



**Univerzitet u Novom Sadu
TEHNOLOŠKI FAKULTET NOVI SAD**

Vojislav V. Banjac, mast. inž. tehnol.

DOKTORSKA DISERTACIJA

**MOGUĆNOST PRIMENE VISOKOPROTEINSKIH
FRAKCIJA SUNCOKRETOVE SAČME DOBIJENIH
POSTUPKOM USITNJAVANJA I VAZDUŠNE
KLASIFIKACIJE U PROIZVODNJI EKSTRUDIRANE
HRANE ZA RIBE**

Mentori: Prof. dr Aleksandar Fišteš, vanredni profesor
Dr Radmilo Čolović, viši naučni saradnik

Novi Sad, 2018. godine

UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET NOVI SAD

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Vojislav V. Banjac
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Prof. dr Aleksandar Fišteš, vanredni profesor Dr Radmilo Čolović, viši naučni saradnik
Naslov rada: NR	Mogućnost primene visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme dobijenih postupkom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije u proizvodnji ekstrudirane hrane za ribe
Jezik publikacije: JP	Srpski
Jezik izvoda: JI	Srpski / engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2018
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Fizički opis rada: FO	6 poglavlja, 174 stranica, 42 slika, 28 tabela, 272 referenci

Naučna oblast: NO	Biotehničke nauke – prehrambeno inženjerstvo
Naučna disciplina: ND	Tehnologija hrane za životinje
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Suncokretova sačma, hrana za ribe, usitnjavanje, vazдушna klasifikacija, ekstrudiranje
UDK	636.087.2:582.998.2]:597
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta Novi Sad, Univerziteta u Novom Sadu, Bulevar cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija
Važna napomena: VN	
Izvod: IZ	

Aktuelni problem industrije proizvodnje hrane za ribe jeste smanjena dostupnost i visoka cena ribljeg brašna, tradicionalnog izvora proteina u hrani za ribe, koja je direktna posledica rasta sektora akvakulture i visoke potražnje za ovim kvalitetnim proteinskim hranivom. Delimična ili potpuna zamena ribljeg brašna visokoproteinskim sirovinama biljnog porekla u recepturama za ishranu riba, uz iznalaženje novih alternativnih visokoproteinskih sirovina pristup je kojim se prevazilazi ovaj problem i koji ima potencijal da obezbedi održivost celokupne industrije hrane za ribe u budućnosti. U okviru ove disertacije predloženo je novo, relativno jednostavno i jeftino tehnološko rešenje za suvo frakcionisanje suncokretove sačme, čijom bi se primenom dobile njene visokoproteinske frakcije kao potencijalne proteinske sirovine biljnog porekla za zamenu ribljeg brašna u hrani za ribe. Shodno tome, istraživanja ove disertacije urađena su u dve odvojene faze, gde je prva, faza vazdušne klasifikacije, imala za cilj ispitivanje mogućnosti primene kombinacije postupaka usitnjavanja suncokretove sačme mlinom čekićarom i vazdušne klasifikacije ovako usitnjene sačme primenom vazdušnog gravitacionog kaskadnog, cik-cak, klasifikatora u cilju dobijanja frakcija povećanog sadržaj proteina u odnosu na polaznu sačmu. Nezavisni parametri usitnjavanja i klasifikacije bili su prečnik otvora sita (POS) čekićara (3, 2 i 1 mm), protok klasifikacionog vazduha (5, 8,7 i 12,5 m³/h) i jačina oscilacije vibro dozatora (JOVD) klasifikatora (30, 60 i 90% maksimuma). Zavisne promenljive bile su sadržaj proteina u dobijenim frakcijama i njihov prinos. Primenjen je 3x3x3 potpuni faktorijalni eksperimentalni dizajn prema metodi odzivne površine. U cilju dobijanja frakcije sa što većim sadržajem proteina, u što većem prinosu, kombinacija postupaka usitnjavanja i vazdušne klasifikacije je optimizovana primenom regresione analize, analize glavnih komponenata (PCA analiza), analize varijanse, kao i računске dinamike fluida (CFD analiza), kojom je dobijeni kompjuterski model vazdušne klasifikacije suncokretove sačme poređen sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. Cik-cak vazdušni klasifikator uspešno je primenjen za razdvajanje usitnjene suncokretove sačme na grubu i finu frakciju. Pri povećanju protoka vazduha smanjivao se prinos grube a istovremeno povećavao prinos fine frakcije. Grube frakcije suncokretove sačme dobijene pri protocima vazduha od 8,7 i 12,5 m³/h imale su za 0,5 – 41,4% relativno veći sadržaj proteina u poređenju sa polaznom sačmom. Smanjenje POS i povećanje protoka vazduha uticalo je na povećanje, dok je povećanje JOVD, uticalo na smanjenje sadržaja proteina grube frakcije. Najveći sadržaj proteina (50,90%SM) imala je gruba frakcija suncokretove sačme dobijena pri sledećim

parametrima: POS – 1 mm; protok vazduha – 12,5 m³/h; JOVD – 30%. Na sadržaj proteina grube frakcije i odnos prinosa frakcija značajan uticaj ($p < 0,05$) imali su POS čekićara i protok vazduha, dok je CFD model pokazao zadovoljavajuće poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima. Cilj druge faze disertacije, faze ekstrudiranja, bio je najpre ispitivanje uticaja dodatka polazne suncokretove sačme (oko 37% proteina na SM) i njene dve visokoproteinske frakcije (oko 43% i 49% proteina na SM), dobijenih na osnovu odabranih parametara usitnjavanja i vazdušne klasifikacije, na postupak ekstrudiranja i fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe. Maksimalno 20% ribljeg brašna bilo je zamenjeno polaznom suncokretovom sačmom i njenim odabranim visokoproteinskim frakcijama, a njihov udeo u recepturi za ishranu pastrmke menjan je na osnovu dizajna smeše. Za ekstrudiranje eksperimentalnih smeša i dobijanje hrane u obliku granula korišćen je dvopužni ekstruder. Ulazni parametri ekstrudiranja bili su konstatni, osim sastava smeše, a praćeni su izlazni parametri ekstrudiranja: temperatura u cevi ekstrudera, temperatura matrice, pritisak na matrici, specifična potrošnja energije (SME) i obrtni moment elektromotora ekstrudera. Proizvedenim uzorcima ispitani su pokazatelji fizičkog kvaliteta: stepen ekspanzije, nasipna masa, tvrdoća, stepen otiranja, kapacitet upijanja ulja, nivo otpuštanja ulja iz zauljenih granula, stabilnost u vodi i mikrostruktura granula. Prisutvo suncokretove sačme višeg sadržaja proteina i manjeg sadržaja celuloze u smeši uticalo je na formiranje više temperature matrice ekstrudera, kao i na smanjenje SME i obrtnog momenta. Povećanje sadržaja proteina suncokretove sačme doprinelo je stvaranju kompaktnije strukture granule, povećanju tvrdoće, otpornosti otiranju i stabilnosti granula u vodi, smanjenju nivoa otpuštanja ulja, te je tako pozitivno uticalo na fizičke karakteristike granula. Visokoproteinska frakcija suncokretove sačme sa 49% proteina na SM doprinela je optimalnim fizičkim karakteristikama ekstrudirane hrane za pastrmku. Karakterizacija ove frakcije kao potencijalne nove sirovine u industriji hrane za ribe bio je krajnji cilj ispitivanja ove disertacije. U tu svrhu navedena frakcija suncokretove sačme poređena je u novom eksperimentu ekstrudiranja i ispitivanja fizičkog kvaliteta hrane za pastrmku sa ribljim brašnom, kao i sojinim brašnom, koje je najčešće korišćen izvor biljnih proteina u hrani za ribe. Korišćena je nova receptura smeše ali ista postavka eksperimenta kao u prvom delu faze ekstrudiranja. Rezultati su pokazali da je prisustvo visokoproteinske suncokretove sačme sa oko 49% proteina (SM) doprinelo smanjenju temperature matrice, ali i povećanju SME i obrtnog momenta, a time i poroznosti granula što je imalo pozitivan uticaj na kapacitet upijanja ulja granula, stabilnost granula i otpuštanje nutrijenata u vodi, kao i negativan uticaj na stepen otiranja i nasipnu masu granula. Zamena 13,4% ribljeg brašna u recepturi ovom viskoproteinskom frakcijom suncokretove sačme za rezultat je imala granule zadovoljavajućeg fizičkog kvaliteta. Granule najboljeg fizičkog kvaliteta dobijene su kombinacijom visokoproteinske frakcije suncokretove sačme sa sojinim brašnom, te se moglo zaključiti da se funkcionalne karakteristike ove dve sirovine odlično dopunjuju, i da visokoproteinska frakcija suncokretove sačme, sa stanovišta tehnološkog kvaliteta hrane za ribu, predstavlja dobru alternativu ribljem brašnu.

Datum prihvatanja teme od strane **10.11.2016.**

Senata:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:
(ime i prezime / titula / zvanje / naziv
organizacije / status)
KO

predsednik:
Prof. dr Biljana Pajin, redovni profesor,
Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u
Novom Sadu

član:
Prof. dr Natalija Džinić, redovni profesor,
Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u
Novom Sadu

član:
Prof. dr Zoran Marković, redovni profesor,
Poljoprivredni Fakultet, univerzite u Beogradu

član:
Prof. dr Aleksandar Fišteš, vanredni profesor,
Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u
Novom Sadu – mentor rada

član:
dr Radmilo Čolović, viši naučni saradnik, Institut
za prehrambene tehnologije, Univerzitet u
Novom Sadu – mentor rada

UNIVERSITY OF NOVI SAD

FACULTY OF NOVI SAD

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type: **Monograph documentation**
DT

Type of record: **Textual printed material**
TR

Contents code: **Phd Thesis**
CC

Author: **Vojislav V. Banjac, MSc**
AU

Mentor: **Dr Aleksandar Fišteš, Associate Professor**
Dr Radmilo Čolović, Senior research Associate
MN

Title: **Application possibility of high protein sunflower
meal fractions obtained by combination of grinding
and air classification in the production of extruded
fish feed**
TI

Language of text: **Serbian language, Latin**
LT

Language of abstract: **Serbian / English**
LA

Country of publication: **Republic of Serbia**
CP

Locality of publication: **AP Vojvodina**
LP

Publication year: **2018**
PY

Publisher: **Author's reprint**
PU

Publication place: **21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1**
PP

Physical description: **6 chapters, 174 pages, 28 tables, 42 figures, 272
references**
PD

Scientific field SF	Biotechnical Sciences – Food Engineering
Scientific discipline SD	Feed Technology
Subject, Key words SKW	sunflower meal, fish feed, grinding, air classification, extrusion
UDC	636.087.2:582.998.2]:597
Holding data: HD	Library of the Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Serbia
Note: N	

Abstract:
AB

High price and finite availability of fish meal (FM), due to high expansion of aquaculture sector in recent decades, are main concerns for modern day aquafeed industry. Partially or completely substitution of fish meal in fish feed with protein sources of plant origin, together with finding novel alternative protein sources, is commonly used approach that enables sustainability of aquafeed industry in decades to come. New, relatively simple and low-cost procedure for dry fractionation of sunflower meal (SFM) was proposed within this thesis, with aim for producing high protein SFM fractions as a potential plant source alternative for FM in fish feed. Thus, thesis's researches were done in two phases, where the aim of the first phase, air classification phase, was to investigate the possibility of applying combination of grinding by hammer mill and air classification of ground SFM using gravitational, cascade air classifier (zigzag), in order to obtain protein enriched fractions. Independent variables of grinding and air classification were sieve openings diameter (SOD) of hammer mill (3, 2 and 1 mm), air flow (5, 8.7 and 12.5 m³/h) and bowl feeder oscillation rate (BFOR) of air classifier (30, 60 and 90% of the maximum). Depended responses were protein content and yield of obtained fractions. The experimental data were obtained using 3 x 3 x 3 full factorial experimental design according to response surface methodology (RSM). For the optimization of grinding and air classification, in order to obtain fraction with highest possible protein content and in high yield, regression analysis, principal component analysis (PCA), analysis of variance (ANOVA) and computational fluid dynamics (CFD) approach were employed. Zigzag air classifier was successfully used for fractionation of ground SFM into coarse and fine fraction. Yield of coarse fractions was decreasing, while fine fractions yield was increasing with the increase of the air flow. Coarse fractions of SFM obtained at 8.7 and 12.5 m³/h were 0.5 – 41.4% relatively enriched in protein content compared to the starting SFM. Decrease of SOD and increase of air flow resulted in coarse fraction protein content increase, while increasing BFOR decreased coarse fraction protein content. The coarse SFM fraction with highest protein content was obtained for the SFM ground by 1 mm SOD, air flow of 12.5 m³/h, with BFOR set at 30%. Protein content of coarse fraction and ratio of fractions yields were significantly affected ($p < 0.05$) by SOD of hammer mill and air flow. CFD model coincide with the experimental results of air classification. The first aim of second phase, extrusion phase, was to investigate influence of starting SFM (37% of protein at DM) and its two high protein fractions (43% and 49% of protein at DM), obtained by grinding and air classification, on extrusion process and physical quality of extruded fish feed. Maximum 20% of FM was substituted with SFM and

its high protein fractions in trout feed recipe, and their share was changed according to the mixture design. Twin screw extruder was used for the production of trout feed samples. Primarily extrusion parameters were constant, except dry mixture composition, and secondary extrusion factors were observed: extruder barrel's temperatures, temperature and pressure at the die, specific mechanical energy (SME) and motor load as torque. Selected physical properties of extruded trout feed samples were determined: radial expansion, bulk density, hardness, durability, oil absorption capacity, oil leakage, water stability and microstructure of feed. SFM higher in protein and lower in fiber influenced higher die temperature and lower SME and torque during extrusion process. Increase in protein content of SFM resulted in more compact structure of pellets, increased hardness, durability and water stability, decreased oil leakage and thus positively influenced on physical properties of feed. High protein SFM fraction with around 49% of protein (DM) contributed to the optimal physical properties of experimental feed and characterization of this SFM fraction, as a potential new raw material in fish feed industry, was definite aim of this thesis. Towards that, new set of experiments was conducted, where high protein SFM fraction was compared with FM and soybean flour (SBF) by extruding new samples of trout feed and investigating their physical quality. Results of second extrusion experiment showed that presence of high protein SFM fraction (49% of protein DM) in dry mixture decreased die temperature, while increased SME and torque, and with that also increased porosity of pellets, oil absorption capacity and water stability but decreased bulk density and durability. Substitution of 13.4% FM by high protein SFM fraction resulted in pellets with satisfactory physical quality. The highest quality pellets were obtained in combination of high protein SFM and SBF, which lead to the conclusion that functional characteristics of high protein SFM fraction and SBF are complementary, and that novel SFM, from the point of technical quality, presents good FM alternative.

Accepted on Senate on: **10.11.2016.**
AS

Defended:
DE

Thesis Defend Board:
DB

president:
Prof dr Natalija Džinić, full professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad

member:
Prof dr Biljana Pajin, full professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad

member:
Prof. dr Zoran Marković, full professor, Faculty of Agriculture, University of Belgrade

member:
Prof dr Aleksandar Fišteš, associate professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad

member:
dr Radmilo Čolović, senior research assistant, Institute of Food Technology, University of Novi Sad

SADRŽAJ

SPISAK SKRAĆENICA	1
1. UVOD	3
2. PREGLED LITERATURE.....	6
2.1. Sačme u industriji hrane za životinje.....	6
2.1.1. Suncokretova sačma	8
2.1.2. Oplemenjivanje suncokretove sačme.....	10
2.1.2.1. Suvi postupci frakcionisanja suncokretove sačme	11
2.1.2.1.1. Usitnjavanje suncokretove sačme za potrebe postupaka uklanjanja suncokretove ljuske.....	12
2.1.2.1.2. Centrifugalna separacija	14
2.1.2.1.3. Elektrostatička separacija	16
2.1.2.1.4. Vazдушna klasifikacija suncokretove sačme	18
2.2. Opšti principi i primena vazdušne klasifikacije	19
2.2.1. Opšti principi vazdušne klasifikacije	22
2.2.2. Tipovi klasifikatora.....	27
2.2.2.1. Gravitacioni kaskadni cik-cak klasifikator.....	29
2.2.3. Primena vazdušne klasifikacije za povećanje sadržaja proteina biljnih sirovina.....	32
2.2.4. Kompjuterska simulacija postupka vazdušne klasifikacije	36
2.3. Industrijska proizvodnja hrane za ribe	37
2.3.1. Značaj akvakulture u svetu	37
2.3.2. Zahtevi kvaliteta hrane za ribe	40
2.3.3. Proizvodnja hrane za ribe postupkom ekstrudiranja.....	42
2.3.4. Naknadno oblaganje granula uljem u vakuumu.....	49
2.3.5. Fizički kvalitet hrane za ribe	51
2.3.5.1. Funkcionalne osobine sastojaka u hrani za ribe	52
2.3.5.2. Metode određivanja fizičkog kvaliteta ekstrudirane hrane za ribe	53
2.4. Zamena ribljeg brašna u hrani za ribe	58
2.4.1. Problem održivosti korišćenja ribljeg brašna u ishrani riba	58

2.4.2. Zamena ribljeg brašna proteinima biljnog porekla	60
3. MATERIJAL I METODE	63
3.1. Materijal	65
3.1.1. Materijal korišćen u fazi vazdušne klasifikacije.....	65
3.1.2. Materijal korišćen u fazi ekstrudiranja	65
3.2. Metode ispitivanja.....	67
3.2.1. Metode ispitivanja korišćene u fazi vazdušne klasifikacije	67
3.2.1.1. Usitnjavanje suncokretove sačme	67
3.2.1.2. Vazдушna klasifikacija.....	69
3.2.1.3. Hemijske analize	70
3.2.1.4. Ispitivanje fizičkih karakteristika suncokretove sačme i njenih frakcija dobijenih kombinacijom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije	71
3.2.1.5. CFD model	73
3.2.2. Metode ispitivanja korišćene u fazi ekstrudiranja.....	74
3.2.2.1. Proizvodnja eksperimentalne hrane za ribe.....	74
3.2.2.2. Hemijske analize	79
3.2.2.3. Ispitivanje fizičkih osobina hrane za ribe	79
3.2.2.3.1. Nasipna masa.....	79
3.2.2.3.2. Prečnik granula i stepen radialne ekspanzije.....	79
3.2.2.3.3. Tvrdoća granula	80
3.2.2.3.4. Otiranje granula	80
3.2.2.3.5. DORIS test.....	81
3.2.2.3.6. Kapacitet upijanja ulja	81
3.2.2.3.7. Nivo otpuštanja ulja iz zauljenih granula.....	82
3.2.2.3.8. Stabilnost granula u vodi	83
3.2.2.3.9. Mikrostruktura granula	84
3.3. Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka	85
3.3.1. Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka u fazi vazdušne klasifikacije.....	85
3.3.2. Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka u fazi ekstrudiranja	86
4. REZULTATI I DISKUSIJA	90
4.1. Faza vazdušne klasifikacije.....	90
4.1.1. Fizičko-hemijske karakteristike polazne i usitnjene suncokretove sačme.....	90
4.1.2. Rezultati vazdušne klasifikacije usitnjene suncokretove sačme	92

4.1.3. Optimizacija postupaka usitnjavanja i vazdušne klasifikacije	98
4.1.4. CFD model	104
4.2. Faza ekstrudiranja	106
4.2.1. Prvi deo faze ekstrudiranja – poređenje polazne suncokretove sačme sa njenim visokoproteinskim frakcijama.....	106
4.2.1.1. Hemijski sastav eksperimentalnih suvih smeša u prvom delu faze ekstrudiranja.....	107
4.2.1.2. Uticaj sastava smeše na parametre ekstrudiranja u prvom delu faze ekstrudiranja .	108
4.2.1.3. Fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe.....	113
4.2.1.4. Konduktometrijska analiza u prvom delu faze ekstrudiranja.....	123
4.2.1.5. Mikrostruktura granula u prvom delu faze ekstrudiranja.....	125
4.2.2. Drugi deo faze ekstrudiranja – poređenje visokoproteinske suncokretove sačme sa sojinim i ribljim brašnom	127
4.2.2.1. Hemijski sastav suvih smeša u drugom delu faze ekstrudiranja	128
4.2.2.2. Uticaj sastava smeše na parametre ekstrudiranja u drugom delu faze ekstrudiranja	130
4.2.2.3. Fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe u drugom delu faze ekstrudiranja	134
4.2.2.4. Konduktometrijska analiza u drugom delu faze ekstrudiranja.....	144
4.2.2.5. Mikrostruktura granula u drugom delu faze ekstrudiranja.....	147
5. ZAKLJUČAK	149
6. LITERATURA	152

SPISAK SKRAĆENICA

ANOVA	Analiza varijanse (<i>Analysis of Variance</i>)
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
BEM	Bezazotne ekstraktivne materije
CFD	Računska dinamika fluida (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CG	Cele granule
DDGS	<i>Distillers Dried Grains with Solubles</i>
DPM	Model diskretnih čestica (<i>Discrete Phase Model</i>)
DV	DORIS vrednost
FAO	<i>Food and Agricultural Organization</i>
HCA	Hijerarhijska klaster analiza (<i>Hierarchical Cluster Analysis</i>)
ISV	Indeks stabilnosti u vodi
JOVD	Jačina oscilacije vibro dozatora
KT	Tvrdoća granula po KAHU-u
KUU	Kapacitet upijanja ulja
LES	Simulacija velikih vrtloga (<i>Large Eddy Simulation</i>)
MBE	Srednja vrednost greške odstupanja (<i>Mean Bias Error</i>)
MPE	Srednja vrednost procentnog odstupanja (<i>Mean Percentage Error</i>)
NM	Nasipna masa
OM	Obrtni moment
OU	Otpuštanje ulja
P	Pritisak na matrici
PCA	Analiza glavnih komponenti (<i>Principal Component Analysis</i>)
PDI	<i>Pellet Durability Index</i>
PG	Pšenični gluten
POS	Prečnik otvora sita
RANS	Reynolds-ovo osrednjavanje Navier-Stokes-ovog modela
RB	Riblje brašno
RMSE	Koren zbira srednje vrednosti kvadrata odstupanja (<i>Root Mean Square Error</i>)
RSM	Metod odzivne površine (<i>Response Surface Methodology</i>)
SB	Sojino brašno
SE	Stepen ekspanzije

SEM	Skenirajuća elektronska mikroskopija (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
SM	Suva materija
SME	Specifična mehanička energija
SOP	Polinom drugog reda (<i>Second Order Polynom</i>)
SPE	Specifična potrošnja energije
SPK	Sojin proteinski koncentrat
SS	Suncokretova sačma
PLC	Programirana logička kontrolna jedinica (<i>Programmable Logic Controller</i>)
TT	Tvrdoća granula određena teksturometrom

1. UVOD

Zadatak industrije hrane za životinje jeste da obezbedi proizvod koji će svojim sastavom i oblikom da zadovolji nutritivne i funkcionalne potrebe svake vrste i kategorije životinja i time i njihov pravilan rast i razvoj. odlika savremene industrije hrane za životinje jeste upotreba mnogobrojnih sirovina biljnog i animalnog porekla. Izbor odgovarajućih sirovina koje sačinjavaju finalnu smešu za ishranu određene vrste životinja prvenstveno je uslovljen nutritivnim zahtevima životinja, dok isto tako važnu ulogu imaju i cena i dostupnost sirovina.

Sadržaj proteina je, uz svarljivost, energetska vrednost i prisustvo antinutritivnih faktora, jedan od najvažnijih kriterijuma prilikom odabira sirovina za ishranu životinja. Protein je najvažniji nutrijent koji, ukoliko je prisutan u dovoljnoj količini, utiče na formiranje ćelija, brz rast i brzo postizanje visokih proizvodnih performansi kod životinja.

Kako je procena FAO (*Food and Agriculture Organization*), da će do 2050. godine svetska populacija iznositi 9,7 milijardi, neizbežno je da će svetski zahtevi za animalnim proteinima vrtoglavo rasti. Jedno od potencijalnih rešenja koje bi obezbedilo dovoljnu količinu animalnih proteina za ishranu ljudi jeste akvakultura, tj. organizovani, uzgoj riba i ostalih vodenih kultura. Poslednjih 60 godina primetan je izuzetan rast sektora akvakulture, zahvaljujući kome danas više od polovine svetske proizvodnje ribe za ishranu ljudi dolazi upravo iz uzgoja. Porast organizovanog uzgoja vodenih kultura praćen je i velikim rastom proizvodnje visokoenergetske, visokoproteinske i visokosvarljive hrane za ribe. Ovaj rast proizvodnje uticao je na ogromnu potražnju za visokoproteinskim sirovinama koje su najzastupljenije u ishrani riba. U savremenim sistemima intenzivnog uzgoja riba, hranivo predstavlja najveći trošak, stoga hrana za ribe mora da poseduje dobar kvalitet uz odgovarajuću cenu. Pored toga što mora da ispuni zahteve nutritivnog kvaliteta, hrana za ribe mora da ispuni i zahteve fizičkog kvaliteta za svaku specifičnu vrstu i njen prirodan način usvajanja hrane. Danas se zato hrana za ribe najviše proizvodi postupkom ekstrudiranja, koji poseduje veliku modularnost i omogućava dobijanje lako svarljivog proizvoda u vidu granula, visokog fizičkog kvaliteta, specifičnog oblika i gustine.

Veliki problem današnje industrije proizvodnje hrane za ribe jeste smanjena dostupnost i visoka cena ribljeg brašna, tradicionalnog izvora proteina u hrani za ribe, koja je direktna posledica rasta sektora akvakulture i visoke potražnje za ovim proteinskim hranivom. Stoga je trend da se riblje brašno u ishrani riba delimično ili potpuno zamenjuje alternativnim proteinskim sirovinama. Smanjenje zavisnosti industrije hrane za ribe od ribljeg brašna doprinosi povećanju održivosti akvakulture. Sa druge strane, za svaki potencijalno novi sastojak hrane za ribe, moraju da se ispituju

uticaji i ograničenja koje poseduje u nutritivnom i tehnološkom pogledu. Ispitivanje uticaja novog proteinskog sastojka na postupak proizvodnje hrane za ribe i fizički kvalitet proizvoda, jedan je od najvažnijih koraka pri karakterizaciji nove sirovine i ispitivanju njenog potencijala za korišćenje kao zamene za riblje brašno.

Zbog svoje široke dostupnosti, visokog sadržaj proteina i relativno niske cene u poređenju sa cenom ribljeg brašna, u industrijskoj proizvodnji hrane za ribe biljne proteinske sirovine se najviše koriste kao alternativa ribljem brašnu. Proteinski proizvodi soje imaju primat nad svim biljnim izvorima proteina u ishrani riba. Međutim, upotreba proizvoda na bazi soje ima kako nutritivna tako i ekonomska ograničenja, te nije moguća potpuna zamena ribljeg brašna ovim proizvodima. Nakon ekstrakcije ulja iz zrna suncokreta zaostaju velike količine suncokretove sačme, naročito u Republici Srbiji, gde je suncokret najznačajnija uljarica. Suncokretova sačma se koristi u ishrani svih vrsta životinja kao široko rasprostranjeno i relativno jeftino proteinsko hranivo. Malo je dostupnih podataka o uticaju suncokretove sačme na rast i razvoj vodenih kultura, kao i o uticaju koji suncokretova sačma ima na postupak proizvodnje i fizički kvalitet hrane za ribe. Međutim, poznato je da je udeo suncokretove sačme u recepturi za ishranu riba ograničen. Razlog tome je visok sadržaj sirove celuloze koji suncokretova sačma poseduje, a koja negativno utiče na svarljivost obroka i zdravstveno stanje riba. Osnovni sastojci suncokretove sačme jesu ostaci suncokretovog jezgra i suncokretova ljuska, zaostali nakon ekstrakcije ulja iz zrna. Pogodnim tehnološkim postupcima dorade, suncokretova ljuska se, kao nosilac celuloznih materija, može ukloniti iz sačme čime se povećava udeo jezgra suncokreta, a time i sadržaj proteina suncokretove sačme. Smanjenje udela ljuske u suncokretovoj sačmi ima pozitivan uticaj na nutritivni kvalitet ovog proteinskog hraniva, čime se povećava i njen upotrebni potencijal.

Imajući u vidu prethodno navedeno, predmet istraživanja ove doktorske disertacije jeste novo, jednostavno i relativno jeftino tehnološko rešenje za suvo frakcionisanje suncokretove sačme koje predstavlja kombinaciju postupaka usitnjavanja i vazdušne klasifikacije, čijom primenom bi se dobile visokoproteinske frakcije kao potencijalne proteinske sirovine biljnog porekla za zamenu ribljeg brašna u ekstrudiranoj hrani za ribe. Istraživanja u okviru disertacije obaviće se u dve faze:

- *Faza vazdušne klasifikacije* koja će za cilj imati ispitivanje primene kombinacije usitnjavanja suncokretove sačme na mlinu čekićaru i jednostepenog postupka vazdušne klasifikacije primenom gravitacionog kaskadnog klasifikatora za dobijanje frakcija sa povećanim sadržajem proteina u odnosu na polaznu sačmu. Predloženi postupak kombinacije usitnjavanja i vazdušne klasifikacije biće optimizovan u cilju pronalaženja kombinacije parametara u okviru kojih se dobijaju frakcije visokog sadržaja proteina sa prihvatljivim prinosom.

- *Faza ekstrudiranja* koja će se izvesti u dva dela. Cilj prvog dela ove faze biće ispitivanje uticaja dodatka polazne suncokretove sačme i njenih visokoproteinskih frakcija, dobijenih usitnjavanjem i vazdušnom klasifikacijom, na postupak ekstrudiranja i fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe. U tu svrhu, biće varirani udeli tri suncokretove sačme (polazne suncokretove sačme i dve njene visokoproteinske frakcije različitog sadržaja proteina) u smešama za proizvodnju granula za ishranu pastrmke ekstrudiranjem. Suncokretova sačma koja doprinese najboljim fizičkim karakteristikama ekstrudiranih uzoraka u prvom delu faze ekstrudiranja biće potom korišćena u drugom delu, gde će se u novom eksperimentu porediti njen uticaj na parametre ekstrudiranja i fizički kvalitet hrane za ribe sa uticajem koji imaju riblje brašno, kao tradicionalni izvor proteina, i sojino brašno, najčešće korišćeni izvor biljnih proteina u hrani za ribe. Rezultati ove faze istraživanja poslužiće za karakterizaciju suncokretove sačme i njenih visokoproteinskih frakcija kao sirovine u proizvodnji ekstrudirane hrane za ribe.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Sačme u industriji hrane za životinje

Proteini biljnog porekla imaju značajnu ulogu u ishrani životinja, jer su u nutritivnom pogledu dobra alternativa proteinima životinjskog porekla, pozitivno utiču na funkcionalne osobine proizvoda, a takođe se dobijaju iz obnovljivih izvora. Mahunarke i pojedine vrste žitarica i uljarica spadaju među najčešće korišćene izvore biljnih proteina u smešama za ishranu životinja. Izdvajanje ulja iz zrna uljarica pogodnim tehnološkim postupcima osnovni je cilj industrije ulja. Sačme predstavljaju materijal koji u velikim količinama zaostaje nakon ekstrakcije ulja iz zrna biljaka. Odlikuje ih velika hranljiva vrednost, pre svega visok sadržaj proteina. Hemijski sastav sačmi, naročito sadržaj proteina, zavisi od raznih faktora, pre svega vrste uljane kulture, kvaliteta zemljišta i klimatskih uslova prilikom gajenja, početnog kvaliteta biljke i primenjenog tehnološkog postupka (*Dale, 1996; Ramachandran i sar., 2007*). Step en ljuštenja zrna bogatog uljem pre same ekstrakcije ima uticaj na hemijski sastav sačme, pa tako uklanjanje ljuske od zrna direktno utiče na povećanje sadržaja proteina i smanjenje sadržaja celuloze u sačmi. Sa porastom stepena ekstrakcije ulja iz polazne sirovine, raste i sadržaj proteina u preostaloj sačmi (*Nwokolo, 1996*). Široka primena biljnih sačmi u ishrani životinja počela je tek u drugoj polovini XX veka, kada su tradicionalna proteinska hraniva, poput deteline, najpre počela da se zamenjuju sojinom sačmom (*Dale, 1996*). Sadržaj proteina sačmi nakon ekstrakcije ulja u zavisnosti od vrste kulture obično se nalazi u rasponu od 35% do 60% računato na suhu materiju (*Moure i sar., 2006*). Sačme odlikuje i prisustvo antinutrijenata (antinutritivnih faktora), supstanci koje same ili preko svojih metaboličkih proizvoda koji nastaju u organizmu, negativno utiču na iskoristivost hraniva i zdravlje životinja, što ima negativan uticaj na proizvodne rezultate (*Makkar, 1993*). U antinutrijente spadaju različiti inhibitori enzima, oligosaharidi, tanini i drugi polifenoli koji negativno utiču na iskorišćenje proteina i varenje kod životinja, kao i fitaze, glukozinolati i oksalati, koji imaju negativan uticaj na usvajanje mineralnih materija (*Francis i sar., 2001; Moure i sar., 2006*). Lignocelulozne komponente hraniva, koje utiču na svarljivost obroka u celini, takođe mogu da se svrstaju u antinutrijente (*Lević i Sredanović, 2012*). Sadržaj pojedinih antinutritivnih faktora, poput inhibitora enzima i fitaza, može da se smanji ili potpuno eliminiše dejstvom toplote, što se postiže pogodnim termičkim postupcima. Obezmašćene sačme mogu da posluže i kao sirovina iz koje ekstrakcijom u kiseloj ili baznoj sredini mogu da se uklone rastvorljivi

ugljeni hidrati, minerali i antinutrijenti i tako da se dobiju proteinski koncentracije sa maksimalno 70% proteina, kao i izolati sa maksimalno 90% proteina (Moure i sar., 2006).

Od svih uzgajanih kultura bogatih uljem u svetu, najzastupljenije su soja sa ukupno proizvedenih 218,67 miliona tona, i palmino zrno sa ukupno proizvedenih 275,29 miliona tona u 2014. godini. Slede ih uljana repica (88,57 miliona tona), pamukovo seme (59,31 miliona tona) i suncokret (43,80 miliona tona) (FAO, 2017). U Republici Srbiji su najzastupljenije sledeće tri kulture za proizvodnju ulja: soja sa proizvedenih 546 000 tona u 2016. godini, suncokret sa 509 205 tona i uljana repica sa značajno manjom količinom od 31 400 tona (RZS, 2017). Shodno tome, na našem podneblju, najčešće se u ishrani životinja koriste sojina sačma i suncokretova sačma (Đorđević i sar., 2009). Procenjeno je da je u Srbiji u 2016. godini proizvedeno 327 000 tona sojine i 166 000 tona suncokretove sačme (<http://www.indexmundi.com/agriculture>), što svrstava soju i suncokret u naše najvažnije sirovine za proizvodnju ulja, a njihove sačme u izuzetno važno proteinsko hranivo.

Sojina sačma je po Dale-u (1996) najkvalitetnije hranivo biljnog porekla i najzastupljenija sačma u ishrani životinja, zbog čega se koristi kao standard u odnosu na koji se upoređuju ostala biljna proteinska hraniva (Đorđević i Dinić, 2011). Ekstrakcijom ulja iz oljuštenog, delimično oljuštenog i neoljuštenog zrna soje dobijaju se sačme propisanog minimalnog sadržaja sirovih proteina od 48, 44 i 40%, prema Pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (Službeni glasnik RS 4/2010, 113/2012, 27/2014, 25/2015, 39/2016 i 54/2017). Navedenim Pravilnikom definisana je i sojina sačma ekstra kvaliteta dobijena ekstrakcijom ulja iz oljuštenog zrna soje sa minimalnim sadržajem sirovih proteina od 50%. Sojina sačma bogata je lizinom, esencijalnom aminokiselinom, dok je deficitarna sumpornom aminokiselinom, metioninom (Dale, 1996). Kako žitarice imaju manjak lizina, odlično se kombinuju sa sojinom sačmom u ishrani životinja. U ishrani mlađih kategorija nepreživara sojina sačma daje dobre rezultate u kombinaciji sa veštačkim metioninom i proteinima animalnog porekla, dok u ishrani koka nosilja i nepreživara može da se koristi kao jedino proteinsko hranivo uz dodatak veštačkog metionina (Đorđević i Dinić, 2011). Sojina sačma koristi se i kao delimična ili potpuna zamena za riblje brašno u ishrani riba (Romarheim i sar., 2006; Romarheim i sar., 2008; Biswas i sar., 2011).

Pored nutritivne vrednosti, sojinu sačmu karakteriše i prisustvo antinutritivnih faktora – tripsin inhibitora i ureaze. Najčešće se za inaktiviranje ovih supstanci koriste termički procesi, pri čemu je potrebna naročita pažnja u vođenju procesa, jer su oba antinutrijenta proteini, stoga je neophodna precizna kontrola temperature koja mora da bude dovoljno visoka da bi ih eliminisala, a da ne dovede do ireverzibilnog oštećenja proteina sojine sačme (Đorđević i Dinić, 2011).

2.1.1. Suncokretova sačma

Kao sporedni proizvod izdvajanja ulja procesom ekstrakcije iz suncokreta, zaostaje suncokretova sačma koja se primarno koristi kao proteinsko hranivo u ishrani životinja (*Kalmendal i sar., 2011*). Suncokretova sačma može se koristiti i kao đubrivo, supstrat za rast mikroorganizama ili izvor toplotne energije (*Lomascolo i sar., 2012*). Hemijski sastav suncokretove sačme zavisi od mnogobrojnih faktora: sorte suncokreta, klimatskih uslova, kvaliteta zemljišta i primenjenog tehnološkog postupka izdvajanja ulja (*Lomascolo i sar., 2012*). Sadržaj proteina, koji predstavlja najvažniju nutritivnu komponentu ove sirovine, obično se nalazi u rasponu od 29 do 34% (*Boni i sar., 1987, Ramachandran i sar., 2007; Geneu-Sbartai i sar., 2008*). Sadržaj sirove celuloze je drugi važan nutritivni pokazatelj kvaliteta suncokretove sačme i obično iznosi od 18 do 23% (*Lević i Sredanović, 2012*). Suncokretova sačma sastoji se iz ostataka jezgra zrna suncokreta, koji su nosioci proteina, i suncokretove ljuske koja je nosilac lignoceluloznih vlakana (*Geneu-Sbartai i sar., 2008*). Step en ljuštenja zrna suncokreta pre postupka ekstrakcije glavni je faktor za sadržaj sirovih proteina. Pravilnikom o kvalitetu hrane za životinje (*Službeni glasnik RS 4/2010, 113/2012, 27/2014, 25/2015, 39/2016 i 54/2017*) propisan je minimalan sadržaj proteina sačme dobijene ekstrakcijom ulja iz neoljuštenog (min. 24% proteina) i delimično oljuštenog zrna suncokreta (min. 33% proteina).

U poređenju sa sojinom sačmom suncokretova sačma sadrži manje antinutritivnih komponentata (*Canibe i sar., 1999*) i izrazito je bogata vitaminima B kompleksa (*Garcia-Moreno i sar., 2012*), ali isto tako i ima manju nutritivnu vrednost (*Bach-Knudsen, 1997*) i manji nivo lizina (*Mérida, 2012*). S druge strane, sadrži veću količinu metionina nego sojina sačma (*Lević i Sredanović, 2012*). Pored metionina, najzastupljenije aminokiseline u suncokretovoj sačmi su arginin, leucin, valin, fenilalanin, izoleucin i lizin (*Parrado i Bautista, 1993; Ramachandran i sar., 2007; Lević i Sredanović, 2012*). Aminokiselinski sastav suncokretove i sojine sačme je komplemeteran (*Đorđević i Dinić, 2011*). Kombinacija sojine sačme, bogate lizinom, i suncokretove sačme, bogate metioninom, u potpunosti ispunjava sve zahteve u pogledu unosa aminokiselina. Za postizanje istog efekta, pored balansiranja ishrane sa sojinom sačmom, suncokretova sačma može da bude uključena u ishranu životinja i kao samostalno proteinsko hranivo ali uz dodatak lizina. Suncokretova sačma sadrži i značajne količine ugljenih hidrata, pre svega neskrobnih polisaharida (*Lević i Sredanović, 2012*). Prisutan je i nizak sadržaj svarljivog, lako usvojivog skroba, ali je njegov udeo mali, tako i da ne doprinosi ukupnom energetsom potencijalu suncokretove sačme (*Johnston i sar., 2003*). Što se tiče mineralnog sastava, suncokretova sačma u poređenju sa sojinom sadrži znatno veće količine fosfora (1,0 : 0,6%), magnezijuma (0,50 : 0,26%), joda (0,70 : 0,15 mg/kg) i selena (0,70 : 0,10 mg/kg), a dva puta manju količinu kalijuma (1,1 : 2,1%), dok je sadržaj drugih minerala približno jednak u obe sačme (*Lević i Sredanović, 2012*). U poređenju sa drugim sačmama uljarica, suncokretova sačma ne sadrži

štetne antinutritivne faktore, ali sadrži nepoželjne polifenole. Hlorogenska i kafeinska kiselina prisutne su u najvećoj količini i ukupno čine 70% polifenolnih jedinjenja suncokretove sačme (Sabir i sar., 1974). Sadržaj polifenolnih jedinjenja u suncokretovoj sačmi sličan je onom koji ima suncokretovo zrno, i nalazi se u osegu od 1,0 do 4,2% (Leonardis i sar., 2003), a zavisi od njenog sadržaja ljuske u sačmi kao i sorte suncokreta (Weisz i sar., 2003). Prisutna količina polifenola u suncokretovoj sačmi obično je netoksična i nema negativan uticaj na razvoj i proizvodne performanse svinja i živine (Trevino i sar., 1998; Canibe i sar., 1999). Polifenolna jedinjenja suncokreta pokazuju antioksidativnu aktivnost (Weisz i sar., 2009) te je stoga suncokretova sačma i potencijalni izvor antioksidanata (Kreps i sar., 2014).

Suncokretova sačma koristi se u ishrani svih kategorija životinja, najviše preživara (Kannan i sar., 2000; Jabbar i sar., 2008; Tufarelli i sar., 2009) i kunića (Pedroche, 2015). Ipak, usled visokog sadržaja sirovih vlakana, suncokretova sačma ima ograničenu upotrebu u ishrani svinja, živine i riba naročito u kategoriji hrane za mlade životinje (Laudadio, 2013). Lignocelulozna vlakna kojima je suncokretova ljuska bogata, visoko su rezistentna na bakterijsko razlaganje u digestivnom traktu životinja (Montagne i sar., 2003). Suncokretova sačma sa velikim sadržajem ljuske ima malu nasipnu masu što se negativno odražava i na količinu konzumirane hrane, napunjenost organa za varenje, energetske gustinu, svarljivost i usvojivost hranljivih materija, stanje digestivnog trakta i zdravlje životinje (Jonsthorpe i sar., 2003). Uklanjanje ljuske iz suncokretove sačme pogodnim tehnološkim postupkom potencijalno je rešenje za eliminisanje negativnog dejstva sirovih vlakana na svarljivost obroka i proizvodne rezultate monogastričnih životinja (Čolović, 2013). Sadržaj proteina i sadržaj sirove celuloze suncokretove sačme nalaze se u inverznom odnosu, te stoga pored toga što se uklanjanjem ljuske smanjuje sadržaj sirovih vlakana suncokretove sačme, istovremeno se povećava i sadržaj proteina (Lević i Sredanović, 2012). Odgovarajućim postupkom dorade suncokretove sačme, izdvaja se ljuska i dobija se oplemenjena, visokoproteinska sačma, proizvod uporediv sa sojinom sačmom i ostalim biljnim, visokoproteinskim hranivima. Visokoproteinska suncokretova sačma od delimično oljuštenog zrna suncokreta, dobijena pogodnim postupkom dorade, minimalno mora da sadrži 42% proteina, što je propisano članom 17 Pravilnika o kvalitetu hrane za životinje (Službeni glasnik RS 4/2010, 113/2012, 27/2014, 25/2015, 39/2016 i 54/2017). Izdvajanjem ljuske iz suncokretove sačme i povećanjem sadržaja proteina suncokretove sačme, povećava se i sadržaj aminokiselina (Sredanović i sar., 2012) i ujedno se poboljšavaju njene fizičke karakteristike čime se povećavaju nutritivna i upotrebna vrednost suncokretove sačme u ishrani svih kategorija životinja.

2.1.2. Oplemenjivanje suncokretove sačme

Oplemenjivanje suncokretove sačme predstavlja svaki vid povećanja nutritivne i upotrebne vrednosti suncokretove sačme, bilo primenom postupka mehaničke dorade gde se povećava dostupnost hranljivih materija ili izdvajanja ljuske u svrhu povećanja sadržaja proteina, bilo dodatkom specifičnih komponenti, poput aminokiselina i enzima, radi povećanja svarljivosti i apsorpcije hranljivih sastojaka u ishrani životinja.

Kako je visok sadržaj ljuske osnovni limitirajući faktor u primeni suncokretove sačme u ishrani životinja, uklanjanje ljuske i proizvodnja viskoproteinske suncokretove sačme predstavlja primarni cilj u postupcima oplemenjivanja suncokretove sačme. Pored toga što prisustvo ljuske umanjuje nutritivnu vrednost, ima i uticaj na fizičke karakteristike suncokretove sačme – neujednačenu raspodelu veličina čestica, malu nasipnu masu, sklonost ka raslojavanju i prašenju. Stoga, uklanjanjem ljuske ne povećava se samo nutritivna vrednost već se i poboljšavaju fizičke karakteristike suncokretove sačme bitne u tehnološkim postupcima proizvodnje hrane za životinje. Visokoproteinska suncokretova sačma može uspešno da zameni druge, skuplje proteinske izvore i uspešno može da se koristi u ishrani mlađih i osetljivijih kategorija životinja i za proizvodnju specijalnih vrsta hrane (*Lević i Sredanović, 2012*). Oplemenjivanje suncokretove sačme vodi ka potpunom iskorišćenju nutritivnog i funkcionalnog potencijala ovog hraniva.

Suncokretovu sačmu karakteriše prisustvo aglomerata suncokretovog zrna i ljuske u vidu čvrstih grudvi različitih veličina (*Sredanović i sar., 2011*). Ovi aglomerati nastaju kao posledica postupka ekstrakcije ulja iz samlevenog zrna suncokreta. Najjednostavniji vid dorade suncokretove sačme jeste njeno usitnjavanje. Usitnjena suncokretova sačma ima veću specifičnu površinu i time je omogućena njena bolja dostupnost životinjama što vodi ka većoj konzumaciji i boljoj iskorišćenosti (*Senkoylu i Dale, 1999*). Usitnjena suncokretova sačma se ujedno manje zasvođava tokom skladištenja što dovodi do lakšeg pakovanja i transporta, ali ako je u njoj prisutna velika količina sitnih čestica, dolazi do intenzivnog prašenja (*Kersten i sar., 2005*). Usitnjavanje suncokretove sačme je neophodan prvi korak u suvom postupku frakcionisanja za dobijanje viskoproteinske sačme.

Suvi postupak frakcionisanja predstavlja jedan od načina za dobijanje viskoproteinskih proizvoda iz biljnih materijala i sporednih proizvoda prehrambene industrije. U suvom postupku usitnjavanje sirovine praćeno je razdvajanjem čestica usitnjenog materijala po fizičkim razlikama osnovnih konstituenata. Razdvajanje čestica može da se obavlja po veličini tehnološkim postupkom prosejavanja (*Maaroufi i sar., 2000; Maaroufi i sar., 2009; Pojić i sar., 2014*), elektrostatičkom separacijom (*Lević i Sredanović, 2012; Pelgrom i sar., 2015; Wang i sar., 2016*), vazдушnom klasifikacijom (*Wu i Abbott, 2003; Wu i Nichols, 2006; Stevenson i sar., 2008; Ferrari i sar., 2009; Pelgrom i sar., 2013; Pelgrom i sar., 2014; Pelgrom i sar., 2015*), kao i kombinacijom prosejavanja i

vazdušne klasifikacije (Challa i sar., 2010; Srinivasan i sar., 2009; Pandya i sar., 2013; Draganov, 2015).

Mokri postupak frakcionisanja predstavlja drugi vid dobijanja visokoproteinskih proizvoda, i podrazumeva različite tehnike ekstrakcije šećera, soli i drugih molekula male molekulske mase iz obezmašćenih sačmi ekstrakcijom ili rastvorom voda-alkohol, razblaženim rastvorom kiseline i/ili vrelom vodom nakon denaturacije proteina. U mokrom postupku odigravaju se termički i fizičko-hemijski procesi koji utiču na nutritivni kvalitet visokoproteinskog proizvoda, kao i na funkcionalne osobine proteina (Moure i sar., 2006). Dobijanje visokoproteinskih proizvoda mokrim postupkom obično obuhvataju sledeće faze: 1. Pripremu suspenzije usitnjenog materijala; 2. Ekstrakciju proteina u alkalnoj ili kiseloj sredini; 3. Izoelektričnu precipitaciju ili ultrafiltraciju proteina; i 4. Sušenje dobijenog precipitata u sušnici sa raspršivanjem (engl. *Spray drier*) ili liofilizacijom. Mokrim postupkom iz suncokretove sačme dobijaju se proizvodi koji imaju sadržaj proteina od 50 do 65 % (Robertson i Russell, 1972; Bau i sar., 1983), dok frakcije suncokretove sačme dobijene suvim postupkom imaju sadržaj proteina do 50 % (Sredanović, 2007; Laudadio i sar., 2013; Draganov, 2015). Iako se mokrim postupkom dobijaju proizvodi većeg sadržaja proteina, suvi postupak ima prednost zbog značajno manje potrošnje vode i energije, kao i zbog dobijanja finalnih proizvoda sa očuvanom nativnom funkcionalnošću proteina (Schutyser i van der Goot, 2011).

2.1.2.1. Suvi postupci frakcionisanja suncokretove sačme

Suncokretovo proteinsko jezgro i suncokretova ljuska osnovni su konstituenti suncokretove sačme i značajno se razlikuju u svojim morfološkim, strukturnim, fizičkim i hemijskim karakteristikama (Lević i Sredanović, 2012). Na osnovu ovih razlika, primenom različitih tehnoloških postupaka, polazna suncokretova sačma se manje ili više uspešno klasifikuje na dve frakcije – frakciju bogatu proteinom i frakciju bogatu celulozom. Suvim postupkom suncokretova sačma se najpre usitnjava nakon čega se iz usitnjene sačme pogodnim tehnološkim postupkom izdvaja ljuska. Tehnološki postupci centrifugalne i elektrostatičke separacije (Sredanović, 2007; Lević i Sredanović, 2012), postupak vazdušne klasifikacije (Laudadio, 2013) i kombinacija postupaka prosejavanja i vazdušne klasifikacije (Walter, 2004; Draganov, 2015) primenjeni su za dobijanje visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme.

2.1.2.1.1. Usitnjavanje suncokretove sačme za potrebe postupaka uklanjanja suncokretove ljuske

Kombinovano delovanje spojljnih sila pritiska (sabijanja), udara, smicanja, trenja i sečenja (rezanja) na čvrsto telo u svrhu smanjenja njegovih dimenzija predstavlja postupak usitnjavanja. Tokom usitnjavanja, u čvrstom telu se javlja unutrašnje naprezanje usled dejstva pomenutih mehaničkih sila. Nakon što unutrašnja naprezanja pređu kritični nivo, savladavaju se sile vezivanja elementarnih čestica čvrstog tela i dolazi do drobljenja i povećanja specifične površine. Intenzitet i karakter sila deforacije koje deluju na česticu u mlevnom prostoru zavise od karakteristika radnih elemenata uređaja za usitnjavanje i postavljenih parametara usitnjavanja. Usitnjavanje je najčešće posledica kombinovanog dejstva različitih sila deformacija pri čemu je, u zavisnosti od tipa uređaja za usitnjavanje, jedna sila uvek dominantna. Zbog velikog utroška energija usitnjavanje je skupa tehnološka operacija (*Simonović i sar., 1972*). Utrošak energije tokom usitnjavanja predstavlja zbir energije potrebne za elastične i plastične deformacije i energije potrebne za povećanje specifične površine (*Rebinder, 1947*). Ipak, relativno mali deo mehaničke energije se efektivno koristi za obrazovanje nove površine čestica, dok se preostali deo transformiše u toplotnu energiju (izaziva povećanje temperature usitnjavanog materijala), transformiše u zvuk, troši na naelektrisanje čestica materijala koji se usitjava i radnih površina, vibracije i savlađivanje otpora u mašini za usitnjavanje. Smatra se da energija potrebna za postupak usitnjavanja materijala koji se frakcioniše predstavlja gotovo celokupan iznos energije potrebne za izvođenje suvog postupka frakcionisanja, jer je energija potrebna za naknadno razdvajanje sastojaka usitnjenog materijala u poređenju sa energijom za mlevenje zanemarljivo mala. Izbor odgovarajućeg uređaja za usitnjavanje sirovine u suvom postupku mora da se vodi tako da se usitnjavanjem postignu optimalni efekti koji bi bili u skladu sa fazom frakcionisanja usitnjenog materijala.

Za dobijanje visokoproteinskih proizvoda iz zrna mahunarki ili žitarica, sirovina mora najpre fino da se usitni tako da bude u obliku praha (*Schutyser i van der Goot, 2011*). Na ovaj način, proteini se oslobađaju od skroba i celuloznih materija, te se omogućava efikasno izdvajanje proteina pogodnim klasifikacionim postupkom. Mlin dezintegrator (engl. *Pin mill*) najčešće je korišćen u ove svrhe (*Tyler, 1984; Wu i Abbott, 2003; Pelgrom i sar., 2014*). Pored dezintegratora usitnjavanje strujom vazduha (engl. *Jet milling*), gde do usitnjavanje čestica dolazi njihovim višekratnim međusobnim sudarima, takođe je korišćeno za dobijanje materijala veoma sitne (fine) granulacije (*Letang i sar., 2002; Pelgrom i sar., 2013*). Usitnjavanje suncokretove sačme, koje ne mora da bude toliko fino kao pri usitnjavanju mahunarki i žitarica, ima za cilj da razbije postojeće aglomerate i da tako oslobodi jezgro suncokreta od ljuske. Aglomerati se moraju usitniti, ali istovremeno preterano usitnjavanje ljuske nije poželjno, jer bi to imalo negativan uticaj na rezultate narednog koraka,

frakcionisanja, gde bi potencijalni procenat povećanja sadržaja proteina u visokoproteinskoj frakciji bio smanjen (*Sredanović i sar., 2011*). Pored toga što uređaji za usitnjavanje suncokretove sačme moraju da se prilagode ovakvom zahtevu, mora da se vodi i računa da je takav uređaj široko dostupan i da predstavlja relativno povoljno rešenje. Mlin čekićar je uređaj za usitnjavanje koji se standardno koristi u uljarama i industriji hrane za životinje i svojim osobinama može da ispuni postavljene zahteve u pogledu kvaliteta usitnjene sačme za potrebe dobijanja visokoproteinskih frakcija.

Mlin čekićar je najčešće korišćen mlin u industriji hrane za životinje i koristi se za mlevenje svih vrsta hraniva (*Nagalakshmi, 2011; Lević i Sredanović, 2012*). Odlikuje ga relativno niska cena, lakoća rukovanja i minimalni zahtevi za održavanjem (*Mani et al., 2004; Udén i Eriksson, 2012*). Sastoji se od čeličnog kućišta, sita i rotora sa slobodno oscilirajućim udaračima – čekićima. Mlevni prostor unutar komore ograničen je izmenjivim sitom, a do usitnjavanja čestica u čekićaru dolazi udarom čekića na čestice, udarom čestica o fiksirano sito kao i trenjem čestica o površinu sita. Veličina otvora sita određuje granulaciju usitnjenog materijala. Materijal ostaje u mlevnoj komori čekićara dok god čestice nisu dovoljno usitnjene da mogu da prođu kroz otvore sita. Smanjenje prečnika sita vodi ka više usitnjenom proizvodu, ali istovremeno se povećava specifična potrošnja energije i smanjuje kapacitet mlevenja (*Vukmirović, 2015*). Detaljan opis rada mlina čekićara, različita konstrukciona rešenja i faktori koji utiču na kvalitet usitnjavanja mogu se pronaći u dostupnoj literaturi (*Heiman, 2000; Lević i Sredanović, 2012; Vukmirović, 2015*). Čestice dobijene usitnjavanjem materijala primenom mlina čekićara pretežno su sferičnog oblika, sa relativno širokom raspodelom veličina oko srednjeg prečnika, odnosno sa određenom količinom sitnih i krupnih čestica (*Koch, 2002*).

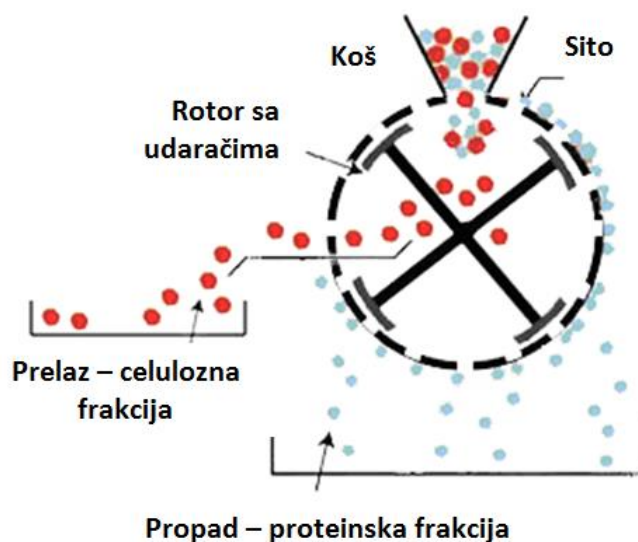
Mlin sa valjcima je pored mlina čekićara najviše korišćen mlin za usitnjavanje sirovina u industriji hrane za životinje (*Ziggers, 2001*). Korišćen je uspešno za usitnjavanje suncokretove sačme pre postupka frakcionisanja u svrhu proizvodnje visokoproteinske sačme (*Sredanović, 2007*). Mlin sa valjcima opremljen je sa jednim ili dva para nazubljenih (žljebljenih) valjaka između kojih se obavlja usitnjavanje materijala. Ako se poredi sa mlinom čekićarom, mlin sa valjcima odlikuje manja potrošnja energije (*Nir i sar., 1990*), manja buka i formiranje manje prašine tokom rada (*Heiman, 2002*), dok usitnjeni materijal ima ravnomerniju granulaciju sa znatno manje sitnih čestica (*Nir i sar., 1990; Nir i sar., 1995*). Detalji o konstrukciji i svim karakteristikama mlina sa valjcima detaljno su opisani u disertaciji Vukmirović (2015). Glavni nedostatak mlina sa valjcima u poređenju sa mlinom čekićarom je visoka nabavna cena i znatno skuplji troškovi održavanja (*Heiman, 2002*), kao i nedovoljna fleksibilnost u odnosu na granulaciju ulaznog materijala zbog čega može da bude smetnji pri mlevenju suncokretove sačme kada su u njoj prisutni krupni aglomerati (*Heiman, 2000*). Za potrebe razbijanja aglomerata suncokretove sačme pred dalji postupak razdvajanja suncokretovog

jezgra i ljuske u cilju dobijanja visokoproteinskih frakcija, mlin sa 2 para glatkih valjaka korišćen je u patentnom rešenju *Draganova (2015)*.

Usitnjavanje suncokretove sačme za potrebe dobijanje visokoproteinskih frakcija naknadnim razdvajanjem sastojaka usitnjenog materijala izvođeno je i primenom uređaja koji nisu česti u industriji hrane za životinje. Kuglični mlin, koji se obično koristi za mlevenje mineralnih sirovina, uspešno je korišćen i za usitnjavanje suncokretove sačme (*Sredanović, 2007*). Ovaj mlin sastavljen je od horizontalnog, rotirajućeg, zatvorenog bubnja čija je polovina unutrašnjeg prostora ispunjena kuglama, koje pri obrtanju deluju na materijal silama udara, trenja i pritiska te tako dolazi do njegovog usitnjavanja. Drobilica sa valjcima, sa jednim parom nazubljenih valjaka između kojih se materijal usitnjava, kao i udarna drobilica, kod koje se materijal usitnjava udarom radnih elemenata rotora po komadima materijala, primenjeni su za doradu suncokretove sačme kao alternativa standardnim mlinovima u industriji hrane za životinje (*Sredanović, 2007*). Iako intenzivno usitnjavanje ljuske najčešće nije poželjno, postupak mikronizacije, kojim se dobija fino usitnjeni prah, uspešno je primenjen za pripremu suncokretove sačme u svrhu dobijanja visokoproteinskih frakcija primenom vazdušne klasifikacije (*Laudadio i sar., 2013*). Mikronizacija se obavlja u uređaju sastavljenom od čeličnog bubnja sa radnim elementom koji rotira perifernom brzinom od čak 175 m/s, te se usitnjavanje čestica postiže u turbulentnom sloju usled udara čestica o nazubljene površine uređaja i međudobnim sudaranjem čestica.

2.1.2.1.2. Centrifugalna separacija

Posebna vrsta rotacionog sita kojim se suncokretova sačma efikasnije prosejava od standardnog planskog sita je centrifugalni separator. Centrifugalni separatori koriste se za prosejavanje teže protočnih materijala i sastoje se iz rotora sa letvastim udaračima i cilindričnog metalnog sita sa otvorima definisane veličine. Šematski prikaz frakcionisanja suncokretove sačme primenom centrifugalnog separatora dat je na slici 2.1. Udarači rotora zahvataju materijal i bacaju ga na cilindrično sito, istovremeno ga usmeravajući ka izlazu iz uređaja. Silama udara i trenja suncokretove sačme o udarače rotora i sito, razdvajaju se delovi jezgra i ljuske iz zaostalih aglomerata i sitne čestice, sastavljene uglavnom od jezgra, prolaze kroz otvore sita i završavaju kao visokoproteinska frakcija, dok se krupne čestice, sa većim udelom ljuske, izdvajaju na kraju sita kao prelaz (*Lević i Sredanović, 2012*).



Slika 2.1. Šema centrifugalne separacije suncokretove sačme (Sredanović, 2007)

Postupak centrifugalne separacije decenijama se koristi u industriji ulja u Srbiji za dobijanje visokoproteinske suncokretove sačme (Lević i Sredanović, 2012). Prva rešenja proizvodnje visokoproteinske suncokretove sačme datiraju iz 60-ih i sedamdesetih godina prošlog veka (Teleki i Delić, 1963; Delić i sar., 1965; Delić i sar., 1971) gde se od polazne sačme sa 37 – 38% proteina dobijalo oko 60% visokoproteinske sačme sa 44 – 45% sirovih proteina. Novije istraživanje (Sredanović, 2007) za cilj je imalo da pokaže kako različiti parametri centrifugalnog separatora (prečnik otvora sita i broj obrtaja rotora) i usitnjavanje sačme pre klasifikacije utiču na kvalitet i prinos frakcija suncokretove sačme. Na centrifugalnim sitima klasifikovano je 10 uzoraka neusitnjenih suncokretovih sačmi različitog polaznog kvaliteta čiji je sadržaj sirovih proteina bio u rasponu od 33,5 do 42,2%. Korišćena su sita sa prečnikom otvora od 0,8; 1,5; 1,8; 2,0; 2,2 i 2,5 mm. Utvrđeno da je najoptimalnija brzina rotora od 1435 obrtaja u minutu. Iako veće brzine dovode do povećanja prinosa propada, ujedno i povećavaju trenje sačme o površinu sita, čime se sačma dodatno usitnjava i povećava se sadržaj nepoželjne ljuske u propadu. Najbolji rezultat postignut je na situ sa prečnikom otvora 0,8 mm, gde su dobijene frakcije suncokretovih sačmi sa sadržajem proteina u rasponu od 39,4 do 47,9 % u prinosu od 29 od 37,4 %. Povećanje otvora prečnika dovelo je do povećanja prinosa ali i istovremenog smanjenja sadržaja sirovih proteina u dobijenim frakcijama. Veliki deo jezgra ostao je zarobljen u aglomeratima koji su kao prelaz sa sita završavali u visokoceluloznoj frakciji, zbog čega su primenjeni različiti uređaji za usitnjavanje suncokretove sačme u cilju razbijanja aglomerata. Rezultati sadržaja proteina i prinosa visokoproteinskih frakcija dobijenih u okviru navedenog istraživanja centrifugalnom separacijom i primenom različitih uređaja za usitnjavanje prikazani su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Usporedni rezultati centrifugalne separacije suncokretove sačme usitnjene različitim uređajima (Sredanović, 2007)

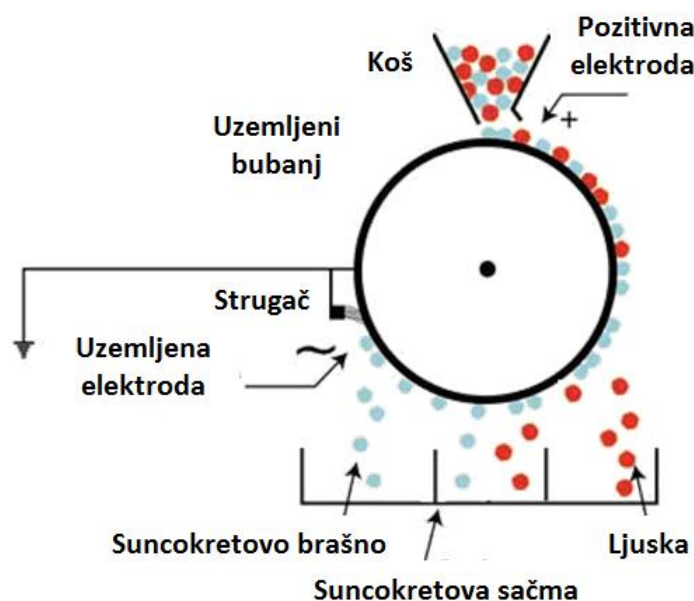
Uređaj za usitnjavanje	Sadržaj proteina polazne suncokretove sačme (%)	Prečnik otvora sita centrifugalnog separatora (mm)					
		1,5		1,8		2,0	
		Prinos frakcije propada (%)	Sadržaj proteina u frakciji propada (%)	Prinos frakcije propada (%)	Sadržaj proteina u frakciji propada (%)	Prinos frakcije propada (%)	Sadržaj proteina u frakciji propada (%)
Mlin čekićar	38,3	62,7	41,3	65,3	40,6	72,1	39,9
Mlin sa valjcima	38,1	48,2	41,6	53,1	41,1	62,4	40,8
Drobilica sa valjcima	38,8	46,8	42,6	51,7	41,8	58,6	41,1
Udarna drobilica	38,5	54,8	43,1	58,2	42,3	68,4	40,1

Primena mlina čekićara za usitnjavanje aglomerata, rezultovala je najvećim prinosima frakcije propada na sva tri korišćena sita (1,5; 1,8 i 2,0 mm), dok u pogledu povećanja sadržaja proteina nije primećena značajnija razlika u zavisnosti od primenjenog uređaja za usitnjavanje. Detaljniji opis rezultata dat je u navedenoj literaturi (Sredanović, 2007). Za viši stepen povećanja sadržaja proteina, centrifugalna separacija suncokretove sačme može se da se izvodi i dvostepeno, tako da se izdvojena frakcija prelaza sa sita još jednom frakcioniše, čime se proizvode dodatne količine visokoproteinske suncokretove sačme (Lević i sar., 1989). Ujedno, može se primeniti i drugačija tehnika frakcionisanja na visokoproteinsku frakciju, kako bi se dodatno izdvojila zaostala ljuska, poput elektrostatičke separacije, korišćene u svrhu dobijanja suncokretovog brašna sa više od 50% proteina (Sredanović, 2007).

2.1.2.1.3. Elektrostatička separacija

Čestice materijala različite prirode ponašaju se različito unutar električnog polja. Čestice jezgra suncokretove sačme u električnom polju dobijaju pozitivan naboj dok čestice ljuske suncokreta dobijaju negativan naboj (Weiss i Thibodeaux, 1984). Ova razlika u naelektrisanju osnovnih konstituenata suncokretove sačme u električnom polju predstavlja osnovu za njeno frakcionisanje u elektrostatičkom separatoru. Weiss i Thibodeaux (1984) su elektrostatičkom separacijom od suncokretove sačme, polaznog sadržaja proteina 29,37%, dobili dve frakcije sa 32,44% i 20,25% proteina. U kasnijem istraživanju (Sredanović, 2007), elektrostatičkom separacijom su u laboratorijskim uslovima od polazne suncokretove sačme sa 43,8% sirovih proteina dobijene tri

frakcije: suncokretovo brašno, suncokretova sačma i suncokretova ljuska. Na slici 2.2 šematski je prikazan princip rada elektrostatičkog separatora korišćenog u navedenom istraživanju.



Slika 2.2. Šematski prikaz elektrostatičke separacije suncokretove sačme (Sredanović, 2007)

Čestice su posredstvom dozatora padale na bubanj u zonu dejstva električnog polja, a potom su čestice izlaskom iz zone, zavisno od njihove prirode, brže ili sporije gubile naelektrisanje i kretale se različitim putanjama što je omogućilo njihovo razdvajanje. Napon električnog polja bio je promenljiv (2,5 – 15 kV). U tabeli 2.2 uporedo su prikazani rezultati prinosa i sadržaja proteina dobijenih frakcija suncokretove sačme elektrostatičkom separacijom.

Tabela 2.2. Prinosi i sadržaji proteina proteinskih frakcija suncokretove sačme, polaznog sadržaja proteina 43,8%, dobijenih primenom elektrostatičke separacije (Sredanović, 2007)

Primenjeni napon (kV)	Suncokretovo brašno		Suncokretova sačma	
	Prinos (%)	Protein (%)	Prinos (%)	Protein (%)
2,5	25,8	51,6	69,7	43,3
5,0	37,2	51,8	57,5	42,0
7,0	39,6	51,9	54,8	41,6
9,0	38,9	53,1	55,1	41,3
12,0	46,3	52,2	47,1	41,0
15,0	48,1	52,5	44,5	40,8

Povećanjem napona povećavao se prinos suncokretovog brašna dok je prinos frakcija suncokretove sačme opadao. Svi primenjeni naponi imali su podjednak uticaj na sadržaj proteina suncokretovog brašna, koji se kretao u rasponu od 51,6 do 52,5%, dok je najbolji rezultat postignut primenom najvišeg napona od 15 kV. Dobijeno suncokretovo brašno imalo je više proteina od sojinog brašna (53,1 : 49,0%) ali i više celuloze (5,3 : 3,5%) dok su oba brašna bila komplementarna u aminokiselinskom sastavu (Sredanović, 2007).

2.1.2.1.4. Vazдушna klasifikacija suncokretove sačme

Razdvajanje ljuske od jezgra suncokreta može da se izvodi i vazdušnom klasifikacijom, tehnološkim postupkom u kome se razdvajaju praškasti, vlaknasti ili granulirani materijali na osnovu razlika u gustini, veličini i brzinama kretanja čestica u struji vazduha. *Laudaio i saradnici (2013)* su za potrebe izdvajanja ljuske iz suncokretove sačme primenili sistem za vazdušnu klasifikaciju. Postupku klasifikacije, polaznog sadržaja proteina od 34% (SM), prethodio je postupak mikronizacije sačme, tj. fino mlevenje. Pri odgovarajućim parametrima klasifikacije najbolji rezultat ostvaren je proizvodnjom frakcije sa 40% (SM) proteina u prinosu od 87,9%. Sadržaj proteina suncokretove sačme može dodatno da se uveća ukoliko se vazdušna klasifikacija usitnjene sačme iskombinuje sa postupkom mehaničkog prosejavanja. *Waters (2014)* je patentirao postupak kojim se suncokretova sačma grubo usitnjava a potom se kombinacijom prosejavanja i vazdušne klasifikacije u turbo separatoru dobijaju dve frakcije sačme, jedna visokoproteinska namenjena za ishranu monogastričnih životinja, i druga, sa povećanim sadržajem sirovih vlakana, koja može da se koristi u ishrani preživara. U patentu *Draganova (2015)* opisan je postupak proizvodnje visokoproteinske suncokretove sačme mlevenjem sačme mlinom sa valjcima i frakcionisanjem kombinacijom postupaka prosejavanja i vazdušne klasifikacije i dat je primer u kom se od polazne suncokretove sačme sa 37,47% dobijaju tri frakcije suncokretove sačme kao finalni proizvodi: visokoproteinska sa 48 – 50% proteina u prinosu od 63,8% i dve frakcije sa sniženim sadržajem proteina, sa 23,80 i 15,68 % proteina u prinosu od 20,5% odnosno 10,4%. U dostupnoj literaturi nisu pronađeni detaljniji podaci o primeni postupka vazdušne klasifikacije za oplemenjivanje suncokretove sačme.

2.2. Opšti principi i primena vazdušne klasifikacije

Vazdušna klasifikacija je tehnološki postupak razdvajanja čvrste, dispergovane faze na finu i grubu frakciju prema veličini, gustini i obliku čestica (*Fürchner i Zampini, 2012*). Ova tehnološka operacija obično se koristi za uklanjanje nepoželjne komponente iz polaznog materijala ili za obogaćenje materijala u sadržaju određene komponente. Maseni bilans vazdušne klasifikacije može da se predstavi sledećom formulom:

$$m_0 = m_g + m_f \quad (2.1)$$

gde su:

m_0 – masa početnog materijala,

m_g – masa grube frakcije,

m_f – masa fine frakcije.

Prinos frakcije predstavlja odnos dobijene mase određene frakcije i mase početnog materijala:

$$\gamma_g = \frac{m_g}{m_0} \quad (2.2)$$

$$\gamma_f = \frac{m_f}{m_0} \quad (2.3)$$

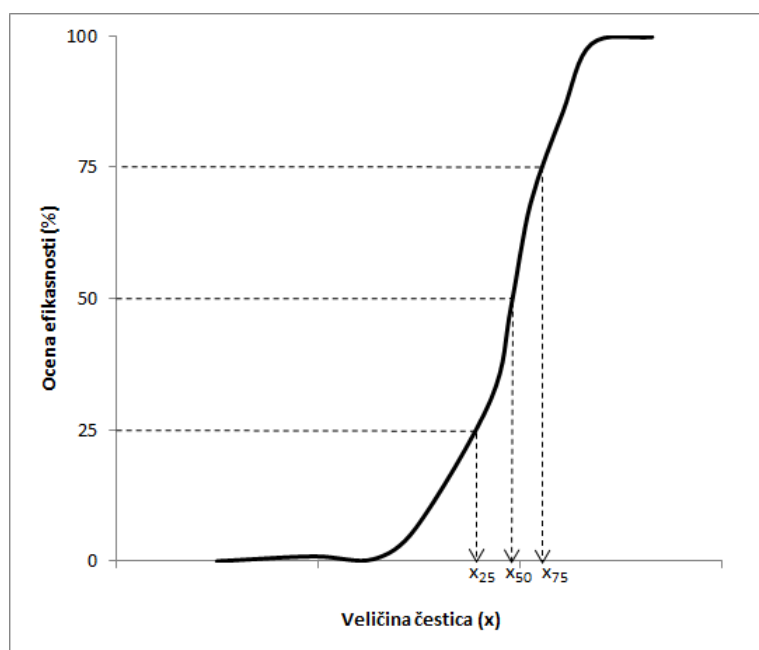
gde su:

γ_g – prinos grube frakcije,

γ_f – prinos fine frakcije.

Razdvajanje čestica definiše veličina koja se zove tačka razdvajanja čestica (engl. *Cut point*), koja predstavlja dimenziju čestice koja je jasna granica između grube i fine frakcije (*Shapiro i Galperin, 2005*). Ekvivalentni prečnik čestice je dimenzija čestice koja najbolje definiše razdvajanje čestica (*Rumpf, 1990*) i predstavlja prečnik koju bi imala hipotetička sfera da je iste zapremine kao data čestica. Čestice koje bi hipotetički imale isti prečnik kao što je tačka razdvajanja imale bi podjednaku šansu da završe i u gruboj i u finoj frakciji (*Dijkink i sar., 2007*). Čestice veće od tačke razdvajanja završavaju u gruboj frakciji, dok čestice dimenzija manjih od tačke razdvajanja završavaju u finoj frakciji. U praksi ovakva preciznost razdvajanja nije moguća pa tako usled različitih stohastičkih (slučajnih) faktora, kao što su vazdušna turbulencija i međusobni sudari čestica u struji vazduha pri

klasifikaciji, neke od čestica koje bi trebalo da završe u finoj frakciji završavaju u gruboj i obrnuto (Shapiro i Galperin, 2005; Johansson i Evertsson, 2012). Ovo, takozvano preklapanje, često se koristi za brzu procenu efikasnosti vazdušne klasifikacije, omogućavajući predviđanje raspodele veličine čestica i prinosa frakcija (Fürchner i Zampini, 2012), a time i preciznost razdvajanja kao i efikasnost klasifikatora (Hosokawa Alpine, 2006). Proces klasifikacije naučno se predstavlja i potpuno opisuje Trompovom krivom koja je istovremeno ocena efikasnosti klasifikacije (Husseman, 1990; Hosokawa Alpine, 2006). Trompova kriva je funkcija koja opisuje koliki deo početnog materijala završava u gruboj frakciji. Primer jedne Trompove krive dat je na slici 2.3.



Slika 2.3. Trompova kriva

Za formiranje Trompove krive koristi se raspodela veličina čestica grube i fine frakcije klasifikatora pri određenim uslovima, kao i raspodela veličine čestica početnog materijala pre klasifikacije. Ocena efikasnosti za određenu veličinu čestica predstavlja odnos količine materijala određene granulacije u gruboj frakciji i količine materijala iste granulacije koja se nalazila u početnom materijalu pre klasifikacije (Fürchner i Zampini, 2012). Trompova kriva računa se primenom sledeće jednačine:

$$T(x) = \frac{\gamma_g \cdot q_g(x)}{q_0(x)} \quad (2.4)$$

gde su:

T – Trompova funkcija,

- x – veličina čestice,
- γ_g – prinos grube frakcije,
- q_g – raspodela veličine čestica grube frakcije,
- q_0 – raspodela veličine čestica početnog materijala.

Trompova kriva opisuje verovatnoću da čestica određene veličine završi u gruboj frakciji, te tako može da se primeti gledajući sliku 2.3, da sa porastom dimenzije čestice raste i njena šansa da završi u gruboj frakciji. Za izradu Trompove krive potrebno je da se odredi raspodela veličine čestica početnog materijala, grube i fine frakcije nakon postupka klasifikacije pri određenim parametrima, pogodnim eksperimentalnim metodama, najjednostavnije, metodom prosejavanja. Veličina čestice (x) za koju Trompova funkcija ima vrednost 50% predstavlja ranije opisanu tačku razdvajanja klasifikatora (x_{50}). Što su čestice manje, verovatnoća da završe u gruboj frakciji postaje sve manja. Međutim, u praksi, verovatnoća da se izrazito sitne čestice nađu u gruboj frakciji se povećava kada dimenzije ovih čestica postanu manje od neke određene minimalne dimenzije. Najverovatnije objašnjenje za ovakvu pojavu jeste adhezija izrazito sitnih čestica na krupne čestice sa kojima zajedno onda završavaju u gruboj frakciji (*Dikjink, 2007*). Kvalitet razdvajanja određen je masom čestica iz svake frakcije u odgovarajućem proizvodu, dok je nagib Trompove krive mera za oštrinu razdvajanja i izračunava se kao (*Fürchner i Zampini, 2012*):

$$\kappa = \frac{x_{25}}{x_{75}} \quad (2.5)$$

gde su:

- κ – indeks oštrine razdvajanja,
- x_{25} – veličina čestice za koju je efikasnost razdvajanja 25%,
- x_{75} – veličina čestice za koju je efikasnost razdvajanja 75%.

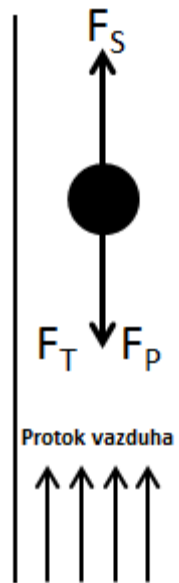
Vrednosti x_{25} i x_{75} čitaju se direktno sa formirane Trompove krive (Slika 2.3). Veći nagib Trompove krive znači i oštrije razdvajanje čestica (*Altun i Benzer, 2014*). Ukoliko se zahteva izrazito oštro razdvajanje, vrednost indeksa oštrine razdvajanja bi trebalo da bude oko 0,8 što je izvodljivo jedino pri niskom protoku materijala u klasifikator. Pri visokim protocima materijala pri kojima se najčešće radi u industrijskim uslovima, može takođe da se dogodi da Trompova kriva ne preseca liniju od 25% efikasnosti razdvajanja, te tada indeks oštrine separacije ne može da se izračuna (*Fürchner i Zampini, 2012*). U slučaju idealnog razdvajanja čestica, indeks oštrine iznosi 1, što bi značilo da bi sve čestice veće od tačke razdvajanja (x_{50}) završile u gruboj, dok bi čestice dimenzija manjih od tačke

razdvajanja zavšile u finoj frakciji. Na tačku razdvajanja, a time i na kvalitet postupka razdvajanja, može da se utiče promenom parametara klasifikacije. Takođe, tačka razdvajanja zavisi i od tipa klasifikatora i principa razdvajanja čestica u njemu. Ukoliko se razdvajanje vazdušnom klasifikacijom odvija u gravitacionom polju, tačka razdvajanja čestica nalazi se u opsegu od 200 μm pa do nekoliko milimetara, dok u centrifugalnom polju može da bude od 1 do 200 μm (Fürchner i Zampini, 2012). Za razdvajanje čestica većih od nekoliko milimetara, tehnološki postupak prosejavanja najčešće ima prednost nad vazdušnom klasifikacijom jer je sa tehničkog stanovišta jednostavniji i zahteva manje energije (Fürchner i Zampini, 2012). Kod prosejavanja, granica razdvajanja čestica po veličini nalazi se između 100 i 200 μm , što zavisi od fizičkih osobina samog rasutog materijala (Fürchner i Zampini, 2012).

Usitnjavanjem materijala koji se zbog svojih osobina teško prosejava, može se da se obezbedi veličina čestica koja bi omogućila razdvajanje na dve frakcije primenom vazdušne klasifikacije. U ultrafinom opsegu veličine čestice su izrazito sitne, a sa smanjenjem veličine čestica Van der Waals-ove privlačne sile među česticama postaju jače, pa tako ove sile otežavaju razdvajanje čestica. Energija koja je potrebna za razdvajanje čestica vazdušnom klasifikacijom u ultrafinom opsegu (čestice veličine $< 5 \mu\text{m}$) je izuzetno visoka. U procesnoj liniji koja uključuje usitnjavanje materijala, potom klasifikaciju čestica manjih od 5 μm , može da se pretpostavi da je za klasifikaciju potrebna približno ista količina energije koliko i za usitnjavanje datog materijala (Fürchner i Zampini, 2012).

2.2.1. Opšti principi vazdušne klasifikacije

Princip razdvajanja u vazdušnom klasifikatoru zasnovan je na različitim brzinama taloženja čestica (Simonović i sar., 1971; Fürchner i Zampini, 2012). Opšti principi koji važe za taloženje čestica u fluidu, koje za rezultat ima mehaničku separaciju heterogenog sistema fluid-čvrsta faza, važe i kod postupka vazdušne klasifikacije. Zakoni taloženja i kretanja čestice kroz fluid predstavljaju teorijsku osnovu vazdušne klasifikacije. Pri postavljanju teorijskih osnova, posmatra se slobodno kretanje čestica kroz fluid, kod kojeg se uspostavlja brzinski profil formiran između fluida koji je povučen česticom i kreće brzinom koju čestica ima, i fluida u mirovanju pri čemu čestice pri kretanju ne utiču jedna na drugu (Simonović i sar., 1971).



Slika 2.4. Sile koje deluju na česticu u struji fluida, F_S – spoljna sila; F_P – sila potiska; F_T – sila trenja

Ako se posmatra kretanje pojedinačne, sferične čestice kroz fluid u jednom pravcu, zapaža se da na česticu deluju tri sile (Slika 2.4): spoljna sila (F_S) koja ima isti pravac, a suprotan smer od kretanja čestica, potisna sila (F_P) koja pokreće česticu u suprotnom smeru od spoljnje sile i sila trenja (F_T) koja se javlja između čestice i fluida (Simonović i sar., 1971). Rezultanta ove tri sile je inerciona sila i definisana je jednačinom:

$$m_{\xi} \cdot \frac{dw}{dt} = F_S - F_P - F_T \quad (2.6)$$

gde su:

m_{ξ} – masa čestice,

dw/dt – ubrzanje čestice koje se javlja kao rezultat pomenutih sila.

Tri sile koje utiču na česticu definisane su sledećim formulama (Simonović i sar., 1971):

$$F_S = m_{\xi} \cdot a_S \quad (2.7)$$

$$F_P = m_f \cdot a_S \quad (2.8)$$

$$F_T = c_D \cdot \frac{w^2 \cdot A \cdot \rho_f}{2} \quad (2.9)$$

gde su:

a_s – spoljnje ubrzanje,
 m_f – masa fluida istisnuta česticom,
 c_D – koeficijent trenja,
 w – brzina čestice,
 A – projektovana površina sferne čestice,
 ρ_f – gustina fluida.

Kombinovanjem jednačine 2.6 sa jednačinama 2.7, 2.8 i 2.9 dobija se izraz:

$$m_{\check{c}} \cdot \frac{dw}{dt} = m_{\check{c}} \cdot a_s - m_f \cdot a_s - c_D \cdot \frac{w^2 \cdot A \cdot \rho_f}{2} \quad (2.10)$$

U operaciji vazdušne klasifikacije od praktičnog značaja je samo brzina uniformnog kretanja čestice što predstavlja konstantnu brzinu koja se uspostavlja nakon ubrzanog kretanja. Ova brzina naziva se brzina taloženja (w_0) (*Simonović i sar., 1971*). Stoga, količnik dw/dt u jednačini 2.10 jednak je nuli, a brzina čestice w zamenjuje se sa brzinom taloženja w_0 , te jednačina 2.10 dobija sledeći oblik:

$$c_D \cdot \frac{w_0^2 \cdot A \cdot \rho_f}{2} = m_{\check{c}} \cdot a_s - m_f \cdot a_s \quad (2.11)$$

Masa fluida istisnutog česticom, površina i masa sferične čestice mogu da se prikažu i kao:

$$m_f = m_{\check{c}} \cdot \frac{\rho_{\check{c}}}{\rho_f} \quad (2.12)$$

$$m_{\check{c}} = \rho_{\check{c}} \cdot \frac{d_0^3 \cdot \pi}{6} \quad (2.13)$$

$$A = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.14)$$

gde je d_0 – ekvivalentni prečnik čestice.

Kombinovanjem jednačina 2.11, 2.12, 2.13 i 2.14 dobija se izraz kojim se računa brzina taloženja čestice:

$$w_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_{\check{c}} - \rho_f) \cdot a_s \cdot d_0}{3 \cdot \rho_f \cdot c_D}} \quad (2.15)$$

Jednačina 2.15 može jednostavnije da se prikaže i kao (Fürchner i Zampini, 2012):

$$w_0 = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\check{c}} \cdot a_s \cdot d_0}{\rho_f \cdot c_D}} \quad (2.16)$$

Koeficijent trenja je funkcija Reynoldsovog broja i eksperimentalno je određen mnogobrojnim ogledima u vazдушnom tunelu pod uslovima koji odgovaraju slobodnom kretanju čestice, te stoga prilikom primene date jednačine treba imati u vidu ovu činjenicu da funkcija podrazumeva samo slobodno kretanje čestica (Simonović i sar., 1971; Fürchner i Zampini, 2012).

U osnovi postoje dve vrste vazдушnih klasifikatora – gravitacioni i centrifugalni. Spoljnje ubrzanje koje utiče na česticu, pri klasifikaciji u gravitacionim klasifikatorima odgovara gravitacionom ubrzanju (g) a u centrifugalnim klasifikatorima centrifugalnom ubrzanju (Fürchner i Zampini, 2012). Formula za proračun brzine taloženja čestica za vazдушnu klasifikaciju u gravitacionom polju tako ima sledeći oblik:

$$w_0 = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\check{c}} \cdot g \cdot d_0}{\rho_f \cdot c_D}} \quad (2.17)$$

Prostor unutar vazdušnog klasifikatora poznata je kao zona razdvajanja, tj. zona klasifikacije, u kojoj postoji uzajamno dejstvo čvrstih čestica i vazduha (Shapiro i Galperin, 2005). Poznate su četiri osnovne zone razdvajanja (Rumpf, 1956):

1. gravitaciona protivstrujna zona,
2. gravitaciona zona sa poprečnim protokom,
3. centrifugalna protivstrujna zona i
4. centrifugalna zona sa poprečnim protokom.

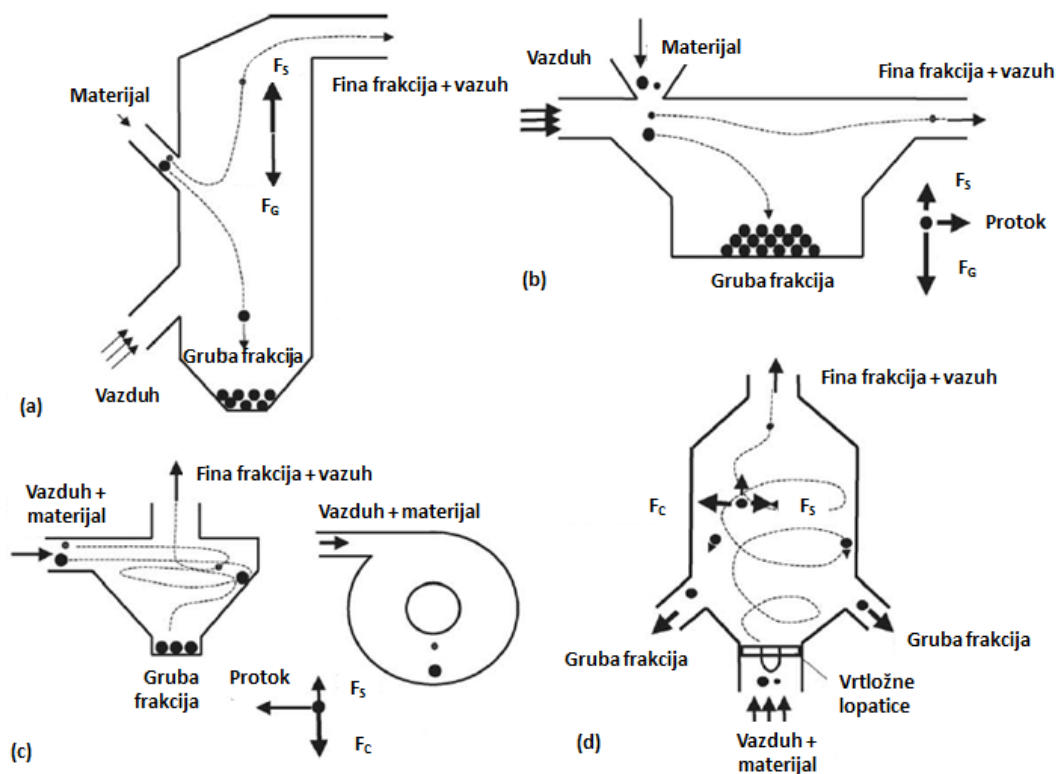
Unutar klasifikatora u obliku vertikalnog cilindra u kojem vazduh konstantno struji nagore, formira se gravitaciona protivstrujna zona razdvajanja (Slika 2.5a). Ukoliko su brzina taloženja čestice i brzina vazduha koji struji prema gore iste, čestica će teoretski beskonačno da bude u klasifikacionoj zoni. Čestica sa nižom brzinom taloženja od brzine vazduha biće vazduhom odnešena na gore u finu frakciju, dok će čestica sa većom brzinom taloženja pasti nadole pod dejstvom gravitacije i završiti u gruboj frakciji (Fürchner i Zampini, 2012).

Razdvajanje u gravitacionoj zoni sa poprečnim protokom predstavlja razdvajanje u horizontalnoj struji vazduha, gde kroz klasifikator u obliku suda (Slika 2.5b) protiče mešavina čestica i

vazduha. Vazduh ulazi u komoru zajedno sa materijalom koji se razdvaja, protiče ka izlazu i ubrzava čestice, koje na kraju imaju horizontalnu brzinu gotovo jednaku brzini samog vazduha. Do separacije dolazi usled vertikalnog kretanja čestica u struji vazduha. Čestice padaju u različite delove komore, zavisno od njihove veličine i brzine taloženja. Velike čestice sa najvećom brzinom taloženja padaju u prvi deo komore, manje u drugi, udaljeniji deo komore, a najsitnije čestice nose se strujom vazduha izvan komore (*Simonović i sar., 1971; Shapiro i Galperin, 2005*). Za razliku od gravitacionog protivstrujnog razdvajanja, tačka razdvajanja ovde pored taložne brzine čestica, zavisi i od širine i visine komore, koja je obično tako napravljena da čestice veličine oko tačke razdvajanja završavaju na najdaljem delu komore klasifikatora (*Shapiro i Galperin, 2005*).

Centrifugalnu protivstrujnu zonu razdvajanja karakteriše ravan vazdušni vrtlog koji prevladava unutar cilindrične komore sa tangencijalnim ulazom i centralnim izlazom materijala i vazduha (Slika 2.5c). U ovom vrtlogu vazduh rotira i protiče radijalno ka centru komore, pri čemu takvo kretanje vazduha predstavlja putanju po kojoj se čestice razdvajaju. Materijal i vazduh tangencijalno ulaze u zonu razdvajanja, a rezultanta centrifugalne i potisne sile dovodi do razdvajanja. Krupne čestice kreću se ka zidovima komore i padaju na dole pod uticajem gravitacione sile, a fine čestice dolaze u središnji deo komore i zajedno sa vazduhom odlaze na gore potisnute kretanjem vazduha. Kako centrifugalna sila, a time i tačka razdvajanja čestica zavisi od radijalne pozicije čestice u komori uređaja, komora klasifikatora treba da ima takvu konstrukciju da omogući konstantnu perifernu brzinu čestice, a time i konstantnu tačku razdvajanja čestica duž radijalnog pravca (*Shapiro i Galperin, 2005*).

Centrifugalna zona razdvajanja sa ukrštanjem protoka javlja se obično u vazdušnom vrtlogu unutar cilindrične komore sa ulazom i izlazom smeštenim na suprotnim stranama (Slika 2.5d). Postupak razdvajanja u ovoj zoni sličan je onom koji se odvija u ciklonima, gde čestice ulaze u komoru zajedno sa strujom vazduha prolazeći kroz lopatice zadužene da stvore vrtloženje vazduha te tako čestice rotiraju u vrtlogu i kreću se ka unutrašnjim zidovima komore različitim brzinama zavisno od njihove veličine. Krupnije čestice idu ka zidovima brže dok se kreću kroz osu komore, te tako padaju nadole i završavaju u gruboj frakciji dok sitne čestice vazduh odnosi nagore u finu frakciju (*Shapiro i Galperin, 2005*).



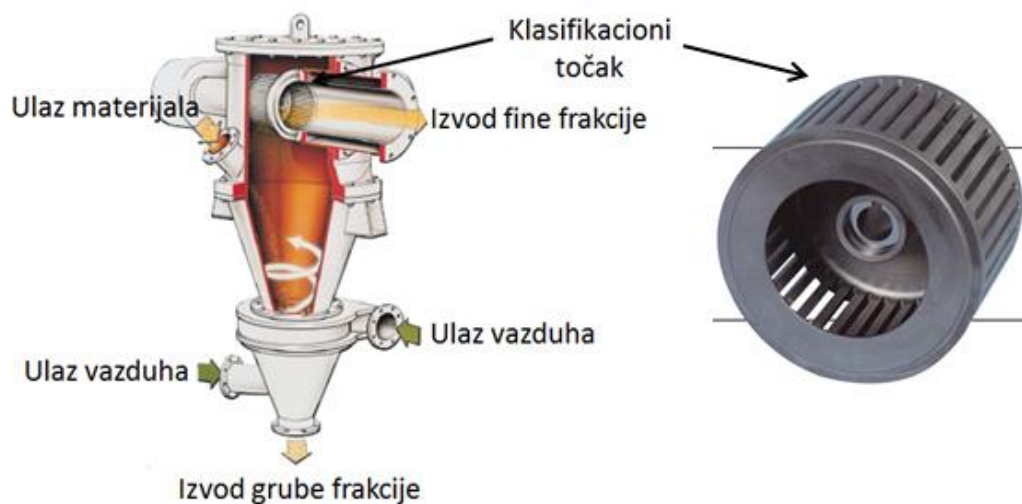
Slika 2.5. Osnovne zone razdvajanja vazdušne klasifikacije: (a) gravitaciona protivstrujna; (b) gravitaciona sa poprečnim protokom; (c) centrifugalna protivstrujna; (d) centrifugalna sa poprečnim protokom; FS - spoljna sila; FG - gravitaciona sila; FC - centrifugalna sila (Shapiro i Galperin, 2005)

2.2.2. Tipovi klasifikatora

Postoje brojne dostupne konstrukcije vazdušnih klasifikatora, ali svaka konstrukcija uređaja ima svoje specifičnosti i pogodna je za određenu svrhu i nema univerzalne konstrukcije koja bi mogla da bude preporučena za razdvajanje različitih materijala (Shapiro i Galperin, 2005). Vazdušni klasifikatori mogu da se dele po nekoliko osnova. Kao prvo, mogu da se podele na osnovu zona razdvajanja opisanih u prethodnom poglavlju. Ipak, jedan klasifikator može da ima i po nekoliko različitih zona razdvajanja u okviru njegove konstrukcije (Shapiro i Galperin, 2005).

Od gravitacionih klasifikatora u industriji se koriste jednostavni cilindrični sa vertikalnom strujom vazduha, kao i njeno naprednija verzija, kaskadni klasifikatori. U gravitacione klasifikatore spadaju i inercioni klasifikatori, čiji je princip rada baziran na inerciji čestica te u njemu sitne čestice prate protok vazduha i završavaju u finoj frakciji, dok krupne čestice u manjoj ili većoj meri odstupaju od trajektorije vazduha i završavaju u gruboj frakciji (Fürchner i Zampini, 2012). Koriste se i klasifikatori u kojima se klasifikacija odvija u fluidizovanom sloju iz kojeg struja vazduha odnosi sitne čestice koje završavaju u finoj frakciji (Shapiro i Galperin, 2005).

Poznata su dva glavna tipa centrifugalnih klasifikatora koja se razlikuju po načinu na koji se stvara vrtložna struja vazduha – vrtložni klasifikatori, kod kojih se vazduh vrtloži primenom stacionarnih lopatica i klasifikatori sa rotorom (Slika 2.6) kod kojih radni element, točak sa oštricama ili klasifikacioni točak, stvara vrtložnu struju vazduha svojim rotiranjem (Shapiro i Galperin, 2005). Klasifikatori sa klasifikacionim točkom široko su primenjeni u proizvodnji visokoproteinskih biljnih sirovina (Pelgrom i sar., 2013; Pelgrom i sar., 2014; Pelgrom i sar., 2015). Principi rada i upotreba svih navedenih tipova klasifikatora detaljno su opisani u preglednom radu autora Shapiro-a i Galperin-a (2005).



Slika 2.6. Klasifikator sa klasifikacionim točkom, model ATP (Hosokawa Alpine, 2006)

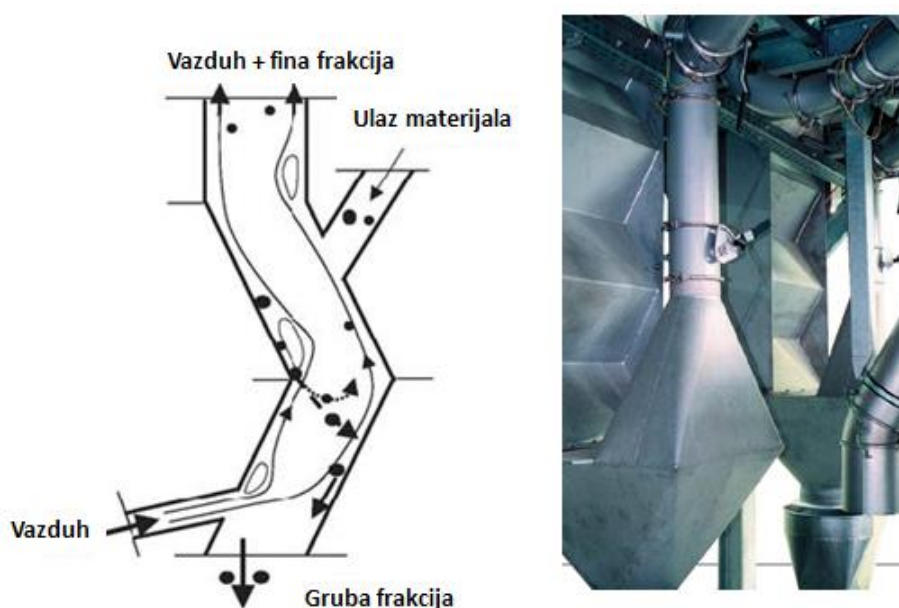
Vazdušni klasifikatori se po svojoj konstrukciji mogu podeliti na klasifikatore sa spoljašnjim i klasifikatore sa unutrašnjim aerodinamičkim ciklusom. Kada se kaže spoljašnji aerodinamički ciklus, smatra se da je vazdušni klasifikator, kao glavna jedinica sistema za vazdušnu klasifikaciju, instaliran odvojeno od ventilatora koji se koristi za stvaranje protoka vazduha za klasifikaciju i sistema za sakupljanje prašine, te je sa njima spojen cevima. Ventilatori su obično postavljeni tako da se u klasifikatoru formira podpritisak čime je sprečen izlazak prašine iz sistema. Kako je ventilator najveći potrošač energije celokupnog sistema, može da se smatra da je potrebna energija za pokretanje ventilatora ujedno i celokupna energija potrebna za sistem vazdušne klasifikacije (Fürchner i Zampini, 2012). Kod vazdušnih klasifikatora sa unutrašnjim aerodinamičkim ciklusom tj. sa recirkulacijom vazduha, svi navedeni elementi nalaze se u jednom uređaju te stoga zahtevaju manja ulaganja i zauzimaju manje prostora (Shapiro i Galperin, 2005). Neophodni protok vazduha stvara veliki ventilator male brzine postavljen na gornjoj strani uređaja. Prednost klasifikatora sa unutrašnjim ciklusom je mala potrošnja energije i zahtevani manji prostor, dok je njihov glavni nedostatak

nedovoljno stabilna tačka razdvajanja koja je uvek veća od 25 μm (Fürchner i Zampini, 2012). Shapiro i Galperin (2005) i Fürchner i Zampini (2012) detaljno su opisali princip rada ovakvih klasifikatora sa recirkulacijom.

Vazdušni klasifikatori mogu da se podele i na osnovu načina ulaska materijala i vazduha u klasifikator. Materijal može da se uvede u klasifikator pogodnim sistemom za doziranje zajedno sa vazduhom ili zasebno od njega. Ukoliko vazdušni klasifikatori ne poseduju pokretne delove, i tačka razdvajanja se podešava samo promenom brzine i smera klasifikacionog vazduha, onda ovakvi klasifikatori spadaju u grupu statičkih klasifikatora, dok svi klasifikatori koji poseduju pokretni deo kojim se vrši klasifikacija, kao što su klasifikatori sa klasifikacionim točkom, svrstavaju se u dinamičke klasifikatore (Altun i Benzer, 2014). Pored toga, postoje podele vazdušnih klasifikatora i po tome kog je oblika struja vazduha, po specifičnim detaljima konstrukcije ili po tome da li rade kontinualno ili šaržno. Za potrebe istraživanja u okviru ove disertacije, korišćen je gravitacioni, kaskadni, vazdušni klasifikator, te je stoga ovaj tip klasifikatora detaljno objašnjen u daljem tekstu.

2.2.2.1. Gravitacioni kaskadni cik-cak klasifikator

Najjednostaviji primer gravitacionog vazdušnog klasifikatora predstavlja vertikalna komora u kojoj vazduh struji na gore, dok se čestice uvode u komoru preko otvora odgore ili sa strane, pri čemu u komori dolazi do njihovog razdvajanja usled različitih brzina taloženja kao direktne posledice razlike u veličini ili gustini čestica. Prednost ovakvih klasifikatora je cena i konstrukciona jednostavnost, a nedostatak neuniformnost proticanja vazduha usled prisustva čestica u fluidu. U vertikalnoj komori formiraju se laminarni slojevi u kojima je brzina vazduha značajno umanjena, te se stvaraju turbulencije i krupne čestice u jednom ovakvom, jednostepenom postupku klasifikacije, onemogućavaju da sitne čestice budu odnešene nagore strujom vazduha, što sve zajedno daje nisku efikasnost razdvajanja i umanjuje efikasnost klasifikacije (Shapiro i Galperin, 2005; Fürchner i Zampini, 2012). Kako bi se ovaj nedostatak gravitacionih klasifikatora prevazišao, u unutrašnjost komore mogu da se dodaju kaskade, tj. elementi koji su postavljeni pod određenim uglom, a koji transformišu jednostepeni postupak klasifikacije u višestepenu klasifikaciju i tako poboljšavaju efikasnost razdvajanja. Umesto postavljanja nagnutih kaskada u unutrašnjost vertikalne komore gravitacionog vazdušnog klasifikatora, čitava komora može da se formira od cevi, pravougaono poprečno postavljenih, tako da formiraju vertikalni cik-cak kanal (Shapiro i Galperin, 2005; Blanke, 2015). Uređaj sa ovakvom komorom poznat je kao cik-cak gravitacioni kaskadni klasifikator (Slika 2.7).



Slika 2.7. Šematski prikaz cik-cak vazdušnog klasifikatora i izgled industrijske jedinice (*Shapiro i Galperin, 2005; Hosokawa Alpine, 2006*)

Pravougaone sekcije cik-cak klasifikatora međusobno su spojene pod određenim uglom formirajući tako cik-cak kanal u kome vazduh struji nagore, dok se čestice kreću nasuprot vazduhu, nadole. Čestice tako usled oblika komore imaju cik-cak putanju kretanja. Ovim je obezbeđeno da čestice provode više vremena u klasifikacionoj zoni, nego što je to slučaj u klasifikatorima bez kaskada, te je i veća šansa da će čestice, koje bi inače završile u gruboj frakciji usled sile gravitacije u vertikalnoj komori klasifikatora, biti odnešene klasifikacionim vazduhom. Na svakom podu unutar cik-cak klasifikatora, pri svakoj promeni pozicije unutar cik-cak komore, čestice su zahvaćene vazduhom i dolazi do njihovog razdvajanja. Višestrukim ponavljanjima razdvajanja na svakom podu povećava se efikasnost klasifikacije i postiže se izuzetno oštro razdvajanje (*Uhlemann i sar., 1990; Fürchner i Zampini, 2012; Blanke, 2015*). Na podovima gde čestice menjaju pravac kretanja vazduh nosi sitne čestice nagore prema otvoru za finu frakciju, dok krupne čestice idu ka dole i udarajući u naspramne zidove završavaju u gruboj frakciji. Može da se smatra da cik-cak klasifikator unutar komore ima više zona klasifikacije, što vodi ka višestepenoj klasifikaciji čija je karakteristika širok raspon mogućih tačaka razdvajanja, od nekoliko mikrometara do nekoliko milimetara (*Hagemeyer i sar., 2014*), te je tako tačka razdvajanja cik-cak gravitacionog klasifikatora u opsegu od 0,1 do 10 mm (*Shapiro i Galperin, 2005*). Pored toga što višestepeno razdvajanje čini postupak klasifikacije efikasnim, krupne čestice se ipak mešaju sa sitnim na svakom podu kaskade što, zavisno od osobina ulaznog materijala, može da umanjí efikasnost razdvajanja i kvalitet finalnih proizvoda (*Shapiro i Galperin, 2005*).

Dimenzije cik-cak komore imaju uticaj na performanse klasifikacije. Kapacitet cik-cak klasifikatora povećava se sa povećanjem površine poprečnog preseka, odnosno dužine i širine komore, ali prilikom povećanja mora se uzeti u obzir ravnomerna raspodela materijala i ravnomeran

protok vazduha (*Uhlemann i sar., 1990*). Kako bi površina poprečnog preseka komore bila optimalna, smatra se da odnos dužina/širina komore treba da bude manja ili jednaka 4 (*Blanke, 2015*). Kako se čestice kreću nasuprot vazduhu i na svakom delu (segmentu) komore se razdvajaju, efikasnost razdvajanja zavisi od broja segmenata komore (*Hagemeyer i sar., 2014*). Povećanjem broja podova, tj. segmenata koji prave cik-cak kanal, povećava se i visina komore, što iako povećava efikasnost razdvajanja, može da ima negativan uticaj na optimalne dimenzije klasifikatora (*Uhlemann i sar., 1990*). Ugao između dve koso postavljane sekcije koje formiraju cik-cak kanal takođe utiče na efikasnost razdvajanja. *Senden (1979)* je, istražujući različite uglove između sekcija (90° , 120° i 150°) cik-cak komore na efikasnost razdvajanja papira i polistirena kao test materijala, utvrdio da pri niskom kapacitetu ugao od 150° obezbeđuje izuzetno dugo vreme zadržavanja čestica u komori i da tako značajno povećava efikasnost klasifikacije. Rezultati kasnijeg istraživanja (*Blanke, 2015*) pokazali su da idealan ugao između sekcije cik-cak komore iznosi 120° .

Ulaz materijala u cik-cak komoru može da se nalazi na sredini komore ili na njenom donjem delu – opcija koja se koristi pri klasifikaciji zrnastih materijala koji imaju sposobnost da slobodno teku ili mogu da budu dispergovani u vazduhu (*Hosokawa Alpine, 2006*). Vreme zadržavanja materijala u cik-cak komori smanjuje se sa povećanjem protoka materijala u komoru. Povećani protok materijala umanjuje efikasnost razdvajanja usled povećanja sudara između čestica u klasifikacionoj komori (*Veslind i Henrikson, 1979*). Obično, dve trećine visine cik-cak klasifikatora sa jednim kanalom napunjeno je materijalom u toku rada, pri kapacitetima u opsegu od 5 do 15 t/h (*Fürchner i Zampini, 2012*). Ako kapacitet jednokanalnog klasifikatora nije dovoljan, više paralelnih cik-cak kanala mogu biti povezani u okviru jednog uređaja (*Uhlemann i sar., 1990; Shapiro i Galperin, 2005; Fürchner i Zampini, 2012, Blanke, 2015*).

Cik-cak gravitacioni vazdušni klasifikator poznat je još od 30-tih godina prošlog veka (*Stebbins, 1930*) gde je patentiran za potrebe klasifikacije materijala u rudarskoj industriji. Većina istraživanja o cik-cak gravitacionim klasifikatorima izvedena je na polju reciklaže čvrstog otpada, pri čemu su korišćene kombinacije materijala kao što su papiri i plasitika sa metalima (*Worrel i Veslind, 1979; Senden, 1985; Veslind i Henrikson, 1981; Rosenbrand, 1986; Biddulph i Connor, 1989*). Danas se cik-cak klasifikatori primenjuju prvenstveno u industriji reciklaže za razdvajanje usitnjenih PET boca od ostalih materijala iz čvrstog otpada (*Friedländer i sar, 2006*) i razdvajanje bakra i izolacionog materijala u industriji reciklaže elektronskog otpada, dok se u prehrambenoj industriji koriste za odvajanje žita od pleve, ljuske od zrna soje i suncokreta nakon ljuštenja, uklanjanje kamenja iz biljnih proizvoda i razdvajanje stabljika od lišća biljaka u industriji čaja i duvana (*Fürchner i Zampini, 2012; Hosokawa Alpine, 2006*). U operativnom smislu, prednosti gravitacionog cik-cak klasifikatora su precizna separacija, visok kvalitet fine frakcije, velika pouzdanost u radu, konstantnost kvaliteta proizvoda pri značajnim promenama u sastavu ulaznog materijala kao i pri preopterećenju, otpornost

na habanje i mala potreba za održavanjem što dovodi do toga da ovakav uređaj može da radi automatizovano dug period bez velike potrebe za nadzorom operatera (*Hosokawa Alpine, 2006*). Osnovni nedostatak gravitacionog cik-cak klasifikatora je visok aerodinamički otpor u cik-cak kanalu, koji je rezultat vrtloga koji se stvaraju u svakoj kaskadi i u svakom uglu klasifikacionog kanala, što dovodi do pada pritiska od oko 2,5 – 3,5 kPa i povećava potrošnju energije uređaja koji stvara strujanje vazduha (*Shapiro i Galperin, 2005; Hagemeyer i sar., 2014*). Segregacija i raslojavanje materijala u košu pre ulaska u komoru klasifikatora može da izazove promene osobina ulaznog materijala (nagla promena veličine, oblika i gustine čestica) što dovodi do privremenih promena u osobinama sloja materijala u struji vazduha i tako može da utiče na performanse klasifikatora (*Hagemeyer i sar., 2014*).

2.2.3. Primena vazdušne klasifikacije za povećanje sadržaja proteina biljnih sirovina

U kriterijum za procenu kvaliteta sirovina koje se koriste u ishrani životinja spadaju nutritivna vrednost, funkcionalne osobine, cena i održivost proizvodnje date sirovine. Visokoproteinski proizvodi imaju bitnu ulogu u industriji hrane za životinje, gde je sadržaj proteina jedan od osnovnih pokazatelja kvaliteta sirovine. Proteinske sirovine koje se koriste u prehrambenoj industriji mogu se klasifikovati po sadržaju proteina na (*Orepoulou i Tzia, 2007*):

- proteinska brašna i sačme (sadrže do 50% proteina),
- proteinske koncentrate (sadrže od 50 do 70% proteina) i
- proteinske izolate (sadrže od 70 do 95% proteina).

Za dobijanje proteinskih proizvoda iz sporednih proizvoda prehrambene industrije razlikuju se dve vrste tehnoloških procesa: suvi i mokri postupak. Izbor tipa postupka izolovanja zavisi od svrhe finalnog proizvoda, dostupnih sirovina, tehničke opreme i troškova proizvodnje. Mahunarke se nakon žitarica smatraju drugim najbitnijim izvorom hrane, što je u vezi sa visokim sadržajem proteina koje imaju. Komercijalne mahunarke i njihovi sporedni proizvodi prerade mogu da se koriste kao izvori proteina. Grašak spada u grupu mahunarki bogatim skrobom (*Pelgrom i sar., 2014*), ali poseduje i relativno visok sadržaj proteina koji je u rasponu od 20 do 28% (*Guegen i Barbot, 1988*). Mokrim postupkom iz graška mogu da se dobiju visokoproteinski proizvodi. U prvom koraku, pravi se suspenzija usitnjenog graška u vodi, pri čemu se skrob graška suspenduje a proteini rastvaraju. Hidrociklonima se potom razdvaja skrob od rastvora proteina, nakon čega se vrši precipitacija

rastvorenih proteina u njihovoj izoelektričnoj tački (pH = 4,8) i sledi neutralizacija i sušenje preoteinskog izolata koji kao finalni proizvod sadrži od 75 do 90% proteina (Boye i sar., 2010).

Suvi postupak predstavlja alternativu mokrom postupku frakcionisanja graška i drugih mahunarki za proizvodnju proteinskih koncentrata (Bergthaller i sar., 2001). Postupak suvog frakcionisanja graška ima prednosti nad mokrim postupkom, jer je suvi postupak jeftiniji i ne zahteva primenu nikakvih hemikalija niti potrošnju vode, te je i ekološki prihvatljiv (Schutyser i van der Goot, 2011). U prvom koraku suvog postupka frakcionisanja, usitnjavanju sirovine, proteini se razdvajaju od drugih ćelijskih konstituenata. Vazдушna klasifikacija je tehnika frakcionisanja koja omogućava da se iz sirovine ukloni određena nepoželjna komponenta i tako dobije frakcija date sirovine sa poboljšanim kvalitetom. Usitnjavanje praćeno vazдушnom klasifikacijom najčešće je korišćeni postupak za dobijanje visokoproteinskih i visokoskrobnih frakcija iz sirovina bogatih proteinom i skrobom (Letang i sar., 2002; Boye i sar., 2010). Kombinacija ova dva postupka uspešno je primenjena još 70-ih godina XX veka u proizvodnji proteinskih koncentrata stočnog graška, pasulja, boba i raznih drugih leguminoza (Vose, 1976; Sosulsky i Youngs, 1979). Finim mlevenjem graška, čestice proteina, veličine od 1 do 3 μm , odvajaju se od velikih granula skroba (20 – 40 μm), čime je omogućeno njihovo razdvajanje po veličini, obliku i gustini (Tyler i Panchuk, 1982; Boye i sar., 2010). Potpuno razdvajanje proteina od skroba je otežano, jer su pojedine čestice proteina i dalje čvrsto prilepljene uz skrobne granule nakon mlevenja. Dvostepeno mlevenje može da omogući potpuno odvajanje proteina od skroba, ali može dovesti do dodatnog usitnjavanja skrobnih granula što bi za rezultat imalo negativan uticaj na efikasnost klasifikacije pošto bi čestice proteina i skroba bile slične veličine (Pelgrom, 2013). Wu i Nichols (2005) su ispitivali uticaj intenziteta usitnjavanja celih i oljuštenih zrna graška na povećanje sadržaja proteina u frakcijama izdvojenim vazдушnom klasifikacijom usitnjenog materijala. Povećanje broja stepena usitnjavanja sa 3 na 9 rezultovalo je smanjenjem sadržaja proteina u frakcijama. Skrobna frakcija izdvojena vazдушnom klasifikacijom ima potencijal kao dodatak u prehrambenoj industriji ili kao sirovina za proizvodnju etanola fermentacijom (Nichols, 2005). Usitnjavanjem zrna graška, polaznog sadržaja proteina 22% (SM), primenom udarnog, klasifikacionog mlina i izdvajanjem fine frakcije vazдушnom klasifikacijom usitnjenog materijala primenom klasifikatora sa klasifikacionom tačkom, dobijen je proteinski koncentrat graška sa 55% (SM) proteina (Pelgrom, 2013). Sadržaj proteina frakcije graška dobijene primenom vazdušne klasifikacije niža je od sadržaja proteina proteinskog izolata (od 70 do 90% SM), koji se dobija mokrim postupkom, ali je značajno viši od sadržaja proteina frakcije dobijene primenom prosejavanja (Maaroufi i sar., 2000). Kako bi primenom vazdušne klasifikacije dobili frakcije sa još većim sadržajem proteina, Pelgrom i saradnici (2015) su, pre finog mlevenja, podvrgli grubo usitnjeno zrno graška raznim fizičkim tretmanima, a potom su primenili elektrostatičku separaciju za dodatno izdvajanje proteina iz frakcija dobijenih vazдушnom klasifikacijom. Ovi autori

koristili su postupke vlaženja i zamrzavanja zrna kako bi se njegova ćelijska struktura poremetila i tako se u većoj meri razdvojili proteini od skrobnih granula. Tretmani vlaženja i zamrzavanja doprineli su smanjenju gustine čestica graška što je imalo za posledicu lošiju klasifikaciju primenom klasifikatora sa klasifikacionim točkom, stoga i manji sadržaj proteina u finoj frakciji u poređenju sa odgovarajućom frakcijom dobijenom usitnjavanjem i vazdušnom klasifikacijom graška bez fizičkog predtretmana.

Vazдушna klasifikacija može da se uspešno koristi i za dobijanje proteinom bogatih frakcija lupina, koji je mahunarka sa visokim sadržajem ulja (*Pelgrom i sar., 2014*). Lupin je biljka koja može da se uzgaja i na zemljištu lošeg kvaliteta i u umerenim klimatskim uslovima (*Lqari i sar., 2002; Jayasena i sar., 2010*) i predstavlja dobar izvor biljnih proteina, koji se poslednjih godina nameće u prehrambenoj industriji kao alternativa kako proteinima animalnog porekla, tako i sojinim proteinima. Zrno lupina sadrži približno 38% (SM) proteina (*Le Gal i Rey, 1986*) i značajan sadržaj masti, oko 7% (SM). Proteinski koncentрати lupina mogu da se proizvode mokrim postupkom (*Dervas i sar., 1999*), ali suvi postupak, kombinacijom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije, predstavlja atraktivnu alternativu, jer ne zahteva sušenje, što znači i da iziskuje manji utrošak energije (*Schutyser i van der Goot, 2010*). U vazdušnoj klasifikaciji lupina za potrebe dobijanja visokoproteinskih frakcija, čestice proteina (5 – 25 μm) moraju da se odvoje od većih polisaharida i celuloznih delova, koji obično imaju široku raspodelu veličina česticu nakon usitnjavanja, što otežava postupak klasifikacije (*Pelgrom i sar., 2014*). Čestice lupina bogate proteinom, koje su proizvod usitnjavanja, sadrže oko 78% (SM) proteina (*Plant i Moore, 1983*), pa bi tako idealnim postupkom vazdušne klasifikacije bilo moguće dobiti proteinski koncentrat sa navedenim sadržajem proteina. *Pelgrom i saradnici (2014)* su kao i kod graška, primenom klasifikacionog mlina sa udaračima i vazdušnog klasifikatora sa klasifikacionim točkom, ostvarili najveći sadržaj proteina od 59% (SM) u finoj frakciji usitnjenog lupina. Značajan sadržaj masti koju lupin ima, negativno utiče na raspodelu usitnjenih čestica u struji vazduha pri vazdušnoj klasifikaciji, usled kohezije koja se javlja između čestica, te bi za postizanje boljih rezultata klasifikacije, lupin trebalo obezmasiti pre postupka suvog frakcionisanja (*Pelgrom i sar., 2015*). Obezmašćivanje lupina u istraživanju *Pelgrom-a i saradnika (2015)* uticalo je da se dobiju frakcije sa većim sadržajem proteina u poređenju sa sadržajem proteina frakcija lupina bez obezmašćivanja, ali je procenat povećanja sadržaja proteina bio manji, kao posledica većeg polaznog sadržaja proteina u odmašćenom uzorku nakon uklanjanja masti. Višestepenim usitnjavanjem i višestepenom elektrostatičkom separacijom dobijena je frakcija lupina sa čak 65% (SM) proteina (*Wang i sar., 2016*), ali ovakav postupak iziskuje veće investicione i operativne troškove u poređenju sa jednostepenom vazdušnom klasifikacijom.

Vazдушna klasifikacija korišćena je za povećanje sadržaja proteina sačmi uljarica (*Wu i Abbot, 2003; 2010; Challa i sar., 2010; Laudaio i sar., 2013*). Obezmašćena sačma salikornije, uljarice čije

seme sadrži do 33% ulja i 31% proteina (*Glenn i sar., 1991*), mlevena primenom mlina dezintegratora pri različitom intenzitetu usitnjavanja, klasifikovana je tehnikom vazdušne klasifikacije u cilju dobijanja frakcija bogatih proteinom (*Wu i Abbott, 2003*). Rezultat klasifikacije bile su fine frakcije sačme salikornije sa 2,9 do 11% većim sadržajem proteina od polazne sačme, dok je stepen povećanja sadržaja proteina i prinos frakcija bio u direktnoj vezi sa intenzitetom usitnjavanja. Usitnjavanje većeg intenziteta rezultovalo je većim prinosom fine frakcije sa manjim povećanjem sadržaja proteina. *Challa i saradnici (2010)* primenili su kombinaciju prosejavanja i vazdušne klasifikacije kako bi dobili nutritivno poboljšane sačme soje i semena pamuka izdvajanjem celuloznih sastojaka navednih sačmi. Sojina sačma i sačma semena pamuka su prosejane na slogu sita veličine otvora od 234 do 1885 μm , da bi potom frakcije prosejavanja klasifikovane primenom gravitacionog vazdušnog klasifikatora. Grube frakcije klasifikacije imale su povećan sadržaj proteina, gde je najveće postignuto relativno povećanje sadržaja proteina bilo 6,86% za sojinu sačmu i 9,76% za sačmu semena pamuka. Ranije opisanim postupkom mikronizacije i vazdušne klasifikacije, *Laudaio i saradnici (2013)* su frakcionisali suncokretovu sačmu na finu frakciju, obogaćenu proteinom i grubu frakciju sa visokim sadržajem sirove celuloze. Tačka razdvajanja pri klasifikaciji bila je 18 μm , a pri odgovarajućim uslovima dobijena je frakcija sa 40% proteina (SM). Dobijene grube frakcije suncokretove sačme imaju potencijal kao hranivo za preživare ali i koke nosilje u količini do 10% u gotovoj smeši (*Rezaei i Hafezian, 2007*).

U industriji hrane za životinje, DDGS (engl. *Distillers Dried Grains with Solubles*), sporedni proizvod proizvodnje etanola iz kukuruza, koristi se kao proteinsko hranivo. Visok sadržaj celuloze ograničava korišćenje ovog hraniva u visokom udelu u hrani za prasid i živinu, te se ono uglavnom koristi u ishrani preživara (*Noll i sar., 2001; Shurson, 2002*). Za potrebe uklanjanje celuloze i povećanje sadržaja proteina DDGS-a korišćen je specijalan postupak, koji predstavlja kombinaciju prosejavanja i vazdušne klasifikacije gravitacionim klasifikatorom – ELUSIEVE postupak (*Srinivasan i sar., 2008*). Dve tehnike frakcionisanja uspešno su kombinovane kako bi se poboljšao ujedno i prinos i sadržaj proteina u finalnom proizvodu. Istraživanje na opremi pilot kapaciteta za rezultat je imalo proizvod sa oko 5% većim sadržajem proteina od polaznog materijala. Isti postupak prosejavanja i vazdušne klasifikacije korišćen je za istraživanje mogućnosti razdvajanja spoljnjih slojeva kukuruza, bogatih celulozom, od ostatka kukuruznog zrna nakon mlevenja primenom mlina čekićara, u cilju dobijanja sirovine sa većim sadržajem skroba za proizvodnju etanola ili ishranu životinja (*Pandya i Srinivasan, 2012; Pandya i sar., 2013*). Uklonjena celulozna frakcija ima potencijal za korišćenje za ishranu preživara ili kao čvrsto gorivo (*Pandya i sar., 2012*).

2.2.4. Kompjuterska simulacija postupka vazdušne klasifikacije

Predviđanje putanje čestica u sistemima gde se čestice razdvajaju u struji vazduha veoma je kompleksno usled intenzivnih interakcija između čestica i fluida, međusobnih interakcija čestica i čestica i klasifikatora. Ipak, od skora se ove putanje čestica mogu predvideti primenom sofisticirane numeričke analize, tj. računске dinamike fluida (engl. *Computational Fluid Dynamics* – CFD). CFD simulacija doprinosi kvalitetnoj analizi i boljem razumevanju postupka vazdušne klasifikacije, i značajan je alat koji se često koristi ne samo u postupku optimizacije procesa vazdušne klasifikacije nego i za analizu i rešavanje problema koji uključuju protok fluida (*Elsayed i Lacor, 2010; Hagemeier i sar., 2014*). Primena CFD analize za simulaciju postupka vazdušne klasifikacije zasniva se na primeni određenog matematičkog modela za proračun strujanja fluida i praškastog materijala. Postoje dva principa za modelovanje strujanja čestica, Langrange-ov i Euler-ov model. Langrange-ov model zasniva se na analizi kretanja pojedinačnih čestica pod dejstvom svih sila, uključujući i međusobne sudare čestica kao i sudare između čestica i zida. Kod Euler-ovog modela analizira se deo prostora kroz koji fluid protiče pri čemu se definiše strujna linija fluida čije tangentne u svakoj tački predstavljaju vektore brzina fluida. Detaljan opis ova dva pristupa modelovanju strujanja čestica dat je u disertaciji *Jovanovića (2015)*. Reynolds-ovo osrednjavanje Navier-Stokes-ovog modela (RANS) i simulacija velikih vrtloga (engl. *Large Eddy Simulation*, LES) korišćeni su za predviđanje statičkog ili dinamičkog polja brzina u ciklon-klasifikatoru (*Wang i sar., 2006; Derksen i sar., 2006; Elsayed i Lacor, 2010; Safikhani, 2010; de Souza i sar., 2012; Oh i sar., 2015*). Reynolds-ov model napona (engl. *Reynolds Stress Model*) i model diskretnih faza (engl. *Discrete Phase Model*, DPM) korišćeni su za predviđanje polja brzina, kao i za procenu krive selektivnosti unutar klasifikatora visoke efikasnosti (*Guizani i sar., 2014*).

CFD simulacija može da se koristi za procenu uticaja različitih parametara vazdušne klasifikacije (*Wang i sar., 2001; Jiao i sar., 2005*) i ispitivanje geometrije klasifikatora u cilju pronalaženja optimalne konstrukcije uređaja (*Veerapen i sar., 2005; Gong i sar., 2012; Johansson i Evertsson, 2012; Johansson i Evertsson, 2014*). Stoga, razdvajanje različitih materijala može da bude simulirano, i tako teorijski testirano, pre istraživanja na realnom klasifikatoru (*Johansson i Evertsson, 2012; Hagemeier i sar., 2014; Johansson i Evertsson, 2014*). *Hagemeier i saradnici (2014)* koristili su CFD simulaciju spregnutu sa modelom diskretnih čestica (engl. *Discrete particle model*) za analizu razdvajanja čestica peska primenom gravitacionog, cik-cak klasifikatora. Numerički model upoređen je potom sa eksperimentalnim rezultatima, sa naglaskom na uticaj protoka vazduha u klasifikatoru na efikasnost razdvajanja. Osim pomenutog, u dostupnoj literaturi ne postoje istraživanja u kojima je primenjena CFD simulacija na cik-cak klasifikatoru.

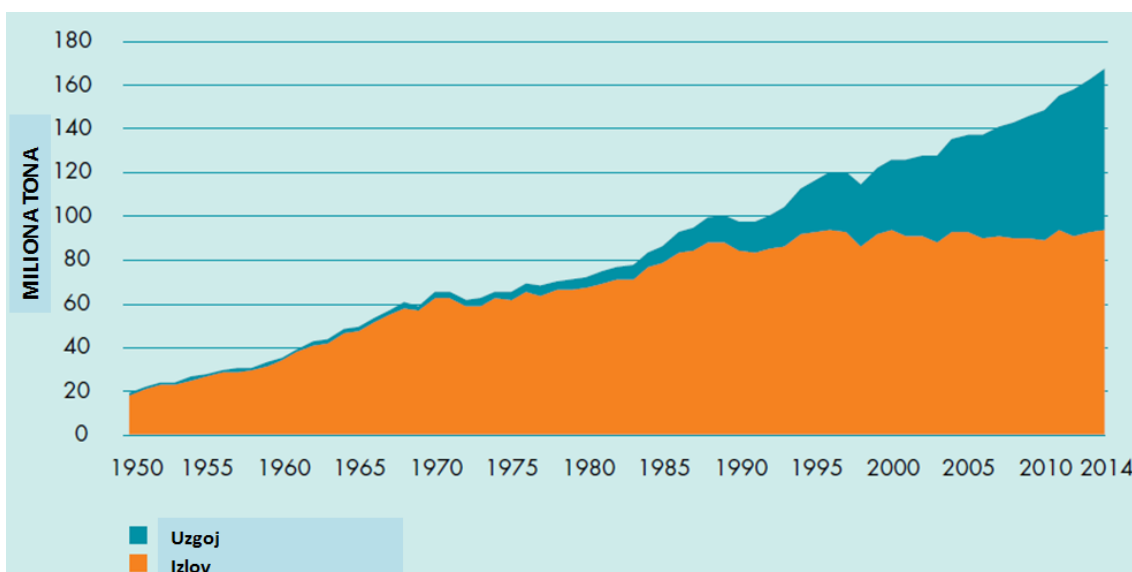
2.3. Industrijska proizvodnja hrane za ribe

Riblje meso je bogat izvor lako svarljivih, visokokvalitetnih proteina, esencijalnih aminokiselina i masnih kiselina, vitamina D, vitamina A i vitamina grupe B, kao i minerala. Kako je bogata i nezasićenim masnim kiselinama, naročito omega-3 kiselinama, ishrana ribom ima pozitivan uticaj na zdravlje ljudi, te je zbog visoke nutritivne vrednosti vrlo važno njeno učešće u izbalansiranoj ishrani. Zahtevi svetske populacije za ribom i ribljim proizvodima konstantno rastu decenijama (FAO, 2016). Procenjeno je da je u 2013. godini prosečna potrošnja ribljeg mesa bila 19,7 kg po glavi stanovnika, što je 17% svetske potrošnje životinjskih proteina, odnosno 6,6% ukupne potrošnje proteina. Procena je da je prosečna potrošnja već u 2014. godini dostigala 20 kg po glavi stanovnika i da će tendencija rasta unosa ribljeg mesa da se nastavi, naročito u zemljama u razvoju (FAO, 2016a). Vekovima je primarni način obezbeđivanja dovoljne količine ribe za ljudsku upotrebu bio izlov ribe, da bi se od 50-ih godina prošlog veka počelo sa intenzivnim razvijanjem akvakulture. Po definiciji, akvakultura predstavlja organizovano, gajenje riba, rakova, mekušaca, vodenih biljaka, algi i ostalih vodenih vrsta. Od sredine 80-ih godina XX veka, proizvodnja riba uzgojem ima značajan trend rasta, i akvakultura je od tih godina zaslužna za impresivan rast u svetskom snabdevanju ribe namenjene za ljudsku ishranu (FAO, 2016a). U organizovanom uzgoju riba bitno je obezbediti uslove koji mogu da omoguće njihov brz rast i razvoj, uz zaštitu od bolesti i predatora. Upravo je kvalitetna hrana za ribe, koja će svojim nutritivnim sastavom, oblikom i fizičkim karakteristikama odgovarati specifičnoj vrsti i uzrastu riba, jedan od glavnih faktora za ispunjavanje navedenih uslova.

2.3.1. Značaj akvakulture u svetu

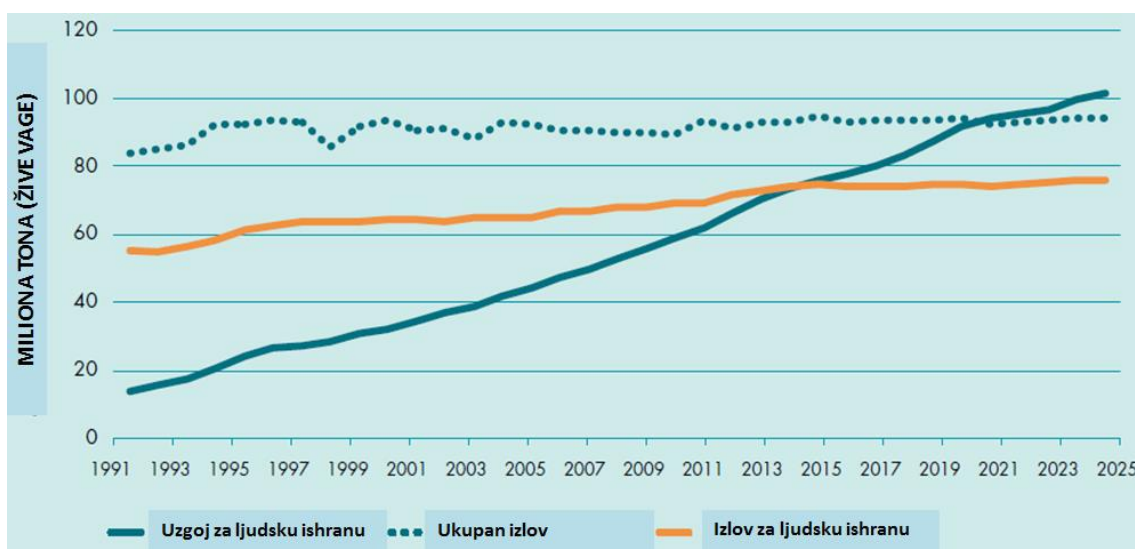
Industrija proizvodnje riba, rakova, mekušaca i drugih vodenih vrsta ima tendenciju rasta već više od 60 godina, a prema izveštaju FAO (2016) svetska proizvodnja vodenih kultura dostigla je 167,2 miliona tona u 2014. godini (Slika 2.8).

Od ukupne svetske proizvodnje, količina dobijena izlovom iznosila je 93,4 miliona tona, što je u poređenju sa 2013. godinom povećanje proizvodnje ulovom od svega 0,8%, dok je uzgojem proizvedeno 73,8 miliona tona. Sva količina dobijena uzgojem bila je namenjena ljudskoj ishrani. Najveći uzgoj odvija se u zemljama u razvoju, pri čemu je zemlja koja je ostvarila najveću proizvodnju bila Kina sa 45,5 miliona tona, što je činilo više od 60% ukupne proizvodnje akvakulturom (FAO, 2016a). Ostali veliki proizvođači su Indija, Vijetnam, Bangladeš i Egipat. U ribnjacima na kopnu uzgojeno je 43,6 miliona tona ribe, što čini 59% ukupne proizvodnje akvakulturom u 2014. godini (FAO, 2016).



Slika 2.8. Količina proizvedenih i izlovljenih vodenih vrsta u svetu (FAO, 2016a)

Akvakultura je imala prosečni godišnji rast od 10,8% u 80-tim godinama i 9,5% u 90-tim godinama prošlog veka. U periodu od 2005. do 2014. godine godišnji rast je usporen i prosečno je iznosio 5,8%. Ipak, važno je napomenuti da procenat uzgojene ribe u odnosu na ribu iz ulova godinama unazad raste, i u 2014. godini iznosio je 44%. Takođe, oko 21 miliona tona izlovljene ribe u 2014. godini nije se iskoristilo u ljudskoj ishrani, već je veliki deo ovog izlova služio kao sirovina za proizvodnju ribljeg brašna i ribljeg ulja. Stoga se može reći da je u 2014. godini svetska proizvodnja ribe iz uzgoja po prvi put prevazišla količinu ribe iz ulova namenjene za ljudsku ishranu (FAO, 2016a). U Aziji čak od 2008. količina uzgojenih riba premašuje onu iz ulova, pa su u 2014. godini 55% od ukupne proizvodnje vodenih vrsta činile one dobijene uzgojem. U Evropi i ostalim kontinentima (izuzev Okeanije) ovaj procenat je bio oko 18 (FAO, 2016). Procenjuje se da će udeo uzgojenih riba u ukupnoj svetskoj proizvodnji nastaviti da raste (Slika 2.9) i da će u 2021. godini da prevaziđe udeo izlovljene ribe, dok će do 2025. godine ovaj procenat iznositi čak 52% od ukupne svetske proizvodnje (FAO, 2016a).



Slika 2.9. Količina proizvedenih i izlovljenih vodenih vrsta u svetu namenjenih za ljudsku ishranu (FAO, 2016a)

Vrednost ukupne svetske proizvodnje vodenih vrsta uzgojem u 2014. godini procenjena je na čak 160,2 milijarde američkih dolara. Akvakultura je stoga izuzetno značajna grana industrije i procenjuje se da će ostati jedna od najbrže rastućih sektora uzgoja životinja čak i pored toga što se predviđa pad prosečnog godišnjeg rasta sa 5,8% na 3,0% tokom sledeće decenije (FAO, 2016a). Procenjuje se da će do pada rasta doći uglavnom zbog manje dostupnosti vode dobrog kvaliteta, manje dostupnosti ribljeg fonda i hraniva zadovoljavajućeg kvaliteta, te nedovoljnim ulaganjima u infrastrukturu u oblastima bogatim prirodnim resursima koji pogoduju uzgoju ribe, kao i različitim zakonodavnim okvirima (FAO, 2016a). Očekivanja su da će do 2025. godine proizvodnja riba uzgojem dostići nivo od 102 miliona tona (Slika 2.9). Zemlje u razvoju i dalje će imati glavnu ulogu u akvakulturi, i očekuje se da će se u njima odvijati 95% ukupne svetske proizvodnje. Akvakultura će se razvijati takođe i u razvijenim zemljama, sa prognozom rasta od 26% u narednoj deceniji. Slatkovodne vrste kao što su šaran, som i tilapija će i dalje da budu najviše uzgajane vrste (60% od ukupne proizvodnje), a takođe će rasti proizvodnja vrsta koje imaju veću komercijalnu vrednost, kao što su losos, pastrmka i škampi (FAO, 2016a).

Razvoj akvakulture i konstantan rast ove grane industrije praćen je isto tako povećanom potražnjom visokokvalitetne, svarljive hrane za ribe, kao i brzim rastom proizvodnje hrane za ribe (Gatlin i sar., 2007). Od sredine 90-tih godina prošlog veka pa sve do početka ove decenije prosečan godišnji rast proizvodnje hrane za ribe iznosio je 10,9% (FAO, 2011). Sa procenjenim daljim rastom akvakulture u svetu u narednim godinama, proizvodnja hrane za ribe će imati najveći rast u poređenju sa proizvodnjom hraniva za sve ostale kategorije životinja (FAO, 2016a). U intenzivnom

uzgoju riba najveći trošak proizvodnje predstavlja hrana, te je stoga njen kvalitet izuzetno važan (Sørensen, 2012).

2.3.2. Zahtevi kvaliteta hrane za ribe

Kvalitetna ishrana životinja u sistemima uzgoja je važna jer pozitivno utiče na proizvodne rezultate i zdravlje životinja. Pored ispunjavanja nutritivnih zahteva, hrana za ribe je specifična po tome što mora da ispuni i zahteve za fizičkim kvalitetom za svaku specifičnu vrstu i njihov prirodan način usvajanja hrane. Zbog toga proizvodnja hrane za akvatične vrste zahteva daleko više znanja i iskustva nego za proizvodnju hrane za živinu, prasad ili preživare.

Nutirtijenti hrane zaslužni su za stvaranje živog tkiva. Takođe, oni su izvor energije koja se koristi za varenje, rast, razvoj i razmnožavanje riba kao i za ostale životne procese. Pored zadovoljavajuće nutritivne vrednosti, hrana za ribe mora da obezbedi i dovoljnu količinu energije. Hrana za svaku specifičnu vrstu treba da bude optimalna i dobro izbalansirana – da obezbedi sve potrebne nutritivne sastojke (proteine, masti, ugljene hidrate, minerale i vitamine), a istovremeno da sadrži tačno potrebnu količinu energije. Višak energije može da dovede do smanjenog unosa hrane, dok manjak energije ima negativan uticaj na rast riba (Craig i Helfrich, 2002). Kvalitet sirovina koje ulaze u sastav gotove hrane za ribe ključan je za njen kvalitet. Za karakterizaciju kvaliteta sirovina koje se koriste u proizvodnji hrane za ribe ključno je da se odrede sledeći parametri kvaliteta (Glencross i sar., 2007):

1. Definisane da li je sirovina biljnog ili životinjskog porekla, određivanje osnovnog hemijskog sastava i sadržaja antinutrijenata;
2. Svarljivost sirovina, koja predstavlja meru odnosa nutrijenata i energije koju riba može da usvoji iz određene sirovine svojim digestivnim i apsorpcionim procesima;
3. Palatibilnost, koja se definiše kao kombinacija privlačnosti i konzumacije hrane;
4. Iskorišćenje nutritivnih sastojaka ili potencijalno ometanje u iskorišćenju sastojaka usled različitih faktora (ovo je najkomplikovaniji korak u karakterizaciji sirovine);
5. Funkcionalnost sirovine pri preradi i proizvodnji hrane pogodnim tehnološkim postupkom. Bez obzira na visoku hranljivu vrednost neke sirovine, ukoliko ta sirovina poseduje loše funkcionalne osobine koje utiču da proizvod ima nezadovoljavajući fizički kvalitet, ona nije pogodna u proizvodnji hrane za ribe.

Glencross i saradnici (2007) detaljno su prikazali metodologiju za karakterizaciju kvaliteta sirovina industrije hrane za ribe.

Pored navedenih kvaliteta izuzetno važan faktor pri izboru sirovina jeste i cena. Protein je najskuplji sastojak hrane za ribe i izuzetno je važno da se postigne tačno zahtevani sadržaj proteina u gotovoj hrani za svaku specifičnu vrstu i uzrast ribe. Pored sadržaja proteina, hrana za ribe mora da zadovolji i aminokiselinski sastav koji svaka vrsta zahteva. Od 20 aminokiselina koji sačinjavaju proteine, 10 ne mogu da budu sintetisane od strane riba, te ih ribe moraju uneti ishranom. To su: metionin, arginin, treonin, triptofan, histidin, izoleucin, lizin, leucin, valin i fenilalanin, od kojih su obično lizin i metionin prve limitirajuće aminokiseline (*Craig i Helfrich, 2002*). Riblje brašno tradicionalan je izvor proteina u ishrani različitih vodenih vrsta, i karakteriše ga visok sadržaj proteina (60 – 74%), dobar aminokiselinski sastav i visoka svarljivost. Usled velike potražnje za ribljim brašnom industrije hrane za ribe, njegova cena je sve veća. Takođe, problem predstavljaju i ograničene zalihe sirovina za proizvodnju ribljeg brašna, zbog čega se ono zamenjuje alternativnim proteinima biljnog porekla (*Draganović, 2011*). Hrana za ribe u čiji sastav ulaze visok sadržaj biljnih proteina (npr. sojina sačma), obično ima nizak sadržaj metionina, koji mora da se nadomesti dodatkom veštačkog oblika ove aminokiseline (*Craig i Helfrich, 2002*).

Zahtevi vodenih vrsta u sadržaju proteina zavise prvenstveno od vrste, uzrasta i načina uzgoja. Nivo proteina za škampe obično je u rasponu od 18 do 20%, za soma od 28 do 30%, od 32 do 38% za tilapiju, dok je za lososa i pastrmku potrebno preko 40% proteina u hrani (*Craig i Helfrich, 2002*). Zahtevani sadržaj proteina obično je niži za biljojede i svaštojede a viši za mesojede, poput lososa i pastrmke. Takođe, za ribe uzgajane u bazenima i recirkulacionim sistemima potrebna je hrana višeg sadržaja proteina dok je za vrste uzgajane u ribnjacima zahtevan niži sadržaj proteina, jer se ribe hrane dodatno materijama koje se prirodno nalaze u ribnjacima. Zahtevi za količinom proteina u ishrani obično su veći za riblju mlad, a smanjuju se kako ribe rastu (*Craig i Helfrich, 2002*). Visoku energiju u ishrani riba pružaju masti, koje pored energije obezbeđuju i unos esencijalnih masnih kiselina dodatkom ribljeg, ili ulja biljnog porekla. Za pojedine vrste riba, ugljeni hidrati nisu toliko neophodni u ishrani. Losos i pastrmka su mesojedi i imaju ograničene sposobnosti razgradnje i usvojivosti skroba (*Hemre i sar., 2002*), te svu energiju dobijaju od proteina i masti. Sirovine bogate skrobom se ipak uključuju u recepture, jer skrob tokom termičke obrade u procesu proizvodnje želatinizuje, ponaša se kao vezivno sredstvo i potpomaže ekspanziju proizvoda te je neophodan za stvaranje strukture granule (*Sørensen, 2010*).

Za razliku od kopnenih životinja, ribe imaju veoma kratak digestivni sistem i stoga hrana mora da bude lako svarljiva. Dobra svarljivost uz optimalno iskorišćenje sastojaka hrane omogućava i da izlučevine riba budu minimalne, čime se smanjuje i zagađenje vode u kojima se riba gaji (*Plattner, 2007*). Hrana za ribe se najčešće proizvodi u obliku granule. Oblik i veličina hrane, moraju da budu prilagođene veličini ribe. Veličina treba da bude takva da najmanja dimenzija bude 20 – 30% od dimenzije otvora usta ribe. Kada je hrana pravih dimenzija, ribe su u stanju da je aktivno unose.

Dimenzija manja od optimalne dovodi do toga da ribe troše više energije da uzmu veći broj granula hrane, zbog čega se smanjuje prinos. S druge strane, dimenzije hrane veće od optimalne dovode do toga da riba ne uzima hranu, što za direktnu posledicu ima nezadovoljavajuće proizvodne rezultate (*Craig i Helfrich, 2002*). Uz veličinu, i tekstura mora da bude takva da omogućava dovoljan unos hrane i efikasno varenje (*Lovell, 1989; Baeverfjord i sar., 2006; Aas i sar., 2011a*). Tvrde i izdržljive granule su poželjne jer hrana za ribe mora da bude otporna na mehaničke udare do kojih dolazi tokom transporta, rukovanja kao i u pneumatskim hranilicama (*Aarseth, 2004; Aarseth i sar., 2006*), ali suviše tvrde granule mogu da izazovu digestivne probleme kod riba (*Pillay i Kutty, 2005*).

Važna osobina hrane za vodene vrste jeste njena sposobnost da tone odnosno pluta, u zavisnosti od prirodnog načina unosa hrane specifične vrste. Vrste kao što su som i tilapija hrane se na površini vode i zahtevaju hranu koja pluta. Predatorske vrste koje hvataju hranu u vodi, poput lososa i pastrmke, zahtevaju hranu koja sporo tone. Škampi, rakovi i bakalar su vrste koje se hrane na dnu i zahtevaju hranu koja brzo tone (*Wood, 1980*). Šaran je vrsta koja koristi hranu sa površine vode, ali i iz vodenog stuba, kao i sa dna. Razlike u brzinama tonjenja hrane za ribe posledica su različitih gustina granula, koje se postižu različitim stepenom ekspanovanja granule u procesu proizvodnje. Danas se proizvodnja komercijalne hrane za ribe u najvećoj meri obavlja tehnološkim postupkom ekstrudiranja, dok se samo za pojedine kategorije koristi postupak peletiranja. Primenom ekstrudiranja dobijaju se visokoenergetski proizvodi odličnih fizičkih karakteristika i nutritivne vrednosti. Dobra formulacija hrane, kvalitetne sirovine i postupak ekstrudiranja omogućavaju da se lako ispune svi zahtevi kvaliteta koje hrane za ribe mora da ispuni.

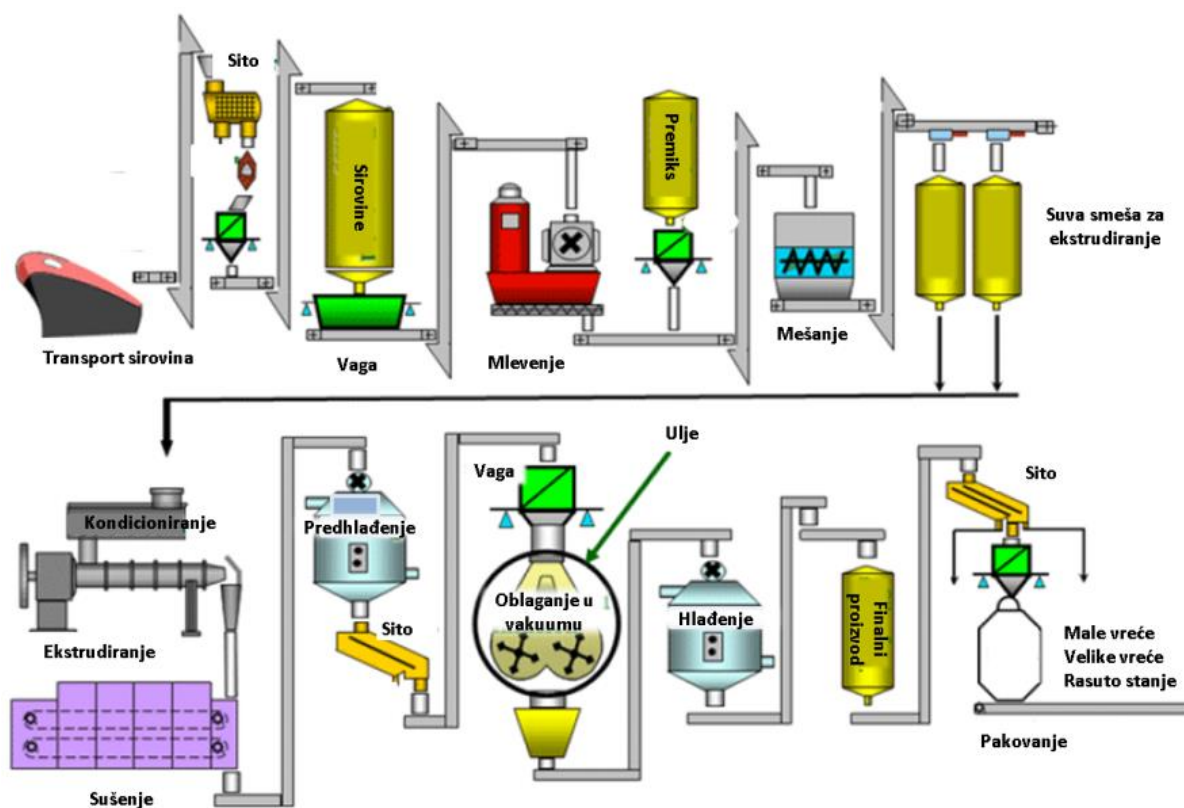
2.3.3. Proizvodnja hrane za ribe postupkom ekstrudiranja

Ekstrudiranje je termička operacija oblikovanja plastičnih ili testastih materijala pomoću puža koji potiskuje masu kroz otvor ili matricu (*Riaz, 2000*). U postupku ekstrudiranja materijal se prisiljava da teče kroz cev ekstrudera, uz istovremeno mešanje, zagrevanje i smicanje, a zatim se potiskuje kroz otvor matrice čiji je zadatak obavljanje oblikovanja i sušenja sastojaka. U cevi ekstrudera materijal je izložen termičkim i mehaničkim procesima, plasificiranju i oblikovanju materijala usled fizičko-hemijskih promena, te se od početnog praškastog materijala dobija finalni proizvod u vidu granule (*Kearns, 1993*).

Ekstrudiranje je postupak koji je široko primenjiv i lako prilagodljiv različitim zahtevima za kvalitetom krajnjeg proizvoda. Minimalne promene u sastavu ulaznog materijala i uslovima rada uređaja, značajno utiču na rezultujuće karakteristike proizvoda, pri čemu veoma jednostavno mogu da se dobiju različiti oblici i forme. Ekstruderi rade pri relativno niskom sadržaju vlage, čime se štedi

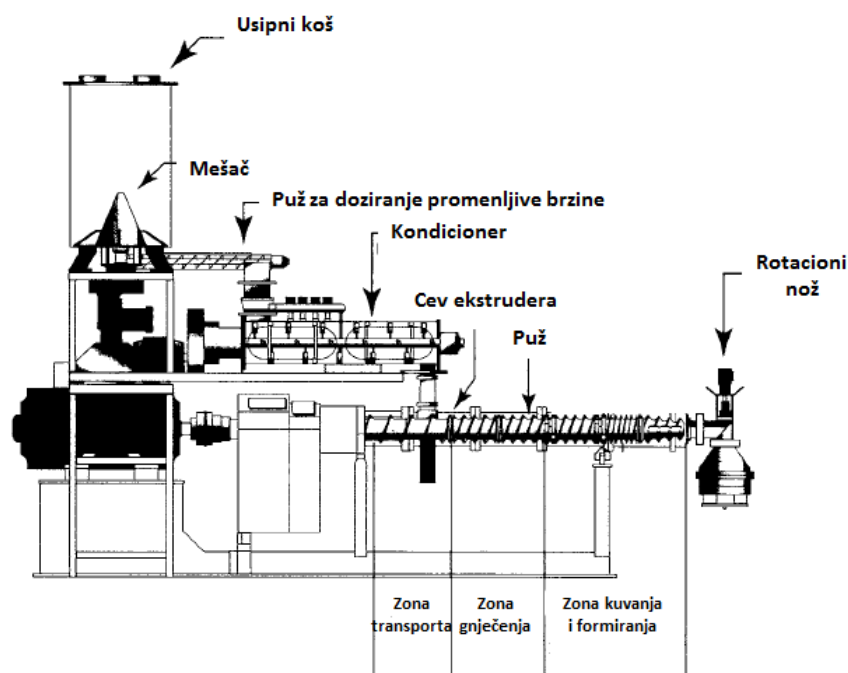
energija potrebna za sušenje proizvoda. Ekstrudiranje omogućava kontinualnu proizvodnju uz visoku produktivnost i potpunu automatizaciju procesa. Prostor potreban za obavljanje svih operacija je znatno manji, nego kod tradicionalnih sistema za termičku obradu, a manji su i troškovi eksploatacije uređaja. Sporedni proizvodi i gubici tokom procesa ekstrudiranja su gotovo zanemarljivi, što je naročito bitno, posmatrano sa strane zaštite životne sredine i rešavanja problema otpadnih materija. Rezultati koji se dobijaju u laboratorijskim uslovima i pilot postrojenjima su reproduktibilni što stvara uslove za prenos stečenih znanja u industrijske uslove proizvodnje, čime je proces pokretanja proizvodnje ekstruderom u fabrikama pojednostavljen (Riaz, 2000).

Tokom ekstrudiranja se zajedničkim dejstvom toplote i sila smicanja denaturišu proteini i razgrađuju ostale komponente prehrambenog matriksa čime se poboljšava svarljivost nutrijenata (Altan i sar., 2008; Rocha-Guzman i sar., 2008; Ruiz-Ruiz i sar., 2008; Yağci i Göğüş, 2008). Osnovne hemijske promene koje se javljaju tokom ekstrudiranja su: cepanje molekula, rekombinacija molekulskih fragmenata i termička degradacija, dok su fizičko-hemijske promene: sjedinjavanje manjih molekula, gubitak prirodne strukture i promena teksture proizvoda. Sastav ekstrudirane hrane menja se i usled materijalnih gubitaka, kao što su isticanje ulja ili isparavanje vode i drugih isparljivih komponenti, pri izlasku iz matrice (Riaz, 2007). Dijagram proizvodnje ekstrudirane hrane za ribe prikazan je na slici 2.10.



Slika 2.10. Dijagram proizvodnje ekstrudirane hrane za ribe (Oehme, 2013)

Proizvodnja hrane za ribe postupkom ekstrudiranja započinje mlevenjem sirovina i njihovim mešanjem na osnovu recepture za svaku specifičnu vrstu. Mlevenjem se smanjuje veličina čestica čime se povećava specifična površina materijala, poboljšava se mešljivost sirovina, onemogućava se blokiranje otvora matrice pri ekstrudiranju i dobija se finalni proizvod dobre teksture i fizičkih karakteristika. Tačno odmeravanje svake sirovine koja ulazi u formulisanu smešu je neophodno kako bi se ispunili zahtevi za optimalnim nutritivnim sastojcima. Vreme mešanja mora da bude optimalno kako bi sve komponente smeše bile homogeno umešane. Pripremljena suva smeša dalje se ekstrudira u cilju dobijanja proizvoda finalnih karakteristika koje odgovaraju ishrani riba. Sistem ekstrudiranja sastoji se iz dozirnog sistema, kondicionera, cevi ekstrudera, pužnice, matrice i noža (Slika 2.11).



Slika 2.11. Osnovni delovi ekstrudera i osnovne zone u cevi ekstrudera (Huber, 2000)

Suva smeša transportuje se u usipni koš, koji se nalazi iznad ekstrudera i čije su dimenzije takve da može da prihvati dovoljnu količinu materijala, odnosno da obezbedi kontinualan dotok materijala u ekstruder, što je preduslov za stalan i ujednačen rad ekstrudera. Suva smeša se transportuje u kondicioner, za šta se obično koristi volumetrijski dozirni sistem, gde se preko broja obrtaja dozirnog puža, tj. zapremine materijala određuje ukupna količina materijala koji se dozira u ekstruder, ili gravimetrijski dozirni sistem, kod kojeg se merenjem gubitka mase materijala u košu određuje količina doziranog materijala (ovi dozirni sistemi su najčešće skuplji od volumetrijskih). Za doziranje tečnih materijala u mešalicu, kondicioner ili ekstruder uobičajeno se koriste pumpe (Rokey, 2000).

Kondicioner je cilindrični uređaj u čijoj unutrašnjosti se nalazi centralno postavljena osovinu na koju su montirane lopatice. U kondicioneru se suva smeša meša sa vodom i suvozasiceenom vodenom parom. Smeša se istovremeno vlaži do željenog sadržaja vlage, greje i meša dok svaka čestica ne dostigne ravnotežnu temperaturu i vlažnost (Huber, 2000). Temperatura na koju se smeša u kondicioneru zagreva obično je od 80 do 90°C, dok je krajnji sadržaj vlage materijala u opsegu od 20 do 28% (Čolović i sar., 2010). Dobro mešanje unutar kondicionera je neophodno kako bi se površina čestica sirovina ravnomerno dovela u kontakt sa vodom ili parom. Vreme između ulaska materijala u ekstruder i izlaska naziva se vreme zadržavanja, a podešava se promenom broja obrtaja osovine, podešavanjem nagiba lopatica, ili njihovom kombinacijom. Duže vreme zadržavanja u kondicioneru omogućuje da se procesi prenosa mase i toplote bolje odvijaju tako da će voda i energija sa površine dospeti dublje u unutrašnjost čestice materijala (Strahm, 2000). Potpuna hidratacija i zagrevanje čestica dovodi do odsustva nepoželjnog suvog i hladnog jezgra u svakoj od njih, što bitno utiče da preželatizacija skroba i denaturisanje proteina smeše bude potpuno (Vukmirović i sar., 2010). Ove promene na skrobu i proteinima daju finalni proizvod boljeg fizičkog kvaliteta i veće svarljivosti. Kondicioniranje takođe povećava kapacitet ekstrudera, smanjuje potrošnju energije potrebnu za proizvodnju i smanjuje habanje elemenata cevi ekstrudera (Sørensen, 2012). U kondicioner se po potrebi dodaju i ostali tečni sastojci, najčešće riblje ili biljna ulja, i to obično pri izlazu materijala iz kondicionera. Prvi ekstruderi iz 50-ih godina prošlog veka imali su kondicionere sa jednom osovinom, u kojima je vreme zadržavanja materijala bilo 30 s ili manje te su, po današnjim standardima, bili neefikasni. Konstrukcija kondicionera danas omogućuje duže vreme zadržavanja (2 – 4 min) za efikasnu razmenu toplote i mase, kao i dobro mešanje praškastog materijala, pare i tečnosti (Strahm, 2000).

Kondicionirana smeša se potom ravnomerno uvodi u cev ekstrudera, gde se odvijaju glavne fizičko-hemijske promene na sastojcima smeše, u uslovima povišene vlage, temperature i pritiska usled dejstva sila smicanja. Temperature ekstrudiranja hrane za ribe dostižu do 130°C, dok pritisci dostižu vrednosti od 20 do 30 bar, u zavisnosti od karakteristika finalnog proizvoda koje se žele postići (Sørensen, 2010). Visok sadržaj vlage (25 – 30%) i kratko vreme zadržavanja materijala u cevi ekstrudera (oko 30 s) osigurava da proces ekstrudiranja ne utiče štetno na nutritivne sastojke hrane (Sørensen i sar., 2002; Løkjel i sar., 2004; Sørensen i sar., 2005). Cev ekstrudera je njegov najvažniji deo, unutar koje je smešten rotirajući puž koji potiskuje materijal ka izlazu dok ga ujedno zagreva usled međusobnog trenja koje rezultuje oslobađanjem toplote (Rokey, 2000). Pužnica se obično sastoji iz segmenata sa elementima različite konstrukcije, koraka i visine navoja, kao i specijalnih elemenata za gnječenje i mešanje (Sørensen, 2012). Različitim kombinacijama elemenata, mogu da se naprave različite konfiguracije pužnice. Konfiguracija pužnice ima uticaj na kuvanje materijala i njegovu transformaciju u cevi ekstrudera, jer promena konfiguracije dovodi do promene u nivou

smicanja, unosu mehaničke energije i vremenu zadržavanja materija u cevi, što je pregledno prikazano u dostupnoj literaturi (Sørensen, 2012). Spirala puža može da ima konstantan prečnik osovine pužnice, kao i korak navoja, a takođe je moguće da se prečnik osovine povećava, a korak i visina navoja smanjuju, čime se postiže da cev ekstrudera bude potpuno ispunjena (Huber, 2000). Obično se u toku rada ekstrudera, postavkom segmenata pužnice u okviru konfiguracije, razlikuje nekoliko zona: 1. zona doziranja materijal u cev ekstrudera, u kojoj se uvode kondicionirana smeša i voda po potrebi; 2. zona gnječenja, u kojoj se materijal polako nagomilava, pritisak unutar cevi se povećava sve usled sila smicanja koje ovde imaju dominantnu ulogu; 3. zona kuvanja, gde se postižu najveće temperature i pritisci i gde se odvijaju fizičko-hemijske promene koje utiču na stvaranje teksture i osobina finalnog proizvoda; 4. zona formiranja, koja se nalazi obično na samom kraju cevi ekstrudera i u kojoj se konfiguracijom puža formira gusta masa koja nakon prolaska kroz matricu dobija oblik granule (Huber, 2000). Cev ekstrudera je često podeljena na segmente. Zavisno od konstrukcije, pojedinim segmentima se preko plašta, odnosno preko fluida za zagrevanje i hlađenje, mogu kontrolisati temperature određenih sekcija, dok u neke sekcije mogu da se uvode voda, ulje ili vodena para (Sørensen i sar., 2010; Čolović i sar., 2011).

Dva vida energije prenose se u materijal tokom ekstrudiranja – termalna energija, koja se uvodi dodatkom vodene pare tokom kondicioniranja, i mehanička energija koja se stvara usled trenja između puža i testastog materijala dok se potiskuje ka izlazu iz cevi ekstrudera (Sørensen, 2012). Prenos energije u materijal tokom ekstrudiranja direktno je povezan sa fizičkim promenama čvrstih čestica materijala u testastu materiju. Stvorena mehanička energija naziva se specifična mehanička energija (SME). Unosom mehaničke energije povećava se temperatura u cevi ekstrudera. Za dostizanje željene temperature unutar ekstrudera, termička energija predstavlja 2/3, dok je mehanička 1/3 ukupno prenete energije (Sørensen, 2012). Povišena temperatura tokom ekstrudiranja pretvara materijal u testastu materiju, smanjuje viskozitet i povećava pritisak pare, što direktno utiče na ekspanziju proizvoda po izlasku iz cevi. Visok pritisak koji vlada u cevi onemogućava isparavanje vode iz vlažnog materijala. Potiskivanjem kroz specifični otvor matrice i izlaskom iz polja visokog pritiska, voda iz mase naglo isparava, usled čega dolazi do širenja tretiranog materijala u manjoj ili većoj meri. U nastavku procesa, on se dalje hladi, očvršćava i skuplja (Riaz, 2007).

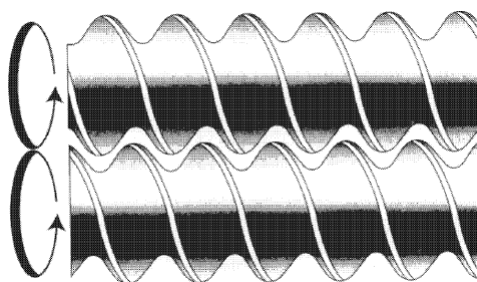
Ekstruderi se u osnovi dele u dve velike grupe, na ekstrudere sa jednim pužem – jednopužne i ekstrudere sa dva puža – dvopužne ekstrudere. Jednopužni ekstruderi su dostupni u velikom broju veličina i oblika, kao i sa različitim konfiguracijama cevi, segmenta puža i oblicima otvora matrice (Harper, 1978). Poslednjih godina sve su veći zahtevi za novim proizvodima unapređenog kvaliteta, koji ne može da se postigne korišćenjem jednopužnih ekstrudera. Dvopužni ekstruderi se koriste za dobijanje proizvoda sa specifičnim zahtevima za kvalitetom zbog sledećih prednosti u odnosu na jednopužne ekstrudere (Riaz, 2000):

- U njima je moguć rad sa viskozim, uljastim, lepljivim ili vrlo vlažnim materijalima i sa nekim drugim proizvodima, koji proklizavaju u ekstruderu sa jednim pužem (u dvopužnom ekstruderu moguće je da se doda i do 25% masti);
- Omogućavaju dobar transport materijala ka izlazu i smanjuju pulsiranja na matrici;
- Ostvaruje se manje habanje manjih delova nego kod ekstrudera sa jednim pužem;
- Mogu da prerađuju čestice čije su veličine u širokom rasponu, od finih do krupnih, za razliku od ekstrudera sa jednim pužem koji su ograničeni na jedan uski opseg veličine čestica;
- Imaju sposobnost samočišćenja zbog čega im je čišćenje unatrosnjosti cevi ekstrudera i pužnica vrlo jednostavno;
- Omogućavaju lakši prelaz sa poluindustrijskih uređaja na industrijske proizvodne uređaje;
- Postupak rada s njima je jednostavniji manje iskusnim radnicima.

Moguća su četiri tipa dvopužnih ekstrudera (*Miller, 1990*):

1. sa puževima koji se ne uklapaju, uz rotiranje u istom smeru,
2. sa puževima koji se ne uklapaju, uz rotiranje u suprotnim smerovima,
3. sa puževima koji se uklapaju, uz rotiranje u istom smeru i
4. sa puževima koji se uklapaju, uz rotiranje u suprotnim smerovima.

Verzije ekstrudera sa puževima koji se uklapaju uz rotiranje u istom smeru sa sposobnošću samočišćenja vrlo su popularne (Slika 2.12). Ekstruderi ove konstrukcije imaju za 50 do 150% višu cenu od jednopužnog ekstrudera istog kapaciteta, prvenstveno zbog kompleksnosti izrade, većeg stepena automatizacije i neophodne obloge koja služi za protok fluida za zagrevanje ekstrudiranog materijala (*Riaz, 2000*).

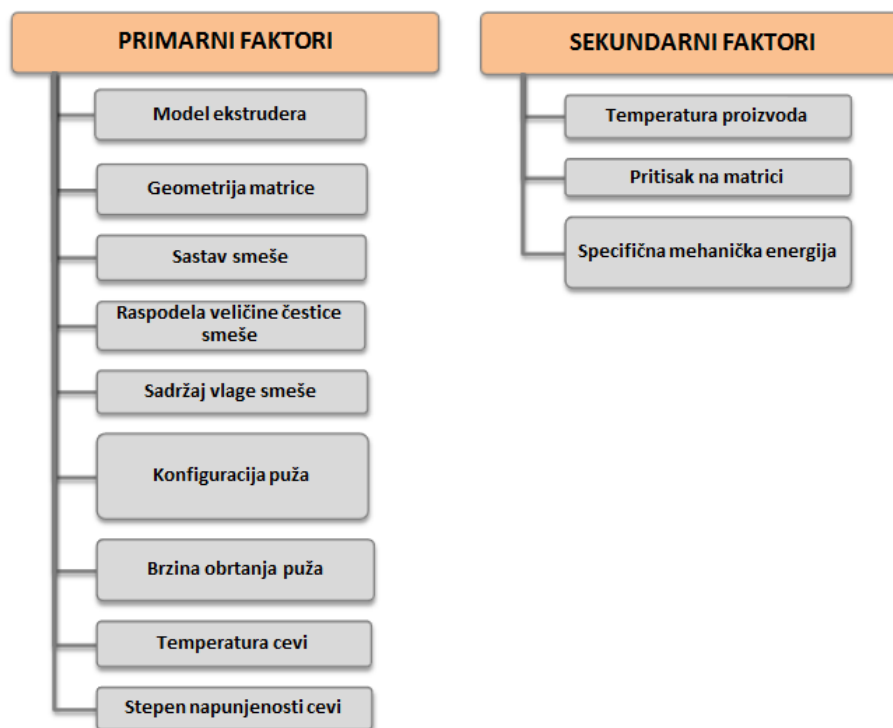


Slika 2.12. Pužnice koje se međusobno uklapaju i obrću u istom smeru (*Huber, 2000*)

Cev ekstrudera završava se matricom sa jednim otvorom ili više otvora kroz koje prolazi ekstrudirani materijal. Ovi otvori oblikuju finalni proizvod i stvaraju otpor koji mora da savlada puž ekstrudera prilikom istiskivanja materijala. Matrica sa otvorima treba da bude tako konstruisana da povećava popunjavanje cevi ekstrudera materijalom koji se ekstrudira, produžava vreme zadržavanja materijala i povećava prenos energije na ekstrudirani materijal u cevi. Nivo smicanja kod matrice

može da se značajno izmeni promenom broja otvora na njoj (Huber, 2000). Željena dužina proizvoda podešava se promenom brzine obrtanja noža (Williams, 2000), koji se nalazi odmah nakon matrice (Huber, 2000), i odseca proizvod na željenu dužinu.

Pri vođenju procesa ekstrudiranja hrane za ribe moraju se uzeti u obzir prirodne varijacije materijala u sadržaju vlage, skroba i proteina, kao i promene parametara ekstrudiranja, od kojih zavisi kvalitet finalnih proizvoda. Faktori ekstrudiranja dele se na primarne i sekundarne (slika 2.13).



Slika 2.13. Faktori procesa ekstrudiranja

Primarni faktori su svi oni parametri koji mogu da se direktno menjaju (upravljivi faktori) kako bi se dobili proizvodi željenog kvaliteta. Sekundarni faktori direktna su posledica kombinacija uticaja primarnih faktora te se na njih posredno može uticati samo promenom primarnih faktora. Kod ekstrudiranja hrane za ribe neophodno je postizanje temperature iznad 100°C kako bi došlo do gubitka vode iz materijala nakon izlaska kroz otvor matrice (tzv. *Flash off* efekat) i kako bi došlo do ekspanzije proizvoda. Zbog toga je neophodan unos mehaničke energije u materijal. SME je direktno zavisna od procesnih parametara tokom ekstrudiranja (Sørensen, 2012). Za kontrolisanje SME i ekspanzije proizvoda broj obrtaja puža može da se menja (Sørensen i sar., 2011a; Kraugerud i sar., 2011; Kraugerud i Svihus, 2011) kao i njegova konfiguracija (Gogoi i sar., 1996; Sørensen i sar., 2010) u cilju dobijanja optimalnog fizičkog kvaliteta hrane za ribe. Promenom matrice i veličine otvora, može da se utiče na pritisak na matrici čime takođe može da se kontroliše ekspanzija proizvoda (Čolović i sar., 2011; Banjac i sar., 2016). Kontrolom ekspanzije proizvoda dobija se željena gustina

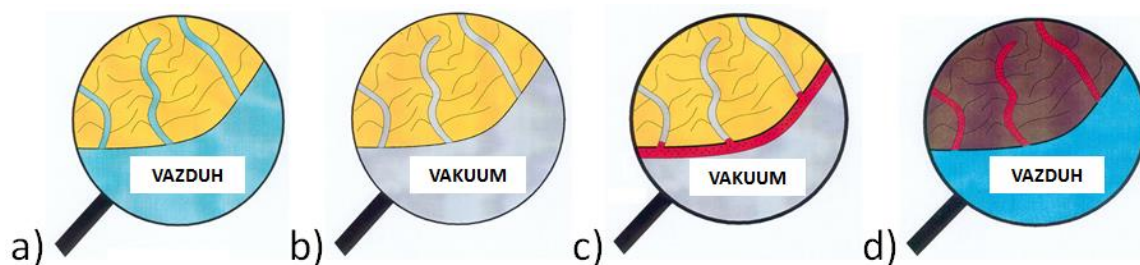
proizvoda što je od velike važnosti za sposobnost upijanja ulja granula kao i mogućnosti plutanja odnosno tonjenja. Stoga se kontrolisanje fizičkih karakteristika hrane za ribe obavlja promenom upravljivih faktora, koji utiču na promene sekundarnih, odnosno izlaznih faktora postupka ekstrudiranja.

Nakon ekstrudiranja, proizvod se suši do sadržaja vlage ispod 10% (Sørensen, 2012). Za vrste riba koje u ishrani zahtevaju visok sadržaj ulja, tople granule se oblažu uljem u specijalnim uređajima pod vakuumom. Nakon sušenja, ekstrudirana hrana se hladi i pakuje. Često se za potrebe velikih sistema za uzgoj riba, gotove granule čuvaju u silosima ili se transportuju vodenim putem u brodskim kontejnerima (Aas i sar., 2011b).

2.3.4. Naknadno oblaganje granula uljem u vakuumu

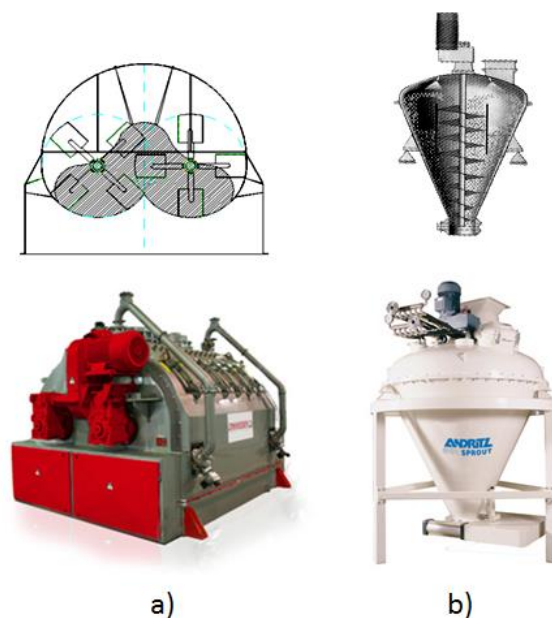
Za vrste i kategorije riba koje zahtevaju visok sadržaj masti u hrani, naknadna količina masti se dodaje u postupku oblaganja ekstrudiranih granula pod vakuumom (engl. *Vacuum coating*). Mast ima lubrikativno dejstvo tokom ekstrudiranja, smanjujući trenje u cevi ekstrudera, a time i SME i obrtni momenat. Količina masti veća od 7% u cevi ekstrudera ograničava ekspanziju usled smanjenja pritiska na matrici i smanjuje kvalitet ekstrudata (Guy, 2001; Cavalcanti i Behnke, 2005ab; Rokey, 2007; Čolović i sar., 2010; Morken i sar., 2012). Kao izvor masti u hrani za ribe koriste se riblje ulje, različita biljna ulja, živinska mast ili kombinacija navedenih. Ukoliko se velike količine ulja dodaju u mešalicu, ne postiže se ravnomerno vlaženje materijala tokom kondicioniranja što utiče nepovoljno na rastvorljivost proteina i želatinizaciju skroba, a što dalje ima negativan uticaj na dostupnost nutrijenata i fizičke osobine ekstrudata (Tester i Morrison, 1990, Thomas i sar., 1998; Zimonja i sar., 2007; Lamichane i sar., 2015).

Dobro ekspanđovana granula ima poroznu strukturu, sa mnoštvom kanala u unutrašnjosti ispunjenih vazduhom. Zamena vazduha iz pora tečnošću je princip na kome se zasniva postupak oblaganja granula pod vakuumom (Lamichane i sar., 2015). U postupku oblaganja granula uljem, granule se nakon ekstrudiranja suše do sadržaja vlage od približno 8% i održavaju se toplim, na temperaturi od oko 70°C (Perez, 2001). Topao ekstrudat se zatim stavlja u uređaj za oblaganje (engl. *Vacuum coater*), gde se uklanja vazduh iz komore uređaja i stvara se vakuum (Slika 2.14 a i b). Pri izvlačenju vazduha iz komore uređaja, istovremeno se izvlači i vazduh iz pora granula. Nakon toga, ulje se naprskava na granule u vakuumu putem dizni, uz neprekidno mešanje. Nakon dodavanja ulja na površinu granula (Slika 2.14c), pritisak u komori se izjednačava sa atmosferskim. Pod dejstvom razike pritiska, ulje sa površine granula popunjava pore i ostaje zarobljeno u unutrašnjosti granula (Slika 2.14d). Ovakav proizvod se hladi i zatim pakuje.



Slika 2.14. Princip postupka oblaganja granule pod vakuumom (Dinnissen, 2001)

Principom oblaganja granula u vakuumu, omogućen je dodatak velike količine masti u finalni proizvod bez negativnog uticaja na njegove fizičke osobine (Borquez i Perez, 2007). Pri tome, ukoliko se izmešaju sa uljem pre dodavanja, sastojci osetljivi na toplotu (vitamini i enzimi) koji bi se inače u procesu ekstrudiranja uništili, mogu da se zaštite (Li i sar., 2003). Pravilno vođen postupak ekstrudiranja može da obezbedi dovoljnu poroznu granulu u koju, postupkom oblaganja u vakuumu, može da se doda od 34 do 40% masti za potrebe hrane za lososa (Bell i Koppe, 2010). Uređaji za oblaganje granula u vakuumu su šaržnog tipa, sa različitim konstrukcijama i načinima mešanja granula tokom dodavanja ulja. Najčešće su napravljeni u vidu jednoosovinskih ili dvoosovinskih, lopatastih mešalica ili kao vertikalne posude sa centralno postavljenim pužom za mešanje (Slika 2.15). Detalji rada uređaja za naknadno oblaganje ekstrudata dostupni su u literaturi Lević i Sredanović (2012).



Slika 2.15. Uređaji za oblaganje granula uljem pod vakuumom: dvoosovinska lopatasta mešalica (a) i vertikalni uređaj (b) (Lević i Sredanović, 2012)

2.3.5. Fizički kvalitet hrane za ribe

Granule su već nakon izlaska iz ekstrudera izložene fizičkim naprezanjima tokom transportovanja, sušenja, oblaganja uljem i hlađenja. Gotov proizvod podložan je abraziji usled dejstva sila udara, smicanja i kompresije koje deluju na granule tokom transporta, manipulacije i skadištenja (*Winowski, 1995*). Posledica delovanja ovih sila jeste njihov lom i abrazija, tj. otiranje. Fizički kvalitet definiše se kao sposobnost granula da tokom fizičke manipulacije zadrže svoj integritet i budu otporne na udar i abraziju, čime bi se izbegao lom granula i nastajanje prašine. Ribe se najčešće hrane primenom pneumatskih sistema u kojima se granule kreću nošene strujom vazduha velike brzine kroz cevi sistema (*Aas i sar., 2011a*). Granule tokom transporta do ribe udaraju o unutrašnjost cevi pneumatskog sistema usled čega granule pucaju i nastaju sitni fragmenti. Ovi fragmenti najčešće ne završavaju u ishrani riba što direktno vodi do nepoželjnih gubitaka u hrani i manjem prirastu. Čestice hrane koje zaostaju u cevima pneumatskog sistema takođe mogu da budu osnova za mikrobiološki rast (*Aas i sar., 2011b*). Stoga su izdržljivost granula, odnosno otpornost ka otiranju i tvrdoća granula važne fizičke karakteristike hrane za ribe (*Sørensen, 2012*). Pored ova dva parametra fizičkog kvaliteta, važno je da hrana za ribe poseduje i ostale karakteristike koje omogućavaju ispunjavanje nutritivnih zahteva i zahteva za prirodnim načinom unosa hrane svake specifične vrste. Među najvažnije parametre fizičkog kvaliteta koja moraju da budu zadovoljeni spadaju stepen ekspanzije, nasipna masa, brzina tonjenja granula, kapacitet upijanja ulja, nivo otpuštanja ulja i stabilnost granula u vodi.

Fizički kvalitet granula zavisi od jačine veze između čestica sirovine i može da varira u zavisnosti od: sastava smeše, raspodele veličine čestica sirovina i postupka proizvodnje (*Behnke, 1996*). Čvrste veze između čestica unutar granule nastaju kao posledica difuzije molekula na mestu kontakta čestica u granuli, kristalizacije čestica različitih sirovina, hemijskih reakcija i očvršćavanja istopljenih sastojaka (*Kaliyan i Morey, 2010*). Sitnije čestice sirovina doprinose boljem fizičkom kvalitetu granule, jer intenzivnije usitnjeni materijal bolje upija vodu usled veće specifične površine (*Hemmingsen i sar., 2008; Kaliyan i Morey, 2010*). Duže vreme zadržavanja materijala u kondicioneru povećava stepen izdržljivosti granula, ali povećava i nivo otpuštanje ulja (*Sørensen, 2011b*). Nepovoljno hlađenje dovodi do toga da je jezgro granula i dalje toplo dok im je površina hladna, što dovodi do naprezanja i stvaranja pukotina u granuli, a time i većeg stepena otiranja (*Kaliyan i Morey, 2009*). Fizičko-hemijske osobine sirovina koje ulaze u sastav hrane za ribe mogu da utiču na specifične funkcionalne karakteristike koje svaka sirovina ima, a time i na ponašanje smeše tokom ekstrudiranja i na karakteristike finalnog proizvoda.

2.3.5.1. Funkcionalne osobine sastojaka u hrani za ribe

Koncept recepture najmanje cene za formulisanje obroka u ishrani životinja, uz zadovoljenje zahteva za kvalitetom proizvoda, vodi ka upotrebi velikog broja hraniva koja su u različitim količinama uključena u finalni proizvod. Osnovnu strukturu granule za ishranu riba formiraju prvenstveno dva biopolimera – skrob i proteini, ali sve sirovine koje ulaze u sastav recepture hrane za ribe uzajamno deluju tokom ekstrudiranja i transformacije osnovnih sastojaka u novi proizvod. Stoga je važno da se razume uloga svake pojedinačne sirovine u recepturi, kao i efekat koja data sirovina ima na parametre tehnološkog procesa i kvalitet hrane za ribe (Guy, 2001).

Pod funkcionalnim osobinama neke sirovine koja se koristi u proizvodnji hrane za životinje podrazumeva se sposobnost date sirovine da omogući proizvodnju granule sa definisanim fizičkim kvalitetom, tj. minimalnom abrazijom, optimalnom tvrdoćom, gustinom i kapacitetom upijanja i otpuštanja ulja (Sørensen, 2012). Biopolimeri iz sirovina formiraju trodimenzionalnu mrežu u koju se ugrađuju ostali sastojci smeše i na taj način se formira tekstura proizvoda.

Skrob se u recepturu za ishranu vrsta mesojeda dodaje primarno kao vezivo i sredstvo za omogućavanje ekspanzije proizvoda. Zavisno od prirodnog izvora, veličine i oblika skrobne granule, kao i odnosa amiloze i amilopektina unutar granule, skrob ima različita funkcionalna svojstva (Sørensen, 2012). Funkcionalne osobine skroba aktiviraju se želatinizacijom, procesom do kojeg dolazi usled povišenog sadržaja vode i temperature u sistemu. Tokom svih termičkih faza proizvodnje hrane za ribe, skrob želatinizira, prvo delimično u fazi kondicioniranja, a potom potpuno u fazi ekstrudiranja. Želatinizacija skroba obično se definiše kao fazni prelaz uz povišen sadržaj vode. U ekstrudiranoj hrani za ribe stepen želatinizacije skroba obično je u rasponu od 73 do 100% u odnosu na polazni sadržaj skroba (Hansen i sar., 2010; Kraugerud i sar., 2011).

Proteini takođe mogu da učestvuju u izgradnji strukture proizvoda, ali moraju da se nalaze u velikoj koncentraciji. Vezivna svojstva proteina određena su strukturom proteina, što je povezano sa aminokiselinskim sastavom i time da li je sirovina koja je izvor proteina prošla prethodnu termičku obradu ili ne. Kada je protein izložen toploti, on se denaturiše, tj. gubi svoju sekundarnu i tercijarnu strukturu. Otvaranje strukture proteina započinje na 45°C i tokom hlađenja, veze iz proteina se ponovo regrupišu i nove veze se stvaraju između čestica hraniva (Thomas i sar., 1997). Višestruko, ponovno zagrevanje proteina smanjuje njihov sposobnost vezivanja (Sørensen i sar., 2009). Nativni proteini, koji nisu prošli nikakav vid procesiranja, imaju bolja vezivna svojstva od onih koji su prethodno bili zagrevani i denaturisani. Rastvorljivost nativnih proteina u vodi je bolja od termički tretiranih proteina, što utiče na dobre fizičke karakteristike ekstrudata (Sørensen i sar., 2009). Proteini životinjskog porekla, poput ribljeg, mesnog i krvnog brašna, koji su u toku procesiranja neizbežno prošli kroz termički tretman, stvaraju manje rastvorljive agregate u vodi i stoga poseduju

loše vezivne karakteristike u poređenju sa biljnim proteinima. Ipak, proteini životinjskog porekla imaju bolji aminokiselinski sastav sa stanovišta nutritivnog kvaliteta i ne zahtevaju suplementaciju sintetičkim aminokiselinama.

Vlakna su sastojak sirovina koje ribe mesojedi ne mogu da vare, te bi stoga trebalo da budu minimalno prisutna u ishrani ovih vrsta (Sørensen, 2012). Obično se dele na vlakna rastvorljiva i nerastvorljiva u vodi. Vrsta vlakana, njihov izvor i sadržaj utiču na kvalitet granula (Hsieh i sar., 1989; Lue i sar., 1990; Hansen i Storebakken, 2007; Kraugerud i sar., 2011), pre svega na viskoznost materijala, kapacitet zadržavanja vode i sposobnosti da formiraju gel. Vlakna rastvorljiva u vodi povećavaju viskoznost materijala i utiču na poboljšanje kvaliteta granule (Kaliyan i Morey, 2009). Nerastvorljiva vlakna mogu da spreče vezivanje čestica usled svojih elastičnih osobina i tako utiču na formiranje slabih mesta u granulama što ima negativan uticaj na njihov fizički kvalitet (Thomas i sar., 1998; Kaliyan i Vance Morey, 2009). Neki autori ipak navode da povećanje sadržaja celuloze, nerastvorljivog vlakna, u recepturi vodi ka izdržljivijim i tvrdim granulama (Refstie i sar., 2006; Hansen i Storebakken, 2007; Kraugerud i sar., 2011).

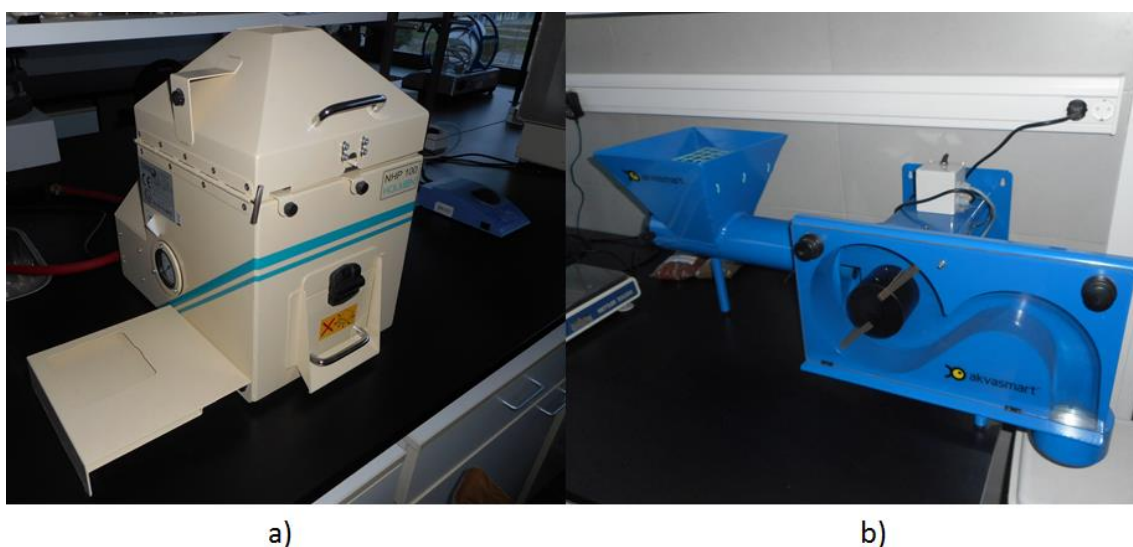
Povećan sadržaj masti u smeši koja se ekstrudira ima negativan efekat na fizički kvalitet granula (Cavalcanti i Behnke, 2005; Cavalcanti i Behnke, 2005b; Morken i sar., 2012). Sadržaj masti iznad 12% tokom ekstrudiranja ima negativan uticaj na stepen otiranja granula (Rokey i Huber, 1994). Smanjenje stepena smicanja tokom ekstrudiranja, koje se javlja pri povećanju sadržaja masti, utiče na smanjenje plastifikacije materijala i kuvanja smeše (Lam i Flores, 2003), što rezultuje lošijim kvalitetom granule. Količina vode ima važnu ulogu za strukturu i fizički kvalitet granula (Mathew i sar., 1999; Lundblad i sar., 2009; Draganović i sar., 2011). Razlike u hemijskom sastavu i fizičkoj formi čestica sirovina, utiču na sposobnost različitih sastojaka da apsorbuju vodu prilikom kondicioniranja ili ekstrudiranja (Hemmings i sar., 2008). Dodata voda aktivira prirodna veziva poput rastvorljivih ugljenih hidrata, skroba, proteina i minerala (Pietsch, 2002).

2.3.5.2. Metode određivanja fizičkog kvaliteta ekstrudirane hrane za ribe

Kao što je već naznačeno, ekstrudirana hrana za ribu ima specifične zahteve u pogledu fizičkog kvaliteta. Pravi izbor metoda za karakterizaciju svake od fizičkih osobina je izrazito važan. Postavljanje standarda fizičkog kvaliteta hrane za ribe ipak predstavlja izazov (Sørensen i sar., 2010), jer nema dovoljno standardizovane opreme i standardizovanih metoda za ispitivanje fizičkih karakteristika (Aas i sar., 2011). Kako se određeni pokazatelji fizičkog kvaliteta ispituju i tokom same proizvodnje hrane za ribe, idealno bi bilo da metode njihovog ispitivanja budu brze i jednostavne, kao i da daju praktične, tačne i ponovljive rezultate (Obaldo i sar., 2002).

Tvrdoća granula definiše se kao maksimalna sila koju granula može da izdrži dok se ne slomi (Kaliyan i Morey, 2009) i iskazuje sposobnost granule da izdrži pritiske koji se javljaju pri skladištenju. Tvrdoća se obično analizira primenom teksturometra (Hansen i sar., 2007; Øverland i sar., 2007; Sørensen i sar., 2009; Glencross i sar., 2010; Sørensen i sar., 2010; Aas i sar., 2011a; Aas i sar., 2011b; Hansen i sar., 2011; Kraugerud i sar., 2011; Oehme i sar., 2014; Storebakenn i sar., 2015 ili različitih testera, poput KAHL-ovog testera tvrdoće (Thomas i van der Poel, 1996). Pri određivanju tvrdoće, na položenu granulu spušta se radni element konstantnom brzinom i polako se povećava pritisak sve dok granula ne pukne, nakon čega se beleži sila koja je dovela do pucanja granule. Ne postoji standardna metoda i rezultati testa zavise od primenjene brzine, korišćene sonde i da li su granule u položenom ili uspravnom položaju, pa tako rezultati različitih ispitivanja često nisu međusobno uporedivi (Sørensen, 2012).

Stepen otiranja predstavlja količinu prašine i sitnih čestica koji nastaju tokom fizičkog manipulisanja granulama. Ovaj pokazatelj govori o otpornosti granule na abraziju, i o tome kako se granula ponaša tokom mehaničkog i pneumatskog transporta (Thomas i van der Poel, 1996; Kaliyan i Morey, 2009). Za ispitivanje stepena otiranja hrane za ribe u upotrebi su najčešće dva uređaja: tester za ispitivanje stepena otiranja po Holmen-u i DORIS tester (Slika 2.16).



Slika 2.16. Uređaji za ispitivanje stepena otiranja: a) Holmen tester i b) DORIS tester

Holmen pelet tester je uređaj koji simulira manipulaciju i transport granula od momenta proizvodnje do distribucije na krajnje odredište (Sørensen, 2012). Uređaj se sastoji od perforirane komore u kojoj se određena masa uzorka tretira vazduhom u trajanju od 30, 60, 90 ili 120 sekundi. Nakon abarizije granula u komori uređaja, one se vade i dodatnim prosejavanjem se izdvajaju sitne čestice nastale tokom testa. Kod hrane za ribe, rezultat se najčešće izražava kao indeks izdržljivosti

granule (engl. *Pellet Durability Index* – PDI), i predstavlja odnos mase prosejanih granula nakon testa i početne mase granula (Sørensen, 2012). Veličina otvora sita za prosejavanje granula bira se na osnovu prečnika granula, i uzima se da je prečnik otvora 80% od prečnika granule (Thomas i van der Poel, 1996). Wolska i saradnici (2014) su tokom standardizacije metode za određivanje stepena otiranja Holmen testerom, utvrdili da na dobijanje rezultata uticaj imaju i pritisak i temperatura vazduha kao i čišćenje komore između dva uzastopna testa, te treba imati u vidu i kontrolu ovih faktora tokom izvođenja analize.

DORIS tester (engl. *Durability on a Realistic Test*) je posebno razvijen za industriju hrane za ribe, kako bi se simulirali uslovi naprezanja koji deluju na granule u pneumatskim hranilicama za ribe. Ovaj uređaj se sastoji iz pužnog transportera kojim se granule transportuju u komoru u kojoj se plastični radni element obrće velikom brzinom, te su granule podvrgnute jakoj sili udara (Aas i sar., 2011a). Materijal se na izlazu skuplja u posudu i potom se prosejava na slogu sita, koji se formira u zavisnosti od početnog prečnika granula. Rezultat se izražava kao procenat celih granula koji ostane na situ sa otvorima najveće veličine, dok DORIS vrednost predstavlja ostatak granula koji zaostaju na ostalim sitima i može da se podeli u dodatne frakcije kao mali lom, veliki lom i prašina (Aas i sar., 2011a). DORIS tester koristi se isključivo za ispitivanje zauljenih granula, dok Holmen tester može da ima ograničenje za granule sa visokim sadržajem ulja, gde usled zadržavanja u komori i do 2 min, može doći do dodatnog isticanja ulja iz granula i netačnog rezultata (Sørensen, 2012).

Merenjem prečnika granule i poređenjem sa prečnikom otvora matrice određuje se radijalni stepen ekspanzije granule. Obično se za potrebe određivanja radijalne ekspanzije prečnik granule meri pomičnim merilom (Øverland i sar., 2007; Kraugerud i sar., 2011; Sørensen i sar., 2010; Draganović i sar., 2011; Sørensen i sar., 2010; de Cruz i sar., 2015; Tyapkova i sar., 2016). Pomičnim merilom meri se i dužina granule, u uslovima kada je nož ekstrudera podešen na konstatnu brzinu, u cilju određivanja longitudinalne ekspanzije (Alvarez i Martinez, 1988; Sørensen i sar., 2010; Morken i sar., 2012; Tyapkova i sar., 2016). Proračun za longitudinalnu ekspanziju znatno je komplikovaniji i detaljno je opisan u literaturi (Alvarez i Martinez, 1988). Prečnik granule može da se meri i primenom teksturometra pre same analize tvrdoće, ukoliko tehničke mogućnosti teksturometra to dozvoljavaju (Sørensen i sar., 2010; Hansen i sar., 2011; Morken i sar., 2012). Postignuti stepen ekspanzije granule ima uticaj na specifičnu gustinu granule. Za određivanje specifične gustine granule najčešće korišćena metoda je volumetrijska, zamenska metoda sa staklenim kuglicama razvijena od strane Hwang-a i Hayakawa-e (1980) (Draganović i sar., 2011; Draganović i sar., 2013b; Draganović i sar., 2014). Jednostavniji način određivanja specifične gustine jeste isecanje granule u cilindar tačno određenih dimenzija, tako da može da se izračuna zapremina dobijenog cilindra, a potom se merenjem mase ovako pripremljenog ekstrudata jednostavno izračunava gustina, kao odnos poznate mase i zapremine granule (Kannadahson i sar., 2011). Specifična gustina granula ukazuje na to da li će hrana

za ribe da pluta ili da tone u vodi (granule manje gustine i veće poroznosti plutaju, dok one sa većom gustinom tonu). Ipak, u industrijskoj proizvodnji svojstvo granula da plutaju odnosno tonu, određuje se posredno primenom brzih testova, kao npr. merenjem nasipne mase granula (*Øverland i sar., 2007; Čolović i sar., 2011; Aas i sar., 2011; Oehme i sar., 2014*). U tabeli 2.3 prikazane su granične vrednosti nasipne mase od kojih zavisi da li će granule da plutaju ili tonu u slatkoj i slanoj vodi (*Rokey, 2007*).

Tabela 2.3. Granične vrednosti nasipne mase koje određuju plutajuće ili tonuće granule

Granule	Nasipna masa (g/l)	
	Slatka voda	Slana voda
Plutajuće	< 440	< 480
Sporo tonuće	500 – 580	520 – 600
Brzo tonuće	> 600	> 640

Za potrebe određivanja osobina plutanja i tonjenja, nekada je dovoljno da se odredi procenat plutajućih i tonućih granula, tako što se određeni broj granula ubaci u vodu definisane zapremine i temperature, te da se nakon određenog vremena gleda koji je broj granula ostao da pluta na površini vode (*Draganović i sar., 2013b; Draganović, 2014*). Ipak, za karakterizaciju tonuće hrane potrebno je da se odredi i brzina tonjenja granula. Brzina tonjenja obično se određuje puštanjem granule u menzuru, pri čemu različiti autori navode različitu visinu (110 – 200 cm) i prečnik (10 – 30 cm) menzure (*Øverland i sar., 2007; Čolović i sar., 2011; Storebakken i sar., 2015; Tyapkova i sar., 2016*). Granula se pušta uvek sa tačno definisane visine od površine vode (*Lekang i sar., 1991; Øverland i sar., 2007; Čolović i sar., 2011*), i potom se štopericom meri vreme između dve tačke označene na menzuri (*Lekang i sar., 1991; Øverland i sar., 2007; Čolović i sar., 2011*). Temperatura i salinitet vode moraju da budu konstatni tokom analize jer utiču na brzinu tonjenja (*Sørensen, 2012*). Obično se u toku izvođenja analize nasumično bira deset ili više granula, a rezultat se izražava u cm/s.

Kapacitet upijanja ulja je fizička osobina koja je u korelaciji sa poroznošću granule. Za lososa i pastrmku je bitno da granule nakon ekstrudiranja imaju što veći maksimalni kapacitet upijanja ulja, što se obezbeđuje povećanom ekspanzijom, ali je isto tako važno da se optimizuje nasipna masa kako bi granule mogle sporo da tonu (*Sørensen, 2012*). Najjednostavnija metoda za određivanje kapaciteta ulja je da se određena masa granula zagreje na 60°C i uroni u ulje u laboratorijskom sudu, koji se potom stavlja u vakuum komoru, pri čemu se kapacitet upijanja računa kao relativno povećanje mase nakon upijanja ulja (*Glencross i sar., 2010*). Za određivanje kapaciteta upijanja ulja, osim relativno jednostavnih posuda, može da se koristi i laboratorijski uređaj za oblaganje granula uljem (*Draganović, 2011; Sørensen i sar., 2011; Draganović, 2014*).

Nakon upijanja ulja od strane granula, važno je da se ulje zadrži unutar njih. Otpuštanje ulja može da dovede do snižavanja energetskeg sadržaja hrane za ribe, a takođe može da stvori probleme prilikom manipulacije takvim granulama. Nivo otpuštanja ulja određuje se jednostavnim metodama kojim se meri gubitak mase zauljenih granula, tokom njihovog zagrevanja na 40°C (*Sørensen i sar., 2011; Draganović i sar., 2013b*) ili na sobnoj temperaturi (*Øverland i sar., 2007; Storebakenn i sar., 2015*) pri različitoj dužini testa. Ispitivanjima je utvrđeno da otpuštanje ulja nije u korelaciji sa ekspanzijom ili nekim drugim parametrom fizičkog kvaliteta, već verovatno sa mikrostrukturom granule (*Sørensen i sar., 2011*). Razvojem modernih tehnika snimanja, danas je moguće detaljnije opisati mikrostrukturu granule, poput snimanja poprečnog preseka granule elektronskim mikroskopom (*Yoshitomi, 2004; Sørensen i sar., 2009; Draganović i sar., 2013b; Umar i sar., 2013; de Cruz i sar., 2015*), kriogenskom skenirajućom elektronskom mikroskopijom (*Draganović i sar., 2013b*) i mikrografijom x zracima (*Draganović i sar., 2013b*). Mikrografija je tehnika koja omogućava i karakterizaciju poroznosti i određivanje prosečnog prečnika pora granule.

Značajna fizička karakteristika hrane za ribe, sa nutritivnog i ekonomskog aspekta, jeste stabilnost granula u vodi, i definiše se kao sposobnost granule da zadrži fizičku strukturu uz minimalno raspadanje i gubljenje nutritijenata, od trenutka kada je uronjena u vodu do momenta kada je usvojena od strane životinje (*Obaldo i sar., 2002*). Dobra stabilnost granula u vodi bitna je za sve akvatične vrste, a naročito vrste koje sporo usvajaju hranu, poput škampa, gde je potrebno da hrana bude stabilna i da ne gubi nutrijente i po nekoliko sati od uranjanja u vodu (*Obaldo i sar., 2002*). Za vrste koje u ishrani zahtevaju sporo tonuću hranu, stabilnost u vodi može da bude važna za predviđanje modela razlaganja u sistemu za varenje ribe (*Sørensen, 2012*). Loša stabilnost granula koje su uronjene nekoliko sati u vodi može da utiče na smanjenje unosa hrane od strane ribe, te tako da dovede do smanjenog prirasta i povećane konverzije (*Obaldo i sar., 2002; Oehme i sar., 2014*). Metoda za određivanje stabilnosti granula u vodi treba da sadrži neku vrstu fizičke manipulacije granulama dok se nalaze u vodi kako bi se dobile jasne razlike u stabilnosti različitih uzoraka (*Obaldo i sar., 2002; Banjac i sar., 2015*). U literaturi se navodi da se za ove potrebe najčešće koriste tresilice za dodatno fizičku agitaciju uzoraka tokom analize (*Obaldo i sar., 2002; Baevefjord i sar., 2006*). Metoda *Baevefjord-a i saradnika (2006)* daje jasne razlike u rezultatima između različitih grupa ekstrudirane hrane za ribe, i pritom dobijeni rezultati dobro korelišu sa ponašanjem hrane u sistemu za varenje riba. U ovoj metodi granule se stavljaju u specijalno napravljene metalne korpe, koje se postavljaju u čaše sa vodom, i stavljaju se u vodeno kupatilo sa tresilicom. Temperatura vode održava se na 23°C, dok je vreme mućkanja podešeno na 30, 60, 90 i 120 min, čime može da se prati stabilnost u vodi u toku vremena. Rezultat se iskazuje kao indeks stabilnosti u vodi, koji predstavlja odnos preostale suve materije uzorka nakon analize i početne suve materije uzorka. Ova metoda široko je upotrebljavana za ispitivanje stabilnosti u vodi eksperimentalne hrane za ribe (*Aas i sar.,*

2011; Hansen i sar., 2011; Morken i sar., 2012; Oehme i sar., 2014; Storebakenn i sar., 2015). Predlozi nekoliko različitih metoda za ispitivanje stabilnosti hrane za vodene vrste u vodi, koje uključuju i natapanje bez fizičkog dejstva na granule i sa fizičkim dejstvom nakon određenog vremena, dostupno je u literaturi (Obaldo i sar., 2002; Banjac i sar., 2015). Nekoliko različitih pristupa može da se koristi za određivanje gubitka nutritijenata u vodu iz hrane tokom vremena – gravimetrijski (Ighwela, 2013), spektrofotometrijski (Čolović i sar., 2014) i konduktometrijski (Banjac i sar., 2015).

2.4. Zamena ribljeg brašna u hrani za ribe

Riblje brašno je tradicionalan izvor proteina u ishrani različitih vodenih vrsta (Glencross i sar., 2007). Dobija se mlevenjem i sušenjem ribe i/ili ribljih delova (FAO, 2016a). Decenijama je riblje brašno cenjeno kao glavno proteinsko hranivo za ribe zbog svog visokog sadržaja proteina, odličnog aminokiselinskog sastava, visoke svarljivosti, odustva antinutritijenata, široke rasprostranjenosti i, sve do nedavno, relativno niske cene. Sa stanovišta nutritivne vrednosti, ali i cene, riblje brašno predstavlja standard za sva ostala visokoproteinska hraniva koja se koriste u ishrani riba (Gatlin i sar., 2007). Intenzivna upotreba ribljeg brašna dovela je do ograničene dostupnosti i neizbežno visoke cene ove sirovine koja se u poslednjoj deceniji povećala za više od 300% (Barrientos i Soria, 2015). Strategija za prevazilaženje ovog problema, koja se već godinama koristi, predstavlja korišćenje različitih visokoproteinskih hraniva biljnog i životinjskog porekla kao alternative ribljem brašnu u ishrani riba (Glencross i sar., 2007). Delimična zamena ribljeg brašna alternativnim izvorima proteina utiče da proizvodnja ribe uzgojem bude održiva i u budućnosti (Tyapkova i sar., 2016).

2.4.1. Problem održivosti korišćenja ribljeg brašna u ishrani riba

Značajan udeo izlovljene ribe završava kao sirovina za proizvodnju ribljeg brašna i ribljeg ulja. U 2014. godini 15,8 miliona tona izlovljene ribe prerađeno je u riblje brašno i ulje. Ova dva proizvoda mogu da se dobiju iz cele ribe, ribljih ostataka ili drugih sporednih proizvoda industrije prerade ribe. Mnoge vrste riba koriste se kao sirovina za proizvodnju ribljeg brašna i ulja, naročito uljem bogate ribe od kojih su glavna korišćena grupa sardele. Stoga, izlov sardele ima značajan uticaj na svetsku proizvodnju ribljeg brašna. Maksimalna proizvodnja ribljeg brašna dostignut je 1994. godine, kada je proizvedeno 30,1 miliona tona ribljeg brašna, da bi nakon perioda stagnacije krenuo pad svetske proizvodnje. Usled smanjenja proizvodnje poslednje dve decenije i povećanje potražnje za ribljim brašnom, pre svega od strane proizvođača hrane za ribe, kao posledica permanentnog rasta sektora

akvakulture u svetu, cene ribljeg brašna značajno su porasle u periodu od 2006. do 2013. godine. Istorijski maksimum cene ribljeg brašna dostignut je 2013. godine kada je tona ribljeg brašna iznosila 1 747 američkih dolara. Poređenja radi, tona sojine sačme kao jednog od najkvalitetnijeg visokoproteinskog hraniva biljnog porekla iznosila je oko 500 američkih dolara. Nakon 2013. godine došlo je do malog pada cena ribljeg brašna, međutim procene su da će cene ove sirovine i dalje da ostanu visoke zbog konstante potražnje koja postoji. Povećana potražnja za ribljim brašnom i njegoa visoka cena dovele su do toga da se poveća udeo sporednih proizvoda riblje industrije koje služe kao sirovina za proizvodnju ribljeg brašna, a koji su u prošlosti često bacani u otpad. Nezvanično, udeo sporednih proizvoda industrije prerade ribe koje se koriste kao sirovina za proizvodnju ribljeg brašna iznosi od 25 do 30%. Kako se ne očekuje da će u budućnosti biti veće količine dostupne ribe kao sirovine za proizvodnju ribljeg brašna nego što je sada, udeo sporednih proizvoda od kojih će se riblje brašno dobijati biće sve veći. Procena je da će biti povećana potražnja za ribljim filetima, a da će svi otpaci poput ribljih glava, repova, kostiju i iznutrica završiti kao sirovina za proizvodnju ribljeg brašna i ribljeg ulja, te da će čak 38% otpadaka završiti kao finalni proizvod za ishranu životinja. Ovo će imati značajan, negativan uticaj na hemijski sastav i nutritivni kvalitet ribljeg brašna, što će da se ogleda u smanjenom sadržaju proteina i aminokiselina, naročito glicina, prolina i hidroksprolina, te povećanom sadržaju pepela tj. mineralnih materija (FAO, 2016a).

Mnoge recepture za ishranu riba i danas sadrže i više od 50% ribljeg brašna, međutim, oslanjanje samo na jednu visokoproteinsku sirovinu u recepturi za ishranu riba predstavlja značajan rizik kada dođe do variranja njene dostupnosti, cene i kvaliteta (Glencross i sar., 2007). Osnovni problem daljeg korišćenja ribljeg brašna u ishrani riba je upravo ograničenost njegoa dostupnosti koja će u budućnosti činiti da upotreba ribljeg brašna bude neodrživa. Udeo izlovljene ribe koja će da se iskoristi za proizvodnju ribljeg brašna biće 16% do 2025. godine, što je oko jedan procenat manje od sadašnjeg stanja. Do ovoga će doći najviše zbog povećanog unosa ribe u ljudskoj ishrani, smanjenom sadržaju dostupne sirovine u moru i većoj upotrebi sporednih proizvoda industrije prerade ribe za dobijanje ribljeg brašna. U godinama kada izlov sardela bude lošiji, udeo izlovljene ribe koja će završiti kao riblje brašno biće manji nego inače. Procena je da će u 2025. godini proizvodnja ribljeg brašna da iznosi 5,1 miliona tona, ali značajno povećanje udela sporednih proizvoda od kojih će se ova vredna sirovina dobijati, uticaće na nutritivni kvalitet ribljeg brašna što može dodatno da utiče na smanjenje korišćenja ribljeg brašna u smešama za ishranu riba (FAO, 2016a).

Problem prisutan kod upotrebe ribljeg brašna u ishrani riba postoji takođe i kod upotrebe ribljeg ulja, proizvoda koji je za sve vrste riba bogat izvor nezasićenih masnih kiselina dugih lanaca. Riblje ulje dobija se kivanjem i presovanjem izlovljene ribe i, usled problema dostupnosti i visoke cene, uveliko se zamenjuje različitim biljnim uljima, najviše uljem uljane repice (Sørensen, 2011a).

Iako se riblje brašno i riblje ulje i dalje smatraju sirovinama sa najboljom nutritivnom vrednošću i najvećom svarljivošću u ishrani riba, njihova količina u gotovim smešama u značajnom je padu, kako bi se kompenzovala njihova visoka cena. Danas se ove sirovine u većim udelima koriste u proizvodima za ishranu riblje mladi ili odraslih jedinki u poslednjoj fazi tova, gde je potrebna hrana visokog sadržaja energije (FAO, 2016a).

2.4.2. Zamena ribljeg brašna proteinima biljnog porekla

Industrija hrane za ribe je u stalnoj potrazi za novim izvorima proteina koji bi se koristili kao zamena za riblje brašno. Riblje brašno se u recepturama za ishranu riba najčešće zamenjuje visokoproteinskim sirovinama biljnog porekla, prerađenim animalnim proteinima domaćih životinja (mesno brašno, krvno brašno), brašnom od krila (malih vodenih ljuskara), sporednim proizvodima industrije prerade morskih plodova, kao i algama (Brinker i Reiter, 2011). Značajni naponi uloženi su da se alternativne proteinske sirovine okarakterišu, kao i da se ispita njihov uticaj kako na zdravlje i proizvodne performanse riba, tako i na parametre ekstrudiranja i fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe (Brinker i Reiter, 2011; Sørensen, 2012; Jobling, 2016). Iako se u proizvodnji komercijalne hrane za ribe mora voditi računa o uticaju dodatka određene sirovine na parametre proizvodnog procesa i fizički kvalitet granula, primarni kriterijumi za odabir sirovine su nutritivni kvalitet, cena i dostupnost (Rokey, 2000). Kako bi neko proteinsko hranivo bilo alternativa ribljem brašnu, mora da bude široko dostupno, da ima konkurentnu cenu, lakoću transportovanja i skladištenja, relativno visok sadržaj proteina, nizak sadržaj vlakana, skroba, nerastvornih ugljenih hidrata i antinutrijenta, kao i pogodan aminokiselinski sastav (Gatlin i sar., 2007). Proteinske sirovine biljnog porekla najviše su zastupljene kao alternativni izvori proteina u ishrani riba zbog svoje široke dostupnosti, pogodnog hemijskog sastava, relativno niske cene i velikog doprinosa održivosti proizvodnje hrane za ribe (Draganović i sar., 2013a).

Primena biljnih izvora proteina u ishrani riba ima svoje prednosti ali i nedostatke (McKevith, 2005; Gatlin i sar., 2007; Tacchi i sar., 2012; Gu i sar., 2014; Kortner i sar., 2014). Veliki nedostatak biljnih proteinskih izvora ogleda se u nepovoljnom aminokiselinskom sastavu, odnosno nedostatku esencijalnih aminokiselina koje moraju da se dodaju kao suplement u ishrani riba, kao i odsustvo nezasićenih masnih kiselina koje su važne za rast i razvoj riba (Jobling, 2016). Pri formulisanju receptura za ishranu riba sa visokim sadržajem alternativnih biljnih proteinskih izvora važno je uzeti u obzir zahteve određene vrste riba za esencijalnim aminokiselinama, dok je ujedno važno i da se kontroliše sadržaj ugljenih hidrata, naročito prostih šećera, kako bi se sprečila glikemija (Wilson, 1994). Visokoproteinske sirovine biljnog porekla često sadrže i različite antinutrijente koji negativno utiču na svarljivost hrane i usvojivost nutrijenata (Francis, 2001). Ovaj nedostatak prevazilazi se

potpunim uklanjanjem ili svođenjem antinutritivnih sastojaka na prihvatljiv minimum pogodnim tehnološkim postupcima obrade sirovine ili dodatkom odgovarajućih enzima u hranivo (Jobling, 2016). Visoka svarljivost i usvojivost hrane sa visokim sadržajem biljnih proteina neophodna je za rast i razvoj riba (Gatlin i sar., 2007). Ukoliko se planira široka upotreba recepture sa velikim količinama biljnih proteina, takva receptura mora da bude i ekonomski konkurentna na tržištu (Brinker i Reiter, 2011).

Udeo biljnih proteinskih sirovina u recepturama za ishranu riba danas je znatno veći od udela ribljeg brašna i ostalih drugih visokoproteinskih sirovina. U norveškoj industriji proizvodnje hrane za lososa, tokom 2012. godine, ukupna količina upotrebljenih sirovina iznosila je 1 630 miliona tona, dok su od te brojke 37% činile sirovine biljnog porekla, a 31% činili su proteini akvatičnog porekla (riblje brašno, brašno od krila, lignji itd.) (Ytrestøyl i sar., 2015). Sojin proteinski koncentrat bila je najviše korišćena biljna proteinska sirovina, koju su pratili sporedni proizvodi industrije prerade suncokreta (suncokretova sačma i pogača) i pšenični gluten (Ytrestøyl i sar., 2015). Sojin proteinski koncentrat i pšenični gluten su, sa stanovišta dostupnosti i nutritivne vrednosti, pokazali veliki potencijal kao alternativa ribljem brašnu (Gatlin i sar., 2007; Draganović i sar., 2013a). Uticaj delimične zamene ribljeg brašna sojinim proteinskim koncentratom i pšeničnim glutenom na postupak ekstrudiranja i fizički kvalitet granula ispitan je u radu Draganovića i saradnika (2011), gde su autori zaključili da je sojin proteinski koncentrat podesnija sirovina od pšeničnog glutena pri zameni visokih sadržaja ribljeg brašna. Takođe, Draganović i saradnici (2013b) ispitali su uticaj delimične zamene ribljeg brašna pšeničnim glutenom na mikrostrukturu granule, dok su Storebakken i saradnici (2015) ispitali uticaj pšeničnog glutena kao glavnog izvora proteina na fizičke i nutritivne osobine granula za ishranu pastrmke. Predmet istraživanja velikog broja autora bili su i proteinski koncentрати leguminoza, njihova mogućnost primene u ishrani riba i uticaj na fizički kvalitet ekstrudirane hrane. Ispitivane su mogućnosti zamene ribljeg brašna proteinskim koncentratima graška (Øverland i sar., 2009; Sánchez-Lozano i sar., 2009; Hansen i sar., 2011; Collins i sar., 2012; Zhang i sar., 2012b; Collins i sar., 2013; Fuertes i sar., 2013), lupina (Burel i sar., 2000; Booth i sar., 2001; Glencross i sar., 2005; Glencross i sar., 2006; Glencross i sar., 2011; Zhang i sar., 2012a; Draganović i sar., 2014) i boba (De Santis i sar., 2015). Ispitivana je mogućnost zamene ribljeg brašna DDGS-om (engl. *Distillers Dried Grains with Solubles*) kao i uticaj DDGS-a na promene parametara ekstrudiranja i fizički kvalitet dobijenih granula (Kannadhasan i sar., 2009; Rosentrater i sar., 2009; Kannadhasan i sar., 2011).

Sprovedena su istraživanja upotrebe sačmi u ishrani riba. Nutritivne osobine sojine sačme i sačme uljane repice, i njihov uticaj na rast pastrmke ispitan je u radovima Collins-a i saradnika (2012; 2013). Efekat sojine sačme na fizički kvalitet hrane za ribe ispitan je u radu Sørensen i saradnika (2009). U ovom radu, postepeno povećanje udela sojine sačme i smanjenje udela ribljeg brašna, dovelo je do smanjenja stepena ekspanzije granula što je uticalo da granule imaju veće nasipne mase

sa većom tvrdoćom i otpornošću na otiranje. Dodatak punomasne soje u recepturu za ishranu pastrmke uticao je da granule imaju manju ekspanziju i lošiji fizički kvalitet od granula proizvedenih sa dodatkom obezmašćene sojine sačme (*Morken i sar., 2012*).

Mali je broj istraživanja u dostupnoj literaturi koja razmatraju zamenu ribljeg brašna suncokretovom sačmom i uticaj koji sačma ima na fizičke osobine hrane za ribe, kao i na rast i zdravlje riba. Uticaj suncokretove sačme na fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe ispitan je u radu *Kraugerud-a i saradnika (2011)*, u kojem je deo ribljeg brašna zamenjen sa nekoliko različitih proteinskih sirovina biljnog porekla (sojina sačma, sačma uljane repice, proteinski koncentrat graška, kukuruzni gluten i suncokretova sačma) u cilju ispitivanja njihovog efekta na kvalitet ekstrudata. Suncokretova sačma doprinela je da se dobiju granule značajno veće tvrdoće od ostalih eksperimentalnih uzoraka, ali sa relativno niskom ekspanzijom. U istraživanju sa posebnom vrstom tilapije (*Sarotherodon mossambicus*), koja spada u grupu biljojeda, udeo od čak 75% suncokretove sačme (32% proteina na SM) u recepturi doveo je do povećanog rasta riba u poređenju sa kontrolnom grupom, što je pokazatelj da navedena vrsta ima sposobnost da efikasno vari i usvaja proteine suncokreta uprkos visokom sadržaju celuloze (*Jackson i sar., 1982*). *Sanz i saradnici (1994)* utvrdili su da je uključjenje 40% suncokretove sačme sa 40% proteina (SM) u hranu za pastrmke rezultovalo zadovoljavajućim prirastom eksperimentalne grupe riba, iako manje od prirasta kontrolne grupe hranjenje hranom bogatom ribljem brašnom. U ispitivanjima svarljivosti proteina sačme od delimično oljuštene suncokretove sačme sa oko 41% proteina (SM), koja je prethodno prošla postupak ekstrudiranja na temperaturi od 150°C, utvrđeno je da kod hrane za lososa (*Gill i sar., 2006*) uvođenje do 27,5% ove sačme u recepturu ne dovodi do značajnih razlika u prirastu ribe, iskoristivosti hrane, proteina i energije u poređenju sa recepturom koja sadrži isključivo riblje brašno. Hrana za lososa u kojoj je udeo ribljeg brašna bio zamenjen sa 14% suncokretove sačme i 14% sojine sačme uticala je na značajno veći unos hrane i bolji rast riba u poređenju sa hranom kod koje je zamena ribljeg brašna izvedena sa 32% sojine sačme (*Refstie i sar., 2010*). S druge strane, učešće suncokretove sačme u udelu od 20% u recepturi za ishranu lososa, dovela je do značajnog smanjenja rasta riba od čak 25% u poređenju sa kontrolnom grupom riba hranjenom hranom sa isključivo ribljim brašnom (*Hartviksen i sar., 2014*). Autori nisu naveli kvalitet korišćenje sačme, ali smatraju da je dobijeni negativan rezultat posledica visokog sadržaja celuloze u suncokretovoj sačmi, kao i smanjenog unosa ovakve hrane od strane riba zbog mogućeg gorkog ukusa koji je potencijalno posledica prisustva hlorogenske kiseline u suncokretovoj sačmi. U ishrani riba mesojeda suncokretova sačma prisutna je obično u udelu od 2 do 4% (*Hartviksen i sar., 2014*), ali dosadašnji rezultati istraživanja pokazali su da postoji potencijal za uključjenje sačme u većim udelima u recepture, naročito ako se pogodnim postupcima smanji sadržaj suncokretove ljuske i time i sadržaj sirove celuloze.

3. MATERIJAL I METODE

Eksperimentalni deo doktorske disertacije urađen je u dve odvojene faze – fazi vazdušne klasifikacije i fazi ekstrudiranja.

1. **Faza vazdušne klasifikacije** – ispitan je uticaj kombinacije parametara usitnjavanja (prečnik otvora sita čekićara – POS od 3, 2 i 1 mm) i vazdušne klasifikacije (protok vazduha – V od 5, 8,7 i 12,5 m³/h i jačina oscilacije vibro dozatora – JOVD 30, 60 i 90% od maksimuma) na povećanje sadržaja proteina i prinos dobijenih visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme. Izračunata je specifična potrošnja energije čekićara (SPE) tokom usitnjavanja sačme za svako korišćeno sito kao i sledeći pokazatelji fizičkog kvaliteta usitnjenih suncokretovih sačmi:
 - nasipna masa (NM),
 - raspodela veličine čestica i
 - geometrijski srednji prečnik čestica (GSP).

Na osnovu rezultata vazdušne klasifikacije usitnjenih sačmi izračunati su prinosi i određeni su sledeći hemijski i fizički pokazatelji kvaliteta dobijenih frakcija:

- sadržaj vlage,
- sadržaj proteina,
- geometrijski srednji prečnik čestica (GSP),
- udeo suncokretovog jezgra i
- udeo suncokretove ljuske.

Određeni udeli suncokretovog jezgra i ljuske poslužili su za proračun funkcije separacije (κ_{exp}) koja opisuje kvalitet razdvajanja čestica u postupku klasifikacije. Funkcija separacije (κ_{CFD}) dobijena je i kao rezultat urađene kompjuterske simulacije postupka vazdušne klasifikacije primenom računске dinamike fluida (CFD).

2. **Faza ekstrudiranja** – izvedena je u dva posebna dela, u kojima su proizvedeni uzorci hrane za pastrmku postupkom ekstrudiranja. Pre samog ekstrudiranja sledilo je usitnjavanje i mešanje sirovina, nakon čega je određen hemijski sastav suvih smeša (sadržaj vlage, proteina, masti, celuloze, pepela, bezazotnih ekstraktivnih materija i skroba). U prvom delu je najpre ispitan uticaj polazne suncokretove sačme i njene dve visokoproteinske frakcije, koje su proizvedene

pri odabranim parametrima iz prve faze istraživanja, na izlazne parametre procesa ekstrudiranja (temperature u cevi ekstrudera, temperaturu matrice, pritisak na matrici, opterećenju motora i specifičnoj mehaničkoj energiji – SME) i na sledeće pokazatelje fizičkog kvaliteta hrane za ribe:

- nasipna masa,
- radijalni stepen ekspanzije,
- tvrdoća granula,
- otiranje granula,
- DORIS kvalitet,
- kapacitet upijanja ulja,
- nivo otpuštanja ulja iz zauljenih granula,
- stabilnost granula u vodi i
- mikrostruktura granula primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM).

U drugom delu faze ekstrudiranja, sačma koja je dala najbolje karakteristike proizvoda u prvom delu eksperimenta, poređena je sa konvencionalnim izvorima proteina, sojinim i ribljim brašnom, proizvodnjom novog seta uzoraka hrane za pastrmku uz praćenje prethodno navedenih parametara ekstrudiranja i određivanjem odabranih parametara fizičkog kvaliteta novih uzoraka.

Najveći deo eksperimentalnog dela doktorske disertacije urađen je na Naučnom institutu za prehrambene tehnologije u Novom Sadu. U fazi vazdušne klasifikacije, izvedeni su postupci usitnjavanja i vazdušne klasifikacije suncokretove sačme u pilot postrojenju za eksperimentalnu proizvodnju hrane za životinje. U istom pilot postrojenju izvedeni su tehnološki postupci usitnjavanja, mešanja, kondicioniranja, ekstrudiranja, sušenja, hlađenja i oblaganja uljem u vakuumu, čijom primenom su proizvedeni uzorci hrane za ribe u okviru faze ekstrudiranja. Hemijske analize korišćenih sirovina i eksperimentalno dobijenih frakcija suncokretove sačme urađene su u hemijskoj laboratoriji, dok su analize fizičkog kvaliteta frakcija suncokretove sačme i proizvedenih uzoraka hrane za ribe urađene u laboratoriji za fizički kvalitet hrane za životinje Istraživačkog centra za tehnologiju hrane za životinje i animalnih proizvoda Naučnog instituta za prehrambene tehnologije u Novom Sadu. Morfologija i struktura poprečnog preseka granula odabranih uzoraka hrane za ribe snimljena je primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa na Prirodno-matematičkom fakultetu, u prostorijama Univerzitetskog centra za elektronsku mikroskopiju Univerziteta u Novom Sadu.

3.1. Materijal

3.1.1. Materijal korišćen u fazi vazdušne klasifikacije

Za potrebe eksperimenta usitnjavanja i vazdušne klasifikacije korišćena je suncokretova sačma (SS) iz uljare „Victoria Oil“ a.d. iz Šida, sa oko 36% proteina izraženo na suvu materiju (SM), koja je po Pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (*Sl. glasnik RS 4/2010, 113/2012, 27/2014, 25/2015, 39/2016 i 54/2017*) deklarirana kao sačma II kvaliteta. Pored suncokretove sačme, iz iste fabrike dopremljeni su i suncokretova ljuska i suncokretovo zrno, koji su korišćeni za potrebe detaljnijeg opisa kvaliteta dobijenih frakcija vazdušnom klasifikacijom. Hemijski sastav korišćene suncokretove sačme prikazan je u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Hemijski sastav polazne suncokretove sačme korišćene u fazi vazdušne klasifikacije

Hemijski sastav	Sadržaj
Vlaga (%)	9,02
Protein (% SM)	35,99
Celuloza (% SM)	19,39
Mast (% SM)	2,13
Pepeo (% SM)	6,75
Bezazotne ekstraktivne materije (% SM)	35,73

3.1.2. Materijal korišćen u fazi ekstrudiranja

Za potrebe ispitivanja mogućnosti upotrebe suncokretove sačme kao potencijalnog proteinskog hraniva u ishrani riba, izvedena su dva odvojena dela proizvodnje ekstrudirane hrane za ribe i ispitivanja fizičkih osobina proizvedenih uzoraka. Za potrebe faze ekstrudiranja nova suncokretova sačma (SS1) sa oko 36% proteina, izraženo na suvu materiju (II kvalitet), dopremljena je iz uljare „Victoria Oil“ a.d. iz Šida. Ova tzv. polazna sačma, korišćena je za proizvodnju dve visokoproteinske frakcije različitog sadržaja proteina (SS2 i SS3), odabranih na osnovu rezultata iz faze vazdušne klasifikacije, a potom su sve tri suncokretove sačme korišćene kao sirovine u prvom delu faze ekstrudiranja. Pored suncokretove sačme SS1 i njenih visokoproteinskih frakcija, u oba dela faze proizvodnje uzoraka za ishranu pastrmke korišćene su i sledeće sirovine:

- pšenica, dopremljena iz fabrike za proizvodnju hrane za ribe DTD „Ribarstvo“ iz Bačkog Jarka,
- riblje brašno (RB), proizvođača „Sardina“ DOO, Postira, Brač, Republika Hrvatska,
- pšenični gluten (PG), proizvođača „Fidelinka skrob“ DOO iz Subotice,
- sojino brašno (SB) SOPRO-TB200, proizvođača „Sojaprotein“ iz Bečeja,

- sojin proteinski koncentrat (SPK) Tradkon SPC500-P, proizvođača „Sojaprotein“ iz Bečeja,
- stočno brašno, mlin „Union SP Commerce“ iz Temerina,
- metionin, proizvođača DSM, Holandija.
- stočna so i kreda, dopremljeni iz firme „TPP Koka Komerc“ iz Čuruga,
- riblje ulje, proizvođača „Sardina“ DOO, Postira, Brač, Republika Hrvatska i
- hladno ceđeno ulje uljane repice, proizvođača „Agrolek“ iz Bača.

Hemijski sastav pšenice i praškastih proteinskih sirovina korišćenih u proizvodnji eksperimentalne hrane za ribe prikazani su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Hemijski sastav pšenice i proteinskih sirovina korišćenih u fazi proizvodnje ekstrudirane hrane za ribe

Hemijski sastav	Pšenica	SS1	RB	PG	SB	SPK
Vlaga (%)	12,63	6,67	4,19	6,99	5,88	6,03
Protein (% SM)	19,90	36,55	62,80	87,60	52,21	65,41
Mast (% SM)	2,02	1,45	9,45	3,80	1,12	0,17
Celuloza (% SM)	3,23	17,80	0,28	0,35	4,35	6,15
Pepeo (% SM)	1,61	7,07	12,60	1,34	25,09	6,61
BEM (% SM)	79,24	37,13	14,87	6,92	17,23	21,67

SS1 – polazna suncokretova sačma; RB – riblje brašno; PG – pšenični gluten; SB – sojino brašno; SPK – sojin proteinski koncentrat; BEM – bezazotne ekstraktivne materije

Za svaki od dva dela faze ekstrudiranja, formulisane su posebne recepture za ishranu pastrmke, tako da nisu bile nutritivno izbalansirane kako se ne bi zamaskirao efekat promenljivog sirovinskog sastava. Pomenuti pristup omogućava jasno uočavanje razlika dobijenih odziva procesa ekstrudiranja kao i fizičkim karakteristikama ekstrudiranih uzoraka usled razlike u njihovom sirovinskom sastavu. Sastavi hrane za pastrmku prvog i drugog dela faze ekstrudiranja prikazani su u tabeli 3.3, odnosno tabeli 3.4.

Tabela 3.3. Sastav hrane za pastrmku u prvom delu faze ekstrudiranja hrane za ribe

Sirovina	Udeo (%)	Udeo u suvoj smeši (%)
Pšenica	10,00	13,36
Riblje Brašno	10,00	13,36
Pšenični gluten	16,00	21,37
Suncokretova sačma (SS1/ SS2/ SS3)	20,00	26,72
Sojin proteinski koncentrat	15,32	20,47
Stočna kreda	1,94	2,59
Stočno brašno	0,75	1,00
Metionin	0,48	0,64
Stočna so	0,37	0,49
Ulje uljane repice	15,28	-
Riblje ulje	9,86	-

SS1 – polazna suncokretova sačma; SS2 i SS3 – odabrane visokoproteinske frakcije suncokretove sačme

Tabela 3.4. Sastav hrane za pastrmku u drugom delu faze ekstrudiranja hrane za ribe

Sirovina	Udeo (%)	Udeo u suvoj smeši (%)
Pšenica	24,00	30,90
Riblje Brašno	28,12	36,21
Odabrana suncokretova sačma (SS/ SB/ RB)	20,00	25,75
Pšenični gluten	5,00	6,44
Stočna kreda	0,54	0,70
Ulje uljane repice	13,60	-
Riblje ulje	8,74	-

SS – odabrana visokoproteinska frakcija suncokretove sačme; SB – sojino brašno; RB – riblje brašno

Udeo proteinskih sirovina od 20% u prvom (suncokretova sačma SS1/SS2/SS3) i drugom (odabrana suncokretova sačma/sojino brašno/riblje brašno) delu faze ekstrudiranja menjan je na osnovu primenjenog dizajna smeše, prikazanog u tabelama 3.6 i 3.7, koji je bio postavljen tako da se dobije po 10 uzoraka u svakom od dva dela ove faze istraživanja, što je bio dovoljan broj uzoraka za adekvatnu procenu uticaja proteinskih sirovina i njihovih kombinacija na parametre ekstrudiranja i fizički kvalitet proizvedene hrane za ribe.

3.2. Metode ispitivanja

3.2.1. Metode ispitivanja korišćene u fazi vazdušne klasifikacije

3.2.1.1. Usitnjavanje suncokretove sačme

Za usitnjavanje suncokretove sačme korišćen je mlin čekićar (ABC Inženjering, Pančevo, Srbija) sa horizontalno postavljenom mlevnom komorom prečnika 31 cm i bočnim, centralnim ulazom materijala u komoru (slika 3.1). Horizontalna osovina primenjenog mlina čekićara imala je 16 čekića, svaki dužine 10 cm, raspoređenih u 4 reda. Rastojanje između čekića bilo je određeno razdvojn timerstvenovima širine 8 mm. Snaga motora mlina bila je 2,2 kW, frekvencija električne mreže 50 Hz a brzina rotiranja osovine sa udaračima bila je 2880 obrtaja u minutu. Mlevna komora mlina čekićara bila je ograničena sitom odgovarajuće veličine otvora. Usitnjavanje materijala u mlevnoj komori je trajalo sve dok čestice materijala nisu svedene na veličinu manju od prečnika otvora. Materijal je nakon usitnjavanja i prolaska kroz otvore sita, sakupljan u posudi ispod mlina. Za usitnjavanje suncokretove sačme korišćena su tri sita sa prečnikom otvora 3, 2 i 1 mm koja su omogućila dobijanje tri suncokretove sačme različite granulacije. Ove sačme su dalje korišćene kao polazni materijal u postupku vazdušne klasifikacije, primenjene u svrhu dobijanja visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme.

U toku usitnjavanja, sa ampermetra mlina očitavana je jačina struje dok je ujedno meren i protok materijala, a potom je izračunata specifična potrošnja energije primenom jednačine (Payne i sar., 2010):

$$Esp = \frac{(I - I_0) \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}}{Q} \quad (3.1)$$

gde su:

E_{sp} – specifična potrošnja energije mlina (kWh/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 naizmenične struje (odnos realne snage koja teče u električno opterećenje prema reaktivnoj snazi),

Q – protok materijala (kg/h).

U zavisnosti od prečnika otvora sita mlina čekićara protok materijala je bio: 306 kg/h za 3 mm, 198 kg/h za 2 mm i 120 kg/h za 1 mm.



Slika 3.1. Mlin čekićar (ABC Inženjering, Pančevo, Srbija) i korišćena sita

3.2.1.2. Vazдушna klasifikacija

Samlevena suncokretova sačma klasifikovana je primenom laboratorijskog, kaskadnog, gravitacionog vazdušnog klasifikatora 1-40MZM (Hosokawa Alpine, Augsburg, Nemačka). Prikaz primenjenog klasifikatora dat je na slici 3.2. U toku klasifikacije varirani su protok vazduha i protok materijala na ulazu u klasifikacionu zonu. Protoka vazduha podešavan je otvaranjem i zatvaranjem glavnog ventila za propuštanje vazduha u klasifikacionu zonu, kao i finim podešavanjem odgovarajućeg ventila na mestu nastajanja potpritiska u uređaju. Protok materijala variran promenom brzine doziranja vibro dozatora. Korišćen je protok vazduha (V) od 5; 8,7 i 12,5 m³/h dok je brzina doziranja bila podešena na 30, 60 i 90% od maksimalne jačine oscilacije vibro dozatora (JOVD).

Kao rezultat klasifikacije, dobijene su dve frakcije – gruba frakcija, u kojoj su dejstvom gravitacije završile čestice koje nisu bile odnete klasifikacionim vazduhom (sakupljene u donjoj posudi), i fina frakcija, u kojoj su čestice koje su odnešene klasifikacionim vazduhom (sakupljene u gornjoj posudi). U toku klasifikacije štopericom je mereno vreme od momenta ulaska materijala u klasifikacionu zonu klasifikatora, posredstvom vibro dozatora, sve do završetka klasifikacije. Izmerene su mase dobijene grube i fine frakcije, i izračunati su protok materijala i prinosi grube i fine frakcije:

$$q = \frac{G + F}{t} \cdot 3,6 \quad (3.2)$$

$$\gamma_G = \frac{G}{G + F} \quad (3.3)$$

$$\gamma_F = \frac{F}{G + F} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{\gamma_G}{\gamma_F} \quad (3.5)$$

gde su:

G – masa grube frakcije (g),

F – masa fine frakcije (g),

t – vreme klasifikacije (s),

q – protok materijala u klasifikacionu zonu (kg/h),

γ_G – prinos grube frakcije,

γ_F – prinos fine frakcije,

R – odnos prinosa grube i fine frakcije.



Slika 3.2. Vazdušni gravitacioni kaskadni klasifikator 1-40MZM
(Hosokawa-Alpine, Augsburg, Nemačka)

3.2.1.3. Hemijske analize

Sadržaj vlage i sirovih proteina polazne suncokretove sačme, dobijenih frakcija suncokretove sačme kombinacijom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije, kao i suncokretove ljuske i suncokretovog jezgra određeni su prema metodama AOAC 934.01 i AOAC 978.04 (AOAC, 2000). Uz sadržaj vlage i sadržaj sirovih proteina, u polaznoj suncokretovoj sačmi je određen i sadržaj sirove celuloze metodom AOAC 978.10, sadržaj sirove masti metodom AOAC 920.39 i sirovog pepela metodom AOAC 942.05 (AOAC, 2000). Hemijske analize rađene su u dva ponavljanja. Sadržaj bezazotnih ekstraktivnih materija polazne suncokretove sačme određen je računski na osnovu metode broj 20 iz Pravilnika o metodama uzimanja uzoraka i metodama fizičkih, hemijskih i mikrobioloških analiza stočne hrane (Službeni list SFRJ br.15/87).

3.2.1.4. Ispitivanje fizičkih karakteristika suncokretove sačme i njenih frakcija dobijenih kombinacijom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije

Nasipna masa polazne i usitnjene suncokretove sačme određena je u tri ponavljanja primenom aparature za određivanje zapreminske mase proizvođača Tonindustrie (West und Goslar, Nemačka) gde je merena masa materijala koji zauzima zapreminu posude od jednog litra, a rezultat je izražen u g/l.

Raspodela veličine čestica polazne suncokretove sačme, usitjenih suncokretovih sačmi, kao i svih dobijenih frakcija vazdušnom klasifikacijom određena je analizom sejanja po metodi ASAE standard S319.3 (ASAE, 2003). Analiza sejanja urađena je korišćenjem laboratorijskog sita (tresilice) Endecotts minor (Endecotts, London, Velika Britanija) gde je amplituda vibracije iznosila 3000 min^{-1} (slika 3.3). Korišćena su sita sejne površine od 314 cm^2 i slog istih sa veličinom otvora sejnih tkiva od 2500, 2000, 1250, 1000, 800, 630, 250, 125 i $63 \mu\text{m}$ sa posudom za prihvatanje materijala na dnu. Vreme prosejavanja iznosilo je 10 min. Prosejavanje svakog uzorka rađeno je u dva ponavljanja.



Slika 3.3 Laboratorijsko sito Endecotts minor (Endecotts, London, Velika Britanija)

Rezultati analize sejanja korišćeni su za izračunavanje geometrijskog srednjeg prečnika čestica (GSP) prema sledećem jednačinama (Pfof i Headly, 1976):

$$GSP = \log^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot \log d'_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3.6)$$

$$d'_i = \sqrt{d_i + d_{i+1}} \quad (3.7)$$

gde su:

GSP – geometrijski srednji prečnik čestice (μm),

d_i – prečnik otvora i -tog sita (μm),

d_i' – geometrijski srednji prečnik čestica na i -tom situ (μm),

w_i – masa materijala na i -tom situ (g).

Kako bi se bolje okarakterisao kvalitet polazne sačme i njenih frakcija dobijenih kombinacijom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije, a time i učinak postupka klasifikacije, rezultati hemijske analize suncokretove ljuske i suncokretovog jezgra poslužili su za izračunavanje udela sadržaja ljuske i jezgra u polaznoj suncokretovoj sačmi kao i u njenim grubim i finim frakcijama. Pod pretpostavkom da je suncokretova sačma sistem koji čine dve komponente, suncokretovo jezgro i ljuska, suma udela ova dva konstituenta suncokretove sačme je 1.

$$J_0 + L_0 = 1; J_G + L_G = 1; J_F + L_F = 1 \quad (3.8)$$

gde su:

J_0 – udeo jezgra u polaznoj suncokretovoj sačmi,

J_G – udeo jezgra u gruboj frakciji suncokretove sačme,

J_F – udeo jezgra u finoj frakciji suncokretove sačme,

L_0 – udeo ljuske u polaznoj suncokretovoj sačmi,

L_G – udeo ljuske u gruboj frakciji suncokretove sačme,

L_F – udeo ljuske u finoj frakciji suncokretove sačme.

Sadržaj proteina suncokretove sačme u direktnoj je vezi sa sadržajem proteina suncokretovog jezgra i ljuske:

$$J_0 \cdot P_J + L_0 \cdot P_L = P_0; J_G \cdot P_J + L_G \cdot P_L = P_G; J_F \cdot P_J + L_F \cdot P_L = P_F \quad (3.9)$$

gde su:

P_J – sadržaj proteina jezgra suncokreta (% SM),

P_L – sadržaj proteina ljuske suncokreta (% SM),

P_0 – sadržaj proteina polazne suncokretove sačme (% SM),

P_G – sadržaj proteina grube frakcije suncokretove sačme (% SM),

P_F – sadržaj proteina fine frakcije suncokretove sačme (% SM).

Kombinovanjem jednačina 3.8 i 3.9, dobile su se jednačine za proračun sadržaja ljuske u polaznoj suncokretovoj sačmi i dobijenim grubim i finim frakcijama:

$$L_0 = \frac{P_K - P_0}{P_K - P_L}; \quad L_G = \frac{P_K - P_G}{P_K - P_L}; \quad L_F = \frac{P_K - P_F}{P_K - P_L} \quad (3.10)$$

U situaciji kada bi separacija suncokretove ljuske od jezgra bila idealna, dobijena frakcija bi imala sadržaj proteina isti kao i sadržaj proteina jezgra suncokreta, a udeo ljuske dobijene idealne frakcije bio bi 0, dok bi udeo jezgra bio 1.

3.2.1.5. CFD model

Model korišćen za numeričku simulaciju je Lagrange-ov model diskretne faze na osnovu pristupa Euler-Lagrange-a, gde se fluidna faza tretira kao kontinualna i parametri se dobijaju rešavanjem Navier-Stokes-ovih jednačina, dok se ponašanje dispergovane faze određuje praćenjem velikog broja čestica kroz polja brzina fluida. Dispergovana faza može da razmenjuje impuls, masu i energiju sa fluidnom fazom a uvedena je pretpostavka da je dispergovana faza dovoljno razblažena i da su interakcije čestica-čestica i uticaji trenja zapremine čestica na fluidnu fazu zanemarljivi (*Elsayed i Lacor, 2010*).

Iako je postojao visok protok materijala u klasifikacionoj komori, kod ovog modela uvedena je pretpostavka je da dispergovana faza zauzima zapreminski mali udeo u fluidu, obično manje od 10-12%, pri čemu je zapreminski udeo odnos između ukupne zapremine čestica i zapremine fluida. Ovakva pretpostavka je prihvatljiva. Putanje pojedinačnih čestica su se obračunavale u određenim vremenskim intervalima. Ovakav pristup čini ovaj model odgovarajućim za modelovanje putanja čestica nošenih fluidom. Protok čestica u industrijskom klasifikatoru je mali (3-5%), i stoga se može bezbedno pretpostaviti da prisustvo čestica ne utiče na polje protoka fluida. U uslovima prisupa Euler-Lagrange-a, jednačina kretanja čestica data je u radu *Zhao-a i saradnika (2006)*.

Koeficijent otpora za sferičnu česticu računat je korišćenjem korelacije koju su razvili *Morsi i Alexander (1972)* kao funkciju relativnog Reynolds-ovog broja Re_p . Jednačina kretanja za čestice se integralila po putanji pojedinačnih čestica. Statistika efikasnosti sakupljanja čestica dobijena je otpuštanjem određenog broja mono-dispergovanih čestica na ulazu klasifikatora i praćenjem broja čestica koje prolaze kroz izlaz. Pretpostavka je bila se da je sudaranje čestica i zidova klasifikatora savršeno elastično (koeficijent restitucije je jednak 1).

Za rešavanje bilansnih jednačina, potrebno je bilo definisati granične uslove: na ulazu vazduha data je njegova brzina, na ulazu materijal broj čestica, i postojala su dva izlaza za dve različite veličine čestica, sa različitim vrednostima pritiska na oba izlaza – na jednom izlazu pritisak je bio 100 001 Pa, a na drugom 95 000 Pa.

Čvrsta faza je definisana sa tri različita protoka praškastog materijala i tri prečnika čestica, a fluidna faza opisana je na ulazu fluida sa tri različita protoka vazduha, što odgovara eksperimentalnoj postavci. Maksimalan broj vremenskih koraka bio je 200 000. Numerički eksperimenti su izvedeni korišćenjem istih parametara kao i eksperimenti na pilot nivou.

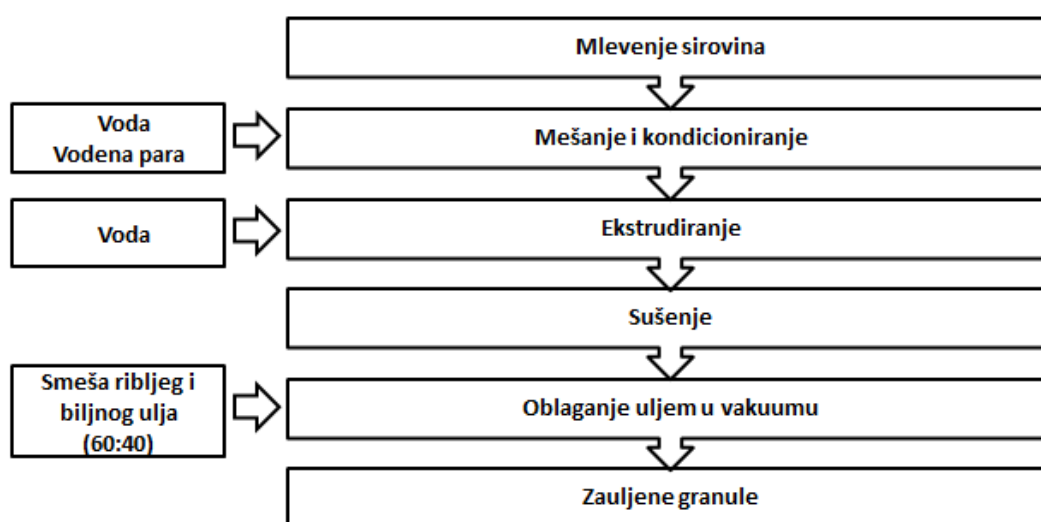
Numerička mreža napravljena je od 109 540 do 111 320 kontrolnih zapremina. Vršena je optimizacija numeričke mreže, a testovima za podešavanje finoće mreže pokazano je da nema promene u rezultatima simulacija za veći broj ćelija u kontrolnoj zapremini. Elementi koji su korišćeni u numeričkoj mreže su tetraedri, dok je veličina elementa bila manja od 10^{-8} m^3 . Funkcija separacije (κ) opisala je kvalitet razdvajanja čestica u procesu klasifikacije a računata je kao odnos udela jezgra i ljuske grube frakcije:

$$\kappa = \frac{J_G}{L_G} \quad (3.11)$$

3.2.2. Metode ispitivanja korišćene u fazi ekstrudiranja

3.2.2.1. Proizvodnja eksperimentalne hrane za ribe

Na slici 3.4 šematski je prikazan korišćeni proces eksperimentalne proizvodnje hrane za ribe.



Slika 3.4. Šematski prikaz postupka eksperimentalne proizvodnje hrane za ribe

Pšenica, polazna suncokretova sačma i njene odabrane frakcije, sojin proteinski koncentrat, stočna kreda i stočna so, samleveni su primenom mlina čekićara (ABC Inženjering, Pančevo, Srbija) sa

sitom prečnika otvora 1 mm. Riblje brašno je prosejano primenom planskog sita sa otvorima od 0,8 mm. Pšenični gluten, sojino brašno i metionin dopremljeni su u praškastom obliku i korišćeni su kao takvi.

Pripremljene sirovine šaržno su mešane u dvoosovinskoj, lopatastoj mešalici (model SLHSJ0.2, Muyang, Yangzhou, Kina) maksimalnog kapaciteta 100 kg po šarži, sa po 14 lopatica na jednoj osovini (Slika 3.5). Mešanje suvih sastojaka trajalo je 90 s, nakon čega je smeša kondicionirana dodatkom vode i vodene pare u cilju postizanja željene vlage materijala od 25%.



Slika 3.5. Dvoosovinska lopatasta mešalica/kondicioner (model SLHSJ0.2, Muyang, Yangzhou, Kina)

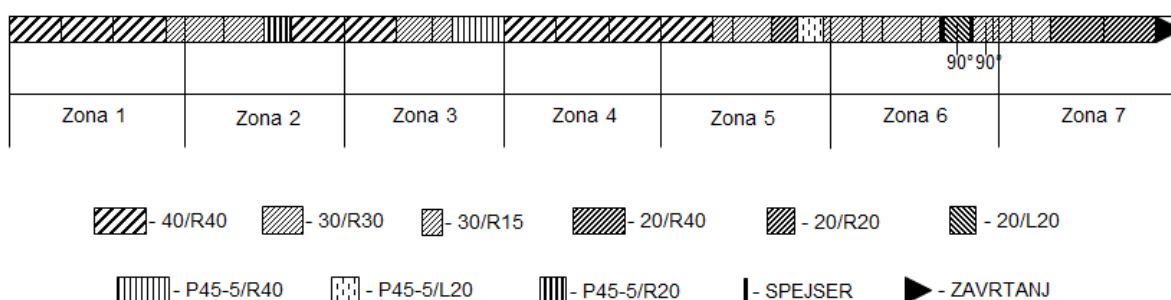
Potrebna količina vode je dodata direktno u mešalicu posredstvom šest dizni postavljenih u dva reda u sredini mešalice tik iznad lopatica. Suvozasícena vodena para, redukovana na pritisak od 2 bar pre uvođenja u mešalicu, takođe je posebnim parnim vodom dozirana direktno u materijal. Za proizvodnju vodene pare korišćen je električni kotao EPK 100 (Pobeda Kotlovi, Beograd, Srbija) maksimalnog kapaciteta 100 kg vodene pare na sat, sa ukupnom instaliranom snagom grejača od 70 kW, radnim pritiskom od 8 bar i radnom temperaturom od 170°C. Unutar mešalice merena je temperatura materijala posredstvom sonde, te je nakon dostizanja temperature od 90°C kondicionirani materijal ispušten momentalno u koš ispod mešalice, odakle je ručno transportovan do dozirnog sistema ekstrudera.

Kondicionirana smeša je ekstrudirana primenom dvopužnog ekstrudera Bühler BTSK 30/28D (Bühler, Uzwil, Švajcarska) sa 7 zona, dužine cevi od 880 mm i odnosa dužina/prečnik = 28 : 1 (Slika 3.6), sa pužnicama koje se međusobno uklapaju i rotiraju u istom smeru.



Slika 3.6. Dvopužni ekstruder BSK 30/28D (Bühler, Uzwil, Švajcarska)

Cev ekstrudera bila je opremljena plaštom za regulaciju temperature zona 2, 3, 4, 6 i 7, dok su senzori za merenje temperature materijala u cevi ekstrudera bili postavljeni u zonama 3 i 6. Regulacija temperature obavljena je primenom dva uređaja za kontrolu temperature koji koriste vodu kao fluid za razmenu toplote (Regloplas P140 smart, Regloplas, St. Gallen, Švajcarska), gde je prvi Regloplas uređaj kontrolisao temperaturu zona 2, 3 i 4, dok je drugi Reglopals korišćen za kontrolu temperatura zona 6 i 7. U cilju eksponencijalnog formiranja pritiska duž cevi ekstrudera od ulaza ka izlazu materijala, korišćena je namenska konfiguracija pužnice, ukupne dužine 878 mm, sastavljena od 33 segmenta različitih dužina, različitih koraka navoja i različite namene, od transportnih elemenata do poligona za mešanje i gnječenje materijala. Šematski prikaz korišćene konfiguracije i segmenata od kojih je formirana, zajedno sa objašnjenjem za oznake segmenata, prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7. Šematski prikaz korišćene konfiguracije pužnica i segmenata od kojih je konfiguracija sastavljena. Slovo R u oznaci segmenta označava element koji transportuje materijal ka napred, slovo L označava element koji transportuje materijal ka nazad. Slovo P označava element za mešanje i gnječenje materijala. Prvi broj u oznaci segmenta daje korak navoja segmenta izražen u milimetrima, dok drugi broj označava dužinu segmenta u milimetrima. Spejser – platna.

Proces ekstrudiranja kontrolisan je preko PLC (engl. *Programmable Logic Controller*) displeja ekstrudera. Sledeći ulazni parametri ekstrudiranja održavani su konstantnim:

- protok materijala u ekstruder – 55 kg/h,
- broj obrtaja puža – 600 obrtaja/min,
- temperatura Regloplasa 1 u zonama 2, 3 i 4 ekstrudera – 95°C,
- temperatura Regloplasa 2 u zonama 6 i 7 ekstrudera – 95°C,
- prečnik otvora matrice – 4 mm (konusni ulaz),
- broj rupa matrice – 1 i
- površina otvora matrice – 12,56 mm².

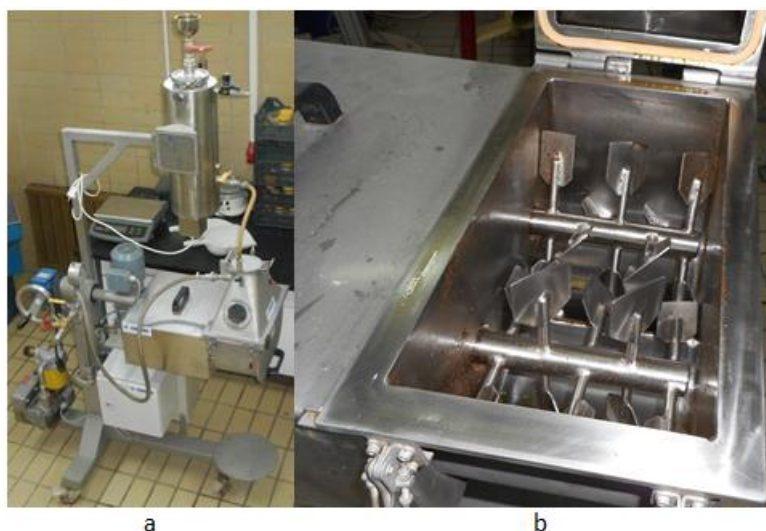
Voda je dodavana direktno u cev ekstrudera posredstvom pumpe za vodu koja čini sastavni deo ekstrudera. Protok vode u cev ekstrudera bio je podešavan za svaki uzorak, tako da je na osnovu poznatog početnog sadržaja vlage kondicioniranog materijala, sadržaj vlage u cevi ekstrudera iznosio 28%. Na izlazu materijala kroz otvor matrice ekstrudera, promenom broja obrtaja noža ekstrudera opremljenog sa 6 oštrica, podešavana je dužina finalnog proizvoda tako da je bila za 10% veća od prečnika dobijenih granula. Tokom ekstrudiranja na PLC displeju ekstrudera praćeni su svi izlazni parametri: temperatura materijala u cevi ekstruderu u zonama 3 i 6, kao i temperatura matrice (°C), pritisak na matrici (bar), opterećenje motora izraženo kao obrtni moment (Nm) i SME – specifična mehanička energija (Wh/kg).

Tople i vlažne granule odmah nakon ekstrudiranja sušene su u šaržnoj sušnici sa prinudnim protokom vazduha (Sutjeska, SFR Jugoslavija) (Slika 3.8a) na 80°C u trajanju od oko 20 min. Hlađenje toplih granula nakon sušenja obavljalo se u šaržnom hladnjaku, uređaju specijalno napravljenom za pilot postrojenje za hranu za životinje Instituta za prehrambene tehnologije u Novom Sadu. Navedeni uređaj sastoji se od ventilatora i tacni sa perforiranim podlogama na kojima se nalaze granule tokom hlađenja (Slika 3.8b). Vreme hlađenja granula bilo je oko 10 min. Postupci sušenja i hlađenja ponavljani su dok suve i hladne granule nisu imale sadržaj vlage između 7 i 8%.

Za zauljivanje ekstrudirane hrane za ribe korišćen je laboratorijski uređaj za oblaganje ekstrudata pod vakuumom, model F-6-RVC (Forberg International AS, Norveška) zapremine komore od 6 l (Slika 3.9).



Slika 3.8. Šaržna sušnica sa prinudnim protokom vazduha (a) i šaržni hladnjak (b)



Slika 3.9. Laboratorijski uređaj za oblaganje granula pod vakuumom, model F-6-RVC (Forberg International AS, Norveška) (a) i unutrašnjost mešalice uređaja nakon zauhljivanja granula (b)

Masa ekstrudiranog materijala po šarži u uređaju za vakuum oblaganje bila je 2,5 kg. Za oblaganja ekstrudata korišćena je smeša ulja uljane repice i ribljeg ulja u odnosu 60 : 40 koja je dodavana u potrebnoj količini, tako da je udeo smeše ulja u finalnom proizvodu bio 25,14% za uzorke iz prvog dela (Tabela 3.3), odnosno 22,34% za uzorke iz drugog dela faze ekstrudiranja (Tabela 3.4). Riblje ulje i ulje uljane repice su bili pomešani u navedenom odnosu, i smeša ulja zagrevana je na 60°C u posudi sa grejačem, koja je bila stavljena pod pritisak od 2 bar. Granule su vakuumirane (0,15 bar) u dvoosovinskoj lopatastoj mešalici uređaja za oblaganje, i ulje je pod pritiskom, posredstvom dizne, naprskavano na njih uz neprekidno mešanje. Nakon što je poslednja količina ulja izašla iz posude, vrednost pritiska se vraćao na atmosferski u trajanju od 90 s. Zauljene granule su čuvane na suvom i hladnom mestu do dalje analize.

3.2.2.2. Hemijske analize

U sirovinama korišćenim za proizvodnju eksperimentalne hrane za ribe, kao i u suvim smešama nakon postupka mešanja, određeni su sadržaj vlage, sirovih proteina, sirove masti, sirove celuloze i sirovog pepela primenom AOAC metoda korišćenim i za hemijsku analizu polazne suncokretove sačme u fazi vazdušne klasifikacije, dok je sadržaj skroba suvih smeša određen prema metodi broj 17, Pravilnika o metodama uzimanja uzoraka i metodama fizičkih, hemijskih i mikrobioloških analiza stočne hrane (*Službeni list SFRJ br.15/87*).

3.2.2.3. Ispitivanje fizičkih osobina hrane za ribe

Pokazatelji fizičkog kvaliteta, nasipna masa, stepen ekspanzije, tvrdoća i otiranje ekstrudata ispitani su na zauljenim uzorcima hrane za ribe 24 časa nakon njihove proizvodnje. Step en otpuštanja ulja hrane za ribe urađen je 48 časova nakon njihove proizvodnje, dok je maksimalna apsorpcija ulja granula ispitana neposredno nakon njihovog sušenja i hlađenja.

3.2.2.3.1. Nasipna masa

Nasipna masa uzoraka hrane za ribe određena je primenom uređaja za određivanje nasipne mase (Tonindustrie, West und Goslar, Nemačka). Merenje nasipne mase rađeno je u 3 ponavljanja.

3.2.2.3.2. Prečnik granula i stepen radijalne ekspanzije

Prečnik 20 granula izmeren je pomičnim, kljunastim merilom (MIB Messzeuge GmbH, Spangenberg, Nemačka). Step en ekspanzije (SE) određen je računski:

$$SE = \frac{d - d_m}{d_m} \cdot 100 \quad (3.12)$$

gde su:

SE – step en ekspanzije (%),

d – prečnik granule (mm),

d_m – prečnik otvora matrice (mm).

3.2.2.3.3. Tvrdća granula

Tvrdća granula određivana je dijametralnom kompresijom na teksturometru proizvođača Stabile Micro Systems Ltd, model TA.HDPlus (Godalming, Velika Britanija), istovremeno sa merenjem njihovih prečnika, na 20 pojedinačnih granula. Pojedinačna granula postavljena je horizontalno na ravno postolje uređaja i potom komprimovana cilindričnom aluminijumskom sondom prečnika 45 mm, pri opterećenju od 30 kg, brzini kretanja sonde 0,16 mm/s i sili aktiviranja od 100 g. Za tvrdću je uzeta vrednost sile (kg) pri kojoj je došlo do najvećeg loma granule, a koja predstavlja maksimum na dobijenoj krivi zavisnosti sile od vremena.

Pored primene teksturometra, tvrdća granula određena je i ručnim KAHL-ovim testerom (Amandus KAHL, Reinbek, Nemačka). Kod ovog uređaja granula je postavljena u ležište testera, a zatim je na nju primenjena sila pomeranjem zavrtnja do momenta pucanja granule, a vrednost sile je očitana sa skale na bočnoj strani testera izraženoj u KAHL jedinicama (*Thomas i van der Poel, 1996*). KAHL tvrdća izražena je kao srednja vrednost 15 merenja.

3.2.2.3.4. Otiranje granula

Stepen otiranja određen je korišćenjem Holmen testera (New Holmen Pellet Tester, NHP 100, TekPro Ltd, Norfolk, Velika Britanija) po metodi *Kraugeruad-a i saradnika (2011)*. Oko 100 g reprezentativnog uzorka, prosejano je na situ sa prečnikom otvora sejnog tkiva od 4,8 mm a potom sipano u perforiranu komoru za granule. Nakon pokretanja uređaja, snažna struja vazduha dovela je do intenzivnog cirkulisanja granula u komori, pri čemu su se granule sudarale međusobno i udarale o zidove komore. Usled toga je dolazilo do njihove abrazije (otiranja) i lomljenja, pri čemu su nastale sitne čestice i prašina koje su propadale kroz otvore na komori. Vreme analize bilo je podešeno na 120 s, nakon čega su granule izvađene iz komore i dodatno prosejavane na situ prečnika otvora sejnog tkiva 4,8 mm. Potom je izmerena masa uzorka preostalih na situ. Rezultat je izražen kao PDI (engl. *Pellet Durability Index*) koji predstavlja procenat granula zaostalih na situ nakon analize, računat primenom formule:

$$PDI = \frac{m_s}{m_0} \cdot 100 \quad (3.18)$$

gde su:

PDI – Pelet Durability Index (engl.) (%),

m_s – masa uzorka zaostala na situ nakon analize (g),

m_0 – početna masa uzorka (g).

3.2.2.3.5. DORIS test

DORIS test je upotrebljen za karakterizaciju kvaliteta hrane za ribe u cilju kvantifikovanja nastanka količine loma i sitne prašine u automatskim hranilicama za ribe. U ovu svrhu primenjen je namenski DORIS tester (Akvasmart, AKVA Group, Bryne, Norveška) i metoda čiji je princip opisan u radu *Aas i saradnika (2011a)*. Oko 300 g granula hrane za ribe, prethodno prosejanih na situ prečnika otvora sejnog tkiva 4,8 mm radi odstranjanja prašine i sitnih delova, stavljeno je u DORIS tester u kome je na njih delovano fizičkom silom. Uzorak je potom prosejan na laboratorijskom situ (tresilici) Retsch AS 200 Control (Retsch GmbH, Haan, Nemačka) u trajanju od 1 min pri amplitudi od 1,5 mm. Korišćen je slog sita prečnika otvora sejnog tkiva od 4000, 3150, 2240 μm i posuda za prihvatanje najsitnijih čestica na dnu. Slog sita je odabran na osnovu dimenzija granula i preporuke proizvođača testera. Test je izvođen u tri ponavljanja za svaki uzorak. Kao rezultat ostaci na situ nakon primene sile udara na granule i njihovog prosejavanja okarakterisani su po sledećoj šemi:

- ostatak uzorka na situ prečnika otvora sejnog tkiva od 4000 μm – cele granule,
- ostatak uzorka na situ prečnika otvora sejnog tkiva od 3150 μm – krupan lom granula,
- ostatak uzorka na situ prečnika otvora sejnog tkiva od 2240 μm – sitan lom granula i
- čestice uzorka propale kroz sito prečnika otvora sejnog tkiva od 2240 μm – prašina.

Izračunata je i DORIS vrednost (DV) koja predstavlja zbir procenata prašine, sitnog i krupnog loma granula.

3.2.2.3.6. Kapacitet upijanja ulja

Kapacitet upijanja ulja (KUU) granula određen je metodom i uređajem razvijenim na Naučnom institutu za prehrambene tehnologije. Oko 100 g smeše ulja uljane repice i ribljeg ulja u odnosu 60 : 40 sipano je u staklenu čašu niske forme od 600 ml. Čaša sa uljem postavljena je u specijalnu vakuum posudu sa grejačem i termostatom (Slika 3.10) i zagrejana na 70°C. Odmereno je oko 50 g uzorka ekstrudirane hrane za ribe, potom uronjeno u zagrejano ulje u čaši, a čaša je postavljena u vakuum posudu, povezanu sa vakuum pumpom. Vakuum posuda je zatvorena i uzorak granula uronjenih u smešu ulja držan je u vakuumu od 0,15 bar u trajanju od 60 s dok je temperatura održavana na približno 60°C. Vreme otpuštanja vakuuma, podešavano laganim otvaranjem ventila na

posudi, bilo je oko 90 s. Nakon što je ponovo uspostavljen atmosferski pritisak, posuda je otvorena, čaša sa uljem i uzorkom izvađena i celokupan sadržaj je izručen preko metalne cediljke sa veličinama otvora oko 1 mm. Zauljene granule su potom stavljene između nekoliko slojeva papirnog ubrusa i višak ulja je polako odstranjen. Masa zauljenih granula sa odstranjenim viškom ulja je izmerena. KUU određen je u dva ponavljanja, i izražen u procentima. Za proračun je korišćena sledeća formula:

$$KUU = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.14)$$

gde su:

KUU – kapacitet upijanja ulja (%),

m_0 – masa uzorka (g),

m_1 – masa uzorka nakon zauljivanja (g).



Slika 3.10. Vakuuum posuda sa grejačem za određivanje kapaciteta upijanja ulja granula

3.2.2.3.7. Nivo otpuštanja ulja iz zauljenih granula

Nivo otpuštanja ulja (OU) iz zauljenih granula određen je modifikovanom metodom opisanom u radu *Sørensen i saradnika (2011)*. Oko 50 g zauljenih granula postavljeno je na prethodno izmerene plastične posude, prečnika 190 mm, sa dva sloja papirnog ubrusa. Tanjir sa uzorkom je postavljen u klima komoru (Binder KBF 240, Binder GmbH, Tuttlingen, Nemačka) gde je držan na 40°C u trajanju od 24 h. Nakon isteka definisanog vremena, tanjir je izvađen iz komore a uzorak je uklonjen sa papira, i izmerena je masa plastičnog tanjira sa papirom. OU je kao rezultat dva ponavljanja izražen u procentima, i izračunat na sledeći način:

$$OU = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (3.15)$$

gde su:

OU – otpuštanje ulja zauljenih granula (%),

m_0 – masa uzorka (g),

m_1 – masa tanjira sa dva sloja papirnog ubrusa pre analize (g),

m_2 – masa tanjira sa dva sloja papirnog ubrusa nakon analize (g).

3.2.2.3.8. Stabilnost granula u vodi

Stabilnost ekstrudirane hrane za ribe u vodi određena je primenom dve metode, dinamičke gravimetrijske i konduktometrijske. U dinamičkoj metodi oko 25 g granula stavljeno je u laboratorijsku čašu od 600 ml u koju je potom dodato 250 ml destilovane vode. Čaša sa uzorkom i vodom stavljena je u klima komoru (Binder KBF 240, Binder GmbH, Tuttlingen, Nemačka) na 23°C u trajanju od 24 h. Nakon natapanja, uzorak je prenet na sito prečnika otvora sejnog tkiva 2,24 mm i sito sa uzorkom postavljeno je na sito tresilicu (Retsch AS200 Control, Retsch, Haan, Nemačka) sa nastavkom za mokro prosejavanje (Slika 3.11). Uzorak je prosejavan pri amplitudi 2 mm u trajanju od 5 min, uz neprekidno prskanje uzorka česmenskom vodom pri maksimalnom protoku, u cilju dodatnog narušavanja fizičke strukture granula. Materijal zaostao na situ nakon prosejavanja prebačen je na plastičnu tacnu odakle je kvantitativno prenet u prethodno osušenu i odmerenu aluminijumsku posudu. Uzorak je sušen na 105°C u trajanju od minimum 18 h. Indeks stabilnosti u vodi (ISV) je izračunat kao odnos preostale suve materije uzorka nakon analize i početne suve materije uzorka:

$$ISV = \frac{m}{m_0 \cdot SM} \cdot 10000 \quad (3.16)$$

gde su:

ISV – indeks stabilnosti u vodi (%),

m_0 – početna masa uzorka (g),

m – masa uzorka nakon analize i sušenja (g),

SM – suva materija početnog uzorka (%).

Određivanje stabilnosti granula u vodi dinamičkom metodom rađeno je u dva ponavljanja dok je suva materija početnog uzorka određena AOAC 934.01 metodom za određivanje sadržaja vlage (AOAC, 2000).



Slika 3.11. Sito tresilica Retsch AS200 Control (Retsch, Haan, Nemačka) sa dodatkom za mokro prosejavanje

U konduktometrijskoj metodi, koja je bazirana na merenju provodljivosti vode sa uronjenim uzorkom ekstrudata, oko 25 g uzorka odmereno je u staklenu čašu niske forme, zapremine od 600 ml. U čašu je usuto 250 ml destilovane vode. Čelija konduktometra (model Lab960, SI Analytics, Mainz, Nemačka) je istog momenta uronjena u sredinu čaše, tako da se dno ćelije nalazilo kod oznake čaše od 100 ml. Korišćeni konduktometar bio je podešen da automatski pohranjuje vrednosti provodljivosti na svakih 20 min u svoju internu memoriju i to u toku 24 h koliko je praćena provodljivost vode sa uronjenim granulama uzorka koje su se polako raspadale. Merenja provodljivosti vršena su pri sobnoj temperaturi. Referentna temperatura prema kojoj je uređaj merio provodljivost vode bila je podešena na 20°C .

3.2.2.3.9. Mikrostruktura granula

Mikrostruktura poprečnog preseka granule odabranih uzoraka eksperimentalno proizvedene hrane za ribe analizirana je primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa JSM-6460LV (SEM, JEOL Ltd., Japan) na 25 kV. Odabrani su uzorci sa maksimalnim udelom promenljive proteinske komponente gde su bile očekivane najuočljivije razlike u mikrostrukturi granula.

Pojedinačna granula odabranog uzorka presečena je skalpelom po širini na pola, a potom je po površini poprečnog preseka raspršen tanak sloj zlata (BAL-TEC SCD 005 sputter coater Balzers, Liechtenstein). Ovako pripremljeni uzorci snimljeni su pri uvećanju od 30 puta.

3.3. Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka

3.3.1. Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka u fazi vazdušne klasifikacije

Eksperimentalni podaci u fazi usitnjavanja i vazdušne klasifikacije suncokretove sačme dobijeni su primenom 3x3x3 potpunog faktorijalnog eksperimentalnog dizajna prema metodi odzivne površine. Ukupno je izvedeno 27 eksperimenata. Nezavisni faktori prikazani su u tabeli 3.5:

Tabela 3.5. Nezavisni eksperimentalni faktori i njihovi nivoi u fazi vazdušne klasifikacije

Eksperimentalni faktor	Simbol	Kodirane vrednosti		
		-1 (nizak)	0 (centralni)	+1 (visok)
POS (mm)	X_1	1	2	3
V (m^3/h)	X_2	5	8.7	12.5
JOVD (% maksimuma)	X_3	30	60	90

POS – prečnik otvora sita; V – protok vazduha; JOVD – jačina oscilacije vibro dozatora

Za definisanje odnosa između parametara usitnjavanja i vazdušne klasifikacije i fizičko-hemijskih osobina dobijenih frakcija primenjena je metoda odzivne površine (engl. *Response Surface Methodology*, RSM). Polinom drugog reda korišćen je za iznalaženje relativnog odnosa između odziva (Y) i promenljivih parametara klasifikacije:

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^2 \beta_{ki} \cdot X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{kii} \cdot X_i^2 + \beta_{k12} \cdot X_1 \cdot X_2, k = 1 - 2 \quad (3.17)$$

gde su: β_0 , β_{ki} , β_{kii} , β_{k12} konstatni regresioni koeficijenti, Y_k : odnos prinosa frakcija (Y_1), sadržaj proteina u gruboj frakciji (Y_2), X_i : POS mlina čekićara (X_1), protok vazduha (X_2) i JOVD čija promena ima uticaj na protok materijala u klasifikator (X_3). Analiza varijanse (ANOVA) korišćena je za iskazivanje značajnih uticaja nezavisnih promenljivih na odzive. Tukey-ev post-hoc HSD test je korišćen za prikazivanje značajnih razlika između fizičkih osobina suncokretovih sačmi nakon mleivanja.

Analiza glavnih komponentata (engl. *Principal Component Analysis*, PCA) primenjena je radi otkrivanja mogućih korelacija između određivanih hemijskih i fizičkih osobina dobijenih frakcija suncokretove sačme kombinacijom usitnjavanja i vazdušne klasifikacije kao i fizičkih osobina uzoraka ekstrudirane hrane za ribe u obe faze eksperimenta i radi grupisanja frakcija suncokretove sačme i uzoraka hrane za u faktorskoj ravni na osnovu hemijskih i fizičkih osobina.

PCA analiza je najzastupljenija multivarijaciona analiza koja otkriva međusobni odnos podataka na način koji najbolje objašnjava njihovu varijansu i predstavlja matematički postupak koji vrši ortogonalnu transformaciju eventualno korelisanih podataka u skup linearno nekorelisanih promenljivih koje se nazivaju glavne komponente. Faktorske koordinate se dobijaju na osnovu linearnih transformacija originalnih promenljivih, tako da prvih nekoliko osnovnih komponenti sadrže veći deo varijabilnosti originalnog seta podataka. Najjednostavnija vrsta PCA deli kovarijansne (odnosno korelacione) matrice na tzv. svojstvene vrednosti (engl. *Eigenvalues*), obično posle centriranja srednjih vrednosti (*i* normalizacije) matrica za svaku promenljivu (Abdi, 2010).

Regresiona analiza, PCA analiza i ANOVA urađene su primenom softverskog paketa Statistica 10.0 (StatSoft Inc., 2010).

3.3.2. Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka u fazi ekstrudiranja

Za postavku faze ekstrudiranja primenjen je dizajn smeše (engl. *Mixture design*). U okviru 20% promenljivog udela sirovine eksperimentalne hrane za pastrmku, menjan je sadržaj proteinskih sirovina: suncokretove sačme, njenih odabranih frakcija, obezmašćenog sojinog brašna i ribljeg brašna. U eksperimentalnim smešama za ishranu pastrmke prvog dela ove faze, menjan je udeo polazne suncokretove sačme i njenih odabranih visokoproteinskih frakcija po dizajnu prikazanom u tabeli 3.6.

U drugom delu faze ekstrudiranja, menjan je sadržaj viskoproteinske frakcije suncokretove sačme, odabrane na osnovu rezultata prvog dela ove faze, sojinog brašna i ribljeg brašna, u okviru promenljivog udela od 20% u finalnom proizvodu. Dizajn smeše korišćen u drugom delu faze ekstrudiranja prikazan je u tabeli 3.7. Uzorci su radi lakšeg identifikovanja opisani skraćenicama upotrebljenih proteinskih sirovina, gde samostalna skraćénica jedne sirovine označava da je ona potpuno prisutna (20%) u promenljivom udelu, dok kod uzoraka sa dve sirovine, prva skraćénica označava da je navedena sirovina prisutna u promenljivom udelu proizvoda sa 13,4%. Uzorci sa podjednakim sadržajem sve tri sirovine u promenljivom udelu proizvoda označeni su sa sve tri skraćénice. Maksimalan udeo promenljivih komponenti u finalnim proizvodima u oba dela

eksperimenta ekstrudiranja koji je iznosio 20%, obezbedio je jasan uvid uticaja koji je svaka od promenljivih komponenti imala na odzive ekstrudiranja i fizičke osobine granula.

Tabela 3.6. Dizajn smeše prvog dela faze ekstrudiranja sa udelima sirovina u finalnom proizvodu nakon zauljivanja

Uzorak	Opis uzorka	Udeo promenljive sirovine		
		SS1	SS2	SS3
1	SS1	20,0	0,0	0,0
2	SS1xSS2	13,4	6,6	0,0
3	SS2xSS1	6,6	13,4	0,0
4	SS2	0,0	20,0	0,0
5	SS2xSS3	0,0	13,4	6,6
6	SS3xSS2	0,0	6,6	13,4
7	SS1xSS3	13,4	0,0	6,6
8	SS3xSS1	6,6	0,0	13,4
9	SS1xSS2xSS3	6,6	6,6	6,6
10	SS3	0,0	0,0	20,0

SS1 – polazna suncokretova sačma sa oko 37% proteina; SS2 i SS3 – visokoproteinske frakcije polazne suncokretove sačme, odabrane na osnovu rezultata faze vazdušne klasifikacije

Tabela 3.7. Dizajn smeše drugog dela faze ekstrudiranja sa udelima sirovina u finalnom proizvodu nakon zauljivanja

Uzorak	Opis uzorka	Udeo promenljive sirovine		
		SS	SB	RB
1	SS	20,0	0,0	0,0
2	SSxSB	13,4	6,6	0,0
3	SBxSS	6,6	13,4	0,0
4	SB	0,0	20,0	0,0
5	SBxRB	0,0	13,4	6,6
6	RBxSB	0,0	6,6	13,4
7	SSxRB	13,4	0,0	6,6
8	RBxSS	6,6	0,0	13,4
9	SSxSBxRB	6,6	6,6	6,6
10	RB	0,0	0,0	20,0

SS – visokoproteinska frakcija polazne suncokretove sačme, odabrane na osnovu rezultata prvog dela faze ekstrudiranja; SB – sojino brašno; RB – riblje brašno

Za definisanje uticaja vrste i udela proteinskih sirovina u smeši na promenu odziva ekstrudiranja u prvom i drugom delu ove faze eksperimenta, korišćena je metoda odzivne površine (engl. *Response Surface Methodology*). Na osnovu eksperimentalnih podataka formirane su funkcije koje pokazuju zavisnost odzivnih veličina od variranih udela promenljivih sirovina u smeši. Za fitovanje eksperimentalnih podataka korišćen je polinom drugog reda (engl. *Second Order Polynom*, SOP):

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^3 \beta_{ki} \cdot X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^3 \beta_{kij} \cdot X_i \cdot X_j \quad (3.18)$$

gde su: β_0 , β_{ki} , β_{kij} , konstatni regresioni koeficijenti, Y_k : temperatura u zoni 3 ekstrudera (Y_1), temperatura u zoni 6 ekstrudera (Y_2), temperatura matrice ekstrudera (Y_3), pritisak matrice ekstrudera (Y_4), obrtni moment elektromotora ekstrudera (Y_5) i specifična mehanička energija (Y_6); X_i : udeo prve proteinske sirovine (X_1), udeo druge proteinske sirovine (X_2) i udeo treće proteinske sirovine (X_3). Za validaciju razvijenih matematičkih modela korišćeni su sledeći statistički testovi: koeficijent determinacije (r^2), hi-kvadrat test (χ^2), koren zbira srednje vrednosti kvadrata odstupanja (engl. *Root Mean Square Error*, RMSE), srednja vrednost greške odstupanja (engl. *Mean Bias Error*, MBE) i srednja vrednost procentnog odstupanja (engl. *Mean Percentage Error*, MPE). Statistički testovi testova χ^2 , RMSE, MBE i MPE, izračunati su primenom sledećih jednačina:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{exp,i} - x_{pre,i})^2}{N - n} \quad (3.19)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_{pre,i} - x_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_{pre,i} - x_{exp,i}) \quad (3.21)$$

$$MPE = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|x_{pre,i} - x_{exp,i}|}{x_{exp,i}} \quad (3.22)$$

gde su: $x_{exp,i}$ – eksperimentalno dobijene vrednosti; $x_{pre,i}$ – vrednosti dobijene računom iz razvijenog SOP modela; N – broj merenja; n – broj konstanti u modelu.

Analiza glavnih komponentata (engl. *Principal Component Analysis*, PCA) primenjena je radi otkrivanja mogućih korelacija između fizičkih osobina uzoraka ekstrudirane hrane za ribe u oba dela eksperimenta i radi njihovog grupisanja u faktorskoj ravni na osnovu dobijenih rezultata. Primenom hijerarhijske klaster analize (engl. *Hierarchical Cluster Analysis*, HCA) uzorci su grupisani na osnovu rezultata fizičkog kvaliteta. Za regresionu i PCA analizu primenjen je softverski paket Statistica 10.0 (*StatSoft Inc., 2010*), dok je za HCA analizu korišćen program NCSS 2007 (*NCSS, 2007*).

Analiza standardne ocene (engl. *Standard Score*, SS) primenjena je radi poređenja fizičkih osobina uzoraka u oba dela faze ekstrudiranja. Rezultati analize standardnih ocena poslužili su za finalnu karakterizaciju ispitivanih proteinskih sirovina. U analizi standardnih ocena primenjuje se tzv.

min-max normalizacija različitih osobina proizvoda, određenih korišćenjem višestrukih eksperimentalnih metoda, pri kojoj se uzorci rangiraju na osnovu odnosa merenih i ekstremnih vrednosti određene veličine. Kako su jedinice i rasponi merenih vrednosti za određene parametre kvaliteta često različiti, podaci za svaku grupu merenih vrednosti nekog parametara moraju da se normalizuju korišćenjem sledećih jednačina (Brlek i sar., 2013):

$$\bar{x}_i = 1 - \frac{\max_i x_i - x_i}{\max_i x_i - \min_i x_i}, \forall_i, \text{ u slučaju kriterijuma "što veće to bolje"} \quad (3.23)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\max_i x_i - x_i}{\max_i x_i - \min_i x_i}, \forall_i, \text{ u slučaju kriterijuma "što manje to bolje"} \quad (3.24)$$

$$\bar{x}_i = \left\{ \begin{array}{l} \min_i x_i \leq x < m, \frac{x_i - \min_i x_i}{m - \min_i x_i} \\ m \leq x_i < n, 1 \\ n \leq x_i < \max_i x_i, 1 - \frac{x_i - n}{\max_i x_i - n} \end{array} \right\}, \forall_i, \text{ za optimalne kriterijume} \quad (3.25)$$

gde su:

x_i – merena vrednost određenog parametra,

m – minimum optimalne vrednosti za određenu merenu veličinu,

n – maksimum optimalne vrednosti za određenu merenu veličinu.

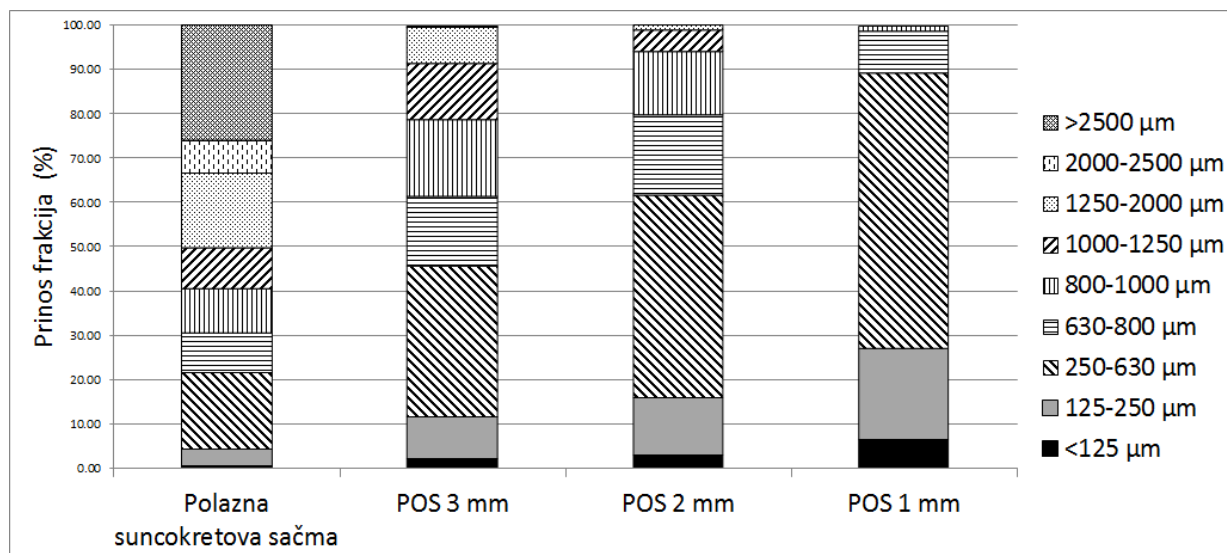
Rezultat primene navedenih jednačina na eksperimentalne rezultate jeste normalizovana ocena (engl. *Score*). Izračunavanjem srednje vrednosti normalizovanih ocena različitih merenih parametara kvaliteta, za svaki posmatrani uzorak dobijena je jedinstvena vrednost koja se naziva standarda ocena koja je predstavljala specifičnu kombinaciju podataka dobijenih različitim mernim metodama, bez ograničenja određene merne jedinice.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Faza vazdušne klasifikacije

4.1.1. Fizičko-hemijske karakteristike polazne i usitnjene suncokretove sačme

Sadržaj vlage suncokretove sačme bio je 9,02%, dok je sadržaj sirovih proteina i celuloze iznosio 32,75% i 17,65%, odnosno 35,99% i 19,39% izraženo na suhu materiju (SM) (Tabela 3.1). Hemijska analiza suncokretove ljuske i suncokretovog jezgra pokazala je da je ljuska sadržala 5,15%, a jezgro 52,00% proteina (SM). Na osnovu sadržaja proteina polazne suncokretove sačme, ljuske i jezgra, primenom jednačina 3.8 i 3.10, izračunato je da je polazna suncokretova sačma sadržala 34,16% ljuske i 65,84% jezgra. Cilj vazdušne klasifikacije bio je da se ukloni što veći deo suncokretove ljuske iz sačme i tako poveća udeo jezgra što bi za rezultat imalo povećanje sadržaja proteina suncokretove sačme. Za razdvajanje ljuske od jezgra korišćen je postupak vazdušne klasifikacije pri kome se frakcije razdvajaju na osnovu različite specifične težine, upravo zbog činjenice da suncokretovo jezgro ima veću specifičnu težinu u odnosu na ljusku. U polaznoj suncokretovoj sačmi bili su prisutni aglomerati jezgra i ljuske, koji nastaju tokom procesa ekstrakcije ulja (*Sredanović, 2011*). Aglomerati su imali oblik velikih grudvi, velike specifične težine, i tokom klasifikacije lako mogu da završe u gruboj frakciji pod dejstvom gravitacione sile i time da smanje efikasnost razdvajanja ljuske od jezgra. Kako bi se razbili aglomerati, suncokretova sačma je usitnjena primenom mlina čekićara. Na slici 4.1 prikazana je raspodela veličina čestica polazne suncokretove sačme i sačme usitnjene primenom čekićara, uz korišćenje sita sa prečnicima otvora (POS) od 3 mm, 2 mm i 1 mm.



Slika 4.1. Raspedela veličine čestica polazne suncokretove sačme i sačme usitnjene primenom mlina čekićara pri korišćenju sita sa različitim prečnicima otvora (POS)

Više od 50% čestica početne suncokretove sačme bilo je veće od 1250 μm. Najveći udeo čestica početne suncokretove sačme (25,89%) bio je veći od 2500 μm usled prisustva aglomerata. Primena mlina čekićara doprinela je potpunom usitnjavanju aglomerata suncokretove sačme, dok je smanjenje POS uticalo na smanjenje veličine čestica suncokretove sačme. Tako, nijedna od tri usitnjene sačme nije imala frakciju čestica većih od 2500 μm. Frakcija čestica veličine između 2000 i 2500 μm nije izdvojena ni za POS 2 mm, kao ni za POS 1 mm, a za POS 3 mm udeo čestica ove frakcije bio je neznatan (0,20%). Usitnjena sačma pri upotrebi sita POS 3 mm imala je udeo od 20,66% frakcije čestica većih od 1000 μm, od čega je 8,42% čestica bilo veličine između 1250 i 2000 μm, i 12,24% čestica dimenzije između 1000 i 1250 μm. Smanjenje POS (2 mm i 1 mm) uticalo je na dodatno usitnjavanje materijala, tako da je primenom sita sa otvorima od 2 mm udeo frakcije čestica većih od 1000 μm iznosio samo oko 6%, dok sačma usitnjena pri upotrebi POS 1 mm nije imala čestice veće od 1000 μm. Smanjenjem POS smanjivao se i udeo čestica veličine između 800 i 1000 μm (17,30% za 3 mm; 14,11% za 2 mm; 1,35% za 1 mm). Udeo frakcije čestica veličine između 630 i 800 μm nije imao ujednačen trend raspodele, i za POS 3 mm iznosio je 15,60%, za 2 mm bio je veći, i iznosio je 18,24%, dok je primena POS 1 mm dovela do smanjenja udela čestica ove frakcije na nivo od 9,43%. Sve tri usitnjene sačme imale su najveći udeo čestica veličine između 250 i 630 μm. Udeo čestica navedene frakcije rastao je sa smanjenjem POS (33,85% za 3 mm, 45,41% za 2 mm i 61,79% za 1 mm), što je očekivano imajući u vidu da se smanjivao udeo krupnijih čestica. Udeo frakcije čestica usitnjenih sačmi veličine između 125 i 250 μm rastao je sa smanjenjem POS (9,74% za 3 mm, 13,02% za 2 mm i 20,64% za 1 mm), kao i frakcija čestica manjih od 125 μm (2,54% za 3 mm; 3,35% za 2 mm; 6,79% za 1 mm).

POS mlina čekićara uticao je značajno na specifičnu potrošnju energije usitnjavanja (SPE), geometrisjski srednji prečnik čestica (GSP) i nasipnu masu (NM) usitnjene suncokretove sačme (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Specifična potrošnja energije usitnjavanja i fizičke osobine polazne i usitnjenih suncokretovih sačmi

POS (mm)	SPE (kWh/t)	GSP (μm)	NM (g/l)
Polazna sačma	-	1127,36 \pm 55,62 ^d	490 \pm 0,00 ^d
3	0,36 \pm 0,01 ^c	573,01 \pm 11,52 ^c	433 \pm 5,77 ^a
2	1,69 \pm 0,03 ^b	453,06 \pm 4,92 ^b	470 \pm 0,00 ^b
1	6,57 \pm 0,20 ^a	342,92 \pm 0,65 ^a	480 \pm 0,00 ^c

POS – prečnik otvora sita; SPE – specifična potrošnja energije; GSP – geometrijski srednji prečnik; NM – nasipna masa

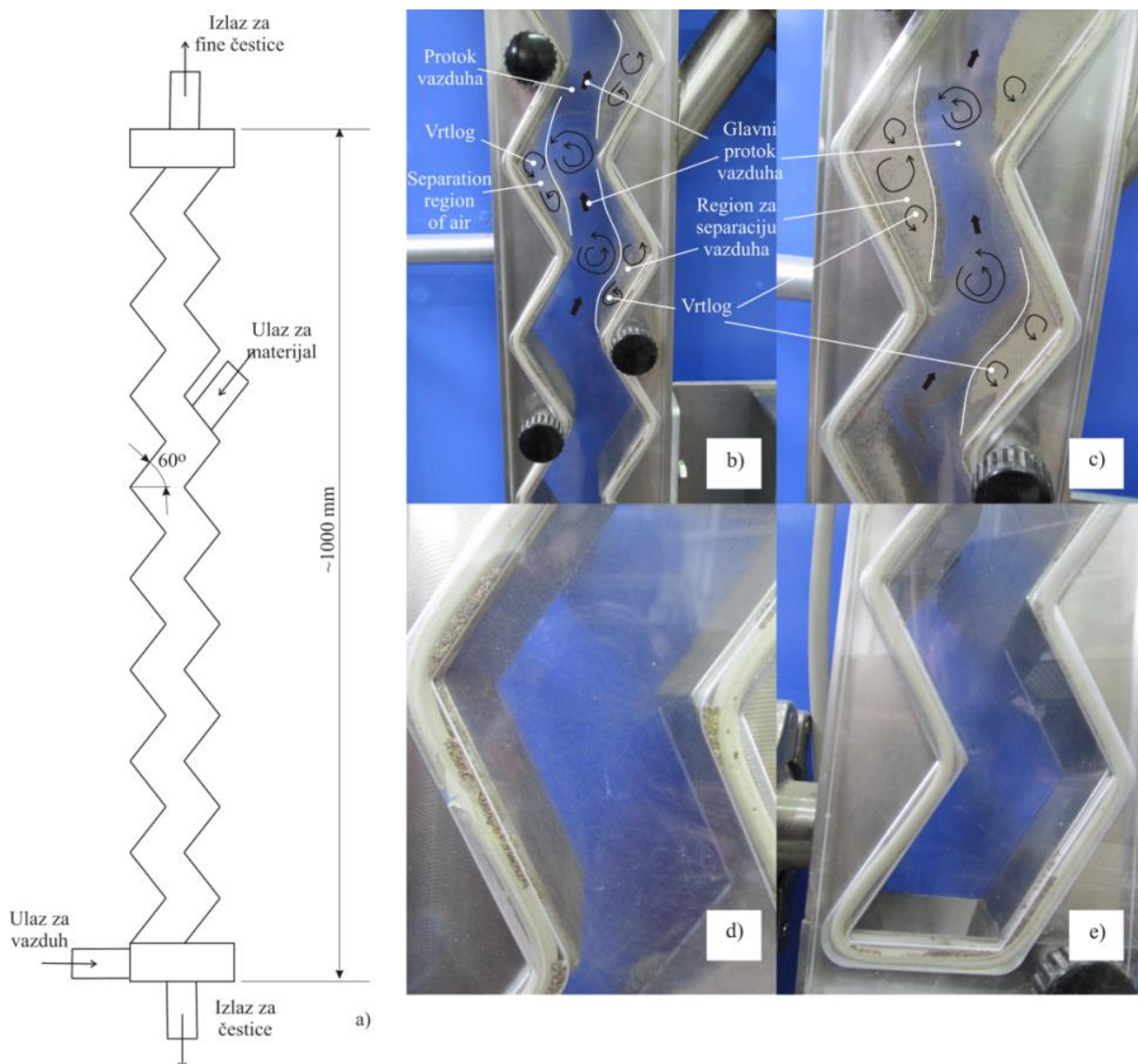
^a Rezultati su prikazani kao srednja vrednost \pm standardna devijacija (n=3); vrednosti označene drugačijim slovom značajno su različite po Tukey post-hoc testu ($p < 0,05$)

Specifična potrošnja energije (SPE) mlina čekićara za usitnjavanje suncokretove sačme povećavala se sa smanjenjem POS (tabela 3.1). Visoka SPE izmerena je prilikom usitnjavanja sačme korišćenjem sita prečnika otvora 1 mm (6,57 kWh/t) dok je SPE čekićara opremljenog sitom otvora 2 mm bila 1,69 kWh/t, odnosno 0,36 kWh/t za sito 3 mm. Linearno smanjenje POS-a pri usitnjavanju suncokretove sačme rezultovalo je eksponencijalnim povećanjem SPE, što je u skladu sa rezultatima istraživanja *Amerah-a i saradnika (2007)* i *Vukmirovića (2015)*.

Geometrijski srednji prečnik čestica (GSP) polazne suncokretove sačme iznosio je 1127,36 μm . Smanjenje POS, značajno je uticalo na smanjenje GSP čestica suncokretove sačme ($p < 0,05$), sa 573,01 μm za 3 mm, na 453,06 μm za 2 mm i 342,92 μm za 1 mm. Ujedno, smanjenjem POS, značajno se povećavala nasipna masa usitnjene suncokretove sačme ($p < 0,05$), kao rezultat intenzivnijeg usitnjavanja i dobijanja materijala sitnije granulacije. Ipak, početna suncokretova sačma je imala najveću nasipnu masu (490,00 g/l) u poređenju sa preostale tri usitnjene suncokretove sačme usled prisustva velikih i gustih aglomerata.

4.1.2. Rezultati vazdušne klasifikacije usitnjene suncokretove sačme

Za klasifikaciju usitnjene suncokretove sačme korišćen je vazdušni cik-cak klasifikator. Šema klasifikacione komore korišćenog cik-cak klasifikatora prikazana je na slici 4.2a. Na slici 4.2b-e prikazan je postupak klasifikacije suncokretove sačme.



Slika 4.2. Cik-cak klasifikator: (a) šema klasifikatora korišćena u numeričkom modelu, (b) i (c) gornji deo klasifikacione zone sa ulazom materijala, (d) srednji deo klasifikacione zone, (e) donji deo klasifikacione zone sa izlazom čestica grube frakcije (Banjac i sar., 2017)

Usitnjeni materijal uvođen je u klasifikacionu komoru kroz ulaz postavljen na gornjem delu komore, dok je klasifikacioni vazduh uvođen sa dna klasifikatora. Cik-cak klasifikator sastojao se iz više delova sa pravougaonim poprečnim presekom, koji su formirali cik-cak kanal međusobnim uklapanjem pod uglom od 120° . Čestice su klasifikovane na osnovu veličine i/ili specifične težine. Krupnije i/ili teže čestice padale su pod dejstvom sile gravitacije i bile izdvojene kao gruba frakcija, dok su sitne i lake čestice bile odnešene klasifikacionim vazduhom u finu frakciju. Glavni tok vazduha u cik-cak kanalu razdvajao se od unutrašnjih zidova klasifikacione komore na mestima isturenih ivica, odnosno mestima gde su se spajali segmenti koji su činili cik-cak kanal. Na gornjem delu posmatrane klasifikacione komore (Slika 4.2b i c), primetno je bilo odvajanje turbulentnih vrtloga od glavnog toka vazduha, u smeru strujanja vazduha. Na slici 4.2b može se videti da je na levoj strani gornjeg dela

komore, suprotno od ulaza materijala, bio formiran mali vrtlog u vidu svetlog oblaka čestica. Nešto veći vrtlog može se videti u srednjem delu klasifikacione komore (slika 4.2d). Stvaranje vrtloga na svakoj kaskadi cik-cak klasifikatora neizbežna je pojava koja dovodi do pada pritiska unutar klasifikacione komore i povećanja potrošnje energije uređaja koji stvara strujanje vazduha kako bi se održao pritisak (*Shapiro i Galperin, 2005; Hagemeyer, 2014*). Putanja čestica koje pod dejstvom sile gravitacije završavaju u gruboj frakciji, može se videti na slici 4.2e, koja prikazuje donji deo klasifikacione komore i mesto ulaza vazduha u nju.

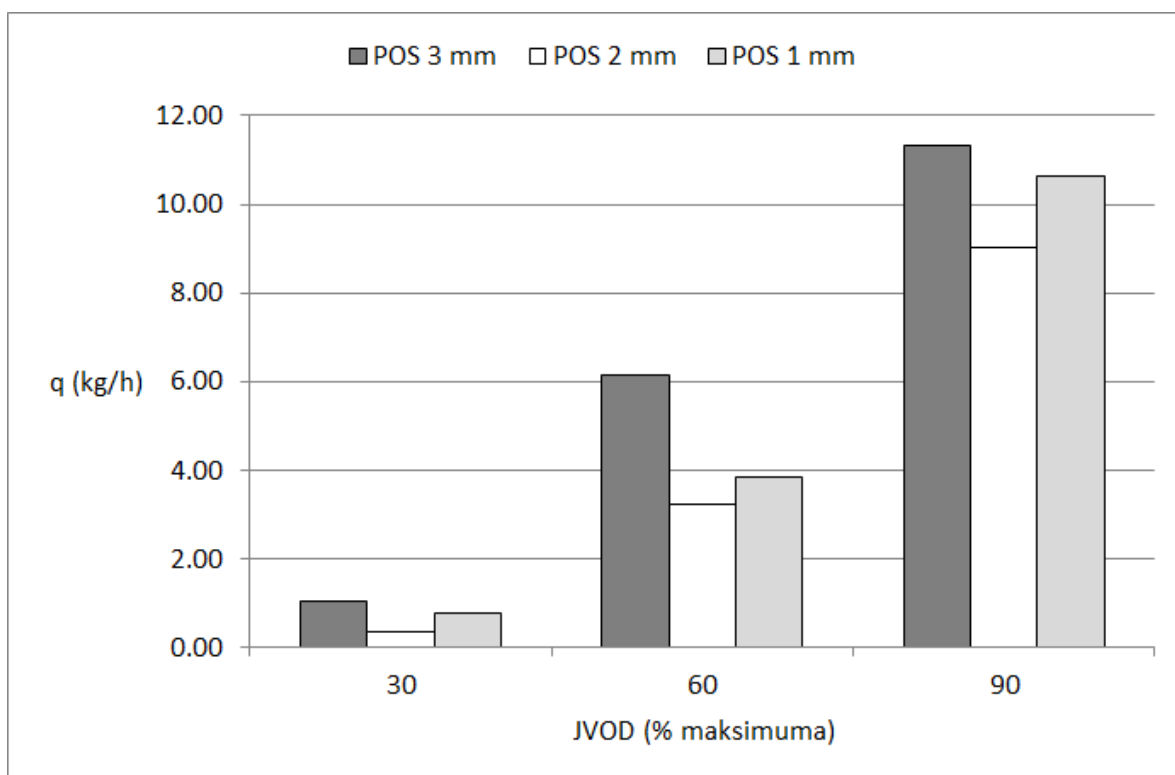
Vazдушna klasifikacija usitnjene suncokretove sačme različite granulacije (POS) i promena parametara vazdušne klasifikacije, protoka vazduha (V) i jačine oscilacija vibro dozatora (JOVD), uz rezultate protoka materijala (q), rezultovali su različitim prinosima grube i fine frakcije usitnjene suncokretove sačme sa različitim sadržajem proteina u dobijenim frakcijama (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Prinos i sadržaj proteina dobijenih frakcija

POS (mm)	V (m ³ /h)	JOVD (% maksimuma)	q (kg/h)	Prinos (%)		Sadržaj proteina (% SM)	
				Gruba frakcija	Fina frakcija	Gruba frakcija	Fina frakcija
3	5	30	0,84	82,71	17,29	35,08	38,36
3	8,7	30	1,19	63,29	36,71	36,19	31,47
3	12,5	30	1,12	28,71	71,29	43,25	30,70
3	5	60	5,09	85,37	14,63	36,49	35,77
3	8,7	60	7,15	63,45	36,55	36,43	34,68
3	12,5	60	6,24	31,05	68,95	42,28	28,95
3	5	90	11,68	88,78	11,12	33,36	38,19
3	8,7	90	10,61	66,67	33,33	36,01	33,47
3	12,5	90	11,70	34,20	65,80	41,49	29,05
2	5	30	0,15	78,95	21,05	36,66	34,28
2	8,7	30	0,56	50,00	50,00	36,49	30,72
2	12,5	30	0,28	23,66	76,34	42,50	30,79
2	5	60	3,45	81,00	19,00	34,28	37,32
2	8,7	60	3,24	51,85	48,15	38,00	29,99
2	12,5	60	3,03	24,75	75,25	41,85	29,98
2	5	90	9,18	84,62	15,38	34,24	37,03
2	8,7	90	8,13	54,63	45,37	36,74	30,72
2	12,5	90	9,71	23,53	76,47	41,73	31,05
1	5	30	0,66	63,69	36,31	35,88	36,43
1	8,7	30	0,88	33,01	66,99	42,97	31,13
1	12,5	30	0,74	11,50	88,50	50,90	32,21
1	5	60	3,47	69,09	30,91	35,78	36,14
1	8,7	60	4,27	33,98	66,02	43,48	28,21
1	12,5	60	3,82	10,88	89,12	50,88	32,50
1	5	90	10,72	75,47	24,53	36,64	35,36
1	8,7	90	10,81	35,50	64,50	41,23	32,88
1	12,5	90	10,41	9,69	90,31	49,46	32,43

POS – prečnik otvora sita; V – protok vazduha; JOVD – jačina oscilacije vibro dozatora; q – protok materijala

Protok vazduha podešavan je promenom položaja ventila na vazdušnom klasifikatoru. Na protok materijala direktan uticaj imala je jačina oscilacije vibracionog dozatora (JOVD) klasifikatora, koju je bilo moguće menjati u opsegu od 0% (bez oscilacija), pa do maksimalnih 100%. Za isti JOVD, protok materijala je varirao sa variranjem granulacije sačme. Tako su za JOVD od 30% protoci materijala bili u opsegu 0,19 – 0,84 kg/h za POS 3 mm, 0,15 – 0,56 kg/h za POS 2 mm i 0,66 – 0,88 kg/h za POS 1 mm. Za JOVD od 60%, protoci materijala bili su u opsegu od 5,09 – 6,24 kg/h za POS 3 mm, 3,03 – 3,45 kg/h za POS 2 mm i 3,47 – 4,27 kg/h za POS 1 mm. Protoci materijala bili su najveći pri JOVD od 90%, što je i bilo očekivano, i kretali su se u opsezima 10,61 – 11,70 kg/h za POS 3 mm, 8,13 – 9,71 kg/h za POS 2 mm i 10,41 – 10,81 kg/h za POS 1 mm. Srednje vrednosti protoka materijala za različite POS i JOVD prikazane su na slici 4.3.



Slika 4.3. Srednje vrednosti protoka suncokretove sačme (q) usitnjene na čekićaru opremljenim sitima sa različitim prečnicima otvora (POS) i pri različitoj jačini oscilacije vibro dozatora (JOVD)

Za istu postavku JOVD, a različit POS, najniže vrednosti protoka materijala u klasifikacionu komoru ostvarene su kod sačme usitnjene pri POS od 2 mm (0,33 kg/h za JOVD od 30%; 0,324 kg/h za JOVD od 60% i 9,01 kg/h za JOVD od 90%). Za usitnjenu sačmu pri POS od 1 mm, relativno povećanje protoka materijala u poređenju sa sačmom usitnjenoj pri POS 2 mm iznosilo je 130% (JOVD od 30%), 18,9% (JOVD od 60%) i 18,2% za JOVD od 90%. Najviše vrednosti protoka materijala bile su pri klasifikaciji sačme usitnjene pri POS od 3 mm. Pri postavkama JOVD od 30 i 60%, vrednosti protoka materijala bile su 1,05 kg/h i 6,16 kg/h, što je za 218% odnosno 91% veće od protoka usitnjene sačme

pri POS od 2 mm. Srednja vrednost protoka materijala na 90% maksimuma JOVD za sačmu usitnjenu pri POS od 3 mm iznosila je 11,03 kg/h. Razlog značajno viših vrednosti protoka materijala pri klasifikaciji sačme usitnjene pri POS 3 mm jeste viši sadržaj krupnijih čestica (Slika 4.1) i značajno veći GSP čestica ($p < 0,05$) (Tabela 4.1), što je uticalo na bolju protočnost materijala (Fürl i Hoffmann, 2013).

Prinos frakcija kod suncokretovih sačmi usitljenih primenom istog POS menjao se sa promenom protoka vazduha i protoka materijala. Povećanje protoka vazduha dovelo je do smanjenja prinosa grube frakcije i povećanja prinosa fine frakcije pri istoj JOVD i istom POS. Za sačmu usitnjenu čekićarom sa sitom prečnika otvora 3 mm, prinos grube frakcije bio je u opsegu od 82,71 do 88,78% pri protoku vazduha od 5 m³/h. Povećanjem protoka vazduha na 8,7 m³/h, povećana je tačka razdvajanja, usled čega je veći broj prisutnih čestica bio odnošen vazduhom u finu frakciju, te se prinos grube frakcije smanjio i bio je u opsegu od 63,45% do 66,67%. Dalje povećanje protoka vazduha na 12,5 m³/h dovelo je pada prinosa grube frakcije koji je varirao od 28,71% do 34,20% zavisno od JOVD. Veći stepen usitjenosti suncokretove sačme kao posledica smanjenja POS sa 3 na 2 mm, smanjilo je prinose grubih frakcija pri istim kombinacijama protoka vazduha i JOVD. Prinosi grubih frakcija suncokretove sačme usitnjene čekićarom sa sitom prečnika otvora 2 mm bili su u opsegu 78,85 – 84,62% za protok vazduha 5 m³/h, 50,00 – 54,63 za protok vazduha 8,7 m³/h i 23,66 – 24,75% za protok vazduha od 12,5 m³/h. Dalje smanjenje granulacije usitnjene sačme, dobijene pri POS od 1 mm, rezultovalo je najnižim prinosima grube frakcije i najvišim prinosima fine frakcije u poređenju sa ostalim POS, za iste kombinacije protoka vazduha i JOVD. Prinosi grubih frakcija za sačmu usitnjenu na čekićaru sa POS 1 mm bili su u rasponu 63,69 – 75,47% za protok vazduha 5 m³/h, 33,01 – 35,50 za protok vazduha 8,7 m³/h i 9,69 – 11,50% za protok vazduha od 12,5 m³/h.

U okviru isto usitjenih suncokretovih sačmi i istih protoka vazduha, povećanje JOVD, u gotovo svim slučajevima dovelo je do povećanja prinosa grube i smanjenja prinosa fine frakcije, osim kod grubih frakcija sačme usitnjene pri POS 1 mm i protoku vazduha od 12,5 m³/h, gde se prinos grube frakcije smanjivao sa povećanjem JOVD. Pri višim vrednostima JOVD, protoci materijala su bili viši, što je znači da veća količina materijala ulazi u klasifikacionu zonu. U takvim uslovima, bio je veći broj čestica koje su se odbijale o unutrašnjost zidova cik-cak kanala, i vazduh nije uspeo da odnese sve čestice u finu frakciju, koje bi inače pri malim protocima materijala tamo i završile. Takve čestice neizbežno su padale pod dejstvom sile gravitacije i završavale u gruboj frakciji. Ujedno, sa više materijala u klasifikacionoj komori, interakcije između čestica su bile izraženije što je zajedno sa promenama pritiska na različitim mestima u klasifikacionoj komori moglo uticati da fine čestice završe u gruboj frakciji (Johansson i Evertsson, 2012). Oštrina i efikasnost razdvajanja na taj način su

bili umanjeni. Ovi rezultati su u skladu sa tvrdnjom *Fürchner i Zampini-a (2012)* prema kojoj se izuzetno oštro razdvajanje može postići isključivo pri manjim protocima materijala.

Kako je suncokretova jezgra, bogato proteinom, gušće i poseduje veću masu od suncokretove ljuske, očekivani rezultat klasifikacije usitnjene suncokretove sačme korišćenim sistemom bio bi da nepoželjna ljuska bude odnešena vazduhom, a da delovi jezgra pod dejstvom gravitacione sile završile u gruboj frakciji. Gruba frakcija bi tako imala povećan sadržaj proteina u odnosu na početnu suncokretovu sačmu. Rezultati hemijske analize dobijenih grubih i finih frakcija pokazali su da je do povećanja sadržaja proteina u grubim frakcijama došlo pri protocima vazduha od 8,7 i 12,5 m³/h, pri sva tri korišćena sita i pri svim vrednostima JOVD, kao i pri protoku vazduha od 5 m³/h pri JOVD od 90%. Protok vazduha od 5 m³/h bio je suviše nizak da bi se dobilo jasno razdvajanje suncokretovog jezgra i ljuske, pri JOVD od 30% i 60%. Pri prethodno pomenutim parametrima, pored najsitnijih čestica ljuske, u finoj frakciji završile su i čestice prašine jezgra bogate proteinom, usled čega je došlo do povećanja sadržaja proteina fine frakcije. Relativno povećanje sadržaja proteina u finim frakcijama dobijenim pri protoku vazduha 5 m³/h i JOVD od 30% i 60% prosečno je iznosilo 6,6% za POS 3 mm, 3,7% za POS 2 mm i svega 0,8% za POS 1 mm. Nasuprot ovim vrednostima, relativna povećanja sadržaja proteina u svim grubim frakcijama bila su u opsegu od svega 0,5% (POS 3 mm, 8,7 m³/h, JOVD od 90%), pa sve do 41,0% (POS 1 mm, 12,5 m³/h, JOVD od 30%).

Primenom drugačije konstrukcije sistema vazdušne klasifikacije *Laudadio i saradnici (2013)* su, za razliku od rezultata istraživanja ove disertacije, dobili fine frakcije (čestice manje od 18 μm) usitnjene suncokretove sačme koje su imale veći sadržaj proteina u odnosu na polaznu sačmu, u prinosima u rasponu 27,90 – 87,90%, uz relativno povećanje koje je bilo u opsegu od svega 1,8 pa do 19,4%. Fine frakcije sa povećanim sadržajem proteina dobijaju se i pri vazdušnoj klasifikaciji usitnjenih frakcija suncokretove sačme, prethodno dobijenih prosejavanjem, u patentnom rešenju *Draganova (2015)*. Ipak u ovom patentnom rešenju, vazdušna klasifikacija zapravo predstavlja postupak vazdušnog prosejavanja, u kojem se iznad vazduhom fluidizovanog materijala nalazi sito otvora prečnika 800 μm, a prolaz kroz otvore sita je materijal obogaćen u sadržaju proteina. Centrifugalnom separacijom suncokretove sačme, usitnjene primenom različitih uređaja, dobijeni su visokoproteinske frakcije različitog sadržaja proteina i prinosa u istraživanju *Sredanović (2007)*. Povećanje sadržaja proteina u odgovarajućim frakcijama se razlikovalo od primenjenog uređaja za usitnjavanje. Mlin čekičar se u ovom istraživanju pokazao kao najmanje efikasno rešenje, gde su se od polazne sačme sa 38,3% proteina dobile frakcije sa 41,30, 40,60 i 39,90% sirovih proteina (SM) na sitima sa prečnikom otvora od 1,5; 1,8 i 2,0 mm, što su bila relativna povećanja sadržaja proteina redom 7,83%, 6,01% i 4,18%. Udarna drobilica pokazala se kao efikasnije sredstvo za usitnjavanje sačme pri čemu su se dobile frakcije sadržaja proteina od 40,10 do 43,10% na SM (u prinosu 54,80 – 68,40%), što čini relativno povećanje sadržaja proteina od 5,9 – 9,8% u odnosu na polaznu

sačmu. Najbolji rezultat istraživanja *Sredanović (2007)* postignut je centrifugalnom separacijom sačme usitnjene na kugličnom mlinu i primenom sita centrifugalnog separatora sa otvorima prečnika 0,8 mm, gde se od početne sačme sa 38,2% proteina dobilo 70,2% prinosa frakcije sa 44,3% (SM) sirovih proteina. Ovaj sadržaj proteina nadmašen je primenom postupka usitnjavanja suncokretove sačme na mlinu čekićaru i vazdušnom klasifikacijom cik-cak vazdušnim klasifikatorom u okviru ove disertacije, samo pri klasifikaciji sačme usitnjene pri POS 1 mm i protoku vazduha od 12,5 m³/h, gde su dobijene grube frakcije sadržaja proteina od 50,90% na SM (JOVD od 30%), 50,88% na SM (JOVD od 60%) i 49,46% na SM (JOVD od 90%), ali u značajno manjem prinosu (redom 11,50, 10,88 i 9,69%).

Kako su rezultati faze vazdušne klasifikacije pokazali da je u svega 6 od 27 finih frakcija došlo do povećanja sadržaja proteina, sa relativnim povećanjem od 0,42 do 6,59%, fine frakcije nisu uzete u dalje razmatranje u okviru ove faze istraživanja. Za potrebe optimizacije procesa usitnjavanja i vazdušne klasifikacije u cilju dobijanja visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme, u razmatranje su samo uzeti rezultati koji su se odnosili na dobijene grube frakcije.

4.1.3. Optimizacija postupaka usitnjavanja i vazdušne klasifikacije

Za potrebe optimizacije postupka suvog fracionisanja suncokretove sačme, grube frakcije suncokretove sačme dobijene vazdušnom klasifikacijom okarakterisane su geometrijskim srednjim prečnikom (GSP), kao i udelom suncokretovog jezgra (J_G) i suncokretove ljuske (L_G). Uvedena je i nova bezdimenziona veličina, odnos prinosa frakcija (R), izračunata primenom jednačine 3.5. Osobine grubih frakcija korišćenih u optimizaciji postupka usitnjavanja i vazdušne klasifikacije suncokretove sačme prikazane su u tabeli 4.3. Za potrebe opisivanja odnosa između parametara usitnjavanja i klasifikacije i fizičko-hemijskih osobina koje opisuju grube frakcije, svih 27 frakcija podvrgnute su analizi glavnih komponenti (engl. *Principal Components Analysis*, PCA). Na grafiku prikazanom na slici 4.4 vidi se uspešno razdvajanje 27 grubih frakcija na osnovu četiri promenljiva parametra kvaliteta: sadržaj proteina (P_G), udeo suncokretovog jezgra (J_G), udeo suncokretove ljuske (L_G) i odnos prinosa frakcija (R). Kvalitativni rezultati PCA analize pokazali su da su prve dve glavne komponente zajedno opisale 92,55% ukupne varijanse, što može da se smatra dovoljnim za prikazivanje celog seta eksperimentalnih podataka. Prva glavna komponenta opisala je 76,01% a druga 16,54% glavne varijanse.

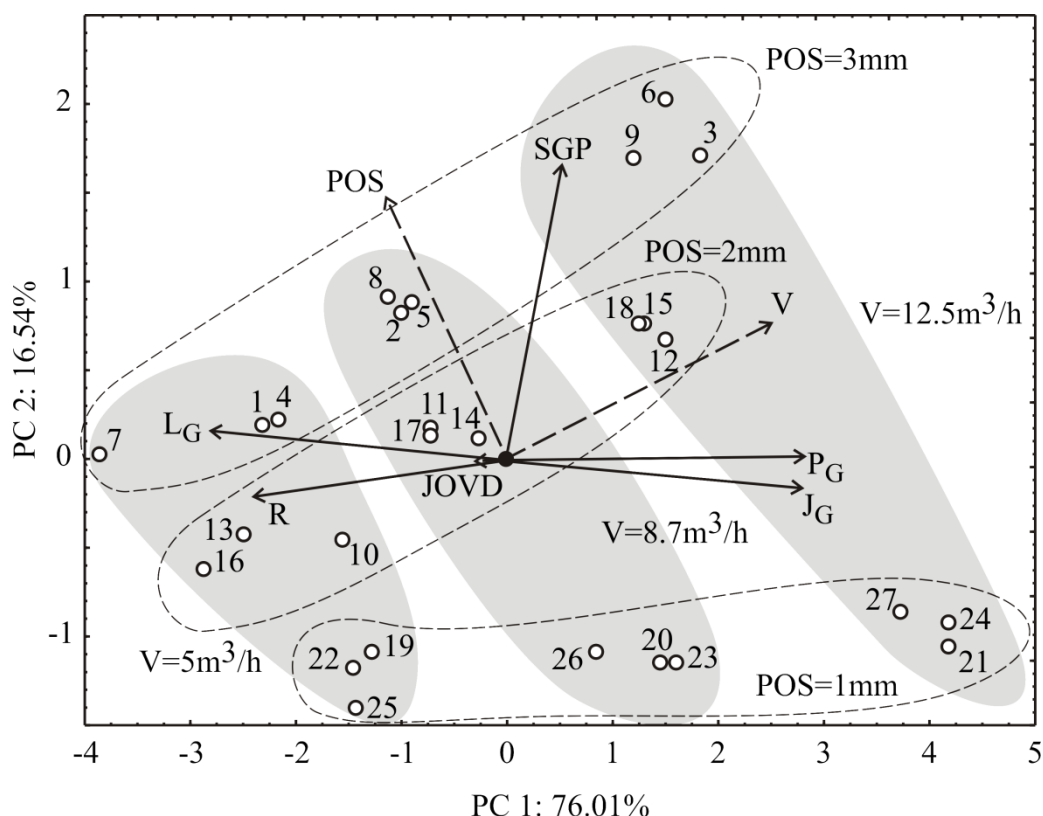
Tabela 4.3. Fizičko-hemijske karakteristike grubih frakcija suncokretove sačme dobijenih usitnjavanjem i vazдушnom klasifikacijom

Broj frakcije	POS (mm)	V (m ³ /h)	JOVD (% maksimuma)	GSP (μm)	P _G (% SM)	J _G (%)	L _G (%)	R
1	3	5	30	678,40	35,08	63,89	36,11	4,78
2	3	8,7	30	769,51	36,19	66,25	33,75	1,72
3	3	12,5	30	984,31	43,25	81,33	18,67	0,40
4	3	5	60	709,16	36,49	66,90	33,10	5,84
5	3	8,7	60	782,70	36,43	66,78	33,22	1,74
6	3	12,5	60	1028,92	42,28	79,25	20,75	0,45
7	3	5	90	665,79	33,36	60,22	39,78	7,98
8	3	8,7	90	787,01	36,01	65,86	34,14	2,00
9	3	12,5	90	963,63	41,49	77,56	22,44	0,52
10	2	5	30	570,47	36,66	67,26	32,74	3,75
11	2	8,7	30	651,93	36,49	66,90	33,10	1,00
12	2	12,5	30	792,92	42,50	79,72	20,28	0,31
13	2	5	60	558,83	34,28	62,17	37,83	4,26
14	2	8,7	60	658,72	38,00	70,12	29,88	1,08
15	2	12,5	60	802,26	41,85	78,33	21,67	0,33
16	2	5	90	536,66	34,24	62,10	37,90	5,50
17	2	8,7	90	648,52	36,74	67,44	32,56	1,20
18	2	12,5	90	801,38	41,73	78,08	21,92	0,31
19	1	5	30	431,32	35,88	65,60	34,40	1,75
20	1	8,7	30	481,62	42,97	80,73	19,27	0,49
21	1	12,5	30	575,01	50,90	97,65	2,35	0,13
22	1	5	60	420,46	35,78	65,38	34,62	2,24
23	1	8,7	60	487,66	43,48	81,82	18,18	0,51
24	1	12,5	60	598,77	50,88	97,61	2,39	0,12
25	1	5	90	398,59	36,64	67,22	32,78	3,08
26	1	8,7	90	476,08	41,23	77,01	22,99	0,55
27	1	12,5	90	595,64	49,46	94,59	5,41	0,11

POS – prečnik otvora sita; V – protok vazduha; JOVD – jačina oscilacije vibro dozatora; GSP – geometrijski srednji prečnik; P_G – sadržaj proteina grube frakcije; J_G – udeo jezgra u gruboj frakciji; L_G – udeo ljuske u gruboj frakciji; R – odnos grube i fine frakcije;

Na GSP grubih frakcija uticao je intenzitet usitnjavanja i protok vazduha. Smanjenje POS uticalo je na smanjenje GSP pri istim kombinacijama protoka vazduha i JOVD. U okviru sačme usitnjene pri istom POS, GSP čestica je imao značajnije promene sa promenom protoka vazduha nego promenom JOVD. Srednje vrednosti GSP dobijenih grubih frakcija sačme usitnjene na čekičaru opremljenim sitom POS 3 mm bile su: 684,45 μm za frakcije dobijene pri protoku vazduha 5 m³/h, 779,74 μm za frakcije dobijene pri protoku vazduha 8,7 m³/h i 992,29 μm za frakcije dobijene pri

protoku vazduha $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Srednje vrednosti GSP grubih frakcija kada je korišćeno sito POS 2 mm iznosile su: $555,32 \mu\text{m}$ za frakcije dobijene pri protoku vazduha $5 \text{ m}^3/\text{h}$, $653,06 \mu\text{m}$ za frakcije dobijene pri protoku vazduha $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$ i $798,85 \mu\text{m}$ za frakcije dobijene pri protoku vazduha $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Najintenzivnije usitnjavanje suncokretove sačme (POS – 1 mm) uticalo je da se dobiju najmanje vrednosti GSP grubih frakcija pri istim protocima vazduha, i čije su prosečne vrednosti iznosile: $416,79 \mu\text{m}$ za frakcije dobijene pri protoku vazduha $5 \text{ m}^3/\text{h}$, $481,79 \mu\text{m}$ za frakcije dobijene pri protoku vazduha $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$ i $589,81 \mu\text{m}$ za frakcije dobijene pri protoku vazduha $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Porast protoka vazduha uticao je na povećanje GSP za sačme usitnjene čekićarom pri situ istog POS. Porast GSP grube frakcije suncokretove sačme je u proseku iznosio 15,7%, pri povećanju protoka vazduha sa 5 na $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$, i 24,0% kada je protok povećan sa $8,7$ na $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$, što je uticalo na efikasnost razdvajanja. Na tačku razdvajanja utiče se promenom parametara vazdušne klasifikacije (Fürchner i Zampini, 2012), a čestice većih dimenzija od tačke razdvajanja završavaju u gruboj frakciji (Dijkink i sar., 2007). Kako se GSP grubih frakcija povećavao sa povećanjem protoka vazduha, povećavala se i tačka razdvajanja. Smanjenje GSP grubih frakcija intenzivnijim usitnjavanjem, uticalo je na smanjenje tačke razdvajanja.



Slika 4.4. Biplot grafik vazdušne klasifikacije usitnjene suncokretove sačme cik-cak vazdušnim klasifikatorom: GSP – geometrijski srednji prečnik čestica; JOVD – jačina oscilacije vibro dozatora; J_G – udeo jezgra u gruboj frakciji; L_G – udeo ljuske u gruboj frakciji; POS – prečnik otvora sita; P_G – sadržaj proteina grube frakcije; R – odnos prinosa grube i fine frakcije; V – protok vazduha

Protok vazduha od $5 \text{ m}^3/\text{h}$ nije bio dovoljno efikasan za dobijanje grubih frakcija povećanog sadržaja proteina, tj. za uspešno razdvajanje čestica bogatih proteinom od čestica bogatih celulozom. Ovaj rezultat može se videti i na slici 4.4 gde se na levoj strani grafika nalaze frakcije dobijene pri protoku vazduha od $5 \text{ m}^3/\text{h}$, koje odlikuje nizak sadržaj proteina, i mali udeo jezgra. Za sva tri korišćena sita mlina čekićara, povećanje protoka vazduha dovelo je do povećanja sadržaja proteina grube frakcije pri istoj JOVD. Sadržaj proteina grubih frakcija suncokretove sačme usitnjene uz upotrebu sita POS 3 mm, i klasifikovane pri protoku vazduha od $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$, kretao se u opsegu od 36,01 – 36,43% na SM (bez obzira na JOVD), i bio je neznatno veći u odnosu na sadržaj proteina polazne sačme. Smanjenje POS pri istom protoku vazduha od $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$ uticalo je na povećanje sadržaja proteina grubih frakcija. Najveće povećanje sadržaja proteina pri protoku od $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$ postignuto je kada je suncokretova sačma bila usitnjena na čekićaru pri POS 1 mm, gde su dobijene frakcije imale 42,97%, 43,48% i 41,23% proteina (na SM) za vrednosti JOVD od 30%, 60% i 90%.

Povećanje protoka vazduha na $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ rezultovalo je grubim frakcijama sa najvišim porastom sadržaja proteina, u poređenju sa rezultatima postignutim pri protocima vazduha od $5 \text{ m}^3/\text{h}$ i $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$. Dobijene frakcije koje su imale najviši sadržaj proteina nalaze se na desnoj strani PCA grafika (Slika 4.4). Smanjenje POS sa 3 na 2 mm, pri protoku od $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ i za isti JOVD, dovelo je do neznatnog smanjenja u sadržaju proteina dobijenih grubih frakcija. Frakcije sa najvišim vrednostima sadržaja proteina dobijene su klasifikacijom sačme usitnjene pri POS od 1 mm i protoku vazduha od $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$, koji su iznosili 50,90%, 50,88% i 49,46% (SM), za JOVD od 30%, 60% i 90%. Frakcije suncokretove sačme dobijene usitnjavanjem pri upotrebi najvećeg POS (3 mm) nalaze se na gornjoj strani PCA grafika (Slika 4.4), na sredini grafika se nalaze frakcije sačme dobijene klasifikacijom sačme usitnjene pri upotrebi sita POS 2 mm, dok se na donjoj grafika strani nalaze frakcije dobijene klasifikacijom sačme usitnjene pri POS 1 mm.

Za razliku od značajnih promena u sadržaju proteina grubih frakcija izazvanim promenom protoka vazduha, promena protoka materijala u klasifikator različitim podešavanjem JOVD, nije imala značajniji uticaj na sadržaj proteina grubih frakcija. Sadržaj proteina grubih frakcija dobijenih pri istim vrednostima POS i protoka vazduha, nije se razlikovao za više od 2% (SM) pri promeni JOVD sa 30 na 90%.

Najviše relativno povećanje sadržaja proteina u poređenju sa sadržajem proteina polazne sačme, pri protoku vazduha od $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$, iznosilo je 20,81% (frakcija br. **23** – POS 1 mm, JOVD od 60%, sadržaj proteina 43,48% SM). Za korišćeni protok vazduha od $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ najviše relativno povećanje sadržaja proteina iznosilo je 41,4% i postignuto kod frakcije broj **21**, dobijene pri parametrima POS 1 mm i JOVD 30%. Navedena frakcija broj **21** sadržala je 50,90% proteina (SM) i dobijena je u prinosu od 11,50%. Ista visoka vrednost relativnog povećanja sadržaja proteina (41,4%) ostvarena je i kod frakcije **24** (POS 1 mm, $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ i JOVD od 60%), koja je sadržala 50,88% proteina

(SM) i dobijena je u prinosu od 10,08%. Tako su najveća povećanja sadržaja proteina ostvarena pri najintenzivnijem usitnjavanju suncokretove sačme (POS – 1 mm), najvišem protoku vazduha ($12,5 \text{ m}^3/\text{h}$) i pri niskoj i srednjoj vrednosti JOVD-a (30 i 60% maksimuma).

U istraživanju povećanja sadržaja proteina sačmi uljarica primenom prosejavanja i vazdušne klasifikacije, *Challa i saradnici (2009)* su ostvarili maksimalna relativna povećanja sadržaja proteina od 6,9% za sojinu sačmu i 9,8% za sačmu semena pamuka. Najveće relativno povećanje sadržaja proteina suncokretove sačme koje je postignuto primenom centrifugalne klasifikacije u istraživanju *Sredanović (2007)* iznosilo je 15,9%, pri proizvodnji visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme usitnjene na kugličnom mlinu u prinosu od 70,20%. Elektrostatičkom separacijom postignuto je maksimalno relativno povećanje sadržaja proteina od 19,9% u poređenju sa polaznom sačmom, dobijanjem proteinskog suncokretovog brašna od 52,5% proteina (SM) (*Sredanović, 2007*). Povećanje sadržaja proteina suncokretove sačme vazdušnom klasifikacijom bio je cilj istraživanja *Laudadio-a i saradnika (2013)*. Autori su u navedenom istraživanju ostvarili maksimalno relativno povećanje sadržaja proteina od 19,4% u frakciji koja je sadržala 40,00% proteina na SM, a dobijena je u velikom prinosu od 87,90%. *Draganov (2015)* je kombinovanjem postupaka usitnjavanja, prosejavanja i vazdušne klasifikacije dobio 63,00% frakcije sa relativnim povećanjem sadržaja proteina od oko 33,0%. Rezultati ove faze istraživanja u okviru disertacije pokazali su da se primenjenim sistemom usitnjavanja mlinom čekićarom i vazdušne klasifikacije cik-cak gravitacionim klasifikatorom, ostvaruje maksimalno relativno povećanje sadržaja proteina koje je veće od svih povećanja ostvarenih u dosadašnjim istraživanjima dobijanja visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme, ali je prinos frakcije sa maksimalno ostvarenim sadržajem proteina bio manji.

Viši sadržaj proteina grube frakcije bio je posledica prisustva većeg udela suncokretovog jezgra i manjeg udela suncokretove ljuske. Stoga su, kako je i očekivano, najviši udeo jezgra imale grube frakcije broj **21**, **24** i **27**, dobijene pri protoku vazduha od $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ i JOVD od 30%, 60% i 90%, a koji je iznosio redom 97,5%, 97,61% i 94,59%. Isto može da se zaključi i posmatranjem PCA grafika (Slika 4.4), gde se navedene frakcije nalaze na donjoj, desnoj strani grafika. Kako je jezgro konstituent suncokretove sačme bogat proteinom, udeo jezgra mora da bude što je moguće veći kako bi frakcija imala visok sadržaj proteina a time i veliku nutritivnu i ekonomsku vrednost. Najmanji udeo jezgra (60,22%) i najveći udeo ljuske (34,14%) imala je frakcija broj **7**, sa 33,36% proteina (SM), dobijena klasifikacijom sačme usitnjene pri POS 3 mm, protoku vazduha od $8,7 \text{ m}^3/\text{h}$ i JOVD 90%.

Sa porastom protoka vazduha odnos prinosa grube i fine frakcije (R) smanjivao se za sva tri korišćena POS. Smanjenjem POS, smanjivala se i vrednost R, za iste vrednosti protoka vazduha i JOVD. Sa PCA grafika može se videti da je R obrnuto srazmeran ostvarenom sadržaju proteina grube frakcije, što pokazuje da se pri parametrima koji omogućavaju dobijanje grubih frakcija sa visokim sadržajem proteina dobijaju mali prinosi ovih frakcija.

Za određivanje relativnog odnosa između odziva (P_G i R) i upravljivih parametara klasifikacije (POS , V , $JOVD$) korišćen je polinom drugog reda (engl. *Second Order Polinom, SOP*). Za verifikaciju značajnosti modela sprovedena je analiza varijanse (engl. *Analysis of Variance, ANOVA*). U tabeli 4.4 prikazani su rezultati ANOVA analize, koja je korišćena da prikaže statističku značajnost uticaja upravljivih parametara (POS , V i $JOVD$) na odzivne veličine (P_G , R). Rezultati ANOVA analize su pokazali da su svi modeli bili značajni, ukazujući da je model adekvatno predstavljao odnose između parametara klasifikacije i odzivnih veličina.

Tabela 4.4. ANOVA klasifikacije suncokretove sačme

	df	P_G	R
POS	1	121.566 ⁺	14.905 ⁺
POS ²	1	33.955 ⁺	0.021
V	1	410.220 ⁺	74.014 ⁺
V ²	1	13.028 [*]	8.773 ⁺
JOVD	1	4.524	2.629 ⁺
JOVD ²	1	1.221	0.110
POS × V	1	36.063 ⁺	9.185 ⁺
POS × JOVD	1	0.128	0.414 ^{**}
V × JOVD	1	0.031	3.158 ⁺
Greška	17	28.978	2.324
r^2		0.955	0.980

POS – prečnik otvora sita; V – protok vazduha; JOVD – jačina oscilacije vibro dozatora; r^2 – koeficijent determinacije; df – stepeni slobode; R – odnos prinosa frakcija; P_G – sadržaj proteina grube frakcije

+Statistički značajan na nivou $p < 0,01$ granica poverenja 95%,

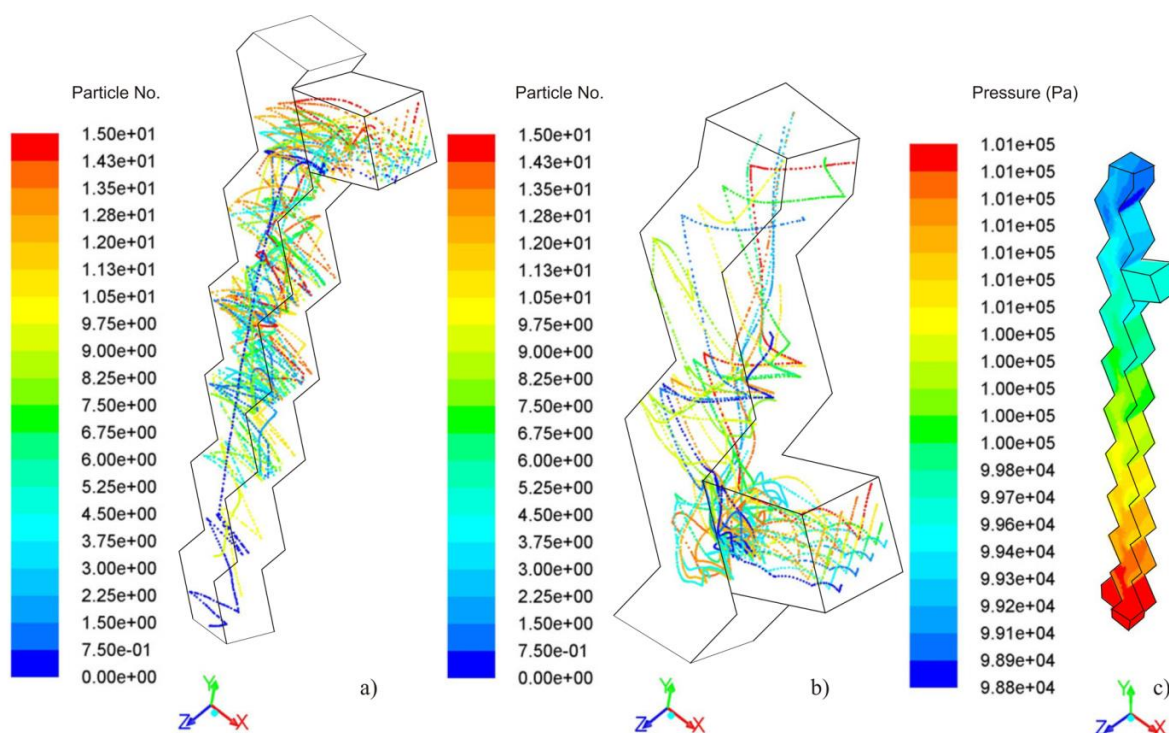
*Statistički značajan na nivou $p < 0,05$ granica poverenja 95%,

** Statistički značajan na nivou $p < 0,10$ granica poverenja 95%

Linearni članovi – protok vazduha i POS, kao i nelinearni član POS x V, uticali su značajno ($p < 0,01$) i na sadržaj proteina grube frakcije i odnos prinosa frakcija. Na odnos prinosa frakcija značajno su uticali kvadratni član protoka vazduha ($p < 0,01$), linearni član JOVD i nelinearni član V x JOVD, dok je na sadržaj proteina značajan uticaj imao i kvadratni član POS čekićara ($p < 0,01$). Prosečna greška između predviđenih i eksperimentalnih rezultata bila je ispod 10%, što je vrednost koja ukazuje na dobro poklapanje rezultata. Svi SOP modeli, nisu imali značajni nedostatak slaganja. Vrednosti koeficijentata determinacije r^2 , za sadržaj proteina grube frakcije i odnos prinosa frakcija, iznosili su 0,955 i 0,980, ukazujući na dobro poklapanje matematičkog modela (SOP) sa eksperimentalnim vrednostima ispitivanih odziva.

4.1.4. CFD model

Rezultati numeričke simulacije za optimalan slučaj vazdušne klasifikacije predstavljeni su na slici. 4.5. Osnovni fokus u ovoj simulaciji bio je na predviđanju putanja čestica i procenu efikasnosti razdvajanja suncokretove ljuske i jezgra u cik-cak klasifikatoru. Numerička simulacija za svih 27 slučajeva vazdušne klasifikacije izvršena je prema eksperimentalnom dizajnu, prikazanom u tabeli 3.5. Putanje 15 reprezentativnih čestica jezgra dobijenih DPM simulacijom (engl. *Discrete Phase Model*) za optimalni slučaj (POS – 1 mm; V – 12,5 m³/h; JVOD – 30%), prikazane su na slici. 4.5a. Slično tome, putanje 15 reprezentativnih čestica ljuske, obračunate DPM simulacijom za optimalni slučaj (POS – 1 mm; V – 12,5 m³/h; JVOD – 30%) prikazane su na slici. 4b. Efekti fenomena kraja vrtloga javljaju se zbog dve moguće stabilne pozicije u jezgru vrtloga, u zavisnosti od ulaznog protoka (Pisarev i Hoffmann, 2012).



Slika 4.5. Rezultati CFD modela: a) gornji i centralni delovi klasifikatora, sa trajektorijama čestica jezgra, b) gornji segment klasifikatora, sa putanjama čestica ljuske, c) polje pritiska fluidne faze (Pa)

Na osnovu rezultata DPM simulacije, prikazanih na slici 4.5a i slici 4.5b, čestice su ulazile u klasifikacionu zonu na mestu predviđenom za ulaz materijala. Teže čestice (suncokretovo jezgro) padale su, pod dejstvom sile gravitacije, ka dnu cik-cak klasifikatora i izlazu grube frakcije. Mali vrtlozi mogu se videti u prvoj sekciji klasifikatora, u kojoj se vrši razdvajanje različitih čestica usled protoka vazduha – fluidizacije (Slika. 4.5a). Lakše čestice (suncokretova ljuska) nošene su vazduhom i transportovane od mesta ulaza materijala, ka gornjoj strani klasifikacione zone. U ovom slučaju,

spoljna sila stvorena protokom vazduha, preovladala je nad gravitacionom silom zbog relativno male mase ljuske (Slika 4.5b). Polje pritiska fluidne faze (vazduha) duž celog klasifikatora je prikazano na slici. 4.5c, sa koje se može videti da su simulacijom određene veće vrednosti pritiska pri dnu klasifikacione zone, gde se nalazi ulaz vazduha, dok su niži pritisci vladali u gornjem delu, gde je vazduh napuštao klasifikacionu zonu. Varijacije u pritiscima mogle su da se uoče i usled geometrije klasifikacione komore cik-cak klasifikatora. Do pada pritiska dolazilo je na podovima svake kaskade usled formiranja vrtloga, što je bilo naročito izraženo u gornjem i donjem delu klasifikacione zone.

Kvalitet razdvajanja čestica u postupku klasifikacije opisan je funkcijom separacije (κ), koja predstavlja odnos udela jezgra i udela ljuske u gruboj frakciji suncokretove sačme (jednačina 3.11). Vrednosti funkcija separacije svih grubih frakcija izračunatih na osnovu eksperimentalnih rezultata (κ_{EXP}) i na osnovu rezultata CFD simulacije (κ_{CFD}) prikazane su u tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Vrednosti funkcije separacije

Broj frakcije	POS (mm)	V (m ³ /h)	JOVD (% maksimuma)	κ_{EXP}	κ_{CFD}
1	3	5	30	1,77	1,47
2	3	8,7	30	1,96	1,64
3	3	12,5	30	4,36	3,7
4	3	5	60	2,02	1,69
5	3	8,7	60	2,01	1,69
6	3	12,5	60	3,82	3,23
7	3	5	90	1,51	1,27
8	3	8,7	90	1,93	1,59
9	3	12,5	90	3,46	2,86
10	2	5	30	2,05	1,69
11	2	8,7	30	2,02	1,67
12	2	12,5	30	3,93	3,23
13	2	5	60	1,64	1,35
14	2	8,7	60	2,35	1,96
15	2	12,5	60	3,61	3,03
16	2	5	90	1,64	1,37
17	2	8,7	90	2,07	1,72
18	2	12,5	90	3,56	2,94
19	1	5	30	1,91	1,59
20	1	8,7	30	4,19	3,45
21	1	12,5	30	41,55	33,33
22	1	5	60	1,89	1,59
23	1	8,7	60	4,50	3,70
24	1	12,5	60	40,84	33,33
25	1	5	90	2,05	1,72
26	1	8,7	90	3,35	2,78
27	1	12,5	90	17,48	14,29

POS – prečnik otvora sita; V – protok vazduha; JOVD – jačina oscilacije vibro dozatora; κ_{EXP} – funkcija separacije izračuna na osnovu eksperimentalnih podataka; κ_{CFD} – funkcija separacije izračunata CFD simulacijom postupka klasifikacije suncokretove sačme

Vrednosti funkcije separacije, koji su dobijeni CFD simulacijom poklapali su se dobro sa eksperimentalnim rezultatima vazdušne klasifikacije. Odstupanja između eksperimentalne i numeričke funkcije separacije za odgovarajući eksperiment bila su oko 10 – 20%, što može da se smatra prihvatljivim (Pisarev and Hoffmann, 2012).

4.2. Faza ekstrudiranja

4.2.1. Prvi deo faze ekstrudiranja – poređenje polazne suncokretove sačme sa njenim visokoproteinskim frakcijama

Za izradu prvog dela ove faze eksperimenta, korišćene su tri suncokretove sačme koje su se razlikovale u sadržaju proteina: polazna suncokretova sačma II kvaliteta sa oko 37% proteina na SM (SS1), suncokretova sačma sa oko 42% proteina na SM (SS2) i suncokretova sačma sa oko 49% proteina na SM (SS3). Visokoproteinske suncokretove sačme SS2 i SS3 proizvedene su na vazдушnom klasifikatoru u dovoljnoj količini za izvođenje faze ekstrudiranja, primenom parametara dobijenih u fazi vazdušne klasifikacije, pri čemu je kao polazna sirovina korišćena suncokretova sačma SS1. U tabeli 4.6 prikazani su korišćeni parametri usitnjavanja i vazdušne klasifikacije za proizvodnju visokoproteinske frakcije, kao i hemijski sastav polazne suncokretove sačme i njenih proizvedenih visokoproteinskih frakcija.

Tabela 4.6. Parametri proizvodnje primenjeni za dobijanje odabranih frakcija korišćenih polazne suncokretove sačme u prvom delu eksperimentalne faze ekstrudiranja i njihov hemijski sastav

Parametri usitnjavanja i vazdušne klasifikacije	Polazna suncokretova sačma (SS1)	Visokoproteinska frakcija suncokretove sačme (SS2)	Visokoproteinska frakcija suncokretove sačme (SS3)
POS (mm)	-	3	1
V (m ³ /h)	-	12,5	12,5
JOVD (% maksimuma)	-	60	60
Hemijski sastav			
Vlaga (%)	6,67	6,67	6,69
Protein (% SM)	36,55	42,46	49,31
Mast (% SM)	1,45	0,86	0,84
Celuloza (% SM)	17,80	12,79	9,51
Pepeo (% SM)	7,07	8,22	9,15
BEM (% SM)	37,13	35,66	31,20

POS – prečnik otvora sita; V – protok vazduha; JOVD – jačina oscilacije vibracionog dozatora; BEM – bezazotne ekstraktivne materije

Udeo početne suncokretove sačme (SS1) i dve proizvedene visokoproteinske sačme (SS2 i SS3) manjan je po primenjenom dizajnu smeše, prikazanom u tabeli 3.6. Ostali ulazni parametri postupka ekstrudiranja bili su konstantni i dati su u poglavlju 3.2.2.1.

4.2.1.1. Hemijski sastav eksperimentalnih suvih smeša u prvom delu faze ekstrudiranja

Rezultati hemijske analize suvih smeša prvog dela faze ekstrudiranja prikazani su u tabeli 4.7.

Tabela 4.7. Hemijski sastav suvih smeša prvog dela faze ekstrudiranja

Uzorak	Opis uzorka	Vlaga (%)	Protein (% SM)	Mast (% SM)	Celuloza (% SM)	Pepeo (% SM)	BEM (% SM)	Skrob (% SM)
1	SS1	6,48	48,83	2,60	9,30	12,23	27,04	24,33
2	SS1xSS2	6,53	50,36	2,67	7,94	12,99	26,04	22,18
3	SS2xSS1	6,55	51,95	2,54	7,57	12,61	25,33	21,88
4	SS2	6,63	53,36	2,53	6,97	13,18	23,96	20,35
5	SS2xSS3	6,61	56,79	2,63	5,72	12,41	22,45	21,11
6	SS3xSS2	6,53	57,80	2,51	5,22	11,39	23,08	22,09
7	SS1xSS3	6,33	55,90	2,55	6,00	11,12	24,38	23,67
8	SS3xSS1	6,52	57,36	2,68	6,20	10,76	23,00	20,02
9	SS1xSS2xSS3	6,37	54,81	2,62	5,55	10,39	26,63	22,14
10	SS3	6,64	58,14	2,38	4,21	10,19	25,08	22,20

SS1 – početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM)

Sve analizirane suve smeše imale su približno isti sadržaj vlage koji je bio u opsegu od 6,37 do 6,64%. Hemijska analiza pokazala je da su sadržaj proteina, celuloze, pepela i skroba, varirali u smešama, u zavisnosti od korišćenih suncokretovih sačmi, čiji su udeli prema primenjenom eksperimentalnom dizajnu bili u opsegu od 0 do 20%. Sadržaj proteina suvih smeša kretao se u rasponu od 48,83 – 58,14% (SM). Najniži sadržaj proteina imala je smeša za proizvodnju uzorka **1**, koja je od suncokretovih sačmi sadržala samo SS1, sačmu najmanjeg kvaliteta, u udelu od 20%. Smanjenje udela sačme SS1 i povećanje udela preostale dve visokoproteinske sačme u smeši vodilo je ka porastu sadržaja proteina. Visokoproteinska sačma SS3, očekivano je doprinela najvećem povećanju sadržaja proteina, te je tako smeša za proizvodnju uzorka **10** sa 20% sačme SS3 imala i najviši sadržaj proteina. Smeša za proizvodnju uzorka **9** imala je sadržaj proteina približno jednaku smeši za proizvodnju uzorka **4**, gde je od suncokretovih sačmi bila prisutna samo suncokretova sačma SS2. Povećanje sadržaja proteina praćeno je smanjenjem sadržaja sirove celuloze koja se kretala u opsegu od 4,21 do 9,30% (SM), jer je, kako je ranije objašnjeno, sadržaj ova dva nutrijenta suncokretove sačme u inverznom odnosu. Kako je sačma SS1 sadržala najviše ljuske, smeša za

ekstrudiranje uzorka **1** imala je najveći sadržaj celuloze. Sadržaj celuloze smanjivao se uključivanjem sačme SS2 u recepturu, a najmanji doprinos na ukupan sadržaj celuloze u smešama imala je sačma SS3 koja je imala najmanji sadržaj suncokretove ljuske. Povećanje sadržaja proteina i istovremeno smanjenje sadržaja celuloze sa uključivanjem visokoproteinskih sačmi u smešu postignuto je u istraživanju Čolovića (2013), gde je ispitivan uticaj dodataka suncokretovih sačmi sa različitim sadržajem proteina na parametre postupka peletiranja i kvalitet peleta.

Sadržaj masti svih analiziranih smeša bio je približno isti i bio je u rasponu od 2,38% (smeša za proizvodnju uzorka **10**) do 2,68 (smeša za proizvodnju uzorka **8**). Sadržaj pepela generalno je opadao sa povećanjem udela visokoproteinskih sačmi. Sadržaj skroba je varirao sa promenom udela suncokretovih sačmi i bio je u rasponu od 20,02% (smeša za proizvodnju uzorka **8**) do 24,33% koliko je imala smeša za proizvodnju uzorka **1**. Skrob u hrani za salmonide obično ima strukturnu ulogu, i pomaže ekspanziju proizvoda i nema veliki nutritivni značaj (Sørensen, 2010).

4.2.1.2. Uticaj sastava smeše na parametre ekstrudiranja u prvom delu faze ekstrudiranja

Tokom proizvodnje svih uzoraka hrane za ribe ekstrudiranjem, jedina promenljiva tokom proizvodnje bila je sastav ekstrudiranih smeša, dok su ostali parametri postupka ekstrudiranja bili konstantni (vlažnost kondicioniranog materijala, protok materijala, vlažnost materijala u cevi ekstrudera, broj obrtaja puža, prečnik otvora, površina otvora matrice, konfiguracija pužnica, itd). Odzivi postupka ekstrudiranja menjali su se stoga prema udelu sirovina u svakoj od smeša i njihovom hemijskom sastavu (Sørensen, 2009). Parametri ekstrudiranja smeša iz prvog dela faze ekstrudiranja prikazani su u tabeli 4.8. Od odzivnih parametara praćeni su temperatura u zonama 3 i 6 ekstrudera (T3 i T6), temperatura matrice (T) i pritisak matrice (P), obrtni moment (OM) i specifična mehanička energija (SME).

Tabela 4.8. Parametri ekstrudiranja smeše u prvom delu faze proizvodnje hrane za ribe

Uzorak Opis uzorka	1 SS1	2 SS1xSS2	3 SS2xSS1	4 SS2	5 SS2xSS3	6 SS3xSS2	7 SS1xSS3	8 SS3xSS1	9 SS1xSS2xSS3	10 SS3
Kondicioniranje										
Temperatura ^a (°C)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Vlažnost ^b (%)	23,99	25,47	25,08	24,45	25,39	25,27	24,32	25,18	25,79	24,05
Ekstrudiranje										
Temperatura ^c (°C)										
Zona 3	90,2	89,0	87,9	89,1	89,8	89,9	91,1	88,6	89,1	89,9
Zona 6	95,5	103,1	98,1	96,2	96,3	98,3	95,2	102,0	99,5	96,2
Matrica	102,0	109,0	110,0	109,0	108,0	108,0	110,0	116,0	117,0	115,0
Broj obtaja puža (obrtaja/min)	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Prečnik otvora matrice (mm)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Površina otvora matrice (mm ²)	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56
Protok materijala (kg/h)	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Protok vode (kg/h)	2,5	1,9	2,2	2,7	2,0	2,1	2,7	2,1	1,7	2,9
Vlažnost materijala u cevi ekstrudera ^d (%)	27,29	27,96	27,96	27,99	28,01	28,02	27,86	27,93	28,01	27,85
Pritisak na matrici (bar)	0,5	0,3	0,8	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Obrtni moment ^e (Nm)	66,0	59,4	57,2	57,2	59,4	57,2	66,0	61,6	59,4	57,2
SME ^f (Wh/kg)	72,7	65,6	64,3	62,7	65,7	65,5	72,8	69,3	68,3	61,9
Broj obrtaja noža (obrtaja/min)	1600	1600	1600	1650	1700	1750	1600	1600	1600	1600

SS1 – početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM)

^a Mereno senzorom postavljenim unutar mešalice/kondicionera.

^b Sadržaj vlage materijala određen nakon kondicioniranja brzim analizatorom sadržaja vlage.

^c Mereno senzorima postavljenim unutar cevi ekstrudera.

^d Ukupni sadržaj vlage materijala, izračunat na osnovu sadržaja vlage nakon kondicioniranja, protoka materijala i protoka vode u cevi ekstrudera.

^e Opterećenje motora, 100% obrtnog momenta je 220 Nm.

^f Specifična mehanička energija.

Uređaji za kontrolu temperature zona 2 – 4 i 6 – 7 ekstrudera bili su podešeni na 95°C , ali u eksperimentalnim uslovima ipak nije bilo moguće održavati zadate temperature konstantnom. Temperature u zoni **3** bile su u veoma uskom rasponu, od 87,9 (uzorak **3**) do 91,1°C (uzorak **7**). Nešto više temperature bile su prisutne kod uzoraka u kojima je bio prisutan veliki udeo sačme SS1 (uzorci **1, 2, 7 i 9**). Konfiguracija pužnica u zoni 3 (Slika 3.7) bila je takva, da se u ovoj zoni odvijalo početno gnječenje materijala i početak povišenja temperature duž cevi ekstrudera (Huber, 2000). Postignute temperature u zoni 6 cevi ekstrudera bile su u opsegu od 95,2°C do 103,1°C . Niske vrednosti temperatura u zoni 6 ostvarene su pri ekstrudiranju uzoraka **1, 4 i 10** (95,5, 96,2 i 96,0°C) u kojima su u recepturi učestvovala samo pojedinačne sačme, redom – SS1, SS2 i SS3. Smeša sačmi različitog kvaliteta dovela je do povećanja temperature zone 6, a najveća temperatura ostvarena je pri ekstrudiranju uzorka **2**, sa 13,4% SS1 i 6,6% SS2 sačme, i iznosila je 103,1°C . Sačma SS1 doprinela je otežanom protoku materijala u cevi ekstrudera, moguće usled najvišeg sadržaja celuloze od svih primenjenih sačmi. Stoga je kod uzorka **2**, najveća temperatura ostvarena usled najvećeg trenja materijala i velike disipacije energije u vidu toplote koja je doprinela zagrevanju zone 6 (Meng i sar., 2010).

Tokom proizvodnje i sakupljanja uzoraka, temperature na matrici su bile ciljane da budu više od 100°C . Temperatura na matrici iznad 100°C omogućava isparavanje vode iz materijala pri izlasku kroz otvor matrice, čime se pojačava ekspanzija proizvoda (Riaz, 2007; Sørensen, 2012). Temperature na matrici bile su u rasponu od 102 – 117°C . Najniža temperatura ostvarena je pri ekstrudiranju uzorka **1**, sa 20% sačme SS1. Smanjenjem udela SS1 na 13,4% i dodatkom 6,6% sačme SS2, temperatura na matrici se povećala na 109°C . Daljim smanjenjem udela sačme SS1 i povećanjem udela visokoproteinskih sačmi SS2 i SS3 temperatura na matrici se nije menjala i tokom proizvodnje uzoraka **3, 4, 5, 6 i 7** bila je u rasponu 108 do 110°C , dok se pri proizvodnji uzoraka **8, 9 i 10** temperatura matrice značajno povećala (116, 117 i 115°C). Ovakva pojava verovatno je pre posledica redosleda proizvodnje uzoraka nego razlike u hemijskom sastavu smeša.

Pritisak na matrici sa jednim otvorom prečnika 4 mm, ukupne površine otvora od 12,56 mm², nalazio se u rasponu od 0,3 do 0,8 bar. Na korišćenom ekstruderu pri postavljenim parametrima i konfiguraciji pužnica, promena udela smeše nije imala značajan uticaj na ovaj izlazni parametar. Ostvareni pritisci na matrici bili su značajno manji od pritiska na matrici ostvarenog pri ekstrudiranju smeše za ishranu riba sa 31% suncokretove sačme sa 38,5% proteina (SM) dvopužnim ekstruderom opremljenog matricom otvora prečnika 4 mm u radu Kraugerud-a i saradnika (2011). Ipak, u navedenom radu korišćena je drugačija konfiguracija pužnica kao, dok je protok materijala bio čak oko 4 puta veći (200 kg/h) u poređenju sa protokom materijala u istraživanju ove disertacije, što je sve zajedno doprinelo većem pritisku na matrici.

Promene u udelu suncokretovih sačmi različitog kvaliteta u smeši dovele su do promene u opterećenju motora pri ekstrudiranju. Opterećenje motora ekstrudera koji pokreće pužnice iskazuje se preko obrtnog momenta u Nm (*Hansen i Storebakken, 2007; Sørensen, 2009; Kraugerud, 2011*). Obrtni moment je povezan sa trenjem u cevi ekstrudera, odnosno otporu proticanju materijala i na njega utiču broj obrtaja puža, napunjenost cevi materijalom i viskoznost materijala (*Harper, 1989*). Tokom proizvodnje svih uzoraka pužnice su se obrtale konstantnom brzinom od 600 obrtaja/min. Takođe je i protok materijala u cev ekstrudera bio konstantan (55 kg/h) čime je i napunjenost cevi ekstrudera bila ista tokom celog istraživanja. Promene u obrtnom momentu koje su se javile tokom proizvodnje različitih uzoraka, mogle su jedino da budu rezultat različite viskoznosti materijala usled različitih udela sačmi različitog kvaliteta u sastavu smeša. Obrtni moment bio je u rasponu 57,2 – 66,0 Nm. Najveća vrednost obrtnog momenta (66,0 Nm) dostignuta je pri proizvodnji uzoraka **1** i **7**, koji su imali veliki udeo sačme SS1 (20% i 13,4%). Sačma SS1 doprinela je da smeše za proizvodnju uzorka **1** i **7** imaju visoke sadržaje celuloze (9,30% za uzorak **1** i 6,00% za uzorak **7**). Visok sadržaj celuloze smeše moguć je razlog težeg proticanja materijala kroz cev ekstrudera, a time i većeg opterećenja motora. U istraživanju *Hansen-a i Storebakenn-a (2007)*, povećanje udela celuloze sa 0,0 na 2,5% u hrani za ribe uticalo je na povećanje obrtnog momenta od 8%. Dalje povećanje od 2,5%, na udeo od 5% u smeši, uticalo je da se obrtni moment poveća za 24% u odnosu na obrtni moment pri proizvodnji kontrolnog uzorka bez dodatka čiste celuloze. Smanjenje udela SS1 i uključivanje visokoproteinskih sačmi rezultovalo je manjim vrednostima obrtnog momenta, tako da su najniže vrednosti od 57,2 Nm zabeležene pri proizvodnji uzoraka **4**, **6** i **10**, koji nisu sadržali SS1 sačmu.

SME predstavlja količnik proizvoda obrtnog momenta i broja obrtaja puža, i protoka materijala (*Mercier i sar., 1989*). Stoga je SME direktno proporcionalan ostvarenom obrtnom momentu, i isto tako zavisi od viskoznosti smeše unutar cevi ekstrudera. SME je varirao tokom proizvodnje eksperimentalnih uzoraka od 61,90 do 72,80 Wh/kg. Najveće vrednosti SME ostvarene su pri ekstrudiranju smeše **1** i **7** (72,7 i 72,8 Wh/kg). Kao i kod obrtnog momenta, ove dve smeše su imale visok sadržaj celuloze usled dominantne količine sačme najnižeg kvaliteta (SS1), što je direktno uticalo na najveće SME vrednosti. Povećanje sadržaja celuloze u recepturu vodi ka povećanju SME (*Hansen i Storebakenn, 2007*). U istraživanju *Tyapkove i saradnika (2016)* zamena ribljeg brašna suncokretovom pogačom u smeši za ishranu riba, uticala je da se dobije smeša sa najvećim sadržajem celuloze i najvećom ostvarenom vrednošću SME u odnosu na ostale smeše gde je riblje brašno zamenjeno istom količinom sojine, lanene, i pogače uljane repice (*Tyapkova i sar., 2016*). Najniže SME vrednosti u ovom istraživanju zabeležene su tokom ekstrudiranja uzoraka **10** (61,90 Wh/kg) i **4** (62,70 Wh/kg), koji u svom sastavu nisu imali sačmu SS1. Ipak, gledajući sadržaj celuloze i vrednosti obrtnog momenta i SME, može da se zaključi da nije isključivo ukupan sadržaj sirove celuloze početne smeše odgovoran za promene u vrednostima SME. Smeša za proizvodnju uzorka **4**, koja je sadržala

sačmu SS2, imala je više vrednosti celuloze (6,97%) ali i istovremeno manji SME pri ekstrudiranju (57,2 Wh/kg) u odnosu na smešu za proizvodnju uzorka 7 (celuloza – 6,00% na SM; SME – 69,3 Wh/kg), gde je u uzorku bilo 13,4% sačme SS1 i 6,6% visokoproteinske sačmae SS3. Prisustvo ljuske iz neklasifikovane, početne suncokretove sačme SS1 doprinelo je većem otporu proticanja materijala u cevi ekstrudera, možda i više nego ukupan sadržaj celuloze u smeši.

Regresioni model odziva prvog dela faze ekstrudiranja prikazan je u tabeli 4.9.

Tabela 4.9. Regresioni model izlaznih parametara ekstrudiranja

	T3	T6	T	P	OM	SME
SS1	4,425±0,990 [*]	4,746±0,138 ⁺	5,038±0,127 ⁺	0,020±0,009 ^{**}	3,293±0,044 ⁺	3,600±0,033 ⁺
SS2	4,771±0,990 ⁺	4,739±0,138 ⁺	5,393±0,127 ⁺	0,027±0,009 [*]	2,871±0,044 ⁺	3,131±0,033 ⁺
SS3	3,943±0,990 [*]	4,851±0,138 ⁺	5,684±0,127 ⁺	0,031±0,009 [*]	2,824±0,044 ⁺	3,079±0,033 ⁺
SS1 × SS2	-0,016±0,218	0,057±0,030	0,064±0,028 ^{**}	0,001±0,002	-0,042±0,010 [*]	-0,029±0,007 [*]
SS1 × SS3	0,092±0,218	0,022±0,030	0,070±0,028 ^{**}	0,001±0,002	0,025±0,010 ^{**}	0,045±0,007 ⁺
SS2 × SS3	-0,280±0,218	0,009±0,030	-0,025±0,028	-0,002±0,002	0,011±0,010	0,036±0,007 ⁺

SS1 – početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM); T3 – temperatura u zoni 3 ekstrudera; T6 – temperatura u zoni 6 ekstrudera; T – temperature matrice; P – pritisak na matrici; OM – opterećenje motora; SME – specifična mehanička energija

⁺statistički značajno na nivou $p < 0,01$; ^{*}statistički značajno na nivou $p < 0,05$; ^{**}statistički značajno na nivou $p < 0,10$

Rezultati tabele 4.9 pokazuju da linerani članovi (SS1, SS2 i SS3) imaju statistički značajan uticaj na formiranje polinoma drugog reda svih posmatranih odziva – temperature u zonama 3 i 6 (T3 i T6), temperature matrice (T), pritiska na matrici (P), obrtnog momenta (OM) i specifične mehaničke energije (SME), uglavnom na nivou $p < 0,01$ (osim u regresionoj formuli za predikciju T3 i P). U modelu za predviđanje temperature zone 3 ekstrudera (T3) najveći uticaj ima linearni član SS2, ali su приметni i uticaji linearnih članova SS1 i SS3, statistički značajni na nivou $p < 0,05$. Na izračunavanje pritiska matrice (P) u regresionom modelu najveći uticaj imaju linearni članovi SS2 i SS3, statistički značajno na nivou $p < 0,05$. Nelinearni članovi u regresionim modelima nemaju značajniji uticaj, osim za izračunavanje SME, gde su članovi proizvoda SS1 × SS3 i SS2 × SS3 statistički značajni na nivou $p < 0,01$, a član interakcije sačmi SS1 i SS2 je statistički značajan na nivou $p < 0,05$. Sinergetski član uticaja sačmi SS1 i SS2 je takođe pokazao statistički značajan uticaj na OM ($p < 0,05$).

U tabeli 4.10 prikazani su rezultati rezidualne analize, koja je urađena da bi se potvrdila pretpostavka da razlike između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zadovoljavaju kriterijum homogenosti varijanse, tj. da su ove razlike nezavisne, da imaju normalnu raspodelu i da je srednja vrednost razlika bliska nuli. Srednje vrednosti razlika za odzive T3, T6, T, P, OM i SME bile su oko 0, a standardne devijacije razlika, kao i varijansa razlika takođe su bile bliske 0. Ovakvi rezultati pokazuju

da model na odgovarajući način predstavlja eksperimentalne podatke dobijene u procesu ekstrudiranja, pošto su rezidualne vrednosti pokazale dobro poklapanje sa normalnom raspodelom, oko nulte srednje vrednosti, u okviru granice poverenja od 95%. Dobre osobine za generalizaciju modela pokazane su parametrima Skew. (engl. *Skeweness* – krivljenje), koja predstavlja odstupanje od normalne raspodele i Kurt. (*Kurtoisis* – nazubljenost), koji predstavlja odstupanje od "nazubljenosti" normalne raspodele.

Tabela 4.10. Rezidualna analiza modela izlaznih parametara ekstrudiranja

Parametar	χ^2	RMSE	MBE	MPE	r^2	Skew.	Kurt.	Sr.vred.	St.Dev.	Var.
T3	-255,4	23,6	-3,5	52,9	0,5	-0,3	2,4	-1,2	14,4	207,7
T6	-7,8	4,2	0,5	5,8	0,7	0,1	-0,5	0,2	2,5	6,5
T	-13,1	5,5	-0,4	6,8	0,8	2,0	4,1	-0,1	3,4	11,3
P	0,0	0,2	0,0	68,1	0,3	-0,5	0,8	0,0	0,1	0,0
OM	-8,1	4,2	-0,7	8,7	0,6	0,9	1,7	-0,2	2,5	6,4
SME	-0,3	0,8	0,0	1,5	1,0	-0,4	2,0	0,0	0,5	0,2

T3 – temperatura u zoni 3 ekstrudera; T6 – temperatura u zoni 6 ekstrudera; T_{mat} – temperatura matrice; P – pritisak na matrici; OM – opterećenje motora; SME – specifična mehanička energija; χ^2 – hi- kvadrat test; RMSE – koren zbira srednje vrednosti kvadrata odstupanja, MBE – srednja vrednost greške odstupanja, MPE – srednja vrednost procentnog odstupanja; r^2 – koeficijent deteminacije; Skew. – krivljenje (engl. *Skeweness*); Kurt. – nazubljenost (engl. *Kurtoisis*)

Niske vrednosti parametara χ^2 , RMSE, MBE i MPE, kao i visoka vrednost koeficijenta determinacije (r^2), prikazane u tabeli 4.10, ukazuju na pouzdano predviđanje odziva ekstrudiranja hrane za ribe u prvom delu faze ekstrudiranja (T3, T6, T, P, OM i SME) modelom prikazanim u tabeli 4.9, kao i na dobro poklapanje vrednosti dobijenih ovim modelom sa eksperimentalnim rezultatima.

4.2.1.3. Fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe

Variranje količine tri suncokretove sačme različitog kvaliteta (SS1, SS2 i SS3) u uzorcima hrane za ribe dovelo je do razlika u fizičkom kvalitetu ekstrudirane hrane za ribe. Za potrebe određivanja fizičkog kvaliteta proizvedenih eksperimentalnih uzoraka određeni su sledeće fizičke osobine ekstrudirane hrane za ribe: radijalni stepen ekspanzije (SE), nasipna masa (NM), tvrdoća određena teksturometrom (TT) i KAHL-ova tvrdoća (KT), otpornost granula na otiranje po Holmenu izraženi kao indeks izdržljivosti granule (IIG), otpornost na otiranje određena posebnim DORIS testom gde su rezultati izraženi kao procenat celih granula (CG) i DORIS vrednost (DV), kapacitet upijanja ulja (KUU), nivo otpuštanja ulja zauljenih granula (OU) i indeks stabilnosti granula u vodi (ISV). Rezultati određenih fizičkih osobina uzoraka prvog dela faze ekstrudiranja prikazani su u tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Fizičke osobine ekstrudirane hrane za ribe prvog dela faze ekstrudiranja

Uzorak	Opis uzorka	Stepen ekspanzije ^a (%)	Nasipna masa ^b (g/l)	Tvrdoća ^a (kg)	Kahl tvrdoća ^c (Kahl jedinica)	Otpornost na otiranje PDI ^b (%)	Cele granule ^b (%)	Doris vrednost ^b (%)	Kapacitet upijanja ulja ^d (%)	Otpuštanje ulja ^d (%)	Indeks stabilnosti u vodi ^d (%)
1	SS1	22,88	488,73	4,78	4,73	93,20	98,12	1,88	58,38	3,50	21,60
2	SS1xSS2	30,50	466,00	5,00	4,72	93,81	98,78	1,22	63,31	3,38	28,02
3	SS2xSS1	27,88	486,20	4,88	4,92	94,49	99,04	0,96	62,02	3,47	33,44
4	SS2	31,88	487,67	5,20	5,47	94,52	98,79	1,21	59,74	3,56	20,25
5	SS2xSS3	31,50	480,97	5,00	5,01	95,40	98,86	1,14	63,07	3,66	27,11
6	SS3xSS2	32,38	485,83	5,26	5,68	95,03	98,94	1,06	62,23	3,74	19,22
7	SS1xSS3	27,63	522,93	5,58	4,80	94,12	99,42	0,58	52,19	3,10	23,94
8	SS3xSS1	34,25	501,10	5,08	4,83	95,22	99,39	0,61	58,73	3,35	24,76
9	SS1xSS2xSS3	33,38	508,70	5,17	4,83	95,06	98,92	1,08	56,49	3,34	20,87
10	SS3	31,75	532,10	6,29	5,30	95,32	98,17	1,83	53,89	2,92	30,29

SS1 – početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM)

a – srednja vrednost 20 ponavljanja

b – srednja vrednost 3 ponavljanja; PDI – Pelet Durability Index (engl.)

c – srednja vrednost 10 ponavljanja

d – srednja vrednost 2 ponavljanja

Stepen ekspanzije granula varirao je od 22,88 do 34,25%. Najniži stepen ekspanzije ostvaren je kod uzorka **1**, koji je sadržao maksimalan sadržaj SS1 sačme sa najmanje proteina (36,5% SM), a najviše celuloze (17,80% SM). Zamena 6,6% sačme SS1 sačmama SS2 i SS3 kod uzorka **2** i **7** dovela je do povećanja stepena ekspanzije, na nivo od 30,50 i 27,63%. Uzorci koji nisu sadržali sačmu SS1 (uzorak **4**, **5**, **6** i **10**) imali su slične vrednosti stepena ekspanzije koje su varirale od 31,50 do 32,88%. Visok sadržaj celuloze koji je imala sačma SS1 verovatno je negativno uticao na ekspanziju. Celuloza ima izrazita hidrofилna svojstva, usled svoje hemijske strukture sa tri hidrosilne grupe koje se nalaze u svakoj glukoznoj jedinici (*Boulos i sar., 2000*). Visok kapacitet vezivanja vode celuloze može dovesti do nadmetanja celuloze i drugih nutirjenata, pre svega skroba, za vodu tokom ekstrudiranja, što utiče da skrobne granule upijaju manje vode i nemaju dovoljnu želatinizaciju, proces neophodan za postizanje optimalne ekspanzije (*Hansen i Storebakken, 2007*). Iako je sačma SS1 u smeši uticala na suzbijanje ekspanzije, najveći stepen ekspanzije je ostvaren kod uzorka **8** koji je sadržao 13,4% sačme SS3 i 6,6% sačme SS1. *Hansen i Storebakken (2007)* su u svom istraživanju dodatka celuloze u hranu za ribe takođe utvrdili da povećanje sadržaja celuloze smanjuje ekspanziju proizvoda, ali su to pre povezali sa manjim sadržajem skroba u početnoj smeši nego sa hidrofилnošću celuloze. Takav rezultat nije u korelaciji sa rezultatima istraživanja ove disertacije u kojoj su rezultati hemijske analize pokazali da je smeša za proizvodnju uzorka **1** koji je najmanje ekspandovao, imala najviše skroba (24,33%), dok je uzorak **8** sa najvećim stepenom ekspanzije (34,25%) sadržao najmanje skroba (20,02%).

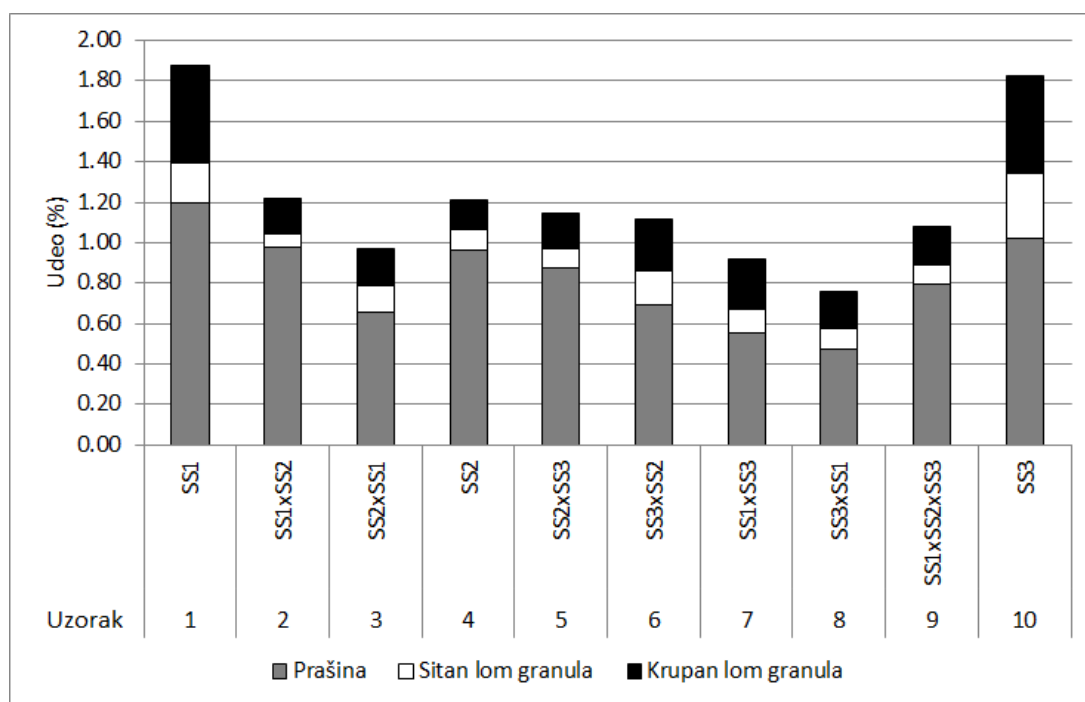
Stepen ekspanzije važan je faktor kvaliteta hrane za ribe jer utiče na gustinu, a takođe može da ima uticaj i na stepen otiranja, tvrdoću i kapacitet upijanja ulja (*Rosentrater i sar., 2009*). Gustina granula obrnuto je srazmerna postignutom stepenu ekspanzije (*Ilo, 1999*). Veći stepen ekspanzije vodi do poroznije granule, koja ima manju gustinu, a time i manju nasipnu masu. Vrednosti nasipne mase zauljenih granula kretale su se od 466,00 do 532,10 g/l. Najmanju nasipnu masu imao je uzorak **2**, sa 13,4% sačme SS1 i 6,6% sačme SS2. Najveću nasipnu masu posedovao je uzorak **10**, koji je sadržao 20% sačme SS3 sa oko 49% proteina (SM). Očekivano je bilo da će uzorak **1**, koji je posedavao najniži stepen ekspanzije imati i najveću nasipnu masu, ali su rezultati pokazali da je njegova vrednost (488,73 g/l) bila bliska nasipnim masama uzoraka **3**, **4**, **5** i **6**, koja je bila u rasponu od 480,97 do 487,67 g/l. Uzorci **7**, **8**, **9** i **10** imali su vrednosti nasipne mase veće od 500 g/l, što je omogućavalo da granule navedenih uzoraka sporo tonu u slatkoj vodi (*Rokey, 2007*), što je značajno za granule namenjene ishrani pastrmke.

Tvrdoća granula određena je primenom dve uređaja, teksturometrom i KAHL-ovim testerom. Rezultati sa teksturometra pokazali su da se sila, potrebna da dođe do loma granule, kretala u opsegu od 4,78 do 6,29 kg. Najniža vrednost postignuta je kod uzorka **1**, uzorka sa 20% sačme SS1, koja je imala najniži sadržaj proteina i najveći sadržaj celuloze (Tabela 3.2). Uzorak **1** ujedno je imao i najniži stepen ekspanzije. Ovakav rezultat nije bio u skladu sa rezultatima prethodnih istraživanja koji su

pokazali da se tvrdoća hrane za ribe povećava sa smanjenjem stepena ekspanzije (Aarseth, 2006; Hansen i Storebakken, 2007) i povećanjem sadržaja celuloze (Hansen i Storebakken, 2007), ali svakako u ovim istraživanjima nije variran kvalitet suncokretove sačme, te rezultati nisu u potpunosti uporedivi. Uzorci **2** i **3** kod kojih je 6,6% odnosno 13,4% sačme SS1 zamenjeno sačmom SS2, imali su tvrdoću blisku uzorku **1** (4,88 i 5,00 kg). Uključenje visokoproteinske sačme SS3 u sastav uzoraka, dovelo je do povećanja tvrdoće, te je za lom uzorka **10** bila potrebna najveća sila (6,29 kg). Rezultati tvrdoće granula ukazuju na povezanost tvrdoće sa sadržajem proteina, odnosno celuloze, u uzorcima (Draganović i sar., 2011). Povećanje tvrdoće granula sa povećanjem sadržaja proteina u proizvodu u skladu je sa rezultatima Storebakken-a i saradnika (2015). Rezultati tvrdoće do kojih se došlo primenom KAHL pelet testera, imali su sličan trend promene kao rezultati dobijeni primenom teksturometra. Vrednosti sile potrebne da se granula slomi bile su bliske za sve ispitane uzorke i iznosile su od 4,72 do 5,68 KAHL jedinica. Uzorci **1** i **2** posedovali su najmanju tvrdoću (4,72 i 4,73 KAHL jedinica), dok su uzorci **7**, **8** i **9** imali gotovo iste vrednosti tvrdoće (4,80 – 4,83 KAHL jedinica). Povećanje sadržaja proteina dovelo je do povećanja tvrdoće granula, te su uzorci **4**, **5** i **10**, koji u svom sastavu nisu imali sačmu SS1, posedovali najveću tvrdoću (5,47, 5,68 i 5,30 KAHL jedinica). U poređenju sa teksturometrom, KAHL pelet tester dao je rezultate sa manjim razlikama među uzorcima, ali je analiza bila brža i jednostavnija za izvođenje.

Svi eksperimentalni uzorci hrane za ribe imali su približno istu otpornost na abraziju, tj. otiranje, obzirom da su imali su bliske PDI vrednosti (93,20 – 95,40 %). Najnižu PDI vrednost imao je uzorak **1**. Postepeno povećavanje sadržaja proteina u smeši zamenom određenog udela sačme SS1 najpre sačmom SS2 sa oko 42% proteina a potom i sačmom SS3 sa približno 49% proteina (SM), rezultovalo je povećanjem PDI vrednosti.

DORIS test pokazao je sposobnost granula da održe celovitost strukture nakon primenjene sile udara na granule unutar komore uređaja. Rezultat se obično daje kao procenat celih granula (Sørensen i sar., 2011; Morken i sar., 2012), ali se ujedno prikazuje i procenat nastalog loma granula kao i nastale prašine (Aas i sar., 2011a; Aas i sar., 2011b, Oehme i sar., 2014). Kako je procenat celih granula (frakcije > 4000 µm) bio vrlo visok (98,12 – 99,42%), svi ispitani uzorci pokazali su odličan kvalitet određen DORIS testom. Procenat nastalogog krupnog i sitnog loma, kao i prašine prikazan je na slici 4.6.



Slika 4.6. Rezultati udela prašine (< 2240 μm), sitnog (2240 – 3150 μm) i krupnog (3150 – 4000 μm) loma granula DORIS testa

SS1– početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM)

Lom granula i prašina u realnim uslovima nastaju u cevovodima pneumatskih automatskih hranilica, i kako ne učestvuju u ishrani riba predstavljaju gubitak hrane, a njihov nastanak se mora minimalizovati proizvodnjom kvalitetne hrane za ribe (*Aas i sar., 2011b*). Zbir krupnog loma (frakcija čestice veličine 3150 – 4000 μm), sitnog loma (frakcija čestica veličine 2240 – 3150 μm) i prašine (frakcija čestica < 2240 μm) predstavlja DORIS vrednost (DV), koja se kretala se u opsegu od 0,58 do 1,88%. Najveći uticaj na DV, kod svih ispitanih uzoraka, imao je procenat nastale prašine koji se kretao u opsegu od 0,47 do 1,19%. Najveći procenat očuvanih granula (99,42%) imao je uzorak 7, sa 13,4% sačme SS1 i 6,6% sačme SS3. Ovaj uzorak je ujedno imao i najmanju DV (0,58%) i procenat prašine koji je iznosio 0,56%. Najlošiji kvalitet po DORISU imao je uzorak 1 sa 20% sačme SS1, koji je imao najmanji procenat celih granula (98,12%) i najvišu DORIS vrednost (1,88%) sa najvećim doprinosom nastale prašine (1,19%), na šta je najverovatnije uticao nizak kvalitet korišćene suncokretove sačme. Procenat nastalog krupnog loma i sitnog loma granula bio je izuzetno nizak i kretao se u opsegu 0,15 – 0,49%, odnosno 0,07 – 0,32%.

Kapacitet upijanja ulja (KUU) uzoraka bio je u opsegu od 52,19 do 63,31% ulja na početnu masu ekstrudiranih granula. KUU svih uzoraka bio je dovoljan da se u uzorke lako doda, postupkom oblaganja ekstrudiranih granula u vakuumu, celokupna količina ulja predviđena recepturom (25,14%). KUU je fizička karakteristika povezana sa poroznošću granule i direktno je zavisna od stepena ekspanzije granule (*Glencross i sar., 2010*), kao i od njenog sirovinskog sastava (*Draganović i*

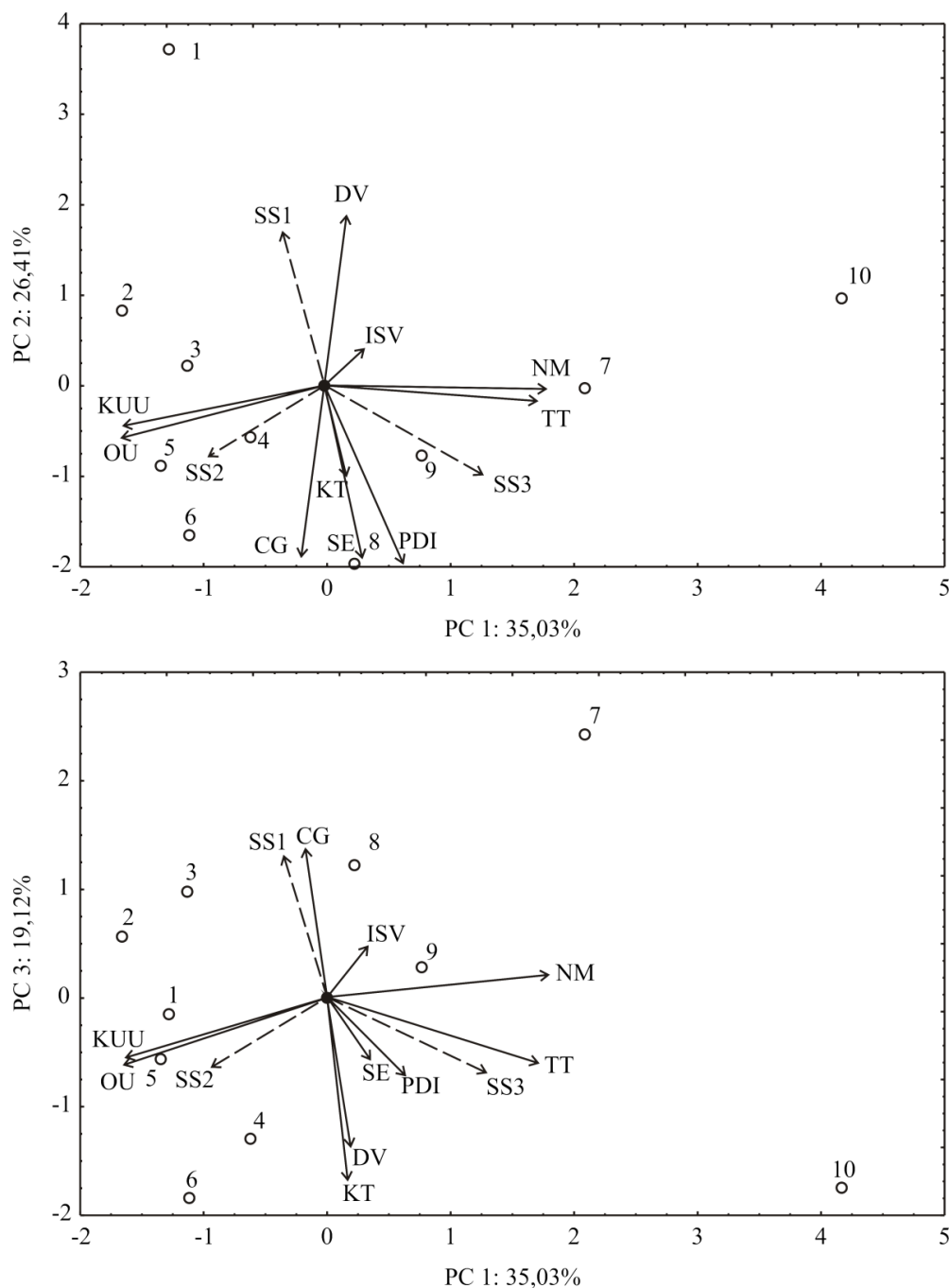
sar., 2011; Sørensen i sar., 2011). Najmanji KUU ostvaren je kod uzorka **7**, koji je posedovao niski stepen ekspanzije od 27,63%. Navedeni uzorak sadržao je 13,4% SS1 i 6,6% SS3 sačme. Nizak KUU od 53,89% imao je uzorak **10**, sa 20% SS3 sačme. Kako je uzorak **1**, sa najmanjim stepenom ekspanzije od 22,88%, imao vrednost KUU (58,38%) blisku vrednosti KUU uzorka **8** (58,73%), koji je imao najveći SE (34,25%), može se reći da ekspanzija nije bila u vezi sa maksimalnim upijanjem ulja granula, već je na KUU uticaj najverovatnije imala unutrašnja struktura granula. Uključenje sačme SS2 u recepturu dovelo je do većih vrednosti KUU, gde je najveća vrednost (63,31%) dostignuta kod uzorka **2**, sa 13,4% sačme SS1 i 6,6% sačme SS2. Sačma SS2 obezbedila je optimalnu ekspanziju proizvoda uz dovoljnu količinu suncokretove ljuske, koja kao visokocelulozna materija ima veliku sposobnost upijanja ulja.

Vrednosti otpuštanja ulja bile su bliske za sve uzorke (2,92 – 3,74%). Ujedno, što je uzorak imao manji OU, i njegov KUU je bio manji. Ovakav rezultat navodio je na zaključak da je otpuštanje ulja granula, kao i KUU, u vezi sa unutrašnjom strukturom granula, što je u skladu sa tvrdnjama iznetim u radu *Sørensen i saradnika (2011)*. Najnižu vrednost OU od 2,92% imao je uzorak **10**, sa 20% visokoproteinske sačme SS3. Uzorci **1** i **4** sa 20% sačme SS1, odnosno sačme SS2, imali su nivo otpuštanja ulja 3,50 i 3,56%. Sastav hrane za ribe je imao uticaj na otpuštanje ulja uzoraka, što je u skladu sa ranijim istraživanjima *Draganovića i saradnika (2013)*.

Rezultati indeksa stabilnosti granula u vodi (ISV) varirali su od 19,22% za uzorak **6**, do 33,44%, koliko je imao uzorak **3**. Primenjena metoda natapanja uzorka u vodi i naknadnog mokrog prosejavanja dala je rezultate sa jasnim razlikama između stabilnosti granula različitih uzoraka u vodi. Uzorak **1** imao je ISV od 21,60%, a zamenom 6,6% sačme SS1 sačmom SS2, uticala je da se ISV poveća na 28,02%. Zamena 13,4% sačme SS1 sačmom SS2 doprinela je da uzorak **3** ima maksimalnu vrednost ISV (33,44%). Uzorak **10**, sa 20% sačme SS3, imao je visoku vrednost ISV-a od 30,29%, što može da bude u vezi sa uticajem koji je najkvalitetnija korišćena sačma imala na strukturu granula, tako da je uzorak **10** imao odličnu tvrdoću i indeks izdržljivosti granule, što je uticalo na veću sposobnost da izdrži mehaničku manipulaciju tokom izvođenja metode određivanja stabilnosti u vodi.

Analiza glavnih komponenti (engl. *Principal Component Analysis*, PCA) korišćena je za detektovanje i analizu odnosa između tri suncokretove sačme i parametara fizičkog kvaliteta granula, odnosno odzivnih promenljivih. PCA analiza omogućava značajno smanjenje broja promenljivih koji učestvuju u analizi. Sve određene vrednosti fizičkog kvaliteta (Tabela 4.11) 10 uzoraka proizvedenih po eksperimentalnom planu (Tabela 3.5) podvrgnuti su PCA analizi. Analiza je pokazala da su prve četiri sopstvene vrednosti (*eigenvalues*) statistički značajne (tj. veće od 1, po *Kaiser*-ovom pravilu) i da imaju vrednosti: 3,50; 2,64; 1,91 i 1,20. Prva glavna komponenta je opisala 35,03% ukupne varijanse, druga 26,41%, treća je opisala 19,12%, a četvrta komponenta opisala je 12,04% ukupne varijanse. Kvalitativni rezultati za ovu analizu pokazali su da prve tri glavne komponente zajednički

prikazuju 80,56% ukupne varijanse što može da se smatra dovoljnim za prikazivanje celokupnog seta eksperimentalnih podataka. Grafički prikaz trendova i efikasnost odvajanja grupa uzoraka na osnovu korišćenih deskriptora prikazana je na slici 4.7, gde su prikazani uzorci i promenljive, u prvoj i drugoj faktorskoj ravni, dobijene PCA analizom.

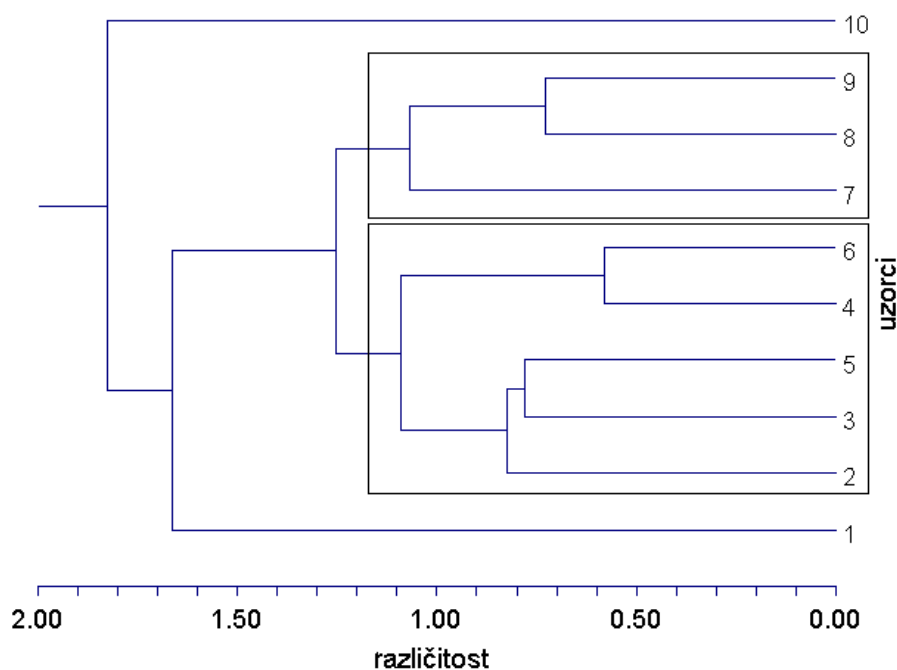


Slika 4.7. Biplot grafik – projekcija u prvoj faktorskoj ravni (PC1-PC2) i drugoj faktorskoj ravni (PC1-PC3): CG – cele granule, DV – DORIS vrednost; ISV – indeks stabilnosti u vodi; KT – KAHL tvrdoća; KUU – kapacitet upijanja ulja; NM – nasipna masa; PDI – pellet durability index (engl.); OU – otpuštanje ulja; SE – stepen ekspanzije; SS1 – početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM)

Nasipna masa (NM) (koja prikazuje 26,0% ukupne varijanse, računato na osnovu korelacije) i tvrdoća određena teksturometrom (TT) (24,0%), su bile najznačajnije promenljive koje su pozitivno uticale na izračunavanje prve glavne komponente, dok su kapacitet upijanja ulja (KUU) (sa 21,8% udela od ukupne varijanse) i nivo otpuštanja ulja (OU) (22,3% od ukupne varijanse), bile najznačajnije promenljive koje su negativno uticale na izračunavanje prve glavne komponente. Na PC1-PC2 grafiku prikazanom na Slici 4.7, na pozitivnom delu PC1 ose nalaze se uzorci **7, 8 i 9**, koje je karakterisala veća nasipna masa (NM) i tvrdoća merena teksturometrom (TT), kao i manji kapacitet upijanja (KUU) i nivo otpuštanja ulja (OU). Na negativnom kraju PC1 ose nalaze se uzorci **2 – 6** koji su imali manju nasipnu masu (NM) i tvrdoću merenu teksturometrom (TT) i veći kapacitet upijanja (KUU) i nivo otpuštanja ulja (OU). Pozitivan uticaj za izračunavanje druge faktorske koordinate pokazala je promenljiva DORIS vrednost (DV) (20,5%), dok su negativan uticaj pokazale promenljive: stepen ekspanzije (SE), sa 27,2%, PDI kao pokazatelj otpornosti na otiranje, sa 22,0%, i procenat celih granula (CG), sa 20,5% ukupne varijanse. Maksimalan sadržaj sačme SS1 sa oko 37% proteina (SM) u uzorku **1** i maksimalan sadržaj visokoproteinske sačme sa 50% proteina (SM) u uzorku **10** uticali su na njihove fizičke karakteristike i njihovo pozicioniranje na grafiku. Suncokretova sačma SS1 uticala je tako da je uzorak **1** imao najmanju vrednost stepena ekspanzije (SE), najlošiju otpornost na otiranje u vidu najmanjeg PDI, najmanji procenat celih granula (CG), najveću DORIS vrednosti (DV), najmanju tvrdoće merenu teksturometrom (TT) i kao i velike vrednosti nivoa otpuštanja ulja (OU). Sa druge strane, prisustvo sačme SS3 u smeši uticalo je tako da je uzorak **10** imao najveću vrednost nasipne mase (NM) i tvrdoće merene teksturometrom (TT) i najmanju vrednost kapaciteta upijanja (KUU) i otpuštanja ulja (OU).

Promenljiva CG koja prikazuje 21,4% ukupne varijanse, bila je najznačajnija promenljiva koja je pozitivno uticala na izračunavanje treće glavne komponente, dok su DV (21,4%) i KT (32,8%), bile najznačajnije promenljive koje su negativno uticale na izračunavanje treće glavne komponente.

Hijerarhijska klaster analiza urađena je sa ciljem da se potvrde rezultati dobijeni pomoću analize glavnih komponenti. Dendrogram dobijen kao rezultat klasterovanja ispitivanih uzoraka u odnosu na eksperimentalno određene fizičke karakteristike prikazan je na slici 4.8.



Slika 4.8. Dendrogram klasterovanja ispitivanih uzoraka u odnosu na eksperimentalno određene fizičke karakteristike

Moguće je uočiti prisustvo dva jasno definisana klastera sa podklasterima i dva uzorka (**1** i **10**) koji se nalaze van klastera. U prvom klasteru nalaze se uzorci **7 – 9**, koje karakteriše veća NM i TT kao i manje vrednosti KUU i OU. Drugi klaster čine uzorci **2 – 6** koji sa manjim vrednostima NM i TT i većim KUU i OU. Pozicioniranje uzoraka **1** i **10** van klastera, još jedna je potvrda uticaja koju su najmanje (SS1) i najviše (SS3) kvalitetna korišćena sačma imale na fizički kvalitet granula. Visoki udeo sačme SS1 (20%) u hrani za ribe negativno je uticao na SE, PDI i tvrdoću. S druge strane, maksimalan udeo visokoproteinske SS3 sačme imao je pozitivan uticaj na fizički kvalitet hrane za ribe koji se ogledao u visokoj tvrdoći, niskom stepenu otiranja i otpuštanja ulja. Na ovaj način, grupisanje ispitivanih uzoraka dobijeno pomoću analize glavnih komponenti potvrđeno je primenom hijerarhijske klaster analize.

Za konačnu karakterizaciju tri korišćene suncokretove sačme i odabir sačme koja je ukupno imala najbolji uticaj na fizički kvalitet eksperimentalnih uzoraka hrane za ribe, primenjena je analiza standardnih ocena (engl. *Standard Score*, SS). Uzorci hrane za ribu rangirani su na osnovu odnosa merenih i ekstremnih vrednosti svakog pokazatelja fizičkog kvaliteta. Na eksperimentalno određene parametre fizičkog kvaliteta uzoraka primenjena je *min-max* normalizacija uz izbor odgovarajućeg kriterijuma za svaki parametar. Kriterijum „veće je bolje“ odabran je za sledeće parametre: SE, TT, KT, PDI, CG, KUU i ISV. Za normalizaciju je primenjena jednačina 3.23. Za parametre DV i OU izabran je kriterijum „manje je bolje“ i za njihovu normalizaciju korišćen je proračun na osnovu jednačine 3.24. Za NM uzet je kriterijum optimalne vrednosti od 500 g/l, jer su eksperimentalni uzorci hrane za ribe bili namenjeni za ishranu pastrmke, koja zahteva sporotonuće granule, a vrednost nasipne mase od

minimum 500 g/l obezbeđuje ovakve osobine tonjenja granula u slatkoj vodi (Rokey, 2007). Jednačina 3.25 primenjena je za normalizaciju vrednosti nasipne mase. Standardna ocena za svaki uzorak dobijena je proračunom prosečne vrednosti normalizovanih ocena svih parametara kvaliteta. Rezultati analize standardne ocene prikazani su u tabeli 4.12.

Tabela 4.12. Standardna ocena uzoraka hrane za ribe prvog dela faze ekstrudiranja

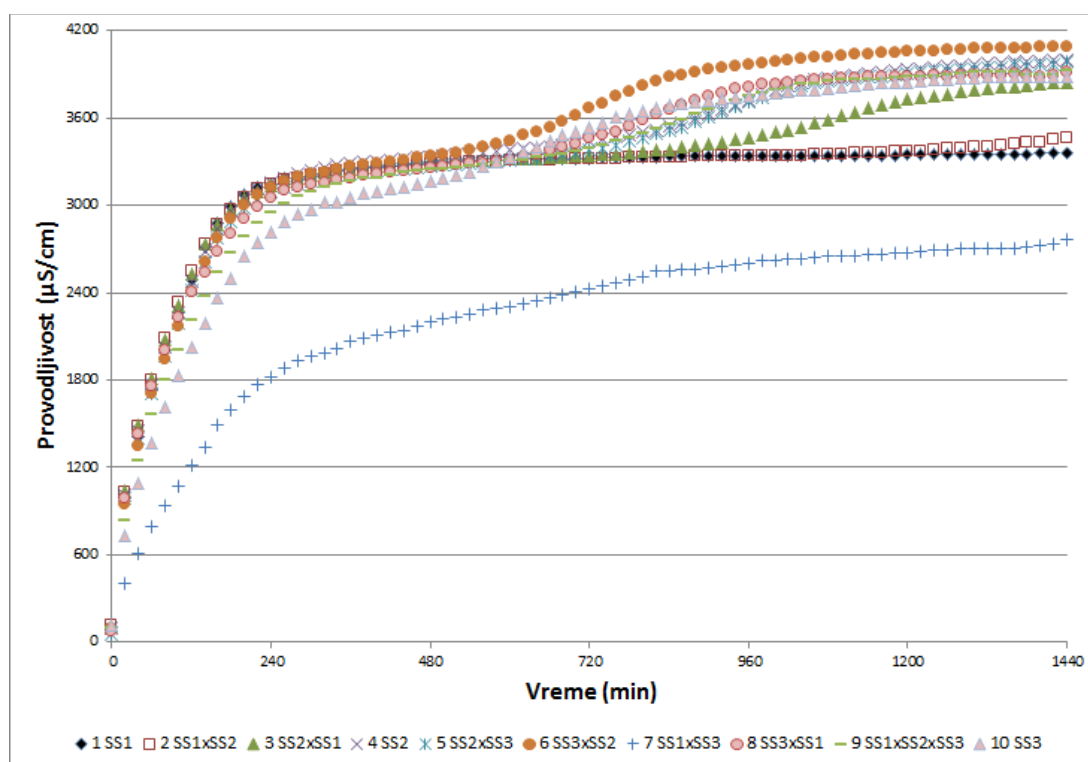
Uzorak	Opis uzorka	Udeo promenljive sirovine			Standardna ocena
		SS1	SS2	SS3	
1	SS1	20,0	0,0	0,0	0,17
2	SS1xSS2	13,4	6,6	0,0	0,42
3	SS2xSS1	6,6	13,4	0,0	0,55
4	SS2	0,0	20,0	0,0	0,51
5	SS2xSS3	0,0	13,4	6,6	0,54
6	SS3xSS2	0,0	6,6	13,4	0,57
7	SS1xSS3	13,4	0,0	6,6	0,48
8	SS3xSS1	6,6	0,0	13,4	0,66
9	SS1xSS2xSS3	6,6	6,6	6,6	0,51
10	SS3	0,0	0,0	20,0	0,54

SS1 – početna suncokretova sačma sa oko 37% proteina (SM); SS2 – suncokretova sačma sa oko 43% proteina (SM); SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM)

Smatra se da standardna ocena manja od 0,6 pokazuje da uzorci nemaju zadovoljavajući fizički kvalitet (*Brlek i sar., 2013*). Standardna ocena uzorka **1**, sa 20% sačme SS1, bila je daleko najmanja od svih izračunatih i iznosila je 0,17. Zamena 6,6% suncokretove sačme SS1 sačmom SS2 u uzorku **2**, uticala je na fizički kvalitet tako da se standardna ocena povećala na 0,42. Sačma SS3 doprinela je daljem poboljšanju fizičkog kvaliteta, tako da je uzorak **7**, sa 13,4% sačme SS1 i 6,6% sačme SS3, imao standardnu ocenu 0,48. Uzorak **2**, koji je u svom sastavu imao 6,6% sačme SS1 i 13,4% sačme SS2, imao je standardnu ocenu od 0,55, a potpuna zamena sačme SS1 sačmom SS2 dovela je do blagog smanjenja standardne ocene na 0,51 (uzorak **4**). Na smanjenje standardne ocene uticala je čak 40% manja stabilnost u vodi uzorka **4** (20,25%) u poređenju sa uzorkom **3** (33,44%). Standardna ocena uzorka **4** bila je jednaka oceni koju je imao uzorak **9**, u čijem sastavu su sve 3 korišćene sačme našle u podjednakom udelu. Dalja zamena sačme SS2 sačmom SS3 delovala je pozitivno na fizički kvalitet uzorka što je dovelo do povećanja standardne ocene sa 0,51 na 0,54 (uzorak **5**) i 0,57 (uzorak **6**). Najveću standardnu ocenu od 0,66 imao je uzorak **8** sa 6,6% sačme SS1 i 13,4% sačme SS3. Visok sadržaj sačme SS3 u uzorku **8** uticao je na dobijanje optimalnog fizičkog kvaliteta granula. Uzorak **10** sa 20% sačme SS3 je postigao standardnu ocenu od 0,54. Iako je uzorak SS3 odlikovala najveća NM i TT, kao i najniži nivo OU i visoka vrednost PDI i ISV, nizak kvalitet DORIS testa uticao je na smanjenje standardne ocene u poređenju sa uzorkom **8**.

4.2.1.4. Konduktometrijska analiza u prvom delu faze ekstrudiranja

Za određivanje gubitka nutritijenata hrane za ribe u vodi primenjena je konduktometrijska metoda. Vrednost provodljivosti vode u kojoj su se granule natapale i raspadale, merena je na svakih 20 minuta tokom 24h. Kao rezultat, za svaki uzorak, dobijena je kriva zavisnosti provodljivosti od vremena (Slika 4.9). Veća vrednost provodljivosti vode u toku eksperimenta ukazivala je na veći nivo otpuštanja nutritijenata uzoraka. Na dinamiku otpuštanja nutrijenata ukazivao je oblik krive. Veći nagib krive ukazivao je na brže otpuštanje nutrijenata iz granula.



Slika 4.9. Krive provodljivosti vode uzoraka hrane za ribe uronjenih tokom 24 h

Ispitani uzorci bili su namenjeni za ishranu pastrmke. Pastrmka je vrsta koja spada u grupu riba koje trenutno konzumiraju hranu od momenta distribuiranja hrane u ribnjacima (*Chen i Jenn, 1992*) i dovoljno je da granule budu stabilne u vodi svega nekoliko minuta (*Tacon, 1996*). Granule koje ribe nisu pojele nakon hranjenja ostaju u vodi, i svojim raspadanjem i otpuštanjem u vodi rastvornih hranljivih materija, doprinose zagađenju vode, smanjenju koncentracije rastvorljivog kiseonika, povećanju biološke potrošnje kiseonika i povećanju broja bakterija u vodi (*Craig i Helfrich, 2002*). Hrana za ribe stoga, mora imati dobru stabilnost u vodi uz minimalan gubitak vrednih nutrijenata, jer se time umanjuju potencijalni ekonomski gubici u hrani i proizvodnim performansama. Najvažnije hranljive materije hrane za ribe jesu proteini, koji su rastvorni u vodi, i masti, koje se gube isticanjem ulja iz pora granula tokom vremena (*Ighwela i sar., 2013*).

Uzorci **1** i **2** sa 20%, odnosno 13,4% sačme SS1, imali su gotovo identične krive provodljivosti, što je ukazalo na isti nivo i dinamiku otpuštanja hranljivih materija kod ova dva uzorka. Početna vrednost provodljivosti za uzorak **1** iznosila je 74,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je za uzorak **2** iznosila 117,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nakon 20 min uranjanja uzoraka u vodu, provodljivost se povećala na 986 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za uzorak **1**, odnosno 1029 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za uzorak **2**. Provodljivost vode rasla je velikom dinamikom prvih 5 sati, nakon čega je došlo do usporavanja odnosno smanjenja otpuštanja nutrijenata iz granula. Dostignute vrednosti provodljivosti u petom satu uzorka **1** i **2** iznosile su 3220 $\mu\text{S}/\text{cm}$, odnosno 3210 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Preostalih 19 časova merenja provodljivosti, otpuštanje nutrijenata uzoraka bilo je minimalno te se provodljivost vode neznatno povećavala kako je vreme odmicalo, i po isteku jednog dana, iznosila je 3360 i 3460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za uzorak **1**, odnosno uzorak **2**. U istraživanju Ighwela i saradnika (2013), u različitim vremenskim intervalima praćeno je smanjenje sadržaja proteina i masti hrane za ribe koja je 6 sati bila uronjena u vodu. Primenjena je gravimetrijska metoda, gde su ostaci uzorka vađeni iz vode i sušeni, nakon čega im je određivan sadržaj proteina i masti. Za pet različitih uzoraka suvi ostatak nakon 6 sati iznosio je u proseku 74%, dok je gubitak proteina u istom vremenskom periodu bio u rasponu od 23,72 – 29,25% od početnog sadržaja, a masti visokih 42,61 – 51,73%. Povećanje provodljivosti vode, bila je posledica i gubitka masti sa površine granula što je u skladu sa rezultatima Ighwela i saradnika (2013).

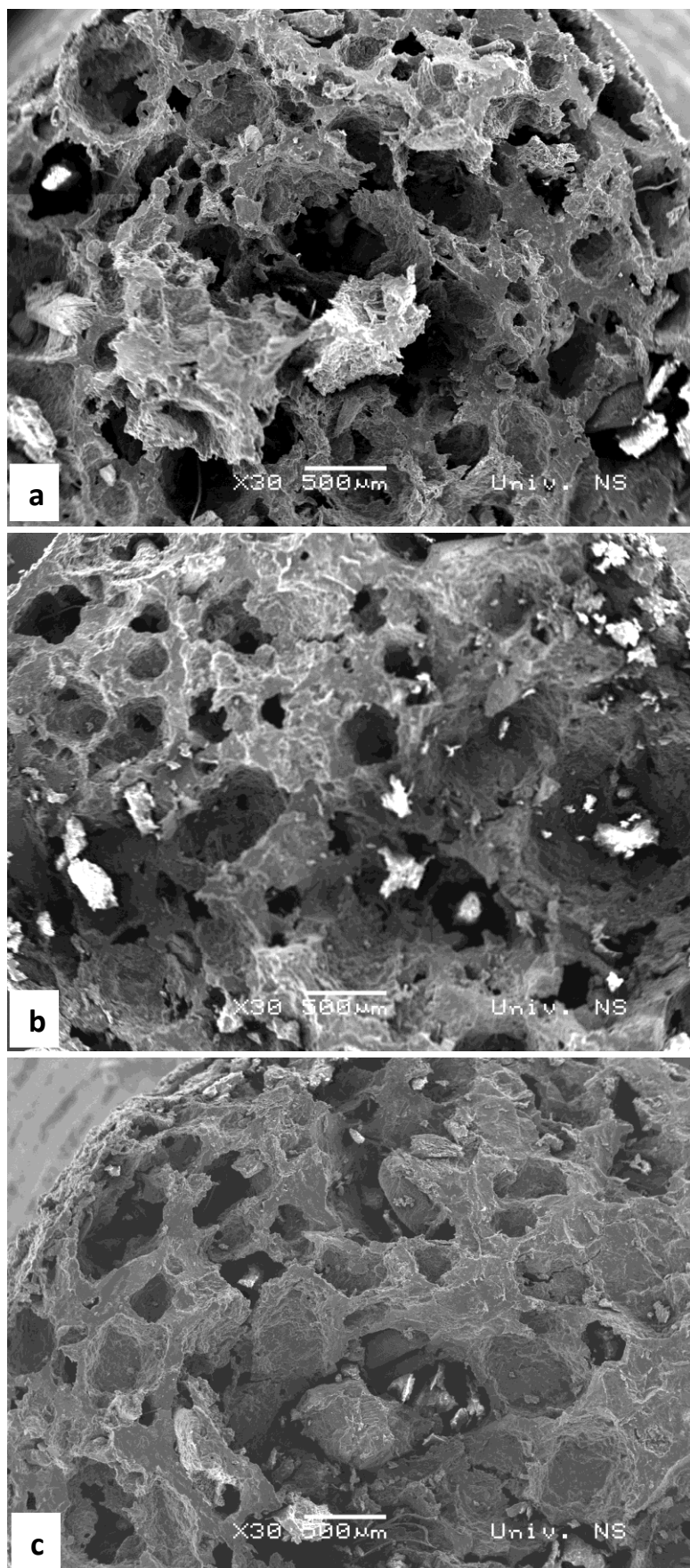
Zamena 13,4% sačme SS1 sa sačmom SS2 kod uzorka **3**, rezultovala je krivom približno istog nivoa i dinamike otpuštanja nutrijenata u vodi kao i kod uzoraka **1** i **2**. Brzi porast provodljivosti nakon petog sata zamenu je umereni porast, da bi se u četrnaestom satu ponovo javio skok provodljivosti, koji je bio prisutan do kraja merenja, kad je finalna vrednost iznosila 3840 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Viša vrednost provodljivosti uzorka **3** u 24. satu u poređenju sa istom vrednošću uzorka **1** i **2** ukazuje na veće otpuštanje nutrijenata, koje može da bude uslovljeno većom ekspanzijom, usled čega su pore veće i dostupnije vodi, bez obzira što je uzorak **3** imao višu vrednost ISV-a, koji iskazuje fizičku stabilnost uzorka u vodi (Tabela 4.11). Krive provodljivosti uzoraka **4**, sa 20% sačme SS2, **5** sa 6,6% sačme SS2 i 13,4% sačme SS3, kao i uzorka **6**, sa 6,6% sačme SS1 i 13,4% sačme SS3 u prvih pet sati bile su bliske krivama uzorka **1**, **2** i **3**. Postojala je bliska dinamika rasta provodljivosti, odnosno otpuštanja hranljivih materija, gde je provodljivost nakon 20 minuta iznosila 1013, 991 i 952 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za uzorke **4**, **5** i **6**, dok je u petom satu vrednost provodljivosti za iste uzorke redom iznosila 3240, 3170 i 3220 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Novi porast krive provodljivosti bio je prisutan nakon devetog sata za uzorke **4** i **6**, odnosno dvanaestog sata za uzorak **5**. Finalne vrednosti provodljivosti na kraju merenja iznosile su 4000, 3990 i 4090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za uzorak **4**, **5** i **6**, redom. Sva tri navedena uzorka imali su bliske vrednosti SE (31,88 – 32,38%) i OU (3,56 – 3,74%), ali je verovatno najviši stepen ekspanzije i mikrostruktura granule uzorka **6** uticala da ima najvišu vrednost provodljivosti nakon 24 h od uranjanja u vodu.

Uzorak **7**, koji je u svom sastavu imao 13,4% sačme SS1 i 6,6% sačme SS3, imao je najniže vrednosti provodljivosti u svakoj merenoj tački od svih ispitanih uzoraka, uz opuštanje nutritijenata koje je do šestog sata imalo velik intenzitet, nakon čega se smanjilo. Finalna vrednost provodljivosti uzorka **7** iznosila je 2770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i bila je za 21% manja od krajnje provodljivosti vode uzorka **1**, koje je imalo drugu najnižu vrednost od svih uzoraka. Uzorak **7** karakterisao je nizak SE (27,63%) kao i niski stepen OU (3,10%) u poređenju sa ostalim uzorcima, što je uticalo da ima najmanje otpuštanje nutrijenata u vodu. Krive provodljivosti formirane otpuštanjem nutrijenata u vodu uzoraka **8** i **9** imali su bliski profil sa preostalim uzorcima, uz niže vrednosti finalne provodljivosti u poređenju sa uzorcima **4**, **5** i **6**, koje su iznosile 3920 i 3930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za uzorak **8**, odnosno uzorak **9**. Otpuštanje nutritijenata uzorka **10**, koji je sadržao 20% sačme SS3, uticalo je da se formira kriva provodljivosti koja je, kao i krive ostalih uzoraka, imala intenzivan rast do petog sata (ostvarena provodljivost 3190 $\mu\text{S}/\text{cm}$), a potom je ujedančeno nastavila sa rastom, ali smanjenim intenzitetom. Uzorak **10** je ipak doprinelo manjim vrednostima provodljivosti u prvih 5 sati od momenta uranjanja granula u vodu u poređenju sa svim ostalim uzorcima, osim uzorka **7**. Maksimalan udeo sačme SS3, sa oko 49% proteina na SM (uzorak **10**), uticao je da nivo otpuštanje nutritijenata bude manji u prvih 10 sati u poređenju sa ostalim uzorcima, ali je krajnja vrednost provodljivosti po isteku 24 h (3890 $\mu\text{S}/\text{cm}$) bila bliska onima koje su ostvarene otpuštanjem nutrijenata kod uzoraka **3**, **8** i **9**. Iako je sačma SS3 doprinela niskom nivou otpuštanja ulja, nije imala uticaj na smanjenje gubitaka nutrijenata u vodi. Najmanjem gubitku nutrijentata nakon jednodnevnog uranjanja u vodu doprinela je početna sačma SS1 sa oko 36% proteina na SM.

4.2.1.5. Mikrostruktura granula u prvom delu faze ekstrudiranja

Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) korišćen je za snimanje mikrostrukture poprečnog preseka uzoraka granula koji su sadržali maksimalan udeo svake od tri ispitane suncokretove sačme: uzorak **1** (20% sačme SS1), uzorak **4** (20% sačme SS2) i uzorak **10** (20% sačme SS3). SEM fotografije sva tri uzorka prikazane su na slici 4.10.

Suncokretova sačma i njene visokoproteinske frakcije uticale su da granule imaju neravnomernu veličinu pora. Iako je posedovao najmanji stepen ekspanzije (22,88%) uzorak **1** je posedovao najveći broj pora, naročito u sredini granule, gde je bila prisutna šupljina izrazito velike zapremine (Slika 4.10a). Početna suncokretova sačma najslabijeg kvaliteta (SS1) uticala je da granula ima strukturu bez kompaktnosti, prožetu mnoštvom kanala i pora velikih prečnika. Naročito su uočljive pore uz spoljašnje ivice granule. Nedostatak kompaktnosti granula uzorka **1**, uticao je da ovaj uzorak ima najslabiji fizički kvalitet u pogledu tvrdoće i stepena otiranja (Tabela 4.10). Suncokretova sačma SS1 ima negativan uticaj na stvaranje ujednačene i kompaktne strukture granule.



Slika 4.10. SEM snimak poprečnog preseka granula (a) uzorak 1 sa 20% sačme SS1 (b) uzorak 4 sa 20% sačme SS2 (c) uzorak 10 sa 20% sačme SS3

Visokoproteinska sačma SS2 doprinela je da granula uzorka **4** ima kompaktniju strukturu, sa ujednačenijim porama u poređenju sa uzorkom **1**. Viši stepen ekspanzije uzorka **4** (31,88%) u poređenju sa uzorkom **1** (22,88%) uticao je na dobijanje granule značajno većeg prečnika, ali je kompaktnija struktura uz manju neujednačenost pora uticala da kapacitet upijanja ulja i nivo otpuštanja ulja za uzorak **4** (59,74% i 3,56%) budu tek neznatno veći u odnosu na uzorak **1** (58,38% i 3,50%). Kompaktnija struktura ujedno je i doprinela većoj tvrdoći i otpornosti na abraziju.

Uzorak **10** posedovao je najkompaktniju strukturu od sva tri snimljena uzorka, sa relativno najujednačenijim porama (Slika 4.11c). Kompaktna struktura uticala je da uzorak **10** ima najveću nasipnu masu (532,10 g/l) kao i najviše vrednosti tvrdoće određene teksturometrom (6,29 kg) i KAHL pelet testerom (5,30 KAHL jedinica), ali uz ipak drugu najmanju vrednost kapaciteta upijanja ulja (53,89%) u poređenju sa ostalim uzorcima. Međutim, mikrostruktura uzorka **10**, kojoj je doprinela visokoproteinska frakcija SS3, obezbedila je da proizvod ima izrazito nizak nivo otpuštanja ulja (2,92%) i odličnu stabilnost u vodi uz minimalno otpuštanje nutrijenata u poređenju sa ostalim uzorcima. SEM analiza uzoraka sa maksimalnim udelima ispitivanih suncokretovih sačmi pokazala je da prisustvo suncokretove sačme različitog kvaliteta u hrani za ribe ima značajan uticaj na mikrostrukturu granula, koja dalje ima veliki uticaj na fizičke karakteristike hrane za ribe, pre svega na tvrdoću, kapacitet upijanja ulja i otpuštanje ulja. Suncokretova sačma SS1, sa najmanjim sadržajem proteina i najvećim sadržajem celuloze od sve tri ispitane sačme, uticala je da se dobije mikrostruktura sa velikim brojem pora velikih prečnika i mnoštvom šupljina koje imaju negativan uticaj na nasipnu masu, tvrdoću, otiranje kao i kapacitet otpuštanja ulja. Iako prethodna istraživanja pokazuju da je povećanje sadržaja celuloze smeše imalo pozitivan uticaj na tvrdoću i otiranje finalne hrane za ishranu riba (*Hansen i Storebakken, 2007; Kraugerud i sar., 2011*), poboljšanje tvrdoće i otpornosti na otiranje granula sa smanjenjem sadržaja celuloze može da se objasni mikrostrukturom granula kao i specifičnim izvorom celuloze, suncokretovom sačmom, gde je povećanje sadržaja proteina u suncokretovoj sačmi koja ulazi u sastav hrane za pastrmke, uticalo da se dobija kompaktnija i manje porozna struktura, uprkos povećanju stepena ekspanzije.

4.2.2. Drugi deo faze ekstrudiranja – poređenje visokoproteinske suncokretove sačme sa sojinim i ribljim brašnom

Visok sadržaj proteina (49,31% SM) i nizak sadržaj celuloze (9,51% SM) koji je posedovala sačma SS3 doprineli su dobrom fizičkom kvalitetu ekstrudiranih uzoraka hrane za ishranu pastrmke. Rezultati klasifikacionih statističkih metoda, PCA i HCA analize, pokazali su izdvajanje uzorka **10** od ostalih, kod koga jer je SS3 sačma doprinela visokoj tvrdoći i otpornosti na otiranje, najvažnijim

fizičkim karakteristikama ekstrudirane hrane za ribe, kao i optimalnoj nasipnoj masi. Analiza standardne ocene pokazala je da je suncokretova sačma SS3 takođe doprinela visokim standardnim ocenama. Najveću standardnu ocenu (0,66) imao je uzorak **8**, koji je u svom sastavu imao 6,6% SS1 i 13,4% SS3 sačme. Drugu najveću standardnu ocenu (0,57) imao je uzorak **6** koji je sadržao 6,6% SS2 i 13,4% SS3 sačme. Visoku standardnu ocenu (0,54) imao je i uzorak **10**, koji je u svom sastavu imao isključivo SS3 sačmu, dok je ista sačma doprinela visokoj standardnoj oceni (0,54) u kombinaciji sa 13,4% sačme SS2 u uzorku **5**. Visok sadržaj proteina koji SS3 sačma ima čini je takođe potencijalno najinteresantnijom sirovinom za zamenu ribljeg brašna, naročito jer je njen hemijski sastav uporediv sa sojinom sačmom prvog kvaliteta, za koju je Pravilnikom o kvalitetu hrane za životinje zahtevano minimalno 48% proteina (*Službeni glasnik RS 4/2010, 113/2012, 27/2014, 25/2015, 39/2016 i 54/2017*).

Odabrana suncokretova sačma učestvovala je kao jedna od promenljivih sirovina u recepturi za hranu za pastrmke koja je predstavljena u tabeli 3.4. Ova suncokretova sačma, koja je u prvom delu faze ekstrudiranja bila označena sa SS3, u drugom delu dobila je oznaku SS, a njen udeo u recepturi, kao i u prvom delu faze ekstrudiranja, menjan na osnovu dizajna smeša prikazanog u tabeli 3.6.

4.2.2.1. Hemijski sastav suvih smeša u drugom delu faze ekstrudiranja

Nakon mlevenja i mešanja sirovina, urađena je analiza hemijskog sastava suvih smeša korišćenih za proizvodnju uzoraka ekstrudirane hrane za ribe. U suhu smešu su ušle sve sirovine, osim potrebne količine ulja koja je dodata nakon ekstrudiranja, oblaganjem granula u vakuumu. Rezultati hemijske analize prikazani su u tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Hemijski sastav suvih smeša drugog dela eksperimentalne faze ekstrudiranja

Uzorak	Opis uzorka	Vlaga (%)	Protein (% SM)	Mast (% SM)	Celuloza (% SM)	Pepeo (% SM)	BEM (% SM)	Skrob (% SM)
1	SS	6,35	45,57	4,13	4,73	12,71	32,86	23,67
2	SSxSB	6,60	46,07	4,35	3,50	14,73	31,35	22,19
3	SBxSS	5,73	46,46	4,23	3,49	12,10	33,54	25,66
4	SB	5,95	46,97	4,16	2,77	11,20	34,90	26,02
5	SBxRB	6,57	47,03	5,12	2,75	12,19	32,92	24,66
6	RBxSB	6,53	47,41	5,55	2,25	13,31	31,48	23,41
7	SSxRB	6,82	46,13	5,47	4,52	13,34	30,54	24,56
8	RBxSS	6,46	47,13	5,60	2,13	13,55	32,94	25,86
9	SSxSBxRB	5,86	47,02	4,68	2,27	13,09	34,56	23,86
10	RB	6,50	47,67	6,44	2,03	15,67	28,19	24,63

SS – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM); SB – sojino brašno; RB – riblje brašno; BEM – bezazotne ekstraktivne materije

Promena sastava smeše uticala je na promene u hemijskom sastavu. Rezultati hemijske analize su pokazali da je sadržaj vlage suvih smeša varirao od 5,73% do 6,82%. Suncokretova sačma i riblje brašno u recepturi doprineli su povećanju sadržaja vlage. Sadržaj proteina eksperimentalnih smeša kretao se u uskom opsegu, od 45,57% do 47,67% (SM). Najmanji sadržaj proteina (45,57% SM) imala je smeša za proizvodnju uzorka **1** koja je sadržala samo suncokretovu sačmu. Sadržaj proteina smeša rastao je sa smanjenjem udela suncokretove sačme i istovremenim povećanjem udela sojinog brašna. Sadržaj proteina smeše za proizvodnju uzorka **4**, iznosio je 46,97% (SM). Ova smeša imala je u svom sastavu isključivo sojino brašno od tri promenljive proteinske komponente. Dalje smanjenje udela sojinog brašna i povećanje udela ribljeg brašna dovelo je do dodatnog povećanja sadržaja proteina. Tako je očekivano najveći sadržaj proteina (47,67% SM) imala smeša za proizvodnju uzorka **10**, u čiji sastav je od tri sirovine koje su varirane na osnovu eksperimentalnog dizajna bilo uključeno samo riblje brašno.

Povećanje udela ribljeg brašna u smeši pored povećanja sadržaja proteina dovelo je i do povećanja sadržaja masti smeše. Sadržaj masti smeša za proizvodnju uzoraka **1**, **2**, **3** i **4** bio je približno isti i iznosio je od 4,13 do 4,35% (SM). U navedene četiri smeše riblje brašno nije ulazilo u sastav promenljivog dela. Uključenje ribljeg brašna povećalo je sadržaj masti smeša, do nivoa od 6,44% SM, koliko je imala smeša **10**, koja je u svom sastavu imala isključivo riblje brašno. Smanjenjem udela suncokretove sačme, smanjivao se i sadržaj celuloze u smešama. Najveći sadržaj celuloze (4,73%) imala je smeša **1**, u kojoj je učestvovala samo suncokretova sačma. Smanjenje udela sačme i povećanje udela najpre sojinog brašna, potom i ribljeg brašna dovelo je do smanjenja sadržaja celuloze na nivo od 2,03% (SM), koliko je imala smeša za proizvodnju uzorka **10**. Rezultat hemijskog sastava smeša u skladu je sa rezultatima istraživanja *Tyapkove i saradnika (2016)* gde je zamena 25% ribljeg brašna sa pogačama uljane repice, soje, lana i suncokreta uticala da finalni proizvodi imaju viši sadržaj celuloze od referentne smeše, i da pritom proizvod sa dodatkom suncokretove pogače ima najviše celuloze, a najmanje proteina. Riblje brašno je najviše doprinelo povećanju sadržaja pepela. Najveći sadržaj pepela (15,67%) imala je smeša **10**, dok je najmanje pepela sadržala smeša za proizvodnju uzorka **4** (11,20%), koja je sadržala samo sojino brašno. Sadržaj skroba bio je relativno visok za hranu za pastrmke (*Sørensen, 2012*), zbog velikog udela pšenice u recepturi, i varirao je od 22,19% (smeša uzorka **2**) do 26,02% (SM), koliko je imala smeša za proizvodnju uzorka **4**. Uključenje sojinog brašna i ribljeg brašna u smeše doprinelo je porastu sadržaja skroba u odnosu na smešu za proizvodnju uzorka **1**, koja je sadržala samo suncokretovu sačmu (23,7% SM).

4.2.2.2. Uticaj sastava smeše na parametre ekstrudiranja u drugom delu faze ekstrudiranja

Parameteri ekstrudiranja drugog dela faze eksperimentalne proizvodnje hrane za ribe prikazani su u tabeli 4.14. Kao i u prvom delu ove faze istraživanja, i u drugom delu je jedini promenljivi parametar tokom ekstrudiranja bio sastav smeše. Promena u udelu suncokretove sačme, sojinog brašna i ribljeg brašna u eksperimentalnim smešama dovela je do različitog hemijskog sastava smeša koji direktno utiče na izlazne parametre ekstrudiranja: temperature u cevi ekstrudera u zoni 3 i 6 (T3 i T6), temperaturu matrice (T), pritisak na matrici (P), opterećenju motora (OM) i specifičnoj mehaničkoj energiji (SME).

Za razliku od prvog dela ove faze istraživanja, razlika nije bila samo u hemijskom sastavu smeša, već i u poreklu proteina, odnosno različitim funkcionalnim karakteristikama koje su posedovale suncokretova sačma, sojino brašno i riblje brašno. Temperature u zoni 3 ekstrudera bile su u rasponu od 87,9 do 91,1°C tokom proizvodnje svih uzoraka. U zoni 3 dolazilo je do početnog gnječenja materijala i sila smicanja je naglo rasla, povećavajući pritisak u cevi ekstrudera i dovodeći do početnih promena na skrobu i proteinima (Guy, 2001). Temperaturama višim od 90°C doprinele su smeše koje su u svom sastavu imale visoke udele suncokretove sačme i ribljeg brašna (uzorci **1**, **8** i **10**). Za uzorak **1**, koji je imao najmanje masti a najviše celuloze, visoka temperatura matrice bila je očekivana, jer mast deluje lubrikativno, te smanjuje trenje, a time i stvaranje toplote disipacijom. Sa druge strane, kod uzoraka **8** i **10**, čija je smeša sadržala 5,60% odnosno 6,40% masti (SM), očekivano je bilo da imaju najniže temperature duž cevi tokom ekstrudiranja. Ova očekivanja delimično su se ostvarila u zoni 6, gde je temperatura prilikom proizvodnje uzorka **8** bila najniža (93,7°C). Najveća temperatura u zoni 6 ostvarena je ekstrudiranjem smeše za proizvodnju uzorka **2**, koji je sadržao 13,4% suncokretove sačme i 6,6% sojinog brašna. Smeše za proizvodnju uzoraka **2** i **9**, sa 4,35% i 4,68% masti (SM), imale su takođe temperature preko 100°C u šestoj zoni cevi ekstrudera. Preostali uzorci imali su bliske temperature u zoni 6, koje su se kretale od 96,5 do 98,6°C.

Temperature na matrici bile su u rasponu od 103 do 111°C. Najniža temperatura ostvarena je pri ekstrudiranju uzorka **1**, gde je početna smeša imala najniži sadržaj proteina (45,57% SM) ali i najniži sadržaj masti (4,13% SM). Ista temperatura matrice postignuta je i kod ekstrudiranja uzorka **8** sa većim udelom ribljeg brašna, gde je i sadržaj proteina (47,13% SM) kao i masti (5,60% SM), bio veći u poređenju sa uzorkom **1**.

Tabela 4.14. Parametri ekstrudiranja smeše u drugom delu eksperimentalne faze proizvodnje hrane za ribe

Uzorak Opis uzorka	1 SS	2 SSxSB	3 SBxSS	4 SB	5 SBxRB	6 RBxSB	7 SSxRB	8 RBxSS	9 SSxSBxRB	10 RB
Kondicioniranje										
Temperatura ^a (°C)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Vlažnost ^b (%)	24,38	26,12	24,27	25,32	24,61	24,71	24,40	24,14	24,71	25,70
Ekstrudiranje										
Temperatura ^c (°C)										
Zona 3	90,3	88,5	87,9	89,4	89,4	89,6	89,9	91,1	87,9	90,0
Zona 6	93,9	101,9	100,3	98,3	98,6	97,8	96,5	93,7	101,7	96,7
Matrica	103,0	108,0	109,0	109,0	108,0	107,0	107,0	103,0	110,0	111,0
Broj obtaja puža (obrtaja/min)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Prečnik otvora matrice (mm)	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56
Površina otvora matrice (mm ²)	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Protok materijala (kg/h)	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Protok vode (kg/h)	2,8	1,7	2,9	2,1	2,7	2,5	2,8	2,9	2,5	1,8
Vlažnost materijala u cevi ekstrudera ^d (%)	28,04	28,34	28,06	28,07	28,14	27,98	28,06	27,94	27,98	28,05
Pritisak na matrici (bar)	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4
Obrtni moment ^e (Nm)	59,4	52,8	48,4	48,4	44,0	41,8	44,0	50,6	44,0	39,6
SME ^f (Wh/kg)	67,3	57,7	53,2	55,0	50,0	45,9	48,9	55,2	49,1	44,8
Broj obrtaja noža (obrtaja/min)	1300	1350	1380	1250	1300	1300	1300	1320	1350	1320

SS – visokoproteinska suncokretova sačma; SB – sojino brašno; RB – riblje brašno

^a Mereno senzorom postavljenim unutar mešalice/kondicionera.

^b Sadržaj vlage materijala određen nakon kondicioniranja brzim analizatorom sadržaja vlage.

^c Mereno senzorima postavljenim unutar cevi ekstrudera.

^d Ukupni sadržaj vlage materijala, izračunat na osnovu sadržaja vlage nakon kondicioniranja, protoka materijala i protoka vode u cevi ekstrudera.

^e Opterećenje motora, 100% obrtnog momenta je 220 Nm.

^f Specifična mehanička energija.

Uvođenjem sojinog brašna u recepturu, temperatura matrice je rasla. Pri proizvodnji uzorka **4**, koji je u sastavu imao svih 20% sojinog brašna, temperatura matrice je iznosila 109°C. Najviša temperatura na matrici (111°C) postignuta je pri ekstrudiranju smeše za uzorak **10**, koji je sadržao maksimalnu količinu ribljeg brašna. Ovakav rezultat nije bio u skladu sa rezultatima istraživanja *Sørensen i saradnika (2009)*, gde se temperatura matrice nije menjala pri zameni dela ribljeg brašna sojinom sačmom u recepturi, i *Tyapkove i saradnika (2016)*, u kojem je temperatura bila najniža kod ekstrudiranja kontrolnog uzorka, koji nije sadržao ni sojinu ni suncokretovu pogaču kao izvor proteina, već isključivo riblje brašno.

Formirani pritisci na matrici (prečnik otvora 4 mm) bili su približno istih vrednosti pri ekstrudiranju svih eksperimentalnih smeša (0,4 – 0,6 bar). Vrednosti ostvarenih pritisaka na matrici bili su značajno manji od pritiska koji se obično ostvaruju u istraživanjima zamene ribljeg brašna sačmama uljarica u ekstrudiranoj hrani za ribe, pri proizvodnji dvopužnim ekstruderom opremljenim matricom prečnik otvora 4 mm (*Sørensen i sar., 2009; Kraugerud i sar., 2011*). Ipak, kako su korišćeni drugačije konfiguracije, parametri proizvodnje i kvalitet sačmi, apsolutne vrednosti pritisaka na matrici nisu uporedivi sa rezultatima dobijenim u okviru istraživanja disertacije.

Obrtni moment kao pokazatelj opterećenja motora bio je u rasponu od 39,6 do 59,4 Nm. Najviša vrednost obrtnog momenta (59,4 Nm) postignuta je pri ekstrudiranju uzorka **1**, sa 20% suncokretove sačme. Smeša za proizvodnju uzorka **1**, sadržala je najmanje masti (4,13% SM) i najviše celuloze (4,73% SM) od svih eksperimentalnih smeša, stoga može da se zaključi da je visok sadržaj celuloze i nizak sadržaj masti uticao da smeše daju veći otpor proticanju materijala u cevi ekstrudera, a time i veće opterećenje motora. Zamena 6,6% suncokretove sačme sojinim brašnom u hrani, dovelo je do pada obrtnog momenta za 11%, a dodatno uključivanje sojinog brašna i smanjenje suncokretove sačme (uzorak **3**) smanjilo je obrtni moment za oko 15% u odnosu na proizvodnju uzorka **1**. Tokom proizvodnje uzorka **4**, sa 20% sojinog brašna, obrtni moment je iznosio 48,4 Nm, i nastavio je da pada daljom zamenom sojinog brašna ribljim brašnom. Nešto veća vrednost obrtnog momenta bila primetna je pri proizvodnji uzorka **9**, što se može dovesti u vezu sa prisustvom suncokretove sačme i uticajem za koji se pokazalo da ima na opterećenje motora. Povećanje udela ribljeg brašna dovelo je do povećanja sadržaja masti smeše. Mast deluje lubrikativno i utiče na smanjenje trenje unutar cevi ekstrudera, što dovodi do smanjenja obrtnog momenta (*Guy, 2011; Čolović i sar., 2011*). Najniža vrednost obrtnog momenta bila je pri proizvodnji uzorka **10**, koji je sadržao samo riblje brašno a time i najviše masti (6,44% SM). Veći sadržaj ribljeg brašna u smeši za ishranu riba, dao je niže obrtne momente pri korišćenju alternativnih izvora proteina i u istraživanju *Draganovića i saradnika (2011)*, gde je za zamenu ribljeg brašna korišćen pšenični gluten. Postignuti rezultati opterećenja motora u ovom delu istraživanja ipak nisu bili u skladu sa rezultatima do kojih su došli *Sørensen i saradnici (2009)*, gde zamena ribljeg brašna sojinom sačmom u hrani za ribe nije

imala nikakav uticaj na promenu obrtnog momenta tokom proizvodnje dvopužnim ekstruderom. Takođe, u istraživanju *Kraugerud-a i saradnika (2011)*, zamena ribljeg brašna različitim sačmama uljarica, dovela je do toga da suncokretova sačma ima najmanje opterećenje motora, u poređenju sa sojinom i sačmom uljane repice.

SME je, kao i obrtni moment, direktna posledica različite viskoznosti materijala i njegovog otpora proticanju u cevi ekstrudera. Najviša vrednost SME očekivano je postignuta pri proizvodnji uzorka **1** (67,3 Wh/kg). Smanjenje udela suncokretove sačme i povećanje udela sojinog brašna dovelo je do smanjenja SME. Dalje smanjenje udela sojinog brašna i njegova zamena ribljim brašnom uticala je na dodatno smanjenje SME. Kao i kod promene obrtnog momenta, i ovde je na smanjenje SME uticalo povećanje sadržaja masti i smanjenje sadržaja celuloze smeša koje su ekstrudirane. Stoga je najmanji SME od 44,8 Wh/kg postignut pri ekstrudiranju smeše uzorka **10**, sa maksimalnim sadržajem ribljeg brašna. Ovakve promene u SME u skladu su sa rezultatima *Tyapkove i saradnika (2016)*, gde je 25% ribljeg brašna zamenjeno sa pogačama različitih uljarica (uljane repice, soje, lana i suncokreta) i gde je prisustvo suncokretove pogače uticalo da smeša ima najviše celuloze i da se pri proizvodnji pri istim parametrima javi najviša vrednost SME. U navedenom istraživanju, samo je uključivanje uljane repice u smešu za ishranu riba uzrokovalo nižu vrednost SME ekstrudera, nego riblje brašno, što je posledica velikog sadržaja masti.

Rezultati regresionog modela za odzive ekstrudiranja drugog dela faze eksperimentalne proizvodnje hrane za ribe prikazani su u tabeli 4.15.

Tabela 4.15. Regresioni model izlaznih parametara ekstrudiranja

	T3	T6	T	P	OM	SME
SS	4,493±0,032 ⁺	4,705±0,090 ⁺	5,160±0,125 ⁺	0,024±0,001 ⁺	2,877±0,211 ⁺	3,257±0,219 ⁺
SB	4,453±0,032 ⁺	4,856±0,090 ⁺	5,409±0,125 ⁺	0,031±0,001 ⁺	2,408±0,211 ⁺	2,743±0,219 ⁺
RB	4,494±0,032 ⁺	4,767±0,090 ⁺	5,444±0,125 ⁺	0,020±0,001 ⁺	2,080±0,211 ⁺	2,326±0,219 ⁺
SS × SB	-0,021±0,007 [*]	0,061±0,020 [*]	0,032±0,028	-0,001±0,000 [*]	-0,032±0,047	-0,056±0,048
SS × RB	0,000±0,007	0,004±0,020	-0,011±0,028	0,001±0,000 ^{**}	-0,032±0,047	-0,047±0,048
SB × RB	-0,007±0,007	0,022±0,020	-0,011±0,028	0,000±0,000	-0,028±0,047	-0,035±0,048

SS – suncokretova sačma; SB – sojino brašno; SS3 – suncokretova sačma sa oko 49% proteina (SM); T3 – temperatura u zoni 3 ekstrudera; T6 – temperatura u zoni 6 ekstrudera; T – temperature matrice; P – pritisak na matrici; OM – opterećenje motora; SME – specifična mehanička energija

⁺statistički značajno na nivou $p < 0,01$; ^{*}statistički značajno na nivou $p < 0,05$; ^{**}statistički značajno na nivou $p < 0,10$

Na formiranje polinoma drugog reda svih posmatranih odziva, temperature u zonama 3 (T3) i 6 (T6), temperature matrice (T), pritiska na matrici (P), obrtnog momenta (OM) i specifične mehaničke energije (SME), linearni članovi ulaznih parametara (SS, SB i RB) imaju statistički značajan

uticaj, na nivou $p < 0,01$. Sinergetski član uticaja sirovina SS i SB je takođe pokazao statistički značajan uticaj u modelu za predviđanje parametara T3, T6 i P ($p < 0,05$), dok ostali nelinearni članovi (SS x RB i SB x RB) nemaju statistički značajan uticaj u modelima za izračunavanje odzivnih funkcija. Srednje vrednosti razlika za odzive T3, T6, T, P, OM i SME bile su bliske nuli (Tabela 4.16).

Tabela 4.16. Rezidualna analiza modela za drugi deo faze ekstrudiranja

Parametar	χ^2	RMSE	MBE	MPE	r^2	Skew.	Kurt.	Sr.vred.	St.Dev.	Var.
T3	-0,3	0,8	0,1	1,1	0,8	-0,4	1,1	0,0	0,5	0,2
T6	-2,1	2,2	-0,3	3,4	0,8	-0,1	-1,1	-0,1	1,3	1,8
T	-4,1	3,0	-0,5	3,6	0,5	-0,2	0,7	-0,2	1,8	3,2
P	0,0	0,0	0,0	9,7	0,9	0,0	-1,2	0,0	0,0	0,0
OM	-15,3	5,8	0,8	12,1	0,8	-0,1	3,2	0,3	3,6	12,6
SME	-15,8	5,9	0,7	11,6	0,8	-0,2	3,1	0,2	3,6	13,2

T3 – temperatura u zoni 3 ekstrudera; T6 – temperatura u zoni 6 ekstrudera; T_{mat} – temperatura matrice; P – pritisak na matrici; OM – opterećenje motora; SME – specifična mehanička energija; χ^2 – hi- kvadrat test; RMSE – koren zbira srednje vrednosti kvadrata odstupanja, MBE – srednja vrednost greške odstupanja, MPE – srednja vrednost procentnog odstupanja; r^2 – koeficijent detriminacije; Skew. – krivljenje (engl. *Skeweness*); Kurt. – nazubljenost (engl. *Kurtosis*)

Rezidualne vrednosti pokazale su dobro poklapanje sa normalnom raspodelom oko nulte srednje vrednosti, u okviru granica poverenja od 95%, te se može reći da dobijeni model na odgovarajući način predstavlja eksperimentalne odzive procesa ekstrudiranja. Niske vrednosti parametara χ^2 , RMSE, MBE i MPE, kao i visoka vrednost koeficijenta determinacije (r^2), prikazane u tabeli 4.16, ukazuju na pouzdano predviđanje odziva ekstrudiranja (T3, T6, T, P, OM i SME) drugog dela faze ekstrudiranja, primenom modela prikazanog u tabeli 4.15, kao i na dobro poklapanje vrednosti dobijenih ovim modelom sa eksperimentalnim rezultatima.

4.2.2.3. Fizički kvalitet ekstrudirane hrane za ribe u drugom delu faze ekstrudiranja

Određeni su sledeći pokazatelji fizičkog kvaliteta hrane za ribe: radijalni stepen ekspanzije (SE), nasipna masa (NM), tvrdoća određena teksturometrom (TT) i KAHL-ova tvrdoća (KT), otpornost granula na otiranje po Holmenu izraženi kao PDI, sposobnost granula da zadrže oblik i strukturu određena specifičnim DORIS testom gde su rezultati izraženi kao izraženi kao procenat celih granula (CG) i DORIS vrednost (DV) u okviru koje figuriše udeo nastalog loma granula i prašine, kapacitet upijanja ulja (KUU), nivo otpuštanja ulja zauljenih granula (OU) i indeks stabilnosti granula u vodi (ISV).

Rezultati pokazatelja fizičkog kvaliteta granula za ishranu riba drugog dela faze ekstrudiranja prikazani su u tabeli 4.17.

Tabela 4.17. Fizičke osobine ekstrudirane hrane za ribe drugog dela faze ekstrudiranja

Uzorak	Opis uzorka	Stepen ekspanzije ^a (%)	Nasipna masa ^b (g/l)	Tvrdoća ^a (kg)	Kahl tvrdoća ^c (Kahl jedinica)	Otpornost na otiranje PDI ^b (%)	Cele granule ^b (%)	Doris vrednost ^b (%)	Kapacitet upijanja ulja ^d (%)	Otpuštanje ulja ^d (%)	Indeks stabilnosti u vodi ^d (%)
1	SS	48,75	439,93	3,86	4,20	84,63	97,96	2,04	74,18	4,58	64,80
2	SSxSB	51,13	415,20	3,87	4,07	87,45	98,25	1,75	80,16	5,21	66,47
3	SBxSS	48,25	437,40	4,12	4,23	90,76	98,02	1,98	73,91	5,61	64,53
4	SB	50,00	442,20	4,43	4,47	91,15	97,98	2,02	73,18	6,31	59,64
5	SBxRB	44,38	455,80	3,36	3,93	92,58	98,11	1,89	69,02	2,74	60,85
6	RBxSB	39,50	475,57	3,10	3,82	93,39	98,21	1,79	63,91	2,27	53,63
7	SSxRB	43,88	452,70	3,62	4,14	91,67	98,38	1,62	69,11	5,75	62,86
8	RBxSS	38,17	477,03	2,99	3,74	92,05	98,11	1,89	61,48	1,96	57,32
9	SSxSBxRB	44,25	445,97	3,49	3,80	89,11	98,41	1,59	70,47	1,63	64,59
10	RB	35,38	479,93	2,63	3,65	95,86	98,67	1,33	59,78	2,50	59,97

SS – suncokretova sačma; SS2 – sojino brašno; RB – riblje brašno

a – srednja vrednost 20 ponavljanja

b – srednja vrednost 3 ponavljanja, PDI – Pellet Durability Index

c – srednja vrednost 10 ponavljanja

d – srednja vrednost 2 ponavljanja

Stepen ekspanzije uzoraka varirao je od 35,38 do 51,13%. Najmanji stepen ekspanzije imao je uzorak **10**, koji je sadržao isključivo riblje brašno. Smeša za proizvodnju uzorka **10** imala najveći sadržaj masti (6,44% SM) usled najvećeg sadržaja ribljeg brašna. Lubrikativno dejstvo koju mast ima u cevi ekstrudra, smanjuje unos mehaničke energije u proizvod i smanjuje proizvodne temperature, što dovodi do smanjenja želatinizacije skroba, manje ekspanzije kao i lošijih fizičkih osobina proizvoda (*Morken i sar., 2012*). Riblje brašno ujedno ima i znatno manji kapacitet upijanja vode od biljnih proteina (*Draganović i sar., 2011; Draganović i sar., 2014*) što dovodi do smanjenja želatinizacije skroba, a time i manje ekspanzije. Zamena 6,6% ribljeg brašna sa suncokretovom sačmom smanjila je sadržaj masti i time povećala SE na 38,17% (uzorak **8**), dok je zamena sa istom količinom sojinog brašna (uzorak **6**) uticala da SE bude još veći (39,50%). Dalje smanjenje količine ribljeg brašna u proizvodu uticalo je na povećanje ekspanzije. Uzorak **7** sa 6,6% ribljeg brašna i 13,4% suncokretove sačme imao je SE 43,88%, dok su uzorak sa podjednakim udelom sve tri sirovine (uzorak **9**) i uzorak sa 13,4% sojinog brašna i ostatkom ribljeg brašna (uzorak **5**) imali približno iste vrednosti ekspanzije (44,25 i 44,38%). Značajno veće vrednosti stepena ekspanzije imali su proizvodi u kojima nije figurisalo riblje brašno u promenljivom udelu prema eksperimentalnom dizajnu. Uzorak **3** sa 6,6% suncokretove sačme i 13,4% sojinog brašna imao je stepen ekspanzije od 48,25%, vrednost blisku stepenu ekspanzije uzorka **1**, koji je sadržao 20% suncokretove sačme. Najveći stepen ekspanzije postignut je kod uzorka **2**, koji je sadržao 6,6% sojinog brašna i 13,4% suncokretove sačme. Suncokretova sačma i sojino brašno imali su pozitivan efekat na ekspanziju uzoraka hrane za ribe, prvenstveno zbog niskog sadržaja masti (1,45 i 1,12% SM), te su doprineli da se poveća SME tokom proizvodnje, kao i ekspanzija proizvoda. Ovi rezultati su u skladu sa istraživanjem *Kraugerud-a i saradnika (2011)*, u kome su i suncokretova i sojina sačma uticale na veću ekspanziju granula za ishranu riba u poređenju sa kontrolnim uzorkom koji je sadržao isključivo riblje brašno. Smeša za proizvodnju uzorka **2**, kojeg je odlikovao maksimalni postignuti SE, imala je za 2,09% manji sadržaj masti od smeše za proizvodnju uzorka **10**, koji je najmanje ekspandovao. Veći sadržaj masti imao je negativan uticaj na ekspanziju proizvoda i u istraživanju *Morken i saradnika (2012)*, gde je poređen kvalitet ekstrudirane hrane za ishranu riba sa dodatkom punomasne i obezmaščene sojine sačme. Sa druge strane, *Sørensen i saradnici (2009)*, zamenom oko 35% ribljeg brašna sojinom sačmom, nisu pronašli značajne razlike u ekspanziji proizvoda, iako je sadržaj masti početne smeše sa sojinom sačmom bio za oko 2% manji. U radu *Tyapkove i saradnika (2016)*, zamenom ribljeg brašna pogačama različitih uljarica (uljana repica, soja, lan i suncokret), došlo je do smanjenja ekspanzije granula, suprotno rezultatima istraživanja ovog dela disertacije. Međutim, razlog tome bio je viši sadržaj masti početnih smeša eksperimentalnih uzoraka u odnosu na uzorak gde je bilo prisutno samo riblje brašno, te je veća količina masti u početnoj smeši, kao i kod rezultata ove disertacije, negativno uticala na ekspanziju što je rezultat koji jeste u skladu sa ovde postignutim.

Viši sadržaj masti smeše za proizvodnju hrane za ribe dovodi do manje ekspanzije proizvoda, a time i do njegove veće nasipne mase (Čolović i sar., 2011). Nasipna masa uzoraka u drugom delu faze ekstrudiranja varirala je od 415,20 g/l, koliko je imao uzorak **2**, do 479,93 g/l, koliko je iznosila nasipna masa uzorka **10**. Rezultati su pokazali da je nasipna masa uzoraka bila obrnuto srazmerna od njihovog stepena ekspanzije. Isto je bilo primetno i u istraživanju zamene dela ribljeg brašna sačmom lupina (Glencross i sar., 2010). Suncokretova sačma i sojino brašno su doprineli smanjenju nasipne mase granula. Sa druge strane, istraživanja nekih autora (Sørensen i sar., 2009; Glencross i sar., 2010; Storebakken i sar., 2015) pokazala su sasvim suprotan trend, pri čemu je zamena ribljeg brašna biljnim proteinima vodila povećanju nasipne mase. Iako je sojino brašno imalo jači efekat na ekspanziju proizvoda (50,00% kod uzorka **4**, sa 20% sojinog brašna) od suncokretove sačme (48,75% stepen ekspanzije uzorka **1**, sa 20% suncokretove sačme), ipak je dalo proizvod nešto veće nasipne mase (442,20 g/l za uzorak **4**) u poređenju sa nasipnom masom uzorka **1** (439,93 g/l).

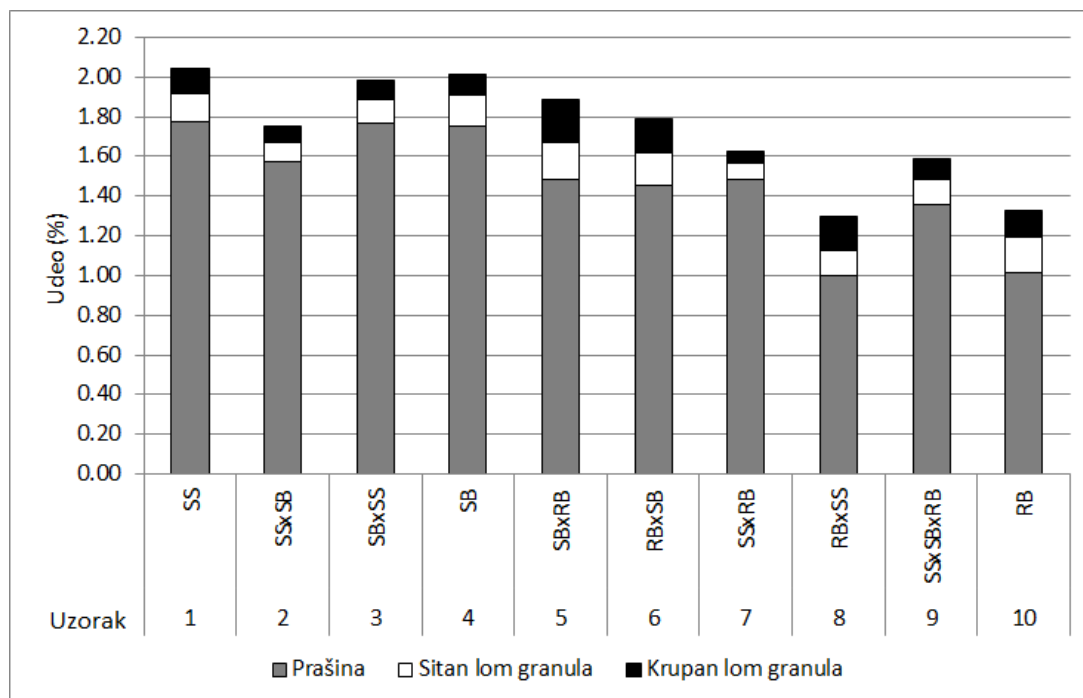
Tvrdoća granula određena je primenom tekstuometra i KAHL-ovog testera tvrdoće. Tvrdoća granula karakterisana je silom koja je bila potrebna da slomi granulu tokom delovanja na nju. Sila loma za proizvedene uzorke određena tekstuometrom kretala se u opsegu 2,63 – 4,43 kg. Najmanju tvrdoću posedovao je uzorak **10** (2,63 kg) sa 20% ribljeg brašna u delu promenljive sirovine u proizvodu. Zamena 6,6% ribljeg brašna sa suncokretovom sačmom (uzorak **8**) dovela je do povećanja tvrdoće granula (2,99 kg). Tvrdoća uzorka **6**, u kome je 6,6% ribljeg brašna u recepturi bilo zamenjeno sojinim brašnom, bila je neznatno viša od tvrdoće uzorka **8** (3,10 kg). Povećanje udela sojinog brašna i suncokretovog brašna na 13,4%, u kombinaciji sa ribljim brašnom (uzorak **5** i **7**), kao i podjednak udeo sve tri komponente u promenljivom delu recepture (uzorak **9**) doveli su do povećanja tvrdoće granula i dobijanja međusobno bliskih vrednosti sile potrebne za lom (3,36; 3,49 i 3,62 kg, redom). Uzorci **1**, **2**, **3** i **4**, koji nisu imali ribljeg brašna u promenljivom delu recepture, nego isključivo biljne proteinske sirovine, suncokretovu sačmu i sojino brašno, imali su najveće tvrdoće. Kod ovih uzoraka vrednost sile potrebne za slamanje uzorka varirala je od 3,86 do 4,43 kg. Vrednost sile potrebne za slamanje granule povećavala se sa povećanjem udela sojinog brašna, pri čemu je najveću vrednost (4,43 kg) imao uzorak **4** koji je sadržao 20% sojinog brašna, što pokazuje da ova proteinska sirovina doprinosi većoj tvrdoći uzoraka. Tvrdoća određena KAHL-ovim testerom varirala je od 3,65 do 4,47 KAHL jedinica. Kao i pri određivanju tvrdoće tekstuometrom i kod određivanja tvrdoće KAHL-ovim testerom primećen je sličan trend promene. Najmanju vrednost tvrdoće posedovao je uzorak **10**, sa maksimalnim sadržajem ribljeg brašna, dok je najveću tvrdoću imao uzorak **4**, sa 20% sojinog brašna. Povećanje udela suncokretove sačme i sojinog brašna u proizvodu uticalo je na povećanje tvrdoće granula, uz veći doprinos sojinog brašna tvrdoći. Poboljšanje tvrdoće granula zamenom dela ribljeg brašna sojinim izvorima proteina u skladu je sa rezultatima istraživanja Sørensen i saradnika (2009). Veći doprinos tvrdoći granula koje je sojino brašno imalo nad suncokretovom sačmom, nije bilo u

skladu sa rezultatima istraživanja *Kraugerud-a i saradnika (2011)* gde je za slamanje granula sa suncokretovom sačmom bila potrebna dvostruka veća sila u odnosu na granule sa istim udelom sojine sačme. U istraživanju *Tyapkove i saradnika (2016)* proteini iz suncokretove pogače dali su granule za ishranu riba veće tvrdoće u odnosu na one sa sojinom pogačom, ali povećanje nije bilo značajno.

PDI vrednost uzoraka varirala je od 84,63% do 95,86%. Najmanji PDI imao je uzorak **1**, sa 20% suncokretove sačme (84,63%). Zamena 6,6% suncokretove sačme sojinim brašnom (uzorak **2**) povećao je PDI na 87,45%. Uzorak **9** imao je PDI od 89,11%, dok je dalja zamena suncokretove sačme sojinim brašnom rezultovala povećanjem PDI vrednosti na 90,76% za uzorak **3** odnosno 91,15% za uzorak **4**, koji je sadržao 20% sojinog brašna. Zamena 6,6% suncokretove sačme (uzorak **7**) i sojinog brašna (uzorak **5**) ribljim brašnom dovela je do povećanja PDI na 91,67%, odnosno 92,58%. Zamena suncokretove sačme i sojinog brašna sa 13,4% ribljeg brašna u proizvodu dodatno je uticala na povećanje PDI (92,05% za uzorak **8** i 93,39% za uzorak **6**), dok je najveći PDI (95,86%) imao uzorak **10**, kojeg je karakterisao maksimalan sadržaj ribljeg brašna. Riblje brašno imalo je pozitivan uticaj na otpornost granula na otiranje, dok je korišćena visokoproteinska suncokretova sačma pokazala izrazito negativan uticaj na otpornost na otiranje što se odrazilo niskim PDI vrednostima. Dobijeni rezultati nisu bili u skladu sa istraživanjem *Kraugerud-a i saradnika (2011)* u kojima je suncokretova sačma pokazala pozitivan uticaj na otpornost na otiranje granula u poređenju sa ribljim brašnom koje je isključivo bilo izvor proteina u kontrolnom uzorku, ali su sa druge strane, bili u skladu sa rezultatima prvog dela ove faze istraživanja gde je sirovina sa više sadržaja celuloze negativno uticala na otpornost otiranja (sačma SS je imala 9,15%, a riblje brašno 0,28% SM celuloze). Visok sadržaj masti, kojem je riblje brašno doprinelo u smeši za proizvodnju uzorka **10**, nije uticalo na smanjenje PDI kao što je to bio slučaj u ranijem istraživanju *Morken i saradnika (2012)*.

Rezultat DORIS testa bio je izražen kao udeo celih granula (frakcija veličine > 4000 µm), udeo krupnog (frakcija čestice veličine 3150 – 4000 µm) i sitnog loma (frakcija čestica veličine 2240 – 3150 µm) i udeo prašine (frakcija čestica < 2240 µm). DORIS vrednost (DV) predstavljala je zbir nastalog krupnog, sitnog loma i prašine (*Aas i sar., 2011a*). Procenat preostalih celih granula svih uzoraka je bio visok i međusobno veoma blizak i kretao se u opsegu od 97,96 do 98,67%. Najmanji procenat celih granula ostvaren je kod uzoraka **1** i **4** (97,96 i 97,98%). Ovi uzorci imali su 20% suncokretove sačme, odnosno 20% sojinog brašna. Na procenat celih granula, pozitivan uticaj je imala kombinacija proteinskih sirovina, naročito za uzorke u kojima je figurisalo 13,4% suncokretve sačme i 6,6% sojinog brašna (uzorak **2**), kao i 13,4% suncokretove sačme i ribljeg brašna (uzorak **7**), gde su procenti celih granula iznosili 98,25%, odnosno i 98,38%, kao i uzorak **9** kod koga je ostvaren rezultat od 98,41%. Najbolji rezultat (98,67%) je imao uzorak **10** sa maksimalnim udelom ribljeg brašna, što je u vezi i sa najvišom PDI vrednošću, koju je ovaj uzorak takođe posedovao. Uzorak **10** je

imao i najvišu DV (1,33%), dok je najmanju imao uzorak **1** (2,04%). U okviru DV najveći udeo imala je prašina kod svih **10** uzoraka (Slika 4.11), i bila je u rasponu od 1,00% kod uzorka **8**, do 1,72% kod uzorka **1**.



Slika 4.11. Rezultati udela prašine (< 2240 µm), sitnog (2240 – 3150 µm) i krupnog (3150 – 4000 µm) loma granula DORIS testa u drugom delu faze ekstrudiranja
SS – suncokretova sačma; SB – sojino brašno; RB – riblje brašno

Prisustvo suncokretove sačme i sojinog brašna u velikom udelu u hrani za ribe (uzorci **1**, **2**, **3** i **4**) doprineli su stvaranju najvećeg sadržaja prašine (1,78; 1,57; 1,77 i 1,75% redom). Rezultati DORIS testa potvrdili su rezultate stepena otiranja po Holmenu-u gde je, na osnovu PDI vrednosti, pokazano da suncokretova sačma ima negativan uticaj na otpornost granula na abraziju, dok je najveći uticaj na poboljšanje otpornosti na otiranje imalo riblje brašno.

Kapacitet upijanja ulja (KUU) uzoraka bio je u rasponu od 59,78 do 80,16% na početnu masu granula. Usled visokog KUU koji su uzorci posedovali, u svaki od njih je u potpunosti dodata dovoljna količina smeše ribljeg ulja i ulja uljane repice postupkom oblaganja u vakuumu, tako da je udeo ulja u finalnom proizvodu bio po recepturi zahtevanih 22,34% (tabela 3.4). Ekspanzija granule u postupku ekstrudiranja, obezbeđuje poroznu strukturu koja može da primi veliku količinu ulja (*Lamichane i sar., 2015*). SE je bitan fizički pokazatelj kvaliteta hrane za ribu koji određuje maksimalnu količinu ulja koju granula može da upije. Najnižu vrednost KUU imao je uzorak **10**, koji je sadržao maksimalnu količinu ribljeg brašna. Ovaj uzorak ujedno je imao najmanji SE (35,38%). KUU se povećavao sa povećanjem udela biljnih izvora proteina – suncokretovom sačmom i sojinim brašnom. Zamena 6,6%

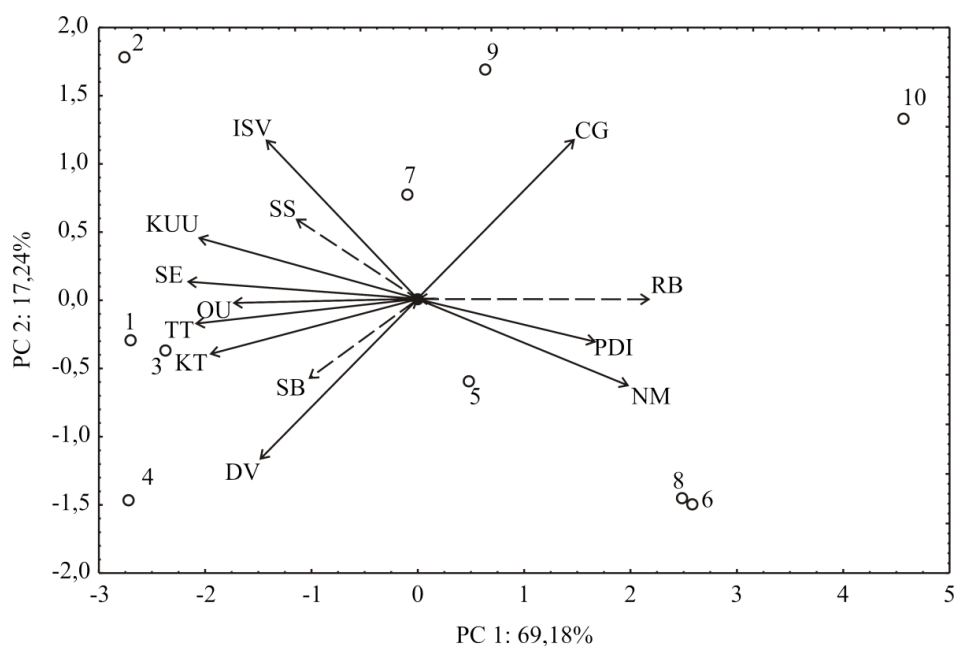
ribljeg brašna ovim sirovinama dovela do vrednosti KUU od 61,48, za uzorak **8**, koji je sadržao suncokretovu sačmu, i 63,91% za uzorak **6**, koji je sadržao sojino brašno. Dalja zamena ribljeg brašna sa 13,4% sojinog brašna (uzorak **6**) i 13,4% suncokretove sačme (uzorak **7**) dala je bliske vrednosti KUU od 69,02% i 69,11%. Blisku vrednost KUU od 70,47% imao je i uzorak **9**, sa sve tri ispitivane sirovine u podjednanim udelima u promenljivom delu sastava. Generalno, suncokretova sačma i sojino brašno doprineli su povećanju KUU proizvoda. Uzorak **4** sa 20% sojinog brašna imao je KUU od 73,18%. Uzorak **3** sa 6,6% suncokretove sačme i 13,4% sojinog brašna imao je KUU od 73,91%, blizak onom koji je posedovao uzorak **1**, koji je u svom sastavu imao 20% suncokretove sačme (74,18%). Najveći KUU od 80,16% početne mase uzorka imao je uzorak **2**, koji je sadržao 13,4% suncokretove sačme i 6,6% sojinog brašna. Isti uzorak posedovao je ujedno i najviši SE (51,13%). Direktna srazmernost SE i KUU koja je dobijena u istraživanjima ovog dela disertacije, u skladu je sa rezultatima rada *Sørensen i saradnika (2011)*.

Nivo otpuštanja ulja (OU) uzoraka varirao je od 1,63 do 6,31%. Najmanje OU posedovao je uzorak **9**, u kome su svi ispitivani izvori proteina bili u jednakom udelu. Uzorci koji su u svom sastavu imali riblje brašno u promenljivom delu recepture (uzorci **6**, **7**, **8** i **10**) imali su bliske vrednosti OU koji su se kretali od 1,96 – 2,74%. Visoke vrednosti OU imali su uzorci sa visokim udelom suncokretove sačme (20% i 13,4%), uzorci **1**, **2**, i **7**, čiji je nivo otpuštanja ulja redom bio 4,58%, 5,21%, i 5,75%. Najveći nivo OU od 6,31% imao je uzorak **4**, sa 20% sojinog brašna. Visokoproteinska suncokretova sačma i sojino brašno, doprineli su da struktura granule bude takva da ona nema dovoljnu sposobnost zadržavanja ulja, kao struktura granule sa velikim procentom ribljeg brašna. Promene u sastavu dovele su do promena u morfologiji granula, koje neminovno utiču na njihov nivo otpuštanja ulja (*Sørensen i sar., 2011; Draganović i sar., 2013b*).

Indeks stabilnosti uzoraka u vodi (ISV) varirao je od 53,63 do 66,47%. Uzorak **6**, sa 6,6% sojinog brašna i preostalim udelom ribljeg brašna, imao je najmanju vrednost ISV (53,66%), a pratio ga je uzorak **8** (57,32%) sa 6,6% suncokretove sačme i 13,4% ribljeg brašna u promenljivom udelu proizvoda. Uzorci **4** i **10**, koji su u svom sastavu imali 20% sojinog brašna, odnosno maksimalnu količinu ribljeg brašna, imali su bliske vrednosti ISV od 59,64 i 59,97%. Povećanje sadržaja suncokretove sačme i sojinog brašna uticalo je na povećanje stabilnosti u vodi uzoraka. Uzorci **5** i **7**, koji su imali 13,4% sojinog brašna odnosno suncokretove sačme i ostatak ribljeg brašna (6,6%), imali su vrednost ISV od 60,85% odnosno 62,86%. Bliske vrednosti ISV posedovali su uzorci kod kojih je udeo ribljeg brašna bio sveden na 6,6% u promenljivom delu (uzorci **1**, **3** i **9**) kod kojih je ISV varirao od 64,53 do 64,80%. Najvišu vrednost stabilnosti u vodi imao je uzorak **2** koji je u svom sastavu imao 6,6% sojinog brašna i 13,4% suncokretove sačme. Riblje brašno imalo je negativan uticaj na stabilnost u vodi proizvedenih uzoraka. Izvori biljnih proteina imali su pozitivan uticaj na stabilnost granula u vodi, pri čemu je suncokretova sačma sirovina koja je hrani za ribu dala veće stabilnosti u vodi u

poređenju sa sojinim brašnom. Suprotno ovim rezultatima, u istraživanju *Morken i saradnika (2011)* zamena ribljeg brašna izvorom biljnih proteina (proteinskim koncentratom ječma) je negativno uticala na stabilnost u vodi hrane za pastrmku.

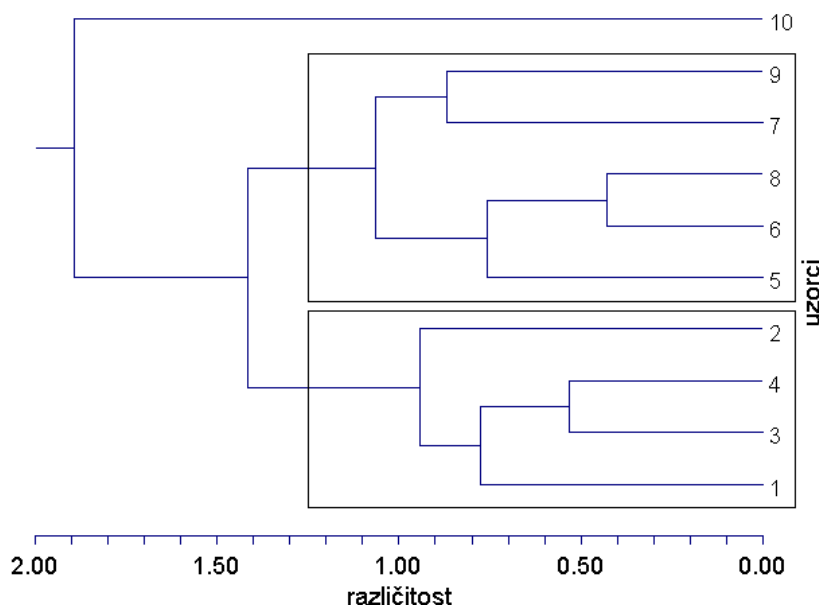
Analiza glavnih komponentni (engl. *Principal Components Analysis, PCA*) korišćena je, kao i u prvom delu ove faze istraživanja, za detektovanje i analizu odnosa između udela tri e korišćene proteinske komponente (suncokretova sačma, sojino i riblje brašno) sa pokazateljima fizičkog kvaliteta uzorka za ishranu riba, odnosno parametara, koji su predstavljali odzivne promenljive. Vrednosti svih određenih pokazatelja fizičkog kvaliteta (Tabela 4.17) 10 uzoraka proizvedenih po eksperimentalnom planu (Tabela 3.6) podvrgnuti su PCA analizi. PCA analiza pokazala je da su prve dve sopstvene vrednosti (*eigenvalues*) statistički značajne i imaju vrednosti: 6,92 i 1,72. Prva glavna komponenta je opisala 69,18% ukupne varijanse, a druga 17,24%. Kvalitativni rezultati za ovu analizu pokazuju da prve dve glavne komponente zajednički prikazuju 86,42% ukupne varijanse, što može da se smatra dovoljnim za prikazivanje celokupnog seta eksperimentalnih podataka. Na slici 4.12 prikazano je uspešno razdvajanje grupa podataka za 10 posmatranih uzoraka.



Slika 4.12. Biplot grafik – projekcija u prvoj faktorskoj ravni (PC1-PC2) za set podataka drugog dela faze ekstrudiranja: CG – cele granule, DV – DORIS vrednsot; IIG – indeks izdržljivosti granule; ISV – indeks stabilnosti u vodi; KT – KAHL tvrdoća; KUU – kapacitet upijanja ulja; NM – nasipna masa; OU – otpuštanje ulja; RB – riblje brašno; SE – stepen ekspanzije; SS – suncokretova sačma; SB – sojino brašno

Nasipna masa (NM), koja prikazuje 11,9% ukupne varijanse, i PDI vrednost, koji prikazuje 8,6% ukupne varijanse, bile su najznačajnije promenljive koje su pozitivno uticale na izračunavanje prve glavne komponente. Uzorci su se stoga rasporedili duž PC1 ose tako da su uzorci 5–9 bili

raspoređeni ka pozitivnom delu PC1 ose i ove uzorke je karakterisala veća nasipna masa (NM) i PDI, a manji stepen ekspanzije (SE), kapacitet upijanja ulja (KUU) i tvrdoće određene teksturometrom (TT). Najznačajnije promenljive koje su negativno uticale na izračunavanje prve glavne komponente bile su stepen ekspanzije (SE), sa 14,0% udela ukupne varijanse, tvrdoća određena teksturometrom (TT), sa 13,1%, kapacitet upijanja ulja (KUU), sa 12,8%, KAHl tvrdoća (KT), sa 11,4%, i nivo otpuštanja ulja (OU), koji je prikazao 9,0% udela ukupne varijanse. Ka negativnom delu PC1 ose pozicionirani su uzorci **1 – 4**, koji su imali veći stepen ekspanzije (SE), kapacitet upijanja ulja (KUU), i tvrdoću merenu teksturometrom (TT), kao i manju nasipnu masu (NM). Pozitivan uticaj za izračunavanje druge faktorske koordinate pokazale su promenljive procenat celih granula (CG) i indeks stabilnosti u vodi (ISV) sa 27,5% odnosno 27,1% ukupne varijanse, dok su negativan uticaj pokazale promenljive: DORIS vrednost (DV) i nasipna masa (NM) sa 27,5% odnosno 7,8% od ukupne varijanse. Maksimalan sadržaj ribljeg brašna u uzorku **10**, uticao je na njegov fizički kvalitet i pozicioniranje na PC1-PC2 grafiku (Slika 4.12). Usled svog sastava uzorak **10** imao je najmanji kapacitet upijanja ulja (KUU), stepen ekspanzije (SE) i tvrdoću merenu teksturometrom (TT), ali i najveću nasipnu masu (NM) i najveći PDI. Ovakvo pozicioniranje uzoraka potvrđeno je i hijerarhijskom analizom klastera (engl. *Hierarchical Cluster Analysis*, HCA). Na slici 4.13. prikazan je dendrogram klasterovanja uzoraka na osnovu vrednosti njihovih ispitanih fizičkih karakteristika.



Slika 4.13. Dendrogram klasterovanja ispitanih uzoraka u odnosu na eksperimentalno određene fizičke karakteristike

Na dendrogramu (Slika 4.13) se uočavaju dva jasno definisana klastera sa podklasterima i uzorak **10** koji se nalazi van klastera. Prvi klaster čine uzorci **5 – 9** koje je karakterisao manji stepen

ekspanzije (SE), kapacitet upijanja ulja (KUU), i tvrdoća merena pomoću teksturometra (TT), dok su njihova nasipna masa (NM) i PDI bili veći. U drugom klasteru nalazili su se uzorci **1 – 4**, sa većim stepenom ekspanzije (SE), kapacitetom upijanja ulja (KUU), i tvrdoćom merenom teksturometrom (TT), kao i manjom nasipnom masom (NM) i PDI vrednošću. Uzorak **10** pozicioniran je van formiranih klastera, usled najvećeg sadržaja ribljeg brašna koje je uticalo da ima najmanje vrednosti SE, KUU, ali i najveću vrednost NM.

Analiza standardne ocene (engl. *Standard Score*, SS) primenjena je u cilju finalne karakterizacije visokoproteinske suncokretove sačme dobijene usitnjavanjem i vazdušnom klasifikacijom kao nove potencijalne sirovine u proizvodnji hrane za ribe. Standardna ocena daje uvid kako i koliko je visokoproteinska suncokretova sačma, prisutna u različitom udelu u proizvedenim eksperimentalnim uzorcima, doprinela fizičkom kvalitetu ekstrudirane hrane za ribe. Uzorci hrane za ribu rangirani su na osnovu odnosa merenih i ekstremnih vrednosti svakog pokazatelja fizičkog kvaliteta prikazanog u tabeli 4.17. Na eksperimentalno određene parametre fizičkog kvaliteta uzoraka primenjena je *min-max* normalizacija uz izbor odgovarajućeg kriterijuma za svaki parametar. Kriterijum „veće je bolje“ odabran je za sledeće parametre: SE, NM, TT, KT, IIG, CG, KUU i ISV. Za normalizaciju ovih parametara kvaliteta primenjena je jednačina 3.23. Za parametre DV i OU izabran je kriterijum „manje je bolje“ i za njihovu normalizaciju korišćena je jednačina 3.24. Rezultati analize standardne ocene prikazani su u tabeli 4.18

Tabela 4.18. Standardna ocena uzoraka hrane za ribe drugog dela faze ekstrudiranja

Uzorak	Opis uzorka	Udeo promenljive sirovine			Standardna ocena
		SS	SB	RB	
1	SS	20,0	0,0	0,0	0,45
2	SSxSB	13,4	6,6	0,0	0,55
3	SBxSS	6,6	13,4	0,0	0,51
4	SB	0,0	20,0	0,0	0,51
5	SBxRB	0,0	13,4	6,6	0,49
6	RBxSB	0,0	6,6	13,4	0,42
7	SSxRB	13,4	0,0	6,6	0,54
8	RBxSS	6,6	0,0	13,4	0,38
9	SSxSBxRB	6,6	6,6	6,6	0,58
10	RB	0,0	0,0	20,0	0,53

SS – suncokretova sačma; SB – sojino brašno; RB – riblje brašno

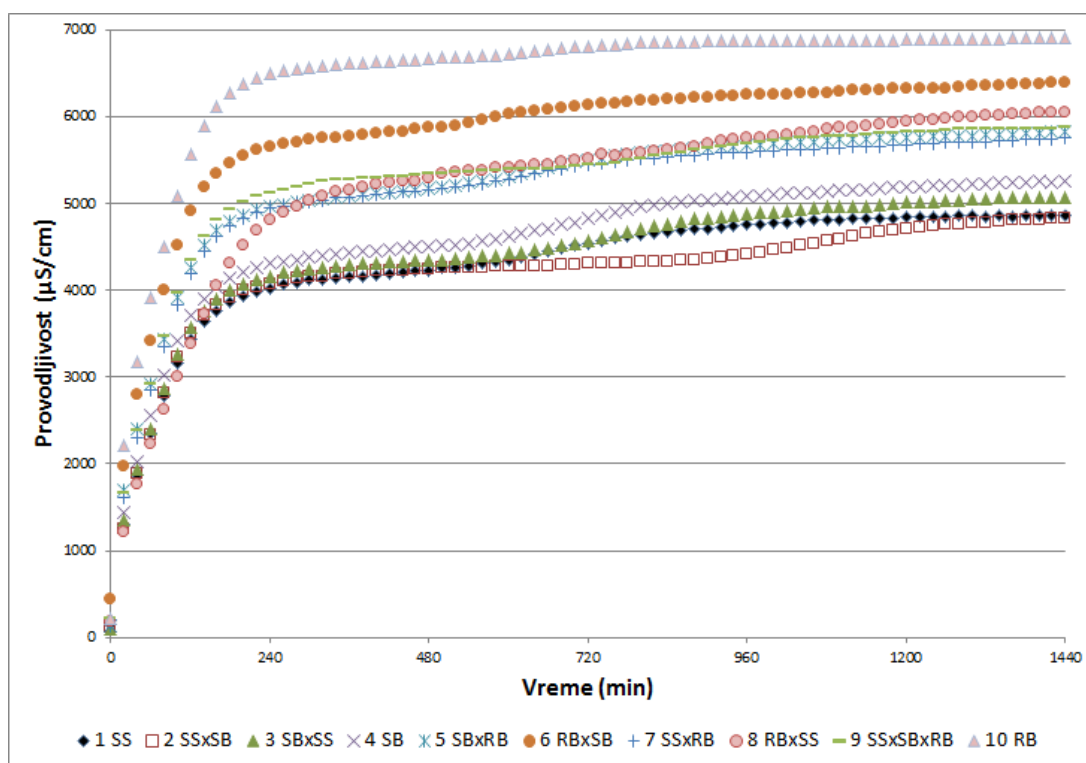
Standardna ocena svih uzoraka varirala je od 0,38 do 0,58. Najmanju ocenu (0,38) imao je uzorak **8**, sa 6,6% suncokretove sačme i 13,4% ribljeg brašna u promenljivom delu recepture. Niskoj oceni uzorka **8** doprineli su niske vrednosti SE, TT, KT, KUU i ISV. Uzorak **6**, kod koga je 6,6% sastava činilo sojino brašno, imao je ocenu od 0,42. Zamena suncokretove sačme sojinim brašnom u udelu od 6,6% dovela je do poboljšanja kvaliteta proizvoda i povećanja ukupne standardne ocene uzorka za

0,04. Povećanje udela sojinog brašna u proizvodu dovelo je do dodatnog poboljšanja fizičkog kvaliteta što se vidi iz rezultata standardnih ocena, gde je uzorak **5**, sa 13,4% sojinog brašna i ostatkom ribljeg brašna u sastavu, imao ocenu 0,49, dok su uzorci **3** (13,4% sojinog brašna i 6,6% suncokretove sačme) i **4** (20% sojinog brašna) imali iste standardne ocene od 0,51. Suncokretova sačma i sojino brašno uticali su na poboljšanje parametara fizičkog kvaliteta kao što su ekspanzija, tvrdoća, kapacitet upijanja ulja i stabilnost granula u vodi. Uzorak **1**, koji je imao 20% suncokretove sačme imao je relativno nisku normalizovanu ocenu od 0,45, kojoj je doprinela ostvarena niska otpornost na otiranje. Standardna ocena uzorka **1** bila je manja u poređenju sa ostalim uzorcima sa maksimalnim udelom odabrane sirovine, uzorkom **4** (0,51), koji je imao 20% sojinog brašna, i uzorkom **10** (0,53) koji je imao isključivo riblje brašno u svom sastavu, što može da vodi ka zaključku da je visokoproteinska frakcija suncokretove sačme imala najmanji pozitivni doprinos fizičkom kvalitetu ekstrudiranih uzoraka hrane za ribu, dok je riblje brašno dalo proizvod najboljeg kvaliteta za zadate optimizacione kriterijume. Visokoj standardnoj oceni uzorka **10** doprineli su pozitivan uticaj ribljeg brašna na otpornost otiranja granula i niska vrednost otpuštanja ulja, ali i visoka nasipna masa koja se javila kao rezultat malog stepena ekspanzije. Međutim, uzorak **10** je pored najmanje vrednosti stepena ekspanzije posedovao i najmanje vrednosti izrazito važnih parametara kvaliteta hrane za pastrmke – tvrdoće i kapaciteta upijanja ulja. Takođe, analiza standardne ocene je pokazala da je zamena 13,4% ribljeg brašna suncokretovom sačmom (uzorak **7**) dala uzorak sa fizičkim kvalitetima na osnovu kojeg je imao ocenu 0,54. Još višu standardnu ocenu od 0,55 imao je uzorak **2**, koji je pored 13,4% suncokretove sačme imao u svom sastavu i 6,6% sojinog brašna, čime je pokazan pozitivan uticaj koji su suncokretova sačma i sojino brašno imali na fizički kvalitet eksperimentalnih uzoraka. Najvišu standardnu ocenu imao je uzorak **9**, koji je posedovao sve tri korišćene proteinske sirovine u istom udelu od 6,6% u promenljivom delu recepture. Rezultati analize standardne ocene ipak zavise od zadatih kriterijuma za svaki parametar fizičkog kvaliteta kao i od njihovih prioriteta, tako da je rangiranje uzoraka ovog dela faze ekstrudiranja na osnovu standardne ocene relativno.

4.2.2.4. Konduktometrijska analiza u drugom delu faze ekstrudiranja

Nakon što su uronjene u vodu, granule počinju da otpuštaju hranljive materije, pre svega proteine koji su rastvorni u vodi, ali i masti, isticanjem naknadno dodatog ulja iz ekstrudirane granule (*Ighwela i sar., 2013*). Iako je dovoljno da hrana za pastrmku bude stabilna u vodi svega nekoliko minuta (*Tacon, 1996*), ona mora da poseduje visoku stabilnost uz minimalni gubitak nutritivnih sastojaka, iz ekonomskih i ekoloških razloga (*Craig i Helfrich, 2002*). Otpuštanje nutrijenata uzoraka hrane za pastrmku ispitano je primenom konduktometrijske metode, kojom je 24 h merena

provodljivost vode na svakih 20 minuta od momenta uranjanja granula u vodu. Na ovaj način, dobijene su krive provodljivosti za svaki uzorak, koje predstavljaju zavisnost provodljivosti od vremena (Slika 4.14).



Slika 4.14. Krive provodljivosti vode uzoraka hrane za ribe uronjenih tokom 24 h

Veća vrednost provodljivosti znači veći nivo otpuštanja, dok je nagib krive predstavljao brzinu otpuštanja nutrijenata. U momentu uranjanja uzorka **1**, sa 20% suncokretove sačme, provodljivost vode iznosila je 149 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kriva provodljivost uzorka pokazuje da je otpuštanje nutrijenata bilo intenzivno prva 3 sata od momenta uranjanja granula, nakon kojih je provodljivost vode iznosila 3 870 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nakon trećeg sata otpuštanje nutrijenata bilo je ujednačeno, jer je provodljivost ujednačeno rasla istom dinamikom. Veći rast provodljivosti bio je prisutan između 10 i 17 sata, nakon čega gotovo nije bilo promene u provodljivosti, a finalna vrednost nakon 24 h iznosila je 4 870 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kriva provodljivosti uzorka **2** bila je veoma slična krivoj provodljivosti uzorka **1**. Intenzivan gubitak nutrijenata bio je prisutan u prva 3 sata, da je nakon isteka trećeg sata provodljivost vode bila 3 930 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Od trećeg sata, provodljivost se gotovo nije ni menjala sve do četrnaestog sata, nakon čega je ponovo došlo do intenzivnog otpuštanja nutrijenata, usled čega je provodljivost rasla sve do finalne vrednosti od 4 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Uzorak **3**, sa 6,6% suncokretove sačme i 13,4% sojinog brašna, uticao je da je kriva provodljivosti bila ista kao i kriva uzorka **2**, uz više vrednosti provodljivosti pri svim vremenima merenja i sa finalnom provodljivošću od 5 080 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dinamika otpuštanja nutrijenata i promene provodljivosti vode uzorka **4** bila je ista kao i kod uzorka **3**. Sojino brašno je

ipak uticalo da otpuštanje nutrijenata bude višeg nivoa, obzirom da su primetne veće vrednosti provodljivosti vode kod uzorka **4**, sa 20% sojinog brašna, u poređenju sa uzorkom **3** pri istim vremenima natapanja u vodi.

Uvođenje ribljeg brašna u promenljivi udeo proizvoda, uticalo je da uzorci **5–9** imaju intenzivnije otpuštanje nutrijenata u prva 3 sata u poređenju sa uzorcima **1–4**, što se vidi po većem porastu provodljivosti navedene grupe uzoraka. Uzorci **5–9** su ujedno posedovali više finalne vrednosti provodljivosti od uzoraka **1–4**, koji su u promenljivom udelu od 20% sadržali samo biljne izvore proteina. Uzorak **5**, sa 6,6% ribljeg i 13,4% sojinog brašna u promenljivom udelu, otpuštao je nutrijente tako da je provodljivost vode nakon 3 h bila 4 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je finalna vrednost provodljivosti iznosila 5 830 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Uzorak **6**, koji je sadržao 6,6% sojinog brašna i 13,4% ribljeg brašna u promenljivom udelu, imao je izrazito otpuštanje nutrijenata u prva 4 sata, nakon čega je rast nastavljen, ali izrazito malim intenzitetom od prosečnih 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ u 20 min. Ponovni porast provodljivosti započeo je u devetom satu i bio je prisutan do kraja merenja od 24 h, kada je dostignuta vrednost od 6 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Uzorak **7** imao je krivu provodljivosti koja je gotovo bila identična onoj koja je dobijena natapanjem uzorka **5**. Provodljivost vode je brzo rasla u prva četiri sata do vrednosti 4 960 $\mu\text{S}/\text{cm}$, da bi zatim rast bio daleko sporiji. Finalna provodljivost vode pri natapanju uzorka **7** iznosila je 5 760 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kod uzorka **8**, koji je sadržao 6,6% suncokretove sačme i 13,4% ribljeg brašna, bilo je primetno da je provodljivost vode intenzivno rasla prvih 5 sati, nakon čega je dalje nastavljen gotovo linearan rast provodljivosti, odnosno konstantnog otpuštanja nutritivnih materija, nakon čega je dostignuta finalna provodljivost vode od 6 060 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

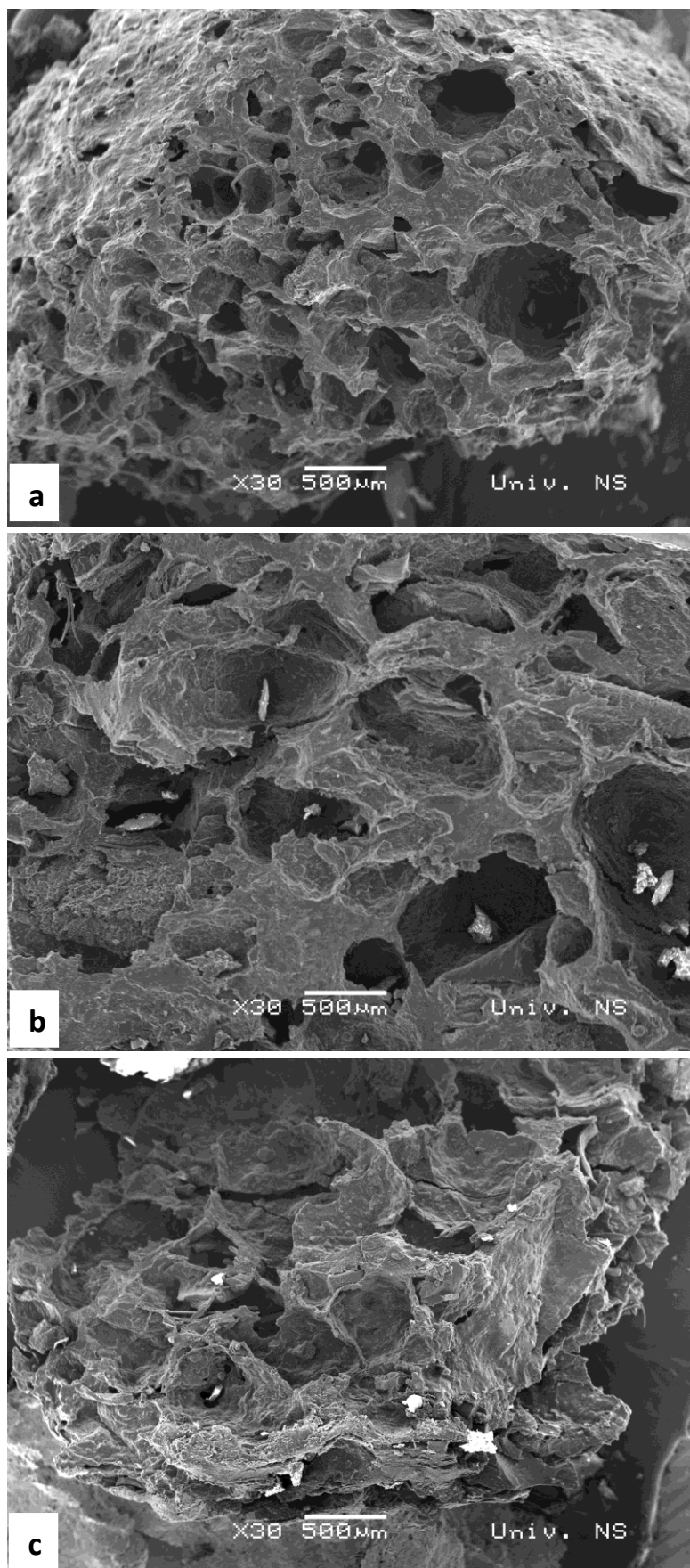
Centralni uzorak, sa podjednakom količinom suncokretove sačme, sojinog brašna i ribljeg brašna u promenljivom udelu recepture (uzorak **9**), formirao je krivu provodljivosti koja ukazuje da se intenzivno otpuštanje nutrijenata dešavalo u prvih 5 sati, što je bilo praćeno intenzivnim porastom provodljivosti. Nakon petog sata, provodljivost vode iznosila je 5 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$, i zatim je rasla sve do finalne vrednosti od 5 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Uzorak **10**, sa maksimalnom količinom ribljeg brašna, doprineo je najbržem porastu provodljivosti vode, pet sati od momenta uranjanja granula u vodu, u poređenju sa svim ostalim proizvedenim uzorcima. Rast provodljivosti vode bio je intenzivan do petog sata u kojem je provodljivost iznosila 6 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nakon petog sata, promene provodljivosti su bile minimalne, i na kraju jednog dana provodljivost vode iznosila je 6 920 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Voda u kojoj se uzorak **10** natapao, imala je daleko najveće vrednosti provodljivosti u poređenju sa ostalim uzorcima za svako vreme merenja. Rezultati konduktometrijske analize pokazali su da je riblje brašno negativno uticalo na otpuštanje nutrijenata u poređenju sa suncokretovom sačmom i sojinim brašnom. Uz drugu najnižu vrednost ISV-a koju je imao uzorak **10** (59,97%) od svih analiziranih uzoraka i najviše vrednosti provodljivosti vode za sva vremena natapanja nakon prvih dvadeset minuta, jasno je da veliki procenat ribljeg brašna ne doprinosi ukupnoj stabilnosti granule, jer ima negativan uticaj na očuvanje

fizičkog integriteta granula kao i na gubitak hranljivih materija. Korišćena visokoproteinska frakcija suncokretove sačme pored toga što ima pozitivan uticaj na ISV, ima i pozitivan uticaj u smislu manjeg otpuštanja nutritijenata u vodu u poređenju sa sojinim i ribljim brašnom.

4.2.2.5. Mikrostruktura granula u drugom delu faze ekstrudiranja

Za potrebe određivanja uticaja suncokretove sačme, sojinog i ribljeg brašna na mikrostrukturu granula napravljene su SEM fotografije poprečnog preseka uzoraka koji su sadržali maksimalne količine navedene tri proteinske sirovine u promenljivom udelu recepture. Snimljen je poprečni presek granule uzorka **1**, sa 20% suncokretove sačme, uzorka **4**, sa 20% sojinog brašna i uzorka **10**, sa 20% ribljeg brašna u promenljivom udelu recepture. SEM snimci poprečnog preseka granule tri navedena uzorka ukazali su na razlike u unutrašnjoj mikrostrukturi granula (Slika 4.15).

Uzorak **1** posedovao je najveću poroznost od sva tri uzorka, sa porama najmanjeg prečnika, relativno ujednačene veličine. Sojino brašno uticalo je da granula uzorka **4** poseduje pore daleko većeg prečnika od uzorka **1**. Uzorak **4** ujedno je posedovao i manji broj pora i donekle kompaktniju strukturu u poređenju sa uzorkom **1**. Uzorak **10**, u poređenju sa uzorkom **1** i **4**, posedovao je neujednačenu strukturu, sa izrazito kompaktnim segmentima na obodima poprečnog preseka, kao i kompaktnim delovima unutrašnjosti prožetim porama neujednačenih veličina. Suprotnom ovom rezultatu, u istraživanju *Sørensen i saradnika (2009)* riblje brašno je doprinelo poroznoj strukturi, dok je delimična zamena ribljeg brašna sojinom sačmom doprinela značajno kompaktnijoj strukturi. Sa druge strane, sojina sačma doprinela je ujednačenijoj veličini pora granule, što je u skladu sa rezultatima ove disertacije, gde su biljni proteini suncokretove i sojine sačme takođe dali znatno ujednačije pore granule.



Slika 4.15. SEM snimak poprečnog preseka granula (a) uzorak 1 sa 20% visokoproteinske suncokretove sačme (b) uzorak 4 sa 20% sojinog brašna (c) uzorak 10 sa 20% ribljeg brašna

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih optimizacijom parametara postupaka usitnjavanja i vazdušne klasifikacije suncokretove sačme u cilju dobijanja njenih visokoproteinskih frakcija, kao i ispitivanja mogućnosti primene odabranih visokoproteinskih frakcija u proizvodnji ekstrudirane hrane za pastirmke izvedeni su sledeći zaključci:

1. Primena mlina čekićara i sva tri korišćena sita, prečnika otvora od 3, 2 i 1 mm, uspešno je doprinela usitnjavanju aglomerata prisutnih u polaznoj suncokretovoj sačmi. Smanjenje prečnika otvora sita (POS) dovelo je do intenzivnijeg usitnjavanja i značajnog smanjenja srednjeg prečnika čestica uz značajno povećanje nasipne mase usitnjene suncokretove sačme. Specifična potrošnja energije mlina čekićara značajno se povećala sa smanjenjem prečnika sita.
2. Cik-cak vazdušni klasifikator uspešno je primenjen za razdvajanje usitnjene suncokretove sačme na grubu i finu frakciju. Povećanjem jačine oscilacije vibro dozatora (JOVD) povećavao se protok materijala u klasifikacionu komoru klasifikatora. Granulacija usitnjene sačme značajno je uticala na protok materijala pri istim postavkama JOVD. Najveći protoci materijala ostvareni su kod sačme usitnjene primenom sita POS od 3 mm. Intenzivnije usitnjena sačma, smanjenjem prečnika otvora sita na 2 mm, uticalo je da su protoci materijala u proseku bili od 1,25 do 3,18 puta manji.
3. Protok vazduha i protok materijala u klasifikatoru uticali su na prinos dobijenih frakcija u okviru iste suncokretove sačme usitnjene uz primenu sita istog POS. Pri povećanju protoka vazduha smanjivao se prinos grube i istovremeno povećavao prinos fine frakcije. Pri istom protoku vazduha i za isto usitnjenu suncokretovu sačmu povećanje protoka materijala uticalo je na povećanje prinosa grube frakcije.
4. Povećanje protoka vazduha uticalo je na povećanje geometrijskog srednjeg prečnika čestica grube frakcije. Grube frakcije suncokretove sačme dobijene pri protocima vazduha od 8,7 i 12,5 m³/h imale su relativno povećanje sadržaja proteina 0,5 – 41,4% u poređenju sa polaznom sačmom. Smanjenje POS i povećanje protoka vazduha uticalo je na povećanje, dok je povećanje JOVD uticalo na smanjenje sadržaja proteina grube frakcije.
5. Rezultati optimizacije postupka vazdušne klasifikacije suncokretove sačme pokazali su da su na sadržaj proteina grube frakcije i odnos prinosa frakcija značajan uticaj ($p < 0.05$) imali POS

čekićara i protok vazduha. Najveći sadržaj proteina grube frakcije suncokretove sačme od 50,90% (SM) ostvaren je pri sledećim parametrima usitnjavanja i vazdušne klasifikacije: POS – 1 mm; protok vazduha – 12,5 m³/h; JOVD – 30%. Vrednosti funkcije separacije (κ), dobijene primenom računске dinamike fluida (CFD), dobro su se poklapali sa eksperimentalnim rezultatima uz prihvatljivo odstupanje za odgovarajući eksperiment od 10 do 20%.

6. Predloženi postupak za dobijanje visokoproteinskih frakcija suncokretove sačme, kombinacijom usitnjavanja mlinom čekićarom i vazdušnom klasifikacijom cik-cak klasifikatorom, efikasno je rešenje, sa velikom modularnošću, za dobijanje proizvoda sa različitim stepenom obogaćenja suncokretove sačme u različitom prinosu. Maksimalno relativno povećanje sadržaja proteina (u odnosu na polaznu suncokretovu sačmu) postignuto istraživanjem u okviru ove disertacije je veće od povećanja sadržaja proteina postignutog drugim primenjivanim postupcima opisanim u literaturi.
7. Suncokretove sačme dobijene postupkom vazdušne klasifikacije korišćene su kao sirovine u eksperimentalnoj proizvodnji ekstrudirane hrane za ribe. Prisutvo suncokretove sačme većeg sadržaja proteina i manjeg sadržaja celuloze u smeši uticalo je na formiranje više temperature matrice ekstrudera, kao i na smanjenje specifične mehaničke energije i obrtnog momenta.
8. Suncokretova sačma najslabijeg kvaliteta (37% proteina na SM) imala je negativan uticaj na radialnu ekspanziju granule, ali je i pored toga doprinela izrazito poroznoj strukturi granule, time i visokom kapacitetu upijanja ulja. Ova suncokretova sačma je ipak negativno uticala na nasipnu masu, tvrdoću granula, stepen otiranja, nivo otpuštanja ulja i stabilnost granula u vodi.
9. Smanjenje sadržaja suncokretove ljuske i povećanje sadržaja proteina suncokretove sačme, uticalo je na povećanje radialne ekspanzije, tvrdoće, otpornosti otiranju i stabilnosti granula u vodi. Visokoproteinska suncokretova sačma sa oko 49% proteina na SM doprinela je kompaktnijoj strukturi granula, a time i optimalnim fizičkim karakteristikama hrane za pastrmke. Rezultati istraživanja ukazali su da je navedena visokoproteinska frakcija suncokretove sačme u poređenju sa preostale dve ispitane sačme, najbolja visokoproteinska sirovina za delimičnu zamenu ribljeg brašna.
10. U poređenju sa obezmašćenim sojinim brašnom i ribljim brašnom, visokoproteinska suncokretova sačma sa oko 49% proteina na SM doprinela je nižim vrednostima temperature matrice ekstrudera, i većim vrednostima obrtnog momenta i specifične mehaničke energije (SME).

11. Visokoproteinska suncokretova sačma uticala je na formiranje granule najveće poroznosti, u poređenju sa sojinim i ribljim brašnom. Navedena suncokretova sačma imala je pozitivan uticaj na kapacitet upijanja ulja granula, stabilnost granula i otpuštanje nutrijenata u vodi, ali i negativan uticaj na stepen otiranja i nasipnu masu granula.
12. Zamenom 20% ribljeg brašna u recepturi za ishranu pastrmke isključivo visokoproteinskom frakcijom suncokretove sačme sa oko 49% proteina na SM, dobijene usitnjavanjem na mlinu čekićaru i postupkom vazdušne klasifikacije, dobijene su granule nezadovoljavajućeg fizičkog kvaliteta. Kombinacijom 13,4% suncokretove sačme i 6,6% sojinog ili ribljeg brašna proizvedene su granule koje su imale značajno bolji fizički kvalitet, dok je optimalni kvalitet postignut uvođenjem podjednakih udela suncokretove sačme, sojinog brašna i ribljeg brašna u recepturu.
13. Viskoproteinska frakcija suncokretove sačme sa približno 49% proteina na SM svojim funkcionalnim karakteristikama odlično se dopunjuje sa funkcionalnim karakteristikama sojinog brašna, i u kombinaciji sa istim daje visokokvalitetne ekstrudirane granule za ishranu riba.

6. LITERATURA

- Aarseth, K. A. (2004). Attrition of feed pellets during pneumatic conveying: the influence of velocity and bend radius. *Biosystem Engineering*, 89, 197-213.
- Aarseth, K. A., Perez, V., Bøe, J. K., Jeksrud, W. K. (2006). Reliable pneumatic conveying of fish feed. *Aquaculture Engineering*, 35, 14-25.
- Aas, T. S., Oehme, M., Sørensen, M., He, G., Lygren, I., Åsgård, T. (2011a). Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system. *Aquacultural Engineering*, 44, 25-34.
- Aas, T. S., Terjesen, B. F., Sigholt, T., Hillestad, M., Holm, J., Refstie, S., Baevefjord, G., Rørvik, K. –A., Oehme, M., Åsgard, T. (2011b). Nutritional responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets with different physical qualities at stable or variable environmental conditions. *Aquaculture Nutrition*, 17, 657-670.
- Abdi, H., Williams L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2, 433-459.
- Altan, A., McCarthy, K., Maskan, M. (2008). Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering*, 84, 231-242.
- Altun, O., Benzer, H. (2014). Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers. *Powder Technology*, 264, 1-8.
- Alvarez-Martinez, L., Kondury, K. P., Harper, J. M. (1988). A general model for expansion of extruded products. *Journal of Food Science*, 53 (2), 609-615.
- Amerah, A. M., Ravindran, V., Lentle, R.G., Thomas, D.G. (2007). Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poultry Science*, 86, 2615-2623.
- ASAE (2003). Methods of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving. Standard no. S319.3. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 202–205.
- Association of Analytical Communities (A.O.A.C.) (1998). Official Methods of Analysis (16th ed.). Gaithersburg, MD, USA.
- Bach-Knudsen, K. E. (1997). Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Animal Feed Science and Technology*, 67(4), 319-338.

- Baeverfjord, G., Refstie, S., Krogedal, P., Åsgård, T. (2006): Low feed pellet water stability and fluctuating water salinity cause separation and accumulation of dietary oil in the stomach of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 261, 1335-1345.
- Banjac, V., Čolović, R., Vukmirović, Đ., Čolović, D., Đuragić, O., Palić, D., Pezo, L. (2015). A proposal of methods for determining water stability of extruded fish feed. VII International Conference Water & Fish, 10-12 June 2015, Belgrade, Serbia, 170-175.
- Banjac, V., Pezo, L., Pezo, M., Vukmirović, Đ., Čolović, D., Fišteš, A., Čolović, R. (2017). Optimization of the classification process in the zigzag air classifier for obtaining a high protein sunflower meal – Chemometric and CFD approach. *Advanced Powder Technology*, 28, 1069-1078.
- Bau H. M., Mohtadi Nia, D. J., Mejean L., Debry G. (1983). Preparation of colorless sunflower protein products: effect of processing on physicochemical and nutritional properties. *Journal of American Oil Chemists Society*, 60, 1141-1148.
- Behnke, K. C. (1996). Feed Manufacturing technology: current issues and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, 62, 49-57.
- Bell, J. G., Koppe, W. (2010). Lipids in aquafeeds. In: Turcjin, G. M., Ng, W. K., Tocher, D. R. (Eds.), *Fish Oil replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 21-59.
- Bergthaller, W., Dijkink, B. H., Langelaan, H. C., Vereijken, J. M. (2001). Protein from pea mutants as a co-product in starch separation — Isolates from wet and dry separation: yield, composition and solubility. *Nahrung/Food*, 45(6), 390-392.
- Biddulph, M. W., Connor, M. A. (1989). A method of comparing the performance of the air classifiers, *Resources, Conservation and Recycling*, 2, 275-286.
- Biswas, A., Biswas, B. K., Ito, J., Takaoka, O., Yagi, N., Itoh, S., Takii, K. (2011). Soybean meal can partially replace enzyme-treated fish meal in the diet of juvenile Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*. *Fisheries Science*, 77(4), 615-621.
- Blanke, J. (2015). Zig-zag classifier and method for classifying for separating material to be separated. US Patent US 2015/0034532 A1.
- Boni, R., Assogna, A., Grillo, F., Robertiello, A., Petrucci, F., Giacomozzi E., Patricelli, A. (1987). Method for preparing protein hydrolysates soluble in an acid environment, and the hydrolysates obtained. European Patent EP0 271 964 A2.

- Booth, M. A., Allan, G. L., Frances, J., Parkinson, S. (2001). Replacement of fish meal in diets for Australian silver perch, *Bidyanus bidyanus*: IV. Effects of dehulling and protein concentration on digestibility of grain legumes. *Aquaculture*, 196(1-2), 67-85.
- Borquez, A., Perez, E. (2007). Vacuum coating pelleted feed. In: Victam International, feed and Food Industries Show, Aquafeed Horizons, Utrecht, Holandija.
- Boulos, N. N., Greenfield, H., Wills, R. B. H. (2000). Water holding capacity of selected soluble and insoluble dietary fibre. *International Journal of Food Properties*, 3, 217-231.
- Boye, J., Zare, F., Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43, 414-431.
- Brinker, A., Reiter, R. (2011). Fish meal replacment by plant protein substitution and guar gum addition i trout feed, Part I: Effects on feed utilization and fish quality, *Aquaculture*, 310, 350-360.
- Brlak, T., Pezo, L., Voća, N., Krička, T., Vukmirović, Đ., Čolović, R., Bodroža-Solarov, M. (2013). Chemometric approach for assessing the quality of olive cake pellets. *Fuel Processing Technology*, 116, 250-256.
- Burel, C., Boujard, T., Tulli, F., & Kaushik, S. J. (2000). Digestibility of extruded peas, extruded lupin, and rapeseed meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture*, 188(3), 285-298.
- Canibe, N., Martin-Pedrosa, M., Robredo, L. M., Bach-Knudsen, K. E. (1999). Chemical composition, digestibility and protein quality of 12 sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 1775-1782.
- Cavalcanti, B., Behnke, K. C. (2005a). Effect of composition of feed model systems on pellet quality: a mixture experimental approach. I. *Cereal Chemistry*, 82, 455-461.
- Cavalcanti, B., Behnke, K. C. (2005b). Effect of composition of feed model systems on pellet quality: a mixture experimental approach. II. *Cereal Chemistry*, 82, 462-467.
- Challa, R., Srinivasan, R., To, F. (2010). Fractionation of soybean meal, cottonseed meal and wheat middlings using combination of sieving and air classification. *Animal Feed Science and Technology*, 159, 72-78.
- Chen, H. Y., Jenn, J. S. (1992). Increased pellet water by the supplementation of phospholipid and its effects on shrimp growth. *Asian Fisheries Science*, 5, 211-217.

- Collins, S. A., Desai, A. R., Mansfield, G. S., Hill, J. E., Van Kessel, A. G., Drew, M. D. (2012). The effect of increasing inclusion rates of soybean, pea and canola meals and their protein concentrates on the growth of rainbow trout: Concepts in diet formulation and experimental design for ingredient evaluation. *Aquaculture*, 344-349, 90-99.
- Collins, S. A., Øverland, M., Skrede, A., Drew, M. D. (2013). Effect of plant protein sources on growth rate in salmonids: Meta-analysis of dietary inclusion of soybean, pea and canola/rapeseed meals and protein concentrates. *Aquaculture*, 400-401, 85-100.
- Craig, S., Helfrich, L. A. (2002). Understanding fish nutrition, feeds and feeding. Virginia Cooperative Extension, Publication 420-256, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Čolović, D. (2014). Ispitivanje uticaja procesa ekstrudiranja na dobijanje i stabilnost funkcionalnog hraniva za životinje na bazi lanenog semena. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- Čolović, R., Vukmirović, Đ., Ivanov, D., Lević, J., Jovanović, R., Kokić, B., Sredanović, S., Đuragić, O., Spasevski, N. (2010). How does oil addition in main mixer influence physical properties of trout feed?, 2nd Feed-to-Food Workshop „Extrusion technology in feed and food processing“, Thematic proceedings, Novi Sad, November 19th, 79-96.
- Čolović, R. (2013). Uticaj dodatka biljnih proteinskih koncentrata u hranu za životinje na kvalitet peleta. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- Čolović, R., Banjac, V., Kokić, B., Lević, J., Đuragić, O., Spasevski, N., Sredanović, S. (2014): A simple method for determination of relative leaching losses of water soluble components of fish feed. *Aquaculture Europe 2014*, 14-17 October, Donostia-San Sebastian, Spain, 264-265.
- Dale, N. (1996). Variation in feed ingredient quality: oilseed meals. *Animal Feed Science and Technology*, 59, 129-135.
- de Cruz, C. R., Kmarudin, M. S., Saad, C. R., Ramezani-Fard, E. (2015). Effects of extruder die temperature on the physical properties of extruded fish pellets containing taro and broken rice starch. *Animal Feed Science and Technology*, 199, 137-145.
- De Santis, C., Ruohonen, K., Tocher, D. R., Martin, S. A. M., Król, E., Secombes, C. J., Bell, J. G., El-Mowafi, A., Crampton, V.O. (2015). Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr as a model to predict the optimum inclusion of air classified faba bean protein concentrate in feeds for seawater salmon. *Aquaculture*, 444, 70-78.

- de Souza, F. J., Salvo, R. V., Martins, D. A. M. (2012). Large eddy simulation of the gas–particle flow in cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 94, 61-70.
- Delić, I., Lazor, M., Kovačević, M. (1965). Mehanička tehnologija izdvajanja celuloznih materija iz suncokretove sačme. *Stočarstvo*, 19(1-2), 73-83.
- Delić, I., Rac, M., Stojsavljević, T., Dutina, B., Ivić, M., Vučurević, N., Milić, B., Vlahović, M. (1971). Fizička svojstva, hemijski sastav i hranljiva vrednost suncokretovih sačmi sa visokim sadržajem proteina. *Savremena poljoprivreda, Posebno izdanje*, 10, 1-37.
- Derksen, J. J., Sundaresan, S., van den Akker, H. E. A. (2006). Simulation of mass-loading effects in gas–solid cyclone separators. *Powder Technology*, 163, 59-68.
- Dervas, G., Doxastakis, G., Hadjisavva-Zinoviadi, S., Triantafillakos, N. (1999). Lupin flour addition to wheat flour doughs and effect on rheological properties. *Food Chemistry*, 66, 67-73.
- Dijkink, B. H., Speranza, L., Paltsidis, D., Vereijken, J. M. (2007). Air dispersion of starch-protein mixtures: A predictive tool for air classification performance. *Powder Technology*, 172, 113-119.
- Dinnissen (2011). *Product Information from Industry*, Netherlands.
- Draganov, L. K. (2015). New process for preparing high protein sunflower meal fraction. European Patent EP 2848128 A1.
- Draganović, V., van der Goot, A. J., Boom, R., Jonkers, J. (2011). Assessment of the effects of fish meal, wheat gluten, soy protein concentrate and feed moisture on extruder system parameters and technical quality of fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 165, 238-250.
- Draganović, V., Jørgensen, S. E., Boom, R., Jonkers, J., Riesen, G., van der Goot, A. J. (2013a). Sustainability assessment of salmonid feed using energy, classical exergy and eco-exergy analysis. *Ecological Indicators*, 34, 277-289.
- Draganović, V., van der Goot, A. J., Boom, R., Jonkers, J. (2013b). Wheat gluten in extruded fish feed: effects on morphology and on physical and functional properties. *Aquaculture Nutrition*, 19, 846-859.
- Draganović, V., Boom, R., Jonkers, J., van der Goot, A. J. (2014). Lupine and rapeseed protein concentrate in fish feed: A comparative assesment of the techno-functional properties using a shear cell device and an extruder. *Journal of Food Engineering*, 126, 178-189.

- Đorđević, N., Makević, M., Grubić, G., Jokić, Ž. (2009). Ishrana domaćih i gajenih životinja. Poljoprivredni fakultet, Zemun, Srbija, 371-394.
- Đorđević, N., Dinić, B. (2011). Proizvodnja smeša koncentrata za životinje. Kruševac, Srbija.
- Elsayed, K., Lacor, C. (2010). Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations, *Chemical Engineering Science*, 65, 6048-6058.
- FAO – Food and Agricultural Organization (2017). <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, pristupljeno poslednji put februara 2017.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2011). Aquaculture development. 5. Use of wild fish as feed in aquaculture. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 5, Suppl.5. FAO, Rome.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2016). Fishery and Aquaculture Statistics. FAO Yearbook 2014. Rome.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2016a). The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Rome.
- Ferrari, B., Finocchiaro, F., Stanca, A. M., Gianinetti, A. (2009). Optimization of air classification for the production of β -glucan-enriched barley flours, *Journal of Cereal Science*, 50, 152-158.
- Francis, G. Makkar H. P. S., Becker, K. (2001). Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish. *Aquaculture*, 199, 197-227.
- Friedländer, T., Kuyumcu, H. Z., Rolf, L., (2006). Untersuchungen zur Sortierung von PET-Flakes nach der Teilchenform. *Aufbereitungstechnik*, 47(8+9), 24-38.
- Fuertes, J. B., Celada, J. D., Carral, J. M., Sáez-Royuele, M., González-Rodríguez, Á. (2013). Replacement of fish meal by pea protein concentrate in practical diets for juvenile crayfish (*Pacifastacus leniusculus* Dana, Astacidae) from onset of exogenous feeding. *Aquaculture* 388-391, 159-164.
- Fürchner, B., Zampini, S. in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, Weinheim 2012, 215-234.
- Fürll, C., Hoffmann, T. (2013). Flow properties of components for dry compound feed. *Powder Technology*, 235, 838-841.

- Garcia-Moreno, M. J., Fernandez-Martinez, J. M., Velasco, L., Perez- Vich, B. (2012). Genetic basis of unstable expression of high gamma-tocopherol content in sunflower seeds. *BMC Plant Biology*, 12, 71.
- Gatlin, D. M., Barrows, F. T., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T. G., Hardy, R. W., Herman, E., Hu, G.; Krogdahl, Å., Nelson, R., Overturf, K., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., Souza, E. J., Stone, D., Wilson, R., Wurtele, E. (2007). Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquaculture Research*, 38, 551-579.
- Geneau-Sbartai, C., Leyris, J., Silvestre, F., Riga, I. L. (2008). Sunflower cake as a natural composite: composition and plastic properties. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 56, 11198-11208.
- Gill, N., Higgs, D. A., Skura, B. J., Rowshandeli, M., Dosanjh, B. S., Mann, J., Gannam, A. I. (2006). Nutritive value of partially dehuiled and extruded sunflower meal for post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar L.*) in sea water. *Aquaculture Research*, 37, 1348-1359.
- Glencross, B., Evans, D., Dods, K., McCafferty, P., Hawkins, W., Maas, R., Sipsas, S. (2005). Evaluation of the digestible value of lupin and soybean protein concentrates and isolates when fed to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, using either stripping or settlement faecal collection methods. *Aquaculture*, 245(1), 211-220.
- Glencross, B., Hawkins, W., Evans, D., Rutherford, N., Dods, K., Maas, R., McCafferty, P., Sipsas, S. (2006). Evaluation of the nutritional value of prototype lupin protein concentrates when fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 251, 66-77.
- Glencross, B. D., Booth, M., Allan, G. L. (2007). A feed is only as good as its ingredients – a review of ingredient evaluation strategies for aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 13, 17-34.
- Glencross, B., Hawkins, W., Maas, R., Karopoulos, M., Hauler, R. (2010). Evaluation of the influence of different species and cultivars of lupin kernel meal on the extrusion process, pellet properties and viscosity parameters of salmonid feeds. *Aquaculture Nutrition*, 16, 13-24.
- Glencross, B., Rutherford, N., Hawkins, W. (2011). A comparison of the growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) when fed soybean, narrow-leaf or yellow lupin meals in extruded diets. *Aquaculture Nutrition*, 17, 317-325.
- Glenn, E. P., O'Leary, J. W., Watson, M. C., Thompson, T. L., Kuehl, R. O. (1991). *Salicornia bigelovii* Torr.: An oilseed halophyte for seawater Irrigation, *Science* 251, 1065-1067.
- Gogoi, B. K., Choudhury, G. S., Oswalt, A. J. (1996). Effects of location and spacing of reverse screw and kneading element combination during twin-screw extrusion of starchy and proteinaceous blends. *Food Research International*, 29, 505-512.

- Gong, G., Yang, Z., Zhu, S. (2012). Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 3916-3930.
- Gu, M., Kortner, T. M., Penn, M., Hansen, A. K., Kroghdahl, Å. (2014). Effects of dietary plant meal and soya-saponin supplementation on intestinal and hepatic lipid droplet accumulation and lipoprotein and sterol metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *British Journal of Nutrition*, 111, 432-444.
- Gueguen, J., Barbot, J. (1988). Quantitative and qualitative variability of pea (*Pisum sativum* L.) protein composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 42, 209-224.
- Guizani, R., Mokni, I., Mhiri, H., Bournot, P. (2014). CFD modeling and analysis of the fish-hook effect on the rotor separator's efficiency. *Powder Technology*, 264, 149-157.
- Guy, R. C. E. (2001). Raw materials for extrusion cooking. In: *Extrusion Cooking Technologies and Applications*, Guy, R.C.E. (ed.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 5-28.
- Hagemaijer, T., Glöckner, H., Roloff, C., Thévenin, Tomas, J. (2014). Simulation of multi-stage particle classification in a zigzag apparatus. *Chemical Engineering & Technology*, 37(5), 879-887.
- Hansen, J. Ø., Storebakken, T. (2007). Effects of dietary cellulose level on pellet quality and nutrient digestibilities in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 272, 458-465.
- Hansen, J. Ø., Penn, M., Øverland, M., Shearer, K. D., Kroghdahl, Å., Mydland, L. T., Storebakken, T. (2010). High inclusion of partially deshelled and whole krill meals in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 310, 164-172.
- Hansen, J. Ø., Shearer, K. D., Øverland, M., Penn, M. H., Kroghdahl Å., Mydland, L. T., Storebakken, T. (2011). Replacement of LT fish meal with a mixture of partially deshelled krill meal and pea protein concentrates in diets for Atlantic salmon (*Salmosalar*). *Aquaculture*, 315, 275-282.
- Harper, J. M. (1978). Extrusion processing of food. *Food Technology*, 32(7), 67-72.
- Harper, J. M. (1989). Food extruders and their applications. In: *Extrusion Cooking* (Mercier, C., Linko, P., Harper, J. M. eds), American Association of Cereal Chemistry, St Paul, MN, 1-15.
- Hartviksen, M., Vecino, J. L. G., Ringø, E., Bakke, A., -M., Wadsworth, S., Kroghdahl, Å., Ruohonen, K., Kettunen, A. (2014) Alternative dietary protein sources for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) effect on intestinal microbiota, intestinal and liver histology and growth. *Aquaculture Nutrition*, 20, 381-398.

- Heiman, M. (2000). Particle size reduction. In Feed Manufacturing Technology V. AFIA, Arlington, SAD, 108-126.
- Heimann, M. (2002). The "bottom line" of grinding. Feed International, 23(5), 32-34.
- Hemmingsen, A. K. T., Stevik, A. M., Claussen, I. C, Lundblad, K. K., Prestløkken, E., Sørensen, M., Eikevik, T. M. (2008). Water adsorption in feed ingredients at different temperatures, particle size and ingredient combinations. Drying Technology, 26, 738-748.
- Hemre, G. I., Mommsen, T. P., Krogdahl, A. (2002). Carbohydrates in fish nutrition: effects on growth, glucose metabolism and hepatic enzymes. Aquaculture Nutrition, 8, 175-194.
- Hosokawa Alpine (2006). Hosokawa Alpine Aktiengesellschaft, Mechanical Process Technology Handbook, 2nd revised edition, Augsburg, Germany.
- Hsieh, F., Mulvaney, S. J., Huff, H. E., Lue, S., Brent, J. (1989). Effect of dietary fiber and screw speed on some extrusion processing and product variables. Lebensmittel Wissenschaft Technologie, 22, 204-207.
- <http://www.indexmundi.com/agriculture>, pristupljeno poslednji put februara 2017.
- Huber, G. R. (2000). Twin-Screw Extruders. In: Extruders in Food Applications. M. N. Riaz (Ed.), Taylor & Francis Group & CRC Press, Boca Raton, USA, 81-114.
- Husemann, K. (1990). Modellierung des Sichtprozesses am Abweiserad. Aufbereitungstechnik, 31(7), 359-366.
- Hwang, M. P., Hayakawa, K. I. (1980). Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. Journal of Food Science, 45, 1400-1402.
- Ighwela, K. A., Ahmad, A. B., Abol-Munafi, A. B. (2013). Water stability and nutrient leaching of different levels of maltose formulated fish pellets. Global Veterinaria, 10(6), 638-342.
- Ilo, S., Liu, Y., Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. LSW – Lebensmittel Wissenschaft & Technologie, 32, 79-88.
- Jabbar, M.A., Ahmad, S., Riffat, S. (2008). Effect of replacing cottonseed cake with sunflower meal in the ration of lactating crossbred cows. Journal of Veterinary and Animal Science, 1, 11-13.
- Jackson, A. J., Capper, B. S., Matty, A. J. (1982). Evaluation of some plant proteins in complete diets for the tilapia *Sarotherodon mossambicus*. Aquaculture, 27, 97-109.

- Jayasena, V., Chih, H. J., Nasar-Abbas, S. M. (2010). Functional properties of sweet lupin protein isolated and tested at various pH levels. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 6(2), 130-137.
- Jiao, J., Zheng, Y., Sun, G. (2005). Numerical simulation of fine particle separation in a rotational tube separator. *China Particuology*, 3(4), 219-223.
- Jobling, M. (2016). Fish nutrition research: past, present and future. *Aquaculture International*, 24, 767-786.
- Johansson, R., Evertsson, M. (2012). CFD simulation of a gravitational classifier. *Minerals Engineering*, 33, 20-26.
- Johansson, R., Evertsson, M. (2014). CFD simulation of a centrifugal air classifier used in the aggregate industry. *Minerals Engineering*, 63, 149-156.
- Johnston, L. J., Noll, S., Renteria, A., Shurson, J. (2003). Feeding by-products in high concentration of fiber to nonruminants. Third National Symposium on Alternative Feeds for Livestock and Poultry held in Kansas City.
- Jovanović, A. (2015). Simulacija procesa kretanja čestica pri transportu u statičkim mešalicama i modifikovanim pužnim transporterima primenom metode diskretnih elemenata. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- Kaliyan, N., Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified products. *Biomass Bioenergy*, 33, 337-359.
- Kaliyan, N., Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101, 1082-1090.
- Kalmendal, R., Elwinger, K., Holm, L., Tauson, R. (2011). High-fibre sunflower cake affects small intestinal digestion and health in broiler chickens. *British Poultry Science*, 52, 86-96.
- Kannadhasan, S., Muthukumarappan, K., Rosentrater, K. A. (2009). Effects of Ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and tapioca starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*, 1, 6-21.
- Kannadhasan, S., Muthukumarappan, K., Rosentrater, K. A. (2011). Effect of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS. *Food Bioprocessing Technology*, 4, 282-294.

- Kannan, A., Sihag, S., Yadav, K.R., Khirwar, S.S. (2000). Effect of replacing mustard cake with deoiled sunflower cake on intake and digestibility of nutrients in lactating Murrah buffaloes. *Indian Journal of Animal Nutrition*, 17, 217-221.
- Kearns, J. P. (1993). Extrusion of aquatic feeds. *Technical Bulletin of American Soybean Association*, 40, 16-34.
- Kersten, J., Rohde, H. R., Nef, E. (2005). *Principles of mixed feed production*, Agrimedia GmbH, Bergen, Nemačka.
- Koch, K. (2002). Hammer mills and roller mills. In *MF-2048 Feed Manufacturing*, Kansas State University, Manhattan, SAD.
- Kortner T. M., Björkheim I., Krasnov, A., Timmerhaus, G., Kroghdahl, Å. (2014). Dietary cholesterol supplementation to a plant based diet suppresses the complete pathway of cholesterol synthesis and induces bile acid production in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *British Journal of Nutrition*, 111, 2089-2103.
- Kraugerud, O. F., Svihus, B. (2011). Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 168, 250-256.
- Kraugerud, O. F., Jørgensen, H. Y., Svihus, B. (2011). Physical properties of extruded fish feed with inclusion of different plant (legumes, oilseeds, or cereals) meals. *Animal Feed Science and Technology*, 163, 244-254.
- Kreps F., Vrbiková, L., Schmidt, Š. (2014). Industrial rapeseed and sunflower meal as source of antioxidants. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(2), 45-44.
- Lam, C. M. D., Flores, R. A. (2003). Effect of particle size and moisture content on viscosity of fish feed. *Cereal Chemistry*, 80, 20-24.
- Lamichhane, S., Sahtout, K., Smillie, J., Scott, T. A. (2015). Vacuum coating of pelleted feed for broilers: Opportunities and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, 200, 1-7.
- Laudadio, V., Bastoni, E., Introna, M., Tufarelli, V. (2013). Production of low-fiber sunflower (*Helianthus annuus* L.) meal by micronization and air-classification processes. *CyTA-Journal of Food*, 11(4), 398-403.
- Le Gal, M. F., Rey, L. (1986). The Reserve proteins in the cells of mature cotyledons of *Lupinus albus* var. Lucky; I. Quantitative ultrastructural study of the protein bodies. *Protoplasma*, 130, 120-127.

- Lekang, O. I., Andersen, J., Bøe, J. K., Berre, B. (1991). Devices and methods for measuring physical properties of particulate material. Department of Mathematical Sciences and Technology, The Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norveška.
- Leonardis, A. D., Macciola, V., Rocco, A. D. (2003). Oxidative stabilization of cold-pressed sunflower oil using phenolic compounds of the same seeds. *Journal of Science and Food Agriculture*, 83, 523-528.
- Letang, C., Samson, M. F., Lasserre, T. M., Chaurand, M., Abecassis, J. (2002). Production of starch with very low protein content from soft and hard wheat flours by jet milling and air classification. *Cereal Chemistry*, 79(4), 535-543.
- Lević, J., Delić, I., Ivić, M., Rac, M., Stefanović, S. (1989). Proizvodnja suncokretove sačme sa povišenim i visokim sadržajem proteina pomoću frakcionisanja. *Uljarstvo*, 26 (1-2), 45-52.
- Lević, J., Sredanović, S. (2012). Suncokretova sačma - monografija, Univerzitet u Novom Sadu, Institut za prehrambene tehnologije u Novom Sadu, Novi Sad.
- Li, Y., Li, J., Liu, Z., Ruan, R., Mao, Z. (2003). Vacuum coating of heat-sensitive liquid ingredients onto feed pellets. *Trans ASAE*, 46, 383-387.
- Lomascolo, A., Uzan-Boukhris, E., Sigoillot, J. C., Fine, F. (2012). Rapeseed and sunflower meal: a review on biotechnology status and challenges. *Applied microbiology and biotechnology*, 95, 1105-1114.
- Lovell, T. (1989). Feed formulation and processing. In: *Nutrition and Feeding of Fish* (Lovell, T. ed.), Van Nostrand Reinhold, New York, 107-127.
- Lqari, H., Vioque, J., Pedroche, J., Millan, F. (2002). *Lupinus angustifolius* protein isolates: chemical composition, functional properties and protein characterization. *Food Chemistry*, 76, 349-356.
- Lue, S., Hsieh, F., Peng, I. C., Huff, H. E. (1990). Expansion of corn extrudates containing dietary fiber: a microstructure study. *Food Science and Technology*, 23, 165-173.
- Ljøkjel K., Sørensen M., Storebakken T., Skrede A. (2004). Digestibility of protein, amino acids and starch in mink (*Mustela vison*) fed diets processed by different extrusion conditions. *Canadian Journal of Animal Science*, 84, 673-680.
- Maaroufi, C., Melcion, J. -P., de Monredon, F., Giboulot, B., Guibert, D., Le Guen, M. -P. (2000). Fractionation of pea flour with pilot scale sieving. I. Physical and chemical characteristic of pea seed fractions. *Animal Feed Science and Technology*, 85, 61-78.

- Maaroufi, C., Chapoutot, P., Sauvant, D., Giger-Reverdin, S. (2009). Fractionation of pea flour with pilot scale sieving. II. *In vitro* fermentation of pea seed fractions of different particle sizes. *Animal Feed Science and Technology*, 154, 135-150.
- Makkar, H. P. S. (1993). Antinutritional factors in foods for livestock. In: Gill, M., Owen, E., Pollot, G.E., Lawrence, T.L.J. Eds., *Animal Production in Developing Countries*. Occasional publication No. 16. British Society of Animal Production, 69-85.
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansang, S. (2004). Grinding performance and physical properties of selected biomass. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 339-352.
- McKevith, B. (2005) Nutritional aspects of oilseeds. *Nutrition Bulletin*. 30, 13-26.
- Meng, X., Threinen, D., Hansen, M., Driedger, D. (2010). Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Research International*, 43, 650-658.
- Mercier, C., Linko, P., Harper, J. M. (1989). *Extrusion Cooking*, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, 471.
- Mérida, S. N., Tomás-Vidal, A., Martínez-Llorens, S., Cerdá, M. J. (2010). Sunflower meal as a partial substitute in juvenile sharpsnout sea bream (*Diplodus puntazzo*) diets: Amino acid retention, gut and liver histology, *Aquaculture*, 298, 275-281.
- Miller, R. C. (1990). Unit operations and equipment, *Extrusion and Extruders, Breakfast Cereal and How They Are Made*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN., 135-193.
- Montagne, L., Pluske, J. R., Hampson, D. J. (2003). A review of interactions between dietary fibre and the intestinal mucosa, and their consequences on digestive health in young non-ruminant animals. *Animal Feed Science and Technology*, 108, 95-117.
- Morken, T., Kraugerud, O. F., Barrows, F. T., Sørensen, M., Storebakken, T., Øverland, M. (2011). Sodium diformate and extrusion temperature affect nutrient digestibility and physical quality of diets with fish meal and barley protein concentrate for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 317, 138-145.
- Morken, T., Kraugerud, O. F., Sørensen, M., Storebakken, T., Hillestad, M., Christiansen, R., Øverland, M. (2012). Effects of feed processing conditions and acid salts on nutrient digestibility and physical quality of soy-based diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture Nutrition*, 18, 21-34.

- Morsi, S. A., Alexander, A. J. (1972). An investigation of particle trajectories in two- phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics* 55 (02), 193-208.
- Moure, A., Sineiro, J., Domínguez, H., Parajó, J. C. (2006). Functionality of oilseed protein products: A review. *Food Research International*, 39, 945-963.
- Nagalkshmi, D., Dhanalakshmi, K., Himabindu, D. (2011). Replacement of groundnut cake with sunflower and karanj seed cakes on performance, nutrient utilization, immune response and carcass characteristics in *Nellore* lambs. *Small Ruminant Research*, 97, 12-20.
- NCSS 2007, J. Hintze, NCSS, LLC., Kaysville, Utah, USA. (www.ncss.com).
- Nichols, N. N., Dien, B. S., Wu, Y. V., Cotta, M. A. (2005). Ethanol fermentation of starch from field peas. *Cereal Chemistry*, 82, 554-558.
- 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., Hillel, R., Ptichi, I., Shefet, G. (1995). Effect of particle size on performance. 3. Grinding pelleting interactions. *Poultry Science*, 74, 771-783.
- Noll, S., Stangeland, V., Speers, G., Brannon, J. (2001). Distillers grains in poultry diets. 62nd Minnesota Nutrition Conference and Minnesota Corn Growers Association Technical Symposium, Bloomington, MN.
- Nwkolo, E. (1996) Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). In *Food and Feed from Legumes and Oilseeds*. Nwkolo, E., Smartt, J. (Eds.), Springer US.
- Obaldo, L. G., Divakaran, S., Tacon, A. G. (2002). Method for determining physical stability of shrimp feeds in water. *Aquaculture Research*, 33, 369-377.
- Oehme, M. M. (2013). Feed utilization can be improved by optimizing physical pellet quality and feeding equipment in salmonid farming. Phd Thesis, Department of Animal and Aquacultural Sciences, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway.
- Oehme, M., Aas, T. S., Olsen, H. J., Sørensen, M., Hillestad, M., Li, Y., Åsgård, T. (2014). Effects of dietary moisture content of extruded diets on physical feed quality and nutritional response in Atlantic salmon (*Salmosalar*). *Aquaculture Nutrition*, 20, 451-465.
- Oh, J., Choi, S., Kim, J. (2015). Numerical simulation of an internal flow field in a uniflow cyclone separator. *Powder Technology*, 274, 135-145.
- Oreopoulou, V., Tzia, C. (2007). Utilization of plant by-products for the recovery of proteins, dietary fibers, antioxidants and colorants. *Springer Science of Business Media*, New York, 209-232.

- Øverland, M., Romarheim, O. H., Ahlstrøm, Ø., Storebakken, T., Skrede, A. (2007). Technical quality of dog food and salmon feed containing different bacterial protein sources and processed by different extrusion conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 134, 14-139.
- Øverland, M., Sørensen, M., Storebakken, T., Penn, M., Krogdahl Å., Skrede, A. (2009). Pea protein concentrate substituting fish meal or soybean meal in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)- Effect on growth performance, nutrient digestibility, carcass composition, gut health, and physical feed quality, *Aquaculture*, 288(3-4), 305-311.
- Pandya, T. S., Srinivasan, R. (2012). Effect of hammer mill retention screen size on fiber separation from corn flour using the Elusive process. *Industrial Crops and Products*, 35, 37-43.
- Pandya, T. S., Srinivasan, R., Johnson, J. K. (2013). Operating air velocities for fiber separation from corn flour using the Elusieve process. *Industrial Crops and Products*, 45, 100-105.
- Parrado J., Bautista J. (1993). Protein enrichment of sunflower lignocellulosic fraction by *Trichoderma harzianum* S/G2431 in low moisture content media. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 57, 317-318.
- Payne, J., Rattink, W., Smith, T., Winowiski, T. (1994). Objectives in pelleting. In: Payne, J., Rattink, W., Smith, T., Winowiski, T. (Eds.), *The Pelleting Handbook*. Borregaard Lignotech, Norway, 11-12.
- Pedroche, J. (2015). Utilization of Sunflower Proteins. In *Sunflower: Chemistry, Production, Processing and Utilization*. Martínez-Force, E., Dunford, N. T., Salas, J. J. (Eds), AOCS Press, Urbana, Illinois, USA.
- Pelgrom, P. J. M., Vissers, A. M., Boom, R. M., Schutyser, M. A. I. (2013). Dry fractionation for production of functional pea protein concentrates. *Food Research International*, 53, 232-239.
- Pelgrom, P. J. M., Berghout, J. A. M., van der Goot, A. J., Boom, R. M., Schutyser, M. A. I. (2014). Preparation of functional lupine protein fractions by dry separation. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 680-688.
- Pelgrom, P. J. M., Wang, J., Boom, R. M., Schutyser, M. A. I. (2015). Pre- and post-treatment enhance the protein enrichment from milling and air classification of legumes, *Journal of Food Engineering*, 155, 53-61.
- Perez, E. (2001). Vacuum coating: Principles and application. In: van der Poel, A. F. B., Vahl, J. L., Kwakkel, R. P. (Eds.), *Advances in Nutritional Technology*. Wageningen Press, Wageningen, Netherlands, 83-96.

- Pfost, H. and Headley, V., 1976. Methods of determining and expressing particle size. In: H. B. Pfost and D. Pickering (Editors), *Feed Manufacturing Technology*. pp. 512-520.
- Pietsch, W. (2002). *Agglomeration Processes – Phenomena, Technologies, Equipment*, Wiley-VCH, Weinheim, 622.
- Pillay, T. V. R., Kutty, M. N. (2005). Feed and nutrition. In: *Aquaculture: Principles and Practices*, 2nd edition, Blackwell publishing, Oxford, 105-173.
- Pisarev G. I., Hoffmann A. C. (2012). Effect of the 'end of the vortex' phenomenon on the particle motion and separation in a swirl tube separator, *Powder Technology*, 222, 101-107.
- Plant, A. R., Moore, K. G. (1983). The protein, lipid and carbohydrate composition of protein bodies from *Lupinus angustifolius* seeds. *Phytochemistry*, 22(11), 2359-2363.
- Plattner, B. (2007). Density management and control. In: *Extruders and expanders in pet food, aquatic and livestock feeds*. Riaz, M. N. (Ed.) Agrimedia GmbH, Clenze, Germany, 277-294.
- Pojić, M., Mišan, A., Sakač, M., Dapčević Hadnađev, T., Šarić, B., Milovanović, I., Hadnađev, M. (2014). Characterization of byproducts originating from hemp oil processing. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2014, 62 (51), 12436-12442.
- Pravilnik o kvalitetu hrane za životinje, (Službeni glasnik RS 4/2010, 113/2012, 27/2014, 25/2015, 39/2016 i 54/2017).
- Pravilnika o metodama uzimanja uzoraka i metodama fizičkih, hemijskih i mikrobioloških analiza stočne hrane, („Službeni list SFRJ" br.15/87).
- Ramachandran, S., Singh, S.K., Larroche, C., Soccol, CR., Pandey, A. (2007). Oil cakes and their biotechnological applications: a review. *Bioresource Technology*, 98, 2000-2009.
- Rebinder, P. A. (1947). Физико-химические исследования процессов деформации твердости, Юбилейный сборник АН СССР. (cit. prema Ястребов, П.П., 1973).
- Refstie, S., Glencross, B., Landsverk, T., Sørensen, M., Lilleeng, E., Hawkins, W., Krogdahl, Å. (2006). Digestive function and intestinal integrity in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed kernel meals and protein concentrates made from yellow or narrowleafed lupins. *Aquaculture*, 261, 1382-1395.
- Refstie, S., Baeverfjord, G., Seim, R. R., Elvebø, O. (2010). Effects of dietary yeast cell wall β -glucans and MOS on performance, gut health, and salmon lice resistance in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed sunflower and soybean meal. *Aquaculture*, 305, 109-116.

- Rezaei, M., Hafezian, H. (2007). Use of different levels of high fiber sunflower meal in commercial leghorn type layer diets. *International Journal of Poultry Science*, 6(6), 431-433.
- Riaz, M. N. (2000). Introduction to Extruders and Their Principles. In: *Extruders in Food Applications*. M. N. Riaz (Ed.), Taylor & Francis Group & CRC Press, Boca Raton, USA, 1-23.
- Riaz, M. N. (2007). Introduction to extrusion. in: *Extruders and expanders in pet food, aquatic and livestock feeds*. Riaz, M. N. (Ed.), Agrimedia GmbH, Clenze, Germany, 21-28.
- Robertson J. A., Russell R. B. (1972). Sunflower: America's neglected crop. *Journal of American Oil Chemists Society*, 49, 239-244.
- Rocha-Guzman, N., Gallegos-Infante, J., Gonzalez-Laredo, R., Bello-Perez, A., Delgado-Licon, E., Ochoa-Martinez, A., Prado-Ortiz, M. (2008). Physical properties of extruded products from three Mexican common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Plant Foods Human Nutrition*, 63, 99-104.
- Rokey, G., Huber, G. (1994) Extrusion processing of aquaculture feeds. In: McElhiney, R. R. (ed.), *Feed Manufacturing Technology IV*, AFIA, Inc., Arlington, VA, 509-515.
- Rokey, G. J. (2000). Single-Screw Extruders. In: *Extruders in Food Applications*. M. N. Riaz (Ed.), Taylor & Francis Group & CRC Press, Boca Raton, USA, 25-50.
- Rokey, G. J. (2007). Single screw extrusion. in: *Extruders and expanders in pet food, aquatic and livestock feeds*. Riaz, M. N. (Ed.), Agrimedia GmbH, Clenze, Germany, 191-226.
- Romarheim, O. H., Skrede, A., Gao, Y., Krogdahl, Å., Denstadli, V., Lilleeng, E., Storebakken, T. (2006). Comparison of white flakes and toasted soybean meal partly replacing fish meal as protein source in extruded feed for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 256, 354-364.
- Romarheim, O. H., Zhang, C., Penn, M., Liu, Y.-J., Tian, L.-X., Skrede, A., Krogdahl, Å., Storebakken, T. (2008). Growth and intestinal morphology in cobia (*Rachycentron canadum*) fed extruded diets with two types of soybean meal partly replacing fish meal. *Aquaculture Nutrition*, 14, 174-180.
- Rosenbrand, G. G. (1986). The separation performance and capacity of zigzag air classifier at high particle feed rates. *Doktorska disertacija*, Tehnički Univerzitet Ajndhoven, Holandija.
- Rosentrater, K. A., Muthukumarappan, K., Kannadhasan, S. (2009). Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*, 1, 22-38.

- Ruiz-Ruiz, J., Martínez-Ayala, A., Drago, S., González, R., Betancur-Ancona, D., Chel-Guerrero, L. (2008). Extrusion of a hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and quality protein maize (*Zea mays* L.) flour blend. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 1-9.
- Rumpf, H. (1956) Fortschritte und Probleme auf dem Gebiete der Windichtung, Staub, vol. 47.
- Rumpf, H. (1990). Particle Technology, Chapman and Hall, London.
- RZS – Republički zavod za statistiku (2017).
<http://www.stat.gov.rs/WebSite/Public/PageView.aspx?pKey=139>, pristupljeno poslednji put februara 2017.
- Sabir M. A., Sosulski F. W., Kernan J. A. (1974). Phenolic constituents in sunflower flour. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 22, 572-574.
- Safikhani, H., Akhavan-Behabadi, M. A., Shams, M., Rahimyan, M. H. (2010). Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators. *Advanced Powder Technology*, 21, 435-442.
- Sánchez-Lozano, N. B., Martínez-Llorens, S., Tomás-Vidal, A., Cerdá, M. J. (2009). Effect of high-level fish meal replacment by pea and rice concentrate protein on growth, nutrient utilization and fillet quality in gilthead seabream (*Sparus aurata*, L.). *Aquaculture*, 298(1-2), 83-89.
- Sanz, A., Morales, A. E., de la Higuera, M., Gardenete, G. (1994). Sunflower meal compared with soybean meals as partial substitutes for fish meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets: protein and energy utilization. *Aquaculture*, 128, 287-300.
- Schutyser, M. A. I., van der Goot, A. J. (2011). The potential of dry fractionation processes for sustainable plant protein production. *Trends in Food Science & Technology*, 22, 154-164.
- Senden, M. M G. (1979). Stochastic models for individual particle behaviour in straight and zig zag air classifiers, Doktorska disertacija, Tehnički Univerzitet Ajndhoven.
- Senkoylu, N., Dale, N. (1999). Sunflower meal in poultry diets: A review. *World Poultry Science Journal*, 56(6), 153-174.
- Shapiro, M. Galperin, V. (2005). Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 279-285.
- Shurson, G.C. (2002). The value and use of distiller's dried grains with solubles (DDGS) in swine diets. Carolina Nutrition Conference, Raleigh, NC.
- Simonović, D., Vuković, D., Cvijović, S., Končar-Đorđević, S. (1971). Tehnološke operacije I – Mehaničke operacije, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu.

- Sørensen, M., Ljøkjel, K., Storebakken, T., Shearer, K. D., Skrede, A. (2002). Apparent digestibility of protein, amino acids and energy in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a fish meal based diet extruded at different temperatures. *Aquaculture*, 211, 215-225.
- Sørensen M., Storebakken, T., Shearer, K. D. (2005). Digestibility, growth and nutrient retention in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets extruded at two different temperatures. *Aquaculture Nutrition*, 11, 251-256.
- Sørensen, M., Stjepanovic, N., Romarheim, O. H., Krekling, T., Storebakken, T. (2009). Soybean meal improves the physical quality of extruded fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 149, 149-161.
- Sørensen, M., Luyen, G. Q. N., Storebakken, T., Øverland, M. (2010). Starch source, screw configuration and injection of steam into the barrel affect physical quality of extruded fish feed. *Aquaculture Research*, 41, 419-432.
- Sørensen, M., Berge, G. M., Thomassen, M., Ruyter, B., Hatlen, B., Ytrestøyl, T., Aas, T. S., Åsgård, T. (2011a). Today's and tomorrow's feed ingredients in Norwegian aquaculture. Nofima, Tromsø, Norveška.
- Sørensen, M., Morken, T., Kosanovic, M., Øverland, M. (2011b). Pea and wheat starch possess different processing characteristics and affect physical quality and viscosity of extruded feed for Atlantic salmon. *Aquaculture Nutrition*, 17, 326-336.
- Sørensen, M. (2012). A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods. *Aquaculture Nutrition*, 18, 233-248.
- Sosulski, F., Youngs, C. G. (1979). Yield and functional properties of air-classified protein and starch fractions from eight legume flours. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 56, 292-295.
- Sredanović, S., Lević, J., Jovanović, R., Đuragić, O. (2012). The nutritive value of poultry diets containing sunflower meal supplemented by enzymes. *Acta Periodica Technologica*, 43, 79-91.
- Srinivisan, R., To, F., Columbus, E. (2009). Pilot scale fiber separation from distillers dried grains with solubles using sieving and air classification. *Bioresource Technology*, 100, 3548-3555.
- STATISTICA (Data Analysis Software System), v.10.0 (2010). Stat-Soft, Inc, USA (www.statsoft.com).
- Stebbis, A. H. (1930). Air classifier. US Patent 1 861 248.

- Stevenson, D. G., Eller, F. J., Jane, J. -L., Inglett, G. E. (2008). Structure and physicochemical properties of defatted and pin-milled oat bran concentrate fractions separated by air-classification, *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 995-1003.
- Strahm, B. S. (2000). Preconditioning. In: *Extruders in Food Applications*. M. N. Riaz (Ed.), Taylor & Francis Group & CRC Press, Boca Raton, USA, 115-126.
- Tacchi, L., Secombes, C. J., Bickerdike, R., Adler, M. A., Venegas, C., Takle, H., Martin, S. A M. (2012). Transcriptomic and physiological responses to fishmeal substitution with plant proteins in formulated feed in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *BMC Genomics*, 13, 363.
- Tacon, A. G. J. (1996). Nutritional studies in crustaceans and the problems of applying research to practical farming systems. *Aquaculture Nutrition*, 1, 165-174.
- Teleki, E., Delić, I. (1963). Poboljšanje kvaliteta suncokretove sačme smanjenjem sadržaja ljuske. *Stočarstvo*, 17 (5-6), 247-252.
- Tester, R. F., Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chemistry*, 67, 551-557.
- Thomas, M., van der Poel, A. F. B. (1996). Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science and Technology*, 61, 89-112.
- Thomas, M., Van Zuilichem, D. J., Van der Poel, A. F. B. (1997). Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of process and its conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 64, 173-192.
- Thomas, M., 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.
- Trevino, T., Rebole, A., Rodriguez, M L., Ortiz, L. T., Centeno, E., Alzueta, C. (1998). Nutritional effect of chlorogenic acid fed to growing chicks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 156-160.
- Tufarelli, V., Dario, M., Laudadio, V. (2009). Milk yield and composition of lactating Comisana ewes fed total mixed rations containing nitrogen sources with different ruminal degradability. *Livestock Science*, 122, 349-353.
- Tyapkova, O., Osen, R., Wagenstaller, M., Baier, B., Specht, F., Zacherl, C. (2016). Replacing fishmeal with oilseed cakes in fish feed – A study on the influence of processing parameters on the extrusion behaviour and quality properties of the feed pellets. *Journal of Food Engineering*, 191, 28-36.

- Tyler, R. T., Panchuk, B. D. (1982). Effect of seed moisture content on the air classification of field peas and Faba beans. *Cereal Chemistry*, 59(1), 31-33.
- Tyler, R. T. (1984). Impact milling quality of grain legumes. *Journal of Food Science*, 49(3), 925-930.
- Udén, P., Eriksson, T. (2012). Evaluation of some factors influencing the reliability of buffer soluble N recovery in feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 177, 218-224.
- Uhlemann, H., Herold, H., Boeck, R., Daun, H. (1990). Zigzag classifier. US Patent 4,931,174.
- Umar, S., Kamarudin, M. S., Ramezani-Fard, E. (2013). Physical properties of extruded aquafeed with a combination of sago and tapioca starches at different moisture contents. *Animal Feed Science and Technology*, 183, 51-55.
- Veerapen, J. P., Lowry, B. J., Couturier, M. F. (2005). Design methodology for the swirl separator. *Aquacultural Engineering*, 33, 21-45.
- Veslind, P. A., Henrikson, R. A. (1981). Effect of feed rate on air classifier performance, *Resources and Conservation*, 6, 211-221.
- Banjac, V., Čolović, R., Vukmirović, Đ., Čolović, D., Spasevski, N., Đuragić, O. (2016): Influence of screw configuration and screw speed on radial expansion and oil absorption capacity of extruded feed for Atlantic salmon. XVII International Symposium "FEED TECHNOLOGY", 25-27 October 2016, Novi Sad, Serbia, 1-6.
- Vose, J. R., Basterrechea, M. J., Gorin, P. A. J., Finlayson, A. J., Youngs, C. G. (1976). Air classification of field peas and horsebean flours: chemical studies of starch and protein fractions. *Cereal Chemistry*, 56(6), 928-936.
- 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 on Processing and Energy in Agriculture*, 2 (14), 106-108.
- Vukmirović, Đ. (2015). Uticaj parametara mlevenja i peletiranja na granulaciju i fizičke karakteristike peletirane hrane za životinje. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- Walter, U. (2004). Method and system for preparing extraction meal from sunflower seeds for animal feed. US Patent, US 2004/0146628 A1.
- Wang, B., Xu, D. L., Chu, K. W., Yu, A. B. (2006). Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modeling*, 30, 1326-1342.

- Wang, J. Zhao, J., de Wit, M., R.M. Boom, R. M., Schutyser, M. A. I. (2016). Lupine proteine concentrate enrichment by milling and electrostatic separation, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 33, 596-602.
- Wang, Q., Melaaen, M. C., De Silva, S. R. (2001). Investigation and simulation of a cross-flow air classifier. *Powder Technology*, 120, 273-280.
- Weiss, L. C., Thibodeaux, D. P. (1984). Separation of seed by-products by an AC electric field. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 61 (5), 886-890.
- Weisz, G. M., Kammerer, D. R., Carle, R. (2009). Identification and quantification of phenolic compounds from sunflower (*Helianthus annuus* L.) kernels and shells by HPLC-DAD/ESI-MS n. *Food Chemistry*, 115(2), 758-765.
- Wilson, R. P. (1994). Utilization of dietary carbohydrates by fish. *Aquaculture*, 124, 67-80.
- Winowski, T. S. (1995). Pellet quality in animal feeds, Technical Bulletin, American Soybean Association, FT21-1995, 1-5.
- Wolska, J., Holst, O., Adlercreutz, P., Jonkers, J. (2014). Standardized method for the Holmen pellet tester (NHP100) as a tool for evaluating the physical quality of fish feed. *Aquaculture Research*, 47(6), 1-7.
- Wood, J. F. (1980). The preparation of water stable fish feeds. Methodology of feed preparation – A brief resume, *Tropical Science* 22 (4), 351-355.
- Worrell, W. A., Veslind, P. A. (1979). Testing and evaluation of air classifier performance. *Resource Recovery and Conservation*, 4, 247-259.
- Wu, V., Abbott, T. (2003). Protein enrichment of defatted salicornia meal by air classification. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 80(2), 167-169.
- Wu, V., Nichols, N. (2005). Fine grinding and air classification of field pea, *Cereal Chemistry*, 82, 341-344.
- Yoshitomi, B. (2004). Effect of extrusion cooking temperature on the microstructure of extruded pellets. *Fisheries Science*, 70, 1157-1163.
- Ytrestøyl, T., Aas, T. S., Åsgard, T. (2015). Utilisation of feed resources in production of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Norway. *Aquaculture*, 448, 365-374.
- Zhang, Y., Øverland, M., Sørensen, M., Penn, M., Mydland, L. T., Shearer, K. D., Storebakken, T. (2012a). Optimal inclusion of lupin and pea proteine concentrates in extruded diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 344-349, 100-113.

- Zhang, Y., Øverland, M., Xie, S., Dong, Z., Lv, Z., Xu, J., Storebakken, T. (2012b). Mixtures of lupin and pea protein concentrates can efficiently replace high-quality fish meal in extruded diets for juvenile black sea bream (*Acanthopagrus schlegeli*). *Aquaculture*, 354-355, 68-74.
- Zhao, B., Su, Y., Zhang, J., 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design* 84, 1158-1165.
- Zimonja, O., Stevnebø, A., Svihus, B. (2007). Nutritional value of diets for broiler chickens as affected by fat source, amylose level and diet processing. *Canadian Journal of Animal Science*, 87, 553-562.