



UNIVERZITET U NOVOM SADU

Tehnološki fakultet

**UTICAJ PARAMETARA MLEVENJA I PELETIRANJA
NA GRANULACIJU I FIZIČKE KARAKTERISTIKE
PELETIRANE HRANE ZA ŽIVOTINJE**

Doktorska disertacija

Mentori: Dr Jovanka Lević

Prof. dr Aleksandar Fišteš

Kandidat: Đuro Vukmirović, dipl. inž.

NOVI SAD, 2015. GODINE

Najpre bih želeo da se zahvalim mentorki, dr Jovanki Lević, osobi koja je sve ovo omogućila, koja mi je pružila priliku, obezbedila uslove i imala puno poverenja u mene. Hvala joj na velikoj podršci i pomoći.

Zahvaljujem se i mentoru, prof. dr Aleksandru Fištešu, sa kojim sam započeo svoj naučni rad tokom izrade diplomskog rada na osnovnim studijama, a potom ga, na svoje veliko zadovoljstvo, uspešno nastavio u okviru ove doktorske disertacije.

Veliku zahvalnost za pomoć u eksperimentalnom radu, kao i na preuzimanju velikog dela drugih obaveza koje sam zapostavio tokom rada na disertaciji, dugujem dragim kolegama Vojislavu Banjcu, dr Dušici Čolović, Bojani Kokić, dr Oliveri Đuragić, Nedeljki Spasevski, Sanji Popović, Slađani Rakiti, Albertu Kormanjošu, i naročito dr Radmilu Čoloviću na korisnim savetima i sugestijama tokom izrade doktorske disertacije.

Zahvalnost na pomoći tokom izrade doktorske disertacije takođe dugujem i dr Ljiljani Kostadinović, dr Tatjani Tasić i dr Predragu Ikoniću.

Veliku zahvalnost na lepoj saradnji, pomoći i savetima dugujem kolegici mr Slavici Sredanović. Takođe bih se na podršci zahvalio i kolegama dr Draganu Paliću, dr Šandoru Kormanjošu i dr Đorđu Okanoviću.

Posebno se zahvaljujem docentu dr Dušanu Rakiću na savetima i pomoći tokom obrade eksperimentalnih podataka.

Zahvalnost i ljubav dugujem svojim roditeljma, Nataliji i Momčilu, kao i bratu Aleksandru, koji su mi, u teškim vremenima iza nas, utabali put do mesta na kome se u ovom trenutku nalazim.

Naravno, moja inspiracija i izvor snage je moja porodica, supruga Tea, moja mala Sofija i novi član naše porodice Filip.

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 material
Vrsta rada (dipl., mag., dok.)	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Đuro Vukmirović, dipl. inž.
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje)	1) Prof. dr Aleksandar Fišteš, vanredni profesor 2) Dr Jovanka Lević, naučni savetnik
Naslov rada: NR	Uticaj parametara mlevenja i peletiranja na granulaciju i fizičke karakteristike peletirane hrane za životinje
Jezik publikacije: JP	Srpski jezik, latinica
Jezik izvoda: JI	srp./eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2015.
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Bulevar cara Lazara 1, Novi Sad
Fizički opis: FO	6 poglavlja, 170 strana, 77 tabela, 107 slika, 229 literaturnih navoda
Naučna oblast: NO	Biotehničke nauke - prehrambeno inženjerstvo
Naučna disciplina: ND	Tehnologija hrane za životinje
Predmetna odrednica, ključne reči:	Hrana za životinje, mlevenje, peletiranje,

PO	kukuruz, veličina čestica, kvalitet peleta
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu
Važna napomena: VN	Istraživanja u ovoj tezi deo su projekta III46012, finansiranog od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije
Izvod: IZ	<p>U savremenom uzgoju živine i svinja smeše se retko koriste u praškastom obliku već se uglavnom peletiraju nakon umešavanja pojedinačnih sastojaka. Pri peletiranju dolazi do narušavanja granulacije smeše, odnosno do gotovo potpunog eliminisanja krupnih čestica, kao i do nastajanja velike količine najsitnijih čestica. U okviru istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji ispitivan je uticaj promene odabranih parametara mlevenja i peletiranja na granulaciju čestica od kojih su pelete sačinjene. Cilj je bio da se utvrdi kombinacija parametara koja doprinosi povećanju sadržaja krupnih čestica, što je značajno u ishrani živine, odnosno da se utvrdi kombinacija parametara koja će u što većoj meri uvećati sadržaj čestica srednje veličine i umanjiti udeo najsitnijih čestica, što je značajno u ishrani svinja. Pri tome je određivan i kvalitet peleta, koji ne sme biti značajnije narušen, kao i potrošnja energije pelet prese za koju je poželjno da je što niža.</p> <p>Nezavisni parametri peletiranja bili su granulacija kukuruznog mliva, rastojanje (zazor) između valjaka i matrice pelet prese, debljina matrice pelet prese i sadržaj vode materijala koji se vodi na peletiranje. Istraživanje je podeljeno u dve faze, gde je u prvoj za usitnjavanje primenjen mlin čekićar, a u drugoj mlin sa valjcima. Na oba uređaja prizvedene su po tri granulacije mliva, pri čemu se granulacija ukрупnjava od najsitnijeg mliva dobijenog na mlinu čekićaru do najkrupnijeg mliva dobijenog na mlinu sa valjcima. U prvoj fazi tri granulacije mliva dobijene na mlinu čekićaru su peletirane u kombinaciji sa tri zazora valjci-matrica (0,30; 1,15 i 2,00 mm) i tri sadržaja vode materijala (14,5%, 16,0% i 17,5%), a u drugoj fazi tri granulacije mliva dobijene na mlinu sa</p>

valjcima peletirane su u kombinaciji sa tri debljine matrice (24, 30 i 36 mm) i tri sadržaja vode materijala (14,5%, 16,0% i 17,5%). Dakle, u obe faze su varirana tri parametra na tri nivoa pri čemu je primenjen Box-Behnken eksperimentalni dizajn. Zavisno promenljive karakteristike (odzivi) bili su temperatura matrice pelet prese, specifična potrošnja energije pelet prese, udeo prašine u peletama, stepen želatinizacije skroba, tvrdoća, stepen otiranja i nasipna masa peleta, kao i granulacija materijala nakon peletiranja. Za svaki od pomenutih odziva definisan je polinom (model) drugog reda. Dobijeni modeli upotrebljeni su za optimizaciju procesa peletiranja sa ciljem da se postigne željena granulacija peletiranog materijala, uz što bolji kvalitet peleta i uz što manju potrošnju energije.

U istraživanju je utvrđeno da mliva sa približno istom vrednošću geometrijskog srednjeg prečnika, dobijena na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, imaju značajno različitu raspodelu veličine čestica. Na mlinu čekićaru dobija se šira raspodela, sa većim sadržajem najkrupnijih i najsitnijih čestica, u poređenju sa mlinom sa valjcima. Za proizvodnju mliva približno istog geometrijskog srednjeg prečnika, a pogotovo mliva sa relativno sličnom raspodelom veličine čestica, potrošnja energije kod mlina sa valjcima značajno je manja u poređenju sa mlinom čekićarom.

Potvrđeno je da peletiranje uzrokuje veliki intenzitet usitnjavanja čestica bez obzira na primenjene parametre. Međutim, određene kombinacije parametara mogu doprineti značajnijem očuvanju krupnih čestica. Parametar peletiranja koji najviše doprinosi povećanju udela krupnih čestica u peletama je granulacija mliva koje se upućuje na peletiranje. Što je krupnija granulacija, udeo krupnih čestica u peletama će biti veći.

Rezultati optimizacije procesa peletiranja u prvoj fazi ukazuju da je u pogledu proizvodnje peletirane hrane za živinu, kada je poželjno očuvanje određene količine krupnih čestica, potrebno primeniti krupno mlevenje na mlinu čekićaru, uz

	<p>podešavanje zazora između valjaka i matrice od 2 mm i uz sadržaj vode materijala od 17,5%. U drugoj fazi optimizacijom je utvrđeno da je potrebno koristiti debljinu matrice od 30 mm, najkrupniju granulaciju mliva na mlinu sa valjcima i vlagu od 17,5%. Pri proizvodnji peletirane hrane za živnu povoljnije je koristiti mlin čekićar, s obzirom da je utvrđeno da su čestice mliva dobijenog na čekićaru otpornije na usitnjavanje tokom peletiranja od čestica dobijenih na mlinu sa valjcima što omogućuje očuvanje većeg broja krupnih čestica tokom peletiranja.</p> <p>Povećanje širine zazora valjci-matrica nije poželjno prilikom peletiranja hrane za svinje jer se povećava intenzitet usitnjavanja čestica, a time i udeo najsitnije frakcije čestica. Sličano je i sa povećanjem debljine matrice. U prvoj fazi istraživanja, rezultati optimizacije pokazuju da je u cilju povećanja udela frakcija čestica srednje veličine (630 – 1600 μm), kao i smanjenja sadržaja najsitnijih čestica (< 125 μm), potrebno primeniti najsitnije mlevenje na mlinu čekićaru, najveći sadržaj vode materijala (17,5%), dok zazor između valjaka i matrice treba podesiti da bude nešto veći od 0,30 mm. I u drugoj fazi istraživanja optimizacija je ukazala da je najveći udeo čestica srednje veličine (630 – 1600 μm), kao i najmanji udeo čestica < 125 μm, ostvaren pri peletiranju najsitnijeg mliva dobijenog na mlinu sa valjcima. Pri tome sadržaj vode je potrebno podesiti na 17,5%, dok debljina matrice treba biti oko 28 mm.</p> <p>Pri predloženim optimalnim parametrima peletiranja ostvaren je zadovoljavajući kvalitet peleta, a potrošnja energije pelet prese bila je na prihvatljivom nivou.</p>
Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP	13.3.2015.
Datum odbrane: DO	

<p>Članovi komisije: (ime i prezime/ titula/ zvanje/ naziv organizacije/ status) KO</p>	<p>Predsednik: Dr Dušan Rakić, docent, Tehnološki fakultet, Novi Sad</p> <p>Član: Dr Jovanka Lević, naučni savetnik, Naučni institut za prehrambene tehnologije u Novom Sadu, Novi Sad – mentor rada</p> <p>Član: Dr Aleksandar Fišteš, vanredni profesor, Tehnološki fakultet, Novi Sad – mentor rada</p> <p>Član: Dr Radmilo Čolović, naučni saradnik, Naučni institut za prehrambene tehnologije u Novom Sadu, 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
Content code: CC	PhD Thesis
Author: AU	Đuro Vukmirović, Graduated Engineer
Mentor: MN	1) Dr. Aleksandar Fišteš, Associate Professor 2) Dr. Jovanka Lević, Principal Research Fellow
Title: TI	Influence of grinding and pelleting parameters on granulation and physical characteristics of pelleted animal feed
Language of text: LT	Serbian language, Latin
Language of abstract: LA	eng./ srp.
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	AP Vojvodina
Publication year: PY	2015
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Physical description: PD	6 chapters, 170 pages, 77 tables, 107 figures, 229 references
Scientific field: SF	Biotechnical Sciences - Food Engineering
Scientific discipline: SD	Feed technology
Subject, key words:	Animal feed, grinding, pelleting, corn,

SKW	particle size, pellet quality
UC	
Holding data: HD	Library of the Faculty of technology, University of Novi Sad
Note: N	Researches of this thesis are part of the project III46012, funded by Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia
Abstract: AB	<p>In modern poultry and swine breeding, animal feed is rarely used in powder form but mainly pelleted after mixing of different ingredients. During pelleting process, granulation of the feed is compromised, i.e. coarse particles are almost completely destroyed and the content of fine particles is strongly increased. This doctoral thesis investigated the impact of changes in selected grinding and pelleting parameters on granulation of particles after pelleting. The goal was to achieve the quantity of coarse particles in pellets to be as high as possible, which is important in poultry nutrition. Another goal was to determine the combination of parameters that will increase, as much as possible, the content of particles medium in size and reduce the share of the smallest particles, which is important in swine nutrition. At the same time quality of the pellets must not be significantly degraded and energy consumption of pellet press should be as low as possible.</p> <p>Independent pelleting parameters were corn granulation after grinding, the distance (gap) between the rollers and the die of pellet presses (roller-die gap), the thickness of the pellet press die (die thickness) and the water content of pelleted material. The study was divided in two stages. In the first stage the corn was ground using a hammer mill and in the second stage, roller mill was used. Three different granulations were produced on both mills. Coarseness of the ground material increased from the finest material produced using the hammer mill to the coarsest material obtained at the roller mill. In the first stage, three different granulations produced at the hammer mill were pelleted in combination with three different roller-die gaps (0.30, 1.15 and 2.00 mm) and three different water</p>

contents of material (14.5%, 16.0% and 17.5%). In the second stage three different granulations produced at the roller mill were pelleted in combination with three different die thicknesses (24, 30 and 36 mm) and three different water content of material (14.5%, 16.0% and 17.5%). Thus, three parameters were varied at three levels in both stages and experiments were designed according to Box-Behnken design. Depended variables (responses) were: temperature of the pellet press die, specific energy consumption of pellet press, dust content in pellets, degree of starch gelatinization, pellet hardness, pellet durability, bulk density of the pellets, and particle size of the material after pelleting. For each of the responses, a second order polynomial model was defined and used for optimization of the pelleting process.

It was determined that particle size distribution of material with similar geometric mean diameter, obtained with hammer mill and roller mill, is significantly different from each other. Hammer mill produced higher quantity of the coarsest and the finest particles comparing to roller mill. Energy consumption of roller mill for grinding to similar particle size distribution or similar geometric mean diameter is lower compared to hammer mill.

Even though it was determined that secondary grinding of particles during pelleting is inevitable, certain combinations of pelleting parameters may contribute to significant preservation of large particles and to reduction of quantity of small particles.

Results of optimization in the first stage indicated that for the production of pelleted poultry feed, when certain amount of coarse particles should be preserved, it is necessary to apply coarse grinding on hammer mill, with the roller-die gap of 2 mm and with material water content of 17.5%. In the second stage it was determined that it is necessary to use die with thickness of 30 mm, coarsest granulation at the roller mill and material water content of 17.5%. In the production of pelleted poultry feed it is better to use a hammer mill since it was found that the

	<p>particles obtained on hammer mill are more resistant to secondary grinding than the particles obtained with the roller mill.</p> <p>Roller-die gap increase is not desirable during pelleting of swine feed because it increases secondary grinding, and thus the proportion of the smallest particles. Similar effect has an increase of the die thickness.</p> <p>In the first stage of the study, the results of the optimization showed that the largest quantity of medium-sized particles (630 – 1600 μm), and the lowest quantity of the smallest particles ($< 125 \mu\text{m}$), were achieved with the finest grinding on the hammer mill. At the same time water content of 17.5% should be applied, while the roller-die gap should be close to 0.30 mm. In the second stage of the study, the largest quantity of medium-sized particles, and the lowest quantity of the smallest particles, was achieved with the finest grinding on the roller mill. According to the optimization results, the water content should be set to 17.5%, while die thickness should approx. 28 mm.</p> <p>With the proposed optimal parameters, satisfactory pellet quality was achieved, and energy consumption of the pellet presses was at an acceptable level.</p>
Accepted on Scientific Board on: AS	March 13, 2015
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>President: Dr. Dušan Rakić, Assistant Professor, Faculty of Technology, Novi Sad</p> <p>Member: Dr. Jovanka Lević, Principal Research Fellow, Institute of Food Technology, Novi Sad – mentor</p> <p>Member: Dr. Aleksandar Fišteš, Associate Professor, Faculty of Technology, Novi Sad – mentor</p> <p>Member: Dr. Radmilo Čolović, Research Associate, Institute of Food Technology, Novi Sad</p>

SADRŽAJ

1.	POGLAVLJE 1: Uvod.....	1
2.	POGLAVLJE 2: Pregled literature.....	4
2.1.	HRANA ZA ŽIVOTINJE.....	4
2.2.	KUKURUZ.....	6
2.3.	MLEVENJE.....	7
2.3.1.	Teorija usitnjavanja čvrstih tela.....	8
2.3.2.	Mlin čekićar.....	9
2.3.3.	Mlin sa valjcima.....	13
2.3.4.	Poređenje mlina čekićara i mlina sa valjcima.....	16
2.4.	PROCES PELETIRANJA.....	17
2.4.1.	Faze procesa peletiranja.....	18
2.4.1.1.	<i>Kondicioniranje.....</i>	18
2.4.1.2.	<i>Peletiranje.....</i>	20
2.4.1.3.	<i>Hlađenje.....</i>	22
2.4.2.	Fizički kvalitet peleta.....	23
2.4.2.1.	<i>Mehanizmi povezivanja čestica u peletama.....</i>	23
2.4.2.2.	<i>Kriterijumi i uređaji za određivanje kvaliteta peleta.....</i>	25
2.4.2.2.1.	<i>Tvrdoća peleta.....</i>	26
2.4.2.2.2.	<i>Stepen otiranja peleta.....</i>	27
2.4.3.	Parametri procesa peletiranja.....	29
2.4.3.1.	<i>Debljina matrice, L:D odnos.....</i>	30
2.4.3.2.	<i>Zazor valjci – matrica.....</i>	30
2.4.3.3.	<i>Protok materijala.....</i>	32
2.4.3.4.	<i>Brzina obrtanja valjaka/matrice.....</i>	32
2.4.3.5.	<i>Veličina čestica.....</i>	33

2.4.3.6.	<i>Hemijski sastav peletiranog materijala.....</i>	34
2.4.4.	<i>Značaj peletiranja i kvaliteta peleta u ishrani životinja.....</i>	35
2.5.	ZNAČAJ GRANULACIONOG SASTAVA HRANE ZA ŽIVOTINJE.....	37
2.5.1.	<i>Značaj granulacionog sastava hrane u ishrani živine.....</i>	37
2.5.1.1.	<i>Mehanizam varenja hrane kod živine.....</i>	38
2.5.1.2.	<i>Anatomija i funkcija bubca.....</i>	39
2.5.1.3.	<i>Uticaoj strukture smeše na razvoj i funkcionalnost bubca.....</i>	40
2.5.1.4.	<i>Optimalna struktura smeša za ishranu živine.....</i>	42
2.5.1.5.	<i>Efekti povećanja udela krupnih čestica u smešama za živinu.....</i>	43
2.5.2.	<i>Značaj granulacionog sastava hrane u ishrani svinja.....</i>	45
2.5.2.1.	<i>Mehanizam varenja hrane kod svinja.....</i>	45
2.5.2.2.	<i>Uticaoj granulacije na probavni sistem svinja.....</i>	46
2.5.2.3.	<i>Uticaoj granulacije i peletiranja na eliminaciju patogenih mikroorganizama prisutnih u hrani za svinje.....</i>	47
2.5.3.	<i>Uticaoj peletiranja na granulacioni sastav hrane za životinje.....</i>	49
3.	POGLAVLJE 3: MATERIJAL I METODE.....	51
3.1.	MATERIJAL.....	51
3.2.	METODE RADA.....	52
3.2.1.	Hemijske analize kukuruza.....	52
3.2.2.	Tehnološki postupak peletiranja.....	52
3.2.2.1.	<i>Usitnjavanje.....</i>	52
3.2.2.2.	<i>Kondicioniranje.....</i>	55
3.2.2.3.	<i>Peletiranje.....</i>	56
3.2.2.4.	<i>Hlađenje.....</i>	57
3.2.3.	Fizičko-hemijske analize.....	57
3.2.3.1.	<i>Granulometrijska analiza usitnjenog kukuruza.....</i>	57
3.2.3.2.	<i>Granulometrijska analiza peletiranog kukuruza.....</i>	59

3.2.3.3.	<i>Udeo prašine u peletama.....</i>	61
3.2.3.4.	<i>Tvrdoća peleta.....</i>	61
3.2.3.5.	<i>Stepen otiranja peleta.....</i>	61
3.2.3.6.	<i>Nasipna masa peleta.....</i>	62
3.2.3.7.	<i>Želatinizacija skroba.....</i>	62
3.3.	EKSPERIMENTALNI PLAN I STATISTIČKA OBRADA PODATAKA	64
3.3.1.	Metoda planiranja eksperimenta – Box-Behnken.....	64
3.3.2.	Rezidualna analiza i optimizacija.....	67
4.	POGLAVLJE 4: Rezultati i diskusija.....	70
4.1.	GRANULOMETRIJSKI SASTAV USITNJENOG KUKURUZA.....	70
4.2.	SPECIFIČNA POTROŠNJA ENERGIJE ZA MLEVENJE.....	74
4.3.	PARAMETRI PROCESA PELETIRANJA.....	77
4.3.1.	Temperatura matrice pelet prese.....	78
4.3.1.1.	<i>Temperatura peletiranja u prvoj fazi istraživanja.....</i>	79
4.3.1.2.	<i>Temperatura peletiranja u drugoj fazi istraživanja.....</i>	81
4.3.1.3.	<i>Poređenje temperature peletiranja u prvoj i drugoj fazi istraživanja.....</i>	83
4.3.2.	Specifična potrošnja energije pelet prese.....	84
4.3.2.1.	<i>Specifična potrošnja energije pelet prese u prvoj fazi istraživanja.....</i>	84
4.3.2.2.	<i>Specifična potrošnja energije pelet prese u drugoj fazi istraživanja.....</i>	86
4.3.2.3.	<i>Poređenje specifične potrošnje energije pelet prese u prvoj i drugoj fazi istraživanja.....</i>	87
4.3.3.	Udeo prašine u peletama.....	88
4.4.	ŽELATINIZACIJA SKROBA.....	90
4.5.	FIZIČKE KARAKTERISTIKE PELETA.....	93
4.5.1.	Tvrdoća peleta.....	94
4.5.1.1.	<i>Tvrdoća peleta u prvoj fazi istraživanja.....</i>	94
4.5.1.2.	<i>Tvrdoća peleta u drugoj fazi istraživanja.....</i>	96

4.5.2.	Stepen otiranja peleta.....	97
4.5.2.1.	Stepen otiranja peleta u prvoj fazi istraživanja.....	97
4.5.2.2.	Stepen otiranja peleta u drugoj fazi istraživanja.....	100
4.5.2.3.	Poređenje stepena otiranja peleta dobijenih pri različitim granulacijama mliva u prvoj i drugoj fazi istraživanja.....	102
4.5.3.	Nasipna masa peleta.....	103
4.6.	GRANULACIJA PELETIRANOG MATERIJALA.....	106
4.6.1.	Krupne frakcije čestica u peletiranom materijalu u prvoj fazi istraživanja.....	110
4.6.1.1.	Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm	110
4.6.1.2.	Prinos frakcije čestica veličine 2000 – 2500 μm	113
4.6.1.3.	Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm	115
4.6.1.4.	Prinos frakcije čestica veličine 1600 – 2000 μm	117
4.6.1.5.	Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm	119
4.6.1.6.	Prinos frakcije čestica veličine 1000 – 1600 μm	121
4.6.1.7.	Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm	122
4.6.2.	Krupne frakcije čestica u peletiranom materijalu u drugoj fazi istraživanja.....	124
4.6.2.1.	Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm	124
4.6.2.2.	Prinos frakcije čestica veličine 2000 – 2500 μm	127
4.6.2.3.	Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm	128
4.6.2.4.	Prinos frakcije čestica veličine 1600 – 2000 μm	129
4.6.2.5.	Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm	130
4.6.2.6.	Prinos frakcije čestica veličine 1000 – 1600 μm	132
4.6.2.7.	Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm	133
4.6.3.	Poređenje udela krupnih čestica u peletama dobijenih peletiranjem mliva sa različitim mlinova.....	135
4.6.4.	Prinos frakcije čestica srednje veličine (630 – 1600 μm).....	139

4.6.5.	Prinos frakcije srednje sitnih čestica (125 - 630 μm).....	143
4.6.6.	Prinos frakcije čestica manjih od 125 μm.....	146
5.	POGLAVLJE 5: ZAKLJUČCI.....	151
6.	POGLAVLJE 6: LITERATURA.....	157

POGLAVLJE 1

Uvod

Industrijski proizvedene potpune smeše za ishranu živine i svinja sadrže veliki broj sastojaka koje je potrebno homogeno umešati, a da bi to bilo moguće, većinu sastojaka koje ulaze u sastav smeše potrebno je usitniti. Usitnjavanjem se omogućuje međusobno umešavanje sirovina, umanjuje sklonost dobijene smeše ka raslojavanju i olakšava peletiranje. Usitnjavanjem se takođe povećava specifična površina sastojaka smeše i tako poboljšava njihovo iskorišćavanje u probavnom sistemu životinja (*Behnke, 1996; Koch, 1996*). Iz tog razloga sitno mlevenje je dugo smatrano ključnim faktorom za postizanje visokog prirasta životinja. Međutim, danas se sve više uviđa da osetljivost gajenih životinja raste sa genetskim napretkom i da sitno mlevenje može izazvati zdravstvene probleme i smanjenje prirasta, kako kod živine (*Taylor i Jones, 2004; Svihus, 2011*), tako i kod svinja (*Nielsen, 1998; Kampheus, 2007*).

Posledice upotrebe suviše usitnjene hrane u ishrani živine su uvećan žlezdani želudac (proventriculum) i pankreas, kao i nedovoljno razvijen bubac (mišićni želudac) što nepovoljno deluje na zdravlje i prirast životinja (*Taylor i Jones, 2004*). Bubac je organ snabdeven snažnim mišićima, čije kontrakcije dovode do usitnjavanja čestica hrane. Prisustvo krupnih čestica stimuliše aktivnost i razvoj bubca. Dobro razvijen bubac ima veću zapreminu i kapacitet i dovodi do dužeg zadržavanja hrane u želudcu (*Svihus, 2011*). To doprinosi boljem iskorišćenju hranjivih materija (*Carre, 2000*) i nižoj pH vrednosti materijala u želudcu (*Duke, 1992*) čime se smanjuje rizik pojave kokcidioza (*Cumming, 1994*) i dovodi do uništavanja patogenih mikroorganizama potencijalno prisutnih u hrani (*Engberg i sar., 2002*). Utvrđeno je da krupne čestice bivaju u potpunosti usitnjene u bubcu (*Hetland i sar., 2002*) i da to usitnjavanje ne utiče na brzinu prolaska hrane kroz gastrointestinalni trakt (*Svihus i sar., 2002*). To ukazuje da sa nutritivnog aspekta žitarice mogu biti

mlevene krupnije u odnosu na uobičajenu praksu u pogonima za proizvodnju hrane za životinje, što bi dovelo do smanjenja utroška energije pri mlevenju i do povećanog kapaciteta uređaja za mlevenje (*Svihus i sar., 2004b*).

U uzgoju svinja, zdravlje životinja i naročito zdravlje gastrointestinalnog trakta, je najznačajnija oblast savremenih istraživanja. Pogodna granulacija hrane može biti jeftin način da se pozitivno utiče na zdravlje gastrointestinalnog trakta (*Klausing, 2011*). U ishrani svinja je poželjna sitnija granulacija u poređenju sa granulacijom hrane za živinu jer su krupne čestice teško svarljive u probavnom sistemu svinja. Međutim, suviše usitnjena hrana je pokazala negativno delovanje u uzgoju svinja. U istraživanju *Klausing-a (2010)*, kada je poređena krupno i sitno mlevena hrana za svinje, utvrđeno je značajno smanjenje prisustva bakterija roda *Salmonella* pri korišćenju krupnije mlevene hrane. Granulacija hrane je značajna i u pogledu pojave ulkusa (čira na želudcu) i drugih oštećenja želuca za koje je utvrđeno da se ređe javljaju kod svinja hranjenih krupnije mlevenom hranom. Pri tome je takođe pokazano da je najznačajnije svesti sadržaj najsitnijih čestica na minimum (*Liesner i sar., 2009; Betcher i sar., 2010; Cappai i sar., 2013; Ball i sar., 2015*). Lečenje ulkusa i drugih oštećenja želuca, uzrokovanih prisustvom velike količine sitnih čestica u hrani, vrlo je komplikovano, skupo i uglavnom neefikasno, a s druge strane dovodi do velikih ekonomskih gubitaka (*Frendship, 2003*). Prema tome, s obzirom da su krupne čestice teško svarljive, a da sitne čestice imaju negativno delovanje na želudac, u ishrani svinja je poželjno da udeo frakcije čestica srednje veličine bude što veći.

U savremenom uzgoju živine i svinja smeše se retko koriste u praškastom obliku već se uglavnom peletiraju nakon umešavanja sastojaka smeše (*Fahrenholz, 2012*). Peletiranje predstavlja proces aglomeracije (povezivanja) čestica hrane za životinje pod dejstvom pritiska, vlage i toplote, pri čemu se dobijaju aglomerati oblika valjaka koji se nazivaju pelete (*Skotch i sar., 1981*). Primena peletirane hrane, pored ostalih prednosti, doprinosi boljim proizvodnim pokazateljima životinja u pogledu prosečnog dnevnog prirasta i bolje konverzije hrane u poređenju sa upotrebom praškaste hrane, što je utvrđeno i kod živine (*Calet, 1965; Quemere i sar., 1988; Moran, 1989; Kilburn i Edwards, 2001; Engberg i sar. 2002; Greenwood i sar., 2004; McKinney i Teeter, 2004; Svihus i sar, 2004b; Abdollahi i sar., 2011*) i kod svinja (*Jensen i Becker, 1965; Vanschoubroek i sar., 1971; Hanke i sar., 1972; Pond i Maner, 1984; Wondra i sar., 1995*).

Željeni granulacioni sastav može se postići prilikom mlevenja sastojaka smeše, a pre svega žitarica kao najzastupljenijih sastojaka. Međutim, tokom peletiranja dolazi do intenzivnog usitnjavanja čestica pa se tako narušava granulacija smeše dobijena nakon mlevenja i mešanja

(Engberg i sar., 2002; Svihus i sar., 2004b; Amerah i sar., 2007b; Abdollahi i sar., 2011). Pri peletiranju dolazi do gotovo potpunog eliminisanja krupnih čestica, kao i do nastajanja velike količine najsitnijih čestica. Sa aspekta ishrane živine postojali su pokušaji da se krupnijim mlevenjem cerealne komponente smeše poveća udeo krupnih čestica u peletama. Tako u istraživanjima *Hetland-a i sar. (2003)*, kao i *Svihus-a i sar. (2004a)*, pokazano je da u ekstremnim slučajevima krupnoće čestica pre peletiranja (pšenica, kao cerealna komponenta smeše, peletirana je nesamlevena), pelet presa neće samleti krupne čestice u potpunosti. To ukazuje da ako je želja povećati količinu krupnih čestica u peletiranoj smeši, u kojoj je kukuruz dominantni sastojak (što je u našoj zemlji uglavnom slučaj), kukuruz treba mleti krupnije nego što je to uobičajeno u praksi. Upravo zato je jedan od osnovnih ciljeva ove disertacije bio ispitavanje uticaja granulacije materijala koji se usmerava na peletiranje na granulaciju čestica u peletama, u sklopu čega se išlo u smeru ukрупnjavanja granulacije kukuruznog mliva.

Mogući problem koji može nastati pri peletiranju krupnije mlevenog materijala je uticaj krupnih čestica na kvalitet peleta. Preovladavajući stav je da krupnije mlevenje pogoršava kvalitet peleta (*Amerah i sar., 2007*). To je uzeto u obzir prilikom planiranja istraživanja pa je u cilju poboljšanja kvaliteta peleta povećavan zazor između valjaka i matrice pelet prese i povećavana debljina matrice. Povećanje ova dva parametra, t.j. zazora valjci-matrice i debljine matrice, povećava pritisak u kanalima matrice pelet prese i tako poboljšava kvalitet peleta. Fizički kvalitet peleta važan je prilikom transporta i različitih manipulacija, pri čemu ne sme dolaziti do njihovog raspadanja. Takođe, bolji kvalitet peleta doprinosi većem unosu hrane i boljem prirastu životinja (*Skoch i sar., 1983; Stevens, 1987; Koopmans i sar., 1989*).

U okviru istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji ispitivan je uticaj promene odabranih parametara mlevenja i peletiranja na granulaciju čestica od kojih su pelete sačinjene. Cilj je bio da se nađe kombinacija parametara koja doprinosi očuvanju što veće količine krupnih čestica, što je značajno u ishrani živine, odnosno da se utvrdi kombinacija parametara koja će u što većoj meri uvećati sadržaj čestica srednje veličine i umanjiti udeo najsitnijih čestica, što je značajno u ishrani svinja. Pri tome je određivan i kvalitet peleta, koji ne sme biti značajnije narušen, kao i potrošnja energije pelet prese za koju je poželjno da bude što niža. U tom cilju, urađen je postupak optimizacije parametara mlevenja i peletiranja kako bi se postigla željena granulacije peletiranog materijala, uz što bolji kvalitet peleta i uz što manju potrošnju energije. Prilagođavanje granulacije peletiranog materijala fiziološkim potrebama životinja doprinelo bi boljem zdravlju i prirastu životinja, a time i većoj ekonomičnosti stočarske proizvodnje.

POGLAVLJE 2

Pregled literature

2.1. HRANA ZA ŽIVOTINJE

Do pre dva veka veoma malo pažnje je posvećivano ishrani domaćih životinja. One su dugo prepuštane da samostalno traže hranu, a najveći deo proizvoda zemljoradnje bio je namenjen ishrani ljudi. Sa razvojem zemljoradnje i povećanjem efikasnosti proizvodnje tokom XIX veka, dolazi do uzgoja i upotrebe poljoprivrednih proizvoda i za ishranu domaćih životinja (*Đorđević i Dinić, 2011*). Pored napretka poljoprivredne proizvodnje, polovinom XIX veka dolazi i do oplemenjivanja i stvaranja produktivnijih rasa, prvo konja, potom goveda, a naročito svinja i živine. Uporedo sa ovim, prelazi se i na stajski sistem gajenja životinja, što se smatra jednom od najznačajnijih promena u stočarskoj proizvodnji (*Bekrić, 1999*).

U prvoj polovini XX veka domaće životinje su hranjene žitaricama kojima je dodavano i neko proteinsko hranivo. Vremenom je istraživanje u oblasti ishrane životinja napredovalo čime je omogućeno tačnije definisanje sastava obroka pa je mešanje svih sastojaka u jednu smešu postalo uobičajeno (*Ewing, 1951*). Savremeno stočarstvo karakteriše se masovnom, farmskom proizvodnjom, i u takvim uslovima ishrana presudno utiče na količinu i kvalitet životinjskih proizvoda (meso, mleko, jaja) kao i na ekonomičnost proizvodnje. Nove rase i tipovi domaćih životinja sa većom produktivnošću zahtevaju pravilnu i kontrolisanu ishranu kako bi ispoljili svoje genetske mogućnosti (*Đorđević i sar., 2009*). Ove promene postavile su nove zahteve u pogledu pripreme hrane za životinje i postepeno se prelazi na pripremu smeša koje u potpunosti zadovoljavaju prehrambene potrebe životinja.

Prema pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (*Pravilnik o kvalitetu hrane za životinje Republike Srbije, 2010*), hrana za životinje je svaka supstanca ili proizvod, prerađena, delimično prerađena ili neprerađena, a namenjena za ishranu životinja koje služe za proizvodnju hrane, i to u obliku: hraniva, predsmеше (premiksa) ili smeše. Pojedinačna hraniva mogu biti biljnog, životinjskog, mikrobiološkog i mineralnog porekla. U intenzivnoj farmskoj proizvodnji, pojedinačna hraniva se mešaju u cilju postizanja optimalne koncentracije pojedinih hranjivih sastojaka i tako dobijaju smeše. S obzirom da pojedina hraniva imaju sličan odnos hranjivih sastojaka, moguće je njihovo međusobno zamenjivanje u cilju postizanja niže cene smeše ili zamene hraniva kojeg nema na tržištu drugim. To je veoma važno imajući u vidu da troškovi ishrane čine 60 do 80% od ukupnih troškova stočarske proizvodnje. Smeše mogu biti potpune i dopunske. Potpune smeše omogućuju podmirenje svih potreba životinja u hranjivim materijama i koriste se bez naknadnog dodavanja hraniva, osim za preživare kod kojih predstavljaju dopunu obroka na bazi kabaste hrane (silaža, seno, itd.). Dopunske smeše obezbeđuju životinjama „najkritičnije“ materije: proteini, esencijalne amino-kiseline, vitamini i minerali. Dopunske smeše se mešaju sa energetskim hranivima (pre svega žitaricama) u odnosu kojim se pojedine vrste i kategorije životinja obezbeđuju u svim hranjivim materijama (*Dorđević i Dinić, 2007*). Predsmеше su proizvodi sa visokim sadržajem vitamina, mineralnih materija, aminokiselina i dozvoljenih dodataka, koji su homogeno izmešani sa nosačem (stočno brašno, kalcijum karbonat itd.). Služe za ishranu životinja u kombinaciji sa hranivima ili za izradu smeša (*Pravilnik o kvalitetu hrane za životinje Republike Srbije, 2010*).

Proizvodnja smeša za ishranu životinja podrazumeva različite tretmane (fizičke, hemijske, termičke) kojima se smeša priprema i prerađuje pre upotrebe za ishranu životinja (*Maier i Bakker-Arkema, 1992*). Efekti ovih tretmana zavise od izbora opreme, uslova prerade kao i proizvodnog sistema, tj. kombinacije i redosleda opreme (*Melcion i van der Poel, 1993*). Na taj način, proizvodnja hrane za životinje može podrazumevati operacije poput jednostavnog mešanja praškastih materijala, ali može biti i znatno složenija, kada uključuje i operacije peletiranja, dvostrukog peletiranja, kramblovanja (grubo mlevenje peleta na mlinu sa valjcima), ekstrudiranja ili ekspandiranja (*Thomas i van der Poel, 1996*).

Troškovi ishrane čine i do 80% ukupnih troškova pri uzgoju životinja, pri čemu prerada smeše (npr. peletiranje) dodatno povećava ove troškove, ali istovremeno rezultuje boljim iskorišćenjem hrane, a time i poboljšanjem proizvodnih karakteristika životinja (*Abdollahi i sar., 2013*). Time istraživanje različitih načina prerade smeša predstavlja oblast velikog potencijala, ali

opravdanost uvođenja novih načina prerade neophodno je sagledati kako u pogledu njihovog potencijala za unapređenje proizvodnih karakteristika životinja, tako i u pogledu njihovih negativnih efekata (*Behnke, 1996*). Najčešće operacije koje se primenjuju u proizvodnji hrane za životinje su prijem sirovina, odmeravanje, mlevenje, mešanje i peletiranje. Proizvodnja smeša može da obuhvata i neke od operacija kao što su higijenzacija (termički tretmani), oblaganje, ekstrudiranje i ekspaniranje.

2.2. KUKURUZ

Kukuruz (*Zea Mays*) je u našoj, ali i u mnogim drugim zemljama, u ishrani domaćih životinja potisnuo sva ostala žita. Osnovni razlog je veliki sadržaj energije zrna kukuruza. Kukuruz se odlikuje visokim sadržajem skroba, srazmerno velikom količinom masti i malim sadržajem celuloze, što doprinosi visokoj svarljivosti. Kukuruz zadovoljava od 63 do 89% energije u smešama za živinu i 72 do 73% svarljive energije u smešama za svinje (*Bekrić, 1997*).

Zrno kukuruza se sastoji od omotača, endosperma i klice. Omotač čini 4,5 do 7% mase zrna i pretežno se sastoji od celuloze i pentozana. Klica se nalazi u donjem delu zrna i čini 10 do 13% mase zrna. U sastavu klice dominiraju masti (oko 35%), zatim proteini (oko 19%), šećeri (oko 10%), skrob (oko 8%) i mineralne materije (oko 10%). Najveći deo zrna čini endosperm (75 do 90%), koji se uglavnom sastoji od skroba. Endosperm zrna kukuruza prema svojoj strukturi može biti brašnasti i rožasti. Brašnasti endosperm je raspoređen u gornjim i središnjim delovima zrna, oko klice, dok je rožasti koncentrisan uglavnom neposredno ispod omotača. Brašnasti endosperm ima rastresitu strukturu u kojoj skrobne granule nisu čvrsto upakovane u proteinsku matricu (prisutni su vazdušni međuprostori) i mehanički je daleko manje otporan od rožastog endosperma koga karakteriše veći sadržaj proteina i zbijenije pakovanje granula skroba (*Đorđević i Dinić, 2011*).

Bogatstvo u skrobu, sadržaj srazmerno velike količine masti, uz najmanji sadržaj celuloze u poređenju sa ostalim žitaricama doprinosi visokoj svarljivosti kukuruza. Ipak, kukuruz se odlikuje najmanjim sadržajem proteina među svim žitima, kao i lošim aminokiselinskim sastavom jer je deficitaran u dve esencijalne aminokiseline (lizinu i triptofanu). Žuti tipovi zubana su bogati β -karotinom (3-5 mg/kg) i ksantofilom (26-36 mg/kg). Žuti kukuruz, pored kukuruznog glutena i lucerke, najznačajniji je izvor pigmentacije jaja i boje kože. Kukuruz se najviše koristi u ishrani svinja, živine i goveda. Za tovne kategorije životinja, kukuruz je osnovno i najvažnije energetska

hranivo i njegovo učešće u obroku je utoliko veće ukoliko su životinje starije (*Bekrić, 1999; Dorđević i Dinić, 2011*).

2.3. MLEVENJE

Mlevenje je tehnološka operacija kojom se različite komponente koje ulaze u sastav smeša za ishranu životinja usitnjavaju kako bi se mogle međusobno umešati i kako bi se mogao postići zadovoljavajući stepen homogenosti smeše. U proizvodnji hrane za životinje mlevenje predstavlja jednu od osnovnih operacija. Naime, više od 80% sirovina koje se koriste za proizvodnju hrane za životinje potrebno je samleti. Melju se, pre svega, različite žitarice, a takođe i nusproizvodi poljoprivrede i prehrambene industrije, sačme, pogače, kao i mineralna hraniva. Struktura samlevenog proizvoda, bilo da se radi o pojedinačnim komponentama ili gotovim smešama, treba pre svega da zadovolji fiziološke zahteve životinja. Što su čestice sitnije, veća im je specifična površina i lakše je delovanje probavnih enzima životinja (*Duragić i sar., 2002*).

Probavni sistemi različitih životinjskih vrsta imaju različitu sposobnost razgradnje komponenti hrane, zbog čega im je potreban i različit stepen usitnjenosti. Takođe, u okviru iste životinjske vrste, postoje različite potrebe u pogledu stepena usitnjenosti, u zavisnosti od uzrasta životinje. Goveda i ovce imaju vrlo dugačak i složen probavni sistem i čestice hrane ne moraju biti jako sitne. Degradacija skroba u želudcu ovih životinja treba da je što manja radi sprečavanja pojave acidoze buraga, a to se postiže grubim mlevenjem zrna (veličina čestica iznosi polovinu ili četvrtinu zrna). Svinje imaju prilično kratak probavni sistem (slično čoveku) pa im je potrebna usitnjenija hrana. Živina ima kratak, ali vrlo složen probavni sistem, usled čega može bolje iskoristiti krupnije mlevenu hranu u poređenju sa svinjama. (*Sredanović i sar., 1997; Ziggers, 2001; Duragić i sar., 2002; Koch, 2002*).

Pored fizioloških zahteva životinja, veličina čestica je važna i za optimalno odvijanje tehnoloških operacija koje slede (mešanje, peletiranje, ekspaniranje, ekstrudiranje) (*Wild, 1992*). Usitnjavanje olakšava proces umešavanja različitih komponenti koje ulaze u sastav smeše i doprinosi većoj stabilnosti smeše, usled manje sklonosti ka raslojavanju različitih komponenti (*Koster, 2003*). Sitnije mlevenje znači veću specifičnu površinu čestica, usled čega će materijal apsorbovati veću količinu vode tokom pripreme za peletiranje, a to će uvećati i stepen želatinizacije skroba što doprinosi boljem povezivanju čestica u peletama. Sitnije mlevenje dovodi i do boljeg

kvaliteta peleta smanjenjem vazdušnih međuprostora između čestica i omogućavanjem boljeg kontakta čestica koje se povezuju u peletu (Koster, 2003).

2.3.1. Teorija usitnjavanja čvrstih tela

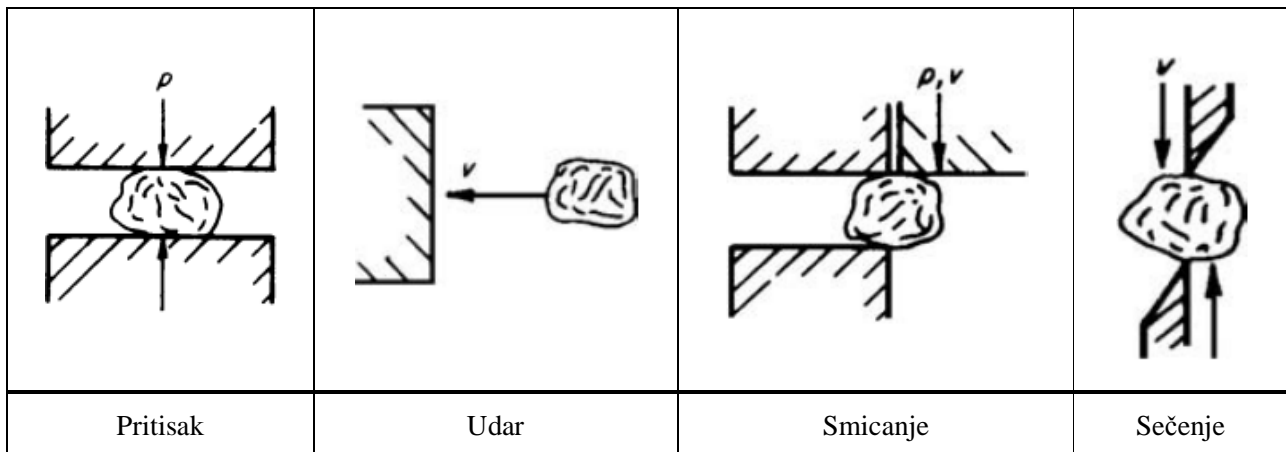
Do usitnjavanja čvrstih tela dolazi delovanjem mehaničkih sila na telo pri čemu se u njemu javljaju unutrašnja naprezanja. Nakon što ova naprezanja pređu određeni kritični nivo, dolazi do drobljenja tela i povećavanja specifične površine. Pri tome se energija troši na elastične i plastične deformacije, kao i na savladavanje sila međumolekulskog privlačenja. Međutim, relativno mali deo mehaničke energije se troši na obrazovanje nove površine čestica. Veći deo se transformiše u toplotnu energiju koja dovodi do zagrevanja usitnjavanog materijala. Takođe, energija se troši i na naelektrisanje čestica materijala koji se usitnjava i radnih površina, na vibracije i na savladavanje otpora u uređaju za usitnjavanje (Earle, 1983; Haque, 1991; Holdrich, 2002).

Ребиндер (1947) je definisao da je utrošak energije za usitnjavanje čvrstih tela (E) jednak zbiru energije koja se troši na elastične i plastične deformacije (E_Y) i energije koja se troši na povećanje površine čestica (E_S):

$$E = E_Y + E_S \quad (1)$$

U jednačini 1 korisno utrošeni deo energije je onaj koji se odnosi na povećanje površine čestica jer dovodi do usitnjavanja tela. Na početku usitnjavanja drobe se krupne čestice polaznog materijala pa je povećanje površine malo i drugi član jednačine je zanemarljivo mali u odnosu na prvi. Pri kasnijem finom usitnjavanju povećanje površine je veliko i utrošak energije je srazmeran povećanju površine (prvi član jednačine je zanemarljiv).

Dakle, mehanizam usitnjavanja sastoji se u deformisanju čvrstih tela sve dok ne dođe do njihovog loma, a to može biti postignuto delovanjem različitih sila, kao što su sabijanje, pritisak, udar, trenje i smicanje (sl. 1). U zavisnosti od tipa uređaja za usitnjavanje i karakteristika radnih elemenata, čestice u mlevnom prostoru mogu biti izložene i deformaci sečenja (rezanja). Usitnjavanje je posledica kombinovanog dejstva sila, pri čemu je najčešće jedna sila deformacije dominantna.



Slika 1. Oblici deformacije pri usitnjavanju čvrstih tela (Barbarosa-Canovas i sar., 2005)

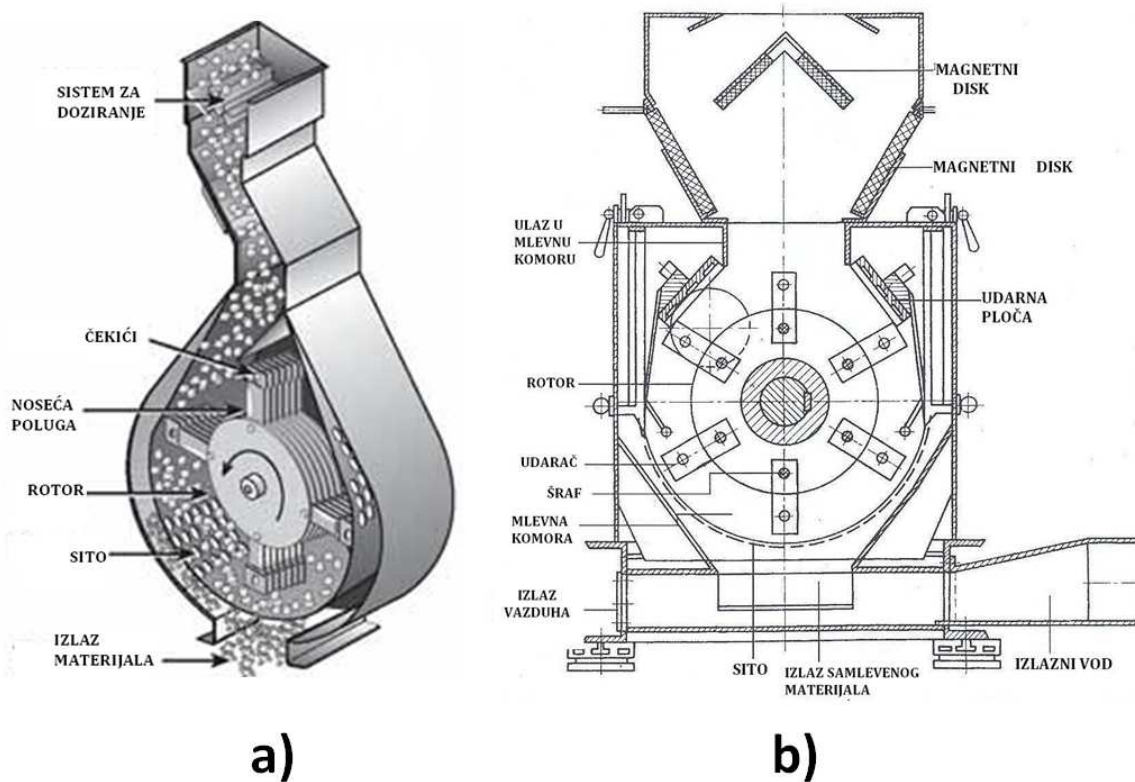
Nakon prijema i čišćenja, većina sirovina koje se koriste u proizvodnji hrane za životinje, a pre svega žitarice, usitnjavaju se u operaciji mlevenja. Za usitnjavanje različitih komponenti koje ulaze u sastav smeša za ishranu životinja mogu da se koristiti različite vrste mlinova, ali su najčešće u upotrebi mlin čekićar i mlin sa valjcima (Ziggers, 2001).

2.3.2. Mlin čekićar

Mlin čekićar (sl. 2) se sastoji od čeličnog kućišta u koje je smešten rotor. Na rotoru su u više redova raspoređeni udarači (čekići) koji mogu biti fiksirani ili slobodno visiti. Udarači su uski i napravljeni od kvalitetnog čelika. Na gornjem i donjem kraju su probušene rupe za učvršćivanje tako da je udarač moguće učvrstiti za oba kraja. Kada se udarna strana istroši, udarač se okrene ili se promeni smer obrtanja rotora i tako druga strana postaje udarna. Kada se i ona istroši, udarač se učvršćuje za drugi kraj pa se tako može koristiti još dva puta. Intenzitet trošenja udarača zavisi od materijala koji se melje i od specifičnog opterećenja mlina izraženog masom samlevenog materijala u jedinici vremena. Rastojanje između susednih udarača, smeštenih u istom redu, određeno je pomoću razdvojnih prstenova. Broj, dužina, širina i čvrstoća udarača zavise od vrste materijala koji se usitnjava i potrebne granulacije (Koch, 2002; Kersten i sar., 2005).

Mlevna komora je ograničena čeličnim sitom, koje se može menjati. Sita imaju otvore čija veličina određuje granulaciju mliva. U gornjem delu komore mogu biti instalirane udarne ploče (sl. 2b) na koje udarači bacaju materijal, čime se on dodatno usitnjava. U dozirnom sistemu čekićara obavezno je ugrađen jedan ili više magneta, kako bi se sprečio ulazak metalnih delića u mlevnu komoru. Njihovo prisustvo moglo bi izazvati oštećenje radnih elemenata čekićara, a takođe i pojavu

varnice koja može izazvati eksploziju pri odgovarajućoj koncentraciji prašine. Ispod sita se nalazi prihvatni bunker za materijal u kome je instaliran otvor za aspiracioni vazduh. Na otvoru se može nalaziti podesivi zasun kojim se reguliše intenzitet aspiracije. Iz prihvatnog bunkera materijal se dalje transportuje najčešće pužnim transporterom ili pneumatski (Kersten i sar., 2005).



Slika 2. Konstrukcija mlina čekićara: a) Koch, 2002 i b) Kersten i sar., 2005

Do usitnjavanja u čekićaru dolazi delovanjem dve sile. Prva je sila udara. Kada materijal dospe u mlevnu komoru, udarači koji se kreću velikom brzinom udaraju čestice i dolazi do usitnjavanja. Takođe, udarači bacaju čestice na površinu sita i udarnih ploča. Zbog velike brzine udarača formira se zavesa materijala u obliku prstena između vrha udarača i površine sita. Čestice u blizini udarača (unutrašnji deo prstena) bivaju ubrzavane, a čestice u spoljašnjim delovima formiranog prstena bivaju usporavane od strane sita i formiraju se slojevi sa različitom brzinom čestica. Brzina čestica se smanjuje što je sloj bliži situ i kada se postigne dovoljno mala brzina (izlazna brzina), čestice prolaze kroz otvore na situ ukoliko su manje od prečnika otvora sita. Drugi tip sila koje dovode do usitnjavanja čestica u mlevnoj komori čekićara su sile trenja. Ove sile se javljaju pri dodiru čestica sa površinom sita i dovode do dodatnog usitnjavanja, a takođe i zaobljavaju čestice. Zato se na čekićaru dobijaju čestice znatno pravilnijeg oblika (sferičnije čestice)

u odnosu na druge načine usitnjavanja. Da bi čestice napustile mlevnu komoru potrebno je da postignu izlaznu brzinu. U slučaju da je brzina čestica u blizini sita suviše velika, iako su čestice manje od prečnika otvora sita, one nastavljaju kružno kretanje i dolazi do prekomernog usitnjavanja, prevelikog habanja udarača i zagrevanja materijala. Izlazak čestica potpomognut je strujom aspiracionog vazduha koja povlači dovoljno usitnjene čestice kroz otvore sita. Čestice koje prođu kroz sito upadaju u prihvatni bunker i odatle se transportuju, bilo mehanički (pužni transporteri, lančasti transporteri), bilo pneumatski (*Heiman, 2005; Kersten i sar., 2005; Anderson, 2007*).

Na efekte usitnjavanja čekićarom utiču vrsta materijala koji se usitnjava (fizičko-hemijska i strukturno-mehanička svojstva) i parametri usitnjavanja. Sa povećanjem čvrstoće i elastičnosti čestica, kapacitet mlevenja se smanjuje i povećava utrošak energije (*Kersten i sar., 2005*). Važan parametar usitnjavanja kod mlina čekićara je obimna brzina udarača. Kada se brzina povećava, čestice koje su već usitnjene na potrebnu veličinu imaju manje vremena da izađu kroz otvore sita jer brže nailazi naredni udarač. To uzrokuje prekomerno usitnjavanje i duže zadržavanje materijala, a time i manji kapacitet uređaja i veći specifični utrošak energije. Zato je veoma značajno podesiti optimalnu obimnu brzinu udarača. U slučaju prekomernog usitnjavanja materijala, ekonomski je povoljnije smanjiti obimnu brzinu udarača nego povećati veličinu otvora sita. To se postiže upotrebom motora sa frekventnim regulatorom. Radi maksimalne uštede energije, ide se na minimalnu vrednost obimne brzine pri kojoj se ostvaruje zadovoljavajući stepen usitnjenosti (*Ruetsche, 1989*).

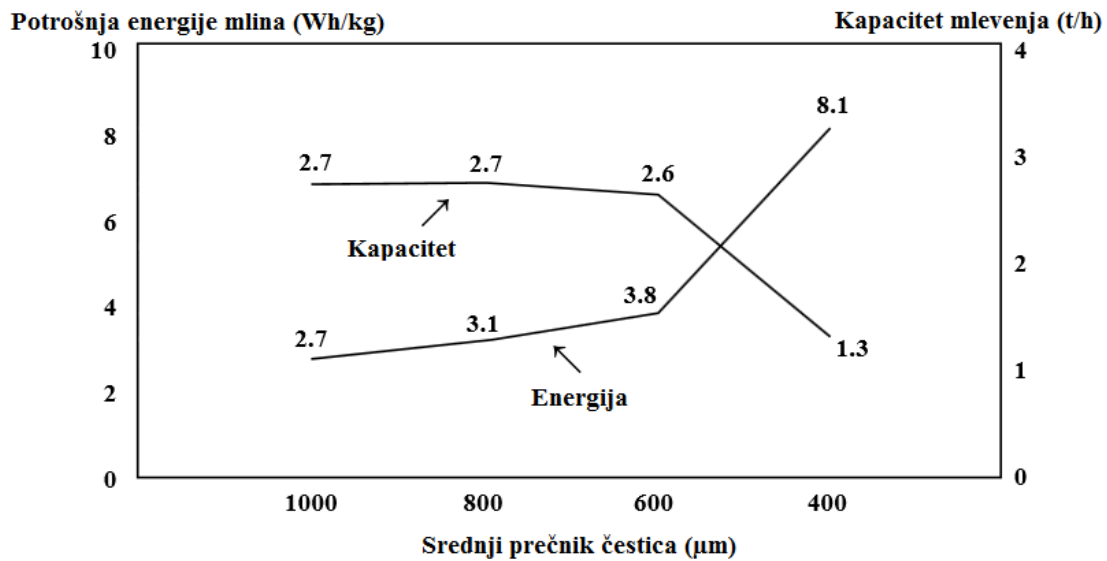
Broj udarača je jednako važan faktor kao i njihova obimna brzina i što je veći, veći broj čestica će biti usitnjavao više puta i time će se dobiti sitnija granulacija mliva. Naravno, biće veći i utrošak energije. Kao i u slučaju obimne brzine, i ovde se ide na minimalnu vrednost, odnosno na najmanji mogući broj udarača. Pri jednakoj perforaciji sita, utvrđeno je da se korišćenjem tankih udarača (3 mm) postiže veći kapacitet mlina (10-15%) i manji specifični utrošak energije nego pri korišćenju širokih udarača (9 mm), jer je kod tankih udarača više izraženo udarno dejstvo. Uglavnom se koriste glatki udarači, kod kojih se posle nekoliko radnih sati formira udubljenje usled intenzivnog trošenja sredine udarača, pa se formiraju dve ivice, što značajno poboljšava usitnjavanje. Pored glatkih, udarači se proizvode i u drugim oblicima, ali je njihova primena mala zbog visoke cene. Stepem oštećenosti udarača treba redovno proveravati. Jako oštećeni udarači smanjuju kapacitet uređaja, povećavaju specifični utrošak energije i dovode do prevelikog zagrevanja proizvoda (*Kersten i sar., 2005*).

Sita mlina čekićara najčešće su izrađena od perforiranog čeličnog lima debljine 2 - 3 mm. Prečnici otvora na situ kreću se najčešće između 2,5 - 5 mm. Uticaj veličine otvora sita na operaciju mlevenja je jasan: što su otvori veći, veći je protok materijala kroz otvore, manji je utrošak energije i mlivo je krupnije. Isti efekat može biti postignut promenom korisne površine sita. Korisna površina predstavlja odnos između površine otvora i ukupne površine sita i izražava se u procentima. Sa njenim povećanjem, povećava se kapacitet, ali se smanjuje čvrstoća sita. Zbog toga se najčešće primenjuju vrednosti između 30 - 50%. Suviše mala korisna površina sita dovodi do predugog zadržavanja već usitnjenih čestica u mlevnoj komori uzrokujući veći utrošak energije, zagrevanje materijala, smanjenje kapaciteta i preveliko usitnjavanje čestica. Na kapacitet čekićara značajno utiče i debljina lima sita. Debeo lim usporava prolazak mliva, tako da kapacitet opada, a potrošnja energije raste (Ziggers, 2001; Kersten i sar., 2005).

Da bi se izbeglo predugo zadržavanje čestica u mlevnoj komori, veoma je značajna pravilna aspiracija čekićara. Struja vazduha odnosi toplotu koja se razvija u postupku mlevenja i olakšava i ubrzava prolaz usitnjenih čestica. Time se povećava kapacitet uređaja, smanjuje specifični utrošak energije, dobija ujednačenija granulacija mliva i smanjuje habanje udarača. Naime, dovoljno usitnjene čestice bivaju povlačene strujom vazduha i lakše prolaze kroz otvore na situ čime se sprečava njihovo dalje usitnjavanje (Kersten i sar., 2005).

Nakon termičkih procesa (peletiranje, ekspandiranje, ekstrudiranje), mlevenje je drugi najveći potrošač energije u proizvodnji hrane za životinje. U istraživanju sprovedenom na univerzitetu u Kansasu, kada je kukuruz mleven do različitog srednjeg prečnika čestica (1000, 800, 600 i 400 μm), utvrđeno je da pri smanjenju srednjeg prečnika sa 1000 na 600 μm , potrošnja energije čekićara je blago povećana sa 2,7 na 3,8 Wh/kg (sl. 3). Međutim, energija koja je bila neophodna za dalje smanjenje srednjeg prečnika sa 600 na 400 μm je više nego dvostruko uvećana (8,1 Wh/kg). Kapacitet proizvodnje blago je smanjen pri smanjenju srednjeg prečnika sa 1000 na 600 μm , ali je pri daljem smanjenju sa 600 na 400 μm došlo do naglog pada kapaciteta proizvodnje (Wondra i sar., 1992).

Čestice dobijene mlevenjem na čekićaru pretežno su sferičnog oblika sa površinom koja je uglavnom bez nepravilnosti. Raspodela veličine čestica kreće se široko oko srednjeg prečnika sa određenom količinom krupnih i puno sitnih čestica (Koch, 2002).



Slika 3. Zavisnost potrošnje energije i kapaciteta mlevenja čekićara od srednjeg prečnika dobijenog mliva (Wondra i sar., 1992)

2.3.3. Mlin sa valjcima

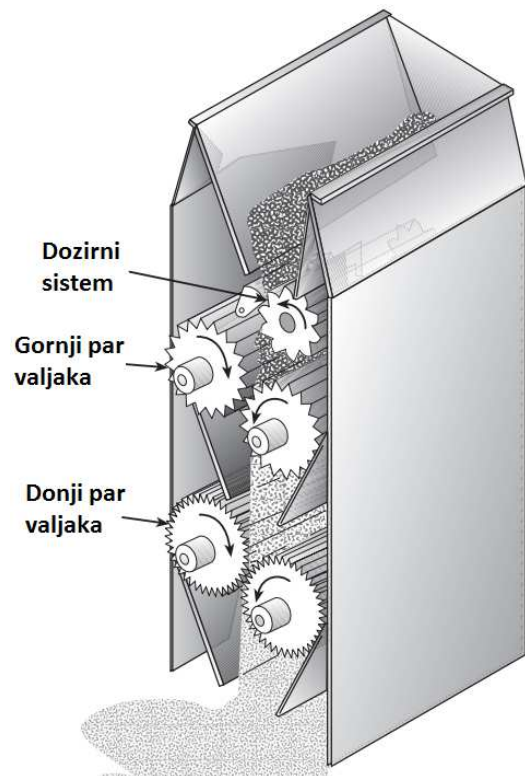
Mlinovi sa valjcima najveću primenu nalaze u proizvodnji brašna gde, iako u upotrebi već više od 100 godina, i dalje predstavljaju osnovni uređaj za usitnjavanje jer omogućuju kontrolisano selektivno usitnjavanje, t.j. razdvajanje anatomskih delova zrna uz odgovarajući stepen usitnjenosti. Njihovo korišćenje u proizvodnji hrane za životinje je započelo znatno kasnije (Ziggers, 2001), pri čemu njihova primena još uvek nije raširena, iako se odlikuju manjom potrošnjom energije (Nir i sar., 1990), manjom bukom tokom rada i stvaraju manju količinu prašine nego čekićari (Heimann, 2002). Takođe je utvrđeno da mlinovi sa valjcima proizvode mlivo ujednačenije granulacije, sa znatno manje sitnih čestica nego čekićari (Nir i sar., 1990, 1995). Smatra se da su mlinovi sa valjcima naročito efikasni pri grubom mlevenju. Glavni nedostatak ovih uređaja je njihova visoka cena kao i skuplje održavanje u poređenju sa čekićarima (Heimann, 2002).

Mlin sa valjcima se sastoji od sistema za doziranje i jednog ili više horizontalno postavljenih parova valjaka (sl. 4). Sistem za doziranje najčešće je u vidu tzv. valjka hranilice, manjeg prečnika od valjaka za usitnjavanje, čiji je zadatak da obezbedi ravnomeran dotok materijala, koji u vidu zavesne pada po celoj dužini mlevnog prostora koji formira par valjaka. Mlinovi sa valjcima u industriji hrane za životinje mogu da sadrže jedan par valjaka, ali su najčešće prisutna dva ili tri para koji sukcesivno usitnjavaju materijal bez među-prosejavanja mliva. Prečnik valjaka se kreće između 20 i 30 cm, a odnos dužina-prečnik je do 4:1. Jedan valjak u paru je fiksiran dok se drugi

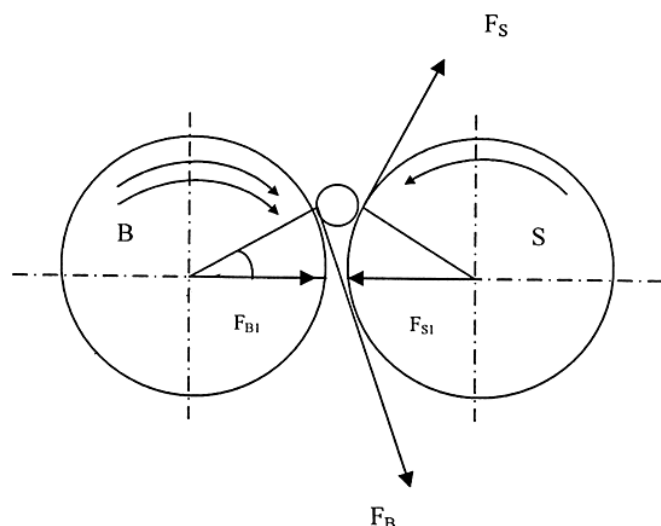
može pomerati i na taj način se podešava razmak između valjaka. Za pogon valjaka, kada su u uređaju prisutna dva para, najčešće se koristi jedan motor za oba, a kada postoji i treći par, on se pokreće posebnim motorom. Pogon se sa motora, preko remenskog prenosnog mehanizma, prenosi na jedan od uparenih valjaka, a sa njega se, opet sistemom kaiša (remena), pogon prenosi na drugi valjak. U zavisnosti od odnosa veličine remenica uparenih valjaka, oni se mogu obrtati istom ili različitom brzinom (Koch, 2002).

Pri mlevenju, valjci se obrću jedan prema drugom, pri čemu, kao što je rečeno, mogu imati istu brzinu ili se jedan obrće brže, pa se naziva brzohodni (B), dok se drugi naziva sporohodni (S). Odnos obimnih brzina brzohodnog i sporohodnog valjka (prenosni odnos) najčešće je 1,5:1 (Ziggers, 2001).

Usitnjavanje se postiže tako što u mlevnom prostoru (koji je geometrijski ograničen površinama valjaka i materijalom koji se usitjava), usled smanjenja razmaka između valjaka i njihovih različitih obimnih brzina, deluju deformacije sabijanja i smicanja (sl. 5). Kod žlebljenih valjaka, prisutna je i deformacija rezanja. U tački zahvata, na česticu deluju sile smicanja: F_B -sa strane brzohodnog valjka i F_S -sa strane sporohodnog valjka. Sile smicanja usmerene su tangencijalno na površinu valjka, pri čemu F_B teži da uvuče česticu u mlevni prostor, a F_S da česticu izbaci iz mlevnog prostora zbog različitih obimnih brzina valjaka. Sile F_B i F_S stvaraju uslove za drobljenje čestice smicanjem. Na česticu



Slika 4. Mlin sa dva para valjaka (Koch, 2002)



Slika 5. Mehanizam usitnjavanja čestica mlinskim valjcima (Fišteš, 2009)

u mlevnom prostoru takođe deluju i sile sabijanja F_{B1} i F_{S1} koje dostižu svoje maksimalne vrednosti na liniji koja spaja centre preseka valjaka. Ove dve sile jednake su po veličini, ali su suprotnog smera. Od značaja je ne samo veličina pomenutih sila nego i njihov odnos. Odnos sila F_B i F_S određen je prenosnim odnosom, a njihova veličina raste sa povećanjem obimnih brzina valjaka (Мерко, 1979).

U industriji hrane za životinje gotovo isključivo se koriste žlebljeni valjci, s obzirom da je cilj da se usitni celo zрно, bez selektivnog usitnjavanja, koje je neophodno npr. pri usitnjavanju pšenice u proizvodnji brašna. Što su žlebovi veći, odnosno što je manja gustina žlebova (broj žlebova po cm obima valjaka) mlivo je krupnije. Manja dimenzija žlebova (veća gustina) rezultuju sitnijom granulacijom mliva, ali i manjim kapacitetom mlina. Što je sitnije zрно žitarice koja se usitjava, veći broj žlebova po cm obima valjaka je neophodan. Tako se pri mlevenju kukuruza preporučuje 3 do 4 žleba po cm obima valjaka, kod ječma, pšenice i ovsaa 4 do 5, a kod sirka 5 do 6. Kod mlinova sa većim brojem parova valjaka postavljenih jedan iznad drugog, gustina žlebova se povećava od gornjeg ka donjem paru valjaka (Ziggers, 2001).

Na usitnjavanje mlinskim valjcima, pored fizičko-hemijskih (krupnoća čestica, oblik, zapreminska masa) i strukturno-mehaničkih svojstava materijala (čvrstoća, tvrdoća, elastičnost), značajan uticaj imaju i parametri usitnjavanja. Dele se u tri grupe:

- kinematički parametri (obimne brzine valjaka, razlika obimnih brzina i prenosni odnos),
- tehnološki parametri (razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka) i
- geometrijski parametri (prečnik valjaka, dužina valjaka, obrada površine valjaka-žlebljena ili glatka, broj žlebova po jedinici obima valjaka, nagib žlebova, uglovi žlebova, uzajamni položaj žlebova i dr.).

Geometrijski i kinematički parametri usitnjavanja nisu operativni parametri u pogonskim uslovima. U toku rada mlina može se menjati razmak između valjaka, a u određenim granicama i specifično opterećenje valjaka (Fišteš, 2009). Veoma je važno da rastojanje između valjaka bude konstantno celom dužinom para valjaka jer to omogućava ujednačeno usitnjavanje. Rastojanje se može podešavati ručno ili mehanički, pneumatskim ili hidrauličkim sistemom. Sa smanjenjem razmaka između valjaka naprezanje čestica materijala raste i stepen usitnjenosti mliva se povećava. Kada su dva ili tri para valjaka postavljeni jedan iznad drugog, razmak između valjaka se postepeno smanjuje od prvog ka drugom ili trećem paru valjaka. Uobičajene vrednosti razmaka između

valjaka u proizvodnji hrane za životinje kreću se između 0,5 i 5 mm (Koch, 2002; Kersten i sar., 2005).

2.3.4. Poređenje mlina čekićara i mlina sa valjcima

Prema Kersten-u i sar. (2005), prednosti upotrebe mlina čekićara u poređenju sa mlinom sa valjcima su sledeće:

- veći kapacitet,
- mogućnost usitnjavanja materijala različitih strukturno-mehaničkih svojstava – univerzalnost primene,
- jednostavna upotreba i održavanje,
- jednostavna promena granulacije mliva,
- niža cena i
- dobijaju se sferične čestice, glatke površine (usled delovanja sila trenja na površini sita).

Nedostaci su:

- manja energetska efikasnost od mlinova sa valjcima – veća specifična potrošnja energije,
- veće razvijanje toplote (gubitak energije, gubitak vlage materijala),
- veća buka,
- veoma široka raspodela veličina čestica i
- velika količina prašine.

S druge strane, prednosti mlina sa valjcima su:

- definisana granulacija mliva i uska raspodela veličina čestica,
- manja specifična potrošnja energije,
- manje habanje radnih elemenata,
- nije potrebna aspiracija,
- manji gubici vlage materijala zbog manjeg razvoja toplote i
- tiši rad.

Nedostaci su:

- slabo usitnjavanje vlaknastih materijala, bogatih celulozom (omotači zrna žita), što se donekle kompenzuje upotrebom žlebljenih valjaka,
- dobijene čestice su nepravilnog oblika, što nepovoljno utiče na njihovo pakovanje u smeši i osobine proticanja,

- manji kapacitet od čekićara i
- veći investicioni kao i troškovi održavanja.

Takođe, u tabeli 1 dat je uporedni prikaz navedenih mlevnih uređaja prema *Wild-u (1992)*:

Tabela 1. Poređenje mlina čekićara i mlina sa valjcima (*Wild, 1992*)

Karakteristika	Mlin čekićar	Mlin sa valjcima
veličina čestica	sitne do krupne	srednje do krupne
raspon veličina čestica	širok	uzak
specifični utrošak energije	visok/vrlo visok	nizak
gubici vlage zbog zagrevanja (povišenje temperature materijala)	znatni (10-15 ⁰ C)	beznačajni (oko 4 ⁰ C)
aspiracija	potrebna	nepotrebna
rukovanje	jednostavno	složenije

2.4. PROCES PELETIRANJA

Pri uobičajenom postupku proizvodnje hrane za životinje, hraniva se usitnjavaju i mešaju i tako dobijaju praškaste smeše koje potom bivaju podvrgnute kondicioniranju (pripremi) pod dejstvom vodene pare i/ili vode, a zatim sledi granuliranje tako pripremljene smeše (*Thomas i van der Poel, 1996*). Granuliranje podrazumeva povezivanje (aglomeraciju) čestica praškaste smeše u krupnije čestice (granule), što se postiže mehaničkim postupkom pri kojem dolazi do kombinovanog delovanja temperature, vlage i pritiska (*Falk, 1985; Fairfield, 2005*). Najčešći način granuliranja smeša za ishranu životinja je operacija peletiranja. Peletiranje je jedna od osnovnih operacija u industrijskoj proizvodnji hrane za životinje u kojoj se smeša potiskuje kroz kanale na matrici, pri čemu dolazi do aglomeracije smeše i na izlazu iz matrice dobijaju se granule oblika valjka (pelete) različite dužine i prečnika (*Lević i Sredanović, 2010*).

Primena smeša u peletiranom obliku pokazala je brojne prednosti u odnosu na praškaste smeše (*Rumpf, 1958; Friedrich i Robohm, 1969; Vanschoubroek i sar., 1971*):

- bolja je protočnost, čime se olakšava transport peleta unutar pogona, uvrećavanje, kao i hranjenje životinja na farmama,
- ne postoji mogućnost raslojavanja smeše,
- onemogućava se selektivna ishrana, t.j. životinja ne može da bira pojedine sastojke iz smeše,
- povećava se konzumacija hrane,

- povećava se svarljivosti hrane,
- poboljšavaju se senzorska svojstva hrane,
- smanjenjuje se broj mikroorganizama,
- povećava se nasipna masa proizvoda, što olakšava transport prevoznim sredstvima i skladištenje i
- smanjuju se transportni troškovi.

Međutim, uvođenje operacije peletiranja podrazumeva dodatne troškove, koji obuhvataju troškove kupovine i održavanja opreme za peletiranje: generator pare, kondicioner, pelet presa, transporter i hladnjak. Potom, tu su troškovi angažovanja dodatne radne snage kao i troškovi energije za rad pelet prese, kondicionera i hladnjaka. S obzirom da se nakon operacije mešanja dobija smeša koja se već u takvom obliku može koristiti u ishrani životinja, dodatni troškovi neophodni za peletiranje moraju biti opravdani prednostima koje ova operacija donosi (*Behnke 1996; Thomas i van der Poel, 1996*).

Proizvodnja smeša za ishranu životinja u obliku peleta datira još iz prve polovine XX veka, kada su *Patton i sar. (1937)* utvrdili nutritivnu superiornost peletirane hrane za živinu nad praškastom. U savremenim pogonima peletiranje se izvodi na takozvanim „valjak-i-matrica“ pelet presama, kako vertikalnim tako i horizontalnim. Pre ulaska u pelet presu, praškasti materijal prolazi kroz pripremu, a to može biti mešanje sa melasom ili mastima, kondicioniranje parom i/ili vodom, ili tretman ekspanderom, kako bi se povećala temperatura i sadržaj vode smeše. Potom se smeša peletira i nakon izlaska iz pelet prese, pelete sa hlade ambijentalnim vazduhom (*Thomas i van der Poel, 1996*). Dakle, celokupni proces peletiranja najčešće obuhvata pripremu materijala (kondicioniranje), samo peletiranje i hlađenje.

2.4.1. Faze procesa peletiranja

2.4.1.1. Kondicioniranje

Proces peletiranja uglavnom uključuje kondicioniranje, koje je ponekad preduslov za kompresiju sirovine u pelete. Kondicioniranje se može definisati kao postupak pripreme sirovine, uz korišćenje toplote, vode i pritiska, tokom određenog vremena, pri čemu se dovodi u fizičko stanje koje olakšava njeno zbijanje. Voda se može dodati u obliku tečnosti ili pare pod pritiskom (*Brlek i sar., 2012*). Kondicioniranje povećava kapacitet proizvodnje i utiče na fizički, nutritivni i

mikrobiološki kvalitet dobijenih peleta. Pravilno kondicioniranje, doprinosi adhezivnim karakteristikama na površini čestica čime se poboljšava kvaliteta peleta, t.j. povećava se čvrstoća i smanjuje abrazija (*Skotch i sar., 1981; Sredanović i Lević, 2000; Samuelson i sar., 2009; Brlek i sar., 2012*).

Kondicioniranjem se menja udeo vode u materijalu i tako utiče na procese koji su značajni za kvalitet peleta. Veći sadržaj vode materijala smanjuje trenje tokom peletiranja (*Serrano i sar., 2011*) što dovodi do manje nasipne mase peleta, ali i do manje potrošnje energije tokom peletiranja (*Samuelson i sar., 2009*). Veća sadržaj vode materijala takođe smanjuje gustinu peleta, a povećava njihovu čvrstoću (*Serrano i sar., 2011*). Toplota i voda dodate tokom kondicioniranja dovode do promena, kao što su želatinizacija skroba i denaturacija proteina, koje doprinose da vezivna svojstva dođu do izražaja (*Thomas i van der Poel, 1996*). Međutim, suviše toplote ili vode umanjuje proizvodni kapacitet i narušava kvalitet peleta, a može doći i do blokiranja pelet prese (*Winowski, 1985*). Pravilno kondicioniranje olakšava dobijanje proizvoda odgovarajuće tvrdoće, stepena otiranja i mikrobiološkog kvaliteta. Pri tome nutritivna vrednost peletirane smeše se ne menja ili se čak i unapređuje (*Liu i sar., 1969; McCapes i sar., 1989; Sredanović i Lević, 2000*).

Za kondicioniranje u proizvodnji hrane za životinje uglavnom se koriste kontinualni cilindrični kondicioneri koji se sastoje od centralne osovine na koju su pričvršćene lopatice. Lopatice transportuju materijal i intenzivno ga mešaju sa parom i/ili vodom. U zavisnosti od broja obrtaja osovine, stepena napunjenosti, protoka materijala, nagiba lopatica i dužine cilindra, vreme zadržavanja materijala u kondicioneru se kreće od 10 do 255 sekundi. Novije konstrukcije kondicionera opremeljene su sa dve osovine sa lopaticama kao i sa toplotnim plaštom (*Audet, 1995; Oechsner de Coninck i Bouvier, 1995; Lević i Sredanović, 2010*).

Tokom kondicioniranja voda se uglavnom dodaje u obliku pare pri čemu se povećava temperatura i sadržaj vode materijala. S obzirom na gasovito stanje, para se ravnomerno raspodeljuje po materijalu. Prilikom kondenzacije pare, tanak film vode se formira na površini čestica što, uz istovremeno povećanje temperature, olakšava povezivanje čestica (*Thomas i sar., 1997*). Do toga dolazi na dva načina. Prvo, voda omogućuje povezivanje čestica dejstvom kapilarnih sila u trofaznom sistemu voda-vazduh-čestice (*Rumpf, 1958; Friedrich, 1977*). Drugo, toplota i voda dovode do velikog broja fizičkih i hemijskih promena, uključujući između ostalog termičko omekšavanje čestica (*Rao i Lund, 1986*), denaturaciju proteina (*Kinsella, 1979*) i želatinizaciju skroba (*Skotch i sar., 1981, 1983*). Ove fizičko-hemijske promene utiču na vezivna

svojstva čestica (*Thomas i van der Poel, 1996*). Dakle, voda na površini čestica menja površinsku strukturu i omogućuje njihovo povezivanje tokom peletiranja.

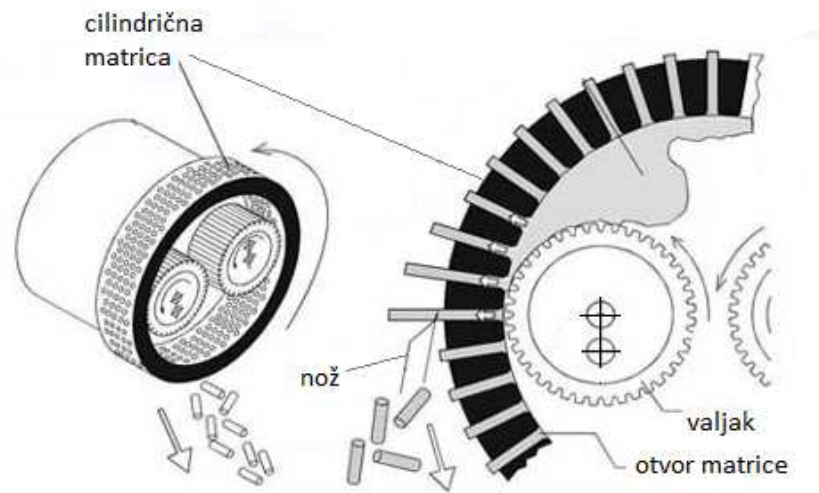
Poredeći efekte kondicioniranja vodom i parom, *Friedrich i Robohm (1969, 1970)* su utvrdili smanjenje stepena otiranja kada je umesto vode dodavana para. Takođe je i *Wood (1987)* pokazao da ukoliko se voda dodaje u obliku pare pozitivni uticaj na tvrdoću i otiranje peleta je izraženiji. S druge strane, *Fairchild i Greer (1999)* su utvrdili znatno poboljšanje kvaliteta peleta pri dodatku vode u tečnom obliku u poređenju sa dodatkom vodene pare.

2.4.1.2. Peletiranje

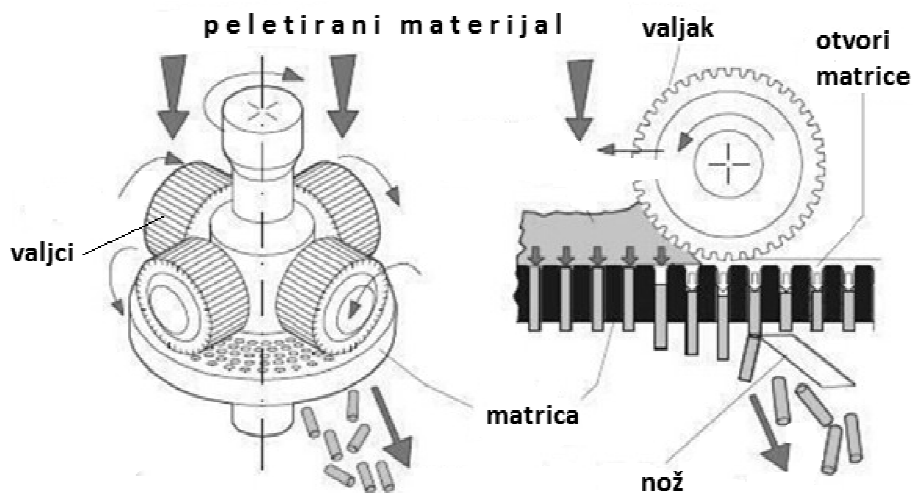
Peletiranje se može definisati kao proces u kojem se sitne čestice povezuju u veće aglomerate tokom mehaničkog postupka uz pomoć vlage, toplote i pritiska (*Falk, 1985*). Uređaj za peletiranje se naziva pelet presa i sastoji se od dva osnovna dela: matrice i valjaka. Oblikovanje se obavlja u kanalima matrice pri čemu valjci potiskuju materijal kroz kanale koju su najčešće cilindričnog oblika. Između zidova kanala i materijala koji se kroz njih potiskuje javlja se trenje. Kada pritisak kojim se materijal potiskuje kroz kanale matrice nadjača sile trenja doći će do ulaska materijala u kanale. Usled stalnog dotoka nove količine, kao i usled delovanja valjaka, materijal u kanalu se potiskuje sledećim slojem presovanog materijala. Na taj način materijal postepeno prolazi kroz matricu i izlazi na drugom kraju kanala u obliku aglomerata cilindričnog oblika. Ovi aglomerati se odsecaju delovanjem rotirajućih noževa i pri tome se dobijaju pelete odgovarajuće dužine i prečnika. Dužinu određuje rastojanje između noža i matrice, a prečnik zavisi od prečnika otvora matrice (*Pfost, 1971, Kersten i sar., 2005*). U praksi se sreću dva tipa pelet prese, sa cilindričnom (sl. 6) i sa ravnom matricom (sl. 7).

Peletirke sa cilindričnom matricom češće se koriste u industriji hrane za životinje. Postoje različiti dizajni ovih peletirki pri čemu obično matrica rotira, a valjci su fiksirani i mogu da rotiraju samo oko sopstvene ose delovanjem sila trenja koje se javljaju između valjaka i peletiranog materijala. Pripremljen materijal ulazi aksijalnim dovodom u komoru za peletiranje i pomoću valjaka i određenih elemenata koji se nazivaju raspodeljivači, biva raspoređen po celoj površini matrice. Postepeno se povećava debljina sloja materijala na matrici i usled pritiska valjaka i rotacije matrice, dolazi do istiskivanja materijala kroz otvore matrice. Sa spoljne strane matrice fiksirani su noževi koji pelete odsecaju na željenu dužinu (*Thomas i sar., 1997; Kersten i sar., 2005*).

Pelet prese sa ravnom matricom se ređe koriste u proizvodji hrane za životinje. Kod njih je matrica statična i preko nje rotiraju valjci potiskujući materijal kroz kanale. Materijal se dovodi slobodnim padom u komoru za peletiranje i ravnomerno raspodeljuje po površini matrice pod dejstvom rotirajućih valjaka. Sa donje strane matrice nalaze se rotirajući noževi koji odsecaju pelete na željenu dužinu (Thomas i sar., 1997)



Slika 6. Pelet presa sa cilindričnom matricom (www.pelletprocess.de)



Slika 7. Pelet presa sa ravnom matricom (www.biofuelmachines.com)

Efikasnost peletiranja podrazumeva proizvodnju peleta dobrog fizičkog kvaliteta uz optimalan odnos potrošnje energije i kapaciteta peletiranja (protoka materijala). To ne znači da je neophodno raditi pri najmanjoj potrošnji energije pelet prese i pri najvećem kapacitetu, već je

potrebno pronaći najbolju kombinaciju ova dva parametra (kompromisni optimum) pri kojoj se dobijaju pelete dobrog (zadovoljavajućeg) kvaliteta uz što manji utrošak energije. Veliki broj istraživanja ukazuje da povećanje pritiska u kanalima matrice poboljšava fizičke osobine proizvedenih peleta (*Miladinović i Svihus, 2005*). Pritisak u kanalima matrice pelet prese zavisi od koeficijenta trenja između zidova kanala matrice i materijala koji se peletira, sadržaja vode, vremena relaksacije sila elastičnih materijala, temperature matrice i kompresibilnosti materijala (*Tešić, 1977*).

Proizvedene pelete trebaju imati sledeće osobine:

- dobar izgled,
- bez prašine,
- bez pukotina,
- ujednačene dužine,
- dovoljno tvrde da podnesu pritiske tokom skladištenja,
- izdržljive, t.j. potrebno je da podnesu manipulacije od proizvoda linije do farme i da pri tome ne nastane puno prašine. Ova osobina je najvažnija od svih navedenih (*Payne i sar., 2010*).

2.4.1.3. Hlađenje

Hladnjaci su uređaji kojima se oduzima višak toplote i vlažnosti iz peleta i na taj način im se povećava čvrstina i otpornost (*Payne i sar., 2010*). Pelete uglavnom izlaze iz pelet prese sa temperaturama u rasponu 60 - 95 °C i sadržajem vode od 12 do 17% (*Maier i Bakker-Arkema, 1992*) i zato se ne smeju pakovati ni skladištiti pre nego što se ohlade i pre nego što im se ukloni višak vode. Kod toplih peleta, usled kondenzacije vode može doći do procesa kvarenja izazvanog razvojem plesni ili drugih mikroorganizama kojima pogoduju viša temperatura i sadržaj vode. Zato se hlađenje obično izvodi odmah nakon izlaska peleta iz pelet prese. Pri tome je poželjno da temperatura peleta nakon izlaska iz hladnjaka bude do 5 °C viša od temperature okoline, a vlažnost materijala za 0,5% viša od vlažnosti pre kondicioniranja (*Turner, 1995; Payne i sar., 2010*).

Neispravno hlađenje može dovesti do narušavanja kvaliteta peleta. Tokom pravilnog hlađenja, u stacionarnom stanju, ista je količina vode (i latentne toplote) koja se prenosi kroz kapilare od unutrašnjeg dela do površine peleta, kao i količina vode koju struja vazduha odnosi sa površine. U slučaju prevelike brzine vazduha tokom hlađenja, više vode i toplote će biti uklonjeno iz površinskog sloja peleta nego što može proći kroz kapilare iz unutrašnjeg sloja, pa na površini

nastaje sloj sa fizičkim svojstvima koja se razlikuju od onih u unutrašnjem delu. Te razlike u fizičkim svojstvima stvaraju naprezanja u peletama koja uzrokuju pucanje površinskog sloja (Thomas i van der Poel, 1996). Ohlađene pelete se iz hladnjaka vode na sita na kojima se izdvajaju sitne čestice i delići peleta, t.j. prašina. Izdvojena prašina se ponovo vraća na peletiranje (Kersten i sar., 2005).

2.4.2. Fizički kvalitet peleta

Fizički kvalitet peleta se može definisati kao njihova otpornost fragmentaciji (lomljenju) i abraziji, t.j. osipanju površinskih nepravilnosti (ispupčenja, nabori) i krajeva peleta tokom mehaničkih i pneumatskih manipulacija (transport, skladištenje, uvrećavanje) (Thomas i Van der Poel, 1996; Cramer i sar., 2003; Amerah i sar., 2007a). Odmah nakon izlaska iz pelet prese, pelete su izložene fragmentaciji i abraziji, najpre tokom kretanja u hladnjaku, zatim tokom daljeg transporta (kofičasti elevatori, lančasti transporteri) i tokom punjenja skladišnih ćelija, a potom pelete mogu biti uvrećavane ili transportovane u rinfuzi (npr. kamionima) gde može doći do njihovog daljeg oštećivanja. Dobar fizički kvalitet obezbeđuje manji udeo prašine u peletama i tako doprinosi boljim proizvodnim karakteristikama životinja (Cramer i sar., 2003; Amerah i sar., 2007a; Fahrenholz, 2012).

Osnovni pokazatelji fizičkog kvaliteta peleta jesu tvrdoća i stepen otiranja. Tvrdoća predstavlja silu koja je neophodna da bi se peleta polomila, a stepen otiranja količinu sitnih čestica koje nastaju pri mehaničkom ili pneumatskom tretmanu peleta (Pfof, 1963). Kako bi se ovi pokazatelji fizičkog kvaliteta bolje razumeli, odnosno kako bi se razumeo uticaj različitih faktora pri peletiranju (karakteristike materijala, uslovi pripreme materijala i parametri procesa peletiranja) na kvalitet dobijenih peleta, potrebno je poznavati mehanizme povezivanja čestica različite veličine, tvrdoće i oblika.

2.4.2.1. Mehanizmi povezivanja čestica u peletama

Mehanizmi povezivanja čestica tokom peletiranja mogu se podeliti na: interakcije „čvrsto-čvrsto“, kapilarne sile u trofaznom sistemu voda-vazduh-čvrste čestice, adhezivne i kohezivne sile između čestica i veziva, van der Waals-ove sile, međusobno preplitanje i obmotavanje čestica itd.

(Thomas i van der Poel, 1996). Koji od navedenih mehanizama će biti glavni uzročnik povezivanja čestica zavisi od vrste materijala koji se peletira kao i od procesnih parametara.

Povezivanje putem interakcija čvrsto-čvrsto podrazumeva neke od sledećih procesa: sinterovanje, rekristalizaciju ili rast kristala pojedinih sastojaka, hemijske reakcije, topljenje termoplastičnih materijala i potom njihovo spajanje pri očvršćivanju (Rumpf, 1958). Ove veze nastaju uglavnom tokom sušenja ili hlađenja u zavisnosti od primenjenih uslova (Thomas i van der Poel, 1996).

U poroznim aglomeratima poput peleta, prisutne su tri faze: voda, vazduh i čvrste čestice. Zbog toga postoje uslovi za povezivanje čestica pod dejstvom kapilarnih sila ili tzv. vodenih mostova, odnosno voda deluje kao vezivo. Jačina tih veza zavisi od površinskog napona prisutne tečnosti γ (N m^{-1}) i od prečnika susednih čestica r (Rumpf, 1958). Sila Δp (N) kojom su čestice povezane definisana je Laplasovom jednačinom:

$$\Delta p = 2 * \frac{\gamma}{r} \quad (2)$$

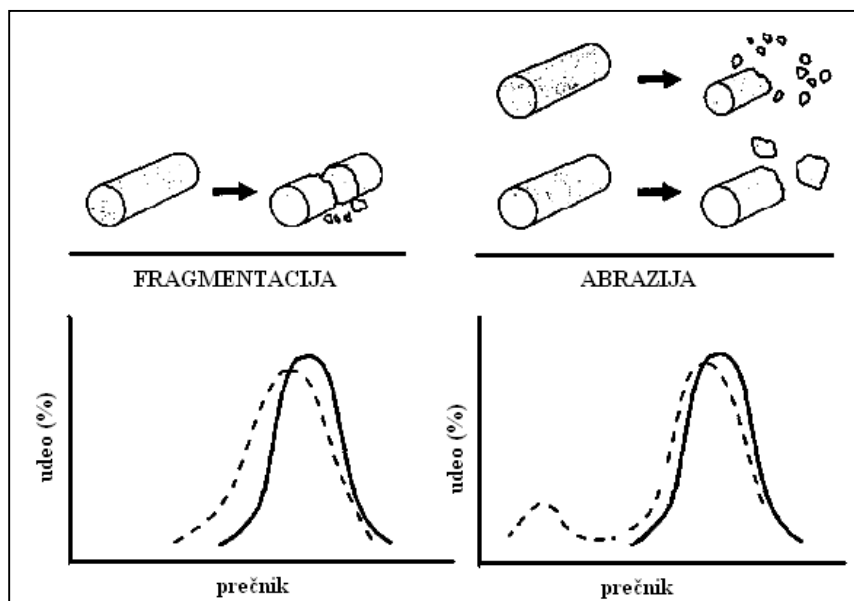
Jednačina 2 važi kada su susedne čestice jednakog prečnika, što u peletama nije slučaj s obzirom da se mlevenjem dobijaju čestice različite veličine. Iz jednačine proizilazi da se sa smanjenjem prečnika čestica povećava sila kojom su one povezane. To je u skladu sa opštim principom da je kvalitet peleta bolji što je mlivo sitnije granulacije (Payne, 1978). Pri smanjenju sadržaja vode peleta dolazi do smanjenja broja vodenih mostova između čestica i ukupna sila ove vrste veze opada. Međutim, sila po pojedinačnoj vezi se povećava jer voda najpre isparava iz većih kapilara, tako da preostala voda povezuje sitnije čestice pa iz Laplasove jednačine proizilazi da će sila biti veća. U slučaju kada velika količina vode ispunjava sve pore unutar peleta, postojaće dvofazni sistem vode i čvrstih čestica i tako neće postojati uslovi za delovanje kapilarnih sila (Thomas i van der Poel, 1996). U istraživanju koje su sprovedi Knacke i Pohl (1959) ispitivan je uticaj količine dodate vode na čvrstinu aglomerata gline. Pri tome je utvrđeno da postoji optimum čvrstoće aglomerata u zavisnosti od količine dodate vode. Iz ovoga se može zaključiti da i pri peletiranju hrane za životinje u pogledu čvrstoće peleta postoji optimalna količina vode.

Van der Waals-ove sile mogu imati ulogu u strukturi peleta kada su čestice dovoljno male ($< 50 \mu\text{m}$ (de Jong, 1995); $< 60 \mu\text{m}$ (Rumpf, 1958)). Međutim, udeo ove frakcije čestica u smešama za ishranu životinja uglavnom je vrlo nizak tako da ove sile nemaju značajniji uticaj na povezivanje u peletama (Thomas i van der Poel, 1996). U peletama postoje i veze koje nastaju usled toga što se

pojedine čestice (vlaknaste čestice, čestice pljosnatog oblika i krupnije čestice) tokom peletiranja presavijaju pri čemu dolazi do njihovog međusobnog preplitanja i obmotavanja (*Rumpf, 1958*).

2.4.2.2. Kriterijumi i uređaji za određivanje kvaliteta peleta

Kada postoji delovanje statičkih (konstantnih) ili dinamičkih (promenljivih) sila na pelete, može doći do njihovog oštećivanja. Statičke sile su prisutne npr. za vreme skladištenja u silo-ćelijama, a dinamičke tokom mehaničkog ili pneumatskog transporta ili pri punjenju ćelija. Do oštećenja peleta, kao što je već rečeno, dolazi usled delovanja dva fenomena, fragmentacije i abrazije (sl. 8), pri čemu oba rezultuju promenom raspodele veličine čestica i nasipne mase peletirane smeše (*Thomas i van der Poel, 1996*). Fragmentacija podrazumeva lomljenje peleta na manje komade, kao i nastajanje sitnih čestica na mestu preloma. Kao posledica toga, maksimum krive raspodele veličine čestica se pomera ulevo, ka manjim veličinama, i kriva je šira, usled veće heterogenosti raspodele veličine čestica. Takođe dolazi i do neznatnog povećanja nasipne mase (*de Jong, 1993*). Pri abraziji dolazi do osipanja peleta na krajevima, kao i osipanja površinskih nepravilnosti (ispupčenja, nabora) i pri tome nastaju sitne čestice koje obrazuju dodatni maksimum na krivoj raspodele veličine čestica. U zavisnosti od intenziteta abrazije, može doći i do značajnijeg povećanja nasipne mase peleta, s obzirom da sitne čestice zauzimaju međuprostore između peleta (*Thomas i van der Poel, 1996*).



Slika 8 – Uticaj fragmentacije i abrazije na krivu raspodele veličina čestica (*de Jong, 1993*)

Prilikom peletiranja hrane za životinje povezuju se čestice različite veličine, oblika i tvrdoće. Takav materijal daje pelete čija je struktura vrlo nehomogena. Fragmentacija i abrazija nehomogenih materijala uvek nastaje u blizini mesta nehomogenosti, s obzirom da su lokalna naprezanja uvek najizraženija na takvim mestima. Tu se formiraju tzv. „slabe tačke.“ Što su nehomogenosti u strukturi veće, manji intenziteti naprezanja su neophodni da dođe do oštećenja (Thomas i van der Poel, 1996).

2.4.2.2.1. Tvrdoća peleta

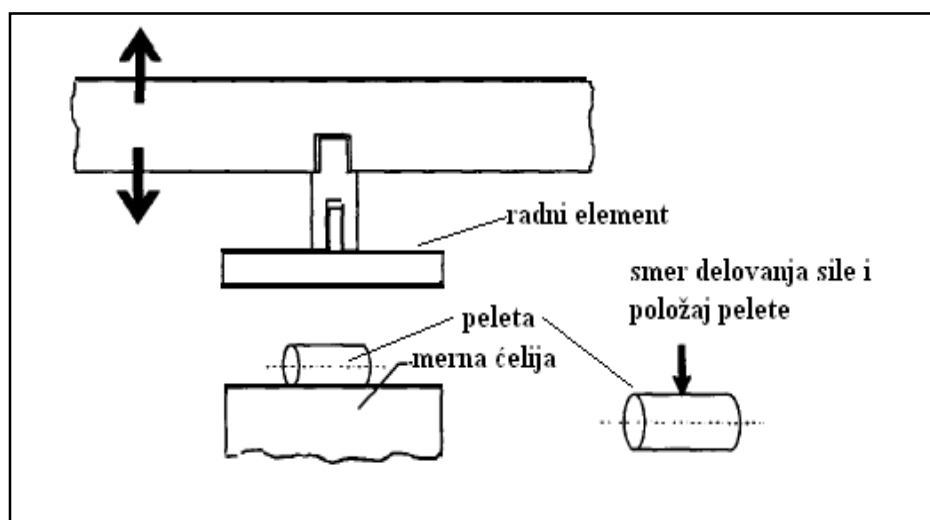
Sklonost peleta fragmentaciji određuje se merenjem njihove tvrdoće. Tvrdoća peleta je veoma značajna za ishranu životinja, s obzirom da može uticati na sklonost životinje ka konzumaciji peletirane hrane (Skoch i sar., 1983). Takođe je pokazano da tvrdoća utiče i na resorpciju azotnih komponenata u probavnom sistemu životinja (Čuperlović i sar., 1973). Određeni stepen tvrdoće je neophodan i kako bi pelete mogle podneti statičke pritiske tokom skladištenja u ćelijama pre uvrećanja (Thomas i van der Poel, 1996).

Tvrdoća peleta se određuje primenom uređaja koji mere silu neophodnu da se peleta polomi. Ovi uređaji su tokom vremena razvijani, kako za naučne svrhe, tako i za neposrednu kontrolu tvrdoće peleta u pogonima za proizvodnju hrane za životinje. Danas postoji više vrsta uređaja koji se međusobno razlikuju po načinu rada (Thomas i van der Poel, 1996). Prvi uređaj koji je imao širu primenu u industriji je Kahl-ov tester (sl. 9). Kod ovog uređaja postepeno se povećava pritisak koji deluje na peletu i meri se sila koja je neophodna da bi se peleta polomila. Srednja vrednost 10 merenja predstavlja Kahl-ovu tvrdoću peleta (Thomas i van der Poel, 1996). Kod starije verzije ovog uređaja, povećavanje pritiska obavlja se ručno, dok noviji uređaji rade automatski.



Slika 9 – Ručni i automatski Kahl-ov uređaj za određivanje tvrdoće peleta (www.akahl.de)

Još jedan od uređaja koji se koristi za određivanje tvrdoće je klatno kojim se meri otpornost na udar, odnosno meri se količina energije potrebna da se peleta polomi udarom. Potom, postoje automatski uređaji (sl. 10) koji se sastoje od nepomične površine sa mernom ćelijom iznad koje se nalazi konstrukcija sa radnim elementom (u vidu ravne ploče ili noža), čija se brzina može podešavati. Na ovakvim instrumentima mogu se izvoditi testovi jednoosnog sabijanja, jednoosnog istezanja, savijanja u tri tačke i testovi rezanja (*Luyten i sar., 1992*). Za testiranje tvrdoće peleta najprikladniji su testovi jednoosnog sabijanja ili rezanja. Sila koja je potrebna da bi se peleta slomila se beleži u zavisnosti od vremena.



Slika 10 – Automatski uređaj sa mernom ćelijom i pomičnim radnim elementom (*Luyten i sar., 1992*)

2.4.2.2.2. Step en otiranja peleta

U praktičnim uslovima, tokom manipulisanja peletama dolazi do njihove abrazije, pri čemu nastaju sitni delići peleta, tzv. prašina. Kako ne bi dolazilo do njihovog preintenzivnog raspadanja, pelete moraju imati određenu otpornost. Pokazatelj sklonosti peleta abraziji je stepen otiranja, koji se određuje mehaničkim ili pneumaskim tretmanom peleta u odgovarajućim uređajima u kojima se simulira manipulacija peletama u praktičnim uslovima. Nakon tretmana meri se količina nastalih sitnih čestica i izražava u odnosu na početnu masu peleta (*Thomas i van der Poel, 1996*). Većim brojem istraživanja je pokazano da je stepen otiranja dobar pokazatelj količine prašine koja nastaje tokom manipulisanja peletama. Tako su *Briggs i sar. (1999)* i *Glipin i sar. (2002)* utvrdili pozitivnu korelaciju između stepena otiranja peleta i količine prašine. Pri tome su *Briggs i sar. (1999)* utvrdili približno 50% manje prašine kada je stepen otiranja smanjen za 40%. Pelete su naročito osetljive na

abraziju na mestima na kojima su odsečene pri izlasku iz matrice pelet prese. Nepravilno hlađenje peleta, kao što je već objašnjeno, može dodatno povećati njihovu osetljivost jer razlika u temperaturi ohlađenih površinskih slojeva i još uvek tople unutrašnjosti dovodi do pojave dodatnih napona u peleti (Thomas i van der Poel, 1996).

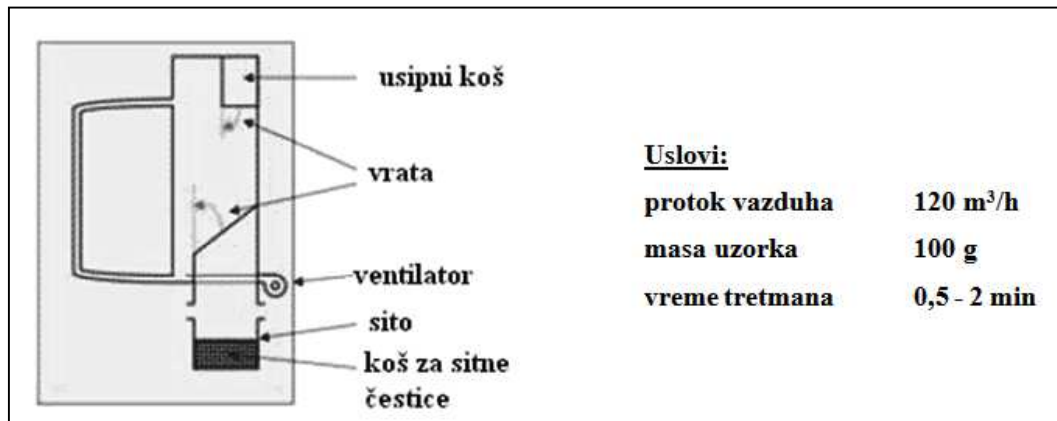
Postoji više uređaja za određivanje stepena otiranja peleta. Postupak prema Pfostru je metoda propisana standardom ASAE S269.4 (ASAE, 1997). Kod ovog postupka, stepen otiranja se određuje pomoću uređaja sa dve rotirajuće kutije u kojima pelete, usled rotiranja kutija, udaraju jedna o drugu, o zidove kutije, kao i o prepreku postavljenu po sredini kutije (sl. 11). Postupak je standardizovan definisanjem dimenzija kutija, u kojima se tretira po 500 g peleta. Takođe je definisano i vreme tretmana (10 min) i broj obrtaja kutija (50 min^{-1}). Nakon tretmana, pelete se proseju na situ čija je veličina otvora jednaka: $0,8 \times$ prečnik pelete (Thomas i van der Poel, 1996). Iz razlike početne mase peleta i mase nakon prosejavanja dobije se masa propada i izrazi kao procenat u odnosu na početnu masu peleta (Pfostr, 1963).



Slika 11 – Uređaj za određivanje stepena otiranja prema Pfostru

Poslednjih decenija, sa relativno sporog mehaničkog transporta peleta, prešlo se na veoma brz pneumatski transport, tako da se promenio i intenzitet sila kojima su pelete izložene. To zahteva i prilagođavanje uređaja za određivanje stepena otiranja novim uslovima. Tako Holmen pelet tester (sl. 12) simulira naprezanja kojima su pelete izložene pri pneumatskom transportu, pri čemu se uzorak peleta (100 g) transportuje kroz sistem cevi pomoću struje vazduha. Nakon tretmana, stepen otiranja se određuje na isti način kao i kod postupka po Pfostru (Thomas i van der Poel, 1996; Lowe, 2005). Novija verzija ovog uređaja je Holmen pelet tester NHP proizvođača TekPro (Norfolk, Velika Britanija). Kao i kod prethodnog modela koristi se struja vazduha kojom se tretira uzorak od 100 g peleta u trajanju od 30, 60, 90 ili 120 s. Struja vazduha „baca“ pelete u perforiranoj komori oblika piramide. Rad sa ovim uređajem je mnogo brži i lakši u poređenju sa uređajem po Pfostru. Winowski (1998) je upoređivao NHP tester sa uređajem prema Pfostru kao i sa originalnim

Holmen pelet testerom. Utvrdio je da je NHP tester destruktivniji od druga dva, ali i da je u dobroj korelaciji sa njima. Iz dobijenih rezultata je zaključeno da su novi NHP tester i originalni Holmen tester osetljiviji na promene u formulaciji ili na promene u parametrima peletiranja.



Slika 12 – Holmen pelet tester (Lowe, 2005)

Pomenute metode za određivanje stepena otiranja su empirijske, što znači da ne mere određenu osobinu, npr. tvrdoću ili elastičnost, što bi sa stanovišta nauke bilo adekvatnije (Fahrenheit, 2012). Pfof i sar. (1962) su utvrdili da merenje tvrdoće peleta nije pokazalo dobru korelaciju sa količinom prašine nastalom pri tretiranju peleta u model sistemu. Međutim, Wood (1987) je takođe ispitivao korelaciju tvrdoće i otiranja, ali je koristio mnogo precizniji Kahl-ov tester za određivanje tvrdoće. Pri tome je utvrdio da je tvrdoća logaritamski povezana sa stepenom otiranja ($r = 0,94$).

2.4.3. Parametri procesa peletiranja

Na kvalitet proizvedenih peleta utiče veći broj parametara operacije peletiranja. Prema Behnke-u (2006) problem kod operacije peletiranja je u tome što gotovo sve što se može učiniti kako bi se poboljšao kvalitet peleta (smanjio stepen otiranja) dovodi ili do povećanih troškova proizvodnje ili do smanjenja kapaciteta pelet prese, ili i jedno i drugo. Parametri koji se mogu varirati tokom peletiranja su količina vode dodate pri kondicioniranju, temperatura kondicioniranja, debljina matrice, zazor valjci-matrica, veličina čestica peletiranog materijala, hemijski sastav smeše i dr.

2.4.3.1. Debljina matrice, L:D odnos

Brojne su karakteristike matrice koje utiču na kvalitet peleta i potrošnju energije pelet prese. Vrsta materijala od kojeg je matrica izrađena utiče na intenzitet trenja između matrice i peletiranog materijala. Značajan uticaj ima i dizajn otvora matrice. Međutim, karakteristika koja ima najveći uticaj je odnos debljine (L) matrice i prečnika otvora (D), koji je poznat kao L:D odnos. Veći L:D odnos, koji znači deblju matricu ili manji prečnik otvora matrice, dovodi do poboljšanja kvaliteta peleta usled većeg trenja i time većeg pritiska kojem je materijal izložen. Pri peletiranju materijala sa visokim sadržajem vlakana dolazi do ekspanzije materijala nakon pada pritiska, prilikom izlaska iz kanala matrice, što povećava poroznost dobijenih peleta (*Thomas i sar. 1998; Stelte i sar., 2012*). U slučaju povećavanja debljine matrice materijal vremenski ostaje duže u sabijenom stanju. Usled toga se umanjuje uticaj prisutnih elastičnih komponenti jer dolazi do relaksacije elastičnih sila u materijalu (*Mohsenin i Zaske, 1976; Fahrenholz, 2012*). Međutim, veći L:D odnos smanjuje kapacitet i povećava potrošnju energije pelet prese.

Pfost (1964) je utvrdio da smanjenje debljine matrice smanjuje kvalitet peleta, ali takođe smanjuje i potrošnju energije pelet prese. *Traylor (1997)* navodi da smanjenje prečnika peleta prati smanjen kapacitet pelet prese i veća potrošnju energije, dok je kvalitet peleta poboljšan. U istraživanju *Miladinovića i Svihus-a (2005)* povećavan je L:D odnos tako što su korišćene matrice sa istim prečnikom otvora (3,5 mm), ali sa različitom debljinom (50 i 60 mm). Takođe, ispitivanja su rađena pri dva protoka materijala 500 i 1000 kg/h. Najmanji stepen otiranja, meren Holmenovim testerom, utvrđen je kod peleta dobijenih korišćenjem deblje matrice i manjeg protoka. Značajno veći stepen otiranja je dobijen pri većem protoku, bez obzira na debljinu matrice, a najveći pri peletiranju sa matricom debljine 50 mm i protokom od 1000 kg/h. I u istraživanju *Hefner-a i Pfost-a (1973)* manji stepen otiranja je dobijen pri povećanju L:D odnosa. *Čolović i sar. (2010)* su pri peletiranju hrane za goveda, primenom matrica različite debljine, zaključili da sa povećanjem debljine matrice dolazi do povećanja tvrdoće peleta. *Shipe i sar. (2011)* su dobili kvalitetnije pelete kada je debljina matrice povećana sa 38,1 na 44,5 mm.

2.4.3.2. Zazor valjci – matrica

Veoma značajan parametar procesa peletiranja je rastojanje između valjaka i matrice (zazor valjci-matrica). Generalno, povećanje zazora dovodi do povećanja tvrdoće i smanjenja stepena

otiranja peleta (Payne, 1995; Thomas i sar., 1997). Najčešće se valjci podešavaju tako da gotovo dodiruju matricu. Sa povećanjem zazora najpre dolazi do povećanja tvrdoće i smanjenja stepena otiranja, a potom dolazi do pogoršanja ovih pokazatelja kvaliteta. Istraživanje koje su izveli Robohom i Apelt (1989) ukazuje da postoji maksimum kvaliteta peleta u zavisnosti od zazora valjci-matrica. Koristeći komercijalnu hranu za svinje utvrdili su smanjenje stepena otiranja sa povećanjem zazora do 2 mm. Dalje povećanje do 4 mm dovelo je do postepenog povećavanja stepena otiranja. Smanjenje stepena otiranja pripisano je sloju materijala sabijenom na površini matrice u kome dolazi do prekompakcije materijala. Zbog toga ovaj sloj može biti nazvan prekompakcioni sloj. Dalje povećanje zazora preko vrednosti pri kojoj se postiže najbolji kvalitet peleta, dovelo je do nestabilnosti prekompakcionog sloja na ivici matrice i valjaka i do „curenja“ materijala pored valjaka. Usled toga dolazilo je do povećanja stepena otiranja peleta i povećanja potrošnje energije.

U istraživanju Miladinovića i Svihusa (2005) ispitivana su različita podešavanja pelet prese kako bi se utvrdio najpogodniji zazor valjci-matrica u pogledu kvaliteta dobijenih peleta. Zaključeno je da se pri povećanju zazora formira nekoliko slojeva materijala i koeficijent trenja raste. Povećanje zazora do 2 mm, kao i smanjenje protoka materijala za 50% značajno je smanjilo stepen otiranja peleta (tab. 2). Pretpostavljeno je da je to posledica produženog sabijanja materijala tokom peletiranja i boljeg povezivanja čestica. Međutim, povećanje zazora i smanjenje protoka dovodi do komercijalno neprihvatljivog povećanja potrošnje energije pelet prese i smanjenja kapaciteta proizvodnje. U istom istraživanju utvrđeno je da sa povećanjem zazora, pored povećane potrošnje energije, dolazi do povećanja količine najsitnije frakcije čestica, što ukazuje na povećano usitnjavanje čestica tokom peletiranja, tzv. sekundarno mlevenje.

Tabela 2. Uticaj zazora valjci-matrica i protoka materijala na stepen otiranja peleta (Miladinović i Svihus, 2005)

Zazor valjci-matrica (mm)	Protok materijala (kg/h)	Stepen otiranja (%)
0,1	500	14,4
0,1	1000	17,2
1	500	12,3
1	1000	16,2
2	500	9,4
2	1000	14,4

Pelet prese mogu imati i sistem za automatsko podešavanje zazora valjci-matrica. Kod ovakvih uređaja moguće je u toku rada, bez zaustavljanja, varirati zazor i utvrditi zazor koji je

najoptimalniji za smešu koja se trenutno peletira, posmatranjem kvaliteta dobijenih peleta kao i potrošnje energije pelet prese. Pri promeni vrste smeše koja se peletira moguće je podestiti novi zazor, koji je odgovarajući za novu smešu, bez zaustavljanja pelet prese (*Kersten i sar., 2005*)

2.4.3.3. Protok materijala

Smanjenje protoka materijala pri peletiranju dovodi do njegovog dužeg zadržavanja u kondicioneru i u kanalima matrice, što doprinosi intenziviranju termo-mehaničkih interakcija kao i boljoj međusobnoj adheziji čestica (*Moritz i Lilly, 2010*). U istraživanju *Miladinovića i Svihusa (2005)* sa povećanjem protoka materijala došlo je do povećanja stepena otiranja peleta. U istraživanju koje je sproveo *Stark (2009)* pri povećanju protoka sa 500 na 1000 kg/h došlo je do povećanja stepena otiranja sa 45 na 59%, dok je dalje povećanje protoka na 1500 kg/h uzrokovalo povećanje stepena otiranja na čak 70%. Slično ovome, *Lowe (2005)* je pokazao da sa povećanjem protoka dolazi do linearnog povećanja stepena otiranja. Ovo ukazuje da je protok važan faktor koji utiče na kvalitet peleta i potrošnju energije. Peletiranje pri maksimalnom protoku omogućuje najveću efikasnost motora pelet prese, odnosno najmanju potrošnju energije po jedinici mase proizvoda. Dakle, sa povećanjem protoka smanjuje se specifična potrošnja energije izražena u Wh/kg. Pri povećanju protoka treba biti oprezan jer se povećava i stepen napunjenosti kondicionera što potencijalno može uzrokovati nejednaku raspodelu vode pri kondicioniranju materijala. Veći protok znači i kraće zadržavanje materijala u matrici pa su pelete vremenski kraće izložene toploti uzrokovanoj trenjem kao i pritisku u matrici (*Fahrenholz, 2012*).

2.4.3.4. Brzina obrtanja valjaka/matrice

Na kvalitet peleta utiče i brzina obrtanja matrice (pelet prese sa cilindričnom matricom) odnosno brzina obrtanja valjaka (pelet prese sa ravnom matricom). Povećanje brzine podrazumeva veću potrošnju energije pelet prese, ali se pri tome dobijaju kvalitetnije pelete. Veća brzina znači veći broj prelazaka valjaka preko sloja materijala na matrici. Usled toga su i tanji slojevi materijala koji bivaju potisnuti u kanale matrice prilikom prolaska valjka. Na taj način dolazi do boljeg sabijanja i pakovanja čestica u peleti (*Kersten i sar., 2005*). Pri konstantnim ostalim parametrima peletiranja, nedovoljna brzina obrtanja valjaka/matrice može dovesti do zapušanja otvora matrice, dok će pri većoj brzini pelet presa raditi nesmetano (*Stevens, 1987*). U preglednom radu *Thomas-a i*

sar. (1997) zaključeno je da brzina matrice prilikom proizvodnje peleta prečnika od 3 do 6 mm treba biti približno 6 do 7 m/s.

2.4.3.5. Veličina čestica

Veličina čestica ima veliki uticaj na kvalitet peleta. U literaturi se uglavnom navodi da sitnije čestice doprinose kvalitetnijim peletama, pri čemu se kao razlog navodi manji broj slabih tačaka u peletama, kao i da se sitnije čestice bolje hidratišu tokom kondicioniranja i tako bolje sabijaju i povezuju (Fahrenheit, 2012). Međutim, Robinson i sar. (1962) su utvrdili da iako se pri sitnijem mlevenju dobijaju nešto kvalitetnije pelete, povećanje temperature kondicioniranja jednako poboljšava kvalitet peleta proizvedenih od sitnog i krupnog mliva. Takvi rezultati ukazuju da ne postoji interakcija između kondicioniranja i veličine čestica. Ovi autori su takođe zaključili da sitnije mlevenje dovodi do manje potrošnje energije pelet prese i do manje količine prašine na izlazu iz pelet prese. Preporuka ovih autora je da „treba mleti onoliko sitno koliko je neophodno da bi se dobio zadovoljavajući kvalitet peleta“.

Objavljeni podaci o uticaju veličine čestica na proces peletiranja i kvalitet peleta su kontradiktorni. Reece i sar. (1985) su pokazali da se pri krupnijoj granulaciji čestica stepen otiranja peleta smanjuje. Povećanjem geometrijskog srednjeg prečnika čestica sa 670 na 1289 μm stepen otiranja je smanjen sa 9 na 7,5%. I u drugom istraživanju (Reece i sar., 1986b) isti autori navode da su pri peletiranju smeša sa krupnije mlevenim kukuruzom dobijene kvalitetnije pelete nego kada je korišćen sitnije mleveni kukuruz. Nasuprot ovome, Angulo i sar. (1996) su pri povećanju prečnika otvora sita čekićara sa 3 na 6 mm dobili znatno lošiji kvalitet peleta. Prema Thomas-u i sar. (1998), krupne čestice stvaraju slabe tačke u strukturi usled čega se pelete lakše lome. Svihus i sar. (2004b) su utvrdili pogoršanje kvaliteta peleta kada je povećana krupnoća pšenice u smeši za brojlere. Ovi rezultati su objašnjeni prisustvom slabih tačaka kao i manjom želatinizacijom skroba pri krupnijem mlevenju pšenice. Amerah i sar. (2007b) nisu registrovali razlike u kvalitetu peleta baziranih na sitnije (prečnik otvora sita čekićara 3 mm) i krupnije mlevenoj pšenici (prečnik otvora sita čekićara 7 mm). Stivens (1987), ispitujući uticaj veličine čestica samlevenog kukuruza na peletiranje nije primetio značajniji uticaj ovog faktora na kapacitet pelet prese niti na stepen otiranja peleta. Kukuruz je mleven do srednjeg prečnika čestica od 1023, 794 i 551 μm i pri tome su dobijeni stepeni otiranja peleta od 10,1%, 11,2% i 9,7%. Ipak, pri peletiranju krupno mlevenog kukuruza

(1023 μm) bila je značajno veća potrošnja energije u poređenju sa kukuruznim mlivom srednje granulacije (794 μm).

2.4.3.6. Hemijski sastav peletiranog materijala

Hemijski sastav peletiranog materijala ima veliki uticaj na kvalitet peleta što je posledica promena pojedinih hemijskih sastojaka do kojih dolazi tokom procesa peletiranja (*Thomas i sar., 1998*). Intenzitet ovih promena zavisi od parametara kondicioniranja (*Moran, 1989*) kao i od parametara samog peletiranja (*Van der Poel, 1994*). Hemijski sastojci mogu biti klasifikovani u sledeće grupe: skrob, proteini, šećeri, vlakna, masti, neorganske materije i voda (*Thomas i sar., 1998*).

Skrob je glavni sastojak žitarica i predstavlja najznačajniji izvor energije u ishrani životinja (*Zimonja i Svihus, 2009*). Tokom termičkih tretmana, u prisustvu vode, dolazi do želatinizacije skroba. To je proces koji uključuje strukturne promene usled kojih dolaze do izražaja vezivna svojstva želatinizovanog skroba (*Svihus i Gullord, 2002*) što poboljšava kvalitet peleta (*Heffner i Pfost, 1973*). Međutim, mehanizam na koji skrob doprinosi vezivnim karakteristikama nije do kraja razjašnjen. Prisustvo vode je preduslov procesa želatinizacije. Pri tome, odnos vode i skroba treba biti 0,3 : 1 (*Lund, 1984*). Brojni autori su isticali da za potpunu želatinizaciju skroba odnos vode i skroba treba biti i do 1,5:1 (*Wootton i Bamunuarachchi, 1979; Eliasson, 1980; Marchant i Blanshard, 1980*). Ovo ukazuje da je tokom peletiranja voda ograničavajući faktor za potpunu želatinizaciju skroba, s obzirom da se vlažnost peletiranog materijala kreće uglavnom do 17-18%. Ipak, da bi delovao kao vezivo, dovoljno je da skrob bude želatinizovan na površini čestica (*Thomas i van der Poel, 1996*). Uz želatinizaciju skroba, denaturacija proteina takođe predstavlja jednu od reakcija koja poboljšava kvalitet peleta (*Maier i sar., 1999*). Naime, proteini u procesu peletiranja, dejstvom toplote i trenja, u prisustvu vode, prolaze kroz proces delimične denaturacije. Usled toga dolaze do izražaja njihova vezivna svojstva što pozitivno utiče na tvrdoću i otiranje peleta (*Wood, 1987; Thomas i sar., 1997*).

Prisustvo prostih šećera (mono i di saharidi) povećava potrošnju energije pelet prese zbog većeg trenja u kanalima matrice. Međutim, šećeri povoljno deluju na kvalitet peleta jer tokom hlađenja dolazi do njihove rekristalizacije i uspostavljanja veza čvrsto-čvrsto (*Friedrich i Robohm, 1982; Thomas i sar., 1998*).

Vlakna (neskrobni polisaharidi) se mogu podeliti na rastvorljiva i na nerastvorljiva u vodi (Frolich, 1990; Lo, 1990). Ova podela može biti korisna sa aspekta objašnjavanja njihovog delovanja na proces peletiranja. Vlakna rastvorljiva u vodi (glukani, arabinoksilani i pektini) povećavaju viskozitet peletiranog materijala. Materijal većeg viskoziteta deluje kao punilac i tako okružuje krupnije čestice i ispunjava pore što rezultuje dobijanjem čvršćih peleta manjeg stepena otiranja (Thomas i sar., 1998) i veće tvrdoće jer je poroznost peleta jedan od glavnih činioca koji određuju tvrdoću (Rumpf, 1958; Ouchiyama i Tanaka, 1985). Vlakna nerastvorljiva u vodi imaju dvojaku ulogu. S jedne strane, doprinose boljem povezivanju čestica tokom peletiranja međusobnim preplitanjem i obmotavanjem (Rumpf, 1958). S druge strane, usled njihove čvrstoće i elastičnosti, mogu stvarati probleme pri padu pritiska, nakon izlaska peleta iz kanala matrice. Tada, usled delovanja elastičnih sila dolazi do narušavanja strukture peleta. Duže zadržavanje materijala u kanalima matrice (deblja matrica, smanjenje protoka) u velikoj meri neutrališe dejstvo elastičnih sila i omogućuje proizvodnju peleta dobrog kvaliteta (Thomas i sar., 1998).

Dodavanje masti u peletiranu smešu smanjuje čvrstoću peleta i povećava stepen otiranja (Stark, 1994; Angulo i sar., 1996; Briggs i sar., 1999). Masti deluju kao lubrikanti između čestica i zida kanala matrice, kao i između samih čestica, uzrokujući manje trenje i time manji pritisak u kanalima matrice. To dovodi do povećanja stepena otiranja krajnjeg proizvoda (Kaliyan i Morey, 2008). Masti takođe, usled svoje hidrofobne prirode, inhibiraju vezivna svojstva drugih komponenti, t.j. skroba, proteina i vlakana, usled njihove hidrofobne prirode (Thomas i sar., 1997). Cavalcanti (2004) je utvrdio da povećanje sadržaja masti iznad 6,5%, u smeši baziranoj na kukuruzu i soji, štetno utiče na kvalitet peleta. S druge strane, dodatak masti smanjuje potrošnju energije pelet prese i povećava kapacitet, takođe usled lubrikativnog efekta (Walter, 1990).

2.4.4. Značaj peletiranja i kvaliteta peleta u ishrani životinja

Peletiranje je veoma značajno u ishrani životinja jer utiče na rast i iskorišćenje hrane. Peletirana hrana je najviše zastupljena u ishrani svinja i živine, pa je i najviše istraživanja rađeno sa ovim životinjama (Fahrenholz, 2012). Brojnim istraživanjima je potvrđeno da primena peletirane umesto praškaste hrane dovodi do boljih proizvodnih karakteristika pri uzgoju svinja. Kao razlozi za to se navodi poboljšanje svarljivosti nutrijenata, manje razbacivanje hrane, poboljšanje mikrobiološkog kvaliteta, eliminisanje antinutritivnih faktora i promena brzine prolaza materijala

kroz digestivni sistem (Lawrence, 1982; Skoch i sar., 1983; Morrow, 1992; Traylor, 1997; Nahm, 2002; Lundblad i sar., 2011; I'Anson i sar. 2012, 2013).

Jensen i Becker (1965) su prilikom zamene praškaste hrane za svinje peletiranom utvrdili povećanje iskorišćenja hrane, ali pri tome nije bilo uticaja na prosečan dnevni prirast. Hanke i sar. (1972) su takođe dobili bolje iskorišćenje prilikom primene peletirane umesto praškaste hrane, ali su dobili i povećan prosečan dnevni prirast. Wondra i sar. (1995) su kao posledicu primene peletirane hrane dobili 7% veće iskorišćenje kao i 5% veći prirast ($p < 0,01$). Vanschoubroeck i sar. (1971) su utvrdili smanjenje unosa hrane za 2% i povećanje prirasta za 7%, a iskorišćenja hrane za 8%, kada je umesto praškaste u ishrani svinja primenjena peletirana hrana. Jedan od razloga za ovakve rezultate je sprečavanje raslojavanja sastojaka smeše, do koga ne dolazi ukoliko je smeša peletirana. Takođe, životinja je sprečena da bira pojedine sastojke smeše usled čega dobija kvalitetniji obrok (Fahrenheit, 2012).

Morrow (1992) zaključuje da su bolji rezultati dobijeni prilikom primene peletirane hrane za svinje pre svega posledica manjeg rasipanja hrane od strane životinja, u poređenju sa primenom praškaste hrane. Ipak, postoje i istraživanja koja ukazuju na poboljšanje svarljivosti hrane kao posledica peletiranja (Graham i sar., 1989). U istraživanju koje je sproveo Stark (1994) utvrđeno je povećanje prirasta i bolje iskorišćenje hrane pri upotrebi peletirane umesto praškaste hrane za svinje. Međutim, povećanje udela prašine u peletama nije negativno uticalo na proizvodne karakteristike. Prema Klausing-u (2011), peletirana hrana obezbeđuje znatno bolji prirast kod svinja zahvaljujući želatinizaciji do koje dolazi u matrici pelet prese. Pritisak i temperatura pri peletiranju obezbeđuju i higijenizaciju hrane. Takođe, svinja će uvek za isto vreme pojesti više peletirane nego praškaste hrane.

Dok se u ishrani svinja često primenjuje hrana u praškastom obliku, smeše za živinu su uglavnom u obliku peleta. Većina istraživanja ukazuje na pozitivno dejstvo primene peletirane hrane na prirast i iskorišćenje hrane kod ovih životinja (Kilburn i Edwards, 2001; Greenwood i sar., 2004; McKinney i Teeter, 2004). Peletiranje hrane za brojlere, pre svega, doprinosi povećanom unosu hrane koji dovodi i do većeg prirasta (Engberg i sar., 2002; Svihus i sar, 2004b). Abdollahi i sar. (2011) su utvrdili povećanje unosa hrane za 14% kada su brojleri hranjeni peletiranom hranom. Peletiranje sprečava ove životinje da rasipaju hranu u potrazi za krupnijim česticama (Jensen, 2000; Abdollahi i sar., 2013). Živina hranjena peletama troši manje energije i vremena na unos hrane i pri tome unosi više hranjivih materija po jedinici energije utrošene na unos hrane (Jones i sar., 1995; Vilarino i sar., 1996). U pogledu uticaja kvaliteta peleta, Greenwood i sar. (2004) su utvrdili

smanjenje iskorišćenja hrane sa povećanjem udela prašine u peletama. *McKinney i Teeter (2004)* su dobili bolji prirast brojlera za 6% pri upotrebi peletirane u odnosu na praškastu hranu. Takođe bolji rezultati u ovom istraživanju su dobijeni i pri smanjenju udela prašine u peletama. Pozitivan uticaj kvaliteta peleta na proizvodne karakteristike brojlera utvrdio je i *Scheideler (1995)*.

2.5. ZNAČAJ GRANULACIONOG SASTAVA HRANE ZA ŽIVOTINJE

Savremeni uzgoj domaćih životinja karakteriše se masovnom, farmskom proizvodnjom. U takvim uslovima ishrana presudno utiče na proizvodnju, kako u pogledu količine i kvaliteta životinjskih proizvoda, tako i sa aspekta ekonomičnosti. Takođe, uzgoj novih rasa i tipova domaćih životinja sa većom produktivnošću nije moguć bez pravilne i kontrolisane ishrane (*Dorđević i sar., 2009*). Poslednjih godina raste interes za veličinu čestica hrane za životinje s obzirom da industrija nastoji pronaći način da se poveća iskorišćenje hranljivih materija i efikasnost proizvodnje (*Amerah i sar., 2008*). Raspodela veličine čestica (granulacija) smeša za ishranu životinja je ponovo postala aktuelna kako u nauci tako i u industriji (*Svihus, 2011*).

Već duže vreme proizvođači širom sveta sve više napuštaju uobičajeno sitno mlevenje u proizvodnji hrane za svinje i živinu. Dugo vremena je sitno mlevenje smatrano ključnim faktorom za postizanje visokog prirasta životinja kao i dobrog kvaliteta peleta, ali danas se sve više uviđa da osetljivost gajenih životinja raste sa genetskim napretkom i da sitno mlevenje može izazvati zdravstvene probleme i smanjenje prirasta, kako kod živine (*Taylor i Jones, 2004*) tako i kod svinja (*Nielsen, 1998; Kampheus, 2007*).

2.5.1. Značaj granulacionog sastava hrane u ishrani živine

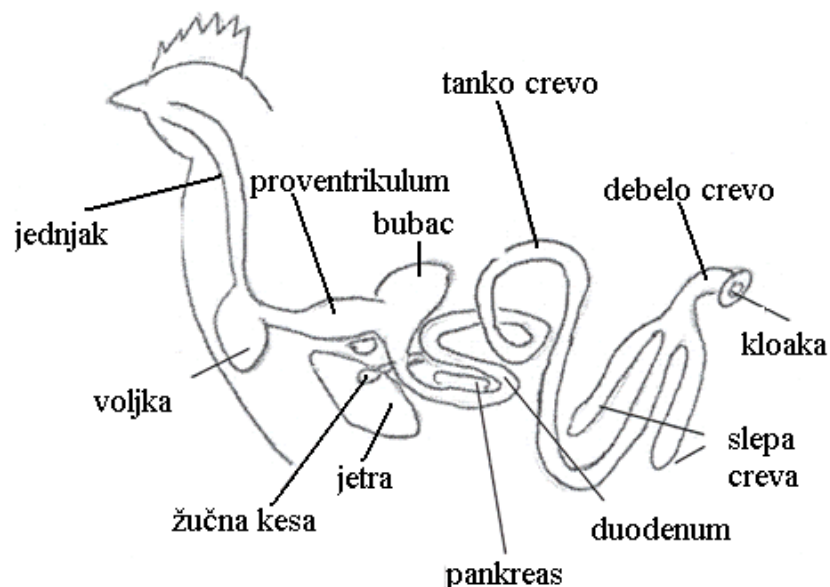
Način ishrane živine prošao je kroz velike promene u poslednjih 50 godina. Nutritivni zahtevi su se dramatično promenili usled genetskih promena životinja, kao i usled novih naučnih spoznaja u oblasti ishrane (*Havenstein i sar., 2003*). Upotreba praškastih smeša, često u kombinaciji sa celovitim (nesamlevenim) žitaricama, bio je uobičajeni način ishrane živine u prvoj polovini XX veka. Međutim, peletiranje i upotreba peletiranih smeša vremenom postaje dominantna. Iako naučna literatura ne preporučuje sitno mlevenje komponenti smeše, pozitivan uticaj sitnog mlevenja na kvalitet peleta, sve veća primena peletirane hrane u ishrani živine, kao i problem raslojavanja

praškastih smeša, doprinose da sitno mlevenje postepeno postane najzastupljeniji način mlevenja komponenti smeše (Svihus, 2011).

Poslednjih godina krupnija granulacija smeše ponovo postaje aktuelna kako zbog uspešne prakse korišćenja celih (nesamlevenih) žitarica u mnogim evropskim zemljama, tako i zbog istraživanja koja ukazuju na pozitivno delovanje krupnijih čestica na probavni sistem i zdravlje živine. Takođe, utvrđeno je da sa genetskim napretkom životinje postaju sve osetljivije, kao i da sitno mlevenje može dovesti do zdravstvenih problema i smanjenja prirasta (von Reichenbach i Dolud, 2010).

2.5.1.1. Mehanizam varenja hrane kod živine

Organi za varenje živine (sl. 13) značajno se razlikuju od organa za varenje drugih monogastričnih životinja. Jedna od specifičnosti je proširenje na kraju jednjaka – voljka, gde se materijal zadržava 3 do 15 časova, što zavisi od strukture hrane (što su čestice usitnjenije, zadržavanje je kraće) i od toga koliko je životinja gladna (kod gladne životinje hrana odmah prolazi kroz voljku i puni želudac). U voljci se material navlaži, omekša i nabubri, i započinje varenje delovanjem enzima pljuvačke (Jovanović i sar. 2000; Dorđević i sar., 2009).



Slika 13 – Šematski prikaz organa za varenje živine (www.daff.qld.gov.au)

Voljka se nastavlja u želudac koji se kod živine sastoji iz dva dela: žlezdanog želudca (proventrikulum) i mišićnog želudca (bubac). Na sluzokoži proventrikuluma nalaze se otvori kroz

koje žlezde luče pepsinogen, hlorovodoničnu kiselinu i sluz. U njemu se hrana zadržava kratko, počinje razlaganje proteina i izdvajanje mineralnih materija iz kompleksnih jedinjenja. Mišićni želudac je znatno veći od žlezdanog, snabdeven je snažnim mišićima, a sluzokoža mu je debela i orožala, sa poprečnim naborima. U njemu, zahvaljujući snažnim kontrakcijama mišića, dolazi do veoma efikasnog usitnjavanja hrane. Na taj način, bubac zamenjuje žvakaći aparat koji pticama nedostaje (*Dorđević i sar., 2009*)

Iz bubca materijal (himus) prelazi u dvanaestopalačno crevo (duodenum) gde se varenje nastavlja pod dejstvom enzima pankreasnog i crevnog soka i žuči. Pankreasni sok sadrži proteolitičke, amilolitičke i lipolitičke enzime koji razlažu veći deo hranjivih materija u ovom delu digestivnog trakta. U daljim delovima tankog creva dovršava se razgradnja hranjivih materija pod dejstvom enzima crevnog soka koji sadrži enzime peptidazu, amilazu i maltazu. Deo himusa ulazi u dva slepa creva gde se materijal razlaže delovanjem prisutne mikroflore (*Dorđević i sar., 2009*).

2.5.1.2. Anatomija i funkcija bubca

S obzirom da ptice nemaju zube, a da je usitnjavanje čestica hrane neophodno, kod ovih životinja je došlo do razvoja specifičnog organa, bubca, prilagođenog za usitnjavanje hrane (*Svihus, 2011; Rodgers i sar, 2012*). Najveći deo bubca čine dva debela bočna mišića i dva tanka mišića u prednjem i zadnjem delu. U odnosu na uzdužnu osu bubca, debeli i tanki mišići su asimetrično raspoređeni i prilikom kontrakcija dovode do usitnjavanja materijala čestica hrane (*Svihus, 2011*).

Ciklus mlevenja započinje kontrakcijom tankih mišića, otvaranjem pilorusa i snažnom peristaltičkom kontrakcijom duodenuma. Pilorus je mali otvor na kraju bubca koji funkcioniše kao sito i ne dozvoljava prolaz suviše krupnim česticama u duodenum. Istovremeno sa kontrakcijom duodenuma, dolazi do kontrakcije debelih mišića bubca usled čega određena količina materijala biva istisnuta u duodenum, a takođe i nova količina uvučena u proventrikulum. Nakon opuštanja debelih mišića bubca dolazi do kontrakcije proventrikuluma i potiskivanja materijala u bubac. Celokupan opisani ciklus kontrakcije odigrava se do četiri puta u minuti i usitnjava materijal zahvaljujući trljanju čestica o zidove bubca, kao i jednih o druge, za vreme kontrakcije debelih mišića, dok tanki mišići transportuju materijal prema zonama usitnjavanja u periodu između dve kontrakcije debelih mišića (*Duke, 1992*).

Iako je proventrikulum zaseban organ koji prethodi bubcu, njegova mala zapremina uzrokuje kratko vreme zadržavanja materijala. Zbog toga, glavina razlaganja hranjivih materija

pod dejstvom pepsinogena i hlorovodonične kiseline, koji se luče u proventrikulumu, odvija se u bubcu. Pri kontrakcijama bubca deo materijala biva vraćen u proventrikulum te dolazi do dodatnog lučenja probavnih sokova u isti materijal. Zbog toga se bubac i proventrikulum mogu smatrati jedinstvenom celinom. Srednje vreme zadržavanja materijala u proventrikulumu i bubcu kreće se od 30 min do 1 sat (*Duke, 1992*).

Krupnije čestice moraju biti usitnjene do određene kritične veličine kako bi mogle proći kroz pilorus i napustiti bubac (*Moore, 1999*). Prema istraživanju koje su sproveli *Fernando i sar. (1987)*, kritična veličina čestica kreće se između 0,5 i 1,5 mm. Podaci *Hetland-a i sar. (2002; 2003)* kao i *Amerah-a i sar. (2008)* ukazuju da je većina čestica koje ulaze u dvanaestopalačno crevo manja od 0,1 mm.

Prema istraživanjima *Amerah-a i sar. (2008; 2009b)*, sa povećanjem udela krupnih čestica u smeši dolazi do značajnog uvećanja zapremine bubca koje može biti i više nego dvostruko. Krupne čestice se selektivno zadržavaju u bubcu (*Hetland i sar., 2003*) dok se vreme zadržavanja sitnih čestica ne menja sa promenom udela krupnih čestica (*Svihus i sar., 2002*). Iako ovo ukazuje da je vreme zadržavanja čestica različitih veličina nejednako, srednje vreme zadržavanja se značajno povećava pod takvim uslovima. Ukoliko je vreme zadržavanja standardne komercijalne smeše, sa malim udelom krupnih čestica, oko jedan sat, srednje vreme zadržavanja smeše sa povećanim udelom krupnih čestica može dostići i do dva sata (*Svihus, 2011*).

Za bubac se takođe smatra da ima važnu ulogu u regulaciji količine unete hrane jer reguliše protok hrane iz voljke (*Chaplin i sar., 1992*). Kod svinja ili čoveka želudac ima ključnu ulogu u regulaciji unosa hrane, a kod živine tu ulogu ima bubac, odnosno sistem bubac/proventrikulum, odakle se šalje signal sitosti (*Svihus, 2011*). Čak i kada je signal sitosti kod savremenih brojlera nadjačan njihovim velikim apetitom, bubac može, ukoliko je dobro razvijen, da spreči prejedanje zahvaljujući svojoj ograničenoj zapremini u kombinaciji sa ograničenim prolaskom hrane iz bubca u duodenum (*Ka i sar., 2009; Cline i sar., 2010*). Na taj način sprečava se prejedanje, koje je nepoželjna pojava u uzgoju brojlera.

2.5.1.3. Uticaj strukture smeše na razvoj i funkcionalnost bubca

Poznato je da se digestivni trakt ptica brzo prilagođava promenama u sastavu hrane. Istraživanja divljih ptica su pokazala da usled velikih varijacija u sastavu hrane tokom godine, dolazi do promena u veličini tankog i slepog creva (*Klasing, 1998*). Bubac naročito brzo reaguje na

promene u sastavu hrane, a pre svega na promene u strukturi smeše (Farner, 1960). Pod strukturom se podrazumeva raspodela veličina čestica smeše kao i oblik u kom se hrana daje životinjama, tj. praškasta ili peletirana.

Čestice smeše se, nakon mlevenja i mešanja, najčešće povezuju u pelete u cilju povećanja unosa hrane kao i poboljšanja tehničkih karakteristika smeše. To predstavlja drugi nivo strukture koji može biti nazvan makrostruktura. Već u prvim delovima probavnog sistema pelete bivaju rastvorene tako da makrostruktura nema uticaja na razvoj bubca niti ima bilo koji drugi efekat izuzev povećanja količine unete hrane (Svihus, 2011). S druge strane, peletiranje dovodi do finije mikrostrukture smeše usled usitnjavanja čestica do kojeg dolazi tokom procesa peletiranja, što je naročito izraženo pri peletiranju smeša sa velikim udelom krupnih čestica (Engberg i sar., 2002; Svihus i sar., 2004b).

Povećanje udela krupnih čestica u smeši prati brzo i vrlo izraženo uvećanje bubca. Tako su Biggs i Parsons (2009) utvrdili izraženo uvećanje bubca već sa 7 dana starosti, kada su cela zrna pšenice uključena u smešu za ishranu jednodnevnih brojlera. Uvećanje je logična posledica veće potrebe za usitnjavanjem hrane, pri čemu dolazi do uvećanja mišića bubca. Prema podacima različitih istraživanja, uvećanje može biti i do 100% (Svihus, 2011). Takođe je uočeno da pri uvođenju strukturnih komponenti u hranu dolazi i do uvećanja kapaciteta bubca, odnosno mase materijala koja u njega može stati. To povećanje je uglavnom mnogo izraženije u odnosu na povećanje dimenzija bubca (Hetland i sar., 2003).

Važno pitanje je i da li bubac koji je slabo razvijen, usled nedostatka strukturnih komponenti u hrani, predstavlja stanje koje može dovesti do slabijih proizvodnih karakteristika živine? Divlji pretci domaćih vrsta živine imali su u ishrani velike količine strukturnih komponenti, kao što su semenke ili vlaknasti materijali (Klasing, 2005). Zbog toga je logičan zaključak da je i domaća živina prilagođena hrani sa velikim sadržajem strukturnih komponenti i da su one neophodne za normalan razvoj i funkciju bubca (Svihus, 2011). O'Dell i sar. (1959) su utvrdili da pri nedostatku strukturnih komponenti ne samo da je bubac slabije razvijen, već i češće dolazi do pojave zapaljenja proventrikuluma, koje se između ostalog karakteriše uvećanjem proventrikuluma i njegovom sklonošću ka pucanju. Jones i Taylor (2001) su utvrdili da pri uključivanju celovitih žitarica u ishranu ređe dolazi do pojave uvećanja proventrikuluma. Sve ovo ukazuje da je za normalan razvoj funkcionalne celine proventrikulum/bubac neophodno prisustvo strukturnih komponenti u obroku (Svihus, 2011).

2.5.1.4. Optimalna struktura smeša za ishranu živine

Mogućnosti savremenih vrsta živine da razgrade strukturne komponente u hrani nisu ispitivane u većoj meri i na pitanje o optimalnoj strukturi smeše, odnosno o optimalnom udelu krupnijih čestica, ne postoji jedinstven odgovor. *Hetland i sar. (2002)* su utvrdili da pri dodavanju do 30% nesamlevenih zrna pšenice ne dolazi do povećanja udela krupnijih čestica koje ulaze u duodenum. Dodavanje 44% zrna pšenice dovelo je do značajnog smanjenja udela čestica manjih od 0,04 mm u duodenumu, ali pri tome nije došlo do smanjenja iskorišćenja hrane. Manji prirast i slabije iskorišćenje hranjivih sastojaka utvrđeno je pri dodatku 60% celih zrna pšenice. Slično smanjenje prirasta dobijeno je u eksperimentu *Biggs-a i Parsons-a (2009)* kada je udeo celih zrna pšenice u smeši povećan sa 35 na 50%. Iz ovoga se može zaključiti da postoji gornja granica udela krupnih čestica u smeši iznad koje ne bi trebalo ići kako se ne bi narušio prirast i iskorišćenje hranjivih sastojaka.

Svihus i sar. (2004b) su ispitivali uticaj veličine čestica smeše na veličinu bubca za 10 različitih smeša i pokazalo se da postoji pozitivna korelacija između sadržaja čestica većih od 1 mm i razvijenosti bubca, pri čemu je najjača korelacija utvrđena za frakciju čestica većih od 2,8 mm. Zaključak da čestice veće od 1 mm podstiču razvoj bubca potvrđuju i istraživanja *Nir-a i sar. (1994a)*, u kojima je utvrđeno povećanje bubca za 26% kada je jedina razlika između kontrolne i eksperimentalne smeše bila ta što je u eksperimentalnoj bilo za 25% više čestica veličine od 1,18 do 1,70 mm. Iz ovoga sledi da bi preporuka mogla biti: najmanje 20% čestica žitarica većih od 1,5 do 2,0 mm ili najmanje 30% čestica većih od 1 mm (*Svihus, 2011*). U istraživanju koje su sproveli *Nir i Ptichi (2001)* je utvrđeno da sa porastom brojlera raste i optimalna vrednost GSP-a smeše (tab. 3).

Tabela 3. Geometrijski srednji prečnik čestica smeše za brojlere različitog uzrasta (*Nir i Ptichi, 2001*)

Starost	Geometrijski srednji prečnik čestica (µm)
1 – 7 dana	900 – 1100
7 – 21 dan	1100 – 1300
nakon 21 dana	1300 – 1500

Drugo pitanje u pogledu strukture hrane je da li je koristiti u praškastom ili peletiranom obliku? Generalni stav je da peletirana hrana povećava prirast i dovodi do većeg unosa hrane (*Calet, 1965; Choi i sar., 1986; Nir i sar., 1995*). Genetska selekcija dovela je do ogromnog napretka u prirastu brojlera, a peletiranje hrane je omogućilo da se genetski potencijal bolje iskoristi. Međutim,

kao posledica prebrzog rasta, dolazilo je do poremećaja u metabolizmu, razvoju kostiju i kardiovaskularnom sistemu (Trevidy, 2005). S druge strane, pokazano je da korišćenje praškaste hrane povećava masu digestivnog sistema brojlera (Choi i sar., 1986) kao i dužinu tankog creva, odnosno jejunuma i ileuma (Nir i sar., 1994b), tako da se hranjive materije iskorišćavaju mnogo bolje. Takođe, i bubac je bolje razvijen usled prisustva krupnijih čestica, koje se tokom peletiranja većim delom usitne. Međutim, brojni su nedostaci primene praškastih smeša u uzgoju brojlera (teža manipulacija smešom, raslojavanje, biranje čestica od strane životinje, prašenje, gubitak mikrokomponenta i dr.).

Može se zaključiti da prednosti peletiranja nadvladavaju prednosti većeg udela krupnih čestica u nepeletiranim smešama te je potrebno pronaći način kako peletirati ili granulirati hranu na neki dugi način, a da pri tome ne dođe do prevelikog usitnjavanja krupnijih čestica.

2.5.1.5. Efekti povećanja udela krupnih čestica u smešama za živinu

Utvrđeno je da je veličina čestica materijala u tankom crevu živine manja ukoliko se u dužem vremenskom intervalu koristi smeša sa većim udelom krupnih čestica u odnosu na korišćenje smeše istog sastava, ali sa manjim udelom krupnih čestica (Hetland i sar., 2002, 2003; Amerah i sar., 2009a). To je posledica razvijenijeg bubca i time efikasnijeg usitnjavanja čestica hrane pri korišćenju smeša krupnije granulacije (Svihus, 2011). Upotrebom elektronskog mikroskopa, Peron i sar. (2007) su uočili sastojke, poput npr. granula skroba, zarobljene u krupnim česticama u tankom crevu. Međutim, kada je bubac dobro razvijen, manji će biti broj krupnijih čestica u tankom crevu, a time i bolje iskorišćenje hranjivih materija.

Dodavanje strukturnih komponenti u smešu za ishranu brojlera dovodi do smanjenja pH vrednosti sadržaja bubca za 0,2 do 1,2 pH jedinica. To se može objasniti većom zapreminom bubca i time dužim zadržavanjem hrane, usled čega se u nju luči veća količina hlorovodonične kiseline (Svihus, 2011). S obzirom da je pH vrednost hrane uglavnom između 5,5 i 6,5, unos veće količine dovešće do povećanja pH vrednosti u bubcu. To je verovatno glavni razlog veće pH vrednosti u bubcu pri korišćenju peletirane hrane, u poređenju sa praškastom, s obzirom da je količina unete peletirane hrane uvek veća (Engberg i sar., 2002; Huang i sar., 2006; Frikha i sar., 2009). Manji udeo krupnih čestica usled usitnjavanja pri peletiranju takođe doprinosi ovom efektu (Svihus i sar., 2004b).

Niža pH vrednost sadržaja bubca doprinosi boljem varenju hrane, a pored toga, i uništavanju patogenih mikroorganizama unetih hranom. Na taj način funkcionalnost bubca posredno utiče na zdravlje životinje (Svihus, 2011). Bakterije roda *Salmonella* predstavljaju jedan od vodećih uzroka alimentarnih toksikoinfekcija ljudi i uglavnom se vezuju za prehrambene proizvode iz živinarstva. Prisustvo krupnijih čestica u dužem vremenskom periodu dovodi do boljeg razvitka bubca brojlera i njegove veće zapremine i kapaciteta, usled čega se hrana duže zadržava i patogeni mikroorganizmi bivaju uništeni zbog niske pH vrednosti (Huang i sar., 2006).

Slično tome, rezultati nekih istraživanja ukazuju i na ublažavanje simptoma kokcidioze brojlera pri povećanju udela krupnijih čestica u hrani (Jacobs, 2011). Kokcidioza je oboljenje koje izazivaju protozoe iz roda *Eimeria* i predstavljaju veliki problem u uzgoju brojlera. Praćeno je smanjenim prirastom i slabijim iskorišćenjem hrane usled čega dolazi do velikih ekonomskih gubitaka (Braunius, 1987). Kokcidioze mogu biti u obliku veoma blagih infekcija, koje gotovo i ne utiču negativno na brojlere, ali mogu se manifestovati i u obliku veoma jakih infekcija koje izazivaju veliku smrtnost (Williams, 1999). Smanjeno obolevanje od ove infekcije uvođenjem većeg udela krupnijih čestica u hrani za brojlere predstavlja veliki potencijal, jer bi se time izbegla ili u velikoj meri smanjila količina primenjenih kokcidiostatika, čije je prisustvo zabranjeno u krajnjim proizvodima.

Već je napomenuto da bubac ima važnu ulogu u regulaciji količine unete hrane i sprečavanje prejedanja. Prejedanje se karakteriše normalnim prirastom mase, unosom hrane koji je veći od prosečnog i metaboličkom energijom manjom od 10,3 MJ/kg. Prejedanje i potom slabo iskoršćavanje sastojaka hrane može biti posledica slabo razvijenog bubca usled malog udela krupnijih čestica u hrani za brojlere (Svihus, 2011). Tako su u istraživanju Peron-a i sar. (2005) brojleri hranjeni smešom sa malim udelom krupnijih čestica, usled čega je bubac bio slabije razvijen. Nakon što su pilići ostavljeni neko vreme da gladuju, ponovo im je data hrana i došlo je do njihovog prejedanja, koje je rezultovalo smanjenom svarljivošću skroba. U istraživanju Svihus-a i sar. (2002) četiri od deset brojlera hranjenih sitno samlevenom pšenicom pokazivali su znakove prejedanja. Dodavanjem celih zrna pšenice brojleri sa simptomima prejedanja su eliminisani.

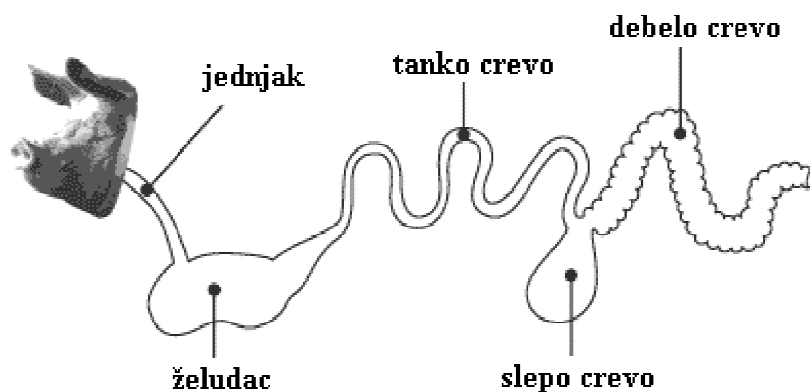
Još jedan pozitivni efekat prisustva većeg udela krupnijih čestica je veća propustljivost hrane za digestivne sokove u želudcu. Naime, hrana u želudcu sastoji se od širokog raspona veličina čestica, pri čemu sitnije čestice popunjavaju prostor između krupnijih. Na taj način sitnije čestice smanjuju propustljivost za digestivne sokove. Povećanje sadržaja krupnijih čestica dovodi do

pojave međuprostora kroz koje prolaze digestivni sokovi što dovodi do boljeg varenja hrane (*Lentle i sar., 2006*).

2.5.2. Značaj granulacionog sastava hrane u ishrani svinja

2.5.2.1. Mehanizam varenja hrane kod svinja

Svinje su svaštojedi sa relativno jednostavnim, jednokomornim želudcem, kod kojih se varenje hrane uglavnom odvija pod dejstvom sopstvenih probavnih enzima. Zato je neophodno obezbediti hranu dobrog kvaliteta u kojoj hranjive materije moraju biti dostupne delovanju enzima. Na slici 14 prikazan je digestivni sistem svinja. U ustima dolazi do usitanjavanja hrane i mešanja sa pljuvačkom. Pljuvačka svinje sadrži enzime koji započinju razgranju ugljenih hidrata. Iz usta, preko jednjaka, hrana dospeva u želudac (*Kersten i sar., 2005*). U delu gde se jednjak spaja sa želudcem (fundus), nema značajnijeg lučenja hlorovodonične kiseline i proteolitičkih enzima i tu bazna pljuvačka stvara uslove za amilolitičku aktivnost enzima pljuvačke. U zidu želudca nalazi se veliki broj žlezda koje proizvode hlorovodoničnu kiselinu i proteolitičke enzime. Kisela sredina dovodi do koagulacije proteina i uništavanja prisutnih mikroorganizama. Hlorovodonična kiselina postepeno zaustavlja dejstvo amilolitičkih enzima, te prevlađuju proteolitički procesi pod delovanjem enzima želudca od kojih je najznačajniji pepsin (*Jovanović, 1984*).



Slika 14 – Šematski prikaz organa za varenje svinja (www.oregonstate.edu)

U tankom crevu se odvija većina razgranje hrane pod dejstvom enzima pankreasnog i crevnog soka kao i sokova žuči. Tu se odvija pretvaranje hranjivih materija u prosta jedinjenja male molekulske mase, rastvorljiva u vodi i sposobna za resorpciju. Kako bi se hranjive materije što

efikasnije resorbovale, zid tankog creva je prekriven crevnim resicama koje povećavaju površinu resorpcije. Himus se iz tankog creva potiskuje u debelo crevo povremeno, u malim porcijama. U debelom crevu dolazi do mikrobiološke razgranje delovanjem bakterija, protozoa i plesni. Ovi mikroorganizmi razlažu hranjive materije koje nisu mogle biti razgrađene u prethodim delovima probavnog sistema, pre svega neskrobne polisaharide. Međutim, mikrobiološka razgradnja kod svinje nije jako izražena. Važna uloga debelog creva je i resorpcija vode kao i mineralnih materija (Jovanović, 1984; Kersten i sar., 2005).

2.5.2.2. Uticaj granulacije na probavni sistem svinja

Oštećenja želudca (lezije, keratinizacija) i ulkus (čir na želudcu) se vrlo često javljaju u intenzivnom uzgoju svinja (Cappai i sar., 2013), pri čemu se učestalost kreće od 32 do 65% (Friendship, 2006). Na farmama, kao posledica krvavih ulkusa, ugine 1 do 2% prasića starosti 3 do 6 meseci (Cappai i sar., 2013). S obzirom da je terapija skupa i zahteva dosta rada, postoje profilaktičke preporuke u cilju smanjenja pojave oštećenja želudca i pojave ulkusa. Iako uzroci pojave ulkusa nisu u potpunosti istraženi, poznato je da je jedan od važnih faktora granulacija hrane (Ayles i sar., 1996; Friendship, 2006). Gornji deo želudca obično je u kontaktu sa sadržajem čiji je pH oko 4 (Kampheus, 1988), dok donji deo može podneti vrednosti pH koje su niže od 2. Tečniji sadržaj u želudcu, koji se javlja pri konzumiranju sitno mlevene ili peletirane hrane (Krakowka i Ellis, 2006), intenzivira mešanje sadržaja u ova dva dela želudca. Vrednost pH u gornjem delu želudca opada i usled toga dolazi do pojave oštećenja sluzokože kao i pojave ulkusa (Grosse Liesner i sar., 2009).

U pogledu uticaja veličine čestica hrane u ishrani svinja, literaturni podaci su protivrečni. Ipak, preovlađujuće mišljenje je da sitnija granulacija hrane poboljšava svarljivost hranjivih materija i prirast, ali povećava i učestalost pojave ulkusa i oštećenja želudca (Ball i sar., 2015). Wondra i sar. (1995) su utvrdili povećanje prirasta za 8% i iskorišćenja energije za 7% pri smanjenju srednjeg prečnika kukuruza sa 600 na 400 μm . Međutim, istovremeno je dobijeno i više lezija i keratinizacija želudca. U istom istraživanju je utvrđeno da u opsegu srednjeg prečnika od 1000 do 400 μm , na svakih 100 μm smanjenja srednjeg prečnika čestica smeše dolazi do povećanja prirasta za 1,3%. I Lahaye i sar. (2008) su konstatovali poboljšanje iskorišćenja hrane kada je pšenica kao osnovna komponenta hrane za svinje mlevena do srednjeg prečnika od 500 μm umesto do 1000 μm . Takođe, u istraživanju Ball-a i sar. (2015), primena sitnije granulacije dovela je do

boljeg iskorišćenja hrane i boljeg prirasta. *Hedde i sar. (1985)* su utvrdili povećanje prosečnog dnevnog prirasta za 8% u završnoj fazi tova svinja kada je krupna smeša (< 20% čestica manjih od 1200 μm) zamenjena sitnom (> 80% čestica manjih od 1200 μm). U istraživanju *Goodband-a i Hines-a (1988)* povećanje prirasta prasića iznosilo je 5% kada je srednji prečnik čestica smeše smanjen sa 768 na 635 μm .

Cappai i sar. (2013) su klasifikovali smeše sa 42,6% ili više čestica manjih od 400 μm kao visoko rizične, jer su lezije želudca utvrđene kod 62% svinja hranjenih takvim smešama. S druge strane, *Morel i Cottam (2007)* nisu dobili značajne razlike u prosečnom dnevnom prirastu i iskorišćenju hrane kada je ječam, kao osnovna komponenta hrane za svinje, mleven sitno, srednje i krupno, korišćenjem mlina čekićara sa prečnikom otvora sita 1, 4 i 7 mm (ostvareni geometrijski srednji prečnici: 400, 700 i 1000 μm).

Cappai i sar. (2013) su klasifikovali najnovija saznanja o uticaju veličine čestica smeše na probavni sistem svinja na sledeći način:

1. Praksa povećavanja udela krupnih čestica u hrani za svinje ne dovodi do smanjene pojave uklusa ukoliko je prisutna i velika količina najsitnijih čestica. Uz to, kod peletirane hrane prisustvo krupnih čestica stvara slabe tačke u strukturi peleta.
2. Raspodelu veličine čestica peletiranih smeša potrebno je određivati nakon peletiranja s obzirom da tokom peletiranja dolazi do intenzivnog usitnjavanja čestica.
3. Eksperimentalni podaci ukazuju da je potrebno fokusirati se na udeo čestica manjih od 400 μm .

2.5.2.3. Uticaj granulacije i peletiranja na eliminaciju patogenih mikroorganizama prisutnih u hrani za svinje

Struktura hrane, tj. veličina čestica, kao i oblik u kom se daje (praškasta ili peletirana), je veoma značajna u pogledu uticaja na zdravlje digestivnog sistema, a time i zdravlja i proizvodnih karakteristika svinja. Unapređenje stanja digestivnog sistema je uvek povezano sa optimalnom pH vrednošću materijala koji se razgrađuje. U pogledu potencijalno prisutnih patogenih bakterija u hrani, pre svega bakterija roda *Salmonella* i *E. coli*, veoma je važno ravnomerno zakišeljavanje materijala u želudcu. Optimalna pH vrednost ovih gram-negativnih bakterija je neutralna do blago alkalna. Vrednost pH u želudcu kreće se između 2 i 4. Pri takvim uslovima dolazi do efikasnog uništavanja prisutnih patogenih bakterija. Takođe, vrednost pH ispod 4 u želudcu važna je za

razgradnju proteina s obzirom da samo u tom opsegu pH dolazi do prelaska pepsinogena u njegovu aktivnu formu, pepsin. Ovaj enzim, zajedno sa tripsinom, koji luči pankreas u duodenum, je ključan za razgradnju proteina. Ali, ukoliko dođe do prevelikog unosa hrane ili loše raspodele želudačnog soka u unetoj hrani usled njenog sporog rastvaranja, pH u pojedinim delovima može imati vrednost veću od 7 i tu patogene bakterije mogu preživeti i preći u naredni segment digestivnog sistema, duodenum. U duodenumu se luči pankreasni sok koji podiže pH vrednost na 7 do 8. Međutim, neujednačene vrednosti pH materijala koji dolazi iz želudca mogu dovesti do neujednačene pH vrednosti u duodenumu, koja u tom slučaju može biti mestimično i preko 8, što predstavlja optimalne uslove za brzo razmnožavanje gram-negativnih bakterija (Klausing, 2010).

Prednost korišćenja peletirane u odnosu na praškastu hranu je što pri povišenim temperaturama i pritiscima pri peletiranju dolazi do dezinfekcije materijala i uništavanja i do 99% prisutne mikroflora. Prednost peletiranja je i odsustvo raslojavanja komponenata smeše tokom transporta i skladištenja. Međutim, u istom vremenskom periodu svinja će konzumirati više peletirane nego praškaste hrane. Takođe, peletiranoj hrani treba više vremena da se rastvori u želudcu, tako da se javlja rizik od neujednačenog zakišeljavanja. Nasuprot tome, hranu u praškastom obliku svinja konzumira u manjim količinama tokom dana, te se bolje navlaži pljuvačkom i brže zakiseli u želudcu. Utvrđeno je da je grubo mlevenoj praškastoj smeši potrebno 2 sata kako bi dostigla vrednost pH od 2, dok je peletiranoj smeši bilo potrebno 4 sata kako bi dostigla istu vrednost pH (Klausing, 2010).

Prema istraživanju koje su sprovedeli Jorgensen i sar. (1999), kada je hrana koja je davana bila krupno mlevena i u praškastom obliku, značajno je smanjena detekcija *Salmonella* kod svinja. Korišćenje krupno mlevene, a potom peletirane smeše, takođe je smanjilo prisustvo *Salmonella*, ali ne u tolikoj meri kao pri korišćenju krupne praškaste hrane što je posledica intenzivnog usitnjavanja čestica tokom peletiranja (tab. 4).

Tabela 4. Uticaj strukture hrane i intenziteta mlevenja na prisustvo *Salmonella* u uzorcima krvi tovnih svinja (Jorgensen i sar., 1999)

Oblik smeše	Ukupno pozitivnih	% pozitivnih	Ukupan broj uzoraka
pelete (sitno mlevenje)	36	12,9	280
pelete (krupno mlevenje)	16	5,6	284
pelete (krupno mlevenje, „hladno“ peletiranje)	24	8,6	279
ekspandat (krupno mlevenje)	13	4,6	285
nepelletirana smeša (krupno mlevenje)	8	2,8	282

2.5.3. Uticaj peletiranja na granulacioni sastav hrane za životinje

U prethodnom tekstu je pokazano da je u ishrani živine potrebno povećati udeo krupnih čestica u odnosu na uobičajenu praksu, a da je u ishrani svinja poželjno umanjiti sadržaj najsitnijih čestica u što većoj meri. Na granulacioni sastav u velikoj meri može se uticati u operaciji mlevenja. Međutim, s obzirom da u procesu peletiranja dolazi do daljeg usitnjavanja čestica, postavlja se pitanje granulacionog sastava smeše nakon peletiranja.

Dok peletiranje, s jedne strane, povezuje čestice u veće aglomerate, istovremeno dolazi i do usitnjavanja čestica koje se povezuju u pelete (sekundarno mlevenje). *Svihus i sar. (2004b)* su određivali granulaciju smeša za brojlere mokrim prosejavanjem, pre i nakon peletiranja. Pri tome je utvrđeno da su krupne čestice gotovo u potpunosti samlevene tokom peletiranja dok je sadržaj najsitnije frakcije čestica značajno povećan. Smeša pre peletiranja imala je 40 do 50% čestica manjih od 200 μm (određeno mokrim prosejavanjem), dok je udeo ovih čestica nakon peletiranja povećan na 50 do 60%. I u istraživanju *Amerah-a i sar (2007b)* tokom peletiranja došlo je do smanjenja udela čestica većih od 1000 μm kao i do povećanja udela čestica manjih od 75 μm . Slično tome, *Abdollahi i sar. (2011)* su nakon peletiranja utvrdili povećanje udela čestica manjih od 75 μm kao i smanjenje udela čestica većih od 2000 μm . *Engberg i sar. (2002)* su pokazali da je kao posledica peletiranja značajno smanjena veličina čestica peletiranih smeša, kao i da je peletiranje uzrokovalo izjednačavanje granulacije smeša različite krupnoće. U ovom istraživanju, usled peletiranja udeo čestica većih od 1000 μm umanjen je sa 26,2 na 14,9% kod smeše krupne granulacije, i sa 20,9 na 13,5% kod smeše sitnije granulacije. Smanjenje veličine čestica tokom peletiranja navode i *Peron i sar. (2005)*. Zaključak *Svihusa i sar. (2004b)* je da su, tokom peletiranja, krupne čestice posebno sklone usitnjavanju usled malog razmaka između valjaka i matrice pelet prese. Time se može objasniti zašto proces peletiranja ima tendenciju izjednačavanja veličine čestica pri peletiranju smeša različite granulacije. Uz to, *Abdollahi i sar. (2011)* su pretpostavili da usled delovanja sile trenja u kanalima matrice dolazi do dodatnog usitnjavanja čestica. U ovom istraživanju je prvi put utvrđeno da povećanje temperature kondicioniranja, povećanjem protoka pare, utiče na granulaciju peletiranih smeša usled povećanja vlažnosti peletiranog materijala. Sadržaj čestica većih od 1000 μm u smešama peletiranim na 20 (hladno peletiranje), 60, 75 i 90 °C, iznosio je 26,5; 35,0; 41,2 i 46,7%. Zaključeno je da je lubrikativno delovanje vode umanjilo sile trenja u kanalima matrice pa je veći udeo krupnih čestica utvrđen u smešama peletiranim na višim temperatura.

Dakle, veliki broj istraživanja ukazuje na intenzivno usitnjavanje čestica tokom peletiranja smeša za ishranu životinja (*Enberg i sar., 2002; Amerah i sar., 2007b; Abdollahi i sar., 2011*). Međutim, u istraživanju *Hetland-a i sar. (2003)* i *Svihus-a i sar. (2004a)* pokazano je da u ekstremnim slučajevima krupnoće čestica pre peletiranja (pšenica, kao cerealna komponenta smeše, peletirana je nesamlevena), pelet presa neće samleti krupne čestice u potpunosti. To ukazuje da ako je želja povećati količinu krupnih čestica u peletiranoj smeši, u kojoj je kukuruz dominantni sastojak (što je u našoj zemlji uglavnom slučaj), kukuruz treba biti mleven krupnije nego što je to uobičajeno u praksi. Upravo zato je jedan od osnovnih ciljeva ove disertacije bio ispitavanje uticaja granulacije materijala koji se usmerava na peletiranje na granulaciju čestica u samim peletama, u sklopu čega se išlo u smeru ukрупnjavanja granulacije kukuruznog mliva. Pri tome je u cilju poboljšanja kvaliteta peleta, koji bi mogao biti narušen pri peletiranju mliva krupnije granulacije, povećavan razmak između valjaka i matrice pelet prese, kao i debljina matrice. Povećanje ova dva parametra dovodi do povećanja pritiska tokom peletiranja i time do boljeg povezivanja čestica. Međutim, povećanje pritiska moglo bi dovesti do značajnog povećanja sekundarnog mlevenja, kao i da povećanja potrošnje energije pelet prese. Zato je u ovom istraživanju variran i sadržaj vode materijala koji se vodi na peletiranje. Povećanje sadržaja vode ima lubrikativno delovanje i smanjuje trenje i pritisak u kanalima matrice pelet prese. To bi moglo dovesti do značajnog smanjenja utroška energije pelet prese, ali i do smanjenja intenziteta usitnjavanja čestica tokom peletiranja.

POGLAVLJE 3

Materijal i metode

Eksperimentalni deo doktorske disertacije urađen je na Naučnom institutu za prehrambene tehnologije u Novom Sadu. Tehnološki postupak peletiranja izveden je u pilot pogonu za proizvodnju hrane za životinje Instituta, a fizičke i hemijske analize sirovine i proizvedenih peleta urađene su u laboratorijama Instituta. Parametri mlevenja i peletiranja varirani su prema odabranom eksperimentalnom dizajnu. Na osnovu dobijenih rezultata formirani su matematički modeli koji opisuju uticaj variranih procesnih parametara na ispitivane odzive. Za prikazivanje rezultata korišćene su vrednosti dobijene neposredno u eksperimentu, kao i vrednosti izračunate iz dobijenih modela, za kombinacije parametara koje nisu predviđene eksperimentalnim dizajnom.

3.1. MATERIJAL

U istraživanju je korišćen kukuruz zuban (*Zea mays indentata*) roda 2011. godine, gajen na teritoriji Vojvodine, koji je dopremljen iz Agrobačka a.d. (Bačka Topola). Ispitivanja u ovom istraživanju nisu rađena sa potpunim smešama za ishranu životinja, niti sa model smešama, već je korišćen samo kukuruz kao najzastupljenija komponenta u smešama za svinje i živinu. To je urađeno jer je osnovni cilj bio ispitati uticaj granulacije materijala (kukuruznog mliva) pre peletiranja na granulaciju nakon peletiranja, kao i na kvalitet peleta i potrošnju energije pelet prese. Ostali sastojci, koji obično ulaze u sastav smeša za ishranu živine i svinja (proteinske sirovine, predsmeše i dr.), nisu umešavani sa kukuruzom pre peletiranja. Na granulaciju navedenih komponenti se u praktičnim uslovima najčešće ne može uticati jer se u pogone za proizvodnju hrane za životinje dopremaju već usitnjene od strane proizvođača i uglavnom su vrlo sitne granulacije.

Usled prisustva navedenih sastojaka, uticaj promene granulacije kukuruznog mliva na proces peletiranja, odnosno na ispitivane odzive, bio bi slabije izražen.

3.2. METODE RADA

3.2.1. Hemijske analize kukuruza

Hemijski sastav korišćenog kukuruza (tab. 5) određen je prema standardnim metodama. Sadržaj vode uzoraka određivan je gravimetrijski po metodi AOAC 950.46, sušenjem do konstantne mase na 103 ± 2 °C u sušnici (AOAC, 2000). Sadržaj sirovih proteina određen je metodom po Kjeldal-u (AOAC, 2000), a sadržaj masti na uređaju za ekstrakciju masti, prema proceduri proizvođača (Soxtec System HT, model 1043 Extraction unit, „Foss Tecator AB“, Švedska) i u skladu sa metodom AOCS Ba 3-38 (AOCS, 2001). Sadržaj sirovih vlakana određen je metodom AOAC 978.10 (AOAC, 2000), a sadržaj sirovog pepela metodom AOAC 942.05 (AOAC, 2000). Sadržaj skroba određen je metodom AOAC 996.11 (AOAC, 2000).

Tabela 5. Hemijski sastav kukuruza upotrebljenog u eksperimentima

Komponenta	Sadržaj (% s.m.)*	Standardna devijacija (% s.m.)
Skrob	75,02	± 2,91
Proteini	9,37	± 0,38
Mast	4,19	± 0,23
Sirova vlakna	2,63	± 0,12
Pepeo	1,27	± 0,06
Voda	11,48	± 0,16

*Rezultati predstavljaju srednju vrednost šest pojedinačnih merenja

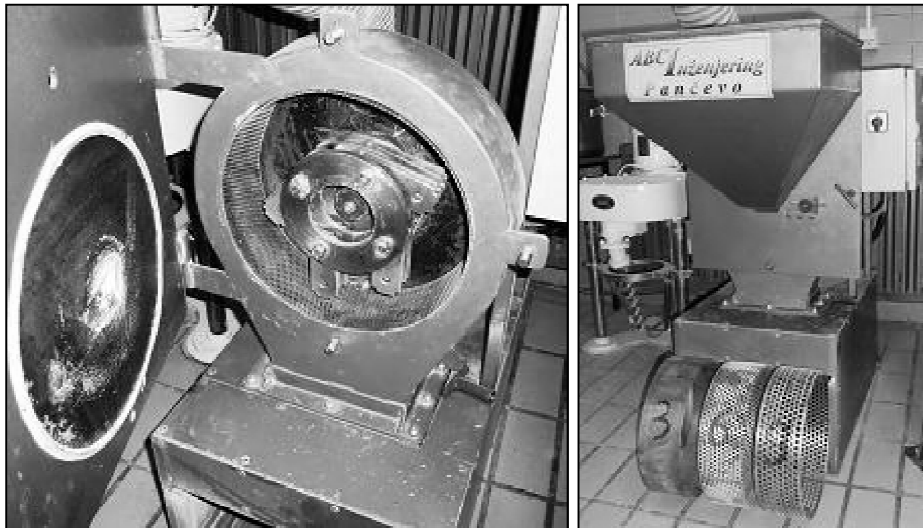
3.2.2. Tehnološki postupak peletiranja

Tehnološki postupak peletiranja sastojao se iz sledećih faza: usitnjavanje, kondicioniranje, peletiranje i hlađenje.

3.2.2.1. Usitnjavanje

Za usitnjavanje kukuruza su korišćena dve vrste mlina: mlin čekićar i mlin sa valjcima, a spram korišćenog mlina istraživanje je podeljeno u dve faze. U prvoj fazi istraživanja za mlevenje je korišćen mlin čekićar (sl. 15), proizvođača „ABC Inženjering“ (Pančevo, Srbija). Primenjeni

mlin čekićar je sa horizontalno postavljenom mlevnom komorom prečnika 31 cm i sa centralnim bočnim ulazom materijala u mlevnu komoru. Na horizontalnoj osovine nalazi se 16 čekića, svaki dužine 10 cm, koji su raspoređeni u 4 reda, pri čemu je rastojanje između čekića određeno razdvojnima prstenovima čija je širina 8 mm. Snaga motora mlina je 2,2 kW, frekvencija 50 Hz i broj obrtaja osovine sa udaračima 2880 u minuti. Mlevna komora je ograničena sitom koje se može menjati, pri čemu su korišćena tri sita sa prečnikom otvora 3, 6 i 9 mm. Na taj način su dobijene tri različite granulacije mliva označene kao MČ-3, MČ-6 i MČ-9, gde skraćenica MČ označava mlin čekićar, a broj predstavlja prečnik otvora korišćenog sita. Protok materijala je, u zavisnosti od primenjenog sita, iznosio: 380 kg/h (MČ-3), 710 kg/h (MČ-6) i 1500 kg/h (MČ-9). Ispod sita nalazila se posuda za prihvatanje mliva.



Slika 15. Mlin čekićar (ABC Inženjering, Pančevo, Srbija)

Za mlevenje u drugoj fazi istraživanja korišćen je mlin sa valjcima ROSKAMP TP650-9 (California pellet mill, SAD) (sl. 16) opremljen sa tri para valjaka prečnika 165 mm i dužine 230 mm. Obimne brzine i broj žlebova po cm obima valjka predstavljeni su u tabeli 6. Odnos obimnih brzina brzohodnog i sporohodnog valjka iznosio je 1,5 : 1 za sva tri para valjaka. Gornji par valjaka pokreće motor snage 5,5 kW, a donja dva para motor snage 11 kW. Iznad valjaka nalazi se koš za prijem materijala sa sistemom za doziranje koji se sastoji od zasuna i mešača. Zasunom se reguliše brzina doziranja materijala, dok mešač obezbeđuje ravnomerno isticanje materijala iz koša koji u se u vidu zavese raspoređuje po celoj dužini valjaka. Geometrijski i kinematički parametri usitnjavanja na mlinu sa valjcima su fiksni i ne mogu se menjati. Operativni parametri su specifično opterećenje valjaka i razmak između valjaka.

Specifično opterećenje je održavano konstantnim tokom rada, pri čemu je protok materijala je iznosio 870 kg/h, a specifično opterećenje valjaka bilo je 5273 kg/cm/h. Razmak između valjaka je podešavan pomoću poluge koja omogućuje radijalno pomeranje brzohodnog valjka. Merenjem rastojanja između centara osovina brzohodnog i sporohodnog valjka, na osnovu poznatog prečnika valjaka, određena je širina razmaka.

Podešavanjem razmaka između valjaka, na ovom mlinu su takođe proizvedene tri granulacije kukuruznog mliva. Pri tome je zazor između gornja dva para valjaka za sve tri granulacije bio 4,4 i 2,6 mm, dok je zazor između donjeg para valjaka podešavan na 1,4; 2,0 i 2,6 mm. Na taj način su dobijene tri granulacije kukuruznog mliva koje su obeležene sledećim oznakama: MV-1,4; MV-2,0 i MV-2,6, gde je MV skraćenica za mlin sa valjcima, a broj predstavlja zazor između donjeg para valjaka.



Slika 16. Mlin sa valjcima (ROSKAMP TP650-9, California pellet mill, SAD)

Tabela 6. Obimne brzine valjaka i broj žlebova po centimetru obima valjaka

		Brzohodni valjak	Sporohodni valjak
Gornji par valjaka	broj obrtaja (min^{-1})	750	500
	broj žlebova po cm obima	2,35	1,77
Srednji par valjaka	broj obrtaja (min^{-1})	850	567
	broj žlebova po cm obima	4,33	5,51
Donji par valjaka	broj obrtaja (min^{-1})	850	567
	broj žlebova po cm obima	5,51	5,51

Tokom mlevenja očitavana je jačina struje na ampermetru mlinova i meren protok materijala, a potom je prema jednačini koju su definisali *Payne i sar. (2010)* izračunata specifična potrošnja energije:

$$E_{sp} = \frac{(I - I_0) * U * \cos\varphi * \sqrt{3}}{Q} \quad (3)$$

gde je:

E_{sp} – specifična potrošnja energije mlina (Wh/kg)

I – jačina struje pri radnom hodu (sa protokom materijala) (A)

I_0 – jačina struje pri praznom hodu (bez protoka materijala) (A)

U – napon (V)

$\cos \varphi$ – faktor snage sistema naizmjenične struje (odnos realne snage koja teče u električno opterećenje prema reaktivnoj snazi)

Q – protok materijala (kg/h)

3.2.2.2. Kondicioniranje

Samleveni kukuruz je pripreman za peletiranje dodatkom vode u dvoosovinskoj lopatastoj mešalici model SLHSJ0.2 (Muyang, Kina) u kojoj se na dve osovine nalazi po 14 lopatica (sl. 17). Voda je dozirana preko šest dizni raspoređenih u dva reda iznad lopatica u središnjem delu mešalice. Masa šarže bila je 30 kg, a vlažnost materijala podešavana je na 14,5%, 16,0% i 17,5%. Željena vlažnost je podešavana merenjem početne vlažnosti samlevenog kukuruza na osnovu čega je proračunavana količina vode koju je potrebno dodati u mešalici radi postizanja željenog sadržaja vode materijala pre peletiranja. Nakon što je uključena mešalica, odmah je puštena i voda i kada je celokupna količina vode bila dozirana, materijal je mešan još 30 s kako bi se dodata voda ravnomerno rasporedila.



Slika 17. Dvoosovinska lopatasta mešalica (unutrašnjost) (model SLHSJ0.2, Muyang, Kina)

3.2.2.3. Peletiranje

Navlaženi materijal je ispuštan u koš ispod mešalice i potom peletiran na pelet presi sa ravnom matricom proizvođača Amandus Kahl (Reinbek, Nemačka), model 14-175 (sl. 18). Pomoću sistema za doziranje, materijal je doziran u pelet presu u kojoj se dva nazubljena valjka obrću i potiskuju materijal u kanale matrice. Prečnik otvora matrice bio je 6 mm. Osovinu sa valjcima obrće motor snage 3 kW brzinom od 136 obrtaja po minutu, a protok materijala je iznosio 20 kg/h. Nakon izlaska iz matrice, formirane pelete su odsecane pomoću rotirajućih noževa sa donje strane matrice. Rastojanje noža i matrice podešeno je na 15 mm. Temperatura matrice merena je pomoću otpornog termometra.

Specifična potrošnja energije pelet prese određivana je prema sledećoj jednačini:

$$E_{sp} = \frac{E - E_0}{Q} \quad (4)$$

gde je:

E_{sp} – specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)

E – potrošnja energije pelet prese u radnom hodu (sa protokom materijala) (W)

E_0 – potrošnja energije pelet prese pri praznom hodu (bez protoka materijala) (W)

Q – protok materijala (kg/h)



Slika 18. Pelet presa sa ravnom matricom (Amandus Kahl, model 14-175, Reinbek, Nemačka),

Kao što je navedeno, istraživanje u okviru ove disertacije podeljeno je na 2 faze. U prvoj fazi variran je razmak (zazor) valjaka i matrice pelet prese (0,30; 1,15 i 2,00 mm), dok je debljina

matrice bila konstantna i iznosila je 24 mm. Najmanja vrednost razmaka valjaka i matrice podešena je tako da valjci budu što bliže matrici, ali da je ne dodiruju kako je ne bi oštetili. Najveća vrednost zazora je određena preliminarnim eksperimentima u kojima je utvrđeno da pri vrednostima većim od 2 mm dolazi do blokiranja pelet prese. U drugoj fazi varirana je debljina matrice (24, 30 i 36 mm) dok je zazor bio konstantan i iznosio je 0,30 mm.

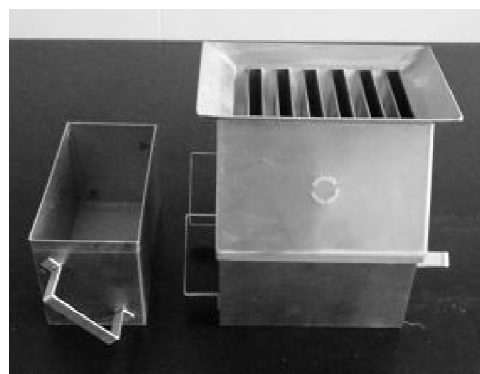
3.2.2.4. Hlađenje

Pelete su hlađene u vibro sušnici/hladnjaku model FB 500x200, proizvođača Amandus Kahl (Reinbek, Nemačka) koja je opremljena sa dva vibromotora snage po 0,3 kW i dva ventilatora snage 11 kW. Pelete su hlađene 10 minuta u blago fluidizovanom sloju vazduhom sobne temperature (20-23 °C).

3.2.3. Fizičko-hemijske analize

3.2.3.1. Granulometrijska analiza usitnjenog kukuruza

Raspodela veličine čestica (granulacioni sastav) kukuruza usitnjenog na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima određena je analizom sejanja po metodi ASAE standard S319.3 (ASAE, 2003). Oko 20 kg prosečnog uzorka kukuruza je samleveno i metodom četvrtanja svedeno na masu od oko 1 kg. Ova masa je pomoću laboratorijskog razdeljivača uzorka Endecotts (Velika Britanija) (sl. 19) svedena na oko 100 g neophodnih za prosejavanje. Analiza sejanja urađena je pomoću laboratorijskog sita Endecotts minor (London, Velika Britanija) (sl. 20), pri čemu amplituda vibracije iznosila 1,2 mm, a brzina vibracije je bila 3000 min⁻¹. Korišćen je slog žičanih sita sa veličinom otvora sejnih tkiva od 5600, 4000, 3150, 2500, 2000, 1600, 1000, 630, 250 i 125 μm. Sejna površina svakog sejnog rama iznosila je 314 cm² dok je veličina otvora sejnih tkiva odabrana u skladu sa očekivanim intervalom veličine čestica. Laboratorijsko sito je



Slika 19. Laboratorijski razdeljivač uzorka (Endecotts, London, Velika Britanija)

opremljeno tajmerom pri čemu je vreme prosejavanja podešeno na 10 min. Prosejavanje svakog uzorka je rađeno u tri ponavljanja.

Pre prosejavanja na laboratorijskom situ, uzorak je prosejan na vazдушnom situ (Alpine, Augsburg, Nemačka) pri čemu je korišćena najmanja veličina otvora sejnog tkiva (125 μm). Kod ovog uređaja, struja vazduha stvara podpritisak sa donje strane sita i tako povlači čestice manje od veličine otvora sita. Na taj način dolazi do efikasnog izdvajanja najsitnijih čestica, koje su najmanje podložne gravitacionoj sili, i koje se pri klasičnom prosejavanju lepe za sejna tkiva umanjujući tačnost granulometrijske analize.

Prelaz na situ sa veličinom otvora sejnog tkiva od 125 μm je nakon vazdušnog prosejavanja, prosejan na slogu sita, kao što je već objašnjeno. Potom je izmerena masa materijala na svakom situ i na dnu, izražena u procentima u odnosu na ukupnu masu i tako dobijena raspodela veličine čestica. Geometrijski srednji prečnik (GSP) i geometrijska standardna devijacija (GSD) izračunati su prema sledećim jednačinama (*Pfost i Headley, 1976*):

$$GSP (\mu\text{m}) = \log^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i * \log d'_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (5)$$

$$d'_i (\mu\text{m}) = \sqrt{d_i * d_{i+1}} \quad (6)$$

$$GSD (\mu\text{m}) = \log^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\log d'_i - \log GSP)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (7)$$

gde je:

d_i – prečnik otvora i-tog sita

d'_i – geometrijski srednji prečnik čestica na i-tom situ

W_i – masa materijala na i-tom situ



Slika 20. Sito tresilica (Endecotts minor, London, Velika Britanija)

Iz vrednosti GSP-a i GSD-je može se izračunati broj čestica po gramu kao i specifična površina čestica (SP) (Pfof i Headley, 1976):

$$\text{Broj čestica po } g = \frac{1}{\rho * \beta_v} * \exp(4,5 * \ln^2 GSD - 3 * \ln GSP) \quad (8)$$

$$SP \left(\frac{cm^2}{g} \right) = \frac{\beta_s}{\rho * \beta_v} * \exp(0,5 * \ln^2 GSD - \ln GSP) \quad (9)$$

gde je:

β_v – faktor oblika za računanje površine čestica

β_s – faktor oblika za računanje zapremine čestica

ρ – gustina čestica (g/cm^3)

Za faktore oblika u ovim jednačinama, prema Pfof-u i Headley-ju (1976) uzete su vrednosti koje važe za kocku ($\beta_s=6$ i $\beta_v=1$), dok je za gustinu uzeta vrednost od $1,32 g/cm^3$.

3.2.3.2. Granulometrijska analiza peletiranog kukuruza

Kako bi se odredila raspodela veličine čestica nakon peletiranja (u samim peletama) primenjena je metoda mokrog prosejavanja po postupku razvijenom od strane Fortek Instituta, Norveški univerzitet prirodnih nauka, Norveška (Miladinović, 2009). Uzorak peleta je četvrtanjem sveden na masu od oko 1 kg i određena mu je vlažnost sušenjem do konstantne mase u tri ponavaljanja (AOAC, 2000). Uzorak je potom sveden na masu od približno 80 g pomoću razdeljivača uzorka. Pelete su prosejane na situ sa veličinom otvora sejnog tkiva od 4,8 mm (0,8 x prečnik peleta) kako bi se odvojile od prašine i sitnih komadića. Uzorak peleta je potom 2 sata potopljen u 500 ml vode na sobnoj temperaturi, uz jedno mešanje nakon prvog sata. Na taj način došlo je do raspadanja peleta i njihovog razdvajanja na pojedinačne čestice.

Za prosejavanje je korišćeno laboratorijsko sito (sito tresilica) sa dodatkom za mokro prosejavanje Retsch AS 200 control (Haan, Nemačka) (sl. 21), pri čemu je amplituda vibracije podešena na 1,2 mm. Preliminarnim ispitivanjima je utvrđeno da u peletama nema čestica većih od 4000 μm kao i da pri korišćenju sita čiji su otvori sejnih tkiva manji od 125 μm nije moguće izvesti mokro prosejavanje usled začepijavanja sita. Takođe, čišćenje sita sa sejnim tkivima čiji su otvori manji od 125 μm bilo je vrlo teško i lako je dolazilo do njihovog oštećivanja jer je za čišćenje korišćen vazduh pod pritiskom. Zato su za mokro prosejavanje korišćena sita sa sledećom

veličinom otvora sejnih tkiva: 2500, 2000, 1600, 1000, 630, 250 i 125 μm . Na donja dva sejna rama su postavljene gumene zaptivke kako bi sprečile curenje vode. Uzorak je iz čaše kvantitativno prenesen na gornji sejni ram na koji je zatim stavljen poklopac. U sredini poklopca nalazi se dizna za ravnomerno rasprskavanje vode po površini gornjeg sejnog rama, dok se na dnu nalazi odvod za vodu na kome je pričvršćeno odvodno crevo. Vreme prosejavanja je podešeno na 3 min, a zatim je puštena voda i uključena tresilica. Nakon isteka 3 min, odvodno crevo je podignuto i, kada su donja tri sejna rama napunjena vodom, dotok vode je zatvoren. Potom je vreme podešeno na 1 min i tresilica uključena. Odvodno crevo je zatim spušteno, čime je omogućeno oticanje vode, vreme prosejavanja podešeno na 3 min, uključena tresilica i pušten dotok vode. Nakon toga, odvodno crevo je ponovo podignuto i tresilica puštena da radi 1 min sa donja tri sejna rama ispunjena vodom. Na kraju je još jednom ponovljeno prosejavanje u trajanju od 3 min sa protokom vode kroz sejne ramove.

Sita su potom stavljena u vakuum sušnicu proizvođača Binder (Tuttlingen, Nemačka), model VD 115. Sušenje je izvedeno na temperaturi od 104°C i pritisku od 7 mbar. Vreme sušenja je bilo 5 h jer je preliminarnim merenjima utvrđeno da je to vreme potrebno za sušenje do konstantne mase u ovim uslovima temperature i pritiska. Nakon sušenja, izmerena je masa sita sa materijalom. Prazna sita su takođe ostavljena 5 h u sušnici pod istim uslovima kako bi se odredila masa praznih zagrejanih sita. Iz razlike mase sita sa materijalom i praznih sita, određena je masa materijala na svakom situ, a iz razlike početne mase uzorka i ukupne mase zaostale na sitima, izračunata je masa materijala koja je prošla kroz sito sa najmanjim otvorima (125 μm), t.j. masa najsitnije frakcije.



Slika 21. Sito tresilica sa dodatkom za mokro prosejavanje (Retsch AS 200 control, Haan, Nemačka)

3.2.3.3. Udeo prašine u peletama

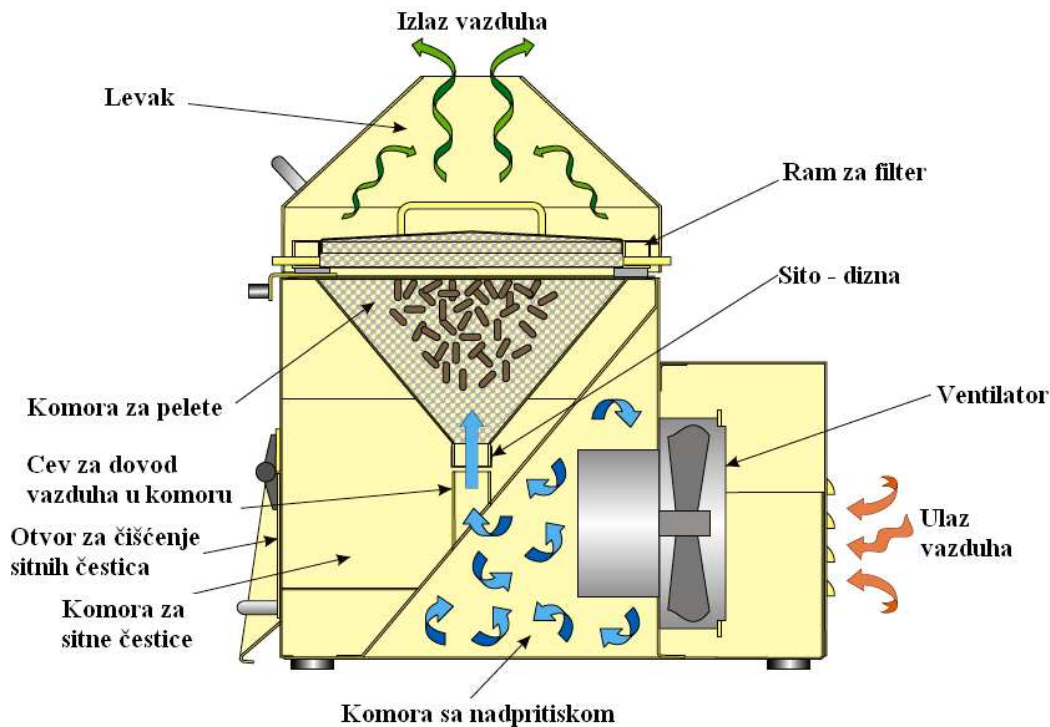
Pelete su neposredno nakon izlaska iz kanala matrice (tzv. tople pelete) prosejane kako bi se utvrdio udeo prašine. Pri tome je oko 100 g peleta prosejano 20 s na situ prečnika otvora sejnog tkiva od 4,8 mm (0,8 x prečnik otvora matrice). Odnos razlika mase peleta pre i nakon prosejavanja i početne mase peleta predstavljao je udeo prašine i izražen je u procentima.

3.2.3.4. Tvrdoća peleta

Tvrdoća peleta određivana je dijametralnom kompresijom na analizatoru teksture proizvođača Stabile Micro Systems Ltd, model TA.HDPlus (Godalming, Velika Britanija), prema metodi opisanoj od *Svihus-a i sar. (2004)*. Iz svakog uzorka uzeto je 15 peleta dužine 14 ± 1 mm. Dužina peleta merena je kljunastim merilom. Pojedinačna peleta postavljena je horizontalno na ravnu podlogu uređaja i potom komprimovana cilindričnom sondom od nerđajućeg čelika prečnika 45 mm, pri opterećenju od 50 kg, brzini kretanja sonde 0,16 mm/s i sili aktiviranja 50 g. Tvrdoća predstavlja silu pri kojoj dolazi do prvog loma pelete, a koja predstavlja maksimum na dobijenoj krivoj zavisnosti sile od vremena. Tvrdoća uzorka izražena je kao srednja vrednost 15 merenja i izražena u kilogramima.

3.2.3.5. Step en otiranja peleta

Step en otiranja određen je korišćenjem Holmen pelet testera (New Holmen Pellet Tester, NHP 100, TekPro Ltd, Norfolk, Velika Britanija) (sl. 22), primenom metode opisane kod *Abdollahi-ja i sar. (2011)*. Oko 100 g reprezentativnog uzorka peleta, odvojenih od sitnih čestica korišćenjem sita sa prečnikom otvora sejnog tkiva 4,8 mm (0,8 x prečnik peleta), sipano je u perforiranu komoru za pelete. Nakon pokretanja uređaja, snažna struja vazduha dovodi do intenzivnog cirkulisanja peleta u komori, pri čemu se one sudaraju međusobno i udaraju o zidove komore. Usled toga dolazi do njihovog krunjenja (otiranja) i lomljenja, pri čemu nastaju sitne čestice i prašina koje propadaju kroz otvore na komori. Vreme tretmana je podešeno na 30 s, nakon čega su pelete izvađene iz komore i dodatno prosejane na situ prečnika otvora sejnog tkiva 4,8 mm. Potom je izmerena masa peleta preostalih na situ, pri čemu step en otiranja predstavlja udeo prašine nastao pri ovakvom tretmanu peleta, izražen u procentima.



Slika 22. Princip rada Holmen pelet testera (NHP 100, TekPro Ltd, Norfolk, Velika Britanija)

3.2.3.6. Nasipna masa peleta

Nasipna masa peleta određena je pomoću aparature za određivanje nasipne mase, proizvođača Tonindustrie (West und Goslar, Nemačka). Određivanje nasipne mase rađeno je u pet ponavljanja.

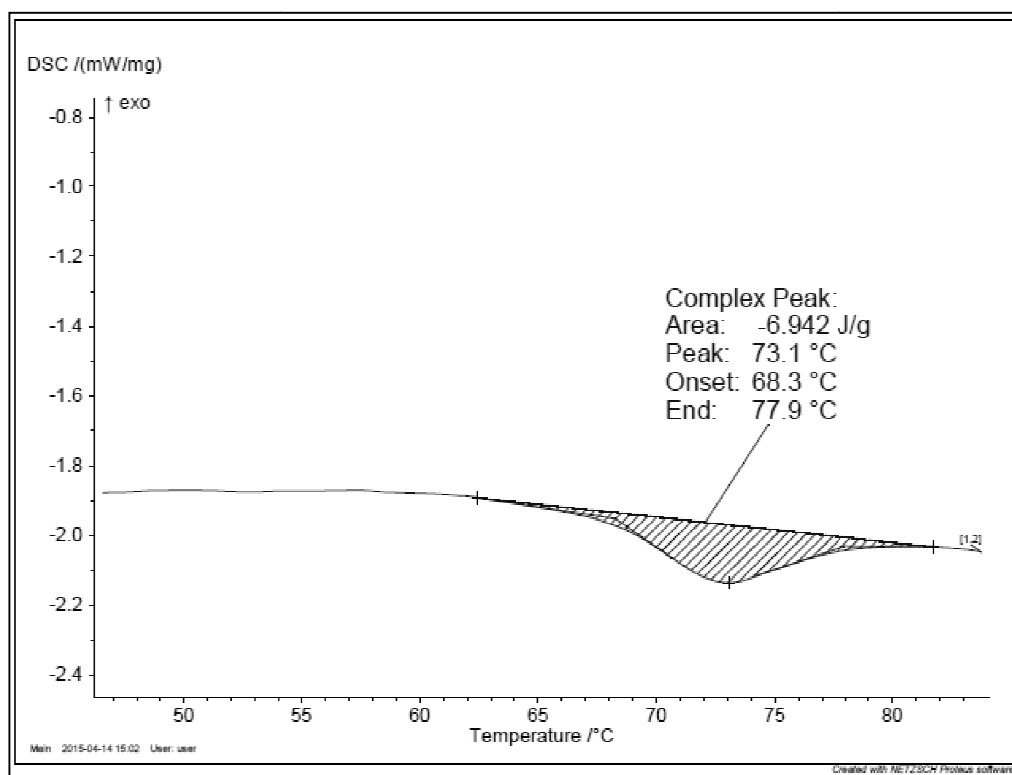
3.2.3.7. Želatinizacija skroba

Stepen želatinizacije skroba određen je metodom diferencijalne skenirajuće kalorimetrije pri čemu je korišćen uređaj proizvođača Netzsch-Geratebau GmbH (Selb, Nemačka), model DSC 204 F1 Phoenix. Ova metoda se zasniva na merenju toplotnog efekta (protoka toplote) koji se javlja pri zagrevanju (ili hlađenju) ispitivanog uzorka i referentnog uzorka, zadržavajući istu brzinu, odnosno kada su izloženi istom temperaturnom režimu. Uzorak početnog materijala kao i peleta je samleven i prosejan na situ sa prečnikom otvora sejnog tkiva od 500 μm . Prelaz na situ je ponovo mleven sve dok sve čestice nisu bile dovoljno sitne da mogu proći kroz otvore pomenutog sita. Približno 4 mg uzorka je pomešano sa 3,3 dela vode (Krueger i sar., 1987), hermetički zatvoreno u posudicu za

merenje i ostavljeno dva sata kako bi se skrob u potpunosti hidratirao. Dobijena suspenzija je potom zagrevana od 20 do 100°C, uz brzinu porasta temperature od 10°C/min. Kao referentni uzorak upotrebljena je prazna posudica za merenje. Na slici 23 predstavljen je primer dobijenog termograma. 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:

$$\text{Stepen želatinizacije (\%)} = \frac{h_0 - h}{h_0} * 100 \quad (10)$$

U ovoj jednačini h_0 (J/kg) je entalpija netretiranog uzorka dok je h (J/kg) entalpija peletiranog uzorka.



Slika 23. Primer dobijenog DSC termograma

3.3. EKSPERIMENTALNI PLAN I STATISTIČKA OBRADA PODATAKA

U okviru istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji ispitivan je uticaj promene odabranih tehnoloških parametara mlevenja i peletiranja na granulaciju čestica od kojih su pelete sačinjene. Cilj je bio da se nađe kombinacija parametara koja doprinosi očuvanju što veće količine krupnih čestica, što je značajno u ishrani živine; odnosno da se utvrdi kombinaciju parametara koja će u što većoj meri uvećati sadržaj čestica srednje veličine i umanjiti udeo najsitnijih čestica, što je značajno u ishrani svinja. Pri tome je određivan i kvalitet peleta, koji ne sme biti značajnije narušen, kao i potrošnja energije pelet prese za koju je poželjno da je što niža.

3.3.1. Metoda planiranja eksperimenta – Box-Behnken

Istraživanje je podeljeno u dve faze. U prvoj fazi kukuruz je usitnjavan mlinom čekićarom, koji je najčešće korišćeni uređaj za usitnjavanje u pogonima za proizvodnju hrane za životinje. Primenjeno je sito sa prečnikom otvora 3 mm (MČ-3), a potom se išlo u smeru daljeg ukрупnjavanja granulacije, t.j. korišćena su sita sa prečnikom otvora 6 mm (MČ-6) i 9 mm (MČ-9). S obzirom da je dominantno mišljenje da krupnije mlevenje narušava kvalitet peleta, drugi varirani parametar bio je razmak između valjaka i matrice pelet prese. Pretpostavka je bila da će povećanje zazora, koje dovodi do povećanja pritiska u kanalima matrice (*Thomas i sar., 1997*), poboljšati kvalitet peleta narušen krupnijim mlevenjem kukuruza. Odabran je minimalan zazor (najmanji koji je bilo moguće podesiti, a da pri tome valjci ne dodiruju matricu), koji je iznosio 0,30 mm, kao i dva veća zazora (1,15 i 2,00 mm). Treći varirani faktor bio je sadržaj vode materijala, s obzirom da voda doprinosi boljem povezivanju čestica (*Rumpf, 1958; Friedrich, 1977*), usled čega bi kvalitet peleta dobijenih peletiranjem krupnijeg mliva bio bolji. S druge strane, sa povećanjem sadržaja vode, smanjuju se sile trenja u kanalima matrice, što doprinosi smanjenju pritiska i očuvanju većeg broja krupnih čestica kao i smanjenju sadržaja najsitnijih čestica (*Abdollahi i sar., 2011*).

Dakle, u prvom delu eksperimenta varirana su tri parametra na tri nivoa i to granulacija čestica mliva (A), zazor valjci-matrica (B) i sadržaj vode materijala (C) pri čemu je primenjen Box-Behnken eksperimentalni dizajn (*Montgomery, 2001*) (tab. 7). Ovaj dizajn predviđa 13, od mogućih 27 kombinacija upravljivih parametara, što u velikoj meri olakšava istraživanje smanjujući broj eksperimenata. Pored toga, Box-Behnken dizajn podrazumeva ponavljanje eksperimenta u centralnoj tački, u kojoj su upravljivi parametri u svojim centralnim vrednostima, tri puta.

Tabela 7. Kodirane i stvarne vrednosti kombinacija upravljivih parametara definisanih prema Box-Behnken dizajnu u prvoj fazi istraživanja

Broj eksperimenta	Faktori					
	Nivo parametara u kodiranim vrednostima			Nivo parametara u stvarnim vrednostima		
	A	B	C	A: prečnik ovora sita čekićara (mm)	B: zazor valjaci-matrica (mm)	C: sadržaj vode materijala (%)
1	-1	1	0	3	2,00	16,0
2	0	-1	-1	6	0,30	14,5
3	0	0	0	6	1,15	16,0
4	0	0	0	6	1,15	16,0
5	0	1	1	6	2,00	17,5
6	1	0	-1	9	1,15	14,5
7	1	0	1	9	1,15	17,5
8	0	1	-1	6	2,00	14,5
9	-1	-1	0	3	0,30	16,0
10	-1	0	-1	3	1,15	14,5
11	0	0	0	6	1,15	16,0
12	-1	0	1	3	1,15	17,5
13	1	-1	0	9	0,30	16,0
14	1	1	0	9	2,00	16,0
15	0	-1	1	6	0,30	17,5

U drugoj fazi kukuruz je mleven na mlinu sa valjcima i takođe su proizvedene tri granulacije mliva. Pri tome se išlo u smeru daljeg ukрупnjavanja čestica u odnosu na mlin čekićar. Kao pokazatelj intenziteta mlevenja na različitim uređajima, uzeta je vrednost GSP-a mliva (*Svihus-a i sar., 2004b*). Razmak između valjaka podešavan je tako da mlivo najsitnije granulacije (MV-1,4) ima približno isti GSP (oko 1100 μm) kao mlivo MČ-6, dobijeno na mlinu čekićaru. Isto tako, mlivo MV-2,0 je imalo sličan GSP sa mlivom MČ-9 (oko 1500 μm). Smatrano je da je za mliva MČ-6 i MV-1,4 i mliva MČ-9 i MV-2,0 primenjen približno isti intenzitet mlevenja korišćenjem različitih uređaja. Ova mliva sa približno istim GSP-om, imala su različitu širinu raspodele veličine čestica, s obzirom da se na mlinu čekićaru dobija šira raspodela, sa većim sadržajem najkrupnijih i najsitnijih čestica, u poređenju sa mlinom sa valjcima. Na taj način je ispitan uticaj različite raspodele veličine čestica, pri istom GSP-u, na operaciju peletiranja u pogledu granulacije čestica nakon peletiranja, kvaliteta peleta kao i utroška energije u procesu. Treće mlivo dobijeno na mlinu sa valjcima imalo je najkrupniju granulaciju (MV-2,6) i predstavlja ekstremno krupnu granulaciju sa preko 75% čestica većih od 2000 μm .

I u drugoj fazi istraživanja, menjana su tri parametra na tri nivoa, pri čemu je pored granulacije čestica, varirana debljina matrice i, kao i u prvoj fazi, sadržaj vode materijala. Naime, sa krupnijim mlevenjem na mlinu sa valjcima očekivalo se pogoršanje kvaliteta peleta. Povećanje debljine matrice, odnosno povećanje odnosa debljine i prečnika otvora matrice (L:D odnos), utiče na povećanje sile trenja i pritisak u kanalima matrice pa se očekivalo da će ovo povećanje poboljšati kvalitet peleta dobijenih pri krupnijem mlevenju. Istovremeno se želelo ispitati da li, i u kojoj meri, veći pritisci do kojih dolazi pri povećanju debljine matrice, povećavaju usitnjavanje čestica tokom peletiranja. Najmanja primenjena debljina matrice odgovarala je matrici koja je korišćena u prvoj fazi istraživanja (24 mm, L:D odnos 1:4) dok su druge dve matrice imale veću debljinu (30 i 36 mm, L:D odnos: 1:5 i 1:6). Pri tome je zazor u drugoj fazi istraživanja iznosio 0,30 mm. S obzirom da se išlo u pravcu ukрупnjavanja granulacije, cilj je bio poboljšati kvalitet peleta primenom debljih matrica, jer se očekivalo da će krupnija granulacija, kao i uža raspodela veličine čestica koja se dobija na mlinu sa valjcima, negativno uticati na kvalitet peleta. U drugoj fazi je ponovo menjan sadržaj vode materijala s obzirom da u prvoj fazi nije bilo značajnog efekta ovog parametra, što nije bilo u skladu sa očekivanjima i pretpostavljeno je da je to posledica snažnijeg uticaja druga dva faktora. Takođe je primenjen je Box-Behnken eksperimentalni dizajn u kojem su tri upravljiva parametra, granulacija čestica mliva (A), debljina matrice pelet prese (B) i sadržaj vode materijala (C), menjana na tri nivoa (tab. 8).

Tokom planiranja eksperimenta u obe faze, nakon što su izabrani parametri čiji će se uticaj ispitivati, bilo je neophodno utvrditi raspon vrednosti u kom će oni biti varirani. Raspon granulacije u prvoj fazi istraživanja izabran je tako što je za najmanju vrednost primenjeno sito prečnika otvora 3 mm koje približno daje granulaciju čestica kakva se uobičajeno koristi kod smeša za ishranu živine i svinja (*Svihus i sar., 2004b*). S obzirom da je u ovom istraživanju želja bila da se ide u smeru ukрупnjavanja granulacije, ova vrednost prečnika otvora sita uzeta je za minimalnu, dok je za maksimalnu vrednost granulacije čestica primenjeno sito sa najvećom veličinom otvora sa kojim se raspolagalo (9 mm). U drugoj fazi istraživanja, granulacije mliva na mlinu sa valjcima, podešavane su u odnosu na postignute granulacije mliva na mlinu čekićaru u prvoj fazi, kako je već opisano.

Minimalne i maksimalne vrednosti ostalih parametara određene su preliminarnim eksperimentima, pri čemu je želja bila da njihov raspon bude što veći kako bi se što bolje ispitao njihov uticaj na ispitivane odzive. Tako je za minimalnu vrednost razmaka valjaka i matrice pelet prese uzeta najmanja vrednost koja se mogla podesiti, a da pri tome valjci ne dodiruju matricu kako ne bi došlo do njenog oštećenja. Za maksimalnu vrednost razmaka valjaka i matrice uzeta je

vrednost pri kojoj je još uvek moguće proizvesti pelete, a iznad koje dolazi do blokiranja pelet prese. Pri sadržaju vode ispod odabrane minimalne i iznad odabrane maksimalne vrednosti, dolazilo je do blokiranja pelet prese. Na isti način su izabrane vrednosti debljine matrice jer pri korišćenju matrice čija je debljina manja od 24 mm, pri određenim kombinacijama parametara peletiranja, ne dolazi do formiranja peleta, dok pri korišćenju matrice deblje od 36 mm, dolazi do blokiranja pelet prese pri određenim parametrima peletiranja.

Tabela 8. Kodirane i stvarne vrednosti kombinacija upravljivih parametara definisanih prema Box-Behnken dizajnu u drugoj fazi istraživanja

Broj eksperimenta	Upravljivi parametri procesa peletiranja					
	Nivo parametara u kodiranim vrednostima			Nivo parametara u stvarnim vrednostima		
	A	B	C	A: razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B: debljina matrice (mm)	C: sadržaj vode materijala (%)
1	1	0	1	2,6	30	17,5
2	0	-1	-1	2,0	24	14,5
3	1	1	0	2,6	36	16,0
4	1	-1	0	2,6	24	16,0
5	-1	-1	0	1,4	24	16,0
6	-1	1	0	1,4	36	16,0
7	-1	0	1	1,4	30	17,5
8	0	0	0	2,0	30	16,0
9	0	-1	1	2,0	24	17,5
10	0	0	0	2,0	30	16,0
11	1	0	-1	2,6	30	14,5
12	0	0	0	2,0	30	16,0
13	-1	0	-1	1,4	30	14,5
14	0	1	1	2,0	36	17,5
15	0	1	-1	2,0	36	14,5

3.3.2. Rezidualna analiza i optimizacija

Kao što je objašnjeno, u operaciji peletiranja je primenjen najširi mogući raspon upravljivih parametara. Iz tog razloga odabran je Box-Behnken eksperimentalni dizajn s obzirom da je bitna osobina ovog dizajna sferičnost, t.j. da ne sadrži kombinacije parametara u kojima su oni na svojim najnižim ili najvišim nivoima (*Ferreira i sar., 2007*). Na taj način izbegnuti su eksperimenti koji podržavaju ekstremne uslove rada uređaja, pri kojima ne bi bilo moguće proizvesti pelete.

U oba dela eksperimentalnog rada, na osnovu dobijenih podataka, upotrebom nelinearne regresione analize, izračunati su koeficijenti modela drugog reda:

$$R = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 \quad (11)$$

gde je:

R – mereni odziv

β_0 – odsečak

β_1 do β_{33} – regresioni koeficijenti

A, B i C – vrednosti ulaznih veličina

AB, AC i BC – interakcije ulaznih veličina

A^2 , B^2 i C^2 – kvadratni uticaji ulaznih veličina

U cilju provere adekvatnosti odabranog modela, odnosno njegove preciznosti predviđanja, određeni su koeficijent R^2 i „Lack od Fit“ vrednost (LoF). Smatra se da vrednosti koeficijenta R^2 veće od 0,8 ukazuju da je dobijeni model adekvatan, odnosno da je poklapanje eksperimentalnih podataka sa predloženim modelom dobro. LoF test poredi rezidualnu grešku (grešku ostataka) sa „čistom“ eksperimentalnom greškom izračunatom iz ponavljanja u centralnoj tački pri čemu ukoliko je LoF značajna ($p < 0,05$), odabrani model nije adekvatan. Takođe, za proveru validnosti modela korišćeni su i grafici normalne raspodele ostataka (reziduala) i grafici izmerenih u odnosu na fitovane (procenjene) vrednosti koji nisu prikazivani u tezi zbog velikog broja analiziranih odziva.

U okviru Box-Behnken dizajna je primenom ANOVA-e određena statistička značajnost upravljivih parametara za svaki ispitivani odziv. Takođe, suma kvadrata (sum of squares – SS) je korišćena za grafičko prikazivanje pojedinačnih uticaja upravljivih parametara. Za prikazivanje rezultata primenjivana je i deskriptivna statistika (srednja vrednost i standardna devijacija).

Prilikom grafičkog prikazivanja zavisnosti posmatranog odzivnog parametra od vrednosti upravljivih parametara korišćene su vrednosti odzivnog parametra koje su dobijene eksperimentalno, kao i vrednosti izračunate iz dobijenog modela za kombinacije upravljivih parametara koje nisu predviđene eksperimentalnim dizajnom. Uslov za ovo je da je dobijeni model bio adekvatan.

U realnim proizvodnim procesima najčešće je potrebno uskladiti nekoliko odziva da bi se dobilo najbolje rešenje. Takav je bio i slučaj u istraživanjima ove doktorske disertacije gde je bilo potrebno uskladiti željeni udeo određene frakcije čestica u peletama sa kvalitetom peleta i

potrošnjom energije pelet prese. Nakon što su za ispitivane odzive pronađene kvadratne funkcije koje opisuju njihovu zavisnost od variranih upravljivih parametara (izrada modela), urađena je optimizacija. Optimizacijom su utvrđeni nivoi upravljivih parametara pri kojima se postižu optimalni uslovi sistema. Za optimizaciju je korišćena modifikovana Harringtonova metoda funkcije zadovoljenja, a rađena je u softverskom paketu Design-Expert 7.1 (trial version). U ovoj metodi se svaki utvrđeni odziv transformiše u vrednost koja se naziva pojedinačna funkcija zadovoljenja i može se kretati od 0 do 1. Što je vrednost bliža 1, to je odziv bliži željenoj vrednosti. Kombinacijom pojedinačnih funkcija zadovoljenja dobija se ukupna funkcija zadovoljenja, čija vrednost takođe treba biti što bliže 1. Na taj način se pronalazi kompromisno rešenje za usklađivanje uslova datih za više odziva koji su vrlo često u suprotnosti jedni sa drugima. S obzirom da svi odzivi nemaju jednak značaj, svakom se dodeljuje prioritet, od čega će zavisi optimalne vrednosti parametara. Najmanje značajnom odzivu dodeljuje se vrednost prioriteta 1, a najznačajnijem 5.

Pri optimizaciji su posmatrani sledeći odzivi: udeo posmatrane frakcije čestica u peletama, kvalitet peleta (izražen preko stepena otiranja) i specifična potrošnja energije pelet prese. Optimizacija je rađena na dva načina. Najpre je svim odzivima dodeljena jednaka vrednost prioriteta (5). U drugom slučaju je udelu posmatrane frakcije čestica dodeljen najviši prioritet (5), što je u skladu sa ciljevima istraživanja, kvalitetu peleta je dodeljen srednji prioritet (3), a potrošnji energije najmanji prioritet (1). Time je dopušteno da se na račun kvaliteta peleta i još više na račun potrošnje energije pelet prese, dobije što poželjniji udeo posmatrane frakcije čestica.

Takođe je ispitivana korelacija između pojedinih odziva pri čemu je dobijena vrednost koeficijenta korelacije (r) tumačena prema *Petz-u (2004)*:

- $r = \text{od } \pm 0,00 \text{ do } \pm 0,20 \rightarrow$ nikakva ili neznatna povezanost
- $r = \text{od } \pm 0,20 \text{ do } \pm 0,40 \rightarrow$ slaba povezanost
- $r = \text{od } \pm 0,40 \text{ do } \pm 0,70 \rightarrow$ značajna povezanost
- $r = \text{od } \pm 0,70 \text{ do } \pm 1,00 \rightarrow$ jaka ili vrlo jaka povezanost

POGLAVLJE 4

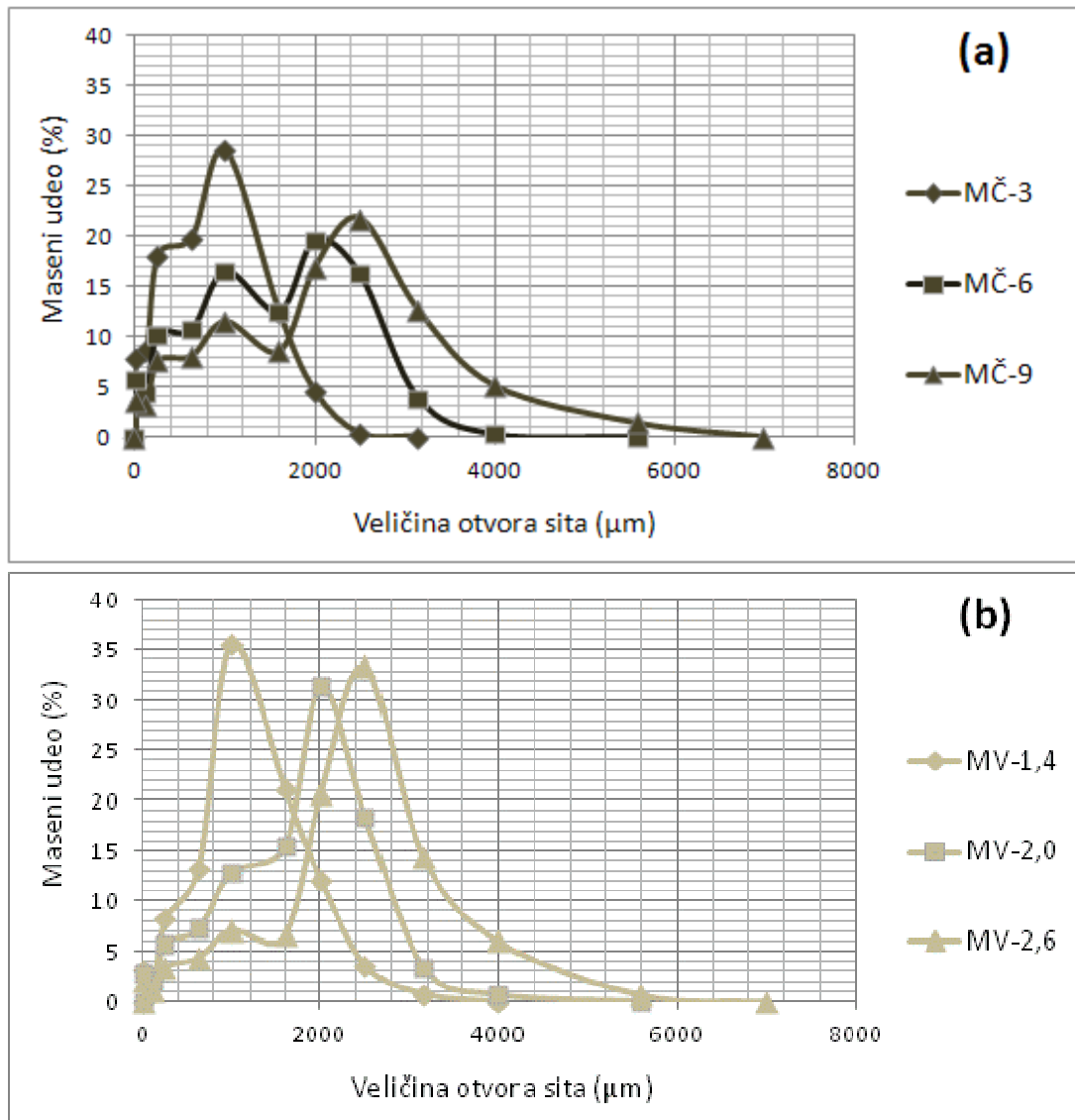
Rezultati i diskusija

4.1. GRANULOMETRIJSKI SASTAV USITNJENOG KUKURUZA

Usitnjavanjem kukuruza na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima dobijena su mliva različite krupnoće, pri čemu su mliva proizvedena na dva različita mlina imala i različit način raspodele veličine čestica (sl. 24(a) i 24(b)). Naime, u situacijama kada je ukupan interval veličine čestica relativno sličan (mliva: MČ-3/MV-1,4; MČ-6/MV-2,0 i MČ-9/MV-2,6), krive koje prikazuju raspodelu veličine čestica mliva dobijenih na mlinu čekićaru su šire i imaju manje izražen maksimum, dok je kod mliva koja su dobijena na mlinu sa valjcima raspodela uža, sa manjim masenim udelom najsitnijih i najkrupnijih frakcija, kao i sa izraženijim maksimumom. Geometrijske standardne devijacije (GSD) takođe ukazuju na znatne razlike u raspodeli veličine čestica mliva dobijenih na ova dva mlina (tab. 9). Prema *A.S.A.E. (2003)*, kada je GSD jednaka 1, sve čestice su iste veličine, dok vrednosti oko 3 i veće ukazuju na velike varijacije u veličini čestica. Vrednosti GSD-je su se kod mliva dobijenih na mlinu sa valjcima kretale od 2,09 do 2,27 μm , a kod mlina čekićara od 2,66 do 2,82 μm , što ukazuje na užu raspodelu veličine čestica mliva dobijenih upotrebom mlina sa valjcima. Ovakvi rezultati su u skladu sa drugim istraživanja u kojima je manja količina najsitnijih i najkrupnijih frakcija čestica, odnosno uža raspodela, dobijena kod mlina sa valjcima nego kod čekićara (*Reece i sar., 1985; Nir i sar., 1995; Sredanović i sar., 1998; Svihus i sar., 2004b*).

Prilikom proizvodnje hrane za životinje žitarice se najčešće melju sitno, korišćenjem mlina čekićara sa prečnikom otvora sita između 3 i 4,5 mm, jer se smatra da je sitno mlevenje ključno za dobro iskorišćavanje hrane u probavnom traktu životinja, kao i za dobijanje peleta dobrog kvaliteta

(Svihus, 2004b). Na taj način, granulacija kukuruznog mliva dobijenog na mlinu čekićaru korišćenjem sita sa prečnikom otvora 3 mm (tretman MČ-3), približno odgovara granulacijama smeša koje se u praksi koriste u ishrani živine i svinja (Healy i sar., 1994; Mavromichalis i sar., 2000; Amerah i sar., 2007a). Potom se išlo u smeru krupnijeg mlevenja pri čemu je korišćen čekićar sa prečnikom otvora sita od 6 mm (tretman MČ-6) i 9 mm (tretman MČ-9).



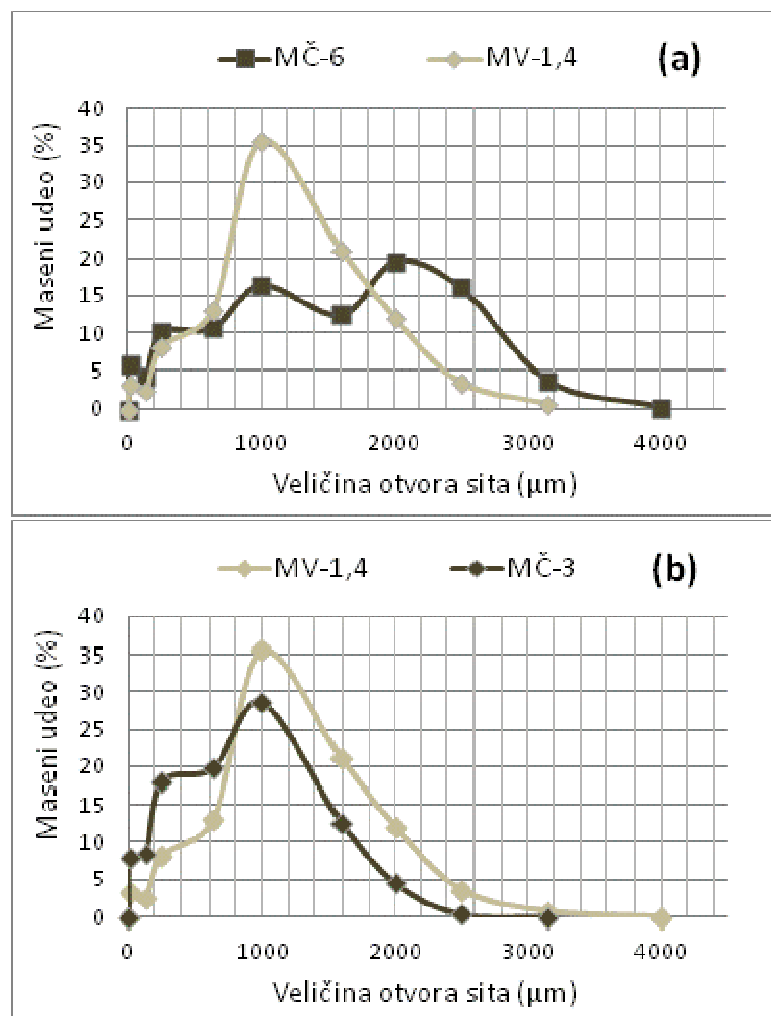
Slika 24. Raspođe veličine čestica dobijene na mlinu čekićaru (a) i mlinu sa valjcima (b)

Tabela 9. Geometrijski srednji prečnik i geometrijska standardna devijacija mliva dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima

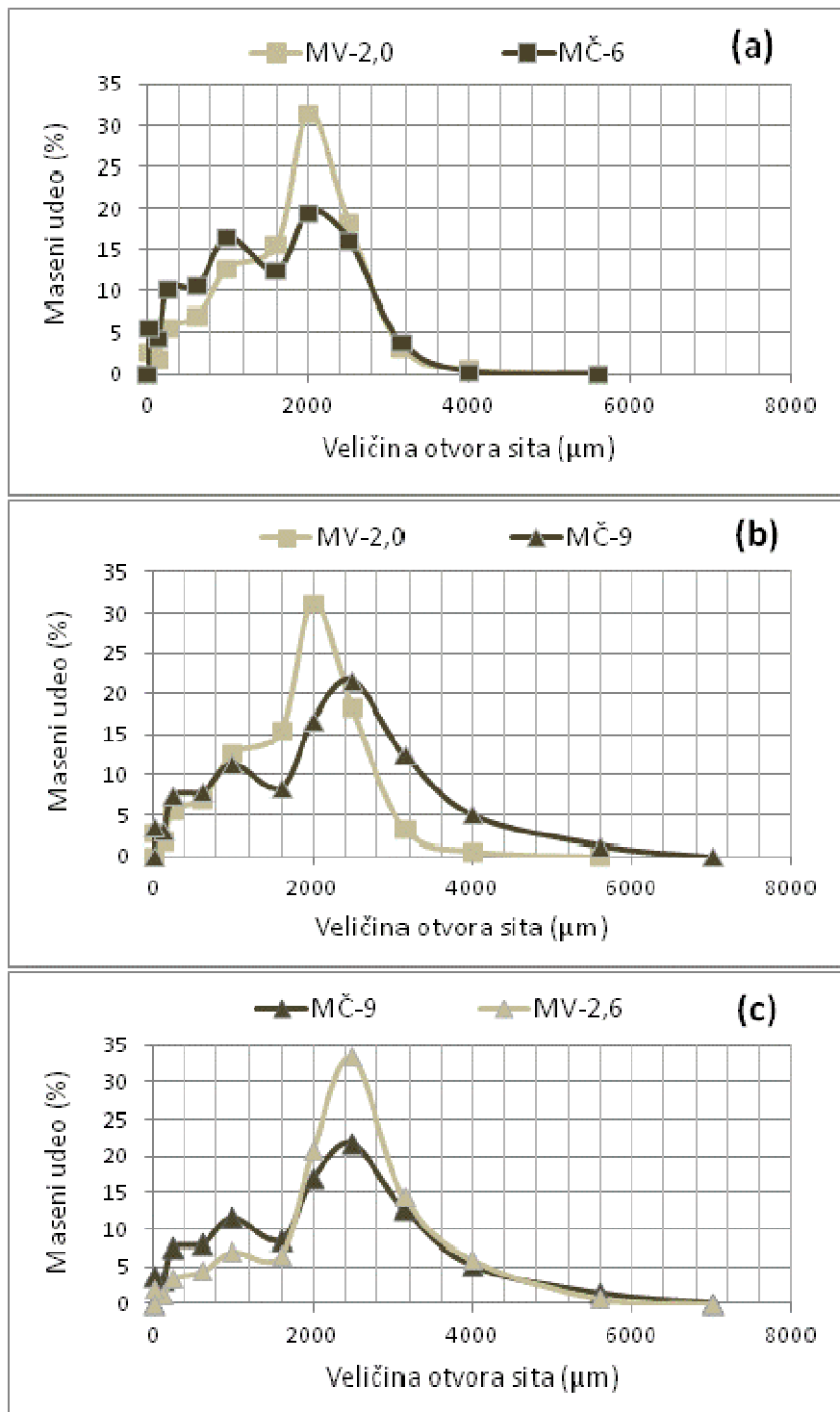
	MČ-3	MČ-6	MČ-9	MV-1,4	MV-2,0	MV-2,6
GSP (μm)	671	1144	1581	1119	1542	2108
GSD (μm)	2,66	2,82	2,69	2,17	2,27	2,09

Na mlinu sa valjcima proizvedene su takođe tri granulacije mliva, pri čemu su parametri mlevenja (razmak između valjaka) podešeni tako da je GSP najsitnijeg mliva (MV-1,4) iznosio 1119 μm i imao sličnu vrednost kao kod mliva MČ-6 koji je iznosio 1144 μm . Isto tako, GSP mliva MV-2,0 iznosio je 1542 μm i bio je sličan po vrednosti sa GSP-om najkрупnijeg mliva dobijenog na čekićaru (MČ-9) koji je iznosio 1581 μm . U literaturi se kao merilo granulacije smeša za ishranu životinja gotovo uvek primenjuje GSP. S obzirom da je kod mliva MČ-6 i MV-1,4, kao i MČ-9 i MV-2,0, dobijena približno ista vrednost GSP-a, može se smatrati da je kod ovih parova mliva primenjen približno isti intenzitet usitnjavanja korišćenjem različitih uređaja. Međutim, raspodela veličine čestica mliva MV-1,4 u velikoj meri se razlikovala od

mliva MČ-6 uprkos sličnom GSP-u (sl. 25(a)) i mnogo je sličnija mlivu MČ-3, čiji je GSP znatno manji (sl. 25(b)). Slično ovome, granulacija mliva MV-2,0 sličnija je granulaciji mliva MČ-6 (sl. 26(a)), nego mlivu MČ-9 (sl. 26(b)) sa kojim ima sličan GSP. Isto tako, mlivo MČ-9 imalo je sličniju raspodelu veličine čestica sa najkрупnijim mlivom dobijenim na mlinu sa valjcima (MV-2,6), čiji je GSP znatno veći (sl. 26(c)) nego sa mlivom MV-2,0 sa kojim ima sličnu vrednost GSP-a. Dakle, prethodno navedeni rezultati ukazuju da se za procenu intenziteta usitnjavanja ne treba rukovoditi isključivo GSP-om već je potrebno posmatrati i ukupnu raspodelu veličine čestica.



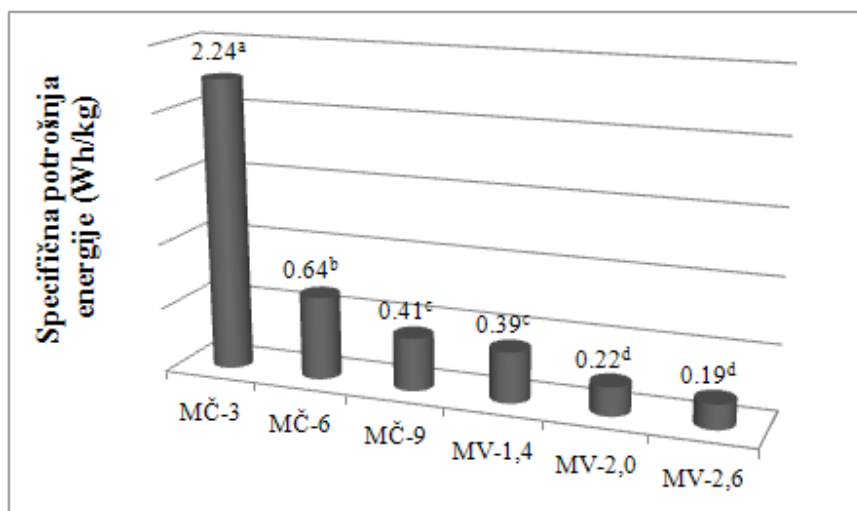
Slika 25. Poređenje raspodele veličine čestica mliva: MČ-6 / MV-1,4 (a) i MV-1,4 / MČ-3 (b)



Slika 26. Poređenje raspodele veličine čestica mliva: MV-2,0 / MČ-6 (a), MV-2,0 / MČ-9 (b) i MČ-9 / MV-2,6 (c)

4.2. SPECIFIČNA POTROŠNJA ENERGIJE ZA MLEVENJE

Najveća specifična potrošnja energije dobijena je pri najsitnijem mlevenju na mlinu čekićaru, t.j. kod tretmana MČ-3 (sl. 27) i iznosila je 2,24 Wh/kg. Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara sa 3 na 6 mm smanjilo je potrošnju energije za oko 3,5 puta, dok je dalje povećanje na 9 mm dodatno smanjilo potrošnju energije za oko 1,5 puta u poređenju sa upotrebom sita od 6 mm. Slično ovome, *Reece i sar. (1986a)* su utvrdili smanjenje utroška energije za 27% kada je veličina otvora sita čekićara povećana sa 4,76 na 6,35 mm. U istraživanju *Wondra-e i sar. (1992)* je sa povećanjem GSP-a mliva kukuruza sa 600 na 1000 μm , potrošnja energije smanjena oko 1,4 puta, dok je pri povećanju GSP-a sa 400 na 1000 μm potrošnja energije smanjena oko 3 puta.



Slika 27. Specifična potrošnja energije u operaciji mlevenja. Vrednosti označene različitim slovom su statistički značajno različite ($p < 0,05$)

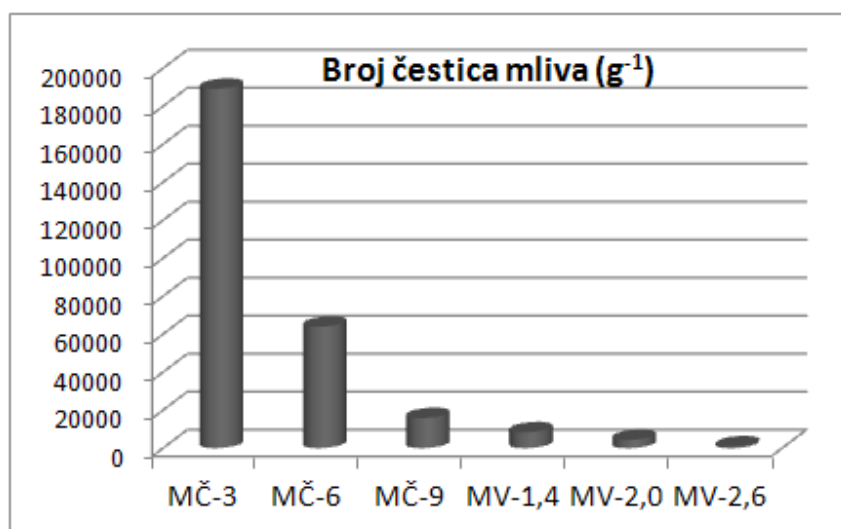
I kod mlina sa valjcima pri krupnijem mlevenju, t.j. sa povećanjem razmaka između valjaka, dolazilo je do smanjenja utroška energije, što je bilo i očekivano. Međutim, razlike nisu bile toliko izražene kao kod mlina čekićara. Kod tretmana MV-2,0 specifična potrošnja energije mlina bila je manja oko 1,8 puta, a kod tretmana MV-2,6 oko 2 puta manja u poređenju sa tretmanom MV-1,4.

Kada se upoređuje potrošnja energije na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima pri tretmanima u kojima su dobijena mliva sa približno istom vrednošću GSP-a (MČ-6/MV-1,4 i MČ-9/MV-2,0), značajno manji utrošak energije ($p < 0,001$) zabeležen je kod mlina sa valjcima. Specifična potrošnja energije bila je 39% manja kod tretmana MV-1,4 u poređenju sa MČ-6 i 46% manja kod tretmana MV-2,0 u poređenju sa MČ-9. Ukoliko se porede tretmani mlevenja na mlinu čekićaru sa tretmanima na mlinu sa valjcima kojima se proizvodi slična raspodela veličine čestica mliva (MČ-

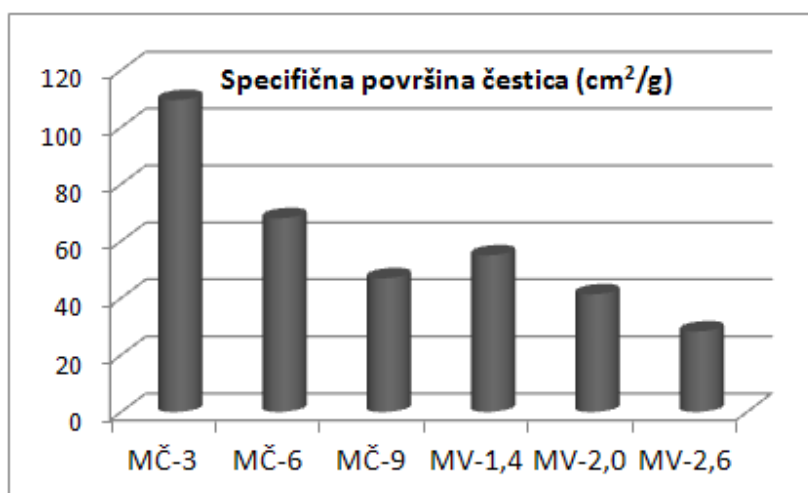
3/MV-1,4; MČ-6/MV-2,0 i MČ-9/MV-2,6), ušteda energije je još veća. Specifična potrošnja energije kod tretmana MV-1,4 bila je oko 82% manja u poređenju sa tretmanom MČ-3, kod tretmana MV-2,0 potrošnja energije bila je 66% manja nego kod tretmana MČ-6, dok je kod tretmana MV-2,6 potrošnja energije bila 54% manja u poređenju sa tretmanom na čekićaru MČ-9. Slično prikazanim rezultatima, prema *Ziggers-u (2001)* ušteda energije pri mlevenju žitarica do vrednosti GSP-a između 600 i 900 μm , iznosila je 30 do 50% kada je umesto čekićara korišćen mlin sa valjcima.

S obzirom da se u proizvodnji hrane za životinje najčešće koristi mlin čekićar sa malim prečnikom otvora sita, prelaskom na krupnije mlevenje, upotrebom sita sa većim prečnikom otvora, ili zamenom čekićara mlinom sa valjcima, postigle bi se značajne uštede energije u operaciji mlevenja. Budući da je nakon peletiranja, mlevenje najveći potrošač energije u procesu proizvodnje peletirane hrane za životinje, smanjenje utroška energije u ovoj operaciji dovelo bi to značajnog pojeftinjenja proizvodnje (*Reece i sar., 1985*). Pored uštede energije, pozitivan efekat krupnijeg mlevenja i upotrebe mlina sa valjcima umesto mlina čekićara mogao bi biti i povećanje udela krupnih čestica nakon peletiranja (pozitivno za živinu), kao i manji udeo najsitnijih čestica u peletama (pozitivno za svinje).

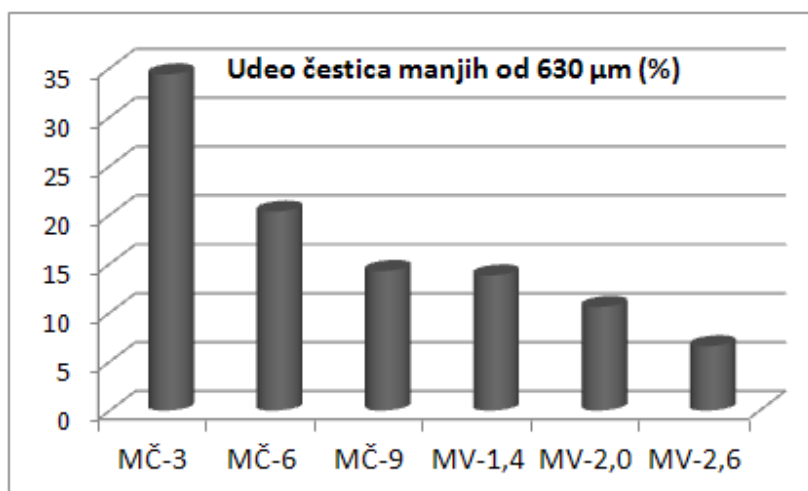
Rezultati broja čestica po jedinici mase mliva (sl. 28), kao i vrednosti specifične površine čestica dobijenih mliva (sl. 29), dobijeni pri različitim mlevnim tretmanima, imali su sličan trend promene sa rezultatima specifične potrošnje energije za mlevenje. To znači da su izrazito najviše vrednosti dobijene kod tretmana MČ-3, dok razlike između vrednosti ovih veličina kod ostalih tretmana mlevenja nisu bile velike. Sličan trend promene rezultata broja čestica po jedinici mase i specifične površine mliva sa rezultatima specifične potrošnje energije mlevenja u skladu je sa Rittinger-ovom hipotezom, prema kojoj je rad utrošen na usitnjavanje srazmeran novoobrazovanoj površini usitnjavanog materijala (*Rittinger, 1867*). Većem ukupnom broju čestica i većoj specifičnoj površini mliva najviše doprinose najsitnije čestice. Ukoliko se posmatra udeo čestica manjih od 630 μm (sl. 30), vidi se da je on izrazito najveći kod tretmana MČ-3, kao i da je trend promene vrednosti udela ovih čestica takođe bio sličan trendu promene vrednosti specifične potrošnje energije za mlevenje. Iz ovoga proizilazi da se najveća količina energije pri mlevenju utroši pri nastajanju najsitnijih frakcija čestica. Za mlin čekićar je karakteristično da dovodi do prekomernog usitnjavanja čestica, jer se pri njegovom radu stvara velika količina sitnih čestica čiji je promer znatno manji od prečnika otvora sita. Prekomerno usitnjavanje dovodi do nepotrebnog utroška energije, habanja opreme, a potencijalno i do probavnih problema kod životinja (*Anderson, 1994*).



Slika 28. Broj čestica po jedinici mase mliva pri različitim mlevnim tretmanima



Slika 29. Specifična površina čestica mliva dobijenih pri različitim mlevnim tretmanima

Slika 30. Udeo čestica manjih od 630 μm pri različitim mlevnim tretmanima

4.3. PARAMETRI PROCESA PELETIRANJA

Odzivni parametri procesa peletiranja koji su posmatrani u ovom istraživanju bili su: temperatura peletiranja, specifična potrošnja energije pelet prese, udeo prašine u peletama i stepen želatinizacije skroba. Vrednosti ovih parametara, dobijene variranjem upravljivih parametara prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu, prikazane su u tabeli 10 za prvu fazu istraživanja, u kojoj je različita granulacija kukuruza dobijena primenom mlina čekićara i u kojoj su, pored granulacije, varirani i zazor valjaka i matrice pelet prese kao i količina vode dodate u fazi kondicioniranja. Dobijene vrednosti odzivnih parametara u drugoj fazi istraživanja, kada je kukuruz mleven na mlinu sa valjcima i kojoj su različite granulacije peletirane u kombinaciji sa različitom debljinom matrice pelet prese kao i različitim sadržajem vode materijala, prikazane su u tabeli 11.

Tabela 10. Odzivni parametri procesa peletiranja i stepen želatinizacije skroba dobijeni u prvoj fazi istraživanja pri kombinacijama upravljivih parametara variranih prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu

Upravljivi parametri			Odzivni parametri			
A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	temperatura peletiranja (°C)	specifična potrošnja energije peletiranja (Wh/kg)	udeo prašine u peletama (%)	stepen želatinizacije skroba (%)
3	2,00	16,0	66,9	50,06	1,81	11,20
6	0,30	14,5	64,5	42,81	2,22	11,50
6	1,15	16,0	60,3	36,86	1,84	11,33
6	1,15	16,0	62,1	41,68	1,45	12,14
6	2,00	17,5	64,2	43,64	2,08	13,21
9	1,15	14,5	59,4	45,26	2,07	10,44
9	1,15	17,5	52,3	35,16	2,30	10,12
6	2,00	14,5	69,8	51,96	2,04	14,54
3	0,30	16,0	62,0	37,57	2,83	11,65
3	1,15	14,5	64,7	45,69	1,64	12,05
6	1,15	16,0	60,1	38,27	1,71	11,49
3	1,15	17,5	58,5	35,91	2,34	12,63
9	0,30	16,0	57,9	39,84	3,30	10,30
9	2,00	16,0	63,9	48,61	2,07	14,12
6	0,30	17,5	60,2	36,65	2,04	11,96

Tabela 11. Odzivni parametri procesa peletiranja i stepen želatinizacije skroba dobijeni u drugoj fazi istraživanja pri kombinacijama upravljivih parametara variranih prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu

Upravljivi parametri			Odzivni parametri			
A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	temperatura peletiranja (°C)	specifična potrošnja energije peletiranja (Wh/kg)	udeo prašine u peletama (%)	stepen želatinizacije skroba (%)
2,6	30	17,5	60,9	37,07	2,36	28,15
2,0	24	14,5	61,9	41,56	2,35	29,16
2,6	36	16,0	64,7	43,63	2,88	31,45
2,6	24	16,0	57,5	37,91	2,07	27,98
1,4	24	16,0	57,4	35,36	2,46	30,28
1,4	36	16,0	66,8	45,68	2,97	34,89
1,4	30	17,5	61,7	33,12	2,24	32,28
2,0	30	16,0	63,9	48,29	2,28	32,45
2,0	24	17,5	55,5	32,25	2,24	27,95
2,0	30	16,0	63,8	42,07	2,28	33,12
2,6	30	14,5	68,4	43,01	2,42	36,95
2,0	30	16,0	64,3	41,26	2,26	34,19
1,4	30	14,5	68,9	43,49	2,48	30,83
2,0	36	17,5	62,3	39,49	3,06	32,85
2,0	36	14,5	68,0	45,83	1,58	37,58

4.3.1. Temperatura matrice pelet prese

Sa povećanjem temperature peletiranja intenziviraju se fizičke i hemijske promene makronutrijenata, od kojih su najznačajnije želatinizacija skroba i denaturacija proteina. Želatinizovani skrob i denaturisani proteini doprinose boljem povezivanju čestica tokom peletiranja jer se ponašaju kao vezivna sredstva (*Bernardin i Kasarda, 1973; Wood, 1987; Zimonja i Svihus, 2009*). Povišena temperatura takođe dovodi do intenzivnijeg uništavanja eventualno prisutnih patogenih mikroorganizama, ali, s druge strane, može da izazove uništavanje pojedinih nutritivnih sastojaka (vitamini, enzimi) (*Thomas i sar., 1998*).

Temperatura peletiranja merena je pomoću otpornog termometra čiji senzor meri temperaturu matrice. Temperatura peleta je uvek nešto niža od temperature matrice usled toga što se

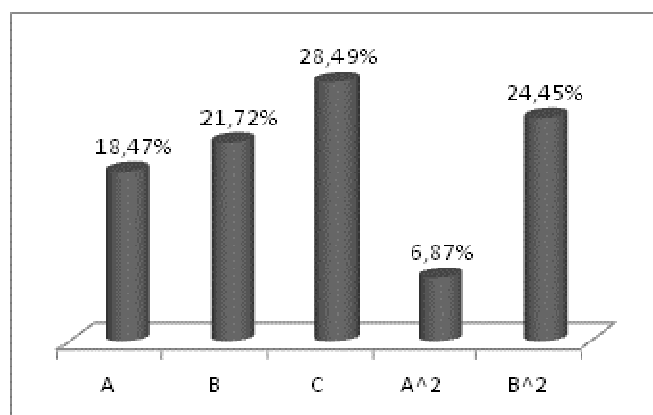
pelete ne zadržavaju dovoljno dugo u kanalima matrice da bi došlo do izjednačavanja temperature matrice i peletiranog materijala (*Stelte i sar., 2012*). Takođe, odmah nakon izlaska iz kanala matrice pelete počinju da se hlade. Usled toga bilo je teško tačno izmeriti temperaturu samih peleta i posmatrana je samo temperatura matrice. Stoga će se u daljem tekstu pod temperaturom peletiranja podrazumevati temperatura matrice pelet prese.

4.3.1.1. Temperatura peletiranja u prvoj fazi istraživanja

Temperatura matrice pelet prese u prvoj fazi istraživanja kretala se u rasponu od 52,3 do 69,8 °C (tab. 10). Na osnovu dobijenih podataka, upotrebom nelinearne regresione analize, izračunati su koeficijenti pojednostavljenog regresionog modela koji opisuje uticaj upravljivih parametara procesa peletiranja (granulacija, zazor valjci-matrica i sadržaj vode materijala) na temperaturu matrice pelet prese. Dobijen je model sa visokom vrednošću koeficijenta R^2 od 0,969, dok LoF vrednost nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,7517$) (u daljem tekstu pod $p(\text{LoF})$ smatraće se značajnost „Lack of Fit“ vrednosti). Vrednosti R^2 i $p(\text{LoF})$ ukazuju da dobijeni model dobro opisuje eksperimentalne podatke. Sva tri upravljiva parametra su imala značajan uticaj na temperaturu peletiranja (tab. 12, sl. 31).

Tabela 12. Koeficijenti regresione jednačine za temperaturu matrice pelet prese u prvoj fazi istraživanja

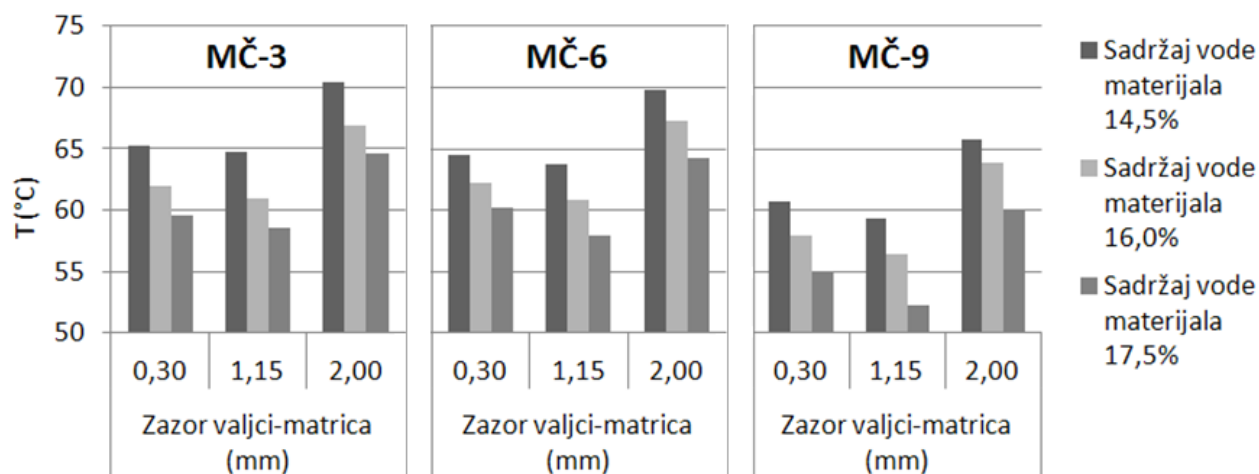
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	18,8385	
Linearni		
A: granulacija mliva	0,2281	< 0,0001
B: zazor valjci-matrica	-3,6544	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	-2,1399	< 0,0001
Kvadratni		
A^2	0,7141	0,0018
B^2	0,0635	< 0,0001



Slika 31. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na temperaturu matrice pelet prese u prvoj fazi istraživanja

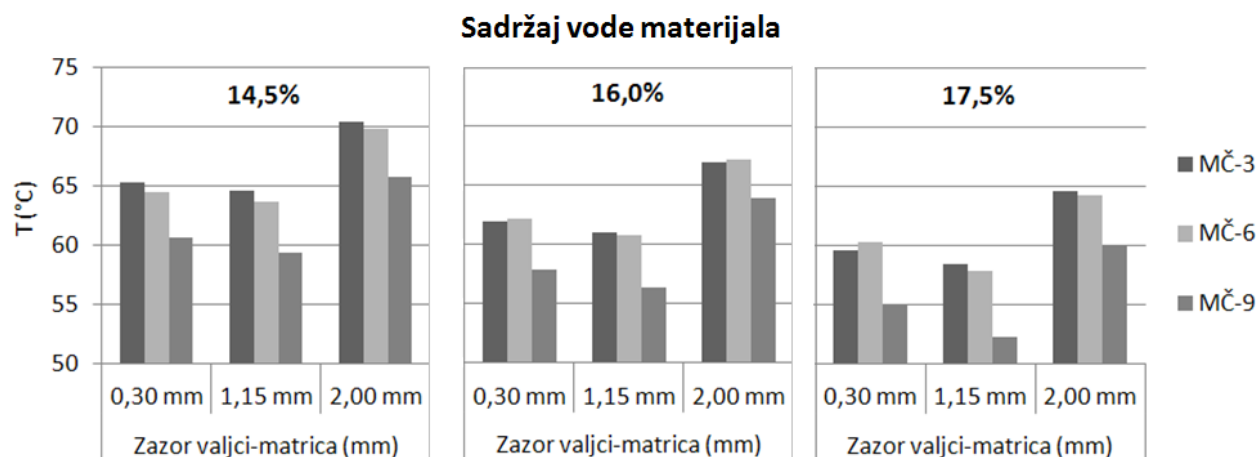
Temperatura peletiranja je približno linearno opadala sa povećanjem sadržaja vode materijala i za 5 do 6 °C je bila niža kada se porede tretmani sa najvećim i najmanjim sadržajem vode (sl. 32) što je posledica lubrikativnog delovanja vode (*Briggs i sar., 1999; Abdollahi i sar.,*

2011). Prisutna voda na površini čestica smanjivala je trenje između materijala koji se peletira i zidova kanala matrice i tako je dovela do smanjenja temperature peletiranja što je u skladu sa istraživanjima *Stivens-a (1987)*, *Vukmirović-a i sar. (2010)* i *Čolović-a (2013)*.



Slika 32. Uticaj sadržaja vode na temperaturu peletiranja pri konstantnoj granulaciji materijala i konstantnom zazoru valjci-matrica u prvoj fazi istraživanja

Temperature peletiranja imale su približno istu vrednost kada su peletirana mliva MČ-3 i MČ-6, dok je pri peletiranju nakrupnijeg mliva (MČ-9) temperatura bila niža za 4 do 5 °C (sl. 33). Ukoliko je mlivo sitnije granulacije, veća mu je SP, a time i veća površina dodira sa zidovima



Slika 33. Uticaj granulacije mliva na temperaturu peletiranja pri konstantnom sadržaju vode materijala i zazoru valjci-matrica pelet prese u prvoj fazi istraživanja

kanala matrice, usled čega je veće trenje i viša temperatura matrice (*Čolović, 2013*). Takođe, voda koja se dodaje u fazi kondicioniranja ravnomernije se raspodeljuje po česticama ukoliko je manja SP mliva, t.j. pri krupnijoj granulaciji, jer je pri većoj SP-ni veća moć apsorpcije vode mliva pa

manja količina vode ostaje na površini čestica i manje je izražen efekat lubrikacije. Iako je razlika SP-ne mliva MČ-3 i MČ-6 veća nego razlika između mliva MČ-6 i MČ-9 (MČ-3: 110 cm²/g; MČ-6: 68 cm²/g; MČ-9: 47 cm²/g), razlike u temperaturi peletiranja mliva MČ-3 i MČ-6 praktično nije bilo dok je pri peletiranju mliva MČ-9 temperatura bila niža. Na osnovu ovih rezultata može se pretpostaviti da je odnos SP-ne mliva MČ-9 i količine dodate vode takav da omogućuje znatno ravnomerniju raspodelu vode po površini čestica, u odnosu na raspodelu vode kod mliva MČ-3 i MČ-6, i da je to razlog niže temperature pri peletiranju mliva MČ-9, iako se samo na osnovu dobijenih rezultata to ne može sa sigurnošću tvrditi.

U pogledu uticaja zazora (u daljem tekstu pod terminom zazor podrazumevaće se rastojanje, odnosno zazor između valjaka i matrice pelet prese), najviša temperatura peletiranja bila je pri najvećem zazoru, dok su pri dva manja zazora temperature podjednake. Pretpostavlja se da pri najmanjem zazoru (0,30 mm) valjci potiskuju materijal direktno u kanale matrice, u kojima postepeno dolazi do povećanja pritiska i do formiranja peleta. S druge strane, pri povećanju zazora, valjci sabijaju materijal na površini matrice, pri čemu nastaje sloj čija je debljina određena širinom rastojanja valjaka i matrice pelet prese (širinom zazora). Na početku peletiranja, pritisak u ovom sloju, koji može biti nazvan prekompakcioni sloj, postepeno raste usled pristizanja nove količine materijala koji valjci sabijaju na površini matrice, materijal ulazi sve dublje u kanale matrice i, kada formirane pelete počnu izlaziti iz kanala, uspostavlja se ravnotežno stanje. Pri tome se može pretpostaviti da u peletiranom materijalu postoji gradijent pritiska, gde pritisak raste od površine prekompakcionog sloja prema izlazu iz kanala matrice. Što je zazor između valjaka i matrice veći, odnosno što je veća debljina prekompakcionog sloja, pritisak kojem su izložene čestice tokom peletiranja je veći, materijal u kanalima matrice je sabijeniji i veće je trenje između materijala i zidova kanala matrice (*Thomas i sar., 1997*). Zato je pri najvećem zazoru (2,00 mm) temperatura peletiranja bila najviša. Međutim, kada se poredе temperature dobijene pri zazorima 0,30 mm i 1,15 mm vidi se da su dobijene vrednosti vrlo bliske. To znači da širina zazora, odnosno debljina prekompakcionog sloja od 1,15 mm, još uvek nije dovoljna da dovede do značajnijeg povećanja trenja i pritiska u kanalima matrice.

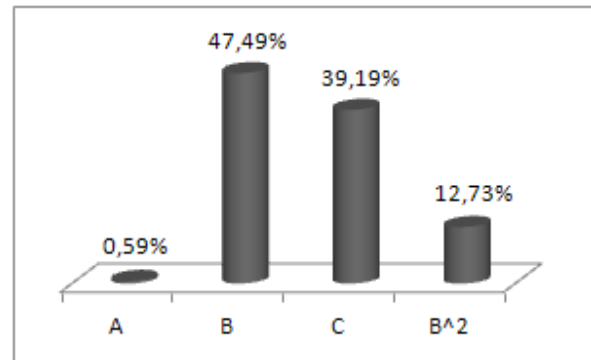
4.3.1.2. Temperatura peletiranja u drugoj fazi istraživanja

Temperatura matrice pelet prese u drugoj fazi istraživanja kretala se u rasponu od 55,5 do 68,9 °C (tab. 11). Na osnovu ovih vrednosti dobijen je kvadratni model koji dobro opisuje

eksperimentalne podatke ($R^2 = 0,975$; $p(\text{LoF}) = 0,0908$). Debljina matrice i sadržaj vode materijala imali su značajan uticaj na temperaturu peletiranja (tab. 13, sl. 34), dok granulacija nije imala značajan uticaj najverovatnije usled malih razlika u veličini SP-ne mliva (MV-1,4: $55 \text{ cm}^2/\text{g}$; MV-2,0: $41 \text{ cm}^2/\text{g}$; MV-2,6: $28 \text{ cm}^2/\text{g}$).

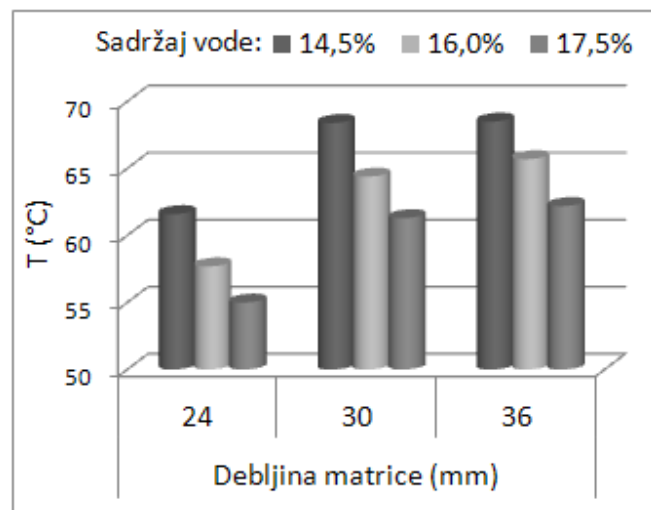
Tabela 13. Koeficijenti regresione jednačine za temperaturu matrice pelet prese u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	13,3619	
Linearni		
A: granulacija mliva	-0,6875	0,1614
B: debljina matrice	5,2723	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	-2,2333	< 0,0001
Kvadratni		
B^2	-0,0776	0,0908



Slika 34. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na temperaturu matrice pelet prese u drugoj fazi istraživanja

Temperatura peletiranja je opadala približno linearno sa povećanjem sadržaja vode (sl. 35) usled njenog lubrikativnog delovanja. Temperatura matrice smanjila se za 6 do 7 °C kada je sadržaj vode povećan sa 14,5% na 17,5%. U pogledu uticaja debljine matrice, odnosno uticaja odnosa debljine i prečnika kanala matrice (L:D odnos), pri korišćenju matrica debljine 36 mm (L:D = 1:6) i 30 mm (L:D = 1:5) dobijene su slične vrednosti temperature peletiranja, dok je prilikom korišćenja najtanje matrice (24 mm; L:D = 1:4) temperatura bila znatno niža pri svim sadržajima vode materijala. Razlog za više temperature pri korišćenju deblje matrice, t.j. pri većem L:D odnosu, je u većem otporu



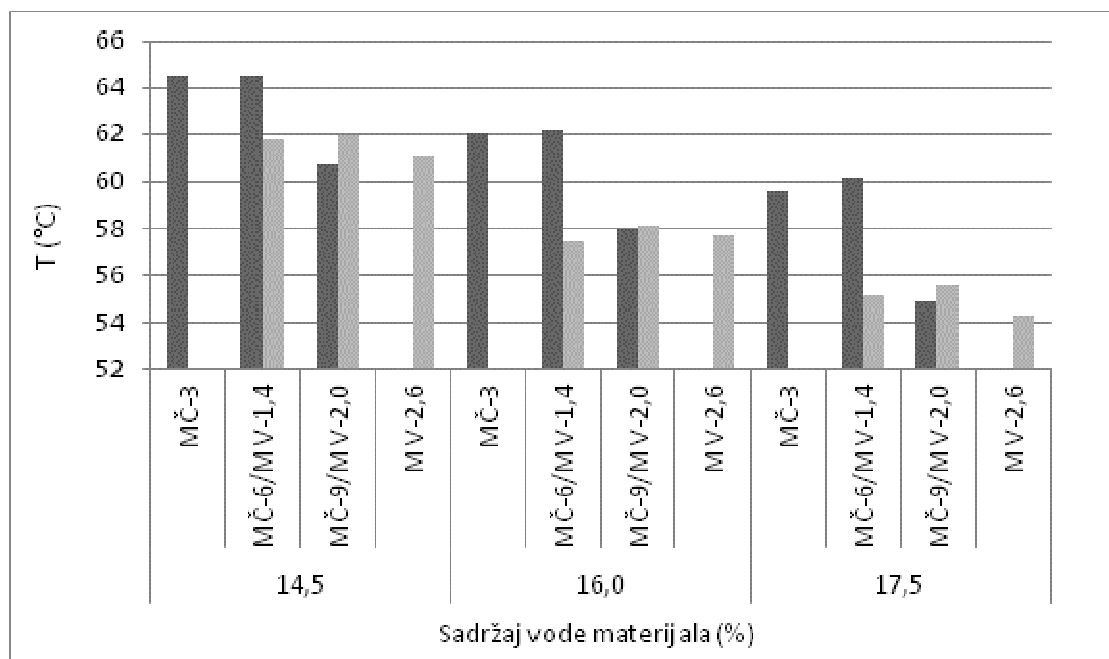
Slika 35. Temperatura peletiranja u drugoj fazi istraživanja

protoku materijala kroz deblju matricu, kao i u dužem zadržavanju materijala na povišenom pritisku tokom njegovog prolaska kroz kanale matrice (Behnke, 2001). Prema istraživanju Fabrode-a i O'Callaghan-a (1987), povećanje L:D odnosa dovodi do eksponencijalnog povećanja pritiska u kanalima matrice. Dakle, povećanje dužine kanala kroz koji matrijal prolazi dovodi do jačeg

presovanja materijala, pa time i većeg pritiska, kao i dužeg zadržavanja u kanalima usled čega se materijal više zagreva.

4.3.1.3. Poređenje temperature peletiranja u prvoj i drugoj fazi istraživanja

Ukoliko se porede temperature peletiranja mliva dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, dobijene pri istim parametrima peletiranja (zazor 0,30 mm i debljina matrice 24 mm), može se primetiti da su najviše temperature bile kod tretmana MČ-3 i MČ-6 (sl. 36). To su ujedno mliva sa najvećom specifičnom površinom čestica. Kod krupnijih mliva (MČ-9; MV-1,4; MV-2,0 i MV-2,6), usled manje specifične površine čestica, manje je trenje u kanalima matrice kao posledica manje kontaktne površine između čestica i kanala matrice. Takođe, kod ovih mliva je manja moć apsorpcije vode tokom kondicioniranja i izraženiji je efekat lubrikacije. Naime, u poređenju sa mlivima MČ-3 i MČ-6, mliva MČ-9, MV-1,4; MV-2,0 i MV-2,6 imaju manji udeo najsitnijih čestica (manjih od 630 μm), koje apsorbuju najveći deo vode dodate u fazi kondicioniranja, i tako umanjuju ravnomernost njene raspodele, kao i količinu vode na površini čestica koja ima lubrikativno dejstvo pri prolasku materijala kroz kanale matrice.



Slika 36. Temperatura peletiranja mliva dobijenih na mlinu čekićaru (MČ) i mlinu sa valjcima (MV) (zazor valjci-matrica: 0,30 mm i debljina matrice: 24 mm)

U prvoj fazi istraživanja granulacija mliva je značajno uticala na temperaturu peletiranja, dok u drugoj fazi nema značajnog uticaja granulacije. To je najverovatnije posledica malih razlika specifične površine mliva dobijenih na mlinu sa valjcima. Ovakav zaključak potvrđuje poređenje temperatura peletiranja mliva sa sličnim GSP-om dobijenim na različitim mlinovima pri istim parametrima peletiranja (zazor valjci-matrica 0,3 mm i debljina matrice 24 mm). Kada se porede tretmani MČ-6 i MV-1,4 (GSP \approx 1100 μ m) može se videti da su temperature bile niže kod mliva sa manjom SP-om, t.j. kod mliva dobijenog na mlinu sa valjcima (MV-1,4), a ukoliko se porede tretmani MČ-9 i MV-2,0 (GSP \approx 1500 μ m) vidi se da su dobijene slične vrednosti temperature, ali je pri tome i SP-na ova dva mliva bila približno ista.

4.3.2. Specifična potrošnja energije pelet prese

4.3.2.1. Specifična potrošnja energije pelet prese u prvoj fazi istraživanja

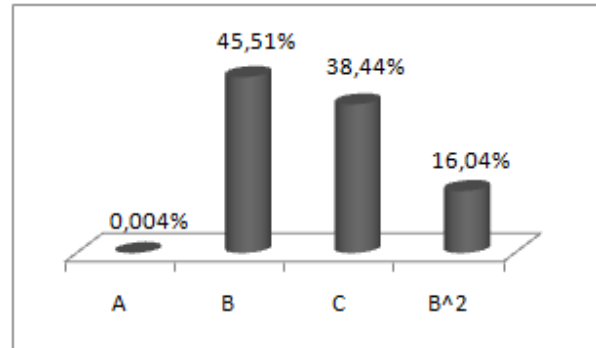
Specifična potrošnja energije pelet prese, dobijena u prvoj fazi istraživanja kretala se između 35,16 i 51,96 Wh/kg (tab. 10), a dobijeni model je bio adekvatan ($R^2 = 0,930$; $p(\text{LoF}) = 0,8928$). Ukoliko se posmatraju koeficijenti pojednostavljenog regresionog modela i relativni intenziteti uticaja parametara na ispitivani odziv (tab. 14, sl. 37) vidi se da je najsnažniji uticaj imao zazor, a potom sadržaj vode, dok uticaj granulacije mliva nije bio značajan. I u istraživanju Čolovića (2013) pri peletiranju kukuruza mlevenog na situ čekićaru sa veličinama otvora sita 2, 3 i 4 mm nije utvrđen značajan uticaj granulacije na specifičnu potrošnju energije pelet prese. Svihus i sar. (2004b) takođe nisu dobili značajne razlike u potrošnji energije pri peletiranju hrane za brojlere u čijem sastavu je bila pšenica različite krupnoće. S druge strane, Stivens (1987) je pri peletiranju smeša sa kukuruzom mlevenim do čestica srednjih prečnika od 1023, 794 i 551 μ m dobio značajno veću potrošnju energije pri peletiranju najkrupnijeg mliva ($p < 0,05$).

Prilikom grafičkog prikazivanja rezultata specifične potrošnje energije pelet prese, uticaj granulacije mliva je zanemaren i posmatrana je zavisnost potrošnje energije od sadržaja vode i zazora valjci-matrica (sl. 38). Pri svim veličinama zazora dolazilo je do značajnog smanjenja potrošnje energije sa povećanjem sadržaja vode. Kao i kod temperature peletiranja, to je posledica lubrikativnog delovanja vode koja smanjuje trenje između materijala koji se peletira i zidova matrice i tako dovodi do manje potrošnje energije pri peletiranju (Moritz i sar., 2002; Abdollahi i

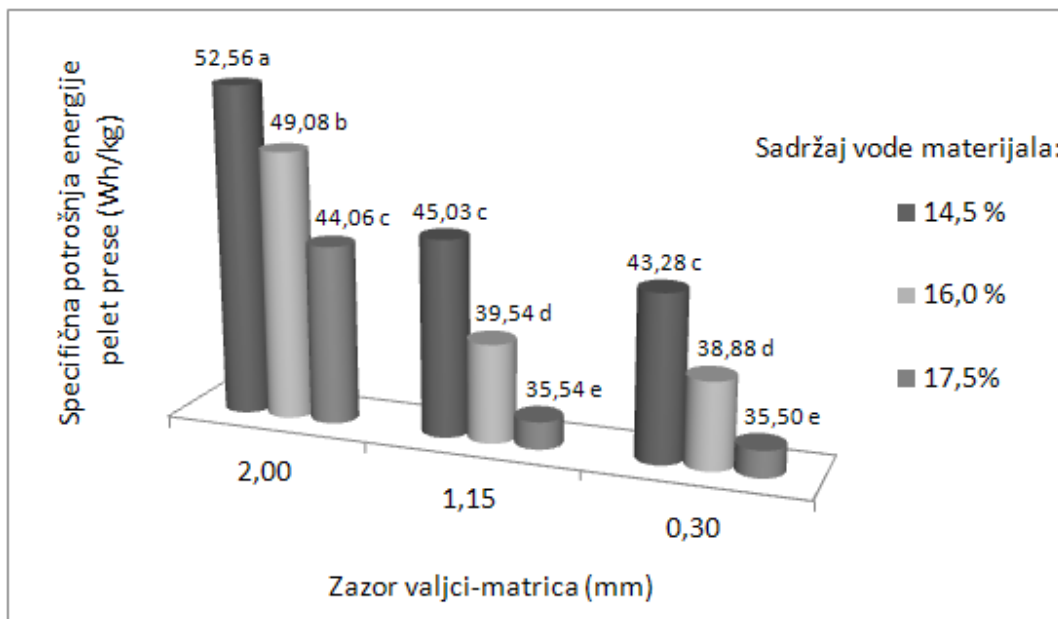
sar., 2011; Čolović, 2013). Fairchild i Greer (1999) su takođe pokazali da pri povećanju količine vode dodate u mešalicu za 3% dolazi do smanjenja potrošnje energije peletiranja za 2,3%.

Tabela 14. Koeficijenti regresione jednačine za specifičnu potrošnju energije pelet prese u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	86,8536	
Linearni		
A: granulacija mliva	-0,0151	0,9412
B: zazor valjci-matrica	-7,4309	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	-2,8637	< 0,0001
Kvadratni		
B ²	5,6216	0,0009



Slika 37. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na specifičnu potrošnju energije pelet prese u prvoj fazi istraživanja



Slika 38. Specifična potrošnja energije pelet prese u prvoj fazi istraživanja. Različita slova ukazuju na značajno različite srednje vrednosti ($p < 0,05$)

Ukoliko se posmatra uticaj zazora valjci-matrica, može se primetiti da je najveća potrošnja energije bila pri najvećem zazoru (2,00 mm) usled povećanog trenja u kanalima matrice do kojeg dolazi sa povećanjem zazora, dok je pri zazoru 1,15 mm potrošnja energije je bila nešto veća nego pri zazoru 0,30 mm, ali razlika nije bila statistički značajna. Ovakvi rezultati su u skladu sa rezultatima za temperaturu peletiranja, koja je bila najviša pri zazoru 2,00 mm, pri svim sadržajima vode materijala, dok su vrednosti za dva manja zazora bile vrlo bliske. To ukazuje da povećanje

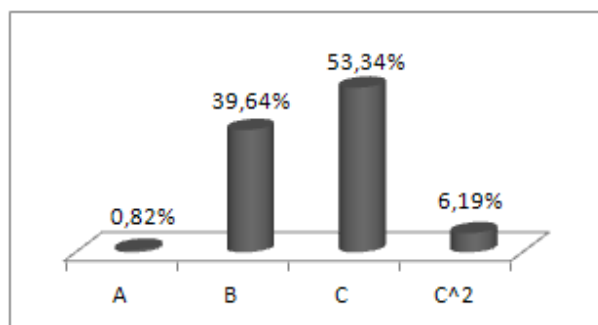
zazora sa 0,30 na 1,15 mm nije dovoljno da dovede do značajnijeg povećanja sile trenja i da se tek pri zazoru 2,00 mm javlja značajniji otpor prolasku materijala kroz kanale matrice usled povećane sile trenja.

4.3.2.2. Specifična potrošnja energije pelet prese u drugoj fazi istraživanja

Specifična potrošnja energije pelet prese u drugoj fazi istraživanja kretala se između 32,25 i 48,29 Wh/kg (tab. 11). Model dobijen na osnovu ekperimentalnih vrednosti bio je adekvatan ($R^2 = 0,894$; $p(\text{LoF}) = 0,5570$). Značajnost koeficijenata pojednostavljenog regresionog modela kao i relativni intenziteti njihovog uticaja (tab. 15, sl. 39) pokazuju da je sadržaj vode materijala imao statistički najznačajniji uticaj na potrošnju energije. Značajan uticaj je imala i debljina matrice, dok uticaj granulacije mliva nije bio značajan. Dakle, najkrupnija granulacija (MV-2,6) nije dovela do očekivanog povećanja utroška energije pelet prese, ali je, s druge strane, dovela je do značajne uštede energije prilikom mlevenja.

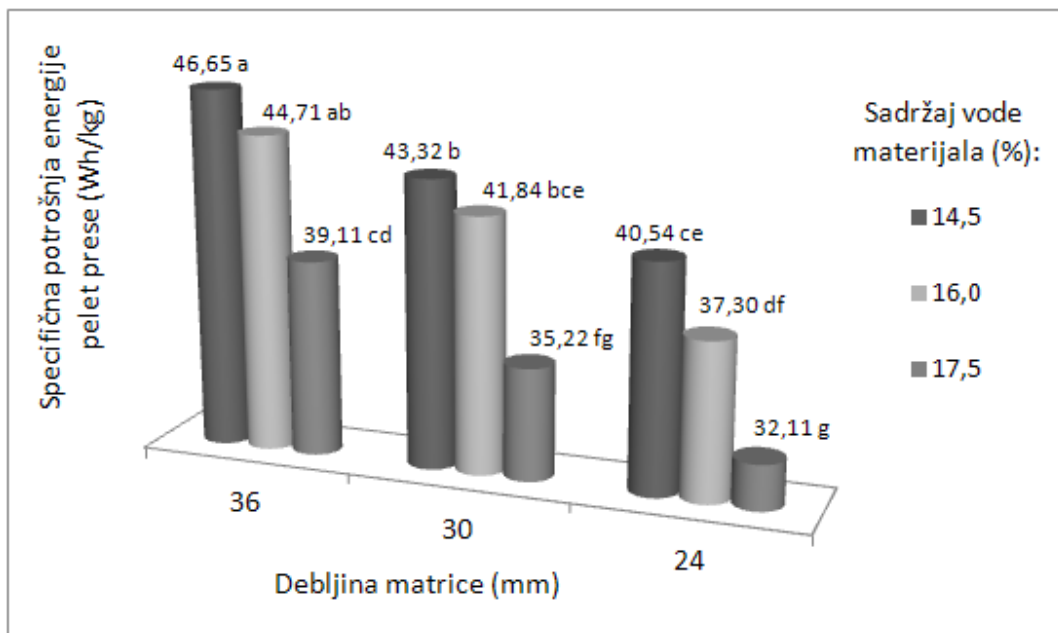
Tabela 15. Koeficijenti regresione jednačine za specifičnu potrošnju energije pelet prese u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-161,4918	
Linearni		
A: granulacija mliva	0,8271	0,4248
B: debljina matrice	0,5740	0,0002
C: sadržaj vode materijala	25,6744	< 0,0001
Kvadratni		
C ²	-0,8856	0,0456



Slika 39. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na specifičnu potrošnju energije pelet prese u drugoj fazi istraživanja

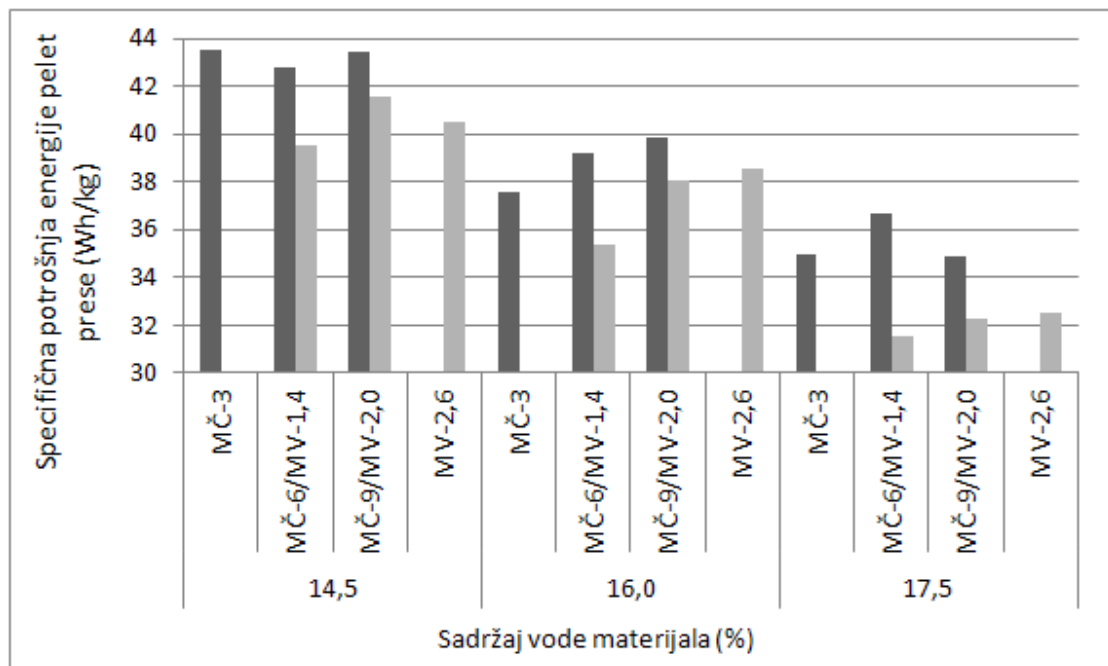
Kao i u prvoj fazi istraživanja, sa povećanjem sadržaja vode materijala dolazilo je do opadanja potrošnje energije (sl. 40), što je posledica lubrikativnog delovanja vode. To opadanje je naročito izraženo pri povećanju sadržaja vode sa 16,0 na 17,5%. Sa smanjenjem debljine matrice smanjivala se specifična potrošnja energije pelet prese pri konstantnom sadržaju vode jer se sa smanjenjem debljine matrice smanjuje otpor protoku materijala kroz kanale matrice.



Slika 40. Specifična potrošnja energije pelet prese u drugoj fazi istraživanja (različita slova ukazuju na značajno različite vrednosti ($p < 0,05$))

4.3.2.3. Poređenje specifične potrošnje energije pelet prese u prvoj i drugoj fazi istraživanja

Ni u prvoj ni u drugoj fazi istraživanja granulacija mliva nije značajno uticala na specifičnu potrošnju energije pelet prese, odnosno očekivanog povećanja utroška energije pri peletiranju krupnije mlevenog kukuruza nije bilo. Ovo je u skladu sa rezultatima *Svihus-a i sar. (2004b)* koji takođe nisu utvrdili različitu potrošnju energije tokom peletiranja smeše za brojlere koja je sadržala pšenicu različite krupnoće. Može se pretpostaviti da je to posledica jačeg uticaja druga dva varirana parametra, t.j. zazora i sadržaja vode materijala (u prvoj fazi istraživanja), odnosno debljine matrice i sadržaja vode (u drugoj fazi istraživanja). Međutim, kada se porede rezultati za različita mliva dobijena na dva korišćena mlina, pri istim parametrima peletiranja (zazor valjci-matrica 0,30 mm i debljina matrice 24 mm), može se primetiti da je specifična potrošnja energije pelet prese bila manja prilikom peletiranja mliva dobijenih na mlinu sa valjcima, kako kod mliva sa približno istim GSP-om (MČ-6/MV-1,4 i MČ-9/MV-2,0), tako i prilikom poređenja mliva sa sličnom raspodelom veličine čestica (MČ-3/MV-1,4; MČ-6/MV-2,0 i MČ-9/MV-2,6) (sl. 41).



Slika 41. Specifična potrošnja energije pelet prese pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu čekićaru (MČ) i mlinu sa valjcima (MV) (zazor valjci-matrica: 0,30 mm i debljina matrice: 24 mm)

4.3.3. Udeo prašine u peletama

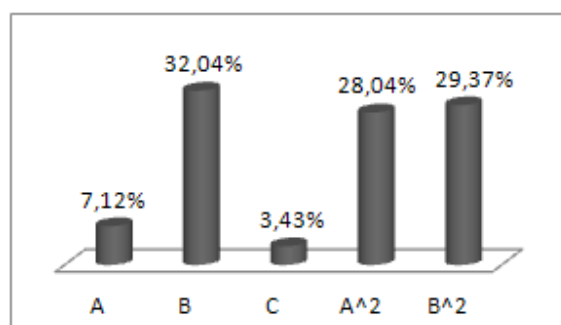
Tokom procesa peletiranja, pelete su odsecane na željenu dužinu nakon izlaska iz kanala matrice pomoću noževa koji rotiraju ispod matrice. Prilikom udara noža u peletu, ona puca na preseku koji je približno u ravni sa donjom stranom matrice. Pri tome, nastaje veća ili manja količina sitnih čestica (tzv. prašine). Zato je u proizvodnom procesu neophodno prosejavati pelete nakon izlaska iz pelet prese, pri čemu se izdvojena prašina vraća u proizvodni proces. Povećanje udela prašine dovodi do smanjenja kapaciteta proizvodnje i povećanje potrošnje energije po jedinici mase proizvoda (Hastings i Higgs, 1978; Čolović, 2013). Takođe, povećanje udela prašine može ukazivati da vrednosti parametara peletiranja nisu optimalne, odnosno da je potrebno nešto menjati u proizvodnom procesu.

Udeo prašine u peletama dobijen u prvj fazi istraživanja kretao se između 1,45 i 3,30% (tab. 10) i dobijen je model sa vrednošću koeficijenta R^2 od 0,710 i LoF vrednošću koja nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,2857$). Postojao je značajan linearni i kvadratni uticaj zazora valjci-matrica, kao i kvadratni uticaj granulacije (tab. 16, sl. 42). Međutim, prema dobijenim p-vrednostima se vidi da ovi uticaji nisu bili jako izraženi. Najveći udeo prašine pri svim granulacijama mliva dobijen je pri najmanjem zazoru, pri čemu je generalno najveća vrednost dobijena pri najkrupnijoj granulaciji i

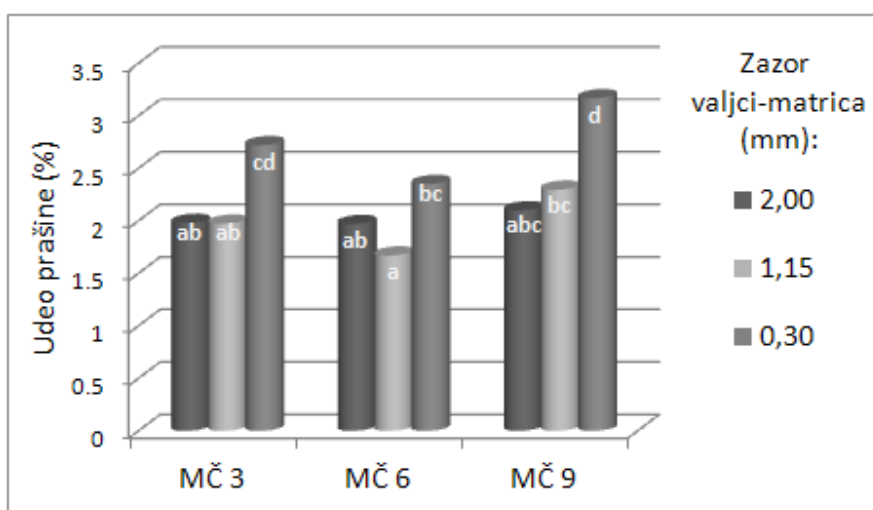
najmanjem zazoru (sl. 43). Krupnija granulacija mliva dovodi do većeg udela krupnih čestica u peletama. Zbog toga je veća verovatnoća da će na mestu gde je peleta odsečena prilikom izlaska iz matrice biti prisutne krupne čestice koje će strukturu preseka činiti slabom i prilikom udara rotirajućeg noža nastajće veća količina prašine. Veći pritisak u kanalima matrice koji se javlja sa povećanjem debljine prekompacionog sloja, t.j. pri zazorima 1,15 i 2,00 mm, dovodi do boljeg povezivnja krupnih čestica prisutnih u strukturi peleta sa okolnim sitnijim česticama, u poređenju sa peletama dobijenim pri zazoru 0,30 mm.

Tabela 16. Koeficijenti regresione jednačine za udeo prašine u peletama u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	3,1679	
Linearni		
A: granulacija mliva	-0,5019	0,2388
B: zazor valjci-matrica	-1,6942	0,0241
C: sadržaj vode materijala	0,0654	0,3977
Kvadratni		
A ²	0,0457	0,0320
B ²	0,5835	0,0288



Slika 42. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na udeo prašine u peletama u prvoj fazi istraživanja



Slika 43. Udeo prašine u peletama u prvoj fazi istraživanja (različita slova ukazuju na značajno različite vrednosti ($p < 0,05$))

U drugoj fazi istraživanja udeo prašine se kretao između 1,58 i 3,06% (tab. 11). Međutim, na osnovu dobijenih eksperimentalnih vrednosti, regresionom analizom je dobijen model sa niskim

koeficijentom R^2 od 0,548, kao i sa značajnom LoF vrednošću ($p(\text{LoF}) < 0,01$) i ti rezultati neće biti prikazani zbog nedovoljne pouzdanosti.

4.4. ŽELATINIZACIJA SKROBA

Na povišenim temperaturama, u prisustvu vode, dolazi do dezintegracije skrobnih granula, odnosno do procesa želatinizacije skroba. Želatinizovani skrob ima vezivna svojstva i doprinosi boljem fizičkom kvalitetu peleta (*Wood, 1987; Zimonja i Svihus, 2009*). Međutim, u procesu peletiranja, usled niskog sadržaja vode (13 – 18%), stepen želatinizacije je nizak i najčešće se kreće u intervalu od 5 do 30% (*Skotch i sar., 1983; Goelema i sar., 1990; Zimonja i sar., 2009*). S obzirom na malu količinu vode koja se dodaje pri kondicioniranju, ta voda najverovatnije ostaje na površini čestica. Želatinizovani skrob na površini čestica svojim vezivnim svojstvima doprinosi njihovom boljem međusobnom povezivanju.

Stepen želatinizacije skroba u prvoj fazi istraživanja, u kojoj je kukuruz mleven mlinom čekićarom, kretao se u rasponu od 10,12 do 14,54% (tab. 10). Regresionom analizom dobijen je model sa vrednošću koeficijenta R^2 od 0,741, dok LoF vrednost nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,1693$). Dobijeni rezultati stepena želatinizacije skroba, pri različitim parametrima peletiranja, nisu pokazivali jasan trend, a razlike između različitih tretmana bile su male, tako da ovi rezultati nisu razmatrani.

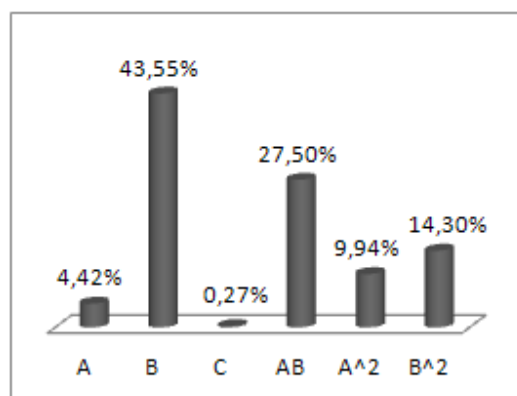
U drugoj fazi istraživanja, u kojoj je za usitnjavanje kukuruza korišćen mlin sa valjcima, vrednosti stepena želatinizacije skroba kretale su se između 24,55 i 38,35% (tab. 11). Ove vrednosti su bile znatno više u poređenju sa vrednostima dobijenim u prvoj fazi istraživanja, a dobijeni model je bio bolji ($R^2 = 0,899$; $p(\text{LoF}) = 0,2666$). Najizraženiji je bio uticaj debljine matrice, a značajan uticaj imao je i sadržaj vode materijala, kao i interakcija sadržaja vode i granulacije mliva (tab. 17, sl. 44).

Kao i kod prethodno razmatranih odzivnih parametara peletiranja, vrednosti izračunate iz dobijenog modela su kombinovane sa eksperimentalnim vrednostima prilikom grafičkog prikazivanja uticaja variranih parametara peletiranja na stepen želatinizacije skroba (sl. 45). Pri konstantnom sadržaju vode materijala, povećanje debljine matrice dovelo je do povećanja stepena želatinizacije skroba, što je posledica više temperature i dužeg zadržavanja materijala u kanalima matrice pri korišćenju deblje matrice. Povećanje sadržaja vode materijala snižavalo je temperaturu peletiranja i dovelo do smanjenja stepena želatinizacije skroba. Uticaj granulacije mliva na stepen

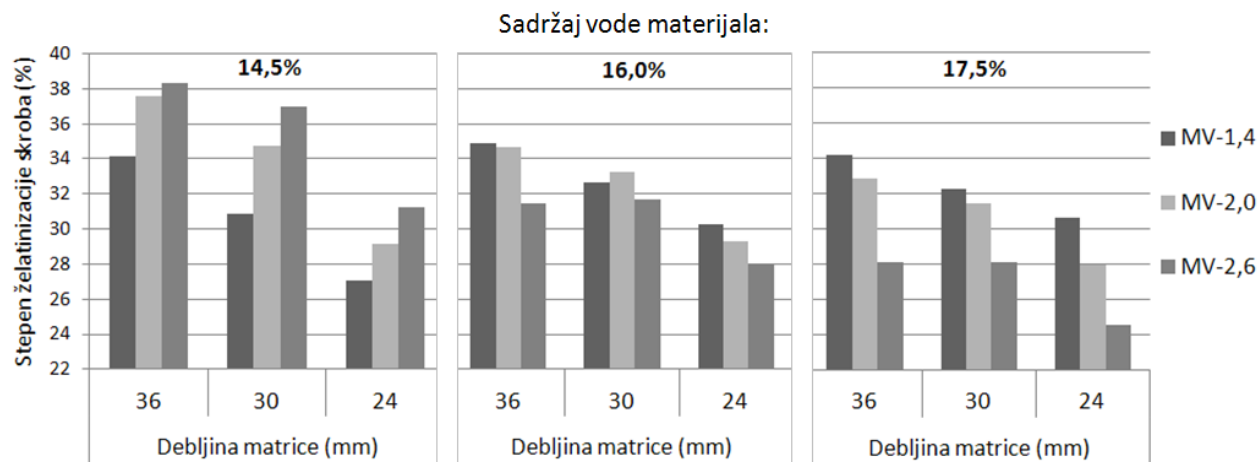
želatinizacije skroba nije imao ujednačen trend promene, odnosno postojala je interakcije granulacije mliva i sadržaja vode. Pri sadržaju vode od 14,5% stepen želatinizacije skroba se povećavao sa povećanjem granulacije mliva, a pri sadržaju vode od 16,0 i 17,5%, stepen želatinizacije se smanjivao sa povećanjem granulacije.

Tabela 17. Koeficijenti regresione jednačine za stepen želatinizacije skroba u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-137,5610	
Linearni		
A: granulacija mliva	55,3670	0,3672
B: debljina matrice	3,8727	0,0009
C: sadržaj vode materijala	7,5197	0,0112
Interakcije		
AC	-2,8486	0,0073
BC	-0,0976	0,2415
Kvadratni		
A ²	-2,6424	0,2237
B ²	-0,0311	0,1605



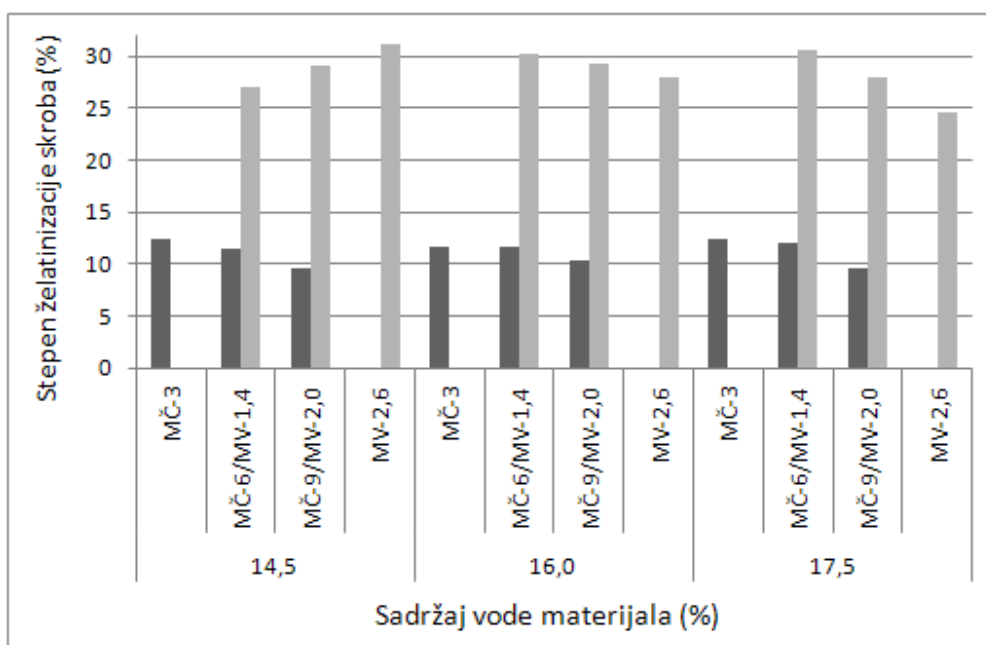
Slika 44. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na stepen želatinizacije skroba u drugoj fazi istraživanja



Slika 45. Stepen želatinizacije skroba u drugoj fazi istraživanja

Ukoliko se poredi stepen želatinizacije skroba pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, pri istim parametrima peletiranja (zazor valjci-matrica 0,30 mm i debljina matrice 24 mm), može se primetiti da su vrednosti dobijene pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima oko 2,5 puta veće, bez obzira na granulaciju (sl. 46). To može biti objašnjeno specifičnom površinom mliva koja je znatno veća kod mliva dobijenih na mlinu čekićaru pa je, pri istoj količini dodate vode, mlivo dobijeno na mlinu sa valjcima bilo ravnomernije navlaženo što je

rezultovalo većim stepenom želatinizacije škroba. Može se pretpostaviti da su kod mliva dobijenog na čekićaru sitne čestice (koje su prisutne u većoj količini nego kod mliva dobijenih na mlinu sa valjcima) apsorbovale veći deo dodate vode što je uticalo na neravnomernu raspodelu vode po česticama, a time i na manji stepen želatinizacije škroba tokom peletiranja. Mliva MČ-9 i MV-1,4 su imala približno istu vrednost SP-e, a takođe i temperatura peletiranja je bila podjednaka, pa bi se moglo pretpostaviti da će se dobiti i sličan stepen želatinizacije škroba. Međutim, približan broj čestica po jedinici mase mliva MČ-9 (15841 g^{-1}) bio je skoro dvostruko veći nego kod mliva MV-1,4 (8303 g^{-1}) što može biti razlog ravnomernije raspodele vode i većeg stepena želatinizacije škroba pri peletiranju mliva MV-1,4.



Slika 46. Stepen želatinizacije škroba pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu čekićaru (MČ) i mlinu sa valjcima (MV) (zazor valjci-matrica: 0,30 mm i debljina matrice: 24 mm)

4.5. FIZIČKE KARAKTERISTIKE PELETA

Od parametara fizičkog kvaliteta peleta određivani su tvrdoća, stepen otiranja i nasipna masa peleta. Rezultati dobijeni variranjem parametara procesa peletiranja prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu prikazani su u tabeli 18, za prvu fazu istraživanja (u kojoj je varirana krupnoća mlevenja kukuruza na mlinu čekićaru, zazor valjaka i matrice pelet prese i sadržaj vode materijala koji se vodi na peletiranje), i u tabeli 19, za drugu fazu (u kojoj je varirana krupnoća mlevenja kukuruza na mlinu sa valjcima, debljina matrice pelet prese i sadržaj vode materijala koji se vodi na peletiranje).

Tabela 18. Fizičke karakteristike peleta dobijene u prvoj fazi istraživanja pri kombinacijama upravljivih parametara procesa peletiranja variranih prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu

Upravljivi parametri			Fizičke karakteristike peleta		
A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	tvrdoća (kg)	stepen otiranja (%)	nasipna masa (kg/m ³)
3	2,00	16,0	16,60	3,86	592,43
6	0,30	14,5	10,68	11,21	609,62
6	1,15	16,0	11,01	6,15	600,27
6	1,15	16,0	10,75	6,04	602,13
6	2,00	17,5	17,21	3,19	600,22
9	1,15	14,5	11,91	6,30	593,55
9	1,15	17,5	12,09	6,40	595,11
6	2,00	14,5	20,05	3,15	609,30
3	0,30	16,0	9,35	10,17	600,44
3	1,15	14,5	14,36	4,65	613,27
6	1,15	16,0	10,56	6,04	604,90
3	1,15	17,5	11,80	5,71	607,38
9	0,30	16,0	9,80	20,75	561,17
9	2,00	16,0	16,61	4,05	576,84
6	0,30	17,5	10,48	12,29	585,64

Tabela 19. Fizičke karakteristike peleta dobijene u drugoj fazi istraživanja pri kombinacijama upravljivih parametara procesa peletiranja variranih prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu

Upravljivi parametri			Fizičke karakteristike peleta		
A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	tvrdoća (kg)	stepen otiranja (%)	nasipna masa (kg/m ³)
2,6	30	17,5	12,55	5,18	570,03
2,0	24	14,5	10,09	6,77	578,98
2,6	36	16,0	15,09	3,11	586,89
2,6	24	16,0	8,63	8,10	577,38
1,4	24	16,0	9,54	8,28	584,88
1,4	36	16,0	14,16	3,95	577,17
1,4	30	17,5	11,33	5,83	586,69
2,0	30	16,0	12,77	5,40	588,01
2,0	24	17,5	8,87	9,32	573,96
2,0	30	16,0	12,10	5,85	584,13
2,6	30	14,5	13,53	5,13	563,44
2,0	30	16,0	14,25	4,51	581,91
1,4	30	14,5	12,69	4,71	564,51
2,0	36	17,5	12,94	3,87	590,77
2,0	36	14,5	15,34	3,06	599,06

4.5.1. Tvrdoća peleta

Kako bi pelete mogle podneti pritisak tokom skladištenja većih količina u silo ćelijama, značajno je da poseduju određenu tvrdoću. Tvrdoća peleta je značajna i u ishrani životinja, jer suviše velika tvrdoća može dovesti do problema pri konzumaciji hrane, pre svega kod svinja, koje radije konzumiraju mekše pelete.

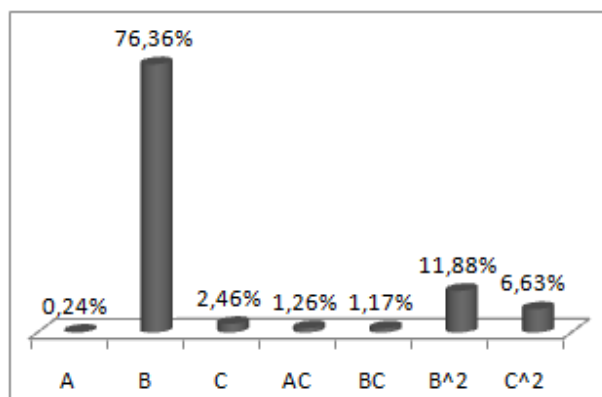
4.5.1.1. Tvrdoća peleta u prvoj fazi istraživanja

Vrednosti tvrdoće peleta u prvoj fazi istraživanja kretale su od 9,35 do 20,05 kg (tab. 18). Na osnovu ovih vrednosti, primenom nelinearne regresione analize, dobijen je model sa vrlo visokim koeficijentom R^2 od 0,989, kao i sa LoF vrednošću koja nije bila značajna

($p(\text{LoF}) = 0,1492$). Dominirao je uticaj zazora valjci-matrica, linearni i kvadratni uticaj sadržaja vode je takođe bio značajan, a postojala je i značajna interakcija granulacije i sadržaja vode, kao i zazora i sadržaja vode (tab. 20, sl. 47).

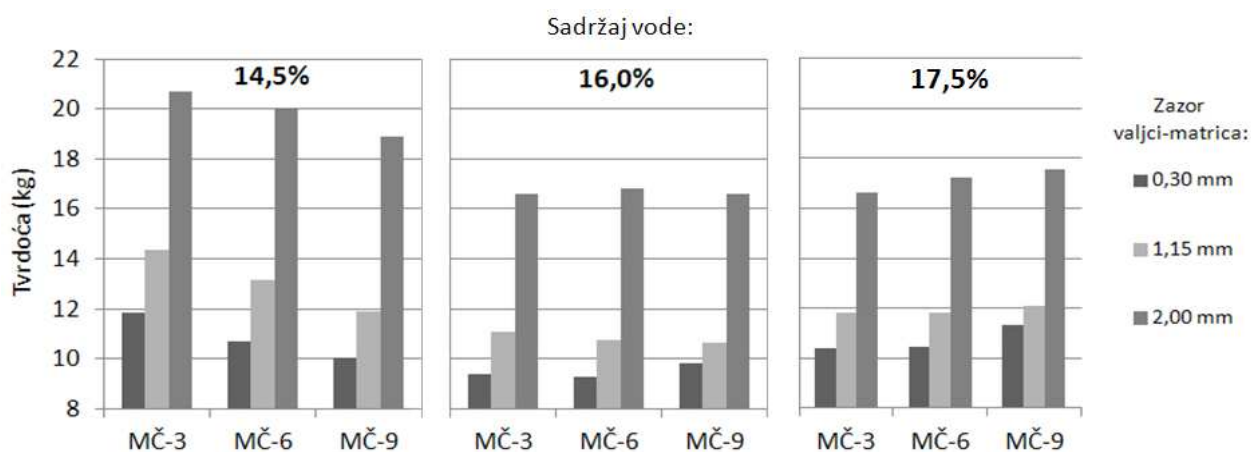
Tabela 20. Koeficijenti regresione jednačine za tvrdoću peleta u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	207,9468	
Linearni		
A: granulacija mliva	-2,5106	0,2588
B: zazor valjci-matrica	5,7600	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	-23,9513	0,0056
Interakcije		
AC	0,1525	0,0254
BC	-0,5170	0,0298
Kvadratni		
B ²	3,0206	< 0,0001
C ²	0,7244	0,0003



Slika 47. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na tvrdoću peleta u prvoj fazi istraživanja

Tvrdoća peleta je bila najveća pri zazoru 2,00 mm (sl. 48). Pri zazoru 1,15 mm tvrdoća je bila veća u poređenju sa zazorom 0,30 mm, pri svim sadržajima vode i granulacijama mliva, ali znatno manja nego pri zazoru 2,00 mm. Ovakvi rezultati bili su očekivani s obzirom na rezultate temperature peletiranja i potrošnje energije pelet prese, koje su bile najveće pri zazoru 2,00 mm i koje su ukazivale na visoke sile trenja i pritiska u kanalima matrice. To je dovelo do jačeg povezivanja čestica i veće tvrdoće peleta. Povećanje tvrdoće peleta sa povećanjem zazora utvrdio je i Payne (1995), kao i Thomas i sar. (1997).



Slika 48. Tvrdoća peleta u prvoj fazi istraživanja

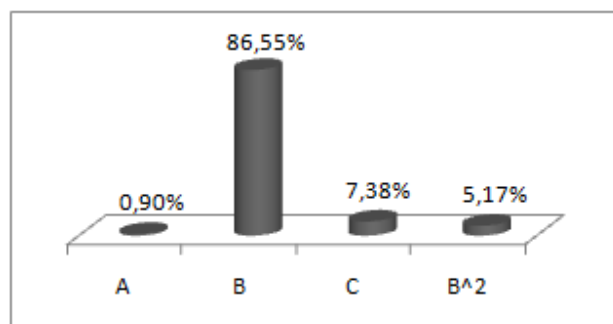
Pri najnižem sadržaju vode materijala bilo je najslabije lubrikativno dejstvo vode pa time i najveće trenje i pritisak u kanalima matrice. Takvi uslovi doveli su do smanjenja rastojanja između čestica i njihovog boljeg povezivanja delovanjem interakcija čvrsto-čvrsto. Ovaj način povezivanja dolazi do izražaja kada su rastojanja između čestica dovoljno mala. Usled toga, tvrdoća peleta je bila najveća pri najnižem sadržaju vode. S druge strane, pri povećanju količine dodate vode, usled manjeg trenja i pritiska, rastojanja između čestica se povećavaju i smanjuju se interakcije čvrsto-čvrsto, ali se povećava intenzitet povezivanja čestica delovanjem kapilarnih sila (Thomas i van der Poel, 1996; Thomas i sar., 1997; 1998). Prethodno navedeno ukazuje da interakcije čvrsto-čvrsto više doprinose tvrdoći peleta od kapilarnih sila.

4.5.1.2. Tvrdoća peleta u drugoj fazi istraživanja

U drugoj fazi istraživanja tvrdoća peleta se kretala u rasponu od 8,63 do 15,34 kg (tab. 19), a dobijeni model je dobro opisivao eksperimentalne podatke ($R^2 = 0,920$; $p(\text{LoF}) = 0,9169$). Od primenjenih parametara procesa peletiranja najznačajniji uticaj je imala debljina matrice (tab. 21, sl. 49). Značajan uticaj, iako mnogo manji, imao je i sadržaj vode materijala, dok uticaj granulacije mliva nije bio značajan.

Tabela 21. Koeficijenti regresione jednačine za tvrdoću peleta u drugoj fazi istraživanja

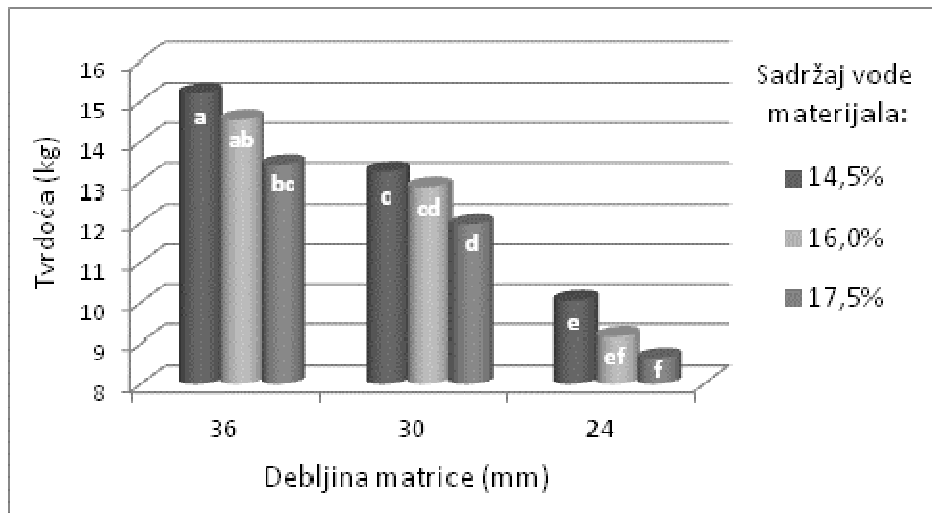
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	15,0312	
Linearni		
A: granulacija mliva	0,5403	0,3338
B: debljina matrice	52,0431	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	4,4400	0,0154
Kvadratni		
B ²	3,1100	0,0348



Slika 49. Intenzitet parametara procesa peletiranja na tvrdoću peleta u drugoj fazi istraživanja

Sa povećanjem debljine matrice povećavala se tvrdoća peleta (sl. 50) što je u skladu sa rezultatima temperature peletiranja i specifične potrošnje energije pelet prese, koji predstavljaju indikatore intenziteta sila trenja i pritiska u kanalima matrice. Pored većeg pritiska, povećanje debljine matrice dovodi do dužeg zadržavanja materijala u kanalima matrice, što takođe doprinosi većoj tvrdoći dobijenih peleta (Lowe, 2005). I kod Čolović-a i sar. (2010) takođe je utvrđeno povećanje tvrdoće peleta sa povećanjem debljine matrice. Kao i u prvoj fazi istraživanja, povećanje

sadržaja vode materijala koji se vodi na peletiranje dovelo je do opadanja tvrdoće peleta, pri čemu je razlika statistički značajna ukoliko se porede tvrdoće pri najvećem i najmanjem sadržaju vode.



Slika 50. Tvrdoća peleta u drugoj fazi istraživanja (različita slova ukazuju na značajno različite vrednosti ($p < 0,05$))

4.5.2. Step en otiranja peleta

Step en otiranja peleta predstavlja pokazatelj njihovog fizičkog kvaliteta, odnosno izražava njihovu otpornost prema abraziji do koje neminovno dolazi prilikom manipulisanja peletama. Određuje se merenjem udela prašine koja nastaje pri mehaničkom ili pneumatskom tretmanu peleta u odgovarajućem uređaju u kome se simuliraju naprezanja kojima su pelete izložene tokom transporta, skladištenja i sl. Što je step en otiranja niži, kvalitet peleta je bolji, odnosno njihova otpornost prema abraziji je veća. Iako ne postoje definisana ograničenja u pogledu vrednosti step ena otiranja, u praksi se teži da vrednost ovog pokazatelja bude ispod 10%.

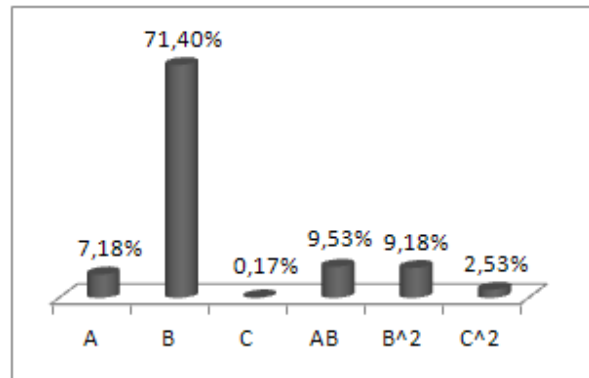
4.5.2.1. Step en otiranja peleta u prvoj fazi istraživanja

U prvoj fazi istraživanja step en otiranja peleta kretao se u širokom rasponu od 3,15 do 20,75% (tab. 18). Na osnovu eksperimentalnih podataka dobijen je model sa visokom vrednošću koeficijenta R^2 od 0,941, dok LoF vrednost nije bila značajna, ali je bila blizu granice značajnosti ($p(\text{LoF}) = 0,0589$). Značajnost regresionih koeficijenata (tab. 22) i relativni intenzitet njihovog uticaja (sl. 51) ukazuju da je dominirao uticaj zazora (linearni i kvadratni), slično kao i kod tvrdoće

peleta. Takođe, postojao je i značajan uticaj sadržaja vode materijala, kao i značajna interakcija granulacije mliva i zazora.

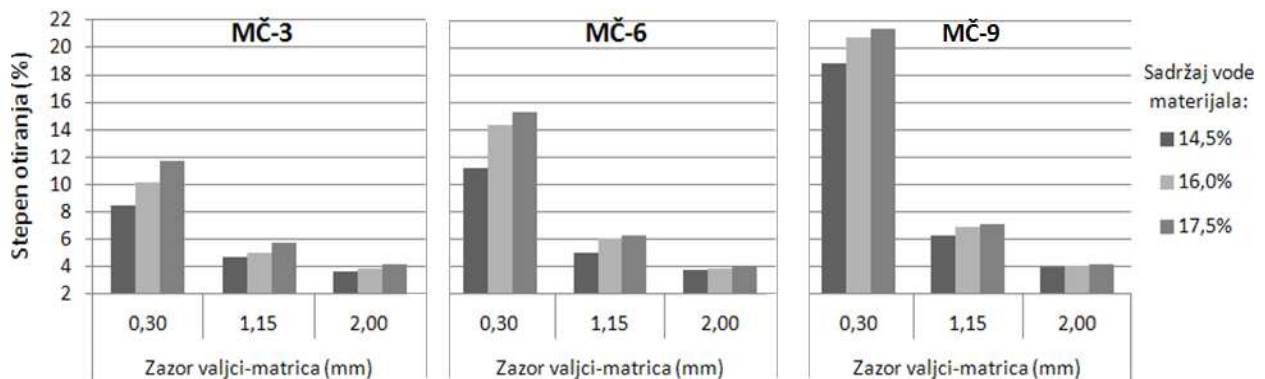
Tabela 22. Koeficijenti regresione jednačine za stepen otiranja peleta u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-152,5070	
Linearni		
A: granulacija mliva	1,7031	0,0163
B: zazor valjci-matrica	-8,2250	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	39,9063	0,0394
Interakcije		
AB	-1,0188	0,0082
Kvadratni		
B ²	3,6623	0,0090
C ²	0,6169	0,1098



Slika 51. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na stepen otiranja peleta u prvoj fazi istraživanja

Stepen otiranja peleta bio je izrazito najveći pri zazoru 0,30 mm i smanjivao sa povećanjem zazora valjci-matrica (sl. 52). Slične rezultate su dobili i *Robohm i Apelt (1989)*, *Robohm (1992)*, *Payne (1995)* i *Miladinović i Svihus (2010)*. Povećanje zazora, odnosno debljine prekompakcionog sloja, dovodi do povećanja pritiska u peletiranom materijalu, a time i do boljeg povezivanja čestica.

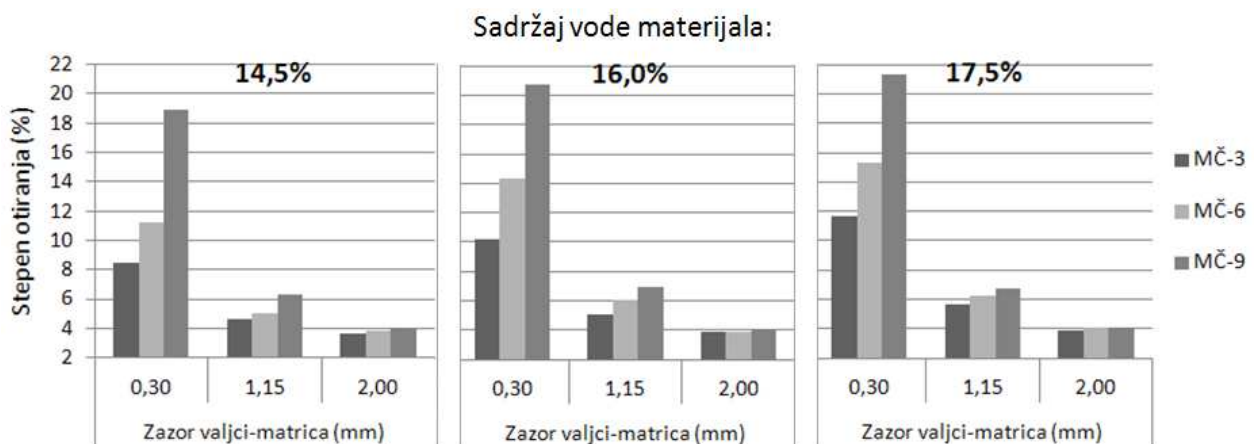


Slika 52. Uticaj sadržaja vode materijala na stepen otiranja peleta pri konstantnoj granulaciji mliva i zazoru valjci-matrica u prvoj fazi istraživanja

Sa smanjenjem sadržaja vode peletiranog materijala postojao je trend smanjivanja stepena otiranja peleta pri svim vrednostima zazora valjci-matrica i svim granulacijama mliva. To je posledica većeg trenja i pritiska u kanalima matrice pri manjem sadržaju vode, usled čega se smanjuju rastojanja između čestica i dolazi do njihovog boljeg povezivanja delovanjem interakcija čvrsto-čvrsto. Stoga se može pretpostaviti, kao i u slučaju tvrdoće peleta, da interakcije čvrsto-

čvrsto doprinose boljem povezivanju čestica i manjem stepenu otiranja peleta u poređenju sa kapilarnim silama čije se dejstvo povećava sa povećanjem sadržaja vode. Razlike u stepenu otiranja peleta pri različitim sadržajima vode smanjivale su se sa povećanjem zazora valjci-matrica, tako da pri zazoru od 2,00 mm razlike gotovo i ne postoje.

Pri povećanju granulacije mliva stepen otiranja peleta se povećavao (sl. 53), što je u skladu sa rezultatima *Svihus-a i sar. (2004b)*. Razlike stepena otiranja peleta dobijene pri peletiranju mliva različite granulacije smanjivale su se sa povećanjem zazora, tako da pri zazoru 2,00 mm gotovo da nije ni bilo razlika. Prema *Thomas-u i sar. (1998)* pelete se lako lome na mestima na kojima se u strukturi peleta nalaze krupne čestice. Takva mesta se nazivaju slabe tačke. U istraživanju u okviru ove disertacije je utvrđeno da krupnija granulacija mliva, kao i manji zazor, doprinose većem broju krupnih čestica u peletama. Takve pelete imaju veći broj slabih tačaka i veći je stepen otiranja u poređenju sa peletama dobijenim od sitnijeg mliva ili dobijenih pri većem zazoru. Pri najmanjem zazoru je takođe i najmanji pritisak u kanalima matrice što takođe doprinosi slabijem povezivanju čestica. Sa povećanjem zazora formira se prekompakcioni sloj i povećava pritisak u kanalima matrice pa se krupne čestice usitnjavanju u većem stepenu, a i bolje međusobno povezuju usled intenzivnijih interakcija čvrsto-čvrsto.



Slika 53. Uticaj granulacije mliva na stepen otiranja peleta pri konstantnom sadržaju vode materijala i zazoru valjci-matrica u prvoj fazi istraživanja

U literaturi se mogu pronaći prilično kotradiktorni podaci o uticaju granulacije peletiranog materijala na kvalitet peleta. Poređenjem stepena otiranja peleta dobijenih peletiranjem krupnijeg i sitnijeg mliva, *Svihus i sar. (2004b)* su utvrdili lošiji kvalitet peleta pri peletiranju krupnijeg materijala. Slično su utvrdili i *Angulo i sar. (1996)*, koji su pri povećanju veličine otvora sita mlina čekićara sa 3 na 6 mm dobili pelete značajno lošijeg kvaliteta. S druge strane, *Amerah i sar. (2007b)*

nisu utvrdili razlike u stepenu otiranja pri peletiranju materijala mlevenog na čekićaru sa veličinom otvora sita od 4 mm i 7 mm, dok su *Reece i sar. (1986a; 1986b)* dobili bolji kvalitet peleta pri peletiranju krupnije mlevenog materijala. Pri peletiranju smeša sa kukuruzom različite granulacije (srednji prečnik: 1023, 794 i 551 μm), *Stivens (1987)* nije dobio značajne razlike u stepenu otiranja peleta (10,1; 11,2 i 9,7%). Mogući razlog kontradiktornih rezultata su nedovoljno definisani parametri procesa peletiranja, a pre svega zazor valjci-matrica, koji u istraživanjima najčešće nije naveden, a kao što se može videti iz rezultata dobijenih u okviru ove disertacije, zazor ima veliki uticaj na stepen otiranja peleta.

Ukoliko se porede rezultati za udeo prašine (sl. 43) sa rezultatima stepena otiranja peleta, može se primetiti isti trend vrednosti. Koeficijent korelacije (r) između ovih parametara je iznosio 0,728 što ukazuje na njihovu jaku povezanost (*Petz, 2004*). Prema tome, udeo prašine u velikoj meri je dobro predvideo kvalitet peleta i može predstavljati parametar koji u toku same proizvodnje ukazuje da je potrebno izvršiti korekcije određenih parametara procesa peletiranja kako bi proizvedene pelete bile zadovoljavajućeg kvaliteta.

Metode određivanja stepena otiranja su empirijske, odnosno ne mere određenu osobinu (npr. tvrdoću ili elastičnost), što bi sa naučnog stanovišta bilo poželjnije (*Fahrenholz, 2012*). Pri poređenju rezultata tvrdoće i stepena otiranja peleta dobijen je koeficijent korelacije od -0,646, što prema *Petz-u (2004)* predstavlja značajnu povezanost upoređivanih veličina. *Wood (1987)* je utvrdio da je tvrdoća peleta povezana logaritamski sa stepenom otiranja, pri čemu je koeficijent korelacije bio vrlo visok i iznosio je 0,94. Iz ovog se može zaključiti da bi se tvrdoća mogla koristiti za procenu kvaliteta peleta u pogledu stepena otiranja.

4.5.2.2. Stepen otiranja peleta u drugoj fazi istraživanja

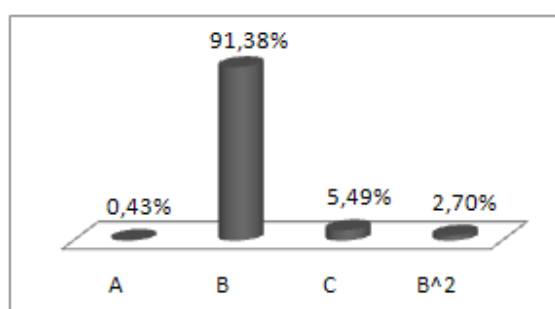
Na osnovu eksperimentalnih vrednosti stepena otiranja peleta u drugoj fazi istraživanja dobijen je adekvatan model ($R^2 = 0,922$; $p(\text{LoF}) = 0,8024$). Značajnost regresionih koeficijenata (tab. 23) i relativni intenzitet njihovog uticaja (sl. 54) ukazuju da je odlučujući uticaj na tvrdoću peleta imala debljina matrice. Takođe, postojao je i značajan uticaj sadržaja vode peletiranog materijala.

U drugoj fazi istraživanja stepen otiranja peleta nije prelazio 10% (tab. 19). Sa smanjenjem sadržaja vode materijala, isto kao i u prvoj fazi istraživanja, dolazilo je do smanjenja stepena otiranja peleta pri svim debljinama matrice i granulacijama mliva (sl. 55) što je posledica većeg

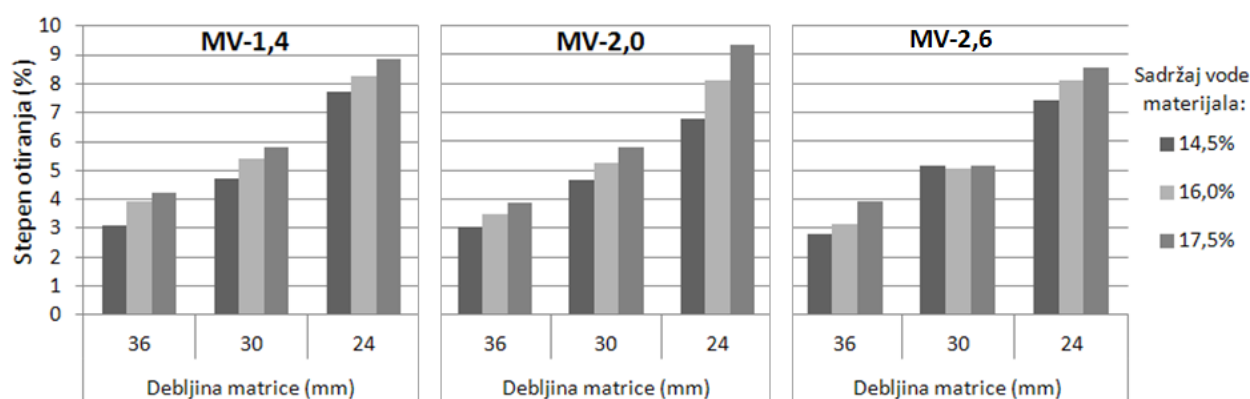
trenja i pritiska u kanalima matrice pri manjem sadržaju vode i time boljeg povezivanja čestica putem interakcija čvrsto-čvrsto. Sa povećanjem debljine matrice očekivano je dolazilo do smanjivanja stepena otiranja peleta kao posledica povećanja trenja i pritiska u kanalima matrice. Ovakvi rezultati u skladu su sa rezultatima za temperaturu peletiranja i specifičnu potrošnju energije pelet prese, koji predstavljaju indikatore sile trenja koja deluje u kanalima matrice. I u istraživanju *Miladinovića i Svihusa (2009)* došlo je do smanjenja stepena otiranja sa povećanjem debljine matrice.

Tabela 23. Koeficijenti regresione jednačine za stepen otiranja peleta u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	25,7699	
Linearni		
A: granulacija mliva	-0,2610	0,4209
B: debljina matrice	-1,3522	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	0,3771	0,0126
Kvadratni		
B ²	0,0161	0,0595



Slika 54. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na stepen otiranja peleta u drugoj fazi istraživanja



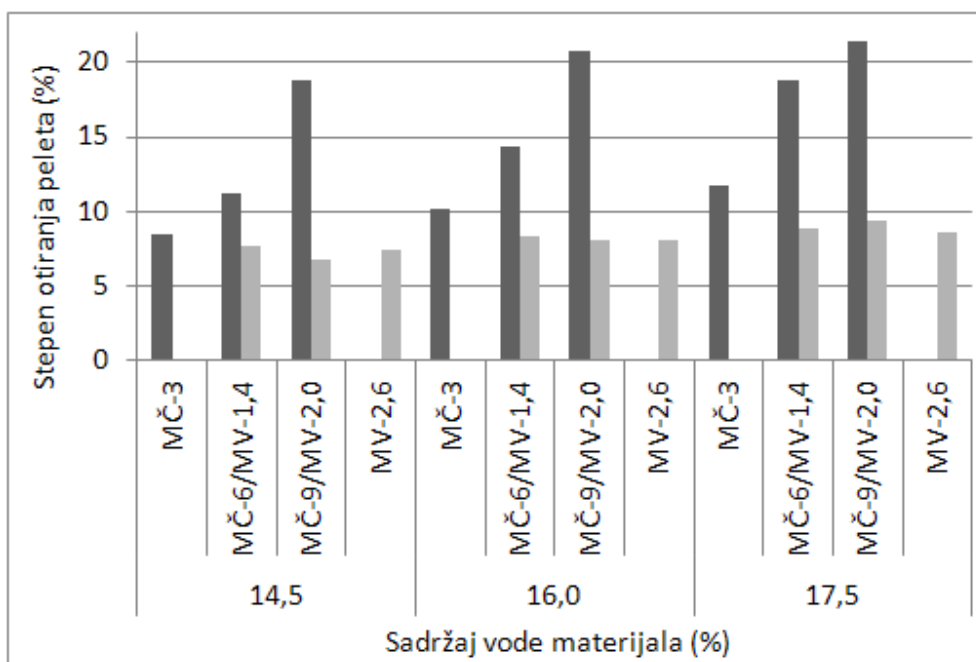
Slika 55. Stepen otiranja peleta u drugoj fazi istraživanja

Iako su na mlinu sa valjcima proizvedene krupnije granulacije u poređenju sa mlivima iz prve faze istraživanja (kada je kukuruz mleven na mlinu čekićaru), stepen otiranja peleta nije prelazio 10%, čak ni pri peletiranju najkrupnije granulacije (MV-2,6) i pri upotrebi najtanje matrice.

I u drugoj fazi istraživanja je postojala korelacija između tvrdoće i stepena otiranja, pri čemu je dobijeni koeficijent korelacije ($r = -0,950$) ukazivao na vrlo jaku povezanost između ovih veličina.

4.5.2.3. Poređenje stepena otiranja peleta dobijenih pri različitim granulacijama mliva u prvoj i drugoj fazi istraživanja

Ukoliko se posmatraju rezultati za stepen otiranja peleta dobijeni u prvoj i drugoj fazi istraživanja, pri istim parametrima peletiranja (debljina matrice 24 mm i zazor valjci-matrica 0,30 mm), vidi se da je bolji kvalitet postignut pri peletiranju mliva dobijenog na mlinu sa valjcima (sl. 56).



Slika 56. Poređenje stepena otiranja peleta dobijenih pri peletiranju mliva različite granulacije u prvoj i drugoj fazi istraživanja (debljina matrice: 24 mm, zazor valjci-matrica: 0,30 mm)

Krupnije mlevenje na mlinu čekićaru uzrokovalo je povećavanja stepena otiranja proizvedenih peleta, što se objašnjava većim brojem slabih tačaka u strukturi peleta usled većeg prisustva najkrupnijih čestica (> 2500 μm). Krupne čestice dobijene na mlinu sa valjcima su znatno nepravilnijeg oblika i lakše se usitnjavaju tokom peletiranja u poređenju sa sferičnijim krupnim česticama dobijenim na mlinu čekićaru. Zato je udeo čestica većih od 2500 μm bio veći kada je peletirano mlivo MČ-9, u poređenju sa tretmanom MV-2,6 (ovi rezultati će biti prikazani kasnije). Pri peletiranju mliva dobijenog na mlinu sa valjcima stepen otiranja je bio niži i prilično ujednačen pri svim granulacijama i sadržajima vode. S obzirom da su krupne čestice dobijene na mlinu sa valjcima znatno nepravilnijeg oblika u poređenju sa krupnim česticama dobijenim na mlinu čekićaru, može se pretpostaviti da se takve čestice lakše povezuju sa okolnim sitnijim česticama u strukturi peleta u poređenju sa krupnim česticama dobijenim na mlinu čekićaru. Dakle, pakovanje i

povezivanja čestica u peletama pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima je bilo bolje. Usled toga pelete su imale manji stepen otiranja. Takođe, manja specifična površina i manji broj čestica po jedinici mase kod mliva dobijenih na mlinu sa valjcima, doprinela je ravnomernijoj raspodeli dodate vode po česticama mliva. Voda na površini čestica doprinosi njihovom boljem međusobnom povezivanju delovanjem kapilarnih sila, a kapilarne sile doprinose elastičnosti peleta čime se smanjuje stepen njihovog otiranja. Pored toga, može se pretpostaviti da je ravnomernija raspodela vode po česticama omogućila želatinizaciju skroba na njihovoj površini što doprinosi njihovom boljem povezivanju. Vrednosti stepena želatinizacije skroba bile su znatno više u drugoj fazi istraživanja što takođe može biti jedan od razloga boljeg kvaliteta peleta (manjeg stepena otiranja) pri peletiranju materijala dobijenog na mlinu sa valjcima.

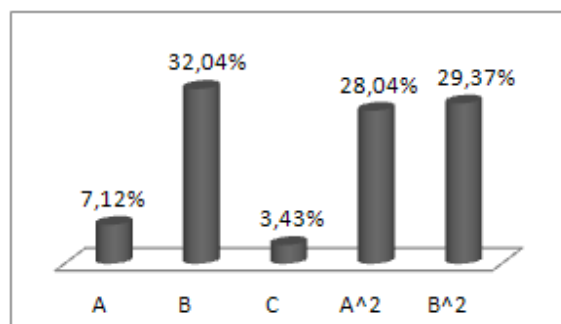
4.5.3. Nasipna masa peleta

Nasipna masa, koja predstavlja specifičnu zapreminsku masu peleta, jednostavno se određuje eksperimentalno i može ukazati na gustinu peleta, odnosno na način „pakovanja“ čestica u strukturi peleta. U proizvodnom procesu, niže vrednosti ovog pokazatelja od uobičajenih, ukazuju na probleme u proizvodnom procesu.

U prvoj fazi istraživanja, na osnovu eksperimentalnih vrednosti nasipne mase peleta je dobijen adekvatan model ($R^2 = 0,904$; $p(\text{LoF}) = 0,1035$) pri čemu je najznačajniji bio linearni uticaj granulacije mliva, ali su i kvadratni uticaji sva tri varirana parametra je bili značajni (tab. 24; sl. 57).

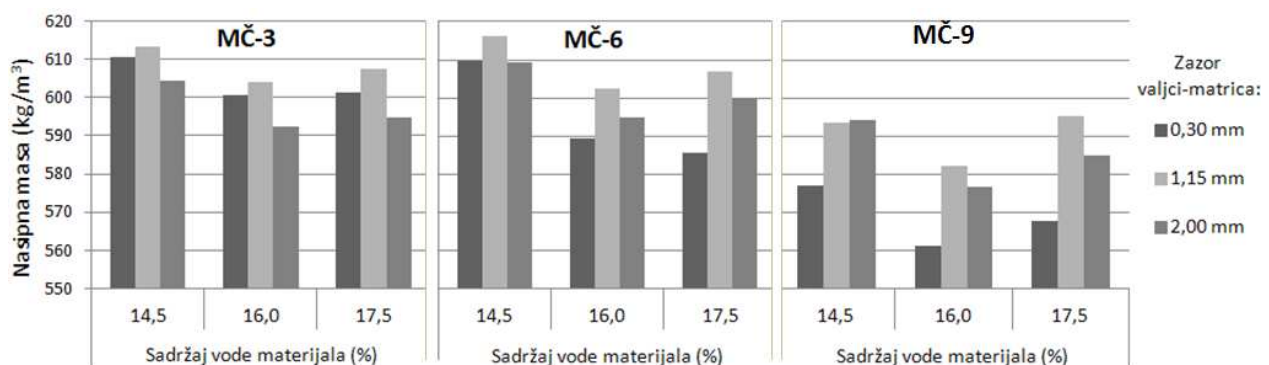
Tabela 24. Koeficijenti regresione jednačine za nasipnu masu peleta u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	1674,8522	
Linearni		
A: granulacija mliva	6,0999	0,0014
B: zazor valjci-matrica	22,4697	0,2393
C: sadržaj vode materijala	-133,7135	0,0643
Interakcije		
AB	2,3214	0,0902
Kvadratni		
A ²	-1,0323	0,0210
B ²	-14,4235	0,0127
C ²	4,0812	0,0221

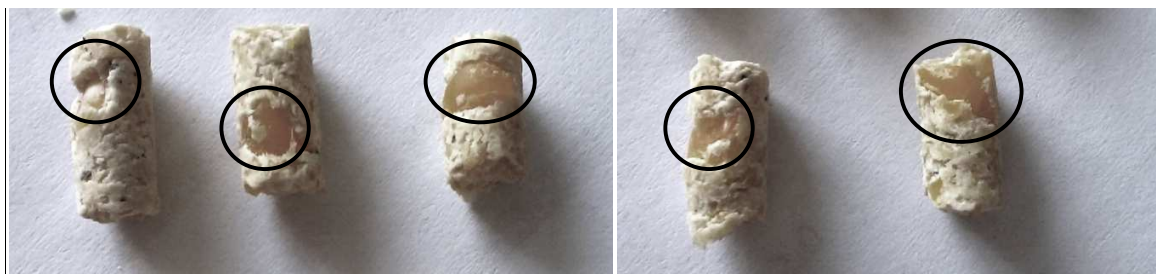


Slika 57. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na nasipnu masu peleta u prvoj fazi istraživanja

Najniže vrednosti nasipne mase peleta dobijene su peletiranjem najkrupnijeg mliva (MČ-9), pri svim zazorima i sadržajima vode materijala, dok su razlike nasipnih masa dobijene peletiranjem mliva MČ-3 i MČ-6 bile uglavnom male (sl. 58). Ovo može biti objašnjeno većim udelom krupnih čestica u mlivu MČ-9, usled čega se formira veći broj slabih tačaka u strukturi peleta. Takve pelete su osetljive i lako dolazi do oštećenja njihovog površinskog sloja što rezultuje smanjenjem nasipne mase peleta. Takođe, pri peletiranju krupnije mlevenog materijala formira se veći broj vazdušnih međuprostora u strukturi peleta, što doprinosi smanjenju nasipne mase (Koster, 2003). Pelete dobijene peletiranjem mliva MČ-9 pri zazoru 0,30 mm već na izlazu iz matrice peletirke imale su veliki broj oštećenja na površini, što se dodatno povećavalo tokom njihovog hlađenja, usled kretanja i sudaranja u blago fluidizovanom sloju hladnjaka. Na slici 59 može se videti hrapava površina ovih peleta, s velikim brojem oštećenja, a takođe se mogu videti krupne čestice uklopljene u strukturu peleta pri čemu su uočljiva oštećenja oko krupnih čestica. Najviše vrednosti nasipne mase peleta, pri svim granulacijama mliva i zazorima, dobijene su pri sadržaju vode od 14,5%. To može biti posledica veće sile trenja usled nižeg sadržaja vode, što dovodi do povećanja pritiska u kanalima matrice, a time i povećanja gustine i nasipne mase.



Slika 58. Nasipna masa peleta u prvoj fazi istraživanja



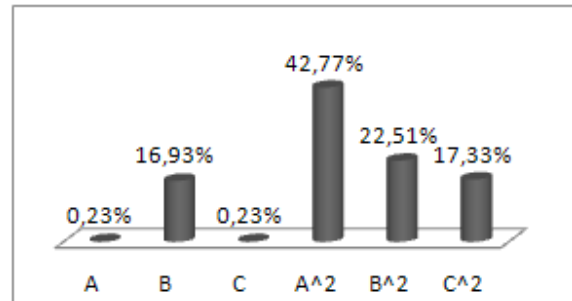
Slika 59. Pelete dobijene od mliva MČ-9, pri zazoru valjci-matrica 0,30 mm i sadržaju vode 16,0%

U drugoj fazi istraživanja, model dobijen na osnovu eksperimentalnih podataka za nasipnu masu peleta imao je vrednost koeficijenta R^2 od 0,785, a značajnost LoF vrednosti bila je 0,1701.

Najznačajniji uticaj na nasipnu masu peleta imala je granulacija mliva, a potom debljina matrice (tabela 25, sl. 60).

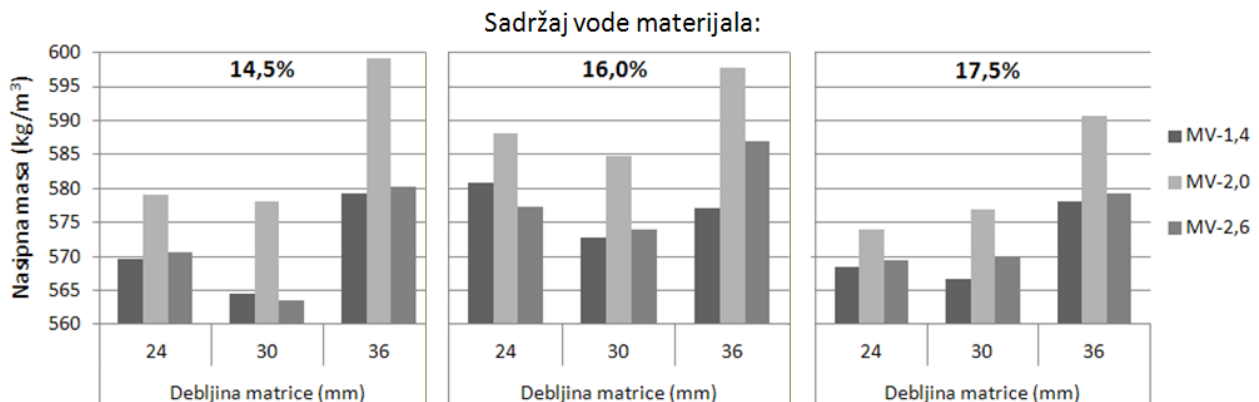
Tabela 25. Koefficienti regresione jednačine za nasipnu masu peleta u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-175,3937	
Linearni		
A: granulacija mliva	126,6669	0,8068
B: debljina matrice	-12,8759	0,0610
C: sadržaj vode materijala	102,0691	0,8047
Kvadratni		
A ²	-31,4329	0,0085
B ²	0,2280	0,0363
C ²	-3,2015	0,0586



Slika 60. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na nasipnu masu peleta u drugoj fazi istraživanja

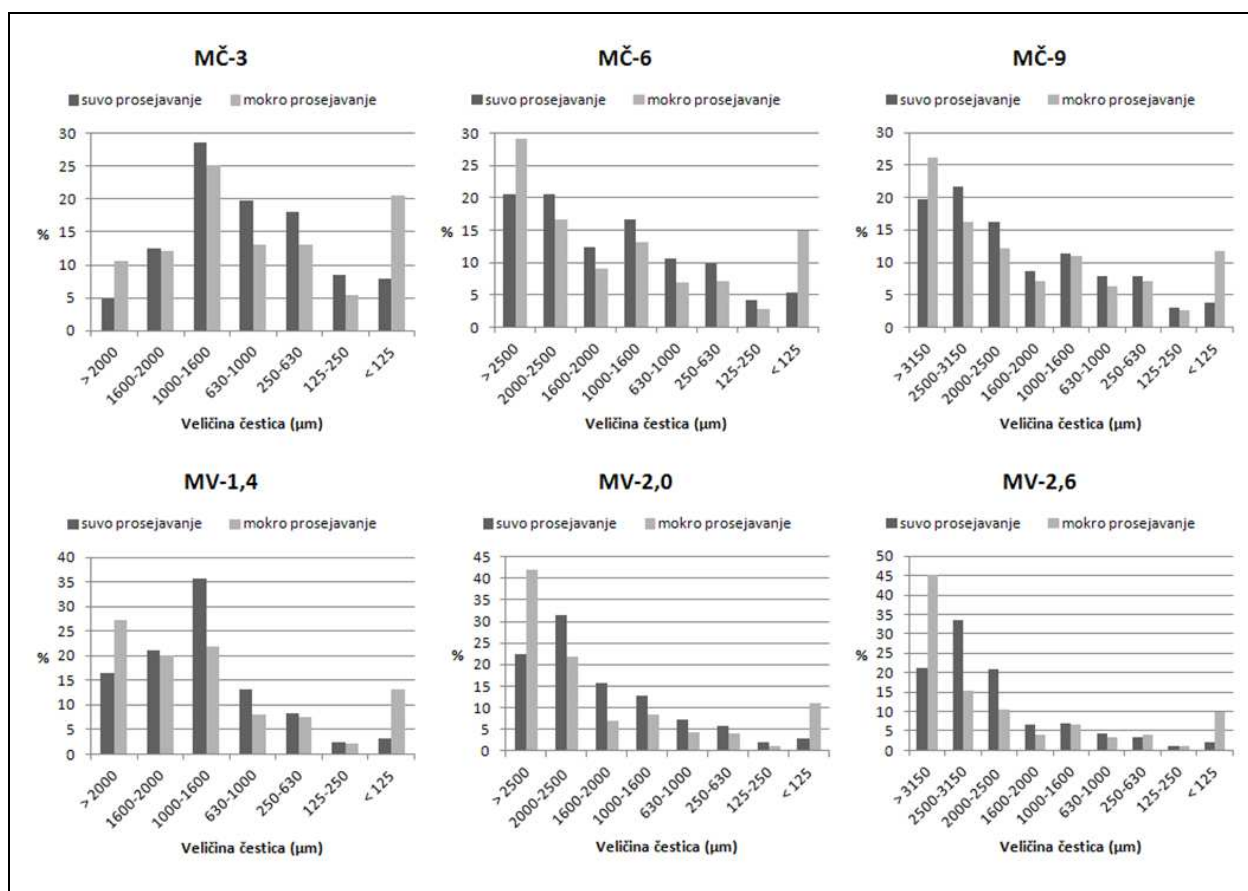
Na osnovu eksperimentalnih vrednosti i vrednosti dobijenih primenom modela grafički je prikazana zavisnost nasipne mase peleta od variranih parametara. Najveća nasipna masa dobijena je primenom najdeblje matrice (36 mm) (sl. 61) usled najvećeg trenja i pritiska u kanalima matrice. Pri peletiranju najsitnijeg i nakrupnijeg mliva dobijene su slične vrednosti nasipne mase, a najveće vrednosti su dobijene pri peletiranju mliva srednje granulacije (MV-2,0). Ukoliko se uporede vrednosti geometrijskih standardnih devijacija (GSD) mliva dobijenih na mlinu sa valjcima (MV-1,4: 2,17 μm ; MV-2,0: 2,27 μm i MV-2,6: 2,09 μm) može se videti da je najveća GSD-ja upravo dobijena kod mliva srednje granulacije. Veća GSD ukazuje na veću širinu raspodele veličine čestica, sa više najkрупnijih i najsitnijih čestica. Ovo omogućuje bolje pakovanje čestica u toku peletiranja, kada manje čestice popunjavaju međuprostore između većih, što dovodi do veće gustine peleta, sa manje vazdušnih međuprostora pa se dobijaju pelete veće nasipne mase.



Slika 61. Nasipna masa peleta u drugoj fazi istraživanja

4.6. GRANULACIJA PELETIRANOG MATERIJALA

Pre rezultata granulacije peletiranog materijala biće prikazani rezultati mokrog prosejavanja nepeletiranih mliva (sl. 62). Naime, poznato je da pri mokrom prosejavanju, usled rastvaranja komponenata rastvorljivih u vodi, kao i usled bubrenja čestica, dolazi do promene raspodele veličine čestica u odnosu na materijal pre mokrog prosejavanja (Wolf i sar., 2010; Klausning, 2011). To je potrebno uzeti u obzir prilikom poređenja granulacije peletiranog materijala, koja se određuje mokrim prosejavanjem, sa granulacijom mliva pre peletiranja. Zato je urađeno mokro prosejavanje nepeletiranog usitnjenog kukuruza kako bi se mogla izvesti adekvatna poređenja.



Slika 62. Poređenje rezultata određivanja granulacije nepeletiranog kukuruznog mliva dobijenih pri suvom i mokrom prosejavanju

Maseni udeo najkrupnije frakcije čestica (u daljem tekstu pod terminom udeo podrazumevaće se maseni udeo posmatrane frakcije čestica) kod mliva dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima (frakcija > 2000 µm kod mliva MČ-3 i MV-1,4; odnosno frakcija > 2500 µm kod mliva MČ-6 i MV-2,0 i frakcija > 3150 µm kod mliva MČ-9 i MV-2,6) bio je veći pri mokrom nego pri suvom prosejavanju. To je posledica bubrenja čestica, usled čega pojedine sitnije čestice

prelaze u najkrupniju frakciju. Takođe, udeo najsitnije frakcije čestica ($< 125 \mu\text{m}$), dobijen pri mokrom prosejavanju, znatno je veći nego pri suvom prosejavanju što je posledica rastvaranja. Vrednosti udela ostalih frakcija, koje su po veličini čestica između najkrupnijih i najsitnijih, bile su više pri suvom prosejavanju za sve mlevne tretmane, s obzirom da deo čestica iz ovih frakcija prelazi u najkrupnije, a deo u najsitnije frakcije, usled bubrenja odnosno rastvaranja tokom mokrog prosejavanja. Dobijeni rezultati u skladu su sa rezultatima *Wolf-a i sar. (2010)* koji su takođe ispitivali promenu granulacije do koje dolazi pri mokrom prosejavanju.

Udeli pojedinih frakcija čestica dobijeni mokrim prosejavanjem prikazani su u tabeli 26 za prvu fazu istraživanja, kada je kukuruz različite granulacije dobijen na mlinu čekićaru i peletiran pri različitim zazorima valjci-matrica i pri različitom sadržaju vode materijala.

Tabela 26. Maseni udeli frakcija čestica u peletiranom materijalu dobijeni u prvoj fazi istraživanja pri kombinacijama parametara a peletiranja variranih prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu

Parametri procesa peletiranja			Maseni udeo čestica (%)								
			Frakcija (μm)								
A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	> 3150	2500 – 3150	2000 – 2500	1600 – 2000	1000 – 1600	630 – 1000	630 – 1600	125 – 630	< 125
3	2,00	16,0	0,00	0,14	1,40	6,26	13,35	9,11	22,46	17,03	52,70
6	0,30	14,5	0,99	3,91	5,57	5,36	11,82	10,24	22,06	18,03	45,06
6	1,15	16,0	0,00	0,95	3,81	7,06	14,06	8,32	21,42	16,58	50,96
6	1,15	16,0	0,01	0,78	3,09	7,17	13,09	8,45	22,45	17,75	48,25
6	2,00	17,5	0,00	2,00	7,10	6,60	11,51	6,62	18,14	12,60	53,58
9	1,15	14,5	0,81	2,61	4,11	6,75	14,52	8,84	23,37	17,30	45,86
9	1,15	17,5	0,75	2,23	3,87	7,16	13,98	9,03	23,01	16,44	47,28
6	2,00	14,5	0,10	1,11	7,01	7,50	11,57	8,30	19,86	15,13	49,37
3	0,30	16,0	0,24	0,55	2,39	4,85	14,97	12,06	27,03	19,53	45,65
3	1,15	14,5	0,00	0,12	0,96	4,79	12,83	10,80	23,63	19,95	50,55
6	1,15	16,0	0,15	0,81	3,38	7,35	14,00	9,38	23,44	17,93	46,81
3	1,15	17,5	0,00	0,16	1,17	5,30	14,48	11,00	25,47	18,83	49,07
9	0,30	16,0	2,00	6,16	4,63	5,56	12,76	9,71	22,46	17,61	43,58
9	2,00	16,0	0,60	3,08	6,71	5,83	9,98	6,93	16,91	14,31	53,16
6	0,30	17,5	0,78	3,27	5,45	5,67	13,07	9,28	22,35	15,86	47,41

U tabeli 27 prikazani su rezultati mokrog prosejavanja peleta dobijenih u drugoj fazi istraživanja, u kojoj je kukuruz mleven na mlinu sa valjcima, pri čemu su različite granulacije kukuruza peletirane u kombinaciji sa različitim debljinama matrice i sa različitim sadržajem vode materijala.

Tabela 27. Maseni udeli frakcija čestica u peletiranom materijalu dobijeni u drugoj fazi istraživanja pri kombinacijama parametara peletiranja variranih prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu

Parametri procesa peletiranja			Maseni udeo čestica (%)								
			Frakcija (µm)								
A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	> 3150	2500 – 3150	2000 – 2500	1600 – 2000	1000 – 1600	630 – 1000	630 – 1600	125 – 630	< 125
2,6	30	17,5	0,73	2,06	5,63	6,63	14,12	8,54	22,66	16,41	45,88
2,0	24	14,5	0,16	1,33	4,88	6,06	13,97	9,05	23,02	17,76	46,80
2,6	36	16,0	0,30	1,28	4,52	6,04	14,69	8,35	23,03	16,16	48,67
2,6	24	16,0	1,08	2,79	5,11	6,62	14,17	9,19	23,36	16,14	43,13
1,4	24	16,0	0,00	0,19	1,68	5,29	17,38	11,51	28,89	19,65	44,31
1,4	36	16,0	0,00	0,11	1,30	5,46	16,66	9,47	26,13	16,75	50,26
1,4	30	17,5	0,00	0,20	1,80	6,06	17,11	10,32	27,43	17,00	47,52
2,0	30	16,0	0,25	1,02	4,32	5,63	13,89	8,97	22,86	18,53	47,25
2,0	24	17,5	0,24	1,21	5,40	6,13	16,07	9,36	25,43	16,43	45,17
2,0	30	16,0	0,21	1,16	5,23	6,79	14,32	8,92	23,25	16,68	45,36
2,6	30	14,5	0,89	2,15	5,88	5,83	14,08	8,18	22,26	16,83	46,16
2,0	30	16,0	0,15	0,77	4,84	6,69	15,72	9,27	24,99	17,19	45,36
1,4	30	14,5	0,00	0,13	1,37	5,43	16,88	9,99	26,87	18,63	47,57
2,0	36	17,5	0,03	0,81	5,16	5,88	14,69	8,71	23,40	15,56	49,15
2,0	36	14,5	0,22	0,77	4,64	5,34	15,81	8,76	24,58	16,71	47,75

Da bi se utvrdio način na koji su varirani parametri procesa peletiranja uticali na granulaciju nakon peletiranja, posmatrani su kako kumulativni tako i pojedinačni prinosi frakcija čestica. Najpre su razmatrane krupne frakcije, čije prisustvo ima pozitivno delovanje u ishrani živine, a potom srednje i sitne frakcije, koje su značajne u ishrani svinja.

Krupnim su smatrane čestice veće od 1000 µm s obzirom da su brojna istraživanja pokazala pozitivnu korelaciju između udela ovih čestica i veličine bubca kod živine (Engberg i sar., 2002; Svihus i sar., 2004a i 2004b; Peron i sar., 2005; Parsons i sar., 2006; Amerah i sar., 2008; Amerah

i sar., 2009a). Tako je u istraživanju *Svihus-a i sar.* (2004b) utvrđeno da sve frakcije čestica veće od 1000 μm pokazuju pozitivnu korelaciju sa razvitkom bubca, pri čemu je najviša korelacija dobijena za najkrupniju ispitivanu frakciju, t.j. čestice veće od 2800 μm . Na osnovu toga se može zaključiti da što su čestice krupnije, više je izraženo njihovo povoljno delovanje.

U ishrani svinja poželjna je sitnija granulacija smeša u poređenju sa smešama za živinu. Velikim brojem istraživanja utvrđen je veći prirast svinja pri sitnijem mlevenju cerealne komponente smeše (*Wondra i sar.*, 1995; *Lahaye i sar.*, 2008; *Valencia i sar.*, 2008; *Mosseler i sar.*, 2010; *Ball i sar.*, 2015). Međutim, istraživanja takođe ukazuju da što je granulacija hrane za svinje sitnija, češće su pojave oštećenja želuca (lezije, keratinizacija) kao i pojave ulkusa (čira na želudcu) (*Wondra i sar.*, 1995; *Eisemann i Argenzio*, 1999; *Nielsen i Ingvarsten*, 1999; *Flis i sar.*, 2001; *Morel*, 2005). *Grosse Liesner i sar.* (2009) su utvrdili da za sprečavanje negativnog delovanja na želudac svinja nije toliko važno krupnije mlevenje, već pre svega smanjenje sadržaja najsitnijih čestica.

S obzirom da su krupne čestice teško svarljive u probavnom traktu svinja, a da sitne čestice imaju negativno delovanje na želudac, potrebno je da udeo frakcija čestica srednje veličine bude što veći. U istraživanju *Ball-a i sar.* (2015) optimalnim su smatrane čestice veličine 500 do 1400 μm , kod *Lucht-a* (2011) su to bile čestice veličine 500 do 1600 μm , u istraživanju *Cappai i sar.* (2013), čestice veličine 800 do 1400 μm . U odnosu na navedene literaturne podatke, kao čestice čija je veličina pogodna u ishrani svinja odabrana je frakcija sa česticama veličine između 630 i 1600 μm .

Kao sitne čestice, koje imaju negativno delovanje na želudac svinja, većina autora podrazumeva čestice manje od 400 μm (*Kampheus i sar.*, 2007; *Grosse Liesner i sar.*, 2009; *Mossler i sar.*, 2010; *Cappai i sar.*, 2013). U istraživanju koje je sproveo *Lucht* (2011), sitnim su smatrane čestice manje od 500 μm . *Grosse Liesner i sar.* (2009) su posmatrali čestice manje od 400 μm kao sitnu frakciju, i zaključili su da što su čestice sitnije, jače je njihovo negativno delovanje na želudac, kao i da čestice manje od 200 μm imaju najizraženije negativno delovanje. Shodno ovome, u istraživanju *Cappai i sar.* (2013), kao najsitnija frakcija posmatrane su čestice manje od 400 μm , a u okviru ove frakcije, posebno su razmatrane dve frakcije: 200 do 400 μm i < 200 μm . U istom istraživanju, čestice veličine 400 do 800 μm smatrane su srednje sitnim.

U odnosu na podatke navedene u literaturi, u okviru ove disertacije čestice veličine 125 do 630 μm posmatrane kao srednje sitna frakcija, čije je negativno delovanje u ishrani svinja slabije izraženo u odnosu na najsitniju frakciju, koja je u ovom istraživanju obuhvatala čestice manje od 125 μm .

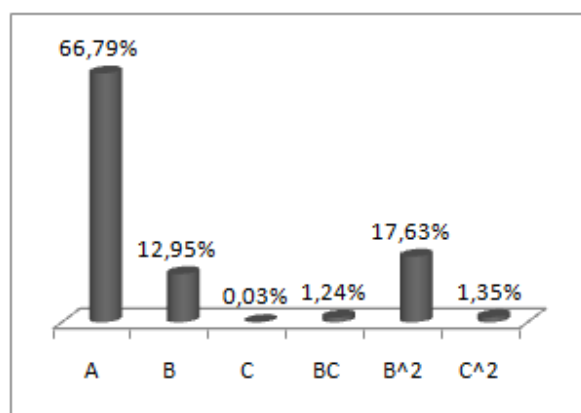
4.6.1. Krupne frakcije čestica u peletiranom materijalu u prvoj fazi istraživanja

4.6.1.1. Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm

Na osnovu eksperimentalnih podataka prinosa frakcije (udela) čestica većih od 2500 μm u prvoj fazi istraživanja (tab. 26) dobijen je adekvatan model ($R^2 = 0,972$; $p(\text{LoF}) = 0,0825$). Značajan uticaj na udeo ovih čestica imala je granulacija mliva i zazor valjci-matrica, dok sadržaj vode nije imao značajan uticaj (tab. 28, sl. 63).

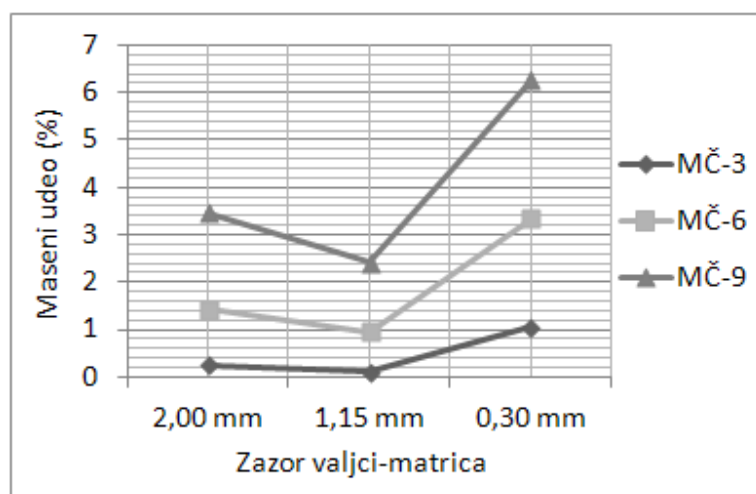
Tabela 28. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	18,8385	
Linearni		
A: granulacija mliva	0,2281	< 0,0001
B: zazor valjci-matrica	-3,6544	0,0003
C: sadržaj vode materijala	-2,1399	0,7710
Interakcije		
BC	0,1036	0,0999
Kvadratni		
B^2	0,7141	0,0001
C^2	0,0635	0,0886



Slika 63. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u prvoj fazi istraživanja

Ukoliko se dobijeni udeli frakcije čestica većih od 2500 μm nakon peletiranja (sl. 64) uporede sa vrednostima pre peletiranja (tab. 29), vidi se da je većina čestica ove frakcije usitnjena tokom peletiranja. Kombinacija najkrupnije granulacije (MČ-9) i najmanjeg zazora (0,30 mm) dala je najveći udeo posmatrane frakcije nakon peletiranja koji je iznosio oko 6,3%. Međutim, kada se to upoređi sa sadržajem ove frakcije u mlivu pre peletiranja, koja je iznosila oko 42%, vidi se da je tokom peletiranja pri datim parametrima, udeo čestica većih od 2500 μm smanjen oko 6,5 puta. Prvi sledeći najviši udeo ostvaren je pri srednjoj granulaciji (MČ-6) i najmanjem zazoru (0,30 mm), kao i pri najkrupnijoj granulaciji (MČ-9) i najvećem zazoru (2,00 mm). Vrednost ostvarena pri ovim kombinacijama parametara procesa peletiranja od oko 3,4% bila je približno dvostruko manja od najveće ostvarene vrednosti (6,3%), dok je kod svih ostalih kombinacija parametara udeo bio još manji. Dakle, peletiranje uzrokuje veliki intenzitet usitnjavanja najkrupnijih frakcija čestica bez obzira na primenjene parametre. Međutim, određene kombinacije parametara mogu doprineti značajnijem očuvanju ovih čestica.



Slika 64. Prinos frakcije čestica većih od 2500 µm u prvoj fazi istraživanja

Tabela 29. Prinos frakcije čestica većih od 2500 µm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	1,15
MČ-6	29,18
MČ-9	42,21

Sa povećanjem granulacije mliva, povećavao se udeo čestica većih od 2500 µm pri svim širinama zazora. U pogledu uticaja zazora valjci-matrica, najveći udeo ove frakcije dobijen je pri najmanjem zazoru, a najmanji pri srednjem zazoru. Što su čestice posmatrane frakcije veće u odnosu na širinu zazora, bile su osetljivije na usitnjavanje u prekompakcionom sloju delovanjem valjaka pelet prese pa su se tako čestice veće od 2500 µm više usitnjavale pri zazoru 1,15 mm nego pri 2,00 mm. Međutim, pri najmanjem zazoru (0,30 mm) dobijen je izrazito najveći udeo čestica većih od 2500 µm. S obzirom da se pri ovom zazoru ne formira prekompakcioni sloj, najverovatnije je da su pojedine čestice veće od 2500 µm valjci potisnuli direktno u kanale matrice i tako nisu usitnjene delovanjem valjaka. Pritisak u kanalima matrice takođe uzrokuje usitnjavanje čestica, međutim pri najmanjem zazoru (0,30 mm) taj pritisak je najniži što dodatno umanjuje usitnjavanje čestica tokom peletiranja primenom zazora 0,30 mm.

Dakle, očuvanje određene količine čestica većih od 2500 µm pri najmanjem zazoru može se objasniti nepostojanjem prekompakcionog sloja i direktnim potiskivanjem čestica u kanale matrice kao i nižim pritiskom u kanalima matrice. S druge strane, pojedine čestice veće od 2500 µm ostaju neusitnjene pri zazorima 2,00 i 1,15 mm iako su širine ovih zazora manje od veličine čestica posmatrane frakcije. To može biti posledica nepravilnog oblika čestica, usled čega se tokom peletiranja čestice mogu orijentisati u prekompakcionom sloju sa najmanjom dimezijom postavljenom normalno na površinu matrice. Takođe, tokom peletiranja dolazi do povremenih neravnomernosti u doziranju materijala, pri čemu se na površini matrice može naći deblji sloj materija. Pri prolasku valjka dolazi do njegovog blagog podizanja, odnosno dolazi do kratkotrajnog

povećanja širine zazora. Valjak pri tome utiskuje deo materijala u kanale matrice, a sa njim mogu proći i krupnije čestice, koje bi inače bile usitnjene.

Pelete sa najvećim sadržajem krupnih čestica, koje bi pozitivno delovale na razvoj bubca živine, dobijene su pri najkrupnijoj granulaciji mliva (MČ-9) i najmanjem zazoru valjci-matrica (0,30 mm). Ovakva kombinacija parametara povoljno je uticala i na specifičnu potrošnju energije pelet prese, koja je bila najmanja pri najmanjem zazoru (35,50 Wh/kg). Takođe, primenom krupnije granulacije postižu se energetske uštede i u operaciji mlevenja. Međutim, udeo prašine u peletama i stepen otiranja peleta bili su najviši pri ovoj kombinaciji parametra usled prisustva slabih tačaka u strukturi peleta kao i usled najnižeg pritiska u kanalima matrice pri zazoru 0,30 mm.

Kako bi se utvrdili parametri procesa peletiranja koji obezbeđuju što veći udeo čestica > 2500 μm izvršen je postupak optimizacije, uzimajući u obzir specifičnu potrošnju energije pelet prese, koja bi trebala da bude što manja, kao i kvalitet peleta izražen preko stepena otiranja, koji bi takođe trebao biti što manji (tab. 30). Svakom od pojedinačnih odziva dodeljen je faktor značajnosti ili prioritet, rangiran od 1 do 5. Pri tome su određene optimalne vrednosti upravljivih parametara za dve kombinacije faktora značajnosti odzivnih parametara. U prvoj kombinaciji je svim odzivima dodeljen jednak faktor značajnosti, a u drugoj, najveći faktor značajnosti (5) dodeljen je udelu posmatrane frakcije, srednji faktor (3) je dodeljen stepenu otiranja peleta, a najniži (1) specifičnoj potrošnji energije pelet prese.

Tabela 30. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u prvoj fazi istraživanja

		Upravljeni parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 2500 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	0,12	
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	6,16	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,781
	Rezultati optimizacije	9	1,43	17,5	5,49	37,46	1,71	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,810
	Rezultati optimizacije	9	2	17,5	2,81	44,23	4,21	

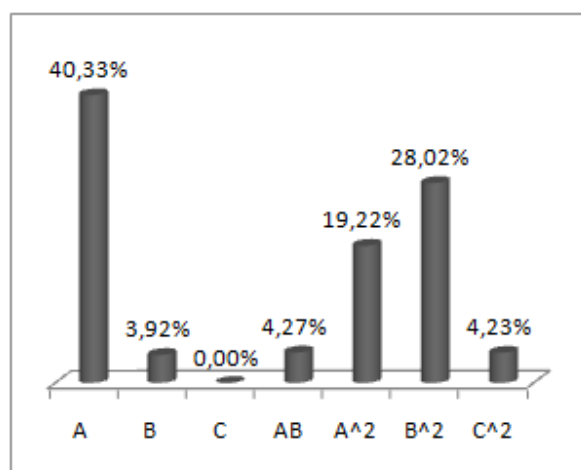
Kada su svi odzivi imali jednak prioritet, t.j. kada su im dodeljeni jednaki faktori značajnosti, vrednost ukupne funkcije zadovoljenja je iznosila 0,781 od maksimalno 1. Pri tome su optimalni parametri procesa peletiranja bili: najkrupnija granulacija mliva (MČ-9), najveći sadržaj vode materijala (17,5%) i zazor valjci-matrica od 1,43 mm. Pri ovakvim parametrima, željene vrednosti odziva su u pogledu potrošnje energije i stepena otiranja peleta zadovoljene, međutim ne i u pogledu udela čestica većih od 2500 μm . Kada je odzivima dodeljen različit prioritet, ukupna funkcija zadovoljenja je imala veću vrednost (0.810), a svi upravljivi parametri su bili na svojim maksimalnim vrednostima. Stepenn otiranja peleta je bio još niži nego u prethodnom slučaju, a udeo posmatrane frakcije mnogo veći. To je ostvareno na račun specifične potrošnje energije pelet prese koja je bila znatno viša nego u prvom slučaju.

4.6.1.2. Prinos frakcije čestica veličine 2000 – 2500 μm

Za frakciju čestica veličine 2000 do 2500 μm , dobijen je model koji dobro opisuje eksperimentalne podatke ($R^2 = 0,980$; $p(\text{LoF}) = 0,4681$). Ukoliko se posmatra značajnost i relativni intenzitet uticaja parametra na udeo ove frakcije (tab. 31, sl. 65), može se videti da je najsnažniji bio linearni uticaj granulacije mliva, a potom kvadratni uticaj zazora i kvadratni uticaj granulacije. Značajan je bio i uticaj interakcije granulacije i zazora kao i kvadratni uticaj sadržaja vode materijala.

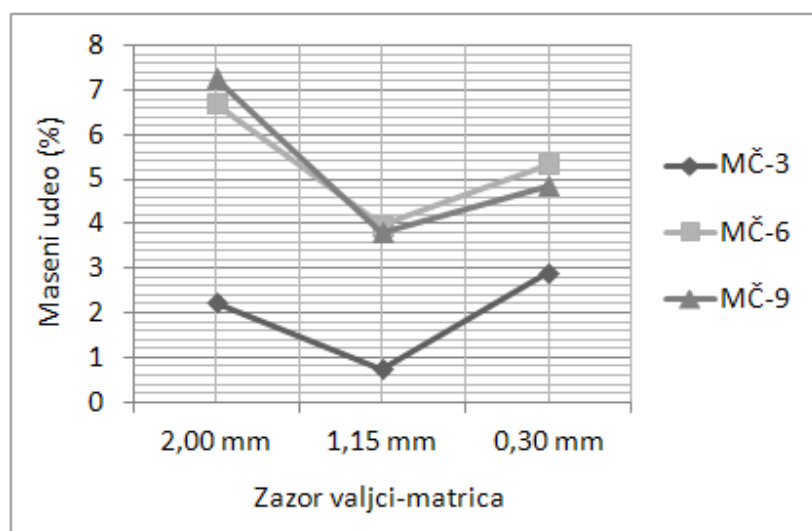
Tabela 31. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	89,2959	
Linearni		
A: granulacija mliva	2,4783	< 0,0001
B: zazor valjci-matrica	-7,7334	0,0089
C: sadržaj vode materijala	-11,3546	0,9553
Interakcija		
AB	0,3017	0,0073
Kvadratni		
A ²	-0,1890	< 0,0001
B ²	2,8426	< 0,0001
C ²	0,3547	0,0074



Slika 65. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm u prvoj fazi istraživanja

Za tretmane MČ-6 i MČ-9 dobijene su približno iste vrednosti udela posmatrane frakcije čestica pri svim zazorima (sl. 66) iako je udeo ovih čestica pre peletiranja bio veći kod mliva MČ-6 nego kod mliva MČ-9 (tab. 32). S obzirom da je većina čestica većih od 2500 μm bila usitnjena tokom peletiranja, deo tih čestica prešao je u frakciju 2000 – 2500 μm . Taj prelazak je bio veći pri peletiranju mliva MČ-9 jer je udeo čestica većih od 2500 μm znatno veći nego u mlivu MČ-6. Usled toga, sadržaj posmatrane frakcije čestica nakon peletiranja kod tretmana MČ-6 i MČ-9 se izjednačio. Znatno manja količina čestica posmatrane frakcije dobijena je pri peletiranju mliva MČ-3, što je posledica manjeg sadržaja čestica ove frakcije u mlivu MČ-3 pre peletiranja u poređenju sa druga dva mliva (tab. 32). Takođe, s obzirom na mali udeo čestica > 2500 μm u mlivu MČ-3, prelaska čestica u frakciju 2000 – 2500 μm gotovo da nije ni bilo, dok je taj prelazak vrlo izražen pri peletiranju mliva MČ-6 i MČ-9.



Slika 66. Prinos frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm u prvoj fazi istraživanja

Tabela 32. Prinos frakcije čestica veličine 2000 do 2500 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	9,36
MČ-6	16,73
MČ-9	12,10

Ukoliko se posmatra uticaj zazora, kod tretmana MČ-6 i MČ-9 najveći udeo čestica veličine 2000 – 2500 μm dobijen je pri zazoru 2,00 mm. To je delimično posledica odnosa veličine čestica i širine zazora, s obzirom da su čestice iz ove frakcije bliske po veličini zazoru od 2,00 mm. Zato lakše dolazi do njihovog očuvanja u prekompakcionom sloju pri ovom zazoru nego pri zazoru 1,15 mm. Viši udeo čestica ove frakcije ostvaren pri zazoru 2,00 mm u poređenju sa 0,30 mm može se objasniti rezultatima dobijenim za frakciju čestica većih od 2500 μm , koje su znatno više usitnjavane pri zazoru 2,00 mm, pa je veći deo njih prešao u frakciju 2000 – 2500 μm .

Kod tretmana MČ-3 najveći udeo posmatrane frakcije je dobijen pri najmanjem zazoru, a najmanji pri zazoru 1,15 mm. Ovi rezultati slični su rezultatima koji su dobijeni za frakciju čestica

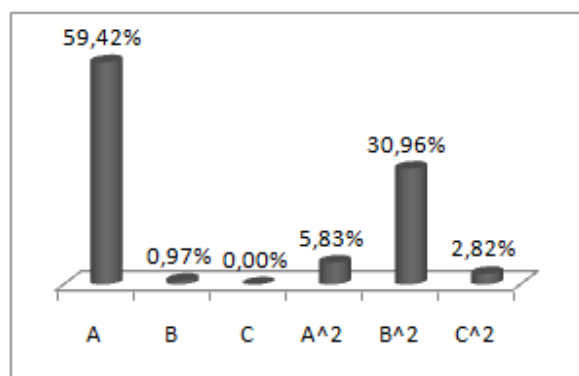
većih od 2500 μm . Razlog za to je mali intenzitet prelaska čestica iz krupnijih frakcija u posmatranu frakciju pri peletiranju mliva MČ-3. Kod mliva MČ-3 pre peletiranja praktično nema čestica većih od 2500 μm tako da se gotovo i ne može govoriti o prelasku čestica iz krupnijih frakcija u frakciju 2000 – 2500 μm . Zato tretman MČ-3 omogućuje bolji uvid o uticaju variranih parametara na posmatranu frakciju čestica.

4.6.1.3. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm

U većem broju istraživanja utvrđeno je pozitivno delovanje čestica većih od 2000 μm na razvoj bubca živine (Amerah i sar., 2008; Amerah i sar., 2009a; i Clark i sar., 2009; Rougiere i sar., 2009). Zbog toga je važno razmotriti i kumulativni (ukupan) udeo čestica većih od 2000 μm dobijen pri ispitivanim parametrima peletiranja. Model dobijen za udeo čestica većih od 2000 μm bio je adekvatan ($R^2 = 0,963$; $p(\text{LoF}) = 0,1986$). Za udeo posmatranih čestica najznačajniji je bio linearni uticaj granulacije mliva, a potom kvadratni uticaj zazora (tab. 33, sl. 67), slično kao i kod kumulativnog udela čestica većih od 2500 μm . Ostali linearni i kvadratni uticaji bili su slabije izraženi, dok interakcije između parametara nisu bile statistički značajne.

Tabela 33. Koeficijenti regresione jednačine za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm u prvoj fazi istraživanja

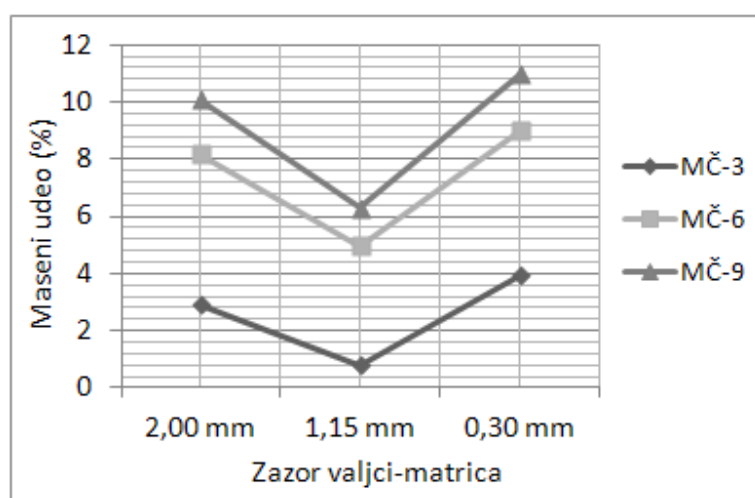
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	119,5672	
Linearni		
A: granulacija mliva	3,1402	< 0,0001
B: zazor valjci-matrica	-11,6971	0,1947
C: sadržaj vode materijala	-15,1132	0,9480
Kvadratni		
A ²	-0,1697	0,0084
B ²	4,8694	< 0,0001
C ²	0,4719	0,0422



Slika 67. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm u prvoj fazi istraživanja

Krupnija granulacija mliva, odnosno veći udeo čestica > 2000 μm u mlivu pre peletiranja (tab. 34), dovela je do povećanja udela čestica posmatrane frakcije u peletiranom materijalu (sl. 68), pri čemu je povećanje izraženije kada je prečnik otvora sita mlina čekićara povećan sa 3 na 6 mm, a znatno je manje pri povećanju prečnika otvora sita sa 6 na 9 mm. Ukoliko se posmatra uticaj zazora

valjci-matrica, može se primetiti da su vrednosti udela čestica većih od 2000 μm u peletiranom materijalu pri zazorima 0,30 i 2,00 mm vrlo bliske (oko 1% (na ukupnu masu materijala) su više pri zazoru 0,30 mm). Kada je primenjen zazor 1,15 mm, dobijene su vrednosti niže za 3 do 4% (na ukupnu masu materijala). Više vrednosti udela čestica $> 2000 \mu\text{m}$ dobijene primenom zazora 0,30 mm u odnosu na zazor 1,15 mm, kao i kod frakcije čestica većih od 2500 μm , su posledica nepostojanja prekompakcionog sloja. Viši sadržaj čestica većih od 2000 μm pri zazoru 2,00 mm posledica je manjeg usitnjavanja frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm što je objašnjeno pri razmatranju rezultata za ovu frakciju čestica.



Slika 68. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm u prvoj fazi istraživanja

Tabela 34. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	10,51
MČ-6	45,91
MČ-9	54,31

U cilju utvrđivanja parametara procesa peletiranja kojima se obezbeđuje da udeo čestica većih od 2000 μm bude što viši, uzimajući pri tome u obzir specifičnu potrošnju energije pelet prese kao i stepen otiranja peleta, primenjen je postupak optimizacije (tab. 35). Kada je pri optimizaciji svim odzivima dodeljen jednak prioritet, vrednost ukupne funkcije zadovoljenja iznosila je 0,793. Pri tome su optimalni parametri procesa peletiranja bili: najkrupnija granulacija mliva (MČ-9), najveći sadržaj vode materijala (17,5%) i zazor valjci-matrica od 1,68 mm. Pri ovakvim parametrima dobijene su niske vrednosti stepena otiranja peleta i potrošnje energije pelet prese. Takođe je dobijena i visoka vrednost udela čestica većih od 2000 μm (8,18%) koja je za oko četvrtinu manja od najveće vrednosti dobijene u ovom istraživanju. Prema tome, željene vrednosti odziva su u velikoj meri zadovoljene. Kada su odzivima dodeljeni različiti prioriteti, kao i kod frakcije čestica većih od 2500 μm , ukupna funkcija zadovoljenja je imala veću vrednost, a svi upravljivi parametri su bili na svojim maksimalnim nivoima. Stepenn otiranja peleta je bio niži nego

u prethodnom slučaju, a udeo frakcije čestica većih od 2000 μm bio je veći. To je ostvareno na račun specifične potrošnje energije pelet prese koja je bila za oko 4,3 Wh/kg veća nego u prvom slučaju.

Tabela 35. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za kumulativni prinost frakcije čestica većih od 2000 μm u prvoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivi			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 2000 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	1,08	
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	10,78	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,793
	Rezultati optimizacije	9	1,68	17,5	4,02	39,93	8,18	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,886
	Rezultati optimizacije	9	2	17,5	2,81	44,22	10,20	

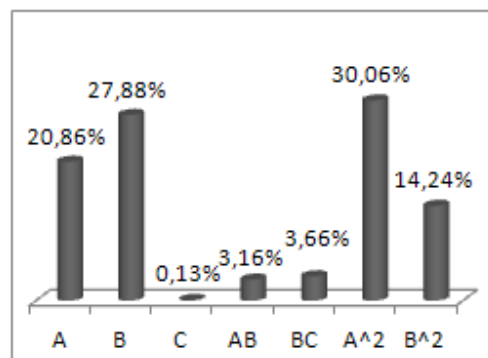
4.6.1.4. Prinost frakcije čestica veličine 1600 – 2000 μm

Granulacija mliva i zazor imali su podjednak uticaj na udeo frakcije čestica veličine 1600 do 2000 μm , dok uticaj sadržaja vode materijala nije bio značajan (tab. 36, sl. 69). Vrednost koeficijenta R^2 iznosila je 0,803, dok je LoF vrednost bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,0449$), mada vrlo blizu granične vrednosti od 0,05.

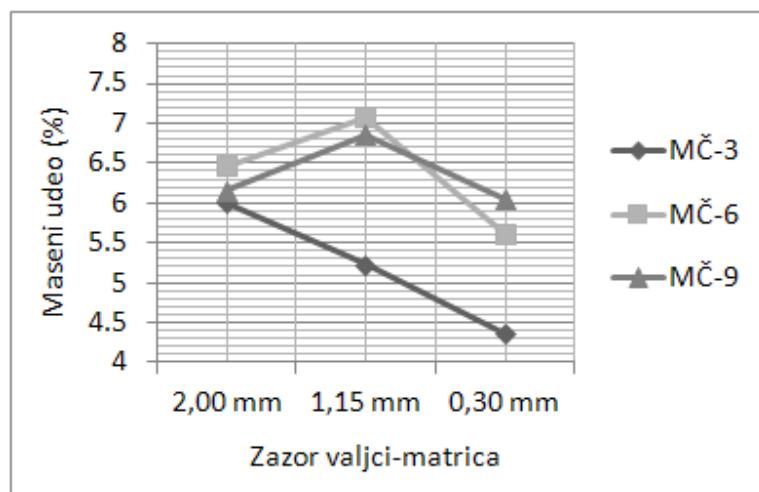
Vrednosti prinosa frakcije čestica veličine 1600 – 2000 μm kod tretmana MČ-6 i MČ-9 nisu bile najniže, već najviše, pri zazoru 1,15 mm (sl. 70), za razliku od prethodno razmatrane frakcije čestica (2000 – 2500 μm). Može se pretpostaviti da je, s jedne strane, razlog za obrnut trend rezultata u odnosu na frakciju 2000 – 2500 μm , manje usitnjavanje čestica posmatrane frakcije pri zazoru 1,15 mm usled toga što su čestice veličine 1600 do 2000 μm bliže su po veličini zazoru 1,15 mm u odnosu na čestice veličine 2000 – 2500 μm . S druge strane, jače usitnjavanje čestica većih od 2000 μm pri zazoru 1,15 mm doprinelo je većem prelasku čestica u frakciju čestica veličine 1600 – 2000 μm , što je takođe povećalo udeo posmatrane frakcije čestica pri zazoru 1,15 mm. Udeli čestica veličine 1600 – 2000 μm u mlivima pre peletiranja nisu se razlikovali u većoj meri (tab. 37).

Tabela 36. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 1600 - 2000 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-5,1322	
Linearni		
A: granulacija mliva	1,505	0,0423
B: zazor valjci-matrica	7,1551	0,0242
C: sadržaj vode materijala	0,3004	0,8518
Interakcija		
AB	-0,1115	0,3643
BC	-0,2379	0,3353
Kvadratni		
A ²	-0,1005	0,0208
B ²	-0,8615	0,08



Slika 69. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 1600 - 2000 μm u prvoj fazi istraživanja



Slika 70. Prinos frakcije čestica veličine 1600 - 2000 μm u prvoj fazi istraživanja

Pri peletiranju mliva MČ-3, sa povećanjem zazora valjaka i matrice pelet prese povećavao se udeo čestica veličine 1600 do 2000 μm . Udeo čestica većih od 2000 μm u mlivu MČ-3 pre peletiranja bio je znatno manji nego kod mliva MČ-6 i MČ-9 (tab. 34). Usled toga manji je prelazak čestica usitnjenih tokom peletiranja iz krupnijih u posmatranu frakciju. Na taj način mlivo MČ-3 je omogućilo da se jasnije vidi uticaj zazora valjci-matrica na frakciju čestica veličine 1600 – 2000 μm . Najveći udeo čestica ove frakcije, dobijen peletiranjem mliva MČ-3, ostvaren je pri zazoru 2,00 mm. Razlog za veći udeo čestica veličine 1600 – 2000 μm dobijen pri zazoru 2,00 mm u poređenju sa zazorom od 1,15 mm je najverovatnije odnos veličine čestica i širine zazora, koji je povoljniji za očuvanje čestica ove veličine pri zazoru 2,00 mm nego pri 1,15 mm. Najmanji udeo

Tabela 37. Prinos frakcije čestica veličine 1600 - 2000 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	10,51
MČ-6	9,16
MČ-9	12,15

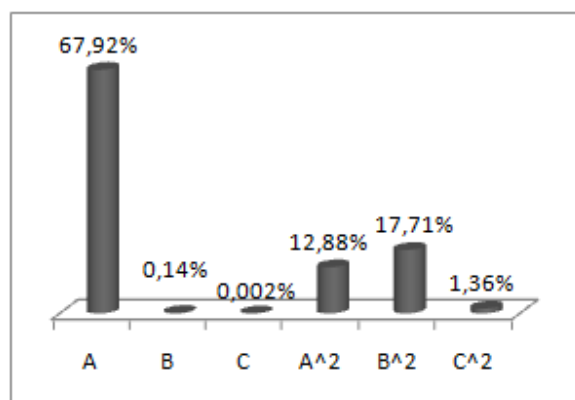
čestica veličine 1600 – 2000 μm kod tretmana MČ-3, dobijen je peletiranjem pri zazoru od 0,30 mm čemu doprinosi manje usitnjavanje čestica većih od 2000 μm pri ovom zazoru, usled čega je prelazak čestica iz krupnijih frakcija u posmatranu frakciju bio manji.

4.6.1.5. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm

U istraživanjima koja su sprovedi *Svihus i sar. (2004a i 2004b)* utvrđeno je uvećanje bubca sa povećanjem udela čestica većih od 1600 μm . Isto je utvrđeno i u istraživanju *Peron-a i sar. (2005)* za čestice veće od 1500 μm , *Engberg-a i sar. (2002)* za čestice veće od 1400 μm , kao i *Parsons-a i sar. (2006)* za čestice veće od 1700 μm . Zbog toga je razmatran i uticaj ispitivanih parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos čestica većih od 1600 μm . Za ovu frakciju dobijen je adekvatan model ($R^2 = 0,986$; $p(\text{LoF}) = 0,3438$), a kao i za prethodne kumulativne prinose frakcija, najznačajniji je bio linearni uticaj granulacije mliva. Značajan je bio i kvadratni uticaj zazora i granulacije mliva, ali i sadržaja vode materijala (tab. 38, sl. 71).

Tabela 38. Koeficijenti regresione jednačine za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

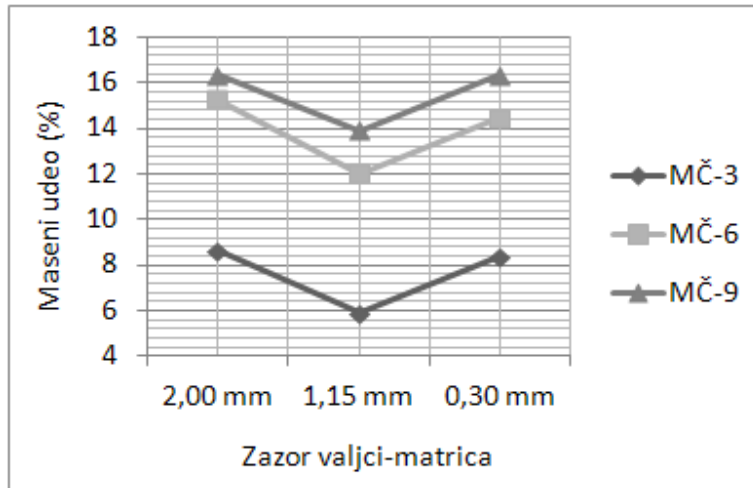
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	89,3528	
Linearni		
A: granulacija mliva	4,5442	< 0,0001
B: zazor valjci-matrica	-8,9524	0,4055
C: sadržaj vode materijala	-11,3023	0,9202
Kvadratni		
A ²	-0,2724	< 0,0001
B ²	3,9796	< 0,0001
C ²	0,3536	0,0238



Slika 71. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara, t.j. krupnije mlevenje, u najvećem stepenu je doprinelo povećanju udela čestica većih od 1600 μm , pri čemu je tretman MČ-3 imao izrazito manji udeo posmatrane frakcije čestica od druga dva tretmana, između kojih razlika nije bila velika (do 2% na ukupnu masu materijala) (sl. 72). Tome doprinosi i činjenica da je mlivo MČ-3 pre peletiranja imalo najniži početni udeo čestica većih od 1600 μm (tab. 39). Najniži prinos frakcije čestica većih od 1600 μm dobijen je pri zazoru 1,15 mm, dok su prinosi kod zazora od 2,00 i

0,30 mm imali približno istu vrednost. Ovaj trend rezultata je sličan rezultatima dobijenim dobijenim za frakcije čestica većih od 2500 i 2000 μm , ali je razlika između rezultata dobijenih pri zazoru 1,15 mm i druga dva zazora manja.



Slika 72. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

Tabela 39. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	22,66
MČ-6	55,07
MČ-9	61,45

Najviši udeo posmatrane frakcije čestica postiže pri najkrupnijoj granulaciji mliva (MČ-9) i najmanjem (0,30 mm) ili najvećem zazoru (2,00 mm). S druge strane, pri srednjem zazoru (1,15 mm) dobijene su kvalitetnije pelete nego pri najmanjem zazoru, a specifična potrošnja energije peletiranja je bila značajno manja nego pri najvećem zazoru. Da bi se odabrali parametri procesa peletiranja koji omogućuju da udeo čestica $> 1600 \mu\text{m}$ bude što veći, ali da se pri tome uzme u obzir i specifična potrošnja energije pelet prese kao i kvalitet peleta izražen preko stepena otiranja, urađen je postupak optimizacije. Kada je svim odzivima dodeljen jednak prioritet, vrednost ukupne funkcije zadovoljenja je iznosila 0,843 (tab. 40). Pri tome su optimalni parametri procesa peletiranja bili: veličina otvora sita čekićara 8,2 mm, zazor valjci-matrica 1,52 mm i sadržaj vode materijala 17,5%. Pri ovakvim parametrima dobijene su niske vrednosti stepena otiranja peleta i potrošnje energije pelet prese, a dobijena je i zadovoljavajuća vrednost udela čestica većih od 1600 μm (14,38%), koja je bila bliska najvećoj eksperimentalno dobijenoj vrednosti (16,35%). Kada je odzivima dodeljen različit prioritet, dobijena je vrlo visoka vrednost ukupne funkcije zadovoljenja (0,930) pri čemu se veličina otvora sita mlina čekićara povećava na 8,45 mm, a zazor i sadržaj vode su u svojim maksimalnim vrednostima (2,00 mm i 17,5%). Pri datim parametrima smanjen je stepen otiranja peleta, a vrednost udela posmatrane frakcije odgovarala je maksimalnoj vrednosti ostvarenoj u istraživanju. Međutim, povećana je specifična potrošnja energije pelet prese

usled povećanja zazora. S obzirom da je udeo željene frakcije čestica bio veći pri drugoj kombinaciji parametra, kao i da je dobijen bolji kvalitet peleta, uprkos većoj potrošnji energije, ova kombinacija parametara može biti odabrana kao povoljnija.

Tabela 40. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za udeo čestica većih od 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

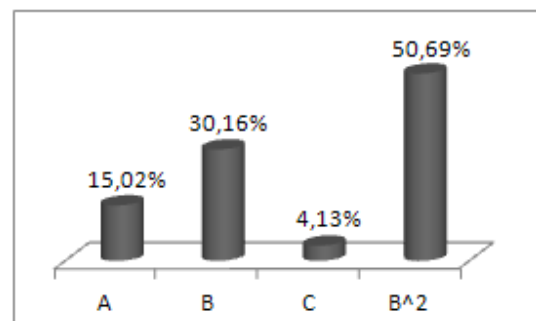
		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 1600 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	5,87	
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	16,35	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,843
	Rezultati optimizacije	8,2	1,52	17,5	4,78	38,28	14,38	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,930
	Rezultati optimizacije	8,45	1,93	17,5	3,15	43,20	16,35	

4.6.1.6. Prinos frakcije čestica veličine 1000 – 1600 μm

Za model koji opisuje uticaj variranih parametara peletiranja na udeo frakcije čestica veličine 1000 do 1600 μm , iako LoF vrednost modela nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,207$), vrednost koeficijenta R^2 je bila relativno niska i iznosila je 0,606. Značajan uticaj na udeo ove frakcije imao je jedino zazor valjci-matrica (kvadratni uticaj) (tab. 41, sl. 73).

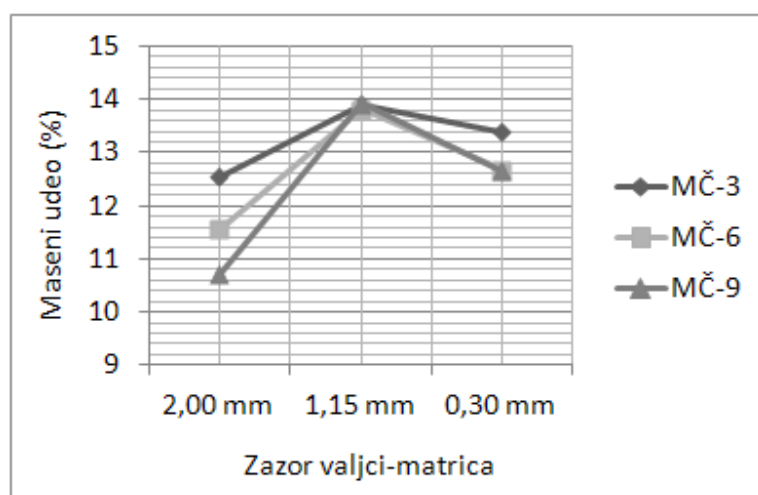
Tabela 41. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	10,2446	
Linearni		
A: granulacija mliva	-0,1826	0,1597
B: zazor valjci-matrica	3,7764	0,0568
C: sadržaj vode materijala	0,1909	0,4454
Kvadratni		
B^2	-2,0389	0,0191



Slika 73. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

Izuzev pri zazoru 1,15 mm, najveći udeo čestica veličine 1000 – 1600 μm dobijen je peletiranjem mliva MČ-3 (sl. 74). To je i očekivano s obzirom da je udeo čestica veličine 1000 – 1600 μm pre peletiranja bio približno dvostruko veći kod mliva MČ-3 u poređenju sa mlivima MČ-6 i MČ-9 (tab. 42). Najveći udeo posmatrane frakcije pri peletiranju svih mliva (MČ-3, MČ-6 i MČ-9) dobijen je pri zazoru 1,15 mm, a interesantno je primetiti da su gotovo iste vrednosti udela posmatrane frakcije čestica dobijene peletiranjem sva tri mliva pri zazoru 1,15 mm.



Slika 74. Prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

Tabela 42. Prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

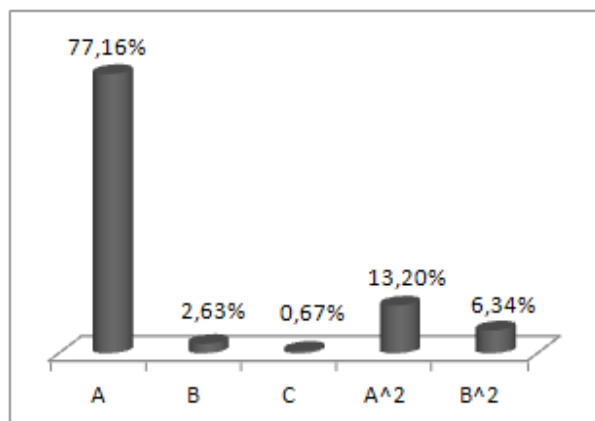
Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	25,15
MČ-6	13,22
MČ-9	10,98

4.6.1.7. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm

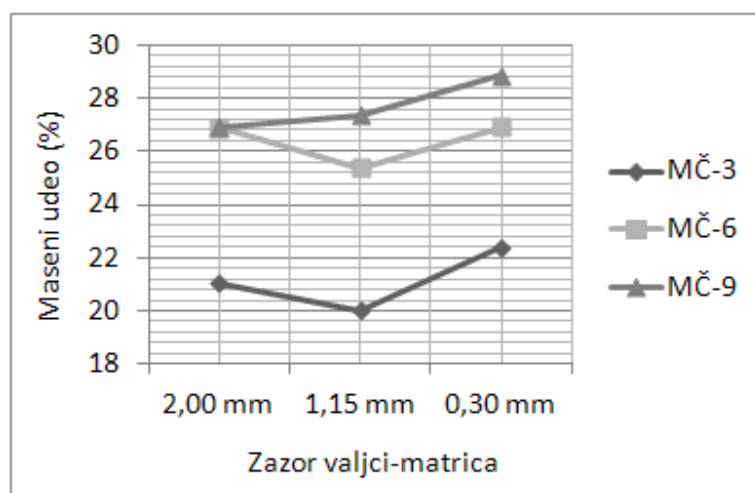
S obzirom da je u istraživanju *Svihus-a i sar. (2004b)* utvrđeno da sve frakcije čestica veće od 1000 μm pokazuju pozitivnu korelaciju sa razvitkom bubca, analiziran je i uticaj variranih parametara peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm (tab. 43, sl. 75) pri čemu je dobijen adekvatan model ($R^2 = 0,899$; $p(\text{LoF}) = 0,4008$). U poređenju sa kumulativnim prinosima frakcija $> 2000 \mu\text{m}$ i $> 1600 \mu\text{m}$, kod kumulativnog prinosa frakcije čestica većih od 1000 μm smanjuje se razlika udela čestica dobijenih pri zazoru 1,15 mm i druga dva zazora (sl. 76). Najveći udeo čestica $> 1000 \mu\text{m}$ dobijen je pri peletiranju nakrupnijeg mliva (MČ-9) koje je imalo i najveći početni udeo ovih čestica (tab. 44). Sa smanjenjem prečnika otvora sita mlina čekićara smanjivao se i udeo posmatrane frakcije čestica u peletama što je posledica smanjenja sadržaja čestica većih od 1000 μm u mlivu pre peletiranja.

Tabela 43. Koeficijenti regresione jednačine za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	11,0696	
Linearni		
A: granulacija mliva	3,7447	< 0,0001
B: zazor valjci-matrica	-5,1003	0,1830
C: sadržaj vode materijala	0,2043	0,4838
Kvadratni		
A ²	-0,2210	0,0103
B ²	1,9078	0,0520



Slika 75. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm u prvoj fazi istraživanja



Slika 76. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm u prvoj fazi istraživanja

Tabela 44. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u prvoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	47,80
MČ-6	68,29
MČ-9	72,43

U postupku optimizacije, pri jednakim prioritetima odziva, ostvarena vrednost ukupne funkcije zadovoljenja iznosila je 0,852 (tab. 45). Tada su optimalni parametri procesa peletiranja bili: veličina otvora sita čekićara 8 mm, zazor valjci-matrica 1,28 mm i sadržaj vode 17,5%. Primenom takvih parametara dobila bi se niska vrednosti stepena otiranja peleta i potrošnje energije pelet prese, pri čemu bi maseni udeo čestica većih od 1000 μm (27,05%) bio nešto manji u poređenju sa najvećim udelom dobijenim u istraživanju (29,10%). Dodeljivanjem različitog prioriteta odzivima, vrednost ukupne funkcije zadovoljenja se gotovo nije promenila, a povećan je prečnik otvora sita čekićara (za 0,63 mm) i zazor valjci-matrica (za 0,63 mm). Pri tome je kvalitet peleta poboljšán, odnosno stepen otiranja je gotovo dvostruko smanjen, ali je potrošnja energije

pelet prese bila veća za 6,33 Wh/kg. Istovremeno udelo posmatrane frakcije čestica neznatno je povećan.

Tabela 45. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm u prvoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 1000 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	18,70	0,852
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	29,10	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	
	Rezultati optimizacije	7,98	1,28	17,5	6,15	36,35	27,05	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	
	Rezultati optimizacije	8,61	1,91	17,5	3,15	42,98	27,73	

4.6.2. Krupne frakcije čestica u peletiranom materijalu u drugoj fazi istraživanja

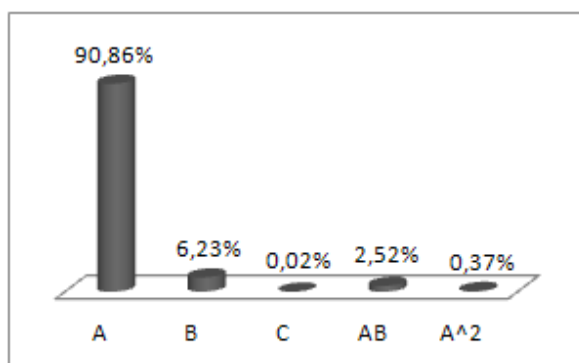
4.6.2.1. Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm

Na osnovu eksperimentalnih podataka prinosa frakcije (udela) čestica većih od 2500 μm u drugoj fazi istraživanja (tab. 27) dobijen je adekvatan model sa koeficijentom R^2 od 0,984, dok je značajnost LoF vrednosti iznosila $p(\text{LoF}) = 0,8880$. Preovladavao je uticaj granulacije, a postojao je i značajan uticaj debljine matrice, dok uticaj sadržaja vode materijala nije bio značajan (tab. 46, sl. 77). Pri krupnijem mlevenju na mlinu sa valjcima povećavao se udeo čestica većih od 2500 μm u peletiranom materijalu (sl. 78). To je posledica povećanja udela čestica $> 2500 \mu\text{m}$ u mlivu pre peletiranja pri krupnijem mlevenju (tab. 47). Razlike u udelu posmatrane frakcije u mlivima MV-1,4; MV-2,0 i MV-2,6 pre peletiranja su velike što je dovelo do velikih razlika u njihovom udelu nakon peletiranja. Povećanje debljine matrice, t.j. povećanje odnosa debljine i prečnika otvora matrice (L:D odnos), dovodi do povećanja trenja i pritiska u kanalima matrice, tako da je i usitnjavanje čestica intenzivnije (Thomas i sar. 1998; Stelte i sar., 2012). Uticaj debljine matrice bio je različit pri različitim granulacijama, odnosno postojala je značajna interakcija granulacije i

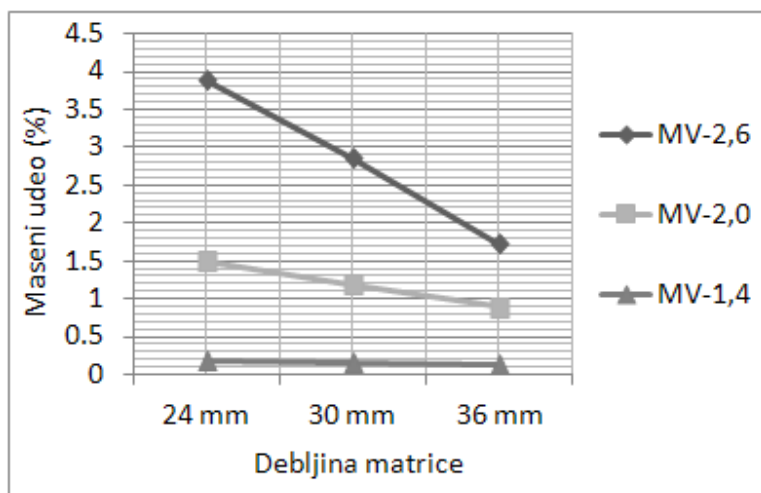
debljine matrice. Tako kod mliva MV-1,4 praktično nije bilo razlike u udelu frakcije čestica većih od 2500 μm pri različitim debljinama matrice, kod mliva MV-2,0 dolazilo je do blagog povećanja udela čestica većih od 2500 μm sa smanjenjem debljine matrice, dok je kod mliva MV-2,6 to povećanje bilo još izraženije. Ovakvi rezultati ukazuju da smanjenje debljine matrice značajno doprinosi očuvanju posmatrane frakcije čestica, ali to nije došlo do izražaja pri peletiranju mliva MV-1,4 zbog malog udela čestica $>2500 \mu\text{m}$ u mlivu pre peletiranja.

Tabela 46. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-3,2256	
Linearni		
A: granulacija mliva	2,9538	< 0,0001
B: debljina matrice	0,0552	0,0002
C: sadržaj vode materijala	-0,0069	0,7182
Interakcije		
AB	-0,0414	0,0044
Kvadratni		
A ²	-0,1639	0,1838



Slika 77. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u drugoj fazi istraživanja



Slika 78. Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 47. Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u drugoj fazi

Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	60,73
MV-2,0	41,96
MV-1,4	9,83

Kao i u prvoj fazi istraživanja, došlo je do velikog stepena redukcije veličine čestica posmatrane frakcije, pri čemu je u drugoj fazi usitnjavanje bilo još intenzivnije. Najviše čestica $>2500 \mu\text{m}$ ostalo je očuvano u peletama proizvedenim upotrebom matrice debljine 24 mm i pri najkрупnijoj granulaciji mliva (MV-2,6). Međutim, udeo posmatrane frakcije čestica pri pomenutim

parametrima peletiranja bio je oko 15 puta manji nego u mlivu MV-2,6 pre peletiranja. Povećanje sadržaja vode, usled lubrikativnog efekta, smanjivalo je trenje i pritisak u kanalima matrice, što se ogledalo u nižoj temperaturi peletiranja i manjoj specifičnoj potrošnji energije pelet prese. Iako se moglo pretpostaviti da će manji pritisak u kanalima matrice pri većem sadržaju vode doprineti manjem usitnjavanju krupnih čestica, sadržaj vode nije značajno uticao na udeo čestica većih od 2500 μm .

Kako bi se utvrdili parametri procesa peletiranja koji obezbeđuju što veći udeo čestica > 2500 μm , uz što manju potrošnju energije pelet prese i što manji stepen otiranja peleta, urađen je postupak optimizacije (tab. 48). Svakom od pojedinačnih odziva dodeljen je faktor značajnosti ili prioritet, rangiran od 1 do 5. Pri tome su određene optimalne vrednosti upravljivih parametara za dve kombinacije faktora značajnosti odzivnih parametara. U prvoj kombinaciji, svim odzivima dodeljen jednak prioritet, a u drugoj, najveći faktor značajnosti (5) dodeljen je udelu posmatrane frakcije, srednji faktor (3) je dodeljen stepenu otiranja peleta, a najniži (1) specifičnoj potrošnji energije pelet prese. Međutim, u oba slučaja dobijene su vrlo slične vrednosti odziva i upravljivih parametara i gotovo identična vrednost ukupne funkcije zadovoljenja. Predloženi optimalni parametri procesa peletiranja su najveći razmak između valjaka mlina (2,6 mm), najveći sadržaj vode materijala (17,5%) i debljina matrice od približno 32 mm.

Tabela 48. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica većih od 2500 μm u drugoj fazi istraživanja

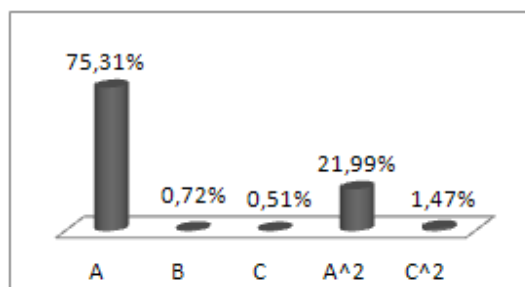
		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 2500 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	0,11	
	max.	2,6	36	17,5	9,32	48,29	3,87	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,745
	Rezultati optimizacije	2,6	31,83	17,5	5,03	36,12	2,50	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,746
	Rezultati optimizacije	2,6	32,02	17,5	4,78	36,23	2,47	

4.6.2.2. Prinos frakcije čestica veličine 2000 – 2500 μm

Dobijeni model koji opisuje uticaj parametara variranih u drugoj fazi istraživanja na prinos frakcije čestica veličine 2000 do 2500 μm imao je visoku vrednost koeficijenta determinacije ($R^2 = 0,972$) kao i LoF vrednost koja nije bila značajana ($p(\text{LoF}) = 0,8127$). Od variranih parametara, značajan uticaj na prinos posmatrane frakcije imala je samo granulacija mliva (tab. 49, sl. 79).

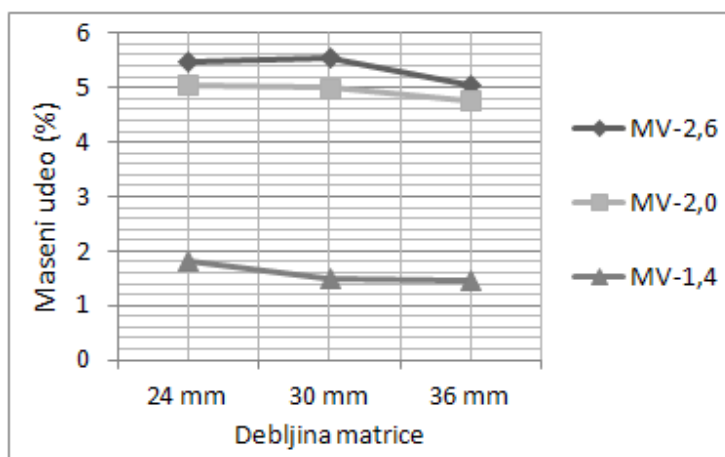
Tabela 49. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	24,8190	
Linearni		
A: granulacija mliva	19,6470	< 0,0001
B: debljina matrice	-0,0304	0,1754
C: sadržaj vode materijala	-5,3503	0,2421
Kvadratni		
A ²	-4,1305	< 0,0001
C ²	0,1704	0,0642



Slika 79. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm u drugoj fazi istraživanja

Pri peletiranju mliva MV-2,0 i MV-2,6 dobijena je vrlo mala razlika udela čestica veličine 2000 – 2500 μm (sl. 80). Početni sadržaj čestica posmatrane frakcije bio je veći kod mliva MV-2,0 (tab. 50). Međutim, udeo čestica > 2500 μm bio je veći kod mliva MV-2,6 u poređenju sa mlivom MV-2,0 (tab. 47). S obzirom da je najveći deo čestica > 2500 μm usitnjen tokom peletiranja, dolazilo je do njihovog prelaska u sitnije frakcije, pa time i u frakciju čestica 2000 - 2500 μm . To je dovelo do izjednačavanja udela posmatrane frakcije čestica dobijenog nakon peletiranja mliva MV-2,0 i MV-2,6.



Slika 80. Prinos frakcije čestica veličine 2000 - 2500 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 50. Prinos frakcije čestica većih od 2500 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u drugoj fazi

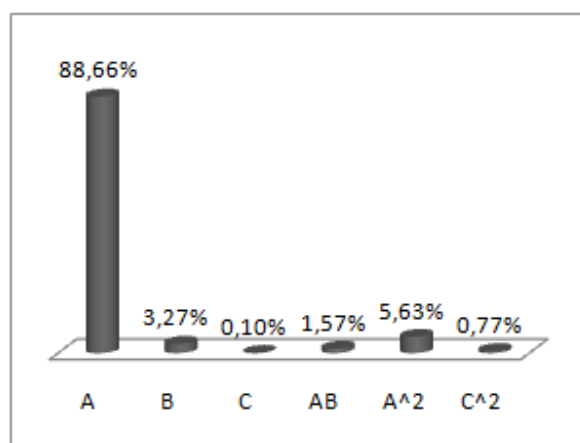
Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	10,53
MV-2,0	21,77
MV-1,4	17,32

4.6.2.3. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm

Najznačajniji uticaj na udeo čestica većih od 2000 μm imala je granulacija, a postojao je i značajan uticaj debljine matrice kao i značajna interakcija granulacije i debljine matrice (tab. 51, sl. 81). Vrednosti koeficijenta R^2 od 0,982 kao i značajnost LoF vrednosti ($p(\text{LoF}) = 0,4764$) ukazuju da je dobijeni model dobro opisuje eksperimentalne podatke.

Tabela 51. Koeficijenti regresione jednačine za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm u drugoj fazi istraživanja

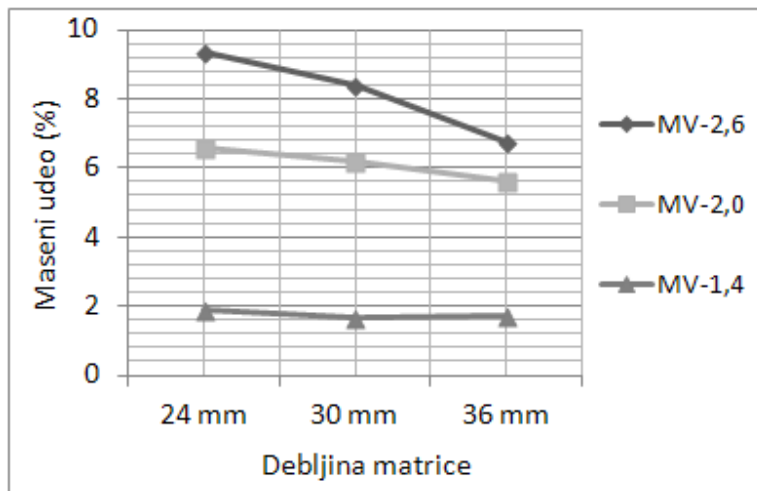
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	23,6054	
Linearni		
A: granulacija mliva	23,5544	< 0,0001
B: debljina matrice	0,2330	0,0057
C: sadržaj vode materijala	-6,1465	0,5283
Interakcije		
AB	-0,1678	0,0319
Kvadratni		
A^2	-3,2943	0,0012
C^2	0,1943	0,1080



Slika 81. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 μm u drugoj fazi istraživanja

Dobijeni rezultati za posmatranu frakciju čestica (sl. 82) vrlo su slični sa rezultatima za udeo čestica većih od 2500 μm (sl. 78). Sa krupnijim mlevenjem na mlinu sa valjcima povećavao se kumulativni prinos čestica većih od 2000 μm u peletiranom materijalu što je posledica većeg početnog udela ovih čestica u mlivu pre peletiranja (tab. 52). Takođe, usled interakcije granulacije mliva i debljine matrice, uticaj debljine matrice na posmatranu frakciju bio je različit pri različitim granulacijama. Kod mliva MV-1,4 praktično nije bilo razlike u udelu frakcije čestica > 2000 μm pri različitim debljinama matrice. Kod mliva MV-2,0 dolazi do blagog smanjenja udela čestica > 2000 μm sa povećanjem debljine matrice, dok je kod mliva MV-2,6 smanjenje izraženije.

Rezultati optimizacije dobijeni kada su odzivima dodeljeni različiti faktori značajnosti ne razlikuju se puno od rezultata optimizacije dobijenih pri istim faktorima značajnosti (tab. 53). Dobijene vrednosti odziva bliske su željenim vrednostima, pri čemu je optimizacija pokazala da je potrebno primeniti najkrupniju granulaciju mliva (MV-2,6), najveći sadržaj vode peletiranog materijala (17,5%) i debljinu matrice približno 32 mm kako bi se u najvećoj mogućoj meri zadovoljili zadati kriterijumi optimizacije u pogledu željenih vrednosti odzivnih parametara.



Slika 82. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 µm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 52. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 µm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u drugoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	71,25
MV-2,0	63,73
MV-1,4	27,15

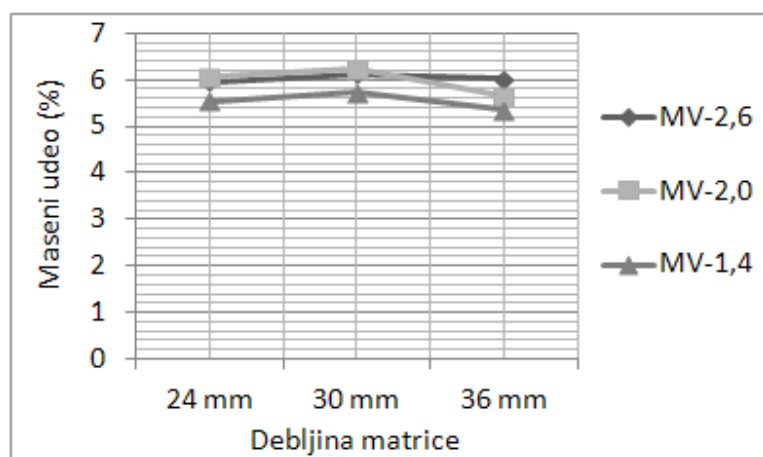
Tabela 53. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 2000 µm u drugoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 2000 µm (%)	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	1,40	
	max.	2,6	36	17,5	9,32	48,29	8,98	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,773
	Rezultati optimizacije	2,6	32,42	17,5	4,62	36,46	7,72	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,792
	Rezultati optimizacije	2,6	31,96	17,5	4,53	36,20	7,81	

4.6.2.4. Prinos frakcije čestica veličine 1600 – 2000 µm

Model koji opisuje uticaj variranih parametara peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 1600 do 2000 µm imao je malu vrednost koeficijenta R^2 od 0,584, dok LoF vrednost nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,9571$). Niska vrednost koeficijenta R^2 ukazuje na malu pouzdanost dobijenog modela pa rezultati za frakciju čestica 1600 – 2000 µm neće biti detaljnije razmatrani. Na udeo ovih čestica statistički značajan uticaj imala je samo granulacija mliva ($p = 0,0259$), a razlike između

udela čestica posmatrane frakcije, dobijene pri različitim parametrima peletiranja, bile su male (sl. 83). Početni udeo čestica veličine 1600 – 2000 μm u mlivima MV-2,0 i MV-2,6 znatno je niži nego kod mliva MV-1,4 (tab. 54) što doprinosi povećanju udela posmatrane frakcije čestica kod tretmana MV-1,4 u odnosu na druga dva tretmana. Međutim, kod tretmana MV-2,0 i MV-2,6 čestice su se tokom peletiranja intenzivno usitnjavale i prelazile iz krupnijih u posmatranu frakciju čestica. Veći početni udeo čestica veličine 1600 – 2000 μm u mlivu MV-1,4, kao i prelazak krupnijih čestica u posmatranu frakciju prilikom peletiranja mliva MV-2,0 i MV-2,6, dovodi do vrlo ujednačenih vrednosti posmatrane frakcije čestica dobijenih pri različitim vrednostima primenjenih parametara peletiranja.



Slika 83. Prinos frakcije čestica veličine 1600 - 2000 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 54. Prinos frakcije čestica veličine 1600 - 2000 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u drugoj fazi istraživanja

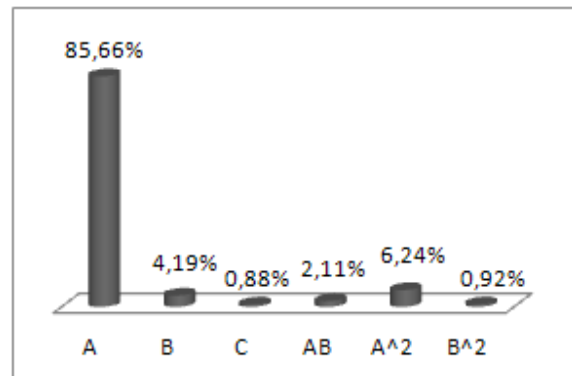
Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	3,99
MV-2,0	7,07
MV-1,4	20,11

4.6.2.5. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm

Za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm dobijen je adekvatan model sa koeficijentom R^2 od 0,979 i sa vrednosti LoF koja nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,975$). Dobijeni rezultati (tab. 55, sl. 84, sl. 85, tab. 56) nisu detaljnije razmatrani s obzirom da su trend eksperimentalnih rezultata, kao i značajnost uticaja parametara procesa peletiranja na prinose ove frakcije, bili vrlo slični rezultatima kumulativnog prinosa frakcije čestica većih od 2000 μm .

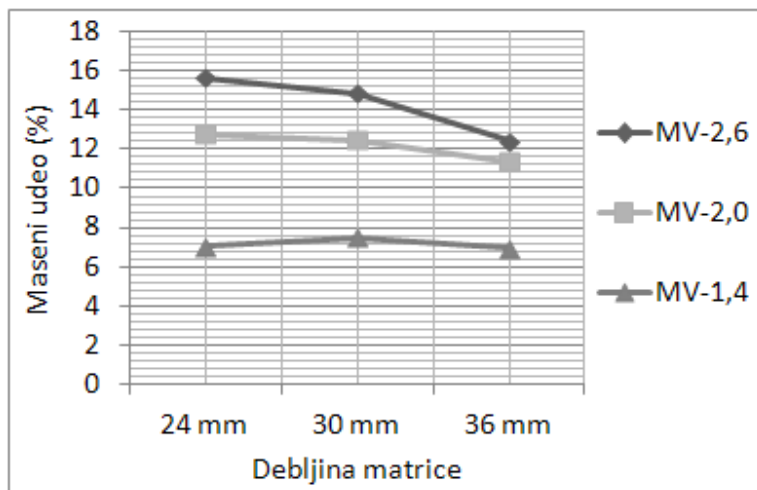
Tabela 55. Koeficijenti regresione jednačine za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-41,7574	
Linearni		
A: granulacija mliva	28,2346	< 0,0001
B: debljina matrice	1,2121	0,0041
C: sadržaj vode materijala	0,2418	0,1055
Interakcije		
AB	-0,2201	0,0225
Kvadratni		
A ²	-3,9224	0,0013
B ²	-0,0151	0,1002



Slika 84. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

Rezultati optimizacije parametara za posmatranu frakciju čestica, kao i vrednost ukupne funkcije zadovoljenja, bili su slični pri istim i pri različitim faktorima značajnosti (tab. 57). Na osnovu rezultata optimizacije može se videti da je u cilju postizanja željenih vrednosti odziva, potrebno peletirati najkрупniju granulaciju (MV-2,6) sa najvećim sadržajem vode (17,5%), pri čemu bi debljina matrice treba biti oko 32 mm.



Slika 85. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 56. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u drugoj fazi istraživanja

Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	75,24
MV-2,0	70,81
MV-1,4	47,26

Tabela 57. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

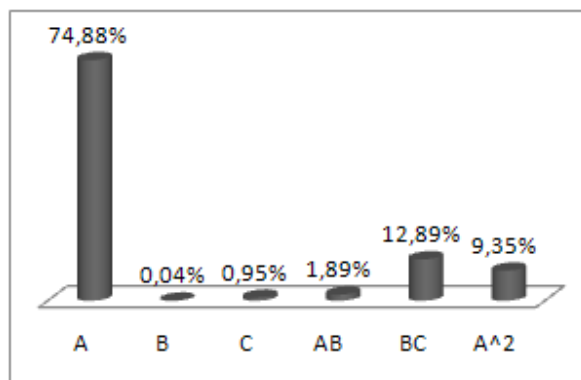
		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 1600 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	6,86	
	max.	2,6	36	17,5	9,32	48,29	15,60	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,771
	Rezultati optimizacije	2,6	32,19	17,5	4,71	36,33	14,17	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,776
	Rezultati optimizacije	2,51	31,45	17,5	5,09	36,35	14,23	

4.6.2.6. Prinos frakcije čestica veličine 1000 – 1600 μm

Za opisivanje uticaja parametara peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 1000 do 1600 μm dobijen je adekvatan model ($R^2 = 0,891$; $p(\text{LoF}) = 0,9822$). Udeo ove frakcije zavisio je u najvećoj meri od granulacije (tab. 58, sl. 86), ali pored granulacije, postojala je i značajna interakcija debljine matrice i sadržaja vode.

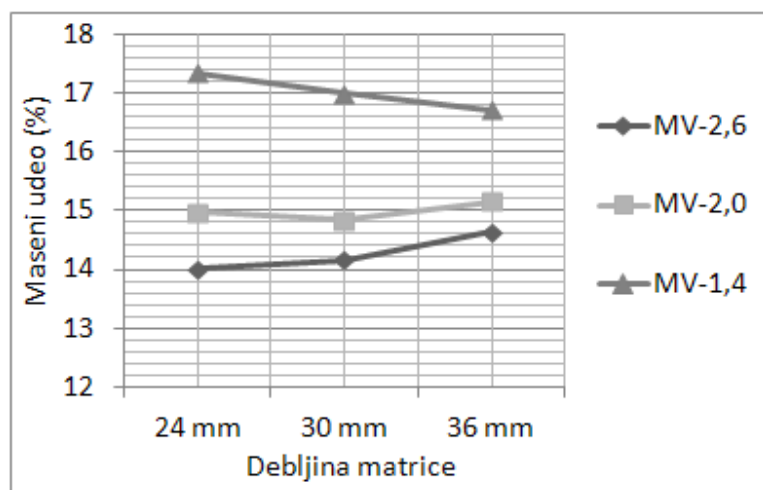
Tabela 58. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-12,2039	
Linearni		
A: granulacija mliva	-12,7455	0,0001
B: debljina matrice	1,2643	0,8701
C: sadržaj vode materijala	2,7863	0,4543
Interakcije		
AB	0,0861	0,2969
BC	-0,0894	0,0200
Kvadratni		
A ²	1,9687	0,0391

Slika 86. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

Rezultati prinosa ove frakcije bili su u suprotnosti sa rezultatima prethodno razmatranih frakcija čestica (> 2500 μm , 2000 – 2500 μm i 1600 – 2000 μm) u pogledu uticaja granulacije mliva

pa je tako najveći udeo čestica veličine 1000 – 1600 μm ostvaren pri peletiranju mliva MV-1,4, a najmanji pri peletiranju mliva MV-2,6 (sl. 87). Ovi rezultati posledica su udela posmatrane frakcije u mlivima pre peletiranja (tab. 59) jer je najveći udeo ovih čestica dobijen kod mliva MV-1,4. Pri tome je potrebno napomenuti da je na rezultate prinosa posmatrane frakcije čestica uticao i prelazak čestica iz krupnijih frakcija usled usitnjavanja tokom peletiranja.



Slika 87. Prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 59. Prinos frakcije čestica veličine 1000 - 1600 μm dobijen pri mokrom prosejavanju nepeletiranog materijala u drugoj fazi

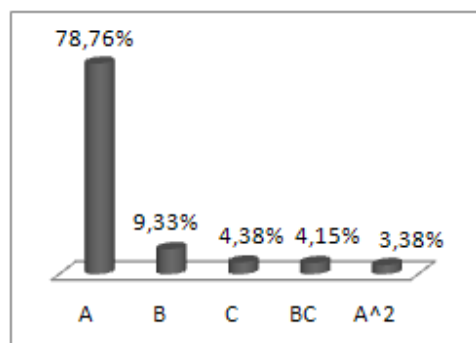
Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	6,55
MV-2,0	8,35
MV-1,4	21,87

4.6.2.7. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm

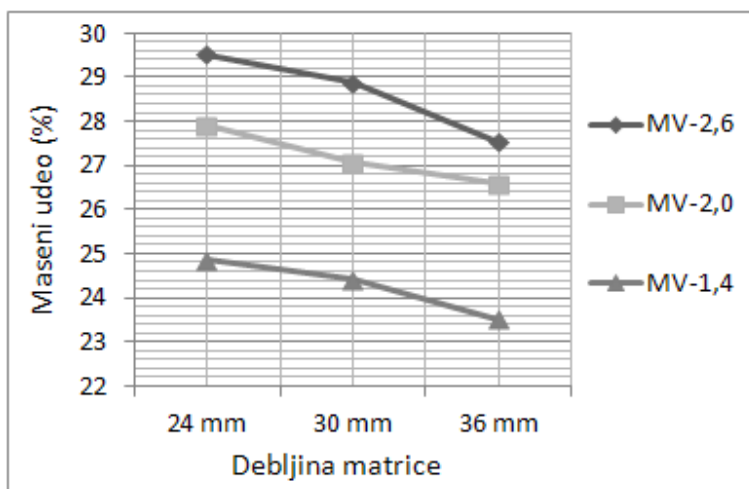
Slični rezultati kao za kumulativne prinose frakcija čestica većih od 2500, 2000 i 1600 μm dobijeni su i za udeo čestica većih od 1000 μm , pa nisu detaljno razmatrani (tab. 60, sl. 88, sl. 89). Dobijeni model koji opisuje uticaj variranih parametara na rezultate posmatrane frakcije imao je koeficijent determinacije od 0,871, a značajnost LoF vrednosti iznosila je 0,9766.

Tabela 60. Koeficijenti regresione jednačine za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	-27,3475	
Linearni		
A: granulacija mliva	11,0404	< 0,0001
B: debljina matrice	1,1417	0,0411
C: sadržaj vode materijala	2,7214	0,1372
Interakcije		
BC	-0,0792	0,1462
Kvadratni		
A ²	-1,8461	0,1858



Slika 88. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 µm u drugoj fazi istraživanja



Slika 89. Kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 µm u drugoj fazi istraživanja

Nakon primenjenog postupka optimizacije čiji je cilj bio očuvati što više čestica većih od 1000 µm, uz što manji stepen otiranja peleta i što manju potrošnju energije pelet prese, dobijene su slične vrednosti odzivnih parametara kada su odzivima dodeljeni jednaki i različiti faktori značajnosti (tab. 61). Pri razmaku između valjaka mlina od približno 2,55 mm, debljini matrice od oko 31 mm i maksimalnom sadržaju vode materijala (17,5%), udeo čestica posmatrane frakcije blizak je najvećoj eksperimentalno dobijenoj vrednosti, pri čemu su dobijene prihvatljive vrednosti stepena otiranja peleta i potrošnje energije pelet prese.

Tabela 61. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za kumulativni prinos frakcije čestica većih od 1000 µm u drugoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica većih od 1000 µm (%)	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	23,52	
	max.	2,6	36	17,5	9,32	48,29	29,76	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,767
	Rezultati optimizacije	2,6	31,56	17,5	4,96	35,97	28,78	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,771
	Rezultati optimizacije	2,55	30,51	17,5	5,42	35,60	28,96	

4.6.3. Poređenje udela krupnih čestica u peletama dobijenih peletiranjem mliva sa različitim mlinova

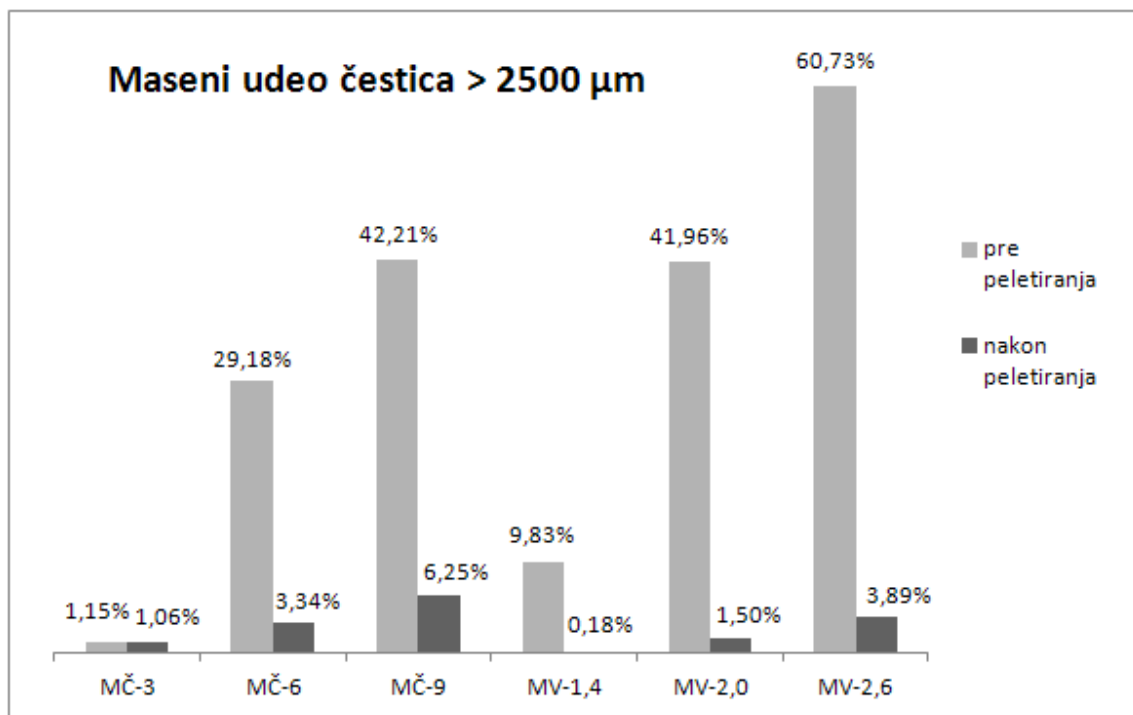
Najveći kumulativni prinosi krupnih čestica u prvoj fazi istraživanja, t.j. pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu čekićaru, iznosili su 6,25% čestica većih od 2500 μm , 10,97% čestica većih od 2000 μm , 16,34% čestica većih od 1600 μm i 28,89% čestica većih od 1000 μm . Sve ove vrednosti ostvarene su pri najkrupnijem mlevenju (mlivo MČ-9) i najmanjem zazoru valjci-matrica (0,30 mm). Pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima, najveći prinosi posmatranih kumulativnih frakcija ostvareni su pri najmanjoj debljini matrice (24 mm) i najkrupnijoj granulaciji mliva (mlivo MV-2,6) i iznosili su: 3,89% čestica većih od 2500 μm , 9,35% čestica većih od 2000 μm , 15,66% čestica većih od 1600 μm i 29,52% čestica većih od 1000 μm .

Uzimajući u obzir veliki broj rezultata istraživanja, *Svihus (2011)* je zaključio da je za stimulaciju razvoja bubca neophodno da najmanje 20% čestica budu veće od 1500 – 2000 μm ili da najmanje 30% čestica bude veće od 1000 μm . Ovakve zahteve teško je ostvariti ukoliko se hrana peletira. Međutim, vidi se da je udeo čestica većih od 1000 μm ostvaren u istraživanju u okviru ove disertacije bio blizu 30%. U prvoj fazi istraživanja najveći sadržaj čestica većih od 1000 μm dobijen je peletiranjem najkrupnijeg mliva (MČ-9) pri najmanjem zazoru valjci-matrica (0,30 mm). Pri ovom zazoru dobijene su pelete lošeg kvaliteta sa stepenom otiranja između 18,87% (pri sadržaju vode od 14,5%) i 21,37% (pri sadržaju vode od 17,5%). Da bi se poboljšao kvalitet peleta potrebno je povećati zazor valjci-matrica, ali to dovodi do smanjenja udela čestica većih od 1000 μm , kao i do povećanja specifične potrošnje energije pelet prese, što se može videti iz rezultata optimizacije prikazanih u tabeli 45. Pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima, najveći sadržaj čestica većih od 1000 μm (29,52%) dobijen je peletiranjem najkrupnijeg mliva (MV-2,6) i primenom najtanje matrice. Pri tome je kvalitet peleta bio zadovoljavajući i vrednosti stepena otiranja kretale su se između 7,39% (pri sadržaju vode od 14,5%) i 8,53% (pri sadržaju vode od 17,5%).

Ovakvi rezultati pokazuju da se odabirom odgovarajućih parametara mlevenja i peletiranja mogu dobiti relativno visoki udeli krupnijih čestica u peletama, pogotovo u odnosu na trenutnu situaciju u praksi pri proizvodnji hrane za svinje i živinu gde se žitarice melju sitno u postupku pripreme za peletiranje.

Ukoliko se poredi prinos čestica većih od 2500 μm ostvaren peletiranjem mliva dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, pri istim parametrima peletiranja (zazor valjci-matrica 0,30 mm i debljina matrice 24 mm) vidi se da se povećavao udeo čestica većih od 2500 μm u peletama sa povećanjem granulacije mliva kod oba mlina, t.j. sa povećanjem početnog udela posmatrane

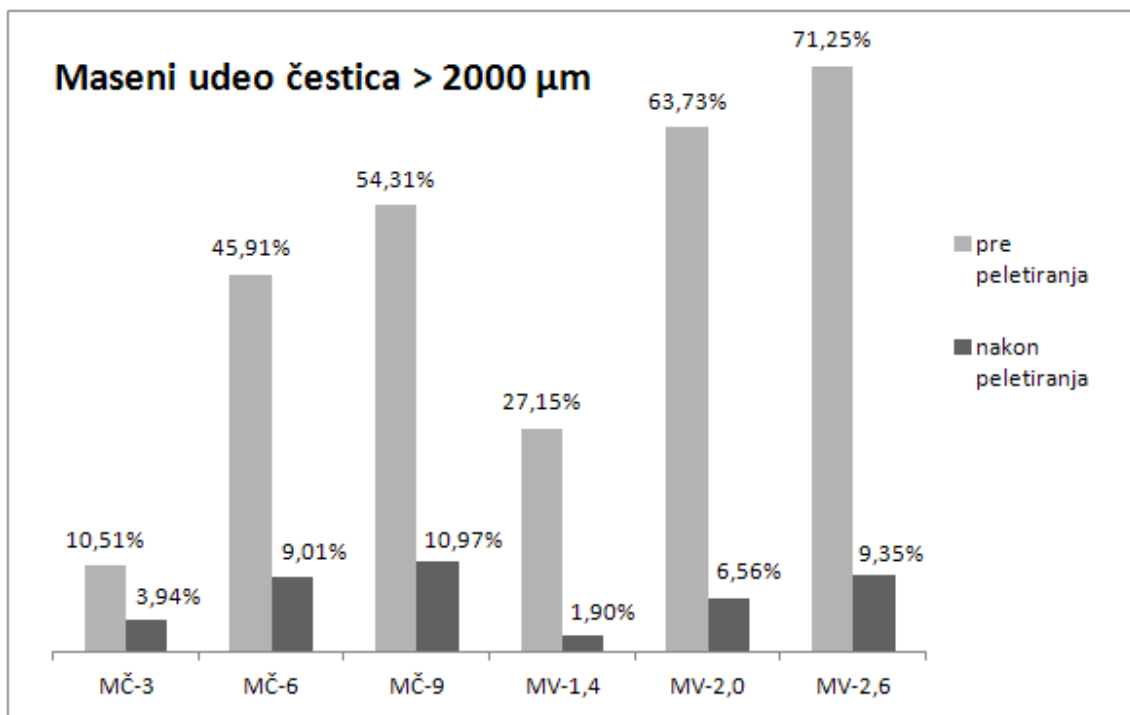
frakcije (sl. 90). Najveći udeo ove frakcije čestica ostvaren je pri peletiranju mliva MČ-9 (6,25%), dok je najveći početni udeo imalo mlivo MČ-2,6. Mliva MČ-9 i MV-2,0 imala su sličan početni udeo posmatranih čestica, međutim, nakon peletiranja, približno četvororostruko veći udeo čestica većih od 2500 μm je dobijen kod mliva MČ-9. Sve ovo ukazuje da se čestice usitnjavaju u manjem stepenu ukoliko je mlivo dobijeno na mlinu čekićaru. To je najverovatnije posledica oblika čestica. Naime, kod mlina sa valjcima do usitnjavanja dolazi delovanjem pritiska u prostoru između valjaka. Istovremeno dolazi i do usitnjavanja usled rezanja i smicanja čestica, delovanjem želebova na površini valjaka u kombinaciji sa različitim obimnim brzinama uparenih valjaka. Usled pomenutih sila nastaju čestice nepravilnog oblika sa iskrzanom površinom i puno oštih ivica i ispupčenja. S druge strane, u mlevnoj komori čekićara, čekići udaraju čestice i tako ih usitnjavaju, ali ih istovremeno i bacaju na površinu sita i na taj način ih „poliraju“, jer se lome ispupčenja i nepravilnosti na površini čestica (Ziggers, 2001). Tako se na mlinu čekićaru dobijaju čestice sferičnijeg oblika za koje se, prema dobijenim rezultatima, može zaključiti da su znatno otpornije na usitnjavanje tokom peletiranja.



Slika 90. Kumulativni prinos čestica većih od 2500 μm u mlivu pre peletiranja (određen mokrim prosejavanjem) i u peletama dobijenim pri zazoru valjci-matrica 0,30 mm i debljini matrice 24 mm

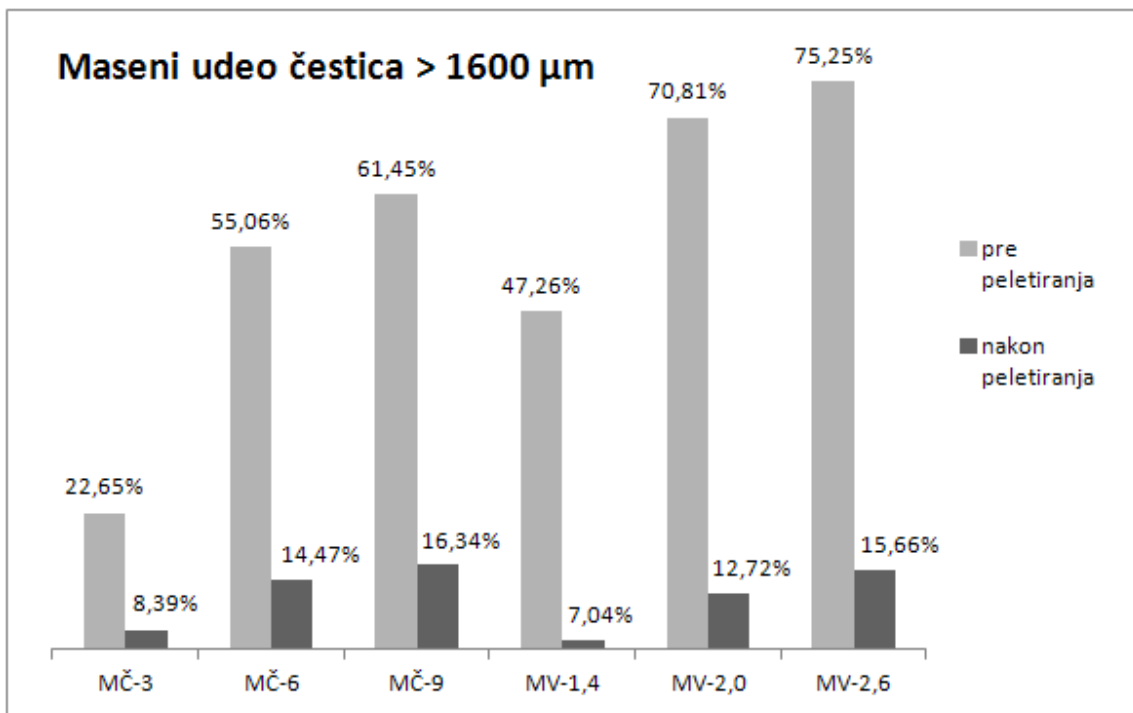
Poređenjem udela čestica većih od 2000 μm dobijenih pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, može se videti da sa povećanjem granulacije mliva kod oba

mlina, t.j. sa povećanjem početnog udela posmatrane frakcije, povećava se i udeo čestica većih od 2000 μm u peletama (sl. 91). Iako je najveći početni udeo imalo mlivo MV-2,6, najveći udeo čestica većih od 2000 μm ostvaren je pri peletiranju mliva MČ-9. Pri peletiranju mliva MČ-6 i MV-2,6 dobijen je približno isti udeo čestica većih od 2000 μm , ali je početni udeo ovih čestica oko 1,5 puta veći u mlivu MV-2,6. Može se smatrati da su ovakvi rezultati posledica su veće otpornosti čestica dobijenih na mlinu čekićaru na usitnjavanje tokom peletiranja.

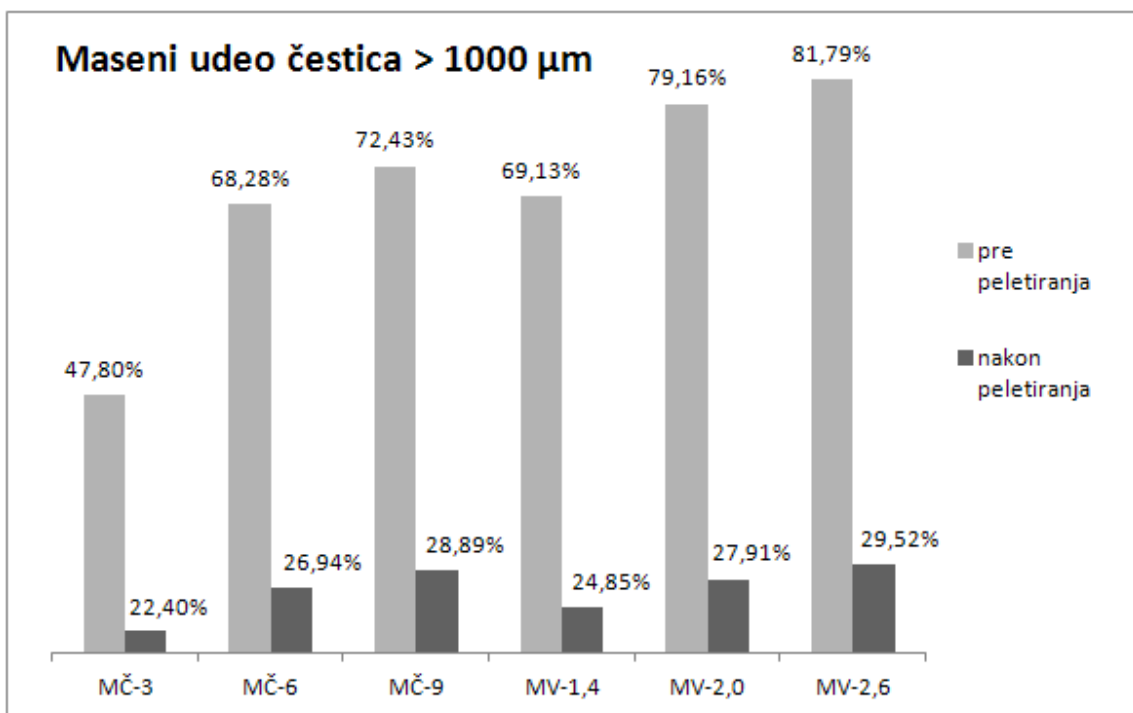


Slika 91. Kumulativni prinos čestica većih od 2000 μm u mlivu pre peletiranja (određen mokrim prosejavanjem) i u peletama dobijenim pri zazoru valjci-matrica 0,30 mm i debljini matrice 24 mm

Rezultati za kumulativne prinose frakcija čestica $> 1600 \mu\text{m}$ (sl. 92) i $> 1000 \mu\text{m}$ (sl. 93) takođe potvrđuju veću otpornost čestica dobijenih na mlinu čekićaru na usitnjavanje tokom peletiranja u poređenju sa česticama dobijenim na mlinu sa valjcima. Najveći udeo čestica $> 1600 \mu\text{m}$ ostvaren je pri peletiranju mliva MČ-9, iako je najveći početni udeo imalo mlivo MV-2,6. Najveći udeo čestica $> 1000 \mu\text{m}$ dobijen je pri peletiranju mliva MČ-9 i MV-2,6, ali je pri tome početni udeo ovih čestica bio veći u mlivu MV-2,6.



Slika 92. Kumulativni prinos čestica većih od 1600 μm u mlivu pre peletiranja (određen mokrim prosejavanjem) i u peletama dobijenim pri zazoru valjci-matrica 0,30 mm i debljini matrice 24 mm



Slika 93. Kumulativni prinos čestica većih od 1000 μm u mlivu pre peletiranja (određen mokrim prosejavanjem) i u peletama dobijenim pri zazoru valjci-matrica 0,30 mm i debljini matrice 24 mm

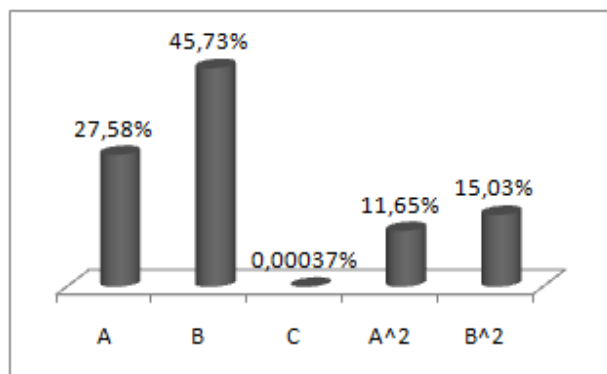
Uprkos većoj otpornosti krupnih čestica dobijenih na mlinu čekićaru, u proizvodnji peletirane hrane za živinu, povoljnije koristiti mlin na valjke s obzirom na velike energetske uštede u fazi mlevenja. Takođe, peletiranjem mliva dobijenog na mlinu sa valjcima dobijaju se kvalitetnije pelete i manja je specifična potrošnja energije pelet prese u poređenju sa peletiranjem mliva dobijenih na mlinu čekićaru.

4.6.4. Prinos frakcije čestica srednje veličine (630 – 1600 µm)

Prema rezultatima postojećih istraživanja (Lucht, 2011; Cappai i sar., 2013; Ball i sar., 2015), kao čestice srednje veličine, koje pogoduju probavnom sistemu svinja (kao što je već objašnjeno), odabrane su čestice veličine 630 do 1600 µm. Na udeo ovih čestica u prvoj fazi, kada je za usitnjavanje kukuruza korišćen mlin čekićar, najviše su uticali zazor valjci-matrica kao i granulacija mliva, dok je uticaj sadržaja vode materijala bio zanemarljiv (tab. 62, sl. 94). Koeficijent R^2 od 0,843 kao i vrednost p(LoF) od 0,4210 ukazuju da je dobijen model koji dobro opisuje eksperimentalne podatke.

Tabela 62. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 µm u prvoj fazi istraživanja

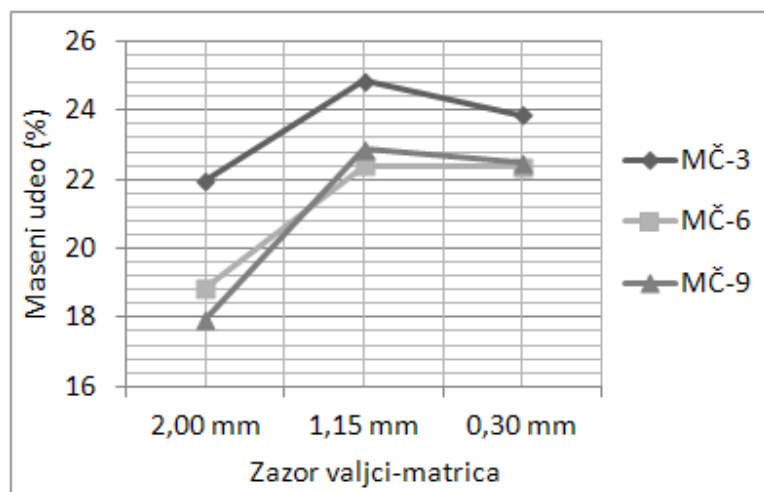
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	31,2641	
Linearni		
A: granulacija mliva	-2,5759	0,0056
B: zazor valjci-matrica	3,1028	0,0012
C: sadržaj vode materijala	0,0039	0,9898
Kvadratni		
A^2	0,1701	0,0433
B^2	-2,4057	0,0257



Slika 94. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica 630 - 1600 µm u prvoj fazi istraživanja

Najveći udeo čestica veličine 630 – 1600 µm dobijen je pri zazoru 1,15 mm, ali vrednosti se ne razlikuju puno od vrednosti dobijenih pri zazoru 0,30 mm, dok su najniži udeli bili pri najvećem zazoru valjci-matrica (sl. 95). U pogledu uticaja granulacije mliva, kod tretmana MČ-6 i MČ-9 dobijene su slične vrednosti, dok su najviše vrednosti prinosa posmatrane frakcije dobijene su pri peletiranju mliva najsitnije granulacije (MČ-3). To je pre svega posledica većeg udela čestica veličine 630 do 1600 µm kod mliva MČ-3 pre peletiranja (tab. 63). Uticaj variranih parametara na

udeo posmatrane frakcije čestica je teško komentarisati zbog velikog prelaska čestica iz krupnijih u posmatranu frakciju kao posledica usitnjavanja čestica tokom peletiranja.



Slika 95. Prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 µm u prvom istraživanju

Tabela 63. Prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 µm dobijen pri mokrom prosejavanju nepelletiranog materijala u prvom istraživanju

Tretman	Prinos frakcije (%)
MČ-3	38,32
MČ-6	20,04
MČ-9	17,28

Razlike u rezultatima optimizacije za posmatranu frakciju čestica, kada su odzivima dodeljeni isti ili različiti faktori značajnosti, nisu bile velike, pri čemu je u slučaju različitih prioriteta dobijena nešto niža vrednost ukupne funkcije zadovoljenja (tab. 64).

Tabela 64. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica veličine 630 do 1600 µm u prvom istraživanju

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci-matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica veličine 630 do 1600 µm (%)	
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	16,91	
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	27,03	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,925
	Rezultati optimizacije	3	1,04	17,5	4,84	35,16	25,75	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,899
	Rezultati optimizacije	3	0,95	17,34	5,20	35,16	25,91	

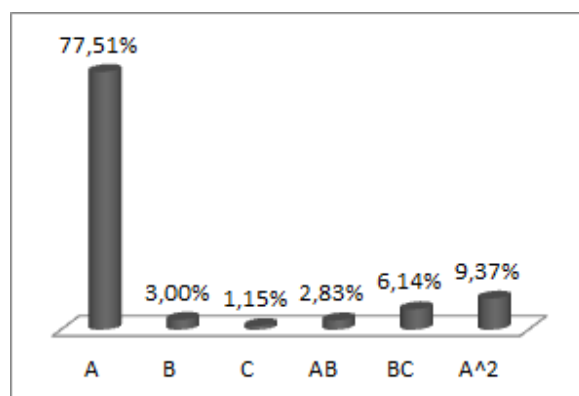
U slučaju kada su parametrima dodeljeni isti faktori značajnosti, rezultati optimizacije su pokazali da je potrebno koristiti sito čekićara sa veličinom otvora od 3 mm, zazor valjci-matrica 1 mm i najveći sadržaj vode (17,5%). Pri tome je potrošnja energije pelet prese bila jednaka najnižoj

izmerenoj vrednosti, stepen otiranja peleta nizak, a udeo čestica posmatrane frakcije blizu najveće vrednosti ostvarene u eksperimentima.

U drugoj fazi istraživanja, kada je kukuruz usitnjavan primenom mlina sa valjcima, takođe je dobijen adekvatan model za prinos frakcije čestica veličine 630 do 1600 μm ($R^2 = 0,922$; $p(\text{LoF}) = 0,9287$). Ovde je najznačajniji bio linearni i kvadratni uticaj granulacije mliva, a postojala je i značajna interakcija debljine matrice i sadržaja vode materijala (tab. 65, sl. 96).

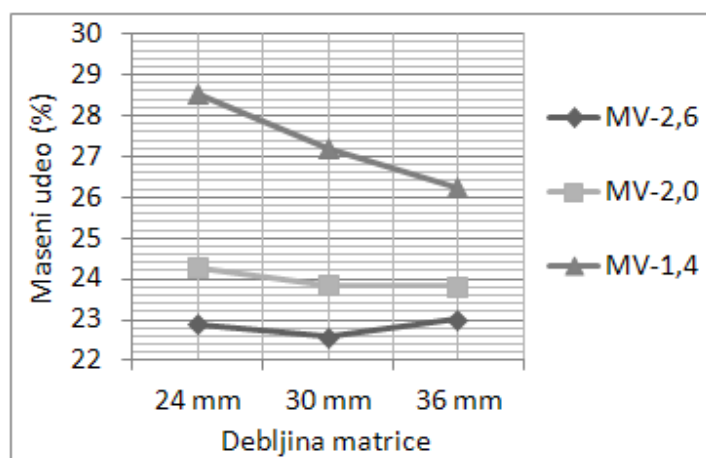
Tabela 65. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	5,8655	
Linearni		
A: granulacija mliva	-21,5539	< 0,0001
B: debljina matrice	1,1794	0,1296
C: sadržaj vode materijala	3,1662	0,3275
Interakcije		
AB	0,1691	0,1391
BC	-0,0995	0,0422
Kvadratni		
A ²	3,1822	0,0174



Slika 96. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica 630 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

Udeo čestica posmatrane frakcije bio je znatno viši kod tretmana MV-1,4 u poređenju sa druga dva tretmana (sl. 97). Ovakvi rezultati proizilaze iz sadržaja posmatrane frakcije čestica u mlivu pre peletiranja koja je bila najveća kod mliva MV-1,4 (tab. 66). Upravo kod ovog mliva, sa smanjenjem debljine matrice povećavao se udeo čestica posmatrane frakcije, dok kod druge dve granulacije nije bilo uticaja debljine matrice.



Slika 97. Prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 66. Prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 μm dobijen pri suvom i mokrom prosejavanju u drugoj fazi istraživanja

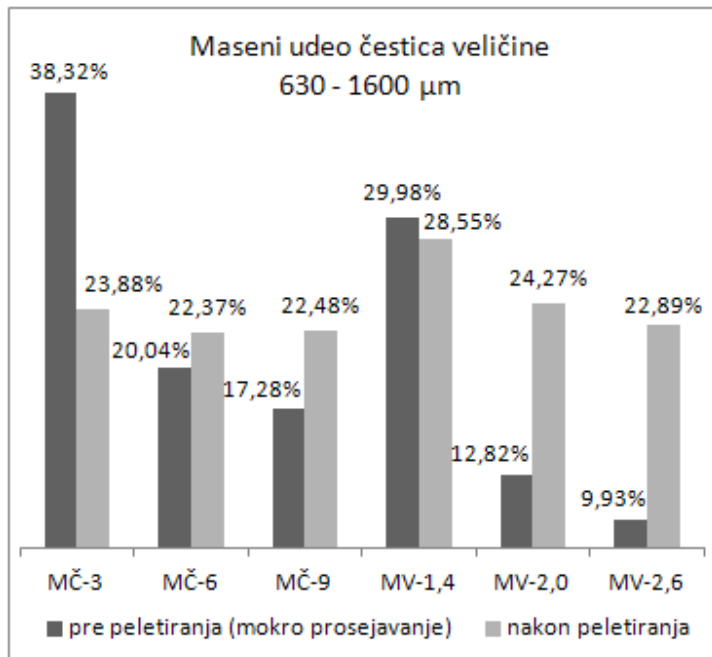
Tretman	Prinos frakcije (%)
MV-2,6	9,93
MV-2,0	12,82
MV-1,4	29,98

Rezultati optimizacije za posmatranu frakciju čestica u drugoj fazi pokazuju da su dobijene vrlo bliske vrednosti ukupne funkcije zadovoljenja, kao i upravljivih parametara, pri istom i pri različitom prioritetu odziva (tab. 67). Vrednosti odziva bliske su željenim vrednostima pri čemu je potrebno primetiti najsitniju granulaciju mliva, najveći sadržaj vode materijala i debljinu matrice od približno 31 mm.

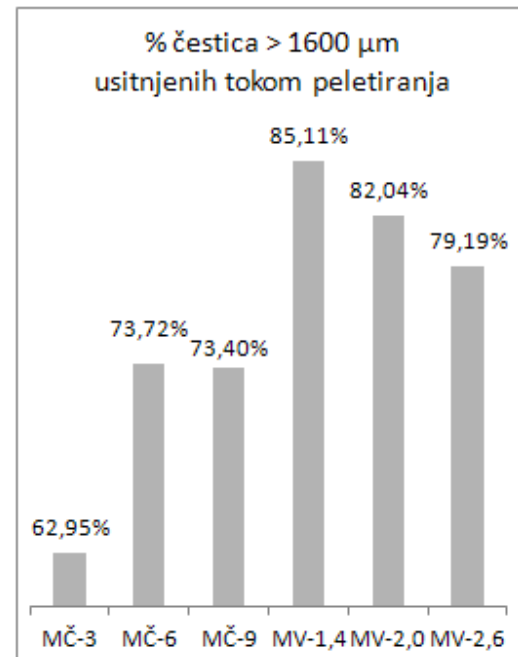
Tabela 67. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica veličine 630 do 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica veličine 630 - 1600 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	22,26	
	max.	2,6	36	17,5	9,32	48,29	28,89	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	max.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,740
	Rezultati optimizacije	1,4	32,17	17,5	5,03	35,32	27,12	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,718
	Rezultati optimizacije	1,4	30,62	17,5	5,67	34,43	27,46	

Ukoliko se posmatraju udeli čestica veličine 630 – 1600 μm u peletama koje su dobijene peletiranjem mliva različite granulacije, dobijenih na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, vidi se da je najveći udeo ostvaren peletiranjem mliva MV-1,4 (sl. 98). Najveći udeo čestica ove veličine pre peletiranja bio je u mlivu MČ-3, međutim nakon peletiranja udeo posmatrane frakcije u mlivu MČ-3 bio je približno jednak sa udelom posmatrane frakcije čestica u mlivima MČ-6, MČ-9, MV-2,0 i MV-2,6 koja su imala znatno niži udeo čestica veličine 630 – 1600 μm pre peletiranja. To je posledica većeg usitnjavanja krupnijih čestica ($> 1600 \mu\text{m}$) pri peletiranju mliva MČ-6, MČ-9, MV-2,0 i MV-2,6 i njihovog prelaska u posmatranu frakciju što potvrđuju rezultati procenta čestica većih od 1600 μm usitnjenih tokom peletiranja (sl. 99).



Slika 98. Prinos frakcije čestica veličine 630 - 1600 µm u mlivu pre peletiranja (određen mokrim prosejavanjem) i u peletama dobijenim pri zazoru valjci-matrica 0,30 mm i debljini matrice 24 mm



Slika 99. Procenat čestica većih od 1600 µm usitnjenih tokom peletiranja

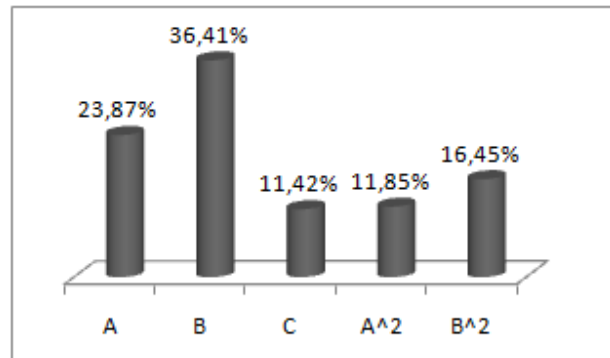
4.6.5. Prinos frakcije srednje sitnih čestica (125 - 630 µm)

Za frakciju srednje sitnih čestica (125 – 630 µm) u prvoj fazi istraživanja dobijen je model koji dobro opisuje eksperimentalne podatke ($R^2 = 0,940$; $p(\text{LoF}) = 0,7602$), pri čemu je najznačajniji bio linearni uticaj zazora i linearni uticaj granulacije mliva (tab. 68). Takođe, i kvadratni uticaji ovih parametara bili su značajni, a postojao je i značajan uticaj sadržaja vode ($p = 0,0032$). Relativni intenzitet uticaja sadržaja vode takođe nije bio zanemarljiv u odnosu na ostale uticaje (sl. 100).

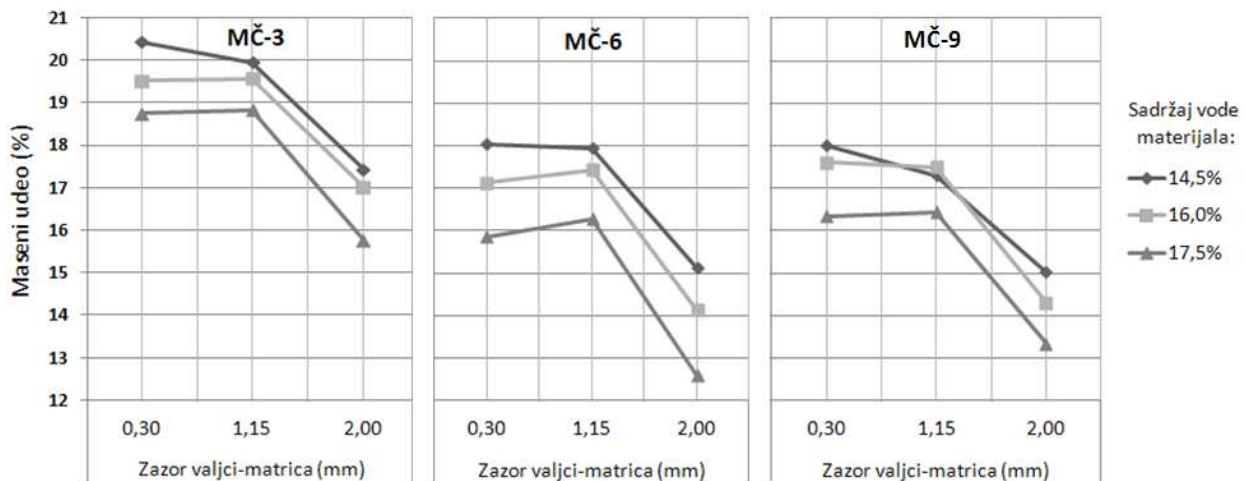
Najveći udeo čestica veličine 125 – 630 µm ostvaren je pri najsitnijoj granulaciji mliva, dok su kod dve krupnije granulacije dobijene vrlo bliske vrednosti (sl. 101). To je u skladu sa rezultatima za udeo ovih čestica pre peletiranja (tab. 69). Što se tiče uticaja zazora, slične vrednosti su dobijene pri zazorima 0,30 i 1,15 mm, dok su pri zazoru 2,00 mm vrednosti bile niže. Sa povećanjem sadržaja vode, pri svim zazorima i granulacijama, dolazilo je do opadanja udela posmatrane frakcije.

Tabela 68. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	5,8655	
Linearni		
A: granulacija mliva	-21,5539	0,0003
B: zazor valjci-matrica	1,1794	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	3,1662	0,0032
Kvadratni		
A ²	0,1691	0,0029
B ²	-0,0995	0,0010



Slika 100. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm u prvoj fazi istraživanja



Slika 101. Prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm u prvoj fazi istraživanja

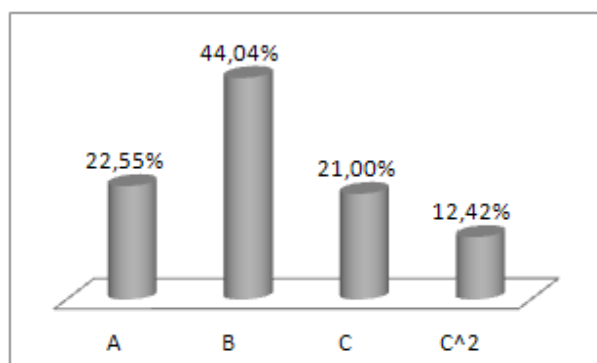
Tabela 69. Prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm dobijen pri mokrom prosejavanju u prvoj fazi istraživanja

Tretman	MČ-3	MČ-6	MČ-9
Prinos frakcije (%)	18,48	10,01	9,57

U drugoj fazi istraživanja za frakciju srednje sitnih čestica dobijen je model sa nešto nižim koeficijentom R^2 od 0,741 dok LoF vrednost nije bila značajna ($p(\text{LoF}) = 0,8938$). Linearni uticaji svih parametara bili su značajni (tab. 70 sl. 102). Dakle, kao i u prvoj fazi, za ovu frakciju je postojao značajan uticaj sadržaja vode ($p = 0,0341$).

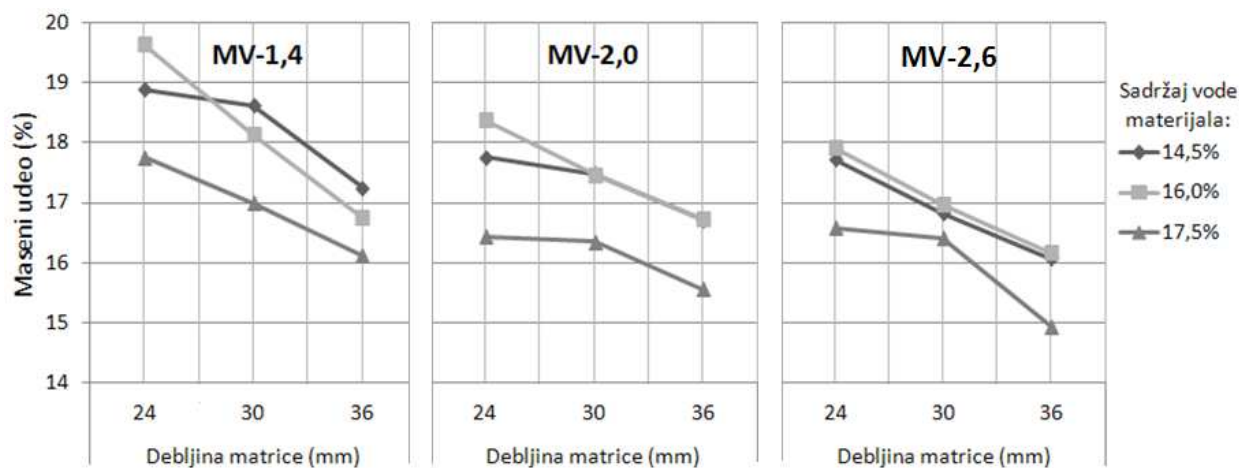
Tabela 70. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm u drugoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	5,8655	
Linearni		
A: granulacija mliva	-21,5539	0,0293
B: debljina matrice	1,1794	0,0052
C: sadržaj vode materijala	3,1662	0,0341
Kvadratni		
C ²	0,1691	0,0888



Slika 102. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica 125 - 630 μm u drugoj fazi istraživanja

Najveći udeo posmatrane frakcije čestica ostvaren je pri najsitnijoj granulaciji, a sa ukрупnjavanjem granulacije sadržaj ovih čestica se smanjuje (sl. 103). To je u skladu sa rezultatima za udeo ovih čestica pre peletiranja, koji opada sa povećanjem granulacije (tab. 71). Sa povećanjem debljine matrice smanjuje se udeo posmatrane frakcije, što je posledica većeg usitnjavanja ovih čestica pri korišćenju deblje matrice, kada postoji veće trenje i pritisak u kanalima matrice. Sa povećanjem sadržaja vode pri svim debljinama matrice i granulacijama dolazilo je do opadanja udela posmatrane frakcije. Ovi rezultati potvrđuju razmatranja o lubrikativnom delovanju vode na očuvanje posmatrane frakcije čestica.



Slika 103. Prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm u drugoj fazi istraživanja

Tabela 71. Prinos frakcije čestica veličine 125 - 630 μm dobijen pri suvom i mokrom prosejavanju u drugoj fazi istraživanja

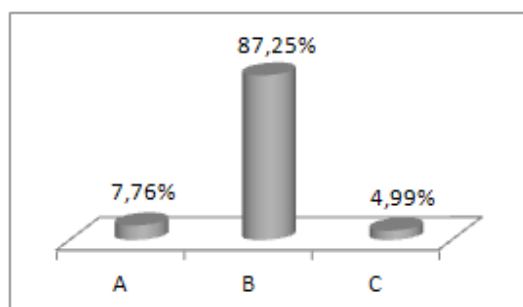
Tretman	MV-1,4	MV-2,0	MV-2,6
Prinos frakcije (%)	9,68	5,32	4,86

4.6.6. Prinos frakcije čestica manjih od 125 μm

Veći udeo frakcije čestica manjih od 125 μm nakon peletiranja, kao najsitnije frakcije u ovom istraživanju, ukazuje na veći intenzitet usitnjavanja čestica tokom peletiranja. Za najsitniju frakciju čestica, u prvoj fazi istraživanja, dobijen je model sa koeficijentom R^2 od 0,792, a značajnost LoF vrednosti bila je 0,8255. Na udeo čestica manjih od 125 μm najveći uticaj je imao zazor valjci-matrica, dok uticaj druga dva parametra nije bio značajan (tab. 72, sl. 104).

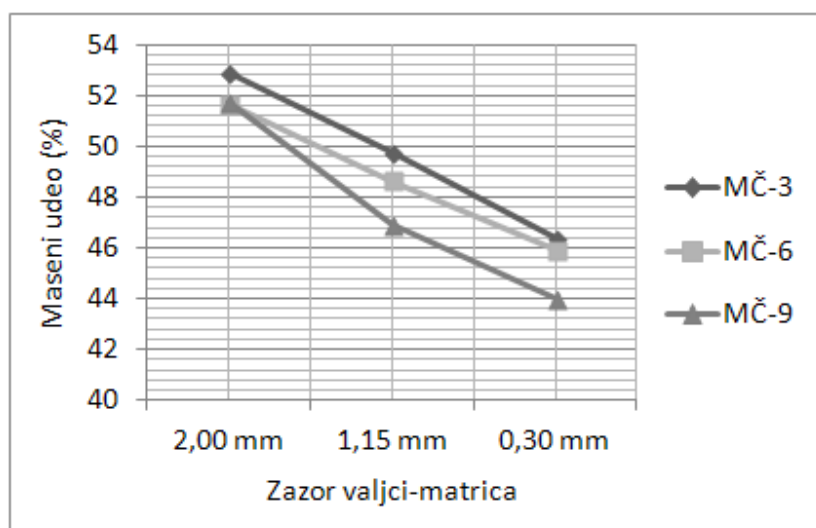
Tabela 72. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u prvoj fazi istraživanja

	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	5,8655	
Linearni		
A: granulacija mliva	-21,5539	0,0988
B: zazor valjci-matrica	1,1794	< 0,0001
C: sadržaj vode materijala	3,1662	0,1761



Slika 104. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u prvoj fazi istraživanja

Sa smanjenjem zazora valjci-matrica dolazilo je do smanjenja udela posmatrane frakcije čestica (sl. 105), što je u skladu sa istraživanjem *Miladinović-a i Svihus-a (2005)*, i ukazuje da



Slika 105. Prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u prvoj fazi istraživanja

smanjenje zazora smanjuje usitnjavanje čestica tokom peletiranja (sekundarno mlevenje). Nasuprot ovome, veći udeo krupnih čestica (> 2500 μm, > 2000 μm, > 1600 μm) je dobijen pri zazoru

2,00 mm u odnosu na zazor 1,15 mm pa bi se moglo zaključiti da je pri zazoru 1,15 mm veći intenzitet sekundarnog mlevenja. Iz ovoga se može zaključiti da iako zazor 2,00 mm dovodi do očuvanja određenog broja krupnih čestica, intenzitet sekundarnog mlevenja je generalno veći pri većem zazoru usled većeg pritiska tokom peletiranja.

S obzirom da povećanje zazora valjci-matrica povećava intenzitet sekundarnog mlevenja, prilikom peletiranja hrane za svinje potrebno je primeniti najmanji mogući zazor. Pri tome je neophodno voditi računa da smanjenje zazora povećava stepen otiranja peleta. Rezultati optimizacije čiji je cilj da udeo čestica manjih od 125 μm bude što manji, kao i da stepen otiranja peleta i potrošnja energije pelet prese budu što manji, prikazani su u tabeli 73. Pri jednakom prioritetu svih odziva, predložene vrednosti parametara bile su: veličina otvora sita čekićara 3 mm, zazor valjci-matrica 0,51 mm i sadržaj vode 17,5%. Pri tome je dobijena mala potrošnja energije pelet prese, uz relativno visok stepen otiranja peleta i udeo posmatrane frakcije čestica od 47,28%. Kada je odzivima dodeljen različit prioritet dobijena je nešto manja vrednost ukupne funkcije zadovoljenja. Za razliku od prvog slučaja, sada je predložena nakrupija granulacija mliva (MĆ-9), najniži sadržaj vode (14,5%) i zazor za 0,43 mm. Pri ovakvim parametrima peletiranja udeo posmatrane frakcije dodatno je bio niži (45,14%), ali je povećana i specifična potrošnja energije za skoro 10 Wh/kg, kao i stepen otiranja peleta sa 7,91 na 9,39%.

Tabela 73. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u prvoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica manjih od 125 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	43,58	
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	53,58	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	min.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,772
	Rezultati optimizacije	3	0,51	17,5	7,91	34,37	47,28	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,732
	Rezultati optimizacije	9	0,93	14,5	9,39	43,13	45,14	

U optimizaciju je pored čestica manjih od 125 μm potrebno uključiti i frakciju čestica 630 - 1600 μm , koje su po veličini optimalne za digestivni sistem svinja, s obzirom da je u njihovoj

ishrani, pored smanjenja udela najsitnijih čestica, važno da nema puno krupnih čestica. Bolja vrednost ukupne funkcije zadovoljenja i nešto bolje vrednosti odziva ostvarane su pri jednakom prioritetu parametara (tab. 74).

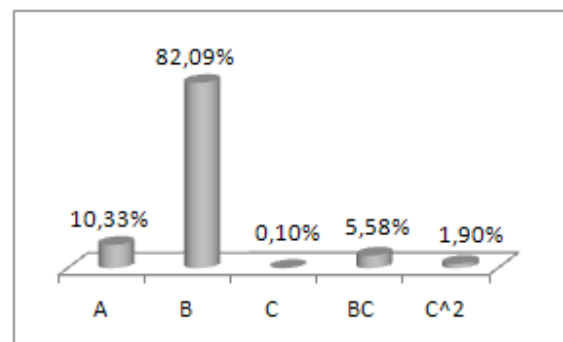
Tabela 74. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica manjih od 125 μm i za frakciju čestica veličine 630 do 1600 μm u prvoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri				Ukupna funkcija zadovoljenja
		A prečnik otvora sita mlina čekićara (mm)	B zazor valjci- matrica (mm)	C sadržaj vode materijala (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo frakcije čestica (%)		
		< 125 μm	630 – 1600 μm						
Opseg vrednosti	min.	3	0,30	14,5	3,15	35,16	43,58	16,91	
	max.	9	2,00	17,5	20,75	51,96	53,58	27,03	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	min.	max.	
I	Faktor značivosti				5	5	5	5	0,804
	Rezultati optimizacije	3	0,55	17,5	7,60	34,31	47,43	26,11	
II	Faktor značivosti				3	1	5	5	0,768
	Rezultati optimizacije	3	0,40	17,5	8,82	34,63	46,86	25,99	

U drugom delu istraživanja dobijen je adekvatan model za frakciju čestica manjih od 125 μm , sa koeficijentom R^2 od 0,840 i značajnošću LoF vrednosti od 0,6367. (tab. 75, sl. 106).

Tabela 75. Koeficijenti regresione jednačine za prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u drugoj fazi istraživanja

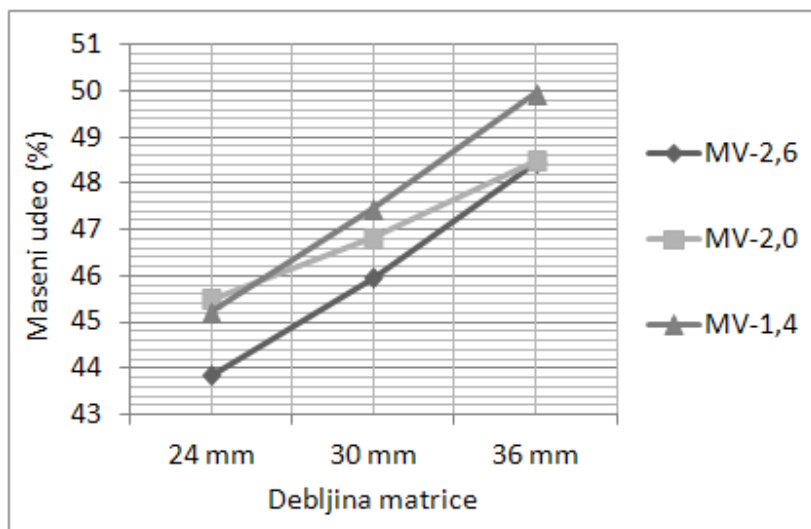
	Vrednost koeficijenta	p - vrednost
Odsečak	131,7964	
Linearni		
A: granulacija mliva	-1,2132	0,0545
B: debljina matrice	-1,0024	0,0002
C: sadržaj vode materijala	-9,0686	0,8372
Interakcije		
BC	0,0840	0,1391
Kvadratni		
C^2	0,2032	0,3680



Slika 106. Intenzitet uticaja parametara procesa peletiranja na prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u drugoj fazi istraživanja

Ukoliko se porede rezultati za posmatranu frakciju čestica u prvom (sl. 105) i drugom delu istraživanja (sl. 107), vidi se da su rezultati vrlo slični. Parametar koji dovodi do povećanja pritiska u kanalima matrice (povećanje zazora valjci-matrica u prvoj i povećanje debljine matrice u drugoj fazi istraživanja) jedini je imao značajan uticaj. Sa povećanjem pritiska u kanalima matrice, pri

povećanju debljine matrice, povećavao se i udeo čestica manjih od 125 μm . Isto kao i u prvom delu, sa smanjenjem granulacije mliva rastao je udeo ovih čestica, iako uticaj ovog parametra nije bio statistički značajan.



Slika 107. Prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u drugoj fazi istraživanja

Prilikom optimizacije, dobijeni rezultati za udeo čestica manjih od 125 μm pokazuju da nije bilo većih razlika u vrednostim odziva u slučajevima kada im je dodeljen isti ili različit prioritet (tab. 76). Za postizanje što manjeg udela čestica manjih od 125 μm , uz što manji stepen otiranja peleta i što manju potrošnju energije pelet prese, potrebno je primeniti najveću granulaciju mliva (MV-2,6) i najveći sadržaj vode (17,5%), dok debljina matrice treba biti oko 29 mm.

Kada je u optimizaciju uključena i frakcija čestica srednje veličine (630 do 1600 μm), opet su pri istim i različitim prioritetima odzivnih parametara dobijene slične vrednosti upravljivih parametara, koje su bile vrlo bliske željenim vrednostima, izuzev nešto više vrednosti stepena otiranja peleta (tab. 77). Pri tom je potrebno je primeniti najsitniju granulaciju mliva (MV-1,4), najveći sadržaj vode (17,5%) i debljinu matrice od oko 28 mm.

Prema tome, u obe faze istraživanja najveći udeo čestica srednje veličine je dobijen pri najsitnijem mlevenju, s obzirom da su mlevni tretmani MČ-3, odnosno MV-1,4, imali najveći početni udeo (udeo u mlivu pre peletiranja) posmatrane frakcije. Iako je mlivo MV-1,4 imalo niži sadržaj frakcije čestica veličine 630 – 1600 μm (29,98%) od mliva MČ-3 (38,32%), njihov udeo nakon peletiranja bio je veći pri peletiranju mliva MV-1,4. To je posledica znatno većeg udela čestica > 1600 u mlivu MV-1,4 (37,49%) nego u MČ-3 (17,27%) koje su se usitnjavale tokom peletiranja i prelazile u posmatranu frakciju.

Može se zaključiti da u je pri proizvodnji peletirane hrane za svinje pogodnije koristiti mlin sa valjcima u odnosu na mlin čekićar zbog manje potrošnje energije za mlevenje i peletiranje i boljeg kaliteta peleta. Pri tome treba primeniti vrlo grubo mlevenje pri kojem će što veći broj čestica biti u željenom intervalu veličine ili krupnije.

Tabela 76. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica manjih od 125 μm u drugoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri			Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo čestica manjih od 125 μm (%)	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	43,13	
	max	2,6	36	17,5	9,32	48,29	50,26	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	min.	
I	Faktor značajnosti				5	5	5	0,664
	Rezultati optimizacije	2,6	29,28	17,5	5,98	34,65	45,65	
II	Faktor značajnosti				3	1	5	0,628
	Rezultati optimizacije	2,6	28,51	17,5	6,35	34,21	45,29	

Tabela 77. Rezultati optimizacije procesa peletiranja za prinos frakcije čestica manjih od 125 μm i za frakciju čestica veličine 630 - 1600 μm u drugoj fazi istraživanja

		Upravljivi parametri			Odzivni parametri				Ukupna funkcija zadovoljenja
		A razmak između valjaka mlina sa valjcima (mm)	B debljina matrice (mm)	C sadržaj vode (%)	stepen otiranja (%)	specifična potrošnja energije pelet prese (Wh/kg)	udeo frakcije čestica (%)		
							< 125 μm	630 – 1600 μm	
Opseg vrednosti	min.	1,4	24	14,5	3,06	32,25	43,13	22,26	
	max.	2,6	36	17,5	9,32	48,29	50,26	28,89	
Ciljana vrednost		u opsegu	u opsegu	u opsegu	min.	min.	min.	max.	
I	Faktor značanosti				5	5	5	5	0,640
	Rezultati optimizacije	1,4	28,23	17,5	6,81	33,06	46,62	28,00	
II	Faktor značanosti				3	1	5	5	0,768
	Rezultati optimizacije	1,4	27,33	17,5	7,28	32,54	46,19	28,20	

POGLAVLJE 5

Zaključci

1. Granulacioni sastav mliva:

- Upotrebom mlina sa valjcima dobija se znatno uža raspodela veličine čestica mliva kukuruza, sa manjim udelom najsitnijih i najkrupnijih frakcija, u poređenju sa mlivima dobijenim upotrebom mlina čekićara.
- Mliva sa približno istom vrednošću geometrijskog srednjeg prečnika, dobijena na mlinu čekićaru i mlinu sa valjcima, imaju raspodelu veličine čestica koja se u velikoj meri međusobno razlikuje. Zato se za procenu intenziteta usitnjavanja ne treba rukovoditi isključivo geometrijskim srednjim prečnikom već je potrebno posmatrati i ukupnu raspodelu veličine čestica.

2. Specifična potrošnja energije za mlevenje:

- Povećanje prečnika otvora sita mlina čekićara, kao i povećanje razmaka između valjaka mlina sa valjcima, dovodi do smanjenja specifične potrošnje energije za mlevenje.
- Za proizvodnju mliva približno istog geometrijskog srednjeg prečnika, kao i za dobijanje mliva sa sličnom raspodelom veličine čestica, potrošnja energije kod mlina sa valjcima značajno je manja u poređenju sa mlinom čekićarom.
- Tokom mlevenja najveća količina energije utroši se pri stvaranju najsitnijih čestica. Zato je važno izbeći prekomerno usitnjavanje, boljim podešavanjem parametara čekićara ili zamenom čekićara mlinom sa valjcima tamo gde je to moguće i opravdano.

3. Temperatura matrice pelet prese:

- Sa povećanjem sadržaja vode smanjuje trenje između peletiranog materijala i zidova kanala matrice, kao posledica lubrikativnog delovanja vode, usled čega se smanjuje se temperatura matrice pelet prese.
- Povećanjem intenziteta usitnjavanja na mlinu čekićaru, povećava se specifična površina mliva, a time i površina dodira čestica sa zidovima kanala matrice, usled čega je veće trenje i viša temperatura peletiranja. Takođe, voda se ravnomernije raspodeljuje po česticama ukoliko je manja specifična površina mliva i ukoliko je manji udeo najsitnijih čestica, koje apsorbuju najveću količinu vode.
- Pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima nema značajnog uticaja granulacije na temperaturu peletiranja. To je verovatno posledica malih razlika specifične površine dobijenih mliva.
- Sa povećanjem zazora, kao i sa povećanjem debljine matrice, raste temperatura peletiranja usled većeg trenja i pritiska u kanalima matrice.

4. Specifična potrošnja energije pelet prese:

- Povećanje zazora valjci-matrica, povećanje debljine matrice, kao i smanjenje sadržaja vode peletiranog materijala, značajno povećava specifičnu potrošnju energije pelet prese.
- Granulacija mliva nema značajan uticaj na specifičnu potrošnju energije pelet prese pri peletiranju mliva različite granulacije dobijenih na istom mlinu. Međutim, ukoliko se upoređuju mliva dobijena na različitim mlinovima, veća potrošnja energije pelet prese ostvarena je pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu čekićaru.

5. Stepem želatinizacije skroba:

- Pri istim parametrima procesa peletiranja, vrednosti stepena želatinizacije skroba dobijene peletiranjem mliva dobijenih na mlinu sa valjcima su oko 2,5 puta veće od vrednosti dobijenih peletiranjem mliva dobijenih na čekićaru. To može biti objašnjeno specifičnom površinom mliva koja je znatno veća kod mliva dobijenih na mlinu čekićaru pa je, pri istoj količini dodate vode, mlivo dobijeno na mlinu sa valjcima bilo ravnomernije navlaženo što je rezultovalo većim stepenom želatinizacije skroba.

6. Tvrdoća peleta:

- Povećanje zazora valjci-matrica, povećanje debljine matrice i smanjenje sadržaja vode peletiranog materijala dovode do povećanja tvrdoće peleta usled većeg trenja i pritiska u kanalima matrice.
- Interakcije čvrsto-čvrsto, koje dolaze do izražaja pri povećanju pritiska u kanalima matrice, više doprinose tvrdoći peleta u odnosu na kapilarne sile.
- Granulacija nije pokazala značajan uticaj na tvrdoću peleta.

7. Stepent otiranja peleta:

- Smanjenje sadržaja vode, povećanje zazora valjci-matrica, kao i povećanje debljine matrice, dovodi do smanjenja stepena otiranja peleta zbog većeg trenja i pritiska u kanalima matrice, usled čega dolazi do boljeg povezivanja čestica putem interakcija čvrsto-čvrsto.
- Krupnija granulacija mliva dobijenog na mlinu čekićaru dovodi do povećanja stepena otiranja peleta što je posledica prisustva većeg udela krupnih čestica koje formiraju slabe tačke u peletama. Povećanjem zazora valjci-matrica razlike stepena otiranja peleta dobijenih peletiranjem mliva različite granulacije se smanjuju. Tada se, usled povećanog pritiska, krupne čestice u većoj meri usitnjavaju, dok se preostale krupne čestice bolje povezuju sa okolnim česticama.
- Pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima granulacija ne utiče značajno na kvalitet peleta.
- Bolji kvalitet peleta (niži stepen otiranja) ostvaruje se peletiranjem mliva dobijenih na mlinu sa valjcima u poređenju sa mlivima dobijenim na čekićaru, pri istim parametrima peletiranja. Ovo je posledica boljeg pakovanja i povezivanja čestica u peletama pri peletiranju mliva dobijenih na mlinu sa valjcima. Dodatni razlog nižeg stepena otiranja je i veći stepen želatinizacije skroba ostvaren pri peletiranju mliva proizvedenog na mlinu sa valjcima.

8. Jaka korelacija između udela prašine i stepena otiranja peleta ukazuje da udeo prašine u velikoj meri dobro predviđa kvalitet peleta.

9. Postojanje korelacije između tvrdoće i stepena otiranja peleta omogućuje primenu tvrdoće za procenu kvaliteta peleta..

10. Mokro prosejavanje izaziva promenu raspodele veličine čestica usled rastvaranja komponenata rastvorljivih u vodi, kao i usled bubrenja čestica. Posledica ovoga je povećanje

udela najkrupnijih i najsitnijih frakcija čestica u poređenju sa njihovim udelom određenim suvim prosejavanjem.

11. Granulacija peletiranog materijala:

- Peletiranje uzrokuje veliki intenzitet usitnjavanja čestica bez obzira na primenjene parametre. Međutim, određene kombinacije parametara mogu doprineti značajnijem očuvanju krupnih čestica.
- Što su čestice posmatrane frakcije veće u odnosu na širinu zazora valjci-matrica, biće osetljivije na usitnjavanje u prekompakcionom sloju delovanjem valjaka pelet prese.
- Najbolje očuvanje krupnijih čestica postiže se pri minimalnom zazoru valjci-matrica. U takvim uslovima ne postoji prekompakcioni sloj i najmanji je pritisak u peletiranom materijalu. Takođe, ukoliko nema prekompakcionog sloja pojedine čestice valjci potiskuju direktno u kanale matrice i manja je verovatnoća da budu usitnjene delovanjem valjaka.
- Parametar peletiranja koji najviše doprinosi povećanju udela krupnih čestica u peletama je granulacija mliva koje se upućuje na peletiranje. Što je krupnija granulacija, udeo krupnih čestica će biti veći.
- Krupne čestice dobijene pri mlevenju na mlinu čekićaru otpornije su na usitnjavanje tokom peletiranja od čestica dobijenih na mlinu sa valjcima. To je posledica njihovog sferičnijeg oblika u odnosu na čestice dobijene na mlinu sa valjcima koje su nepravilnog oblika sa iskrzanom površinom i puno oštrih ivica i ispupčenja pa su samim tim i osetljivije.
- Očekivano poboljšanje kvaliteta peleta, dobijenih od krupno mlevenog materijala, pri povećanju zazora valjci-matrica, kao i pri povećanju debljine matrice je postignuto. Međutim, posledica toga je povećanje potrošnje energije pelet prese kao i povećanje intenziteta usitnjavanja čestica tokom peletiranja.

12. Optimizacija procesa peletiranja sa aspekta ishrane živine:

- Prema rezultatima optimizacije u prvoj fazi istraživanja, kako bi se dobile pelete zadovoljavajućeg kvaliteta, uz što manju potrošnju energije i uz što veći udeo krupnih čestica, potrebno je primeniti krupno mlevenje kukuruza pre peletiranja, zazor valjci-matrica od 2 mm i sadržaj vode od 17,5%. Krupno mlevenje obezbeđuje veći udeo krupnih čestica u peletama. Veliki zazor valjaka i matrice povećava trenje i pritisak u kanalima matrice i tako omogućuje da pelete sa povećanim udelom krupnih

čestica imaju zadovoljavajući kvalitet. Na kraju, najveća količina vode dodata tokom kondicioniranja svojim lubrikativnim delovanjem, smanjuje potrošnju energije pelet prese koja se povećava sa povećanjem zazora valjci-matrica.

- U drugoj fazi istraživanja, rezultati optimizacije ukazuju da je potrebno koristiti najkrupniju granulaciju (MV-2,6), debljinu matrice od oko 31-32 mm i sadržaj vode od 17,5%. Najkrupnija granulacija obezbeđuje najveći udeo krupnih čestica u peletama, visoki sadržaj vode smanjuje potrošnju energije pelet prese, dok je srednja vrednost debljine matrice omogućuje dobijanje peleta dobrog kvaliteta.
- Uprkos većoj otpornosti krupnih čestica dobijenih na čekićaru, u proizvodnji peletirane hrane za živinu, povoljnije koristiti mlin na valjke s obzirom na velike energetske uštede u fazi mlevenja, kao i da se peletiranjem mliva dobijenog na mlinu sa valjcima dobijaju kvalitetnije pelete i manja je specifična potrošnja energije pelet prese u poređenju sa peletiranjem mliva dobijenih na mlinu čekićaru.

13. Optimizacija procesa peletiranja sa aspekta ishrane svinja:

- Povećanje zazora valjci-matrica nije poželjno prilikom peletiranja hrane za svinje jer se povećava intenzitet usitnjavanja čestica, a time i udeo najsitnije frakcije čestica. Sličan efekat ima i povećanje debljine matrice tako da je pri peletiraju hrane za svinje potrebno koristiti što je moguće manji zazor i što je moguće tanju matricu.
- U prvoj fazi istraživanja, rezultati optimizacije pokazuju da je u cilju povećanja udela frakcija čestica srednje veličine (630 – 1600 μm), kao i smanjenja sadržaja najsitnijih čestica ($< 125 \mu\text{m}$), potrebno primeniti najsitnije mlevenje, koje je rezultovalo najvećim početnim udelom posmatrane frakcije čestica (tretman MČ-3), najveći sadržaj vode materijala (17,5%), čime se snižava potrošnja energije pelet prese, dok zazor valjci-matrica treba podestiti da bude nešto veći od 0,30 mm. Takav zazor neće dovesti do značajnijeg povećanja intenziteta usitnjavanja tokom peletiranja, ali će dovesti do poboljšanja kvaliteta peleta.
- I u drugoj fazi istraživanja optimizacija je ukazala da je najveći udeo čestica srednje veličine (630 – 1600 μm), kao i najmanji udeo čestica $< 125 \mu\text{m}$, dobijen pri peletiranju najsitnijeg mliva, koje je imalo najveći početni udeo posmatrane frakcije čestica (MV-1,4). Pri tome sadržaj vode je potrebno podesiti na 17,5%, dok debljina matrice treba biti oko 28 mm.

- Pri proizvodnji peletirane hrane za svinje pogodnije koristiti mlin sa valjcima u odnosu na mlin čekičar zbog manje potrošnje energije za mlevenje i peletiranje i boljeg kaliteta peleta. Pri tome treba primeniti vrlo grubo mlevenje pri kojem će što veći broj čestica biti u željenom intervalu veličine (630 – 1600 μm) ili krupnije.

POGLAVLJE 6

Literatura

- Abdollahi, M.R., Ravindran, V., Svihus B. (2013). Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Animal Feed Science and Technology*, 179, 1–23.
- Abdollahi, M.R., Ravindran, V., Wester, T.J., Ravindran, G., Thomas, D.V. (2011). Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Animal Feed Science and Technology*, 168, 88-99.
- Amerah, A.M., Ravindran, V. (2008). Influence of method of whole-wheat feeding on the performance, digestive tract development and carcass traits of broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 147, 326-339.
- Amerah, A.M., Ravindran, V., Lentle, R.G. (2009a). Influence of wheat hardness and xylanase supplementation on the performance, energy utilisation, digestive tract development and digesta parameters of broiler starters. *Animal Production Science*, 49, 71-78.
- Amerah, A.M., Ravindran, V., Lentle, R.G. (2009b). Influence of insoluble fibre and whole wheat inclusion on the performance, digestive tract development and ileal microbiota profile of broiler chickens. *British Poultry Science*, 50, 366-375.
- Amerah, A.M., Ravindran, V., Lentle, R.G., Thomas, D.G. (2007a). Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World's Poultry Science Journal*, 63, 439-455.
- Amerah, A.M., Ravindran, V., Lentle, R.G., Thomas, D.G. (2007b). Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilisation, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poultry Science*, 86, 2615–2623.
- American Society of Agricultural and Biological Engineers (A.S.A.E.) (2003). Methods of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving, Standard no. S319.3, 202–205.
- Anderson, S. (1994). Large Rotor High Speed Hammermills: Beyond Screen Size. *Feed Management*, 45 (9), 20-22.
- Anderson, S. (2007). Hammer Tip: Go High Speed to Control Particle Size. *Feed Technology Update*, 2(5), 18-21.

- Angulo, E., Brufau, J., Esteve-Garcia, E. (1996). Effect of a sepiolite product on pellet durability in pig diets differing in particle size and in broiler starter and finisher diets. *Animal Feed Science and Technology*, 63, 25-34.
- AOAC official methods of analysis (2000), 17th edition, J. AOAC Int., Arlington, USA.
- AOCS Method Ba 3-38 (2001), Official methods and recommended practices 5th edition, AOCS Press, Champaign.
- ASAE (1997). Cubes, Pellets, and Crumbles - Definitions and Methods for Determining Density, Durability, and Moisture Content. ASAE Standard S269.4. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI
- ASAE S319.3 (2003). Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. In: *Agricultural Engineers Yearbook*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA 589.
- Audet, L. (1995). Emerging feed mill technology: keeping competitive. *Animal Feed Science and Technology*, 53, 157-170.
- Ayles, H.L., Friendship, R.M., Ball, R.O. (1996). Effect of dietary particle size on gastric ulcers, assessed by endoscopic examination, and relationship between ulcer severity and growth performance of individually fed pigs. *Journal of Swine Health and Production*, 4 (Suppl. 5), 211–216.
- Ball, M.E.E., Magowan, E., McCracken, K.J., Beattie, V.E., Bradford, R., Thompson, A., Gordon, F.J. (2015). An investigation into the effect of dietary particle size and pelleting of diets for finishing pigs. *Livestock Science*, 173, 48-54.
- Barbarosa-Canovas, G.V., Ortega-Rivas, E., Juliano P., Yan, H. (2005). *Food Powders: Physical Properties, Processing and Functionality*, Springer US, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York
- Barneveld, R.J., Hewitt, R. (2003). Influence of diet particle size and grain processing on the nutrient yield and gastro-intestinal health of growing pigs, CHM Alliance, South Maclean, Australija, 1-22.
- Behnke, K.C. (1996). Feed manufacturing technology: current issues and challenges. *Animal Feed Science Technology*, 62, 49–57.
- Behnke, K.C. (2001). Factors influencing pellet quality, *Feed technology*, 5(4), 19-22.
- Behnke, K.C. (2006). The Art (Science) of Pelleting, In *Technical Report Series: Feed Technology*, 5-9. Singapore: American Soybean Assn. International Marketing Southeast Asia.
- Bekrić, V. (1997). *Upotreba kukuruza*. Zemun, Srbija: Institut za kukuruz „Zemun polje“.
- Bekrić, V. (1999). *Industrijska proizvodnja stočne hrane*. Zemun, Srbija: Institut za kukuruz „Zemun polje“.
- Bernardin, J.E., Kasarda, D.D. (1973). Hydrated protein fibrils from wheat endosperm. *Cereal Chemistry* 50, 529-536.
- Biggs, P., Parsons, C.M. (2009). The effects of whole grains on nutrient digestibilities, growth performance, and cecal short-chain fatty acid concentrations in young chicks fed ground corn-soybean meal diets. *Poultry Science*, 88, 1893-1905.
- Braunius W.W. (1987). Effect van Baytril™ (Bay Vp 2674) op jonge kalkoenen lijdende aan luchtweginfecties [Uticaj Baytril™ (Bay Vp 2674) na respiratorne infekcije mladih ćurki], *Tijd-schr. Diergeneeskd*, 112, 531–533.

- Briggs, J.L., Maier, D.E., Watkins, B.A., Behnke, K.C. (1999). Effects of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poultry Science*, 78, 1464-1471.
- Brelek, T., Bodroža-Solarov, M., Vukmirović, Đ., Čolović, R., Vučković, J., Lević, J. (2012). Utilization of spelt wheat hull as a renewable energy source by pelleting. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(5), 752-758.
- Calet, C. (1965). The relative value of pellets versus mash and grain in poultry, *World's Poultry Science Journal*, 21, 23-52.
- Cappai, M.G., Picciau, M., Pinna, W. (2013). Ulcerogenic risk assessment of diets for pigs in relation to gastric lesion prevalence. *BMC Veterinary Research*, 9, 36.
- Calvacanti, W.B. (2004). The effect of ingredient composition on the physical quality of pelleted feeds: a mixture experimental approach, Ph.D. dissertation, Kansas State University, USA.
- Chaplin, S.B., Raven, J., Duke, G.E. (1992). The influence of the stomach on crop function and feeding behaviour in domestic turkeys. *Physiology and Behavior*, 52, 261-266.
- Choi, J.H., So, B.S., Ryu, K.S., Kang, S.L. (1986). Effects of pelleted or crumbled diets on the performance and the development of the digestive organs of broilers. *Poultry Science*, 65, 594-597.
- Clark, P.M., Behnke, K.C., Fahrenholz, A.C. (2009). Effects of feeding cracked corn and concentrate protein pellets on broiler growth performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 18, 259-268.
- Cline, M.A., Nandar, W., Bowden, C., Calchary, W., Smith, M.L., Prall, B., Newmyer, B., Rogers, J.O., Siegel, P.B. (2010). The threshold of amylin-induced anorexia is lower in chicks selected for low compared to high juvenile body weight. *Behavioural Brain Research*, 208, 650-655.
- Cramer, K.R., Wilson, K.J., Moritz, J.S., Beyer, R.S. (2003). Effect of sorghum-based diets subjected to various manufacturing procedures on broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 12, 404-410.
- Čolović, R. (2013). Uticaj dodatka biljnih proteinskih koncentrata u hranu za životinje na kvalitet peleta, Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.
- Čolović, R., Vukmirović, D., Matulaitis, R., Bliznikas, S., Uchockis, V., Juškienė, V., Lević, J. (2010). Effect of die channel press way length on physical quality of pelleted cattle feed, *Food and Feed Research* 1, 1-6
- Čuperlović, M., Cmiljanić, R., Boban, Z. (1973). The effect of pelleting a corn-sunflower oil meal type diet supplemented with synthetic lysine on post-prattdial plasma free lysine and histidme levels in pigs, *Acta Veterinaria*, 23(S), 251-258.
- de Jong, J.A.H. (1993). Slijtage van deeltjes: harde realiteit vraagt zachte aanpak, *Proces Technologie*, 7, 30-34.
- de Jong, J.A.H. (1995). Gruisvorming bij transport en opslag [Promena granulacije tokom skladištenja i transporta]. Optimale mengvoederproduktie anno 2000, IV ontwerp en inrichting van de produktie in de praktijk. Studiedag voor de mengvoedetindustrie, 22 Februari.
- Duke, G.E. (1992). Recent studies on regulation of gastric motility in turkeys. *Poultry Science*, 71, 1-8.
- Dorđević, N., Dinić, B. (2007). *Hrana za životinje*. Arandelovac, Srbija: Cenzone tech-Europe d.o.o.
- Dorđević, N., Dinić, B. (2011). *Proizvodnja smeša koncentrata za životinje*. Kruševac, Srbija: Institut za krmno bilje.

- Dorđević, N., Makević, M., Grubić, G., Jokić, Ž. (2009). *Ishrana domaćih i gajenih životinja*. Srbija, Zemun: Poljoprivredni fakultet.
- Duragić, O., Sredanović, S., Lević, J. (2002). Granulacija-bitno svojstvo kvaliteta hrane za životinje, *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi*, 6(1-2), 44-45.
- Earle, R.L. (1983). *Unit operations in food processing (2nd edition)*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Eisemann, J.H., Argenzio, R.A. (1999). Effects of diet differing in propensity to promote gastric lesions on defense systems in gastric mucosae. *Journal of Animal Science*, 77, 2715–2720.
- Eliasson, C.C. (1980). Effect of water content on the gelatinization of wheat starch. *Starke*, 32 (81), 270.
- Engberg, R.M., Hedemann, M.S., Jensen, B.B. (2002). The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity in the digestive tract of broiler chickens. *British Poultry Science*, 43, 569-579, 2002.
- Ewing, W.R. (1951). *Poultry Nutrition (fourth edition)*. Pasadena, USA: The Ray Ewing Company.
- Fahrenheit, A.C. (2012). Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability, Ph.D. thesis, Kansas State University, USA.
- Fairchild, F., Greer, D. (1999). Pelleting with precise mixer moisture control. *Feed International*, 20 (8), 32–36.
- Fairfield, D. (2005). Pelleting system and operation, In Schofield, E.K. (Ed.), *Feed manufacturing technology*, Arlington, USA: American Feed Industry Association Inc.
- Falk, D. (1985). Pelleting cost center, In R.R. Mc Ellhiney, (Ed.) *Feed Manufacturing Technology III*. Arlington, USA: American Feed Industry Association Inc.
- Farner, D.S. (1960). Digestion and the digestive system, In Marshall, A.J. (Ed.) *Biology and comparative physiology of birds*. (pp. 411-467). New York: Academic Press.
- Ferrando, C., Vergara, P., Jimenez, P., Gonalons, E. (1987). Study of the rate of passage of food with chromium-mordanted pland cells in chickens (*Gallus gallus*). *Quarterly Journal of Experimental Physiology*, 72, 251-259.
- Ferreira, S.L.C. , Bruns, R.E., Ferreira, H.S., Matos, G.D., David, J.M., Brandão, G.C., da Silva, E.G.P., Portugal, L.A., dos Reis, P.S., Souza, A.S., dos Santos W.N.L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597, 179–186
- Fišteš, A. (2009). Prilog proučavanju mogućnosti racionalizacije tehnološkog postupka mlevenja pšenice primenom osmovaljne stolice, Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.
- Flis, M., Sobotka, W., Jakubowski, K., Mieszkalski, L., Czarnyszewicz, Z., Anders, A. (2001). The nutritional value of differently prepared barley in growing-finishing pigs. *Journal of Animal Feed Science*, 10, 119–131.
- Friedrich, W. (1977). Futtermitteltechnologie. In: M. Kling and W. Wihlbier (Ed.), *Handehfuttermittel I Band 1, Gesamtschau, Futtermittel tierischer Herkunft, Fette und Gle, Zsadtzstoffe*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 113-143.
- Friedrich, W., Robohm, K.F. (1970). Pressversuche mit Ligninsulfonat-bindemitteln. *Kraftfutter*, 54, 344-349.
- Friedrich, W., Robohm, K.F. (1969). Vergleichende Pressversuche mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften auf der Ring- und Scheibenmatrize. *Kraftfutter*, 53, 390-395.

- Friedrich, W., Robohm, K.F. (1982). Preßfähigkeit von Komponenten und Mischungen, Teil IV: Wirkung unterschiedlicher Inhaltsstoffe in Mischungen und Verdichtungswiderstand. *Krafffutter*, 65 (3), 92-102.
- Friendship, R.M. (2006). Gastric ulcers. In Straw, B.E., Zimmerman, J.J., D'Allaire, S., Taylor, D.J., Ames, I.A. (Ed.) *Diseases of Swine* (pp. 891-900). Ames, USA: Blackwell Professional Publishing.
- Frikha, M., Safaa, H.M., Serrano, M.P., Arbe, X., Mateos, G.G. (2009). Influence of the main cereal and feed form of the diet on performance and digestive tract traits of brown-egg laying pullets. *Poultry Science*, 88, 994-1002.
- Frølich, W. (1990). Chelating properties of dietary fibre and phytate. The role for mineral availability. In Furda, I., Brine, C.J. (Ed.) *New developments in dietary fibre and phytate* (pp. 83-93). New York: Plenum.
- Gilpin, A.S., Herrman, T.J., Behnke, K.C., Fairchild, F.J. (2002). Feed Moisture, Retention Time, and Steam as Quality and Energy Utilization Determinants in the Pelleting Process. *Applied Engeneering in Agriculture*, 18 (3), 331-338.
- Goodband, R.D., Hines, R.H. (1988). An evaluation of barley in starter diets for swine. *Journal of Animal Science*, 66, 3086.
- Graham, H., Fadel, J.G., Newman, C.W., Newman, R.K. (1989). Effect of pelleting a beta-glucanase supplementary on the ileal and faecal digestibility of a barley based diet in the pig. *Journal of Animal Science*, 67, 1293-1298.
- Greenwood, M.W., P.M. Clark, Beyer, R.S. (2004). Effect of feed fines level on broilers fed two concentrations of dietary lysine from 14 to 30 days of age. *International Journal of Poultry Science*, 3, 446-449.
- Grosse Liesner, G.V., Taube, V., Leonhard-Marek, S., Beineke, A., Kamphues, J. (2008). Integrity of gastric mucosa in reared piglets – effects of physical form of diets (meal/pellets), pre-processing grinding (coarse/fine) and addition of lignocellulose (0/2.5 %). *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 93, 373-380.
- Hanke, H. E., J. W. Rust, R. J. Mead, Hansion, L. E. (1972). Influence and source of soybean protein, and of pelleting, on rate of gain and gain/feed of growing swine. *Journal of Animal Science*, 35, 958-962.
- Hasting, W.H., Higgs, D. (1978). *Fish Feed Technology*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
- Havenstein, G.B., Ferket, P.R., Qureshi, M.A. (2003). Growth, livability, and feed conversion of 1957 versus 2001 broilers when fed representative 1957 and 2001 broiler diets. *Poultry Science*, 82, 1500- 1508.
- Haque, E. (1991). Application of Size Reduction Theory to Roller Mill Design and Operation. *Cereal Foods World*, 36, 368-374.
- Healy, B.J., Hancock J.D., Kennedy, G.A., Bramel-Cox, P.J., Behnke, K.C., Hines R.H. (1994). Optimum Particle Size of Corn and Hard and Soft Sorghum for Nursery Pigs. *Journal of Animal Science*, 72, 2227-2236.
- Hedde, R.D., Lindsey, R.C., Parish, R.C., Daniels, H.D., Morgenthien, E.A., Lewis, H.B. (1985). Effect of diet perticle size and feeding H2-receptor antagonists on gastric ulcers in swine. *Journal of Animal Science*, 161, 179.
- Heffner, L.E., Pfof, H.B. (1973). Gelatinization during pelleting. *Feedstuffs*, 45, 33.

- Heiman, M. (2005). Particle Size Reduction. In Schofield, E.K., (Ed.) *Feed Manufacturing Technology*, Chapter 8, Arlington, USA: American Feed Industry Association.
- Heimann, M. (2002). The “bottom line” of grinding. *Feed International*, 23 (5), 32–34.
- Hetland, H., Svihus, B. (2007). Inclusion of dust bathing materials affects nutrient digestion and gut physiology of layers. *Journal of Applied Poultry Research*, 16, 22-26.
- Hetland, H., Svihus, B., Choct, M. (2005). Role of insoluble fiber on gizzard activity in layers. *Journal of Applied Poultry Research*, 14, 38-46.
- Hetland, H., Svihus, B., Krogdahl, Å. (2003). Effects of oat hulls and wood shavings on digestion in broilers and layers fed diets based on whole or ground wheat. *British Poultry Science*, 4, 275-282.
- Hetland, H., Svihus, B., Olaisen, V. (2002). Effect of feeding whole cereals on performance, starch digestibility and duodenal particle size distribution in broiler chickens. *British Poultry Science*, 43, 416- 423.
- Holdich, R.G. (2002). *Fundamentals of Particle Technology*. Leicestershire, UK: Midland Information Technology and Publishing
- Huang, D.S., Li, D.F., Xing, J.J., Ma, Y.X., Li, Z.J., Lv, S.Q. (2006). Effects of feed particle size and feed form on survival of *Salmonella typhimurium* in the alimentary tract and cecal *S. typhimurium* reduction in growing broilers. *Poultry Science*, 85, 831-836.
- ΓAnson, K.A., Choct, M., Brooks, P.H. (2012). The influence of particle size and processing method for wheat-based diets, offered in dry or liquid form, on growth performance and diet digestibility in male weaner pigs, *Animal Production Science*, 52, 899–904.
- ΓAnson, K.A., Choct, M., Brooks, P.H. (2013). Effect of feed processing and enzyme supplementation on diet digestibility and performance of male weaner pigs fed wheat-based diets in dry or liquid form. *Animal Production Science*, 53, 531–539.
- Jacobs, C.M. (2011). The effects of potential dietary prebiotics and grain particle size on the growth performance and intestinal microflora of young poultry, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, USA.
- Jensen, L.S. (2000). Influence of pelleting on the nutritional needs of poultry. *Asian-Australian Journal of Animal Science*, 13, 35–46.
- Jensen, A. H., Becker, D. E. (1965). Effect of pelleting diets and dietary components on the performance of young pigs. *Journal of Animal Science*, 4, 392.
- Jones, F.T., Anderson, K.E., Ferket, P.R. (1995). Effect of extrusion on feed characteristics and broiler chicken performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 4, 300–309.
- Jones, G.P.D., Taylor, R.D. (2001). The incorporation of whole grain into pelleted broiler chicken diets: production and physiological responses. *British Poultry Science*, 42, 477-483.
- Jovanović, M. (1984). *Fiziologija domaćih životinja*. Beograd-Zagreb: Medicinska knjiga.
- Jovanović, R., Dujić, D., Glamočić, D. (2000). *Ishrana domaćih životinja*, Novi Sad, Srbija: Stylos-izdavaštvo.
- Jørgensen, L., J. Dahl, B. B. Jensen, and H. D. Poulsen. (1999). *Effects of expanding, pelleting, and grinding on Salmonella typhimurium infection, growth performance and gastrointestinal ecosystem in slaughter pigs*. Publication No. 426. Copenhagen, Denmark: The Natl. Comm. for Pig Prod.

- Ka, S., Lindberg, J., Stromstedt, L., Fitzsimmons, C., Lindqvist, N., Lundeberg, J., Siegel, P.B., Andersson, L. and Hallbook, F. (2009). Extremely Different Behaviours in High and Low Body Weight Lines of Chicken are Associated with Differential Expression of Genes Involved in Neuronal Plasticity. *Journal of Neuroendocrinology*, 21, 208-216.
- Kaliyan, N., Morey, R.V. (2008). Factors affecting strength and durability of densified biomass products, *Biomass and Bioenergy*, 33, 337-359.
- Kamphues, J. (1988). Investigations on Digestion in Reared Piglets Depending on Amount and Processing of Diets as well as on Feed Additives, Tiera` rztl. Hochsch., Habil.-Schr., Hannover.
- Kamphues, J., Brüning, I., Papenbrock, S., Mößeler, A., Wolf, P., Verspohl, J. (2007). Lower grinding intensity of cereals for dietetic effects in piglets? *Livestock Science*, 109, 132-134.
- Kersten, J., Rohde H. R., Nef, E. (2005). *Principles of Mixed Feed production*. Bergen/Dumme, Germany: Agrimedia.
- Kinsella, J.E. (1979). Functional properties of soy proteins. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 56, 242-258.
- Klasing, K.C. (1998). *Comparative avian nutrition*. New York: Oxford University Press.
- Klasing, K.C. (2005). Poultry nutrition: A comparative approach, *Journal of Applied Poultry Research*, 14, 426-436.
- Klausing, H.K. (2010). How feeding can support intestinal health? *All About Feed*, 1(1), 27-30.
- Klausing, H.K. (2011). A closer look at feed structure, *All About Feed*, 2(4), 18-19.
- Kilburn, J., Edwards, H.M. Jr. (2001). The response of broilers to the feeding of mash or pelleted diets containing maize of varying particle sizes, *British Poultry Science*, 42, 484-492.
- Knacke, O., Pohl, H. (1959). Experimenteller Beitrag zu den Grundlagen des Pelletisierens. *Chemie-Ing-Tech.*, 31(1), 50-54.
- Koch, K. (2002). Hammer mills and roller mills. In MF-2048 Feed Manufacturing, Kansas State University, Manhattan, USA.
- Koster, H. (2003). Improved animal performance through feed processing technology. In Proceedings of AFMA annual symposium (pp. 20-55).
- Krakowka, S., Ellis, J. (2006). Reproduction of severe gastroesophageal ulcers (GEU) in gnotobiotic swine infected with porcine Helicobacter pylori-like bacteria. *Veterinary Pathology*, 43, 956-962.
- Krueger, B.R., Walker, C.E., Knutson, C.A., Inglett, G.E. (1987). Differential scanning calorimetry of raw and annealed starch isolated from normal and mutant maize genotypes. *Cereal Chemistry*, 64, 187-190.
- Lahaye, L., Ganier, P., Thibault, J.N., Riou, Y., Seve, B. (2008). Impact of wheat grinding and pelleting in a wheat-rape seed meal diet on amino acid ileal digestibility and endogenous losses in pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 141, 287-305.
- Lawrence, T.L.J. (1982). Effect of processing on nutritive value of diets for pigs, In Miloslav Rechcigiel, J.R. (Ed.) *Handbook of Nutritive Value of Processed Food*. Animal Feedstuffs, Vol. 2, (pp. 389-401). Boca Raton, FL, USA: CRC Press Inc.

- Lentle, R.G., Ravindran, V., Ravindran G., Thomas, D.V. (2006). Influence of feed particle size on the efficiency of broiler chickens fed wheat-based diets. *The Journal of Poultry Science*, 43, 135-142.
- Lević J., Sredanović, S. (2010). Heat treatments in animal feed processing. In Thematic Proceedings of 2nd Workshop „*Extrusion technology in feed and food processing*“, (pp. 1-24). Novi Sad, Serbia: Institute of food technology.
- Liu, T.S., Snoeyenbos, G.H. and Carlson, V.L. (1969). Thermal resistance of Salmonella enftenberg 774W in dry animal feeds, *Avian Diseases*, 13, 611-631.
- Lo, G.S. (1990). Physiological effect and physic-chemical properties of soy cotyledon fibre. In Furda, I., Brine, C.J. (Ed.), *New developments in dietary fibre* (pp. 49-66). New York: Plenum Press.
- Lowe, R. (2005). Judging pellet stability as part of pellet quality, *Feed Technology*, 9(2), 15-19.
- Lund. D. (1984). Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 20(4), 249-273.
- Lundblad, K.K., Issa,S., Hancock,J.D., Behnke,K.C., McKinney,L.J., Alavi,S., Prestlokken,E., Fledderus,J., Sorensen,M. (2011). Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 169, 208–217.
- Luyten, H., van Vliet, T., Walstra, P. (1992). Comparison of various methods to evaluate fracture phenomena in food materials. *Journal of Texture Studies*, 23, 245-266.
- Lucht, T. (2011). Stage grinding with hammer mill and crushing roller mill. *Feed Compounder* (April 2011), 22-26.
- Maier, D.E., Bakker-Arkema, F.W. (1992). The counterflow cooling of feed pellets. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 53, 305-319.
- Maier, D.E., Briggs, J., Watkins, B.A. (1999). Effects of ingredients and processing conditions on the pelleting of feeds. Completed research summary, Project 305. Tucker, USA: US Poultry and Egg Association.
- Marchant, J.L., Blanshard, J.M. (1980). Changes in the birefringence characteristics of cereal starch granules at different temperatures and water activities, *Starke*, 30(7), 223-226.
- Mavromichalis, I., Hancock, J.D., Senne, B.W., Gugle, T.L., Kennedy, G.A., Hines R.H., Wyatt, C.L. (2000). Enzyme supplementation and particle size of wheat in diets for nursery and finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 78, 3086-3095.
- McCapes, R.H., Ekperigin, H.E., Cameron, W.J., Ritchie, W.L., Slagter, J., Stangeland, V., Nagaraja, K.V. (1989). Effect of a new pelleting process on the level of contamination of poultry mash by Escherichia coli and Salmonella. *Avian Diseases*, 33, 103-111.
- McKinney, L.J., Teeter, R.G. (2004). Predicting effective caloric value of nonnutritive factors: I. Pellet quality and II. Prediction of consequential formulation dead zones. *Poultry Science*, 83, 1165-1174.
- Melcion, J.P., van der Poel, A.F.B. (1993). Process technology and antinutritional factors: principles, adequacy and process optimization, In: A.F.B van der Poel, I. Huisman and H.S. Saini (Ed.), Proceedings of the Second International Workshop on Antinutritional Factors (ANF's) in Legume Seeds “*Recent Advances of Research in Antinutritional Factors in Legume Seeds*” (pp. 419-434). Wageningen, Netherlands.

- Мерко, И.Т. (1979). *Совершенствование технологических процессов сортового помола пшеницы*. Москва: Колос.
- Miladinović, D. (2009). Wet Sieving procedure on a “Retsch AS 200 Control” for feed manufactured pellets or feed compound. Pellet Quality Project: Procedure Manual. As, Norway: Fôrtek – Norwegian University of Life Science.
- Miladinović, D., Svihus, B. (2005). Optimising press settings contributes to better pellet quality. *Feed technology*, 9(5), 15-17.
- Mohsenin, Zasko, J. (1976). Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21, 193-205.
- Montgomery, D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments (fifth edition)*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Moore, S.J. (1999). Food breakdown in an avian herbivore; who needs teeth? *Australian Journal of Zoology*, 47, 625-632.
- Moran, E.T. (1989). Effect of pellet-quality on the performance of meat birds, In Haresign, W., Cole, D.J.A. (Eds.), *Recent Advances in Animal Nutrition* (pp. 87-108). London: Butterworth.
- Morel, P.C.H. (2005). Particle size influences the incidence of stomach ulcers but has no effect on performance in barley-based diets for pigs. In J.E. Paterson (Ed.) Proceedings of the Tenth Bienn. Conf. Australasian Pig Sci. Assoc. *Manipulating Pig Production X*. (pp. 147). Corowa, Australia: Australian Pig Science Association.
- Morel, P.C., Cottam, Y.H. (2007). Effects of particle size of barley on intestinal morphology, growth performance and nutrient digestibility in pigs. *Asian-Australian Journal of Animal Science*, 20, 1738–1745.
- Moritz, J.S., Lilly, K.G.S. (2010). Production strategies and feeding opportunities for pellets of high quality. In Proceedings of the 8th Annual Mid-Atlantic Nutrition Conference (pp. 85-90). College Park, USA: University of Maryland.
- Moritz, J. S., Wilson, K. J., Cramer, K. R., Beyer, R. S., McKinney, L. J., Cavalcanti, W. B., Mo., X. (2002). Effect of formulation density, moisture and surfactant on feed manufacturing, pellet quality and broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 11, 155–163.
- Morrow, A.T.S. (1992). Studies on voluntary feed intake of growing pigs with reference to behaviour and efficiency of food utilisation, Ph.D.Thesis, The Queen's University of Belfast, UK.
- Mösseler, A., Kottendorf, S., Liesner, V.,G., Kamphues, J. (2010). Impact of diets' physical form (particle size; meal/pelleted) on the stomach content (dry matter content, pH, chloride concentration) of pigs. *Livestock Science*, 134, 146–148.
- Nahm, K.H. (2002). Efficient feed nutrient utilization to reduce pollutants in poultry and swine manure, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32, 1–16.
- Nielsen, K.E. (1998). Influence of feed structure/processing on stomach size/ulcers in pigs. Proceedings 4th International KAHN Symposium (pp. 4/1 - 4/8), Reinbek, Germany.
- Nielsen, E.K., Ingvarsen, K.L. (1999). Influence of feed processing on gastric lesions, weight of stomach and stomach content, and performance in growing pigs (DJF Rapport). *Husdyrbrug*, 14, 1–38.

- Nir, I., Hillel, R., Ptichi, I., Shefet, G. (1995). Effect of particle size on performance. 3. Grinding pelleting interactions. *Poultry Science*, 74, 771–783.
- Nir, I., Hillel, R., Shefet, G., Nitsan, Z. (1994a) Effect of grain particle size on performance. 2. Grain texture interactions. *Poultry Science*, 73, 781-791.
- Nir, I., Melcion, J.P., Picard, M. (1990). Effect of particle size of sorghum grains on feed intake and performance of young broilers. *Poultry Science*, 69, 2177–2184.
- Nir, I., Ptichi, I. (2001). Feed particle size and hardness: influence on performance, nutritional, behavioral and metabolic aspects. In Proceedings of the 1st World Feed Conference (pp. 157-186). Utrecht, Netherlands.
- Nir, I., Twina, Y., Grossman, E., Nitsan, Z. (1994b). Quantitative effects of pelleting on performance, gastrointestinal tract and behaviour of meat-type chickens. *British Poultry Science*, 35, 589–602.
- Nolan, A., McDonnell, K., Devlin, G.J., Carroll, J.P., Finnan, J. (2010). Economic analysis of manufacturing costs of pellet production in the Republic of Ireland using non-woody biomass. *Open Renew. Energy J.*, 3, 1–11.
- O'Dell, B.L., Newberne, P.M., Savage, J.E. (1959). An abnormality of the proventriculus caused by feed texture. *Poultry Science*, 38, 296-301.
- Oechsner de Coninck, K. and Bouvier, J.M. (1995). Preconditioning in the extrusion-cooking process. In Grain Processing Asia '95 (pp. 109-119). Singapore.
- Ouchiyama, N., Tanaka, T. (1985). Kinetic analysis of the compaction process of a pellet in granulation. In C.E. Capes (Ed.), 4th Int. Symposium on Agglomeration (pp. 635-641). Toronto, Canada.
- Parsons, A.S., Buchanan, N.P., Blemings, K.P., Wilson, M.E., Moritz, J.S. (2006). Effect of corn particle size and pellet texture on broiler performance in the growing phase. *Journal of Applied Poultry Research*, 15, 245-255.
- Patton, J.W., Buskirk, H.H., Rams, L.A. (1937). A study of the relative merits of pellets and mash poultry feeds. *Vet. Med.*, 32, 423-427.
- Payne, J.D. (1978). Improving quality of pellet feeds. *Milling Feed Fertil.*, 162, 34-41.
- Payne, J.D. (1979). Pelleting - striving for greater control. *AgriTrade*, October 1995.
- Payne, J., Rattink, W., Smith, T., Winowiski, T., Dearsley, G., Strom, L. (2010). *The Pelleting Handbook*. Sapsborg, Norway: Borregaard Lignotech.
- Peron, A., Bastianelli, D., Oury, F.-X., Gomez, J., Carré, B. (2005). Effects of food deprivation and particle size of ground wheat on digestibility of food components in broilers fed on a pelleted diet. *British Poultry Science*, 46, 223-230.
- Peron, A., Svihus, B., Gabriel, I., Bérot, S., Tanguy, D., Bouchet, B., Gomez, J., Carré, B. (2007). Effects of two wheat cultivars on physico-chemical properties of wheat flours and digesta from two broiler chicken lines (D+ and D-) differing in digestion capacity. *British Poultry Science*, 48, 370- 380.
- Petz, B. (2004). *Osnovne statističke metode za nematematičare*. Zagreb, Hrvatska: Naklada Slap.
- Pfost, H.B. (1963). Testing the durability of pelleted feed. *Feedstuffs*, 23, 66-68.
- Pfost, H.B. (1964). The Effect of Lignin Binder, Die Thickness, and Temperature on the Pelleting Process. *Feedstuffs*, 36 (22), 20.

- Pfost, H.B. (1971). Equipment and techniques in starch gelatinization. *Feedstuffs*, 24.
- Pfost, H.B., R.M. Allen, G. Gutekunst, W. Monti, R.L. Stroup (1962). A Standard Method of Measuring Pellet Quality. In Proceedings of the 1962 Feed Production School "Cost Reductions Through In-Plant Production Controls and Reports of Special Research Projects". Missouri, USA: Midwest Feed Manufacturers Association.
- van der Poel, A.F.B. (1994). Effecten van processen (gericht op salmonella-decontaminatie), *De Molenaar*, 94 (471), 20-24.
- Pravilnik o kvalitetu hrane za životinje Republike Srbije, Službeni glasnik Republike Srbije br. 4/2010.
- Rao, M.A. and Lund, D.B. (1986). Kinetics of thermal softening of foods - a review. *J. Food Process Preserv.*, 10, 311-329.
- Ребиндер, П.А. (1947). Физико-химические исследования процессов деформации твердости, Юбилейный сборник АН СССР. (cit. prema Ястребов, П.П., 1973).
- Reece, F.N. (1966). Temperature, pressure, and time relationships in forming dense hay wafers. *Transactions of the ASAE*, 9(1), 749-751.
- Reece, F.N., Lott, B.D., Deaton, J.W. (1985). The effects of feed form, grinding method, energy level, and gender on broiler performance in a moderate (21 °C) environment. *Poultry Science* 64, 1834–1839.
- Reece, F.N., Lott, B.D., Deaton, J.W. (1986a). Effects of environmental temperature and corn particle size on response of broilers to pelleted feed. *Poultry Science*, 65, 636–641.
- Reece, F.N., Lott, B.D., Deaton, J.W. (1986b). The effects of hammer mill screen size on ground corn particle size, pellet durability, and broiler performance. *Poultry Science*, 65, 1257-1261.
- von Reichenbach, H.G., Dolud, M. (2010). Preservation of coarse grinding structures in pig and poultry feed production by striking new paths in feed processing, In Thematic proceedings "Extrusion technology in feed and food processing" (pp. 62-67). Novi Sad, Serbia: Institute of food technology.
- Rittinger, P. (1867). Lehrbruch der Aufbreitungskunde, Berlin. (cit. prema Ястребов, П.П., 1973).
- Robinson, R., Bartikoski, R., Smith, G.M., Heideman, A.G., Nesseth, K.A., Stevens, C (1962). Methods Available for Improving Pellet Durability. In Proceedings of the 1962 Feed Production School "Cost Reductions Through In-Plant Production Controls and Reports of Special Research Projects". Missouri, USA: Midwest Feed Manufacturers Association.
- Robohm, K.F. (1992). Adjustable roll gap: benefits to energy demand, throughput and pellet durability. *Feed International*, 13, 30-35.
- Robohm, K.F., Apelt, J. (1989). Die Automatische Spaltweitenverstellung. *Die Mühle und Mischfüttertechnik*, 126, 271-275.
- Rodgers, N.J., Chost, M., Hetland, H., Sundby, F., Svihus, B. (2012). Extent and method of grinding of sorghum prior to inclusion in complete pelleted broiler chicken diets affects broiler gut development and performance. *Animal Feed Science and Technology*, 171, 60-67.
- Rougiere, N., Gomez, J., Mignon-Grasteau, S., Carré, B.(2009). Effects of diet particle size on digestive parameters in D+ and D- genetic chicken lines selected for divergent digestion efficiency. *Poultry Science*, 88, 1206-1215.

- Ruetsche, P. (1989). *Grinding/Sieving in the Feed Milling Industry*. Advances in Feed Technology, No. 1, Detmold, Germany: Verlag Moritz Schafer.
- Rumpf, H. (1958). Grundlagen und Methoden des Granulierens. *Chemie-Ing.-Tech.*, 30 (3), 144- 158.
- Samuelsson, R., Thyrel, M., Sjöström, M., Lestander, T.A. (2009). Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel processing technology*, 90, 1129 – 1134.
- Scheideler, S.E. (1995) Is Pelleting Cost Effective? *Feed Management*, 46 (1), 21-26.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92, 699–706.
- Shipe, K.J., Evans, A.M., Lilly, K.G.S., Shires, L.K., Swiger, B.N., Moritz, J.S. (2011). Effects of feed manufacture techniques that vary feed exposure to pellet die heat and pressure on pellet quality and subsequent broiler lysine utilization. *Poultry Science*, 90 (Suppl. 1), 105.
- Skoch, E.R., Binder, S.F., Deyoe, C.W., Allee, G.L., Behnke, K.C. (1983). Effects of pelleting conditions on performance of pigs fed a corn-soybean meal diet. *Journal of Animal Science*, 57 (4), 922-928.
- Skoch, E.R., Behnke, K.C., Deyoe, C.W., Binder, S.F. (1981). The effect of steam-conditioning rate on the pelleting process. *Animal Feed Science and Technology*, 6, 83-90.
- Sredanović, S., Lević, J. (2000). Conditioning: An important step in feed production. *Journal of Processing and Energy in Agriculture*, 4 (3-4), 82-84.
- Sredanović, S., Lević, J., Đuragić, O. (1997). Mlevenje u fabrikama stočne hrane, U Zborniku VII simpozijuma tehnologije stočne hrane „Unapređenje tehnologije proizvodnje stočne hrane“ (str. 249-255). Tara, Srbija: Zavod za tehnologiju stočne hrane, Tehnološki fakultet.
- Sredanović, S., Lević, J., Lević, Lj., Miljanski, J., Alargić, Ž. (1998). Mlin sa valjcima u industriji stočne hrane, Zbornik VIII simpozijuma tehnologije stočne hrane „Tehnologija proizvodnje stočne hrane u službi ekologije“ (str. 74-79). Petrovac na moru, Crna Gora.
- Stark, C.R. (1994). Pellet Quality I. Pellet quality and its effects on swine performance, PhD Thesis, Kansas State University, Manhattan, USA.
- Stark, C.R. (2009). Effect of die thickness and pellet mill throughput on pellet quality. Abstr. T89. Southern Poultry Science Society Meeting.
- Stelte, W., Sanadi, A.R., Shang, L., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B. (2012). Recent developments in biomass pelletization—A review. *Bioresources*, 7(3), 4451-4490.
- Stevens, C.A. (1987). Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process, Ph.D. Thesis, Kansas State University, USA.
- Svihus, B. (2011). The gizzard: function, influence of diet structure and effects on nutrient availability. *World's Poultry Science Journal*, 67 (2), 207-224.
- Svihus, B., Gullord, M. (2002). Effect of chemical content and physical characteristics on nutritional value of wheat, barley and oats for poultry. *Animal Feed Science and Technology*, 102, 71-92.
- Svihus, B., Hetland, H., Choct, M., Sundby, F. (2002). Passage rate through the anterior digestive tract of broiler chickens fed on diets with ground or whole wheat. *British Poultry Science*, 43, 662-668.

- Svihus, B., Juvik, E., Hetland, H., Krogdahl, A. (2004a). Causes for improvement in nutritive value of broiler chicken diets with whole wheat instead of ground wheat. *British Poultry Science*, 45, 1–6.
- Svihus, B., Kløvstad, K.H., Perez, V., Zimonja, O., Sahlström, S., Schuller, R.B., Jeksrud, W.K., Prestløkken, E. (2004b). Physical and 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, 281–293.
- Taylor, R.D., Jones G .P .D. (2004). The influence of whole grain inclusion in pelleted broiler diets on proventricular dilatation and ascites mortality. *British Poultry Science*, 45, 247–254.
- Tešić, M. (1977). Das Verdichten unter Ntirstoffaufschluss von Futterpflanzen in Matrizenptessen, Ph.D. Thesis, Georg-August Universidt Gottingen, Germany, 181.
- Thomas, M., van der Poel, A.F.B. (1996). Physical quality of pelleted animal feed: 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science Technology*, 61, 89–112.
- Thomas, M., van Vliet, T., van der Poel, A.F.B. (1998). Physical quality of pelleted animal feed: 3 Contribution of feedstuff components. *Animal Feed Science and Technology*, 70, 59–78
- Thomas, M., van Zuilichem, D.J., van der Poel, A.F.B. (1997). Physical quality of pelleted animal feed: 2. Contribution of processes and its conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 64, 173–192.
- Traylor, S. L. (1997). Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance, Master's Thesis, Kansas State Univ., Manhattan, USA.
- Trevidy, J.J. (2005). Broiler Feeding: Mash or Pellet? The Poultry Site (sa <http://www.thepoultrysite.com/articles/291/broiler-feeding-mash-or-pellet>)
- Turner, R. (1995). Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality. *Feed Management*, 46, 30–33.
- Valencia, D.G., Serrano, M.P., Lazaro, R., Latorre, M.A., Mateos, G.G. (2008). Influence of micronization (fine grinding) of soya bean meal and fullfat soya bean on productive performance and digestive traits in young pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 147, 340–356.
- Vanschoubroeck, F., Coucke, L., van Spaendonck, R. (1971). The quantitative effect of pelleting feed on the performance of piglets and fattening pigs. *Nutr. Abstr. Rev.*, 41, 1–9.
- Vilarino, M., Picard, M.J., Melcion, J.P., Faure, J.M. (1996). Behavioural adaptation of laying hens to dilution of diets under mash and pellet form. *British Poultry Science*, 37, 895–907.
- Vukmirović, Đ., Ivanov, D., Čolović, R., Kokić, B., Lević, J., Đuragić, O., Sredanović, S. (2010). Effect of steam conditioning on physical properties of pellets and energy consumption in pelleting process. *Journal of Processing and Energy in Agriculture*, 14 (2), 106–108.
- Walter, M. (1990). The inclusion of liquids in compound feeds. In *Advanced Feed Technology*, 4 (pp.36–48). Detmold, Germany: Verlag Moritz Schafer.
- Wild, R. A. (1992). Hammer Mills and Roller Mills, *Advances in Feed Technology*, 8 (pp. 46–55). Detmold, Germany: Verlag Moritz Schafer.
- Williams, R.B. (1999). A compartmentalised model for the estimation of the cost of coccidiosis to the world's chicken production industry. *International Journal of Parasitology*, 29, 1209–1229.

- Winowiski, T. (1985). Optimizing pelleting temperature. *Feed Management*, 36, 28-33.
- Winowiski, T. (1998). Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best? *Feed Mgmt.*, 49 (1), 23-26.
- Wolf, P., Rust, P., Kamphues, J. (2010). How to assess particle size distribution in diets for pigs? *Livestock Science*, 133, 78-80.
- Wondra, K.J., Hancock, J.D., Behnke, K.C., Hines, R.H., Stark, C.R. (1995). Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility and stomach morphology in finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 73, 757-763.
- Wondra, K. J., McCoy, R. A., Hancock, J. D., Behnke, K. C., Hines, R. H., Fahrenholz, C. H., Kenndey, G. A. (1992). Effect of diet form (pellet vs meal) and particle size on growth performance and stomach lesions in finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 70 (Suppl. 1), 239.
- Wood, J. F. (1987). The functional properties of feed raw materials and the effect on the production and quality of feed pellets. *Animal Feed Science and Technology*, 18, 1-17.
- Wootton, M., Bamunuarachchi, A. (1979). Application of differential scanning calorimetry to starch gelatinization, II. Effect of heating rate and moisture level. *Starke*, 31, 262.
- Ziggers, D. (2001). Hammering or rolling the grain. *Feed Technology*, 5 (7), 9-12.
- Zimonja, O., Svihus, B. (2009). Effects of processing of wheat or oats starch on physical pellet quality and nutritive value for broilers. *Animal Feed Science and Technology*, 149, 287-297.