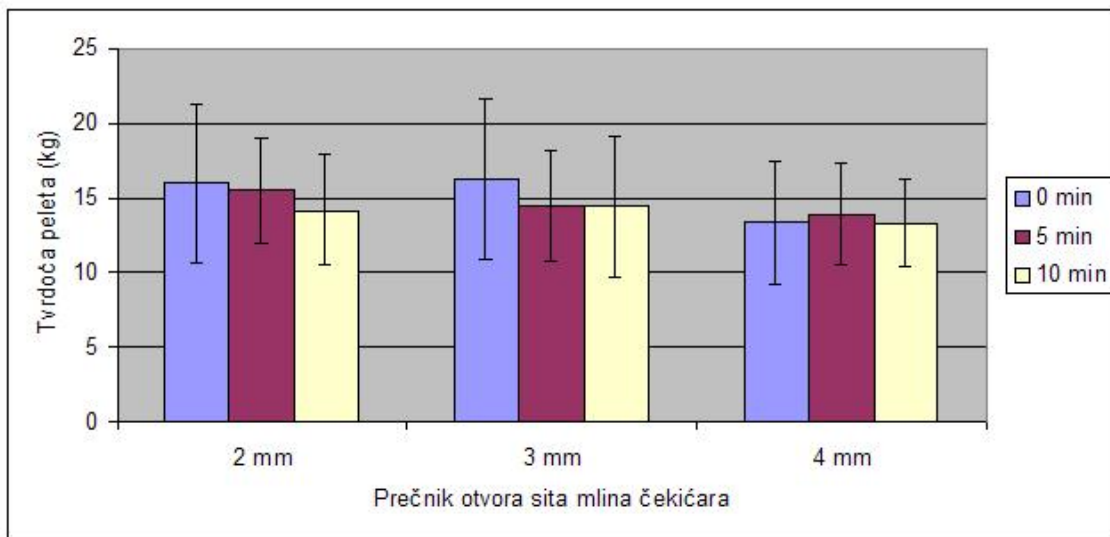
Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara je, kao i kod smeše 1, imalo uticaja na smanjenje tvrdoće peleta, usled pojave „slabih tačaka“ u peleti. Nije primećen jasan uticaj vremena zadržavanja u kondicioneru na tvrdoću peleta uprkos povećanju stepena želatinizacije skroba sa vremenom zadržavanja. Bliske vrednosti temperatura matrice pelet prese, koje su indikator količine toplote stvorene trenjem u matrici pelet prese, pokazatelj su da postoji blagi trend smanjenja količine slobodne vode na površini čestica, pa je verovatno da se uticaji funkcionalnih promena na skrobu i fizičkog prisustva slobodne vode delimično potiru.



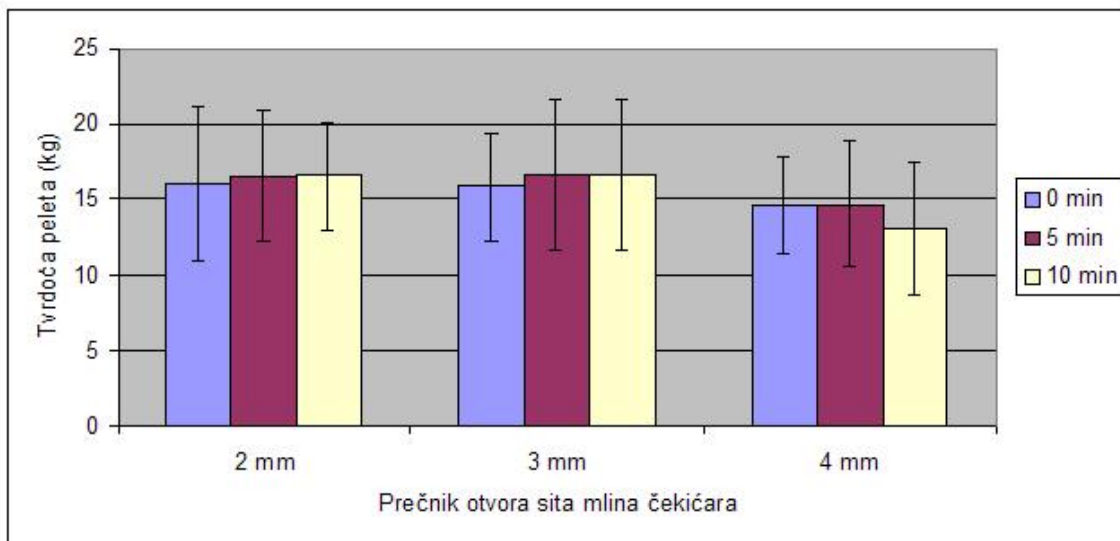
Slika 50. Tvrdoća peleta – smeša 2.

Na Slici 51 prikazane su vrednosti tvrdoće peleta smeše 3. Opseg tvrdoća peleta smeše 3 bio je od 13,32 do 16,28 kg, a standardne devijacije od 2,95 do 5,29 kg. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara, kao i kod smeša 1 i 2, imalo je uticaj na smanjenje tvrdoće peleta. Iako nije bilo značajnih razlika između vrednosti tvrdoće peleta, najtvrdje pelete kod ove smeše dobijene su za materijal koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru, za prečnike otvora sita mlina čekićara od 2 i 3 mm, verovatno zbog veće količine vode na površini čestica. Za prečnik otvora sita mlina čekićara od 4 mm sve vrednosti tvrdoće su bile prilično bliske (od 13,32 do 13,95 kg).

Opseg tvrdoća peleta smeše 4 (Slika 52) kretao se u intervalu od 13,11 do 16,57 kg, a standardne devijacije od 3,17 do 5,11 kg. Povećanje prečnika otvora sita uticalo je na smanjenje tvrdoće peleta usled prisustva krupnijih čestica, kao što je već objašnjeno. Najtvrdje pelete smeše 4 su dobijene za vreme zadržavanja od 5 minuta, mada nije bilo značajnih ($p > 0,05$) razlika između tvrdoća peleta napravljenih pod različitim procesnim parametrima.



Slika 51. Tvrdoća peleta – smeša 3.

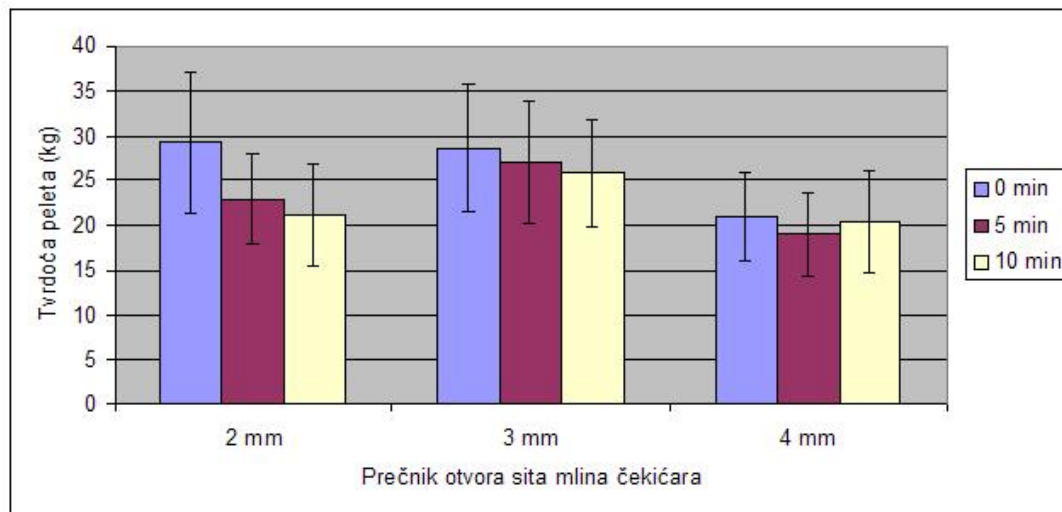


Slika 52. Tvrdoća peleta – smeša 4.

Vrednosti tvrdoća peleta smeše 5 prikazane su na Slici 53. Opseg tvrdoća peleta ove smeše se kretao u opsegu od 19,00 do 29,29 kg, a standardne devijacije od 4,70 do 7,89 kg. Povećanje prečnika otvora sita uticalo je na smanjenje tvrdoće peleta, pa su tako najtvrdje pelete dobijene za prečnik otvora sita mlina čekićara od 2 mm. Vreme zadržavanja smeše sa sojinom sačmom u kondicioneru je uticalo na apsorpciju vode, što je potvrđeno između ostalog rezultatima merenja temperature matrice pelet prese, kao i rezultatima iz literature (Hemmingsen et al., 2008). S

obzirom da je sojina sačma komponenta koja ima veću moć upijanja vode od suncokretove sačme (Lević and Sredanović, 2012), kraće vreme kondicioniranja parom je omogućilo bolje povezivanje čestica od smeše, jer su čestica imale dovoljno vode za međusobno povezivanje.

Srednje vrednosti tvrdoća svih pet smeša iznosile su: 12,13 kg (smeša 1), 11,45 kg (smeša 2), 14,61 kg (smeša 3), 15,64 kg (smeša 4) i 23,90 kg (smeša 5). Poređenjem srednjih vrednosti tvrdoća peleta smeše 1 i smeše 2 može se videti da pelete napravljene od smeše 1 imaju veću tvrdoću uprkos manjem sadržaju proteina, kao i većem sadržaju skroba, koji je samo delimično želatiniziran. Razlog za to je mnogo manji sadržaj sirovih vlakana u smeši 1 u poređenju sa smešom 2 (1,75 : 8,31). Nerastvorna vlakna, koja su prisutna u suncokretovoj ljusci i koja stvaraju otpor kompakciji materijala i povezivanju čestica usled velike elastičnosti, predstavljaju „slabe tačke“ u peleti gde može da dođe lomljenja pelete kada se primeni sile pritiska (Kaliyan and Morey, 2009).



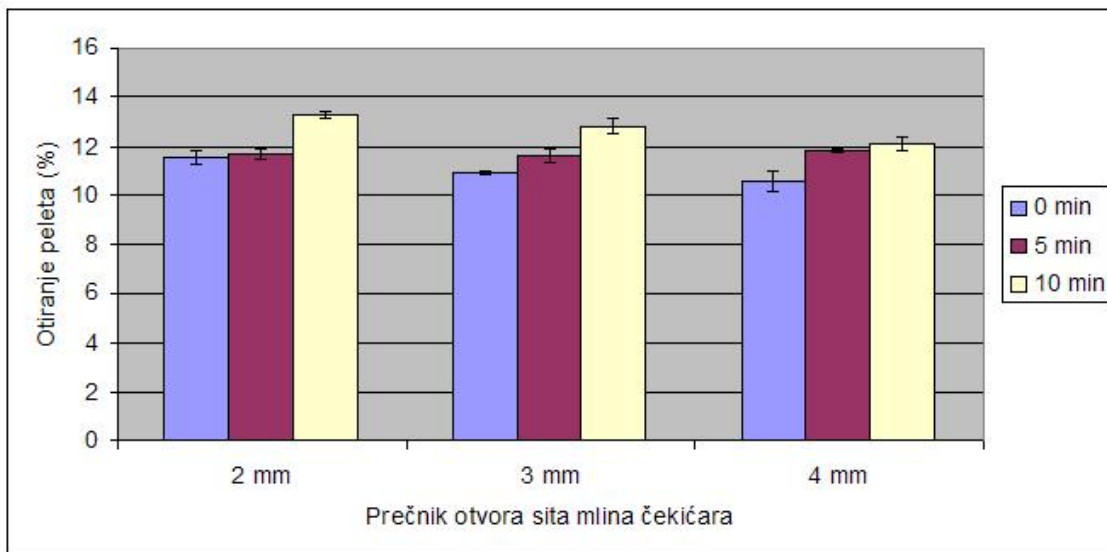
Slika 53. Tvrdoća peleta – smeša 5.

Daljim smanjenjem sadržaja sirovih vlakana i povećanjem sadržaja proteina u smešama sa suncokretovom sačmom (smeše 3 i 4) dobijene su pelete koje su tvrđe od peleta od čistog kukuruza. Pelete napravljene od smeše 3 bile su za 20,4 % tvrđe od peleta napravljenih od smeše 1, dok su pelete napravljene od smeše 4 bile su za 28,9 % tvrđe od peleta napravljenih od smeše 1. Najtvrđe pelete su bile pelete

napravljene od smeše kukuruza i sojine sačme, zahvaljujući najvećem sadržaju proteina i niskom sadržaju sirovih vlakana.

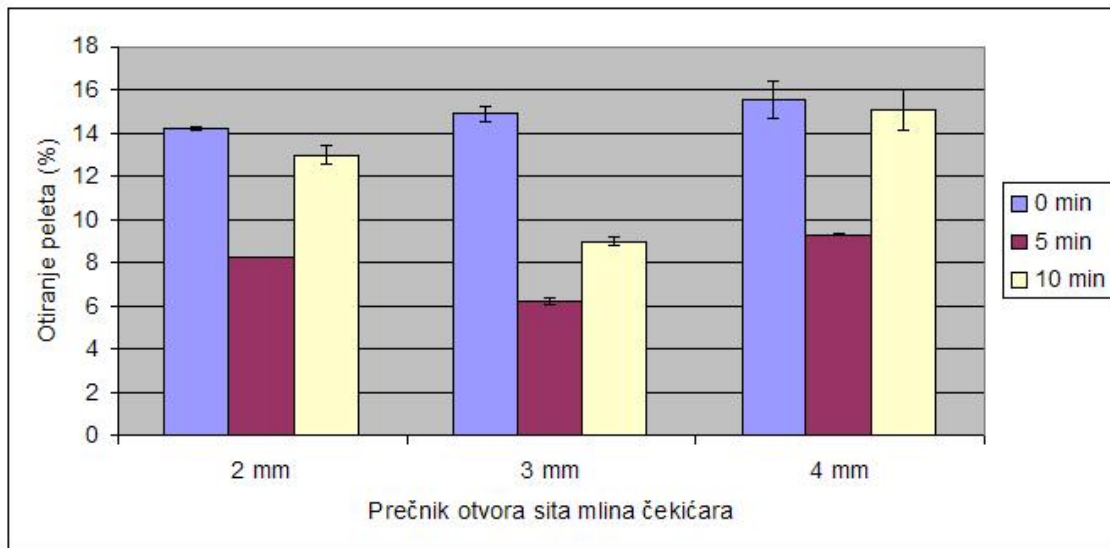
4.4.3 Otiranje peleta

Merenje stepena otiranja peleta predstavlja jedan od parametara predviđanja fizičkog kvaliteta peleta, na osnovu udela prašine koja je nastala abrazijom peleta prilikom manipulacije. Na Slici 54 prikazani su podaci stepena otiranja peleta napravljenih od smeše 1. Vrednosti stepena otiranja peleta ove smeše kretale su se u opsegu od 10,53 do 13,23 %. Promena prečnika otvora sita mlina čekićara nije imala značajan ($p > 0,05$) uticaj na stepen otiranja peleta. Sa druge strane, produženje vremena kondicioniranja uticalo je na povećanje otiranja peleta. Razlog za to je raspoređivanje površinske vlage u unutrašnjost čestica (Stevens, 1987; Briggs et al., 1999). Količina površinske vlage je imala veći uticaj i od stepena želatinizacije skroba, koji se povećavao sa vremenom zadržavanja u kondicioneru. Rezultati stepena otiranja peleta smeše 1 su u skladu sa ostalim rezultatima fizičkih analiza ove smeše, gde je pokazano da produžetak vremena zadržavanja u kondicioneru utiče na smanjenje sadržaja površinske vlage, a time i na povećanje temperature matrice pelet prese, povećanje specifične potrošnje energije, smanjenje tvrdoće peleta, itd. Rezultati Guilpin et al. (2002), koji su peletirali smeše koje su sadržavale 73,8 % kukuruza, imaju suprotan trend od rezultata prikazanih na Slici 54. Međutim, ovi autori su produžili vreme kondicioniranja parom sa 5 na 15 sekundi, što je mnogo manje u poređenju sa inkrementima od 5 minuta, tako da u tom kratkom vremenskom intervalu nije moglo doći do značajnijeg upijanja tečnosti sa površine čestica.



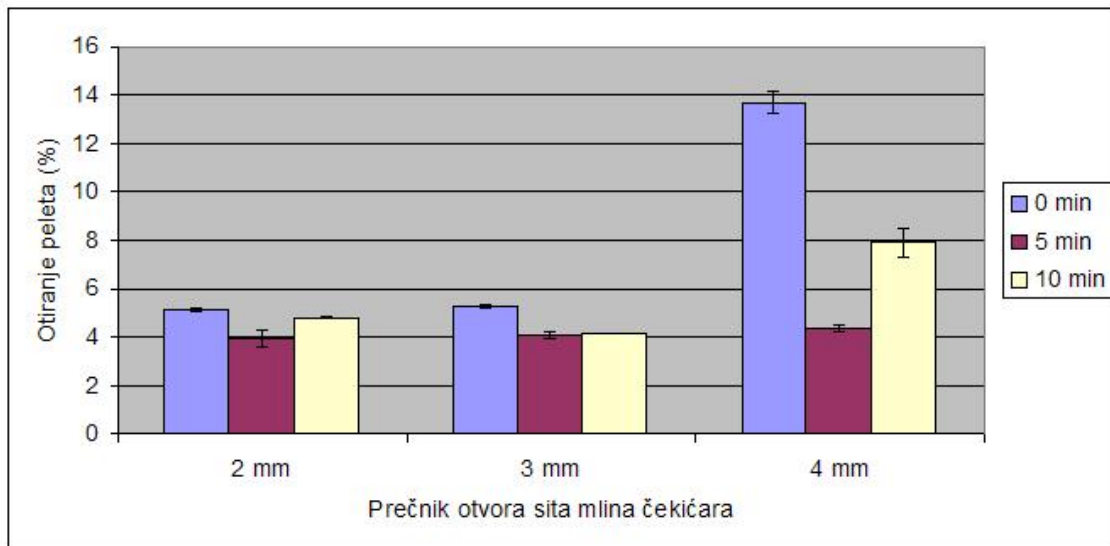
Slika 54. Otiranje peleta – smeša 1.

Rezultati stepena otiranja peleta smeše 2 prikazani su na Slici 55. Kod peleta ove smeše primećen je uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na stepen otiranja peleta za materijal koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru i materijal koji je naknadno zadržavan u kondicioneru u trajanju od 10 minuta. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara materijala uticalo je na povećanje stepena otiranja peleta, što je u skladu sa rezultatima *Svihus et al. (2004)*. Vreme zadržavanja materijala u kondicioneru posle dostizanja maksimalne temperature značajno ($p < 0,05$) je uticalo na stepen otiranja peleta. Najmanji stepen otiranja peleta postignut je za vreme zadržavanja materijala od 5 minuta. Za isti prečnik otvora sita mlina čekićara, pelete napravljene materijala koji je zadržan u kondicioneru 5 minuta imale od 30,67 do 58,14 % manji stepen otiranja od peleta napravljenih od materijala koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru i materijala koji je naknadno zadržavan u kondicioneru trajanju od 10 minuta. Rezultati stepena otiranja peleta smeše 2 pokazuju da je optimalno vreme zadržavanja 5 minuta, tj. vreme za koje je materijalu dostupno dovoljno površinske vlage za povezivanje čestica, a za koje je u dovoljnoj meri došlo do funkcionalnih promena makronutrijenata (Tabela 11 i Slika 43).



Slika 55. Otklanje peleta – smeša 2.

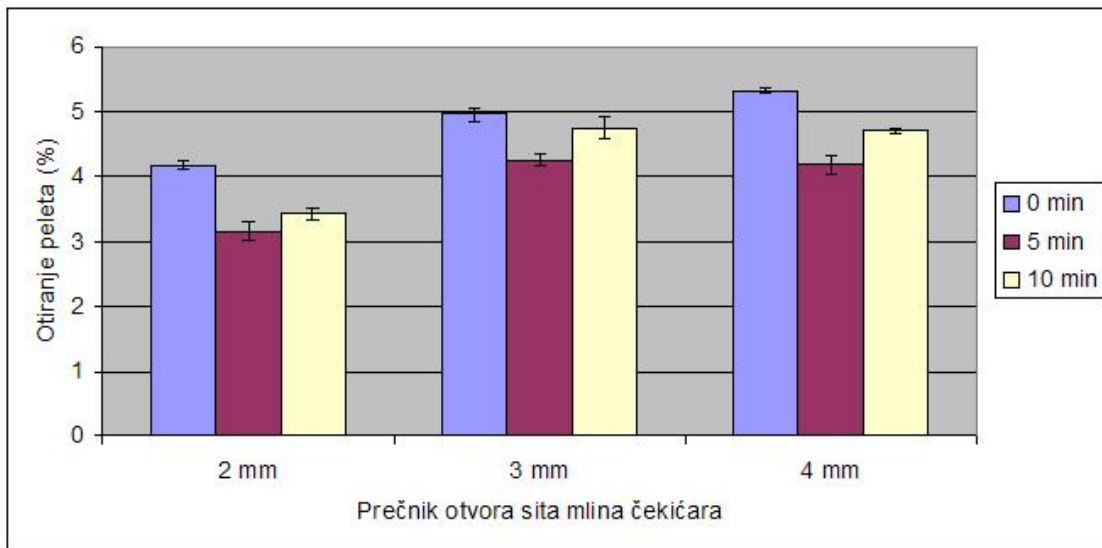
Na Slici 56 prikazani su rezultati stepena otiranja peleta smeše 3. Kao i kod smeše 2, i kod ove peleta ove smeše primećen je uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na stepen otiranja peleta, pa je tako povećanje prečnika otvora sita uticalo na povećanje stepena otiranja peleta. Primećen je značajan ($p < 0,05$) uticaj vremena zadržavanja u kondicioneru na stepen otiranja peleta, kao i kod peleta sa suncokretovom sačmom najlošijeg kvaliteta, pri čemu je najmanji stepen otiranja peleta postignut za vreme zadržavanja materijala od 5 minuta. Kod peleta ove smeše, za isti prečnik otvora sita mlina čekićara materijala, za vreme zadržavanja od 5 minuta, dobijene su kvalitetnije pelete čije je otiranje bilo od 1,59 % do 68,05 % manje od peleta od materijala koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru i materijala koji je zadržavan u trajanju od 10 minuta. Pošto je stepen želatinizacije skroba ove smeše bio zavisao od vremena zadržavanja materijala u kondicioneru, može se smatrati da je vreme od 5 minuta optimalno u pogledu funkcionalnih promena makronutrijenata smeše i površinske vlage materijala.



Slika 56. Otiranje peleta – smeša 3.

Vrednosti stepena otiranja peleta smeše 4 (Slika 57) su se kretale u užem intervalu (3,16 do 5,31%) nego kod smeša 2 i 3. Povećanje prečnika otvora sita čekićara je uticalo na povećanje stepena otiranja peleta. Kao i kod smeša 2 i 3, vreme zadržavanja u kondicioneru je značajno ($p < 0,05$) uticalo na stepen otiranja peleta, pa je najmanji stepen otiranja peleta postignut za vreme zadržavanja materijala od 5 minuta. Vrednosti otiranja peleta za vreme zadržavanja od 5 minuta bile su od 8,02 do 24,34 % manje od vrednosti otiranja peleta od materijala bez naknadnog zadržavanja u kondicioneru i od materijala čije je vreme naknadnog zadržavanja 10 minuta. Kao i kod smeša sa lošijim kvalitetom suncokretove sačme, i ovde se vreme zadržavanja u kondicioneru u trajanju od 5 minuta pokazalo kao optimalno za minimalan stepen otiranja peleta.

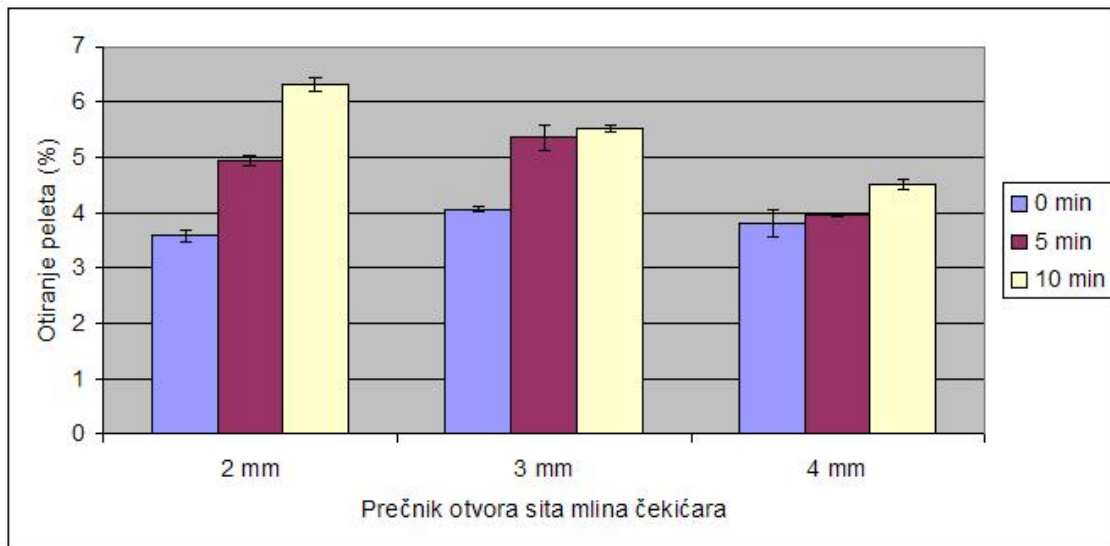
Sa povećanjem udela proteina i smanjenjem udela ljuske u suncokretovoj sačmi smanjivalo se srednje apsolutno odstupanje između vrednosti otiranja peleta od materijala bez naknadnog zadržavanja u kondicioneru i vrednosti otiranja peleta od materijala koji je naknadno zadržavan u kondicioneru u trajanju od 5 minuta, kao i između vrednosti otiranja peleta od materijala koji je naknadno zadržavan u kondicioneru u trajanju od 5 minuta i vrednosti otiranja peleta od materijala koji je naknadno zadržavan u kondicioneru u trajanju od 10 minuta. Za smeše 2 i 3 ono je iznosilo 40,96 i 29,59 %, dok je za smešu 4 ono iznosilo 14,93 %.



Slika 57. Otriranje peleta – smeša 4.

Kod smeše 5 (Slika 58) nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj prečnika otvora sita mlina čekićara na stepen otiranja peleta. Vreme zadržavanja u kondicioneru imalo je značajan ($p < 0,05$) uticaj na vrednosti stepena otiranja peleta. Kao i kod peleta napravljenih od smeše 1, stepen otiranja peleta se povećavao sa povećavanjem vremena zadržavanja materijala u kondicioneru. Ovaj trend se može povezati sa većom moći upijanja vode sojine sačme u odnosu na suncokretovu sačmu, kao što je već pokazano od strane *Lević i Sredanović (2012)*, jer su pelete napravljene za vreme zadržavanja od 5 minuta imale lošiji kvalitet od peleta napravljenih u kondicioneru usled smanjenja površinske vlage koja potpomaže povezivanje peleta, što kod smeša 2-4 nije bio slučaj.

Srednje vrednosti stepena otiranja peleta za svih 5 smeša iznosile su: 11,81 % (smeša 1), 11,72 % (smeša 2), 5,92 % (smeša 3), 4,32 % (smeša 4) i 4,67 % (smeša 5). Poređenjem ovih vrednosti može se videti da su pelete napravljene od smeše 1 bile lošijeg kvaliteta nego pelete napravljene od smeše 2, uprkos velikom sadržaju nerastvorljivih sirovih vlakana, koja utiču na povećanje stepena otiranja peleta.



Slika 58. Otklanje peleta – smeša 5.

Razlog za to je činjenica da peletiranju smeše 1 pogoduje kraće vreme kondicioniranja zbog brže apsorpcije vode, kao i manji sadržaj proteina i veći sadržaj skroba u ovoj smeši, koji je samo delimično želatiniziran. To se može videti iz srednje vrednosti otklanja peleta smeše 1 od materijala koji nije naknadno zadržavan u kondicioneru (10,99 %), a koja je manja od srednje vrednosti otklanja peleta smeše 2 za isto vreme kondicioniranja (14,89 %). Takođe, *Calvacanti (2004)* je pokazao da proteini kukuruza imaju negativan uticaj na fizički kvalitet peleta, što može biti još jedan od razloga za velike vrednosti otklanja peleta smeše 1.

Povećanje sadržaja proteina u suncokretovoj sačmi i smanjenje sadržaja sirovih vlakana odrazilo se na povećanje fizičkog kvaliteta peleta, pa su tako od smeša sa suncokretovom sačmom pelete napravljene od smeše 4 imale najmanje vrednosti stepena otklanja. Razlog za to je što se proteini na visokim temperaturama i u vlažnoj sredini ponašaju kao vezivno sredstvo, pa su pelete sa većim udelom proteina kvalitetnije.

Srednja vrednost stepena otklanja peleta smeše 5 bila je veća od srednje vrednosti otklanja peleta smeše 4. Ukoliko se porede vrednosti sadržaja proteina (20,06 : 21,42), kao i vrednosti sadržaja sirovih vlakana (7,42 : 1,99) smeša 4 i 5, može se videti da smeša sa suncokretovom sačmom ima manji sadržaj proteina i veći sadržaj sirovih vlakana, a manji stepen otklanja peleta. Međutim srednje vreme zadržavanja materijala u okviru jedne smeše je 5 minuta, a već je pokazano da

produženje vremena zadržavanja ima pozitivan uticaj na kvalitet peleta napravljenih od smeša 2-4, a negativan uticaj na kvalitet peleta napravljenih od smeše 5. Vrednosti otiranja peleta smeše 5 za konvencionalno vreme zadržavanja, tj. bez naknadnog zadržavanja, (3,82 %), su manje od vrednosti otiranja peleta smeše 4 za isto vreme zadržavanja (4,81 %).

MacMahon and Payne (1991) su poredili peletabilnost suncokretove i sojine sačme i pokazali da su pelete od čiste suncokretove sačme bile kvalitetnije od peleta od čiste sojine sačme, iako su imale manji sadržaj sirovih proteina, veći sadržaj sirovih vlakana, kao i neznatno veći sadržaj sirove masti. Međutim, ovi autori nisu dali brojne vrednosti za stepen otiranja peleta i za tvrdoću peleta od navedenih sačmi, kao i procesne parametre pod kojima su pelete proizvedene.

4.5. Matematičko modelovanje i optimizacija otiranja peleta

U Tabeli 15 prikazane su eksperimentalne vrednosti odziva (otiranja peleta) u procesu peletiranja smeša sa dodatom suncokretovom sačmom. Ulazne promenjive, koncentracija proteina (X_1), prečnik otvora sita mlina čekićara (X_2) i vreme produženog kondicioniranja parom (X_3), su date u vidu kodiranih vrednosti, dok su stvarne vrednosti prikazane u Tabeli 5 (šarže 10-36).

Vrednosti koeficijenata u polinomu drugog stepena, koji opisuje uticaj nezavisno promenjivih, kao i međuzavisnost ovih promenjivih na odziv sistema (procenat otiranja peleta), prikazane su u Tabeli 15. Analiza varijanse pokazala je da pojedine nezavisno promenjive u polinomu imaju statistički značajan uticaj na odziv sistema na nivou statističke značajnosti od $p < 0,05$.

Vrednosti značajnosti nezavisno promenjivih u modelu za optimizaciju otiranja peleta se mogu videti na Slici 59. Linearni član koji se odnosi na koncentraciju proteina (C) je značajno uticao na promenu otiranja peleta. Kod kvadratnih članova na vrednost odziva sistema (otiranje peleta) uticali su koncentracija proteina (C^2) i vreme produženog kondicioniranja parom (t^2).

Tabela 15. Eksperimentalne vrednosti odziva u procesu peletiranja smeša sa dodatom suncokretovom sačmom

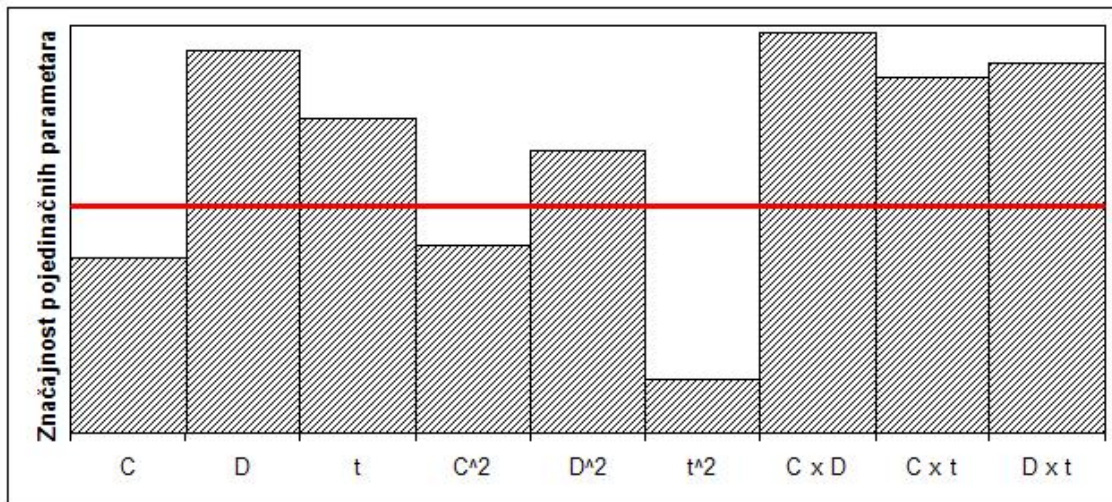
X_1	X_2	X_3	Otiranje (%)
-1	-1	-1	14,23
-1	-1	0	8,25
-1	-1	1	13,00
-1	0	-1	14,91
-1	0	0	6,24
-1	0	1	9,00
-1	1	-1	15,52
-1	1	0	9,30
-1	1	1	15,07
0	-1	-1	5,12
0	-1	0	3,96
0	-1	1	4,80
0	0	-1	5,28
0	0	0	4,06
0	0	1	4,13
0	1	-1	13,67
0	1	0	4,37
0	1	1	7,92
1	-1	-1	4,17
1	-1	0	3,16
1	-1	1	3,43
1	0	-1	4,95
1	0	0	4,25
1	0	1	4,75
1	1	-1	5,31
1	1	0	4,18
1	1	1	4,71

Koeficijent determinacije (R^2), kao mera varijabilnosti sistema, je određen na osnovu ANOVA testa. Vrednost koeficijenta determinacije od 0,83 je pokazatelj da predloženi model dobro opisuje eksperimentalne vrednosti.

Od ostalih statističkih pokazatelja korišćenih za potvrdu validnosti modela, koren srednje vrednosti kvadrata greške (RMSE) je iznosio 1,67, dok je srednja greška odstupanja (MBE) iznosila 2,78.

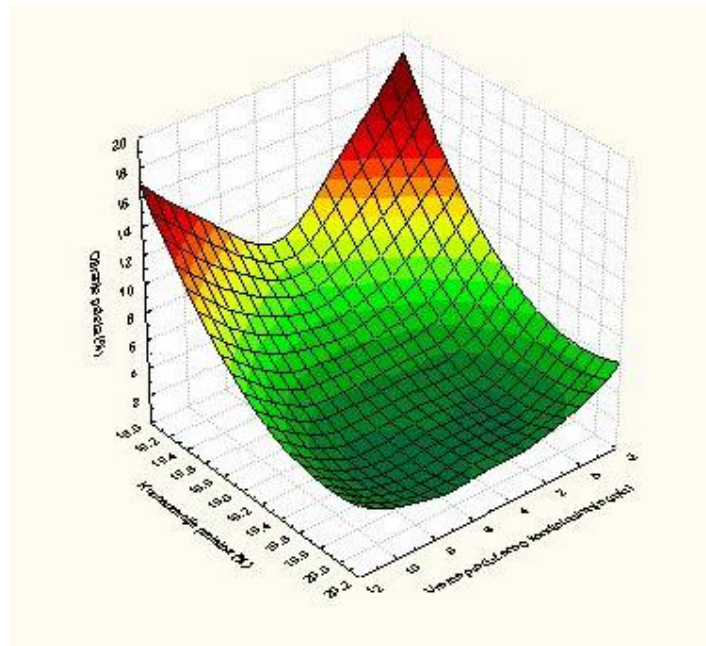
Tabela 16. Regresioni koeficijenti u modelu

Koeficijenti	Otiranje peleta (%)
β_0	856,960*
Linearni	
β_1	-84,203*
β_2	-5,316
β_3	-3,091
Kvadratni	
β_{11}	2,101*
β_{22}	1,391
β_{33}	0,121*
Interakcija	
β_{12}	-0,081
β_{13}	0,101
β_{23}	-0,075
Koeficijent determinacije	
R^2	0,83
RMSE	1,67
MBE	2,78

*Statistički značajno na nivou $p < 0,05$ 

Slika 59. Dijagram značajnosti nezavisno promenljivih u modelu za optimizaciju otiranja peleta.

Na Slici 60 prikazan je odziv sistema (procenat otiranja peleta) u zavisnosti od promena ulaznih veličina, koncentracije proteina, prečnika otvora sita čekićara i vremena produženog kondicioniranja parom. Na 3d grafiku je prikazana zavisnost odziva od dve ulazne veličine, dok je treća nezavisno promenljiva fiksirana u centralnoj tački (prečnik otvora sita mlina čekićara je fiksiran u vrednosti od 3 mm).



Slika 60. Dijagram zavisnosti otiranja peleta od koncentracije proteina i vremena produženog kondicioniranja parom

Sa Slika 55-57 se može videti da povećanje koncentracije proteina u smešama sa dodatom suncokretovom sačmom značajno utiče na smanjenje stepena otiranja peleta, za sva tri vremena zadržavanja u kondicioneru, zbog svojstva proteina da se na visokim temperaturama i u vlažnoj sredini ponaša kao vezivno sredstvo. Vreme produženog kondicioniranja parom je takođe značajno uticalo na kvalitet peleta. Najkvalitetnije pelete, tj. pelete sa najmanjim stepenom otiranja, su dobijene za vreme produženog kondicioniranja parom od 5 minuta. Vreme produženog kondicioniranja parom od 5 minuta se pokazalo kao optimalno za količinu površinske vlage za povezivanje čestica, kao i za funkcionalne promene na skrobu i proteinima, kako je već objašnjeno.

Za određivanje optimalnih vrednosti procesnih parametara u cilju smanjenja stepena otiranja peleta korišćena je metoda željene funkcije (*Khayet et al., 2008*). Ukupna željena funkcija može da ima vrednosti od 0 do 1, pri čemu se teži da se za datu kombinaciju ulaznih veličina bude u oblasti što bližoj vrednosti 1. Optimalne vrednosti variranih parametara, koncentracije proteina (C (%)), prečnika otvora sita mlina čekićara (D (mm)) i vremena produženog kondicioniranja (t (min)), u cilju

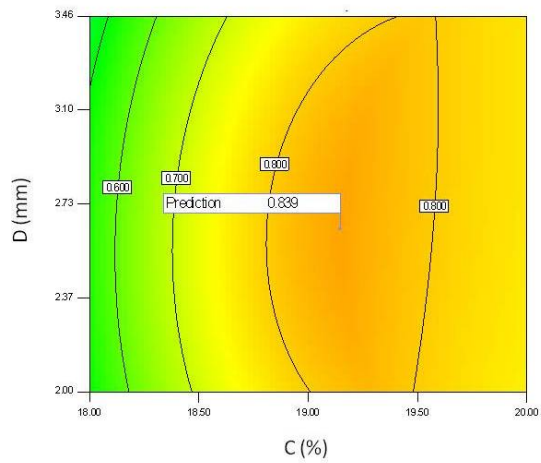
dobijanja minimalne vrednosti otiranja peleta, uz što manju specifičnu potrošnju energije, date su u Tabeli 17. Za stepen otiranja peleta je izabran faktor značajnosti 5 (od 5), jer je stepen otiranja peleta primarni parametar fizičkog kvaliteta peleta, a za specifičnu potrošnju energije 2 (od 5).

Tabela 17. Optimalne vrednosti procesnih parametara za minimalnu vrednost stepena otiranja peleta

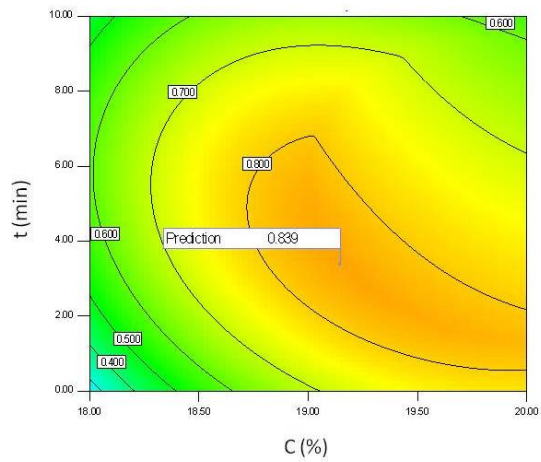
C (%)	D (mm)	t (min)	Otiranje peleta (%)	E (kW/t/h)
19,2	2,6	3,4	3,16	16,32

Na Slici 61 prikazani su rezultati optimizacije eksperimentalnih vrednosti, tj. sadržaja proteina, prečnika otvora sita čekićara i dužine trajanja produženog kondicioniranja parom. Data je zavisnost ukupne željene funkcije od 2 procesna parametra, dok je treći parametar fiksiran u optimalnoj vrednosti.

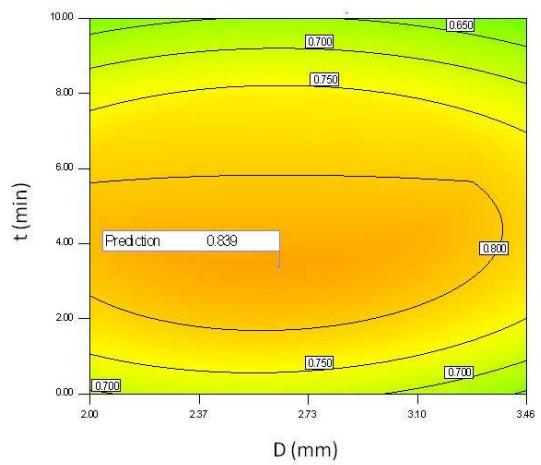
Sa Slike 61 (a) i (b) može se videti da vrednost ukupne željene funkcije raste sa porastom koncentracije proteina u smešama do vrednosti koncentracije proteina od oko 19,5 %. Dalje povećanje koncentracije proteina neznatno utiče na fizički kvalitet peleta, ali značajno povećava specifičnu potrošnju energije. Stoga je za optimalan fizički kvalitet peleta (za opseg koncentracija proteina u smeši u ovom istraživanju od 18,1 do 20,1 %), pri manjoj specifičnoj potrošnji električne energije, potrebno peletirati smešu sa opsegom koncentracija proteina od 19,0 do 19,5 %. Ukupna željena funkcija ima veće vrednosti za prečnik otvora sita mlina čekićara od oko 2,0 mm do oko 3,5 mm (za opseg prečnika otvora sita mlina čekićara u ovom istraživanju od 2,0 mm do 4,0 mm), pri čemu je optimalna vrednost prečnika otvora sita mlina 2,6 mm (Slika 61 (a) i (c)).



(a)



(b)



(c)

Slika 61. Zavisnost ukupne željene funkcije od eksperimentalnih vrednosti procesnih parametara: C (%) i D (mm) (a), C (%) i t (min) (b), D (mm) i t (min) (c).

Preporuka je da se za mlevenje kukuruza, koji se koristi u pripremi smeša sa suncokretovom sačmom, ne koriste prečnici otvora mlina sita čekićara veći od oko 3,5 mm, kako bi se proizvodile pelete dobrog kvaliteta, uz optimalnu potrošnju električne energije. Vrednost ukupne željene funkcije (za opseg vremena naknadnog zadržavanja materijala u kondicioneru u ovom istraživanju od 0 do 10 minuta) je pokazala da se za opseg vremena zadržavanja u kondicioneru od 2,5 do 5,5 minuta dobijaju najkvalitetnije pelete, uz optimalnu potrošnju električne energije (Slika 61 (b) i (c)). Optimalno vreme naknadnog zadržavanja u kondicioneru, za opseg vremena naknadnog zadržavanja koji je primenjen u ovom istraživanju, iznosi 3,4 minuta.

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata prikazanih u ovoj disertaciji mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Temperatura peletiranja (temperatura matrice pelet prese i temperatura peleta) pokazala je zavisnost od sirovinskog sastava smeša. Najviše temperature postignute su pri peletiranju čistog kukuruza, dok su najniže temperature postignute pri peletiranju smeša sa suncokretovom sačmom. Smanjenje sadržaja skroba i sirovih proteina i povećanje sadržaja sirovih vlakana uticalo je na snižavanje temperature peletiranja. Različit hemijski sastav upotrebljenih smeša uzrokovao je pojavu trenja različitog intenziteta, što je dalje uticalo na promenu temperature peletiranja. Temperature matrice pelet prese kod smeša sa suncokretovom sačmom bile su od 4,9 do 10,1°C niže u odnosu na smešu kukuruza i sojine sačme, odnosno od 7,6 do 12,8°C niže u odnosu na smešu od čistog kukuruza. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara i produženje vremena zadržavanja u kondicioneru uticalo je na povećanje temperature peletiranja.
2. Specifična potrošnja energije menjala se sa peletiranjem smeša različitog sirovinskog sastava. Pri peletiranju smeša sa suncokretovom sačmom specifična potrošnja energije bila je od 33 do 65 % niža u poređenju sa smešom od čistog kukuruza i smešom kukuruza i sojine sačme. Povećanje sadržaja sirovih vlakana i smanjenje sadržaja proteina u suncokretovoj sačmi snizilo je specifičnu potrošnju energije od 10 do 30 %. Produženje vremena kondicioniranja parom povećalo je specifičnu potrošnju energije, u zavisnosti od sastava smeše, od 10 do 33 %. Prečnik otvora sita mlina čekićara nije značajno ($p > 0,05$) uticao na specifičnu potrošnju energije.
3. Udeo prašine u peletama je opadao sa porastom sadržaja proteina, smanjenjem sadržaja sirovih vlakana i smanjenjem sadržaja skroba u smešama, zbog boljeg povezivanja čestica. Pri peletiranju smeša sa suncokretovom sačmom od 40,31 % i 42,68 % sadržaja proteina, izmeren je

manji udeo prašine, nego kod peleta od čistog kukuruza i kod peleta od smeše kukuruza i sojine sačme. Produženje vremena kondicioniranja parom uticalo je na povećanje udela prašine u peletama zbog smanjenja površinske vlage. Nije primećen jasan uticaj granulacije materijala na udeo prašine u peletama.

4. Step en želatinizacije skroba u peletama bio je relativno nizak i kretao se u opsegu od 7,73 do 38,61 %. Najveći step en želatinizacije izmeren je u peletama od čistog kukuruza, zbog najviših temperatura peletiranja. Smanjenje prečnika otvora sita mlina čekićara i produženje vremena naknadnog kondicioniranja uticali su na povećanje step ena želatinizacije skroba.
5. Kvalitativna i kvantitativna analiza proteina pokazala je da je proces peletiranja uticao na promene u veličini molekula proteina i njihovoj koncentraciji. Intenzitet ovih promena zavisio je od sirovinskog sastava smeša. Kod peleta od čistog kukuruza došlo je do razlaganja proteina većih molekulskih masa na manje, što je dovelo do smanjenja frakcija proteina većih od 38,2 kDa i povećanja frakcija proteina manjih od 25,5 kDa. Kod smeša sa suncokretovom sačmom koncentracija većine proteinskih frakcija se smanjila. Pri peletiranju smeše sa suncokretovom sačmom sa najvećom koncentracijom proteina došlo je do povezivanja proteina u toku peletiranja. Nije primećen značajan ($p > 0,05$) uticaj granulacije materijala i vremena zadržavanja u kondicioneru na promenu koncentracije i sastava proteina.
6. Prečnik peleta pokazao je zavisnost od hemijskog sastava smeša. Najmanji prečnik peleta dobijen je pri peletiranju smeša sa sojinom sačmom. Pelete od smeša sa suncokretovom sačmom imale su od 3,6 do 4,7 % veći prečnik od peleta od smeše sa sojinom sačmom. Kod smeša sa suncokretovom sačmom prečnik peleta je opadao sa smanjenjem udela sirovih vlakana i povećanjem udela proteina u smeši. Vreme kondicioniranja i granulacija materijala nisu značajno ($p > 0,05$) uticali na prečnik peleta.

7. Najtvrdže pelete dobijene su pri peletiranju smeše sa sojinom sačmom (23,90 kg) zbog visokog sadržaja proteina i niskog sadržaja sirovih vlakana. Tvrdća peleta od smeša sa suncokretovom sačmom bila je od 35 do 61 % manja u poređenju sa tvrdoćom peleta od smeša sa sojinom sačmom. Kod peleta od smeša sa suncokretovom sačmom, tvrdoća peleta se smanjivala sa smanjenjem sadržaja sirovih vlakana i povećanjem sadržaja proteina u smeši. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara uticalo je na smanjenje tvrdoće peleta usled pojave „slabih tačaka“ u peleti.
8. Stepent otiranja peleta, najznačajniji pokazatelj fizičkog kvaliteta peleta, zavisio je od hemijskog sastava smeša. Pelete od čistog kukuruza, tj. pelete od smeše sa najvećim sadržajem skroba, imale su najveći stepent otiranja (11,81 %), što je najslabiji kvalitet peleta proizvedenih u ovom istraživanju. Kod peleta sa suncokretovom sačmom, sa povećanjem sadržaja proteina i smanjenjem sadržaja sirovih vlakana smanjivao se stepent otiranja peleta. Pelete od smeše sa suncokretovom sačmom najboljeg kvaliteta imale su za 8,5 % manji stepent otiranja od peleta od smeše sa sojinom sačmom, uprkos manjem sadržaju proteina, većem sadržaju sirovih vlakana i većem sadržaju masti. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara uticalo je na povećanje stepena otiranja peleta, zbog pojave „slabih tačaka“. Vreme kondicioniranja takođe je uticalo na stepent otiranja peleta. Minimalno otiranje peleta kod smeša sa suncokretovom sačmom postignuto je za vreme produženog kondicioniranja od 5 minuta, a kod ostalih smeša bez produženog kondicioniranja.
9. Primenom metode odzivne površine i metode željene funkcije na adekvatan način opisani su uticaji procesnih parametara (koncentracije proteina, prečnika otvora sita mlina čekićara i vremena produženog kondicioniranja) na stepent otiranja peleta i specifičnu potrošnju energije pelet prese. Optimalni uslovi procesa peletiranja smeša sa dodatkom suncokretove sačme pokazali su da je za dobijanje kvalitetnih peleta potrebno peletirati smešu sa većim sadržajem proteina, koja je mlevana na mlinu čekićaru prečnika otvora od 2,0 do 3,5 mm i koja je zadržana u kondicioneru u trajanju od 2,5 do 5,5 minuta.

6. LITERATURA

- [1] Aarseth, K.A., Prestløy, E., Mechanical properties of feed pellets: Weibull Analysis, *Biosystems Engineering* 84 (2003) 349-361.
- [2] Abdolahi, M.R., Ravindran, V., Svihus, B., Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value, *Animal Feed Science and Technology* 179 (2013) 1-23.
- [3] Adamović, M., Bočarov-Stančić, A., Radivojević, M., Effect of „Bentopell“ on the quality and efficiency of the usage of pelleted feed mixtures, *Journal on Processing and Energy in Agriculture* 15 (2) (2011) 74-78.
- [4] Adams, J.B., Review: enzyme inactivation during heat processing of food-stuffs, *International Journal of Food Science and Technology* 26 (1991) 1-20.
- [5] Adapa, P., Tabil, L., Schoenau, G., Compression characteristics of selected ground agricultural biomass, *Agricultural Engineering International: CIGR E-journal*, Manuscript 1347, IX (2009).
- [6] AEC Tables, Recommendations for Animal Nutrition, 5th Edition, Rhone Poulenc, Paris (1987).
- [7] Ajayi, S., University of Alabama at Birmingham, Benjamin Cummings Publishing (2008).
- [8] Alakangas, E., Paju, P., Wood pellets in Finland, technology, economy and market. OPET 5 report. VTT Technical Research Centre of Finland: Espoo (2002).
- [9] Amerah, A.M., Gilbert, C., Simmins, P.H., Ravindran, V., Influence of feed processing on the efficacy of exogenous enzymes in broiler diets, *World's Poultry Science Journal* 67 (1) (2011) 29-46.

- [10] Angulo, E., Brufau, J., Esteve-Garcia, E., Effect of a sepiolite product on pellet durability in pig diets differing particle size and in broiler starter and finisher diets, *Animal Feed Science and Technology* 63 (1996) 25-34.
- [11] Anonymous (a), *Pelleting Technology* Netherland, Schijndel, Netherland (2012).
- [12] Anonymous (b), *Animal feeds – Sunflower meals*, Northern gate, Burnaby, Canada (2012) www.northerngate.ca.
- [13] Anonymous (c), *Products - Soy bean meal*, Best Ag Source, Inc. (2012) www.bestagsource.com.
- [14] AOAC official methods of analysis, 17th edition, J. AOAC Int., Arlington, USA (2000).
- [15] AOCS Method Ba 3-38. In: *Official methods and recommended practices* 5th edition, AOCS Press, Champaign (2001).
- [16] ASAE S319.3. Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. In: *Agricultural Engineers Yearbook*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA (2003) 589.
- [17] Aumaitre, A., Melcion, J.P., Vaissade, P., Seve, B., Glucose, sirop de glucose à haute teneur en fructose (S.G.H.F.F.), ou saccharose dans les aliments de sevrage précoce du porcelet: influence sur l'agglomération et l'appétibilité, *Annales de Zootechnie* 27 (3) (1978) 409-421.
- [18] Bandyopadhyay, S.Rout, R.K., Aquafeed extrudate flow rate and pellet characteristics from low-cost single-screw extruder, *Journal of Aquatic Food Product Technology* 10 (2) (2001) 3-15.

- [19] Behnke K.C., Factors affecting pellet quality, Maryland Nutrition Conference, Department of Poultry Science and Animal Science, University of Maryland, College Park, MD, USA (1994), 44-54.
- [20] Behnke K.C., Factors influencing pellet quality, *Feed Tech* 5(4) (2001) 19-22.
- [21] Berhmann, J., Berhmann, J., Refinement of solid matters by means of agglomeration by compression with flat die pelleting process, Amandus KAHL, Hamburg, Germany (2012) 1-4.
- [22] Bernardin, J.E.; Kasarda, D.D., Hydrated protein fibrils from wheat endosperm, *Cereal Chemistry* 50 (1973) 529-536.
- [23] Beumer, H., De invloed van enkele wijzen van mengselvoorbereiding op het persresultaat II, *De Molenaar* 83 (1980) 1688-1690, 1716-1718, 1756-1758, 1792-1794.
- [24] Briggs, J.L., Maier, D.E., Watkins, B.A., Behnke, K.C., Effects of ingredients and processing parameters on pellet quality, *Poultry Science* 78 (1999) 1464-1471.
- [25] Brkić, M., Janić, T., Briketiranje i peletiranje biomase, Monografija, Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija (2009).
- [26] Buchanan, N.P., Moritz, J.S., Main effects and interactions of varying formulation protein, fiber, and moisture on feed manufacture and pellet quality, *The Journal of Applied Poultry Research* 18 (2) (2009) 274-283.
- [27] Calvacanti, W.B., The effect of ingredient composition on the physical quality of pelleted feeds: a mixture experimental approach. Ph.D. dissertation. Kansas State University (2004).
- [28] Carroll, J.P., Finnan, J., Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws, *Biosystems Engineering* 122 (2) (2012) 151-159.

- [29] Catala-Gregori, P., Garca, V., Madrid, J., Orengo, J., Hernandez, F., Inclusion of dried bakery product in high fat broiler diets: effect on pellet quality, performance, nutrient digestibility and organ weights, *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 22 (5) (2009) 686.
- [30] Cornell, H.J., Hoveling, A.W., Chryss, A., Rogers, M., Particle size distribution in wheat starch and its importance in processing, *Starch* 46 (1994) 203-207.
- [31] Cowieson, A.J., Hruby, M., Isaksen, M.F., The effect of conditioning temperature and exogenous xylanase addition on the viscosity of wheat-based diets and the performance of broiler chickens, *British Poultry Science* 46 (2005) 717-724.
- [32] Čabarkapa, I., Čolović, R., Vukmirović, Đ., Kokić, B., Ivanov, D., Šarić, Lj., Lević, J., Effect of moisture increase during conditioning process on microbial properties of pellets, *Archiva Zootechnica* 13 (3) (2010) 47-54.
- [33] Čolović, R., Mišljenović, N. Ivanov, D., Koprivica, G., Dragomir, C., Lević, Lj. Lević, J. Sredanović, S., Wheat milling fractions as a carrier of sugar beet molasses - physical properties of pellets, *Archiva Zootechnica* 14 (2) (2011) 17-27.
- [34] Čolović, R., Vukmirović, D., Matulaitis, R., Bliznikas, S., Uchockis, V., Juškienė, V., Lević, J., Effect of die channel press way length on physical quality of pelleted cattle feed, *Food and Feed Research* 1 (2010) 1-6.
- [35] Delić, I., Lević, J., Sredanović, S., Standardna i oplemenjena suncokretova sačma sa 44% sirovih proteina, 33. Savetovanje: Unapređenje uljarstva Jugoslavije (1992) 268-287.
- [36] Di Gioia, L., Cuq, B., Guilbert, S., Effect of plasticizers on thermomechanical properties of corn gluten meal, *Cereal Chemistry* 75 (1998) 514-519.
- [37] Donald, A.M., Plasticization and self-assembly in the starch granule. Review. *Cereal Chemistry* 78 (2001) 307-314.

- [38] Đorđević, N., Dinić, B., Proizvodnja smeša koncentrata za životinje, Kruševac, Srbija (2011) 247-248.
- [39] Đorđević, N., Makević, M., Grubić, G., Jokić, Ž., Ishrana domaćih i gajenih životinja, Poljoprivredni fakultet, Zemun, Srbija (2009) 371-394.
- [40] Faborode, M.O., Ocallaghan, J.R., Optimizing the compression briquetting of fibrous agricultural materials, Journal of Agricultural Engineering Research 38 (1987) 245-262.
- [41] Fairchild, F., Greer, D., Pelleting with precise mixer moisture content, Feed International 20 (1999) 32-36.
- [42] Feil, A., Steam generation, steam properties and conditioning. In: Fundamentals and new developments in feed-compounding technology, Braunschweig, Germany (2009).
- [43] Filipović, S., Đurđev, S., Sredanović, S., Bogdan, V., Ivić, M., Tehnološki postupak peletiranja suncokretove sačme, Uljarstvo 29 (1-2) (1992) 61-65.
- [44] Franke and Rey, Pelleting quality, World Grain (2006) 78-79.
- [45] Friedrich, W., Robohm, K.F., Die Abriebfestigkeit von Pellets und ihre Abhängigkeit vom Pressprozess insbesondere der Kühlung, Krafffutter 52 (1968) 59-64.
- [46] Friedrich, W., Robohm, K.F., Preßfähigkeit von Komponenten und Mischungen, Teil IV: Wirkung unterschiedlicher Inhaltsstoffe in Mischungen und Verdichtungswiderstand, Krafffutter 65 (3) (1982) 92-102.
- [47] Friedrich, W., Futtermitteltechnologie. In: Handelsfuttermittel 1. Band 1, Gesamtschau, Futtermittel tierscher Herkunft, Fette und Öle, Zusatzstoffe, Kling, M. and Wohlbier, W., Editors, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, Germany (1977).

- [48] Friedrich, W., Zur Technologie des Verpressens von Mischfutter. Grundlagen, Versuchsergebnisse und ihre Bedeutung für den Mischfutterbetrieb, *Krafftutter* 47 (6) (1964) 352-358.
- [49] Frølich, W., Chelating properties of dietary fibre and phytate. The role for mineral availability. In: *New developments in dietary fibre and phytate*, Furda, I., Brine, C.J., Editors, Plenum, New York, USA (1990) 83-93.
- [50] Gilpin, A.S., Herrman, T.J., Behnke, K.C., Fairchild, F.J., Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process, *Applied Engineering in Agriculture* 18 (2002) 331-338.
- [51] Goelema, J.O., Smits, A., Vaessen, L.M., Wemmers, A., Effects of pressure toasting, expander treatment and pelleting on in vitro and in situ parameters of protein and starch mixture of broken peas, lupins and faba beans, *Animal Feed Science and Technology* 78 (1999) 109-126.
- [52] Grover, P.D., Mishra, S.K., Biomass briquetting: technology and practices, Regional wood energy development program in Asia, field document no. 46. Bangkok, Thailand, FAO of the UN (1996).
- [53] Hamilton, R.M.G., Kennie, J., The effects of lighting program, ingredient particle size and feed form on the performance of broiler chickens, *Canadian Journal of Animal Science* 77 (1997) 503-508.
- [54] Hansen, M.T., Jain, A.R., Hayes, S., Bateman, P., English handbook of wood pellet combustion, EU-funded Pelletsatlas project (2009).
- [55] Hayta, M., Alpaslan, M., Effects of processing on biochemical and rheological properties of wheat gluten proteins, *Nahrung/Food* 45 (2001) 304-308.
- [56] Heckel, R.W., An analysis of powder compaction phenomena, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* 221 (1961) 1001-1008.
- [57] Heffner, L.E., Pfof, H.B., Gelatinization during pelleting, *Feedstuff* 45 (1973) 33.

- [58] Heimann, M., The “bottom line” of grinding, *Feed International* 23 (5) (2002) 32-34.
- [59] Hemmingsen, A.K.T., Stevik, A.M., Claussen, I.C., Lundblad, K.K., Prestløkken, E., Sørensen, M., Eikevik, T.M., Water adsorption in feed ingredients for animal pellets at different temperatures, particle size, and ingredient combinations, *Drying Technology* 26 (2008) 738–748.
- [60] Hendriks, W.H., Moughan, P.J., Boer, H., van der Poel, A.F.B., Effects of extrusion on the dye-binding, fluorodinitrobenzene-reactive and total lysine content of soya-bean meal and peas, *Animal Feed Science and Technology* 48 (1994) 99-109.
- [61] Heinemans H., The interaction of practical experience and the construction of new pelleting and cooling machinery, *Advances in Feed Tech* 6 (1991) 24-38.
- [62] Hertzal, G., *Preconditioning Technology, Aquaculture Feed Extrusion, Nutrition and Feed Management Short Course*, Texas A&M University, TX, USA (2010).
- [63] Hill, B., Pulkinen, D.A., A study of the factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets, *Saskatchewan Dehydrators Association*, Saskatchewan, Canada (1988).
- [64] Holm, J., Lundquist, I., Björck, I., Eliasson, A.C., Asp, N., Relationship between degree of gelatinization, digestion rate in vitro, and metabolic response in rats, *The American Journal of Clinical Nutrition* 47 (1988) 1010-1016.
- [65] Hosney, R.C., *Principles of cereal science and technology*, 2nd edition, AACC, St Paul, MN, USA (1994).

- [66] Hott, J.M., Buchanan, N.P., Cutlip, S.E., Moritz, J.S., The effect of moisture addition with a mold inhibitor on pellet quality, feed manufacturem and broiler performance, *Journal of Applied Poultry Research* 17 (2008) 262-271.
- [67] Howell, N.K., Protein-protein interactions. In: *Developments in Food Proteins* 7, Hudson, B.J.F., Editors, Elsevier, Amsterdam, Netherlands (1991) 231-270.
- [68] Ivanov, D., Čolović, R., Lević, J., Sredanović, S., Optimization of supercritical fluid extraction of linseed oil using RSM, *European Journal of Lipid Science* 114 (7) (2012) 807-815.
- [69] Kaliyan, N., Morey, R.V., Factors affecting strength and durability of densified biomass products, *Biomass and Bioenergy* 33 (2009) 337-359.
- [70] Kaliyan, N., Morey, R.V., Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass, *Bioresource Technology* 101 (3) (2010) 1082-1090.
- [71] Kawakita, K., Ludde, K.H., Some considerations on powder compression equations, *Powder Technology* 4 (1971) 61-68.
- [72] Ker, Y.C., Chen, R.H., Shear-induced conformational changes and gelation of soy protein isolate suspensions, *Food Science and Technology* 31 (1998) 107-113.
- [73] Kersten, J., Rohde, H.R., Nef, E., *Principles of Mixed Feed Production*, Agrimedia, Germany (2005).
- [74] Kirchner, A., *Cooling*. In: *Fundamentals and new developments in feed-compounding technology*, Braunschweig, Germany (2009).
- [75] Kitabatake, N., Doi, E., Denaturation and texturization of food protein by extrusion cooking, In: *Food extrusion science and technology*, Kokini, J.L., Ho, C.T., Karwe, M., Editors, Marcel Dekker, New York, USA (1992) 361-371.

- [76] Koch, K., Hammermils and Roller Mills, Feed Manufacturing, MF-2048, Kansas State University (2002) 1-5.
- [77] Kyahet, M., Cojocar, C., Zakrzewska-Trznadel, G., Response surface modelling and optimization in prevaporation, Journal of Membrane Science (2008) 272-283.
- [78] Kytö, M., Äijälä, M., Use and conversion of wood energy. Part 3. Equipment technology for biomass pelletisation. Espoo: Technical Research Centre of Finland, Research Notes (1981) 46.
- [79] Lankhorst, C., Tran, Q.D., Havenaar, R., Hendriks, W.H., van der Poel, A.F.B., The effect of extrusion on the nutritional value of canine diets as assessed by in vitro indicators, Animal Feed Science and Technology 138 (2006) 285-297.
- [80] Larsson, K., Inhibition of starch gelatinization by amylase-lipid complex formation, Stärke 32 (4) (1980) 125-126.
- [81] Lazić, Design of Experiments in Chemical Engineering, Wiley, Weinheim (2004).
- [82] Leuenberger, H., Rohera, D., Fundamentals of powder compression. 1. The compactibility and compressibility of pharmaceutical powders, Pharmaceutical Research 3 (1986) 12-22.
- [83] Lević, J., Deliće, I., Ivić, M., Rac, M., Stefanović, S., Proizvodnja suncokretove sačme sa povišenim i visokim sadržajem proteina pomoću frakcionisanja, Uljarstvo 26 (1-2) (1989) 45-52.
- [84] Lević, J., Deliće, I., Ivić, M., Rac, M., Stefanović, S., Removal of cellulose from sunflower meal by fractionation, Journal of American Oil Chemists Society 69 (9) (1992) 890-893.

- [85] Lević, J., Delić, I., Sredanović, S., Arsenijević, M., Pejović, R., Ćurčić, R., Razvoj tehnološkog postupka oplemenjavanja suncokretove sačme, *Uljarstvo* 29 (1-2) (1992) 31-37.
- [86] Lević, J., Radoičić, D., Sredanović, S., Lević, Lj., Technological Procedures for Enhancing the Production of High Protein Content Sunflower Meal. *Advances in Oils and Fats, Antioxidants and Oilseed By-Products*. Eds. Koseoglu, S.S., Rhee, K.C., Wilson, R.F. In: AOCS Press, Champaign, Illinois, USA (1998) 104-107.
- [87] Lević, J., Sredanović, S., Enzymes as Additives for Upgrading the Nutritive Value of Poultry Diets Containing Sunflower Meal, *Victam, FIAAP International Conference, Cologne, Germany, (2011)*.
- [88] Lević, J., Sredanović, S., Suncokretova sačma, *Monografija, Naučni institut za prehrabene tehnologije u Novom Sadu, Novi Sad (2012)*.
- [89] Lević, J., Vukić-Vranješ, M., Isakov, V., Stojanović, S., Sredanović S., The effect of pelleting on quality of various feed mashes for fattening swines, *International conference "Modern feedmilling – prospects for development", Moscow, Russia (1994) 42*.
- [90] Lo, G.S., Physiological effect and physico-chemical properties of soy cotyledon fibre, In: *New developments in dietary fibre*, Furda, I., Brine, C.J., Editors, Plenum, New York, USA (1990) 49-66.
- [91] Loar II, R.E., Corzo, A., Effects of feed formulation on feed manufacturing and pellet quality characteristics of poultry diets, *World's Poultry Science Journal*, 67 (2011) 19-27.
- [92] Löwe, R., Milling at the Feed Plant. In: *Fundamentals and new developments in feed-compounding technology*, Braunschweig, Germany (2009).

- [93] Lucht, H.W., Expander and extruder – Conditioning and physics, Amandus Kahl, Reinbek, Germany (2009).
- [94] Ludikhuyse, L., Van Loey, A., Indrawati, S.C., Hendrickx, M., Effects of combined pressure and temperature on enzymes related to quality of fruits and vegetables: from kinetic information to process engineering aspects, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 43 (2003) 527-586.
- [95] Lundblad, K.K., Hancock, J.D., Behnke, K.C., Prestløkken, E., McKinney, L.J., Sørensen, M., The effect of adding water into the mixer on pelleting efficiency and pellet quality in diets for finishing pigs without and with use of an expander, *Animal Feed Science and Technology* 150 (2009) 295-302.
- [96] MacMahon, M.J., Payne, J.D., *The pelleting handbook*, Borregaard Lignotech (1991) 63.
- [97] Maier, D.E., Briggs, J., Watkins, B.A., Effects of ingredients and processing conditions on the pelleting of feeds, Completed research summary, US Poultry and Egg Association, Tucker, USA (1999) Project 305.
- [98] Maier, D.E., Gradecki, J., Feed mash conditioning field case studies. Paper no. 92-1541. The American Society of Agricultural Engineers, Int. winter meeting, TN, USA (1992).
- [99] Maier, D.E., Kelley, R.I., Bakker-Arkema, F.W., The counterflow cooling of feed pellets, *Journal of Agricultural Engineering Research* 53 (1992) 305-319.
- [100] Malumba, P., Vanderghem, C., Deroanne, C., Béra, F., Influence of drying temperature on the solubility, the purity of isolates and the electrophoretic patterns of corn proteins, *Food chemistry* 111 (2008) 564-572.
- [101] Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S., Evaluation of compaction equations applied to four biomass species, *Canadian Biosystems Engineering* 46 (2004) 3.553.61.

- [102] Marchetti M., Tossani N., Marchetti S., Bauce G., Stability of crystalline and coated vitamins during manufacture and storage of fish feeds, *Aquaculture Nutrition* 5 (1999) 115–120.
- [103] Marsman, G.J.P., Gruppem, H., de Groot, J., Voragen, A.G.J., Effect of toasting and extrusion at different shear levels on soy protein interactions, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46 (7) (1998) 2770-2777.
- [104] Merkus, H.G., *Particle size measurements: fundamentals, practice, quality*, Springer (2009).
- [105] Miladinović, D., Svihus, B., To the better physical pellet quality through the pellet press settings, www.engormix.com (2010).
- [106] Mohsenin, N., Zaske, J., Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials, *Journal of Agricultural Engineering and Research* 21 (1976) 193-205.
- [107] Molina, E., Ledward, D.A., Effects of combined high-pressure and heat treatment on textural properties of soya gels, *Food Chemistry* 80 (2003) 367-370.
- [108] Moran Jr, E.T., Effect of pellet quality on the performance of meat birds. In: *Recent advances in animal nutrition*, Haresign, W., Cole, D.J.A., Editors, London, England (1989) 87-108.
- [109] Moritz, J.S., Beyer, R.S., Wilson, K.J., Cramer, K.R., McKinney, L.Y., Fairchild, F.J., Effect of moisture addition at the mixer to a corn-soybean based diet on broiler performance, *Journal of Applied Poultry Research* (2001) 347-353.
- [110] Mullen, K., Ennis, D.M., Rotatable design in product development, *Food Technology* 33 (7) (1979) 74-75 78-80.

- [111] Murphy, A., Collins, C., Philpotts, A. Bunyan, A., Henman, D., Influence of hammer mill screen size and grain source (wheat or sorghum) on the growth performance of male grower pigs, QUA Meet Industries, Pty Ltd, Report (2009).
- [112] Mushtaq, T., Sarwar, M., Ahmad, G., Mirza, M.A., Ahmad, U., Noreen, U., Mushtaq, Z., Karman, M.M.H., Influence of sunflower meal based diets supplemented with exogenous enzyme and digestible lysine on performance, digestibility and carcass response of broiler chickens, *Animal Feed Science and Technology* 149 (3-4) 275-286.
- [113] Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M., Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments, New York, John Wiley, Edition 3 (2009).
- [114] Myers, R.H., Montgomery, D.C., Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons, New York, USA (1995).
- [115] Oechsner de Coninck, K., Bouvier, J.M., Preconditioning in extrusion-cooking process, *Grain Processing Asia '95*, Singapore (1995) 109-119.
- [116] Oil World, Major meals, World summary balances, *Oil World Weekly* 55 (3) (2010) 45.
- [117] Palić, D., Coetzee, E., Postupak za korišćenje rastvorljivosti proteina kao indikatora termičkog tretmana punomasne soje, *Acta Periodica Technologica* 40 (2009) 71-77.
- [118] Payne, J.D., Improving quality of pellet feeds, *Milling Feed Fertil* 162 (1978) 34-41.
- [119] Payne, Pelleting – striving for a greater control, *AgriTrade* (1995)

- [120] Payne, J.D., Troubleshooting the pelleting process, Feed technology technical report series, Singapore: American Soybean Association International Marketing Southeast Asia (2006) 17-23.
- [121] Pfof, H.B., Equipment and techniques in starch gelatinization, Feedstuffs (1971) 24.
- [122] Pfof, H.B., Testing the durability of pelleted feed, Feedstuffs (1963) 66-68.
- [123] Pietsch, W., Agglomeration processes – phenomena, technologies, equipment, Weinheim, Wiley-VCH (2002).
- [124] Pirie, N.W., Food protein sources, Cambridge University Press (2012).
- [125] Prasad, E.R., Dutta-Gupta, A., Padmasree, K., Purification and characterization of a Bowman-Birk proteinase inhibitor from the seeds of black gram (*Vigna mungo*), Phytochemistry 71 (2010) 363-372.
- [126] Pravilnik o kvalitetu hrane za životinje, „Službeni glasnik RS broj 4/2010“ (2010).
- [127] Radosavljević, M., Milašinović, M., Pajić, Z., Filipović, M., Starch in animal feed, XIII International Feed Technology Symposium, Novi Sad, Serbia (2009) 20-28.
- [128] Reece, F.N., Lott, B.D., Deaton, J.W., Effects of environmental temperature and corn particle size on response of broilers to pelleted feed, Poultry Science 65 (1986a) 636-641.
- [129] Reece, F.N., Lott, B.D., Deaton, J.W., Effects of hammer mill screen size on ground corn particle size, pellet durability, and broiler performance, Poultry Science 65 (1986b) 1257-1261.
- [130] Reimer, L., Conditioning. In: Proc. Northern Crops Institute Feed Mill Management and Feed Manufacturing Technol. Short Course. CPM Crawfordsville, USA (1992) 7.

- [131] Renkema, J.M.S., Lakemond, C.M.M., de Jongh, H.H.J., Gruppen, H., Van Vliet, T., The effect of pH on heat denaturation and gel forming properties of soy proteins, *Journal of Biotechnology* 79 (2000) 223-230.
- [132] Richardson, W., Day, E.J., Effect of varying levels of added fat in broiler diets on pellet quality, *Feedstuffs* 48 (1976) 24.
- [133] Robohm, K.F., Adjustable roll gap: benefits to energy demand, throughput and pellet durability, *Feed International* 13 (1992) 30-35.
- [134] Robohm, K.F., Apelt, J., Die Automatische Spaltweitenverstellung, *Die Mühle und Mischfuttertechnik* 126 (1989) 271-275.
- [135] Rouilly, A., Orliac, O., Silvestre, F., Rigal, L., Thermal denaturation of sunflower globulins in low moisture conditions, *Thermochimica Acta* 398 (2003) 195-201.
- [136] Rumpf, H., Grundlagen und Methoden des Granulierens, *Chemie-Ing.-Tech.* 30 (3) (1958) 144-158.
- [137] Rumpf, H., The strength of granules and agglomeration. In: *Agglomeration*, Knepper, W.A., Editor, New York, John Wiley (1962) 379-418.
- [138] Salmon, R.E., Effect of pelleting, added sodium bentonite and fat in a wheat-based diet on performance and carcass characteristics of small white turkeys, *Animal Feed Science and Technology* 12 (1985) 223-232.
- [139] Seckinger, H.L., Wolf, M.J., Electron microscopy of endosperm protein from hard and soft wheats, *Cereal Chemistry* 47 (1970) 236-243.
- [140] Serena, A., Bach-Knudsen, K.E., Chemical and physiochemical characterisation of co-products from the vegetable food and agro industries, *Animal Feed Science and Technology* 139 (2007) 109-124.

- [141] Serrano, M.P., Valencia, D.G., Méndez, J., Mateos, G.G., Influence of feed form and source of soybean meal of the diet on growth performance of broilers from 1 to 42 days of age. 1. Floor pen study, *Poultry Science* 91(1) (2012) 2838-2844.
- [142] Skoch, E.R., Behnke, K.C., Deyoe, C.W., Binder, S.F., The effect of steam-conditioning rate on the pelleting process, *Animal Feed Science and Technology* 6 (1981) 83-90.
- [143] Skoch, E.R., Binder, S.F., Deyoe, C.W., Allee, G.L., Behnke, K.C., Effect of steam pelleting conditions and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middlings, *Journal of Animal Science* 57 (1983) 929-935.
- [144] Sonnergaard, J.M., Investigation of anew mathematical model for compression of pharmaceutical powders, *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 14 (2) (2001) 149-157.
- [145] Sosulski, F.W., The centrifuge method for determination water absorption in hard red spring wheats, *Cereal Chemistry* 39 (1962) 344-351.
- [146] Spasevski, N., Kokić, B., Bliznikas, S., Švirmickas, G., Vukmirović, Đ., Čolović, R., Lević, J., Effect of different thickness of die on the stability of amino acids in pelleting pig feed, *Journal of Animal Science, Bulgaria* (2010) 150-154.
- [147] Spencer, R.S., Gilmore, G.D., Wiley, R.M., Behavior of granulated polymers under pressure, *Journal of Applied Physics* 21 (1950) 527-531.
- [148] Sredanović, S., Lević, J., Conditioning: An important step in feed production, *Journal of Processing and Energy in Agriculture* 4 (3-4) (2000) 82-84.
- [149] Sredanović, S., Lević, J., Đuragić, O., Enzyme Enhancement of the Nutritional Value of Sunflower Meal, *Biotechnology in Animal Husbandry* 21 (5-6) (2005) 197-203.

- [150] Sredanović, S., Lević, J., Đuragić, O., Ivanov, D., Upgraded Technology for Sustainable Sunflower Meal production, First International conference "Sustainable postharvest and food technologies" INOPTEP 2009 13 (3) (2009) 265-267.
- [151] Sredanović, S., Lević, J., Mechanical fractionation as the procedure for increasing feeding value of animal feedstuffs, International Agrophysics, Institute of Agrophysics 8 (4) (1994) 693-697.
- [152] Sredanović, S., Unapređenje tehnološkog procesa i kvaliteta suncokretove sačme, Magistarska teza, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2007.
- [153] Stark, C.R., Effect of die thickness and pellet mill throughput on pellet quality, Southern Poultry Science Society Meeting, Abstr. T89 (2009).
- [154] Statistica, Data Analysis Software System v 10.0, StatSoft Inc., Tulsa, USA (2011).
- [155] Stelte, W., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions, Fuel 90 (2011) 3285-3290.
- [156] Stevens, C.A., Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process. Ph.D.Dissertation. Kansas State University, USA (1987).
- [157] Stevnebo, A., Sahlström, S., Svihus, B., Starch structure and degree of starch hydrolysis of small and large starch granules from barley varieties with varying amylose content, Animal Feed Science and Technology 130 (2006) 23-28.
- [158] Svihus, B., Kløvstad, K.H., Perez, V., Zimonja, O., Sahlström, S., Schüller, R.B., Jerksrud, W.K., Presteløkken, E., Nutritional effects of pelleting of

- broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill, *Animal Feed Science and Technology* 117 (2004) 281-293.
- [159] Svihus, B., Uhlen, A.K., Harstad, O.M., Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review, *Animal Feed Science and Technology* 122 (2005) 303-320.
- [160] Svihus, B., Zimonja, O., Chemical alterations with nutritional consequences due to pelleting animal feeds: a review, *Animal Production Science* 51 (2011) 590-596.
- [161] Tabil, L.G., Binding and pelleting characteristics of alfalfa. Ph.D.Dissertation. University of Saskatchewan, Canada (1996).
- [162] Thomas, M., van der Poel, A.F.B., Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality, *Animal Feed Science and Technology* 61 (1996) 89-112.
- [163] Thomas, M., van Zuilichem, D.J., van der Poel, A.F.B., Physical quality of pelleted animal feed 2. Contribution of processes and its conditions, *Animal Feed Science and Technology* 64 (1997) 173-192.
- [164] Thomas, M., van Vilet, T., van der Poel, A.F.B., Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components, *Animal Feed Science and Technology* 70 (1998) 59-78.
- [165] Timmons, J.R., Angel, R., Harter-Dennis, J.M., Saylor, W.W., Ward, N.E., Evaluation of heat-stable phytases in pelleted diets fed to broilers from day zero to thirty-five during the summer months, *Journal of Applied Poultry Research* 17 (2008) 482-489
- [166] Tomanee, P., Cassava-Based Adsorbent for Removing Water from Ethanol Vapor, 2008 AIChE Annual Conference (2008) 134-138.

- [167] Torbica, A., Živančev, D., Nikolić, Z., Đorđević, V., Nikolovski, B., Advantages of the Lab-on-a-Chip method in the determination of the Kunitz trypsin inhibitor in soybean varieties, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58 (2010) 7980-7985.
- [168] Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Kenney, K.L., Hess, J.R., A technical review on biomass processing: Densification, preprocessing, modeling and optimization, 2010 ASABE Annual International Meeting (2010) 1-32.
- [169] Turner, R., Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality, *Feed Management* 46 (1995) 30-33.
- [170] Van Barneveld, R.J., Effect of heating proteins on the digestibility, availability and utilization of lysine by growing pigs, PhD Thesis, University of Queensland, Australia (1993).
- [171] Van Zuilichem, van der Poel, A.F.B., The comparative costs and benefits of expanders and double pelleting in animal feed production, *Proceedings Feed Expo Ireland* (1993) 102.
- [172] Vilamide, M.J., San Juan, L.D., Effect of chemical composition of sunflower meal on its true metabolizable energy and amino acid digestibility, *Poultry Science* 77 (1998) 1884-1892.
- [173] Vukmirović, Đ., Ivanov, D., Čolović, R., Kokić, B., Lević, J., Đuragić, O., Sredanović, S., Effect of steam conditioning on physical properties of pellets and energy consumption in pelleting process, *Journal of Processing and Energy in Agriculture* 14 (2) (2010) 106-108.
- [174] Walter, M., The inclusion of liquids in compound feeds, *Advanced Feed technology* 4 (1990) 36-48.
- [175] Weijers, SR, van't Riet, K., Enzyme stability in downstream processing. Part 1: enzyme inactivation, stability and stabilization, *Biotechnology Advances* 10 (1992) 237-249.

- [176] Winowiski, T., Problems in optimizing pellet quality, *Feed Management* 36 (1985) 28-33.
- [177] Winowiski, T., Wheat and pellet quality, *Feed Management* 39 (1988) 58-64.
- [178] Wood, J.F., The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets, *Animal Feed Science and Technology* 18 (1987) 1-17.
- [179] Yumak, H., Ucar, T., Seyidbekiroglu, N., Briquetting soda weed (*Salsola tragus*) to be used as a rural fuel source, *Biomass and Bioenergy* 34 (5) (2010) 630-636.
- [180] Zimonja, O., Hetland, H., Lazarević, N., Edvardsen, D.H., Svihus, B., Effects of fibre content in pelleted wheat and oat diets on technical pellet quality and nutritional value for broiler chickens, *Canadian Journal of Animal Science* 88 (4) (2008) 613-622.
- [181] Zimonja, O., Stevnebø, A., Svihus, B., Nutritional value of diets for broiler chickens as affected by fat source, amylose level and diet processing, *Canadian Journal of Animal Science* 87 (2007) 553-562.
- [182] Zimonja, O., Svihus, B., Effects of processing of wheat or oats starch on physical pellet quality and nutritional value for broilers, *Animal Feed Science and Technology* 149 (2009) 287-297.