Primjena regresijskih i kemometrijskih metoda u modeliranju svojstava industrijski proizvedenih keksa

Šimošić, Ema

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:222568

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

REPOZITORIJ PTFOS PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK dabar

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Food Technology Osijek

zir.nsk.hr

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

Ema Šimošić

PRIMJENA REGRESIJSKIH I KEMOMETRIJSKIH METODA U MODELIRANJU SVOJSTAVA INDUSTRIJSKI PROIZVEDENIH KEKSA

Diplomski rad

Osijek, srpanj, 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek
Zavod za procesno inženjerstvo
Katedra za modeliranje, optimiranje i automatizaciju
Franje Kuhača 20, 31000 Osijek, Hrvatska

Diplomski sveučilišni studij Prehrambeno inženjerstvo

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija
Nastavni predmet: Modeliranje i upravljanje u prehrambeno-tehnološkim procesima
Tema rada je prihvaćena na IX. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek u akademskoj godini (npr. 2020./2021.) održanoj 24. lipnja 2021. godine.
Mentor: prof. dr. sc. *Damir Magdić, tr. zv.*
Pomoć pri izradi: -

Primjena regresijskih i kemometrijskih metoda u modeliranju svojstava industrijski proizvedenih keksa

Ema Šimošić, 0113143873

Sažetak:
U radu je primijenjena metoda polinomne regresije i kemometrijske metode analize podataka. Analizirane su ulazne veličine prihvatnoga koša i procesa pečenja kako bi se utvrdile zavisnosti mjerenih izlaznih veličina o ulaznim veličinama. Nakon prikupljenih podataka u industrijskim uvjetima provedena je metoda polinomne regresije te analiza glavnih komponenti. Primjenom polinomne regresije izrađen je matematički model ovisnosti mase oblikovanoga tijesta o brzini rotacije valjka ulagača koji je gotovo 100% točan. Obzirom da je u procesu pečenja prisutno mnogo ulaznih veličina, primijenjena je PCA metoda i obrada podataka u programu „Statistica“ te je smanjen broj varijabli, a one su potom grupirane u klastere. Utvrđeno je da svega par ulaznih veličina imaju značajan utjecaj na izlazne veličine i da bi se njihovim reguliranjem mogla kontrolirati proizvodnja keksa uz zadovoljavanje zahtjeva proizvođača. Izvedeni su zaključci o izrađenom modelu i utjecaju ulaznih veličina na varijabilnost gotovog proizvoda.

Ključne riječi: keks, industrijska proizvodnja, polinomni model, PCA

Rad sadrži: 37 stranica
9 slika
7 tablica
7 literaturnih referenci
Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada i diplomskog ispita:

1.	prof. dr. sc. *Sandra Budžaki*	predsjednik
2.	prof. dr. sc. *Damir Magdić*, tr. zv.	član-mentor
3.	prof. dr. sc. *Tihomir Moslavac*	član
4.	dr. sc. *Daniela Horvat, znan. savj*. tr. zv.	zamjena člana

Datum obrane: 15. srpnja 2021.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

University Josip Juraj Strossmayer in Osijek
Faculty of Food Technology Osijek
Department of Process Engineering
Sub department of Modelling, Optimization and Automation
Franje Kuhača 20, HR-31000 Osijek, Croatia

Graduate program Food Engineering

Scientific area: Biotechnical sciences
Scientific field: Food technology
Course title: Modelling and Management in Food Technology Processes
Thesis subject was approved by the Faculty of Food Technology Osijek Council at its session no. IX. held on June 24, 2021
Mentor: *Damir Magdić*, PhD, tenured prof.
Technical assistance: -

Application of Regression and Chemometric Methods in Modelling The Properties of Industrial Biscuits

Ema Šimošić, 0113143873

Summary:
The polynomial regression method and chemometrics data analysis methods were used in this thesis. The input values of the receiving basket and the baking process were analyzed in order to determine the dependences of the measured output values on the input values. After collecting the data in industrial conditions, the polynomial regression method and the analysis of the main components were applied. Using polynomial regression, a mathematical model of the dependence of the mass of the shaped dough on the rotation speed of the feeder roller was developed which is almost 100% accurate. Since many input values are present in the baking process, the PCA method and data processing in the program "Statistics" were applied and the number of variables was reduced and grouped into clusters. It was found that only a few input values have a significant impact on the output sizes and that their regulation could control the production of biscuits while meeting the requirements of the manufacturer. Conclusions were made about the developed model and the influence of input quantities on the variability of the finished product.

Key words: Biscuit, industrial production, polynomial model, PCA

Thesis contains: 39 pages
9 figures
7 tables
7 references
Original in: Croatian

Defense committee:

1. *Sandra Budžaki*, PhD, prof. — chair person
2. *Damir Magdić*, PhD, tenured prof. — supervisor
3. *Tihomir Moslavac*, PhD, prof. — member
4. *Daniela Horvat*, PhD, tenured sci. adv. — stand-in

Defense date: July 15, 2021

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

Veliko hvala mentoru prof. dr. sc. Damiru Magdiću na velikoj pomoći, razumijevanju i profesionalnosti prilikom izrade ovoga diplomskoga rada, na brojnim savjetima i prenesenom znanju te usmjeravanju ka inženjerskome načinu razmišljanja.

Zahvaljujem i tvornici Karolina d.o.o. na pruženoj prilici da izradim ovaj rad u industrijskim uvjetima te tehnologu Marku Tokiću na susretljivosti.

Posebno velika zahvala ide mojoj obitelji koja mi je u svakome trenutku tijekom studiranja bila podrška, oslonac i vjetar u leđa. Hvala im za svu pruženu ljubav, što su uvijek vjerovali u mene i što su me usmjerili na pravi put. Oni su zaslužni za sve što sam postigla.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. TEORIJSKI DIO 3

2.1. KEKS 4

2.1.1. Sirovine za proizvodnju keksa 4

2.1.2. Izgled i svojstva keksa 5

2.1.3. Ambalaža za pakiranje keksa 6

2.2. INDUSTRIJSKA PROIZVODNJA KEKSA 6

2.2.1. Zamjes tijesta 8

2.2.2. Formiranje tijesta 8

2.2.3. Tipke za podešavanje brzine, pritiska i položaja 9

2.2.4. Pečenje oblikovanog tijesta 10

2.3. POLINOMNA REGRESIJA 11

2.4. KEMOMETRIJSKE ANALIZE 13

2.4.1. Analiza glavnih komponenti 13

3. EKSPERIMENTALNI DIO 15

3.1. ZADATAK 15

3.2. MATERIJAL I METODE 15

3.2.1. Materijali 15

3.2.2. Metode 15

3.2.2.1. Mjerenje u pogonu 15

3.2.2.2. Zahtjevi proizvođača 16

3.2.2.3. Polinomna regresija 16

3.2.2.4. Analiza glavnih komponenti 16

4. REZULTATI I RASPRAVA 19

4.1. STATISTIČKA OBRADA PODATAKA 19

5. ZAKLJUČCI 31

6. LITERATURA 33

Popis oznaka, kratica i simbola

Oznaka varijable	Oznaka mjerne veličine	Značenje varijable i mjerne veličine	Mjerna jedinica
V_1	v_V	brzina rotacije valjka	m min^{-1}
V_2	l_V	položaj valjka	mm
V_3	l_N	položaj noža	mm
V_4	p_{GVD}	pritisak gumenog valjka - desno	bar
V_5	p_{GVL}	pritisak gumenog valjka - lijevo	bar
Y_1	m_T	masa tijesta nakon prihvatnog valjka	g
V_6	t_P	vrijeme pečenja	min
V_7	v_P	brzina trake u peći	m min^{-1}
V_8	T_{P1Z}	zadana temperatura pečenja - Zona 1	°C
V_9	T_{P2Z}	zadana temperatura pečenja - Zona 2	°C
V_{10}	T_{P3Z}	zadana temperatura pečenja - Zona 3	°C
V_{11}	T_{P1S}	stvarna temperatura pečenja - Zona 1	°C
V_{12}	T_{P2S}	stvarna temperatura pečenja - Zona 2	°C
V_{13}	T_{P3S}	stvarna temperatura pečenja - Zona 3	°C
V_{14}	l_{GTZ1}	položaj gornje toplinske zaklopke - Zona 1	%
V_{15}	l_{GTZ2}	položaj gornje toplinske zaklopke - Zona 2	%
V_{16}	l_{GTZ3}	položaj gornje toplinske zaklopke - Zona 3	%
V_{17}	l_{DPT1}	položaj donjeg prigušivača topline - Zona 1	%
V_{18}	l_{DPT2}	položaj donjeg prigušivača topline - Zona 2	%
V_{19}	l_{DPT3}	položaj donjeg prigušivača topline - Zona 3	%
V_{20}	Od_{GTZ1}	odnos gornje toplinske zaklopke - Zona 1	%
V_{21}	Od_{GTZ2}	odnos gornje toplinske zaklopke - Zona 2	%
V_{22}	Od_{GTZ3}	odnos gornje toplinske zaklopke - Zona 3	%
V_{23}	Om_{DTZ1}	omjer donje toplinske zaklopke - Zona 1	%
V_{24}	Om_{DTZ2}	omjer donje toplinske zaklopke - Zona 2	%
V_{25}	Om_{DTZ3}	omjer donje toplinske zaklopke - Zona 3	%
V_{26}	Ot_{ZZO1}	otvorenost zračne zaklopke odvođenja - Zona 1	%
V_{27}	Ot_{ZZO2}	otvorenost zračne zaklopke odvođenja - Zona 2	%
V_{28}	Ot_{ZZO3}	otvorenost zračne zaklopke odvođenja - Zona 3	%
V_{29}	P_1	plamenik - Zona 1	%
V_{30}	P_2	plamenik - Zona 2	%
V_{31}	P_3	plamenik - Zona 3	%
Y_2	R_P	promjer peciva nakon pečenja	mm
Y_3	d_P	debljina peciva nakon pečenja	mm
Y_4	m_P	masa peciva nakon pečenja	g

1. UVOD

Jedan od široke palete proizvoda konditorske industrije svakako je keks, vrlo rado konzumirana slastica među potrošačima raznih uzrasta u bilo koje doba dana. Danas je dostupan veliki broj različitih vrsta keksa, za svakoga po nešto. Svaki sastojak toga keksa na osobit način doprinosi njegovoj kvaliteti, teksturi i okusu u većoj ili manjoj mjeri.

Kako sve više raste svijest potrošača o onome što konzumiraju, sukladno tome industrije nastoje proizvesti proizvod koji će odgovoriti svim njihovim zahtjevima – krenuvši od receptura, preko poboljšanja vanjskog izgleda pa sve do novih tehnologija. Svaki proizvod ili proizvođač istoga ima određene zahtjeve koji su tu ili iz zakonodavnih razloga ili jednostavno iz politike industrije.

U okviru ovoga diplomskoga rada upravo se išlo na pokušaj uočavanja koje to veličine utječu na zahtjeve finalnoga proizvoda i kako se to može poboljšati. Promatrana je ovisnost svojstava gotovog proizvoda o procesnim veličinama u industrijskoj proizvodnji. Kako bi se brže i jednostavnije došlo do željenoga odgovora, provedena je matematička analiza i utvrđeni su modeli ovisnosti svojstava tijesta i keksa o procesnim uvjetima.

Kako bi se izabrala najprikladnija metoda za određivanje tražene ovisnosti, korištene su regresijske i kemometrijske metode. Obzirom da se u okviru ovog istraživanja radilo o velikim setovima podataka lakše tumačenje svega omogućila je kemometrija, odnosno statistika.

Cilj je ovoga rada razviti model koji će odgovoriti na postavljene zahtjeve proizvođača, objasniti utjecaj ulaznih procesnih veličina na svojstva tijesta za keks i gotovog pečenog keksa.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. KEKS

Prema Pravilniku o keksu i keksima srodnim proizvodima (NN RH 73/05, 69/08 i 141/13) keks je proizvod dobiven pečenjem oblikovanoga tvrdog tijesta, a sadrži najmanje 6 % masnoće, računato na ukupnu masu gotovog proizvoda, i sadrži najviše 5 % vode.

Prema udjelu masnoća, keks se može podijeliti u tri kvalitetne skupine:

1. keks ekstra kvalitete – sadrži najmanje 16 % masnoća, a 13,5 % treba biti najmanji udio mliječne masti

2. keks prve kvalitete – sadrži najmanje 10 % masnoće

3. keks druge kvalitete – sadrži najmanje 6 % masnoće (Ugarčić-Hardi, 1999).

2.1.1. Sirovine za proizvodnju keksa

Osnovni sastojci keksa su brašno, masnoća i šećer. Najčešće se koristi brašno meke pšenice gdje je udio proteina do 9 %. Ukoliko je prisutan veći udio proteina glutena to može negativno utjecati na teksturu keksa. Keksi, čiji je osnovni sastojak bijelo pšenično brašno, su bogati ugljikohidratima, masnoćama i šećerom, a siromašni su vlaknima, vitaminima i mineralima. U proizvodnji keksa često se koriste masnoće koje sadrže veći udio zasićenih masnih kiselina, a one se povezuju s povećanjem razine kolesterola te kardiovaskularnim bolestima (Boobier i sur., 2006).

Sastojci svijetloga keksa koji je korišten u svrhu izrade ovoga diplomskoga rada su sljedeći:

1. amonijev karbonat
2. aroma 1
3. aroma 2
4. brašno T550
5. brašno T850
6. biljna mast
7. enzim
8. mlijeko u prahu

9. natrijev hidrogenkarbonat
10. sol
11. šećerni sirup
12. mljeveni šećer
13. voda,

Sastojci tamnoga keksa su:

1. amonijev hidrogenkarbonat
2. aroma 1
3. aroma 2
4. brašno T550
5. brašno T850
6. biljna mast
7. enzim
8. sol
9. natrijev hidrogenkarbonat
10. kakao u prahu
11. šećerni sirup
12. mljeveni šećer
13. suhe mrvice keksa
14. voda.

2.1.2. Izgled i svojstva keksa

Gotovi proizvod, keks, određenog je geometrijskog oblika s glatkom i sjajnom gornjom površinom s gravurama i rupicama pravilnoga oblika. Donja je površina keksa bez sjaja s otiscima pletene čelične trake na kojoj se peče. Pri prijelomu vidljiva je slojevita struktura sa sitnim i ujednačenim šupljinama. Visina keksa kreće se od 5 do 7 mm. Krt je, čvrst i suh, a

tijekom žvakanja omekšava i razvija se puna aroma. Udio vlage u keksu može biti od 4 do 5 %, a pH od 7 do 7,2.

Keks na kojem su obavljana mjerenja za ovaj rad je okrugao prepoznatljive forme svojstvene toj industriji. Finalan proizvod je sendvič – keks čija je gornja strana svijetli keks, a donja strana je tamni keks s gravurama. Između njih nalazi se krema.

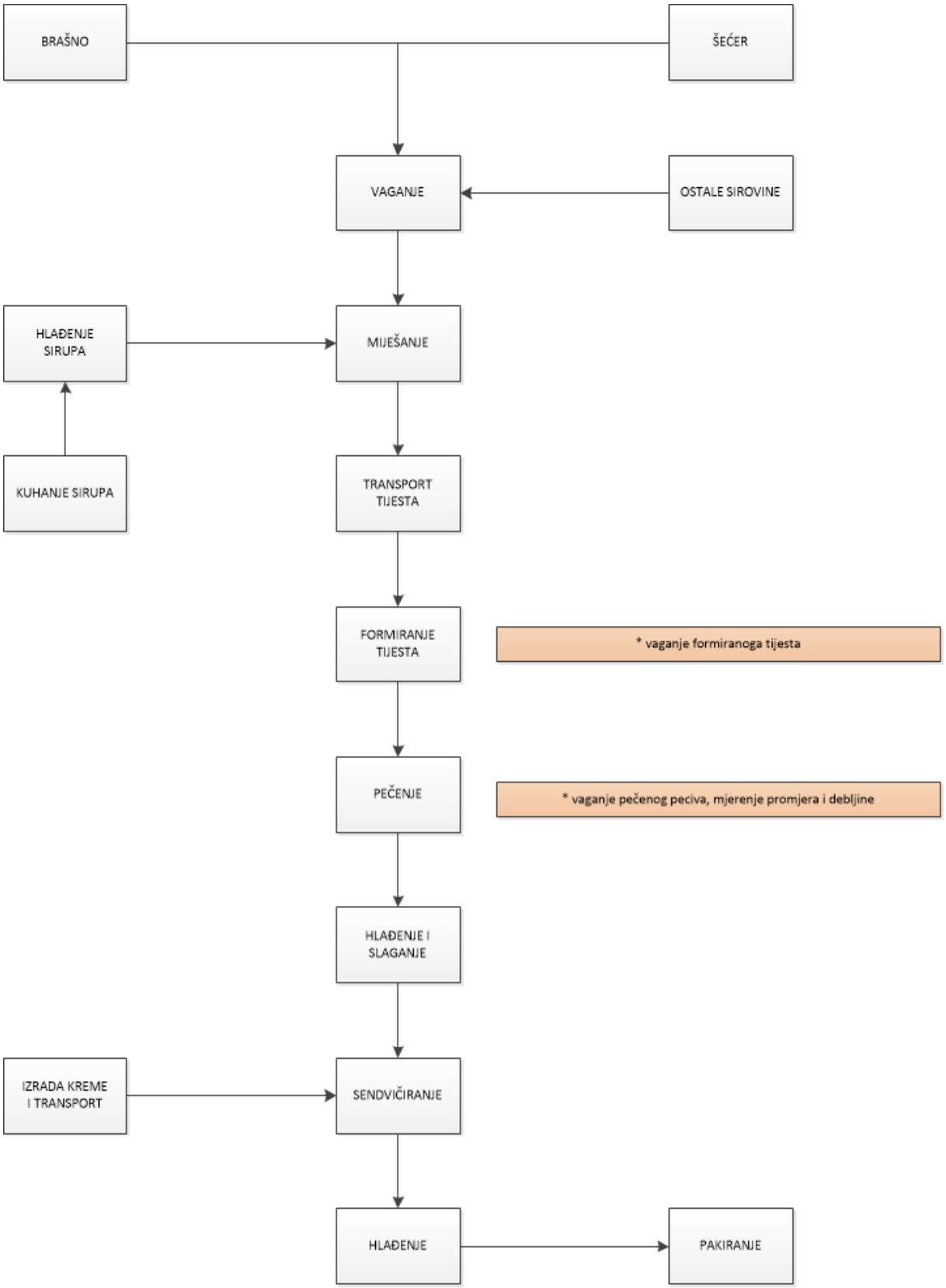
2.1.3. Ambalaža za pakiranje keksa

Ambalaža za pakiranje prehrambenih proizvoda ne smije dovesti u opasnost zdravlje potrošača jer ambalaža dolazi u izravan kontakt s hranom. Obzirom da je keks proizvod s niskim sadržajem relativne vlage, a visokim udjelom masti, potrebno ga je skladištiti u ambalažu koja sprječava apsorpciju vlage iz okoline kako bi se zadržala hrskavost. Također, ambalažni materijal treba biti postojan na masnoće i na utjecaj svjetla kako bi se spriječilo kvarenje, a neizostavan zahtjev za ambalažu je i mehanička zaštita s ciljem sprječavanja loma keksa (Jakobek-Barron, 2016).

Analizirani keks pakiran je u kartonsku kutiju obloženu s polimernom folijom. Na ambalaži su istaknute sve potrebne informacije o proizvodu, težini, proizvođaču, sastojcima te nutritivnoj vrijednosti.

2.2. INDUSTRIJSKA PROIZVODNJA KEKSA

Industrijska proizvodnja keksa složena je i zahtjevna zbog velikog broja varijabli u procesu proizvodnje. Brojne su interakcije između varijabli i veliki utjecaj na svojstva sirovine, poluproizvoda i gotovog proizvoda. Na **Slici 1** prikazana je shema proizvodnje keksa u industrijskim uvjetima. Mjerenja su obavljana u fazi formiranja i nakon faze pečenja. Proces zamjesa, formiranja i pečenja detaljnije je opisan u narednim poglavljima.



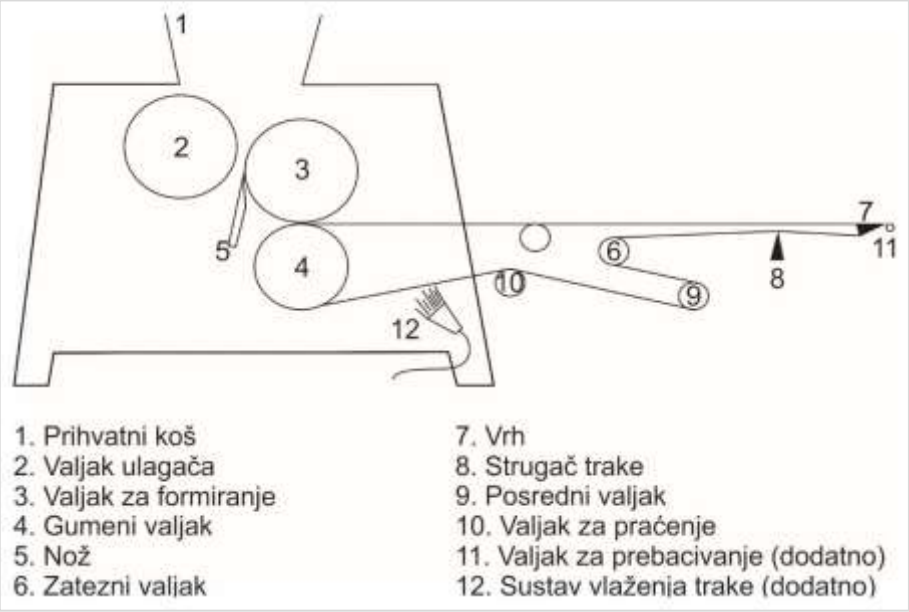
Slika 1 Shematski prikaz industrijske proizvodnje keksa

2.2.1. Zamjes tijesta

Sastojci prethodno navedeni za svijetli keks idu u fazu zamjesa gdje se najprije ubacuju sve sirovine osim brašna, kemikalija i vode. Nakon te faze slijedi doziranje kemikalija i vode. Prva i druga faza zamjesa se jednim imenom zovu "šlaganje". Slijedi treća faza gdje se samo brašno ubacuje i ona traje najduže. Zamjes za tamni keks sličan je ovome za svijetli – prva i treća faza su identične jedino je razlika u trajanju druge faze. Svi sastojci dodaju se ručno, a brašno i šećer automatskim doziranjem. Nakon što je završena faza zamjesa, tijesto odležava 10 minuta.

2.2.2. Formiranje tijesta

Nakon odležavanja, tijesto dolazi u fazu formiranja u stroju čija je shema prikazana na **Slici 2**.



Slika 2 Poprečni presjek stroja za formiranje tijesta

Zamiješeno tijesto pada u prihvatni koš odakle dolazi u razmak između valjka ulagača i valjka za formiranje. Senzor razine održava konstantnu, potrebnu, razinu tijesta kako bi se postigli optimalni uvjeti proizvodnje i maksimalna preciznost težine. Valjak se ulagača okreće prema valjku za formiranje potiskujući tijesto u razmak između valjaka čime se pritisak na tijesto povećava. Na taj način tijesto se utisne u šupljine valjka za formiranje i keksi dobiju svoj oblik. Nož koji se nalazi u razmaku između valjaka skida višak tijesta. Stražnja strana oštrice

noža osigurava vraćanje viška tijesta u valjak ulagača. Gumeni valjak stvara pritisak trake na valjak za formiranje kako bi se formirano tijesto ekstrahiralo iz valjka za formiranje. Brzine svih valjaka u stroju mogu se neovisno kontrolirati.

Uređaj za vlaženje trake sastoji se od niza mlaznica postavljenih na cijev. Regulator zraka i ventil za uključivanje/isključivanje stvaraju vakuum u mlaznicama pri čemu se usisava voda iz priključka za vodu u mlaznice. One raspršuju vodu i distribuiraju je na traku. Povećanjem tlaka zraka povećava se količina vode, a vodena maglica postaje finija.

2.2.3. Tipke za podešavanje brzine, pritiska i položaja

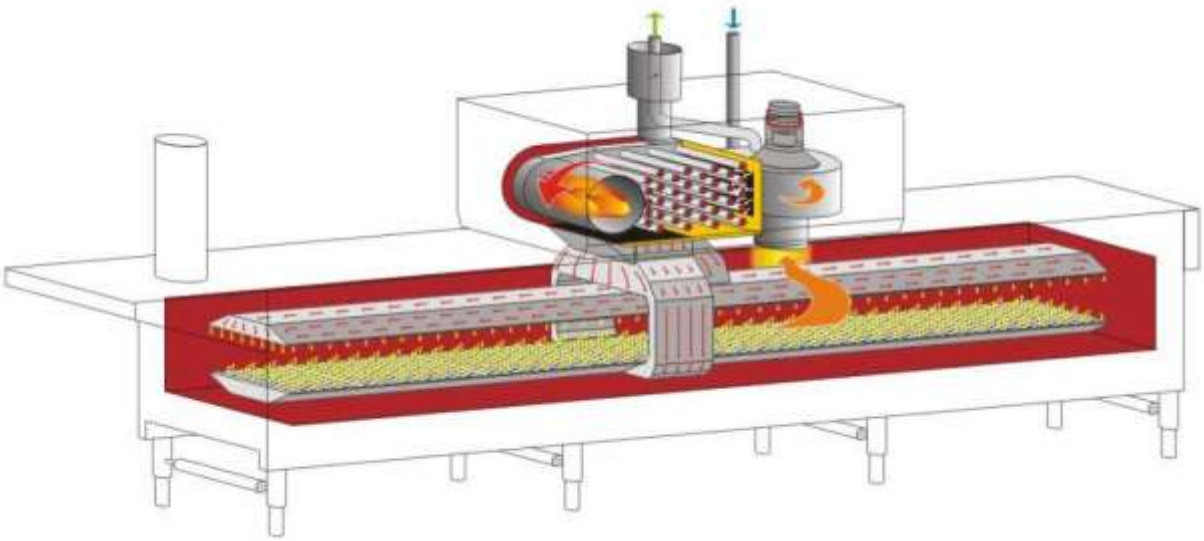
Na početku linije za formiranje, u sklopu, stroja nalazi se monitor pomoću kojega se regulira proizvodnja. Tipke koje se na njemu nalaze su sljedeće:

- rotacija valjka za formiranje – izražena je u m min^{-1} i glavna je za cijeli stroj. Ako se promijeni brzina valjka za formiranje, sukladno tome mijenja se i brzina valjka ulagača i gumenoga valjka. Minimalna vrijednost je 3 m min^{-1}, a maksimalna 9 m min^{-1}. Brzina se podešava prema brzini peći i trebala bi biti ista ili približna toj brzini;
- valjak ulagača (+/-) – osnovna brzina valjka ulagača regulira se brzinom valjka za formiranje. Ukoliko je vrijednost brzine valjka ulagača s predznakom „+“ to znači da se valjak ulagača za određeni postotak brže okreće u odnosu na valjak za formiranje, a ako je predznak „-„ to znači da se valjak ulagača za određeni postotak sporije okreće u odnosu na valjak za formiranje. Ukoliko se poveća brzina valjka ulagača, to ubrzanje utječe na pritisak tijesta, a sukladno tome i na težinu pojedinoga oblikovanog komada tijesta (smanjuje se opterećenje na motoru valjka za formiranje i obrnuto). Moguće je mijenjati brzinu od – 20 % do + 20 %;
- brzina transportne trake (+/-) – jednaka je brzini gumenoga valjka jer se ona upravo pogoni preko gumenoga valjka. Osnovna se brzina ove trake regulira brzinom valjka za formiranje. Brzina može varirati od – 5 % do + 5 % u odnosu na brzinu valjka za formiranje;
- položaj valjka ulagača – odnosi se na udaljenost između valjka ulagača i valjka za formiranje. Udaljenost može varirati od 5 mm pa do 25 mm;

- položaj noža – može varirati od –37 mm do 0 mm. Ukoliko je nož podignut, smanjit će se prostor između valjka ulagača i valjka za formiranje što će rezultirati povećanjem pritiska u području gdje se tijesto pritišće na valjak ulagača. Povećani pritisak dat će kompaktniji komad tijesta, a samim time i teži;
- napetost transportne trake – varira od 0 bar do maksimalnih 6 bar;
- pritisak gumeni valjak lijevo - utječe na pritisak transportne trake na valjak za formiranje i lakšu ekstrakciju komada tijesta, a samim time i na smanjenje nastajanja „polovica“ komada tijesta;
- pritisak gumeni valjak desno - utječe na pritisak transportne trake na valjak za formiranje i lakšu ekstrakciju komada tijesta, a samim time i na smanjenje nastajanja „polovica“.

2.2.4. Pečenje oblikovanog tijesta

Nakon oblikovanja, tijesto transportnom trakom putuje u peć na pečenje. U peći se nalazi plamenik u čijim cijevima struji zrak koji se zagrijava plamenikom. Zagrijani zrak cirkulira u peći i služi za pečenje keksa. Zadržava se u sustavu osim onoga dijela zraka koji se odvodi van. Primjer indirektnog konvekcijskog zagrijavanja zraka kojim se provodi pečenje keksa prikazano je na **Slici 3**.



Slika 3 Shematski prikaz indirektnog konvekcijskog zagrijavanja [WEB 2]

Peć se sastoji od tri zone, a u svakoj zoni je drugačija temperatura pečenja. U prvoj zoni ima najviše vlage stoga je temperatura ovdje najviša kako bi se otpario višak vode i u ovoj zoni odvođenje zraka je slabije. U drugoj je zoni vlage manje jer ovdje počinje pečenje i odvodi se više zraka, a temperatura je nešto niža. U trećoj i posljednjoj zoni odvodi se najviše zraka, a temperatura je nešto viša jer započinju Maillardove reakcije kako bi keks postigao željenu boju i aromu.

Na peći se također nalazi monitor za regulaciju ulaznih veličina, a te veličine jesu:

- vrijeme pečenja – 5,2 min, ono ujedno određuje i brzinu pečenja;
- brzina pečenja – 5,77 m min^{-1}
- temperatura pečenja – prikazana je zadana temperatura i stvarna, postignuta temperatura u peći;
- položaj gornje/donje toplinske zaklopke – govori koliko zraka dolazi s gornje i donje strane prema keksima. Nema mjerne jedinice već je vrijednost izražena u % i govori koliko su zaklopke za zrak otvorene. 100 % bi bilo ekvivalentno otvoru pod 90 °;
- odnos gornje toplinske zaklopke – omjer je koji govori koliko topline, odnosno koliki postotak zraka dolazi od gornje strane;
- omjer donje toplinske zaklopke – omjer je koji govori koliko topline, odnosno koliki postotak zraka dolazi s donje strane;
- zračna zaklopka odvođenje – veličina je koja govori koliko se zraka odvodi izvan zona pečenja;
- plamenik – govori kolikom snagom plamenik radi od 0 do 100 %.

Završetkom pečenja, keksi izlaze iz peći i transportnom trakom odlaze u druge faze proizvodnje, a pri tome prolaze između sustava za hlađenje koji upuhuju rashladni zrak od dolje i gore.

2.3. POLINOMNA REGRESIJA

Neka su dvije ili više varijabli povezane i neka među njima postoji zavisnost, odnosno korelacija. Upravo je ta korelacija predmet istraživanja. Kako bi se izrazila korelacija između niza slučajnih varijabli y(n) koje ovise o nezavisnoj varijabli x(n), koriste se metode regresije. Pomoću njih dobije se model koji se zatim koristi ili za predviđanje podataka za koje ne

postoje mjerenja ili za utvrđivanje nekih od konstanti koje opisuju promatranu zavisnost. Primjenom metode, sparuju se odgovarajuće slučajne, zavisne varijable y(n) i nezavisne varijable x(n).

Cilj je na temelju sparenih mjerenja (x1, y1), . . . ,(xn, yn) utvrditi zavisnost slučajnih varijabli, y, o nezavisnoj varijabli, x. Odnos ovih dviju varijabli može se prikazati modelom:

y_i=f(x_i) + e_i, i=1, ... , n) [1]

gdje je f(x) regresijska funkcija, a e_i nezavisna, slučajna varijabla. Ukoliko je u modelu prisutna jedna nezavisna varijabla, radi se o jednostavnom regresijskom modelu, a ukoliko je u modelu prisutno više nezavisnih varijabli, u pitanju je višestruki regresijski model (Šuvak N., Benšić M., 2013.).

Polinomna regresija promjenu zavisne varijable opisuje polinomom, što je slučaj u ovome diplomskome radu gdje je korišten polinom 4. stupnja u svrhu predikcije promjene zavisne varijable u vidu reakcije na promjene nekih od nezavisnih varijabli. Takav polinom može se prikazati na sljedeći način:

y = a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x^1 + b [2]

gdje je y zavisna varijabla, x nezavisna varijabla, a koeficijent nezavisne varijable, a b slobodni član. Svaka regresijska jednadžba ima i koeficijent determinacije, R^2. Upravo je taj koeficijent pokazatelj točnosti modela. Njegova vrijednost iznosi $0 \leq R^2 \leq 1$, što znači da je točnost modela veća što je vrijednost koeficijenta determinacije bliža vrijednosti 1. Veza vrijednosti koeficijenta determinacije i točnosti modela opisana je Chadockovom tablicom (Hinkle i Wiersma, 2003):

Tabela 1 Chadockova tablica

R^2	Tumačenje veze
0	odsutnost veze
0.00 – 0.25	slaba veza
0.25 – 0.64	veza srednje jakosti
0.64 – 1	čvrsta veza
1	potpuna veza

Regresijski pravac i polinom koji opisuje zavisnu varijablu dobiveni su u MS Excel-u.

2.4. KEMOMETRIJSKE ANALIZE

Kemometrija je znanstvena disciplina koja povezuje računalnu tehnologiju s analitičkom kemijom i razvija se iz dana u dan. Drugim riječima je to primjena statistike u analizi kemijskih podataka. Naziv datira iz 1970-ih, a u svojim se početcima uglavnom bavila obradom podataka dobivenih instrumentalnim analitičkim tehnikama koje su uključivale jednostavne izračune poput dekonvolucije kromatografskih ili spektrofotometrijskih pikova (Brereton, 2007).

Konvolucija predstavlja količunu preklapanja dvije funkcije od kojih je jedna prethodno zrcaljena. Suprotnost tome je dekonvolucija koja je matematički postupak izdvajanja jednog analita iz preklopljenih odziva. Jedan od glavnih ciljeva ovakvog pristupanja podatcima, odnosno skupu podataka, je izvlačenje relevantnih podataka iz cijelog skupa.

Pri izradi ovog diplomskoga rada korištena je kemometrijska metoda analiza glavnih komponenti s ciljem objašnjenja utjecaja varijabilnosti ulaznih procesnih veličina na tijesto i gotov proizvod.

2.4.1. Analiza glavnih komponenti

Analiza glavnih komponenti ili PCA (eng. *Principal Component Analysis*) metoda je čija je svrha svođenje velikog broja varijabli na manji broj faktora. Ovom metodom formiraju se nove varijable koje su linearne kombinacije početnih varijabli. Glavni je cilj analize glavnih komponenti sažeti i analizirati linearnu povezanost velikog broja različitih, koreliranih varijabli u smislu formiranja manjeg broja faktora te novih varijabli koje međusobno ne koreliraju, ali s minimalnim gubitkom informacija (Pecina, M., 2006).

Neke varijable mogu se grupirati u klastere (grupe podataka) jer međusobno imaju visoku korelaciju. Klasteri koji su blizu apscisne osi (*Factor 1*), a međusobno su udaljeni, značajno se međusobno razlikuju. Jednaka udaljenost dva klastera po ordinatnoj osi uglavnom znači manju razliku između ta dva klastera. Gotovo sva varijabilnosti je sadržana u odnosima koje prikazuje prvi faktor pa razlike po drugom faktoru imaju manji utjecaj na varijabilnost sustava.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

Zadatak je ovoga diplomskog rada izraditi matematički model zavisnosti svojstava gotovoga proizvoda o procesnim veličinama u uvjetima industrijske proizvodnje keksa. Na mjerenim svojstvima keksa i procesnim veličinama treba provesti matematičku i statističku analizu i potom utvrditi modele koji će opisati zavisnost tijesta i pečenoga keksa o procesnim uvjetima. Izmjereni podaci analizirat će se regresijskim i kemometrijskim metodama analize kako bi se utvrdila najprikladnija metoda za određivanje traženih zavisnosti.

3.2. MATERIJAL I METODE

3.2.1. Materijali

Za prikupljanje podataka analizirano je formirano svijetlo i tamno tijesto i pečeno pecivo.

Nakon formiranja zamjesa tijesta, određuje se masa oblikovanoga tijesta, a nakon pečenja tijesta, određuje se masa pečenoga keksa, njegov promjer i debljina. Postupak određivanja ovih svojstava isti je za obje vrste keksa (svijetli i tamni).

3.2.2. Metode

Metoda korištena u svrhu prikupljanja podataka jest mjerenje u pogonu, a za obradu tih podataka korištena je metoda polinomne regresije (MS Excel) i analiza glavnih komponenti – PCA (pomoću računalnoga programa Statistica ver. 13).

3.2.2.1. Mjerenje u pogonu

Navedena svojstva (masa oblikovanoga tijesta, masa pečenoga keksa, promjer i debljina) mjerena su u pogonu na liniji za formiranje i pečenje. Masa oblikovanoga tijesta određuje se vaganjem 10 komada oblikovanoga tijesta iz svakoga od 8 redova s transportne trake. Na isti način određuje se i masa pečenoga keksa. Promjer pečenoga keksa i njegova debljina određuju se pomoću pomičnog mjerila uz naglasak da se promjer određuje s dvije nasuprotne strane kako bi se utvrdilo je li keks „jajastog“ oblika. Te dvije vrijednosti ne određuju se za svaki keks posebno već za jedan keks iz svakoga od 8 redova.

3.2.2.2. Zahtjevi proizvođača

Minimalne, optimalne i maksimalne vrijednosti svojstava tijesta i keksa koje je proizvođač zadao dane su u **Tablici 2** i **3**.

Tablica 2 Zahtjevi proizvođača za masu oblikovanoga tijesta i masu pečenoga keksa

SVOJSTVO	Minimalno (g/10 kom)	Optimalno (g/10 kom)	Maksimalno (g/10 kom)
masa oblikovanog tijesta	48	50	52
masa pečenog keksa	41	43,2	44

Tablica 3 Zahtjevi proizvođača za promjer i debljinu pečenoga keksa

SVOJSTVO	MINIMALNO (mm)	OPTIMALNO (mm)	MAKSIMALNO (mm)
promjer pečenog keksa	44	45	46
debljina pečenog keksa	4,8	5	5,2

3.2.2.3. Polinomna regresija

Polinomna regresija promjenu zavisne varijable opisuje polinomom, što je slučaj u ovom radu. Korišten je polinom 4. stupnja u svrhu predikcije promjene zavisne varijable u vidu reakcije na promjene nekih od nezavisnih varijabli.

Dobiveni polinom primjenjiv je samo za jednu nezavisnu varijablu, za svaku ostalu se mora izraditi novi model jer promjenom jedne nezavisne varijable, u ovome slučaju, ostale ne mogu ostati konstantne.

3.2.2.4. Analiza glavnih komponenti

Na prikupljene podatke o oblikovanom tijestu i pečenom pecivu u pogonu primijenjena je kemometrijska metoda analiza glavnih komponenti (PCA). Statistička obrada podataka provedena je programskim paketom Statistica ver. 13.

Analizirane su ulazne i izlazne veličine u prihvatnome košu te tijekom procesa pečenja. Svaka veličina ima svoj udio u ukupnoj varijanci podataka koji nam govori koliko određena veličina utječe na cjelokupni promatrani set podataka. Što je njen položaj u koordinatnom sustavu faktorskog prikaza udaljeniji od ishodišta, utjecaj na ukupnu varijabilnost, a samim time i na svojstva oblikovanoga tijesta i pečenoga peciva je veći. Veličine koje imaju najviše udjela u varijanci postat će prva glavna komponenta. Primjenom takvog postupka omogućeno smanjenje broja promatranih varijabli uz zaključivanje s velikom preciznošću unatoč zanemarivanja nekih od varijabli.

Ova je metoda korištena u svrhu izrade diplomskoga rada kako bi se analizirao utjecaj velikoga broja nezavisnih varijabli na one izlazne, zavisne varijable, odnosno masu formiranoga tijesta, masu pečenoga peciva te promjer i debljinu pečenoga peciva.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. STATISTIČKA OBRADA PODATAKA

Izmjerene vrijednosti svojstava oblikovanoga tijesta i pečenoga peciva prikupljene su u travnju i svibnju 2021. godine u industrijskim uvjetima. Prilikom izrade ovoga rada provedena je metoda polinomne regresije te analiza glavnih komponenti – PCA metoda, a rezultati su prikazani grafikonima i u tablicama. Za mjerena svojstva zadani su zahtjevi proizvođača koje je cilj ispuniti, a navedeni su u **Tablici 2** i **3**. Obzirom na zahtjev proizvođača prema masi oblikovanog tijesta izrađen je model po kojemu bi taj zahtjev bio ispunjen. Model je dobiven izračunavanjem regresijske (aproksimacijske) jednadžbe izradom grafičkoga prikaza svih mjerenja u MS Excelu. Ostali rezultati mjerenja parametara prihvatnoga koša i procesa pečenja, odnosno nezavisnih varijabli, obrađeni su kemometrijskom analizom u programu „Statistica“.

Tablica 4 Ulazne vrijednosti za prihvatni koš u redovitoj proizvodnji

	Oznaka u modelu	Oznaka	Serija 1	Serija 2	Serija 3	Serija 4	Serija 5
ulazne veličine	$\vec{X}_{1\text{-}5}$	v_V	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2
		l_V	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6
		l_N	-12,1	-12,2	-12,3	-12,4	-12,5
		p_{GVD}	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		p_{GVL}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
izlazna veličina	Y_1	m_T	50,33	50,39	49,82	50,70	50,82

U **Tablici 4** prikazane su vrijednosti ulaznih veličina za prihvatni koš. Pri ovome mjerenju mijenjane su vrijednosti brzine rotacije valjka, međutim tom promjenom rezultirala je i promjena ostalih parametara kako je vidljivo u tablici.

Broj ponavljanja mjerenja mase tijesta, m_T, je N=16 za svaku seriju, odnosno promjenu brzine rotacije valjka ulagača, a vrijednosti u tablici izražene su kao srednja vrijednost.

Kada bi sve vrijednosti prihvatnoga koša bile promjenjive, izraz za izračun mase tijesta bio bi predstavljen višestrukom polinomnom jednadžbom, a varijable bi tada bile v_V, l_V, l_N, p_{GVD} i p_{GVL}.

Višestruka polinomna jednadžba u tome slučaju oblika je:

$$Y_1 = m_T = a_1 \cdot v_V + a_2 \cdot l_V + a_3 \cdot l_N + a_4 \cdot p_{VGVD} + a_5 \cdot p_{VGVL} + b, \quad [4]$$

gdje je b slobodni član.

Prilagođavajući opći oblik polinomne jednadžbe, izraz za računanje mase kada je mijenjana samo brzina rotacije valjka ulagača v_v je obična polinomna jednadžbu n-tog stupnja:

$$Y_1 = m_T = a_1 \cdot v_V^n + a_2 \cdot v_V^{n-1} + a_3 \cdot v_V^{n-2} + a_4 \cdot v_V^{n-3} + \cdots + b. \quad [5]$$

Tablica 5 Ulazne vrijednosti za proces pečenja u redovitoj proizvodnji

		Oznaka	Serija 1	Serija 2	Serija 3	Serija 4	Serija 5
ulazne veličine	Y_1	m_T	50,33	50,39	49,82	50,70	50,82
	$\vec{X}_{6\text{-}31}$	t_P	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
		v_P	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77
		T_{P1Z}	182	182	182	182	182
		T_{P2Z}	174	174	174	174	174
		T_{P3Z}	181	181	181	181	181
		T_{P1S}	182	182	182	182	182
		T_{P2S}	174	174	174	174	174
		T_{P3S}	181	181	181	181	181
		l_{GTZ1}	100	100	100	100	100
		l_{GTZ2}	100	100	100	100	100
		l_{GTZ3}	100	100	100	100	100
		l_{DPT1}	8	8	8	8	8
		l_{DPT2}	3	3	3	3	3
		l_{DPT3}	5	5	5	5	5
		Od_{GTZ1}	93	93	93	93	93
		Od_{GTZ2}	97	97	97	97	97
		Od_{GTZ3}	95	95	95	95	95
		Om_{DTZ1}	7	7	7	7	7
		Om_{DTZ2}	3	3	3	3	3
		Om_{DTZ3}	5	5	5	5	5
		Ot_{ZZO1}	20	20	20	20	20
		Ot_{ZZO2}	30	30	30	30	30
		Ot_{ZZO3}	50	50	50	50	50
		P_1	43	43	45	45	45
		P_2	20	19	19	19	20
		P_3	47	48	47	47	48
izlazne veličine	$\vec{Y}_{2\text{-}4}$	R_P	44,43	44,28	44,50	44,42	44,44
		d_P	4,98	5,00	4,96	4,97	5,13
		m_P	43,19	43,32	42,74	43,56	43,59

U **Tablici 5** prikazane su vrijednosti ulaznih veličina pri procesu pečenja oblikovanoga tijesta koje je dobiveno pod uvjetima prikazanima u Tablici 1. U ovoj fazi mjerenja nije promijenjena vrijednost niti jedne veličine već su izmjerene izlazne veličine: promjer pečenog peciva, debljina peciva te masa pečenoga peciva.

Za svaku seriju provedeno je 16 mjerenja, osim kod promjera gdje je broj mjerenja N=32, obzirom da se promjer mjerio na dvije međusobno okomite pozicije. Rezultati ovih izlaznih veličina izraženi su kao srednja vrijednost.

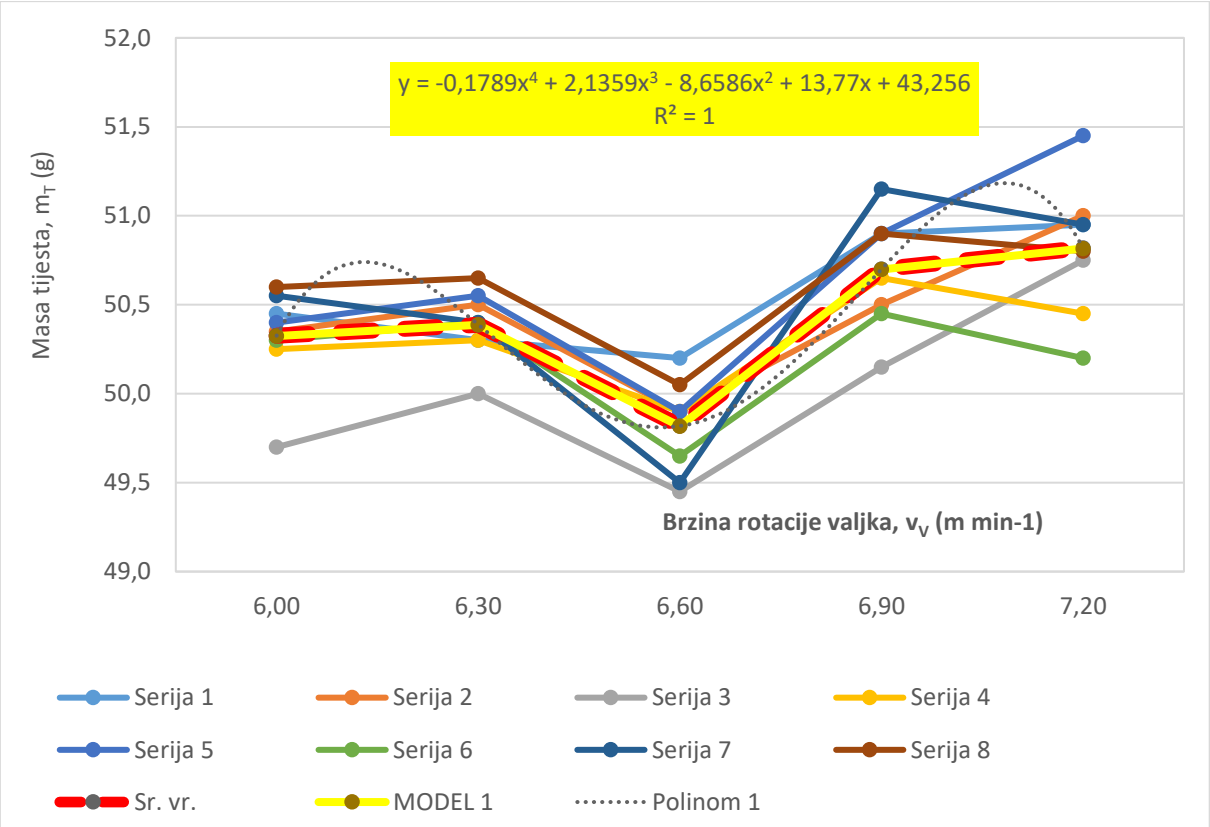
Za drugi dio procesa proizvodnje keksa (pečenje), višestruki polinomni model mogao bi imati jedan od sljedećih općih oblika:

$$\vec{Y}_{2-4} = \begin{Bmatrix} R_P \\ d_P \\ m_P \end{Bmatrix} = a_1 \cdot Y_1 + \left\{\vec{a} \cdot \vec{Y}\right\}_{6-31} + b \qquad [6]$$

ili

$$\vec{Y}_{2-4} = \begin{Bmatrix} R_P \\ d_P \\ m_P \end{Bmatrix} = \left\{\vec{a} \cdot \vec{Y}\right\}_{5-31} + b \qquad [7]$$

U MS Excelu je izračunavanjem polinomne regresijske jednadžbe za brzine rotacije valjka od 6 do 7,2 m min^{-1} dobiveno sljedeće:



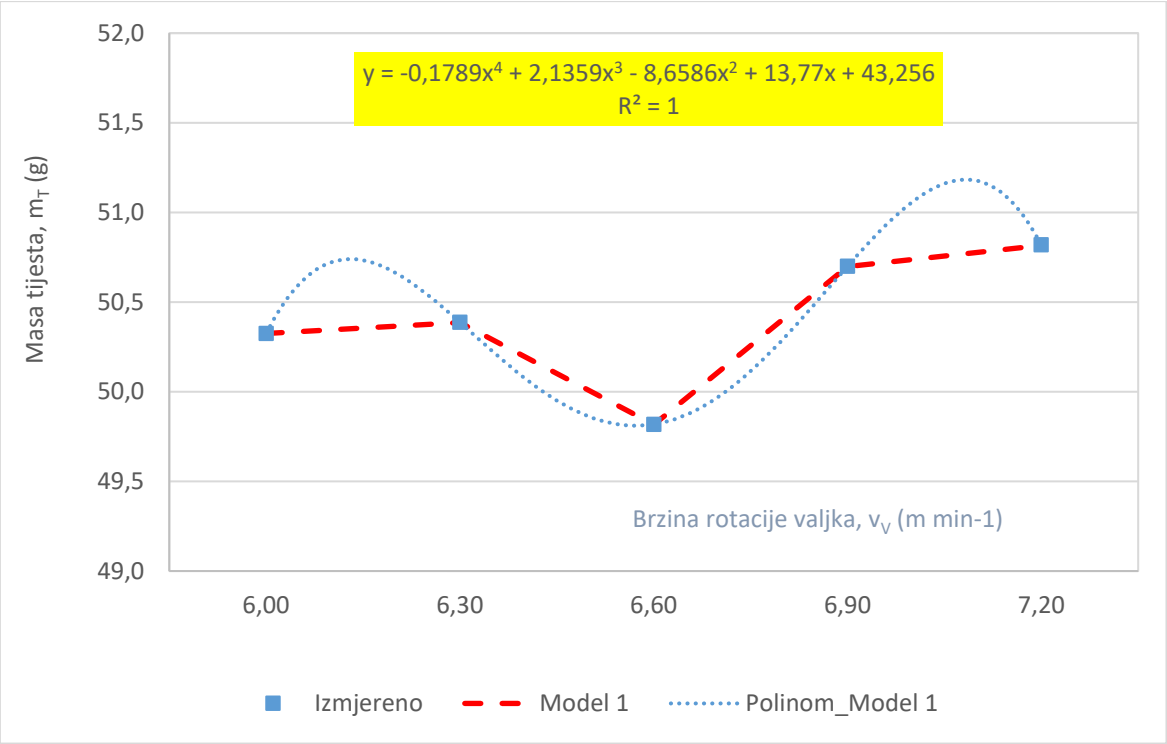
Slika 4 Polinomni model za izračunavanje mase tijesta

Na **Slici 4** prikazan je grafički prikaz svih mjerenja mase oblikovanoga tijesta, poklapanje sa srednjom vrijednošću te polinom koji opisuje model koji se najbolje poklapa sa srednjom vrijednošću.

Model koji predstavlja najbolje rješenje za dobivanje 50 g oblikovanoga tijesta nakon izlaska iz prihvatnoga koša jest polinom 4. stupnja, a on je dan izrazom:

$$y = -0{,}1789 \cdot x^4 + 2{,}13593 \cdot x^3 - 8{,}65862 \cdot x^2 + 13{,}77 \cdot x^1 + 43{,}256 \qquad [8]$$

gdje y predstavlja masu tijesta, odnosno zavisnu varijablu, a x predstavlja brzinu rotacije valjka ulagača.



Slika 5 Grafički prikaz modela i polinoma 4. stupnja

Na **Slici 5** izdvojena je sa **Slike 4** krivulja modela i polinoma 4. stupnja koji ga opisuje.

Iz Modela izveden je izraz za izračun brzine rotacije valjka ulagača kako bi se zadovoljio zahtjev proizvođača za masom 10 komada oblikovanoga tijesta od 50 g, a dan je izrazom:

$$y = -0{,}1789 \cdot x^4 + 2{,}13593 \cdot x^3 - 8{,}65862 \cdot x^2 + 13{,}77 \cdot x^1 + 43{,}256 \quad [9]$$

$$-13{,}77 \cdot x^1 = -0{,}1789 \cdot x^4 + 2{,}13593 \cdot x^3 - 8{,}65862 \cdot x^2 + 43{,}256 - y \quad [10]$$

$$x = -\frac{\left(-0{,}1789 \cdot x^4 + 2{,}13593 \cdot x^3 - 8{,}65862 \cdot x^2 + 43{,}256 - y\right)}{13{,}77} \quad [11]$$

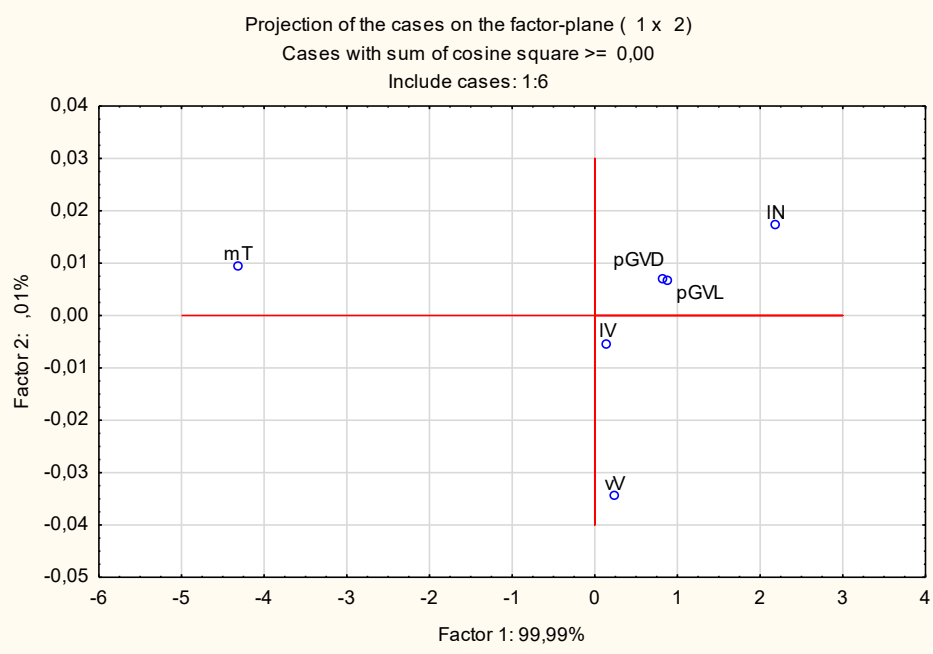
Matematičkim postupkom linearne Jacobi-eve iteracije nakon 34 iteracije za početnu vrijednost brzine rotacije (x_0=1, ova vrijednost odgovara prvoj brzini rotacije valjka v_V=6 m min^{-1}) izračunata je vrijednost x=v_v=0,82377 m min^{-1}.

Izračunata, potrebna brzina valjka za postizanje zadane mase tijesta od 50 g je x=v_v=4,942652 m min^{-1}. Ostale vrijednosti koje su potrebne za postizanje 50 g oblikovanog tijesta dane su u **Tablici 6**.

Tablica 6 Vrijednosti ulaznih veličina u prihvatnome košu za puni opseg proizvodnje

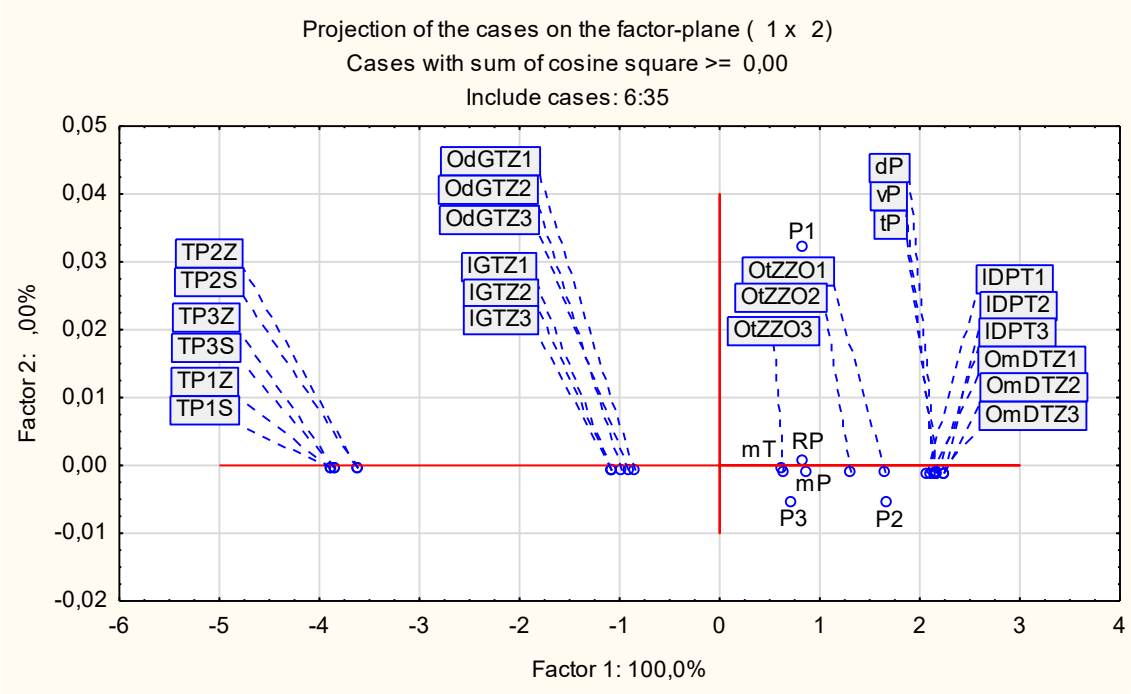
	Oznaka	Izračunate vrijednosti
ulazne veličine	v_V	4,942652
	l_V	7,2
	l_N	-12,1
	p_{GVD}	0,9
	p_{GVL}	0,3
izlazna veličina	m_T	50,00

Ulazne i izlazne veličine prihvatnog koša podvrgnute su kemometrijskoj analizi.



Slika 6 Grafički prikaz rezultata analize glavnih komponenata za varijable i izlaznu veličinu u prihvatnom košu

Na **Slici 6** grafički je prikazan rezultat analize glavnih komponenti za ulazne, nezavisne varijable i izlaznu, zavisnu varijablu prihvatnoga koša iz kojega se može vidjeti utjecaj i doprinos pojedine varijable ukupnoj varijabilnosti.



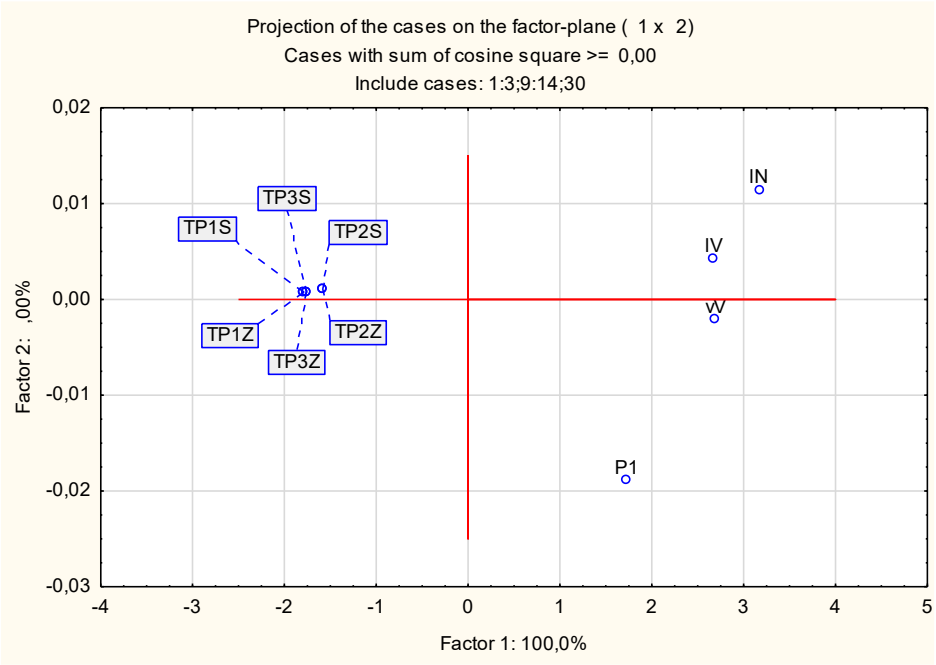
Slika 7 Grafički prikaz rezultata analize glavnih komponenti za sve varijable i izlazne veličine tijekom pečenja tijesta

Na **Slici 7** dan je grafički prikaz rezultata analize glavnih komponenti ulaznih, nezavisnih varijabli i izlaznih, zavisnih varijabli za proces pečenja oblikovanoga tijesta čime je dan uvid u utjecaj pojedinih varijabli na promjer, debljinu i težinu pečenoga peciva.

Analizom glavnih komponenti izračunat je i doprinos pojedine komponente ukupnoj varijabilnosti prema faktorima, a u analizu su bile bile uključene varijable s najvećim doprinosom varijabilnosti svojstava pečenog peciva na izlazu iz procesa. Rezultati analize dani su u **Tablici 7**.

Tablica 7 Vrijednosti doprinosa pojedinih varijabli ukupnoj varijabilnosti

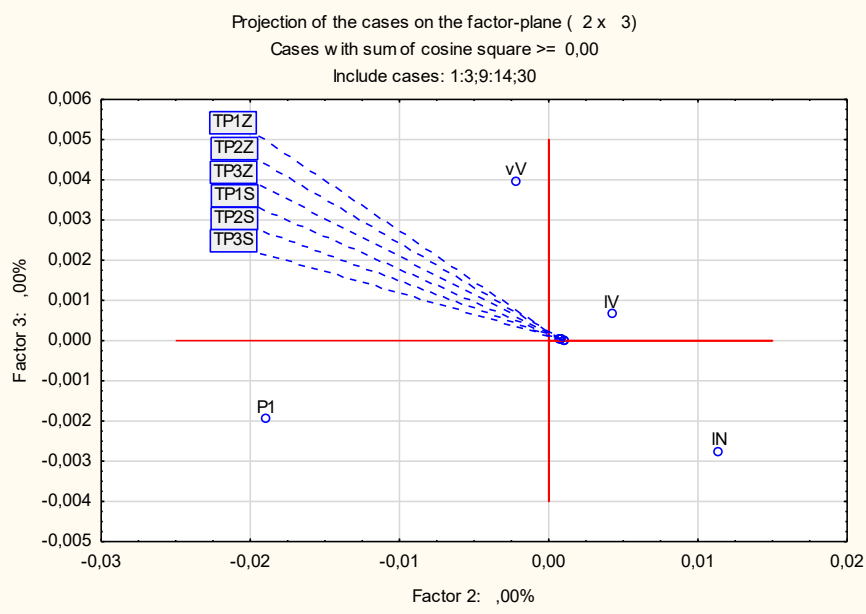
	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
v_V	16,0720531	0,880832133	56,709182
I_V	15,8291006	3,50577407	1,55650421
I_N	22,3537883	25,2861546	27,7377617
T_{P1Z}	7,09240406	0,118274013	0,00514502386
T_{P2Z}	5,56411946	0,229103378	0,000343733497
T_{P3Z}	6,89123932	0,130142067	0,00365362373
T_{P1S}	7,09240406	0,118274013	0,00514502386
T_{P2S}	5,56411946	0,229103378	0,000343733497
T_{P3S}	6,89123932	0,130142067	0,00365362373
P_1	6,64953232	69,3722003	13,9782674



Slika 8 Grafički prikaz rezultata analize glavnih komponenti za varijable prihvatnoga koša i procesa pečenja

Na **Slici 8** prikazan je rezultat analize glavnih komponenti za ulazne varijable prihvatnoga koša i procesa pečenja koje su imale najveću varijabilnost pri njihovoj zasebnoj analizi.

Isti je postupak proveden, ali iz aspekta Faktora 2 i Faktora 3, a rezultat ove analize prikazan je na **Slici 9**.



Slika 9 Grafički prikaz rezultata analize glavnih komponenti za varijable i izlazne veličine tijekom pečenja tijesta (Odnos Faktora 2 i 3)

U **Tablici 4** nalaze se vrijednosti ulaznih veličina za prihvatni koš. Iako se mijenjala samo jedna ulazna veličina, brzina rotacije valjka ulagača, ostale ulazne veličine nisu ostale konstantne kako je bilo očekivano već su se morale prilagođavati novonastaloj promjeni, odnosno brzini rotacije valjka ulagača. Ukoliko one ne bi promijenile zadanu vrijednost, iz prihvatnoga koša bi na transportnu traku dolazilo nepravilno oblikovano tijesto nezadovoljavajućih svojstava.

Osim toga, srednja vrijednost mase oblikovanoga tijesta varira pri svakoj promjeni brzine rotacije valjka ulagača. Promatrajući srednje vrijednosti mase tijesta, porast mase bi trebao biti linearan, odnosno proporcionalan povećanju brzine rotacije, međutim pri trećem mjerenju dogodila su se odstupanja i nisu ispunjeni zahtjevi proizvođača.

Puno je jednostavnije izraditi i koristiti model kada je samo jedna ulazna veličina promjenjiva, a ostale su konstantne, stoga je i izveden izraz za računanje mase tijesta s promjenjivom brzinom rotacije valjka [5]. Međutim, ukoliko bi još neka ulazna veličina mijenjala svoju vrijednost, bilo bi potrebno izraditi novi višestruki polinomni model jer onaj prethodni ne bi odgovarao i davao zadovoljavajuće rješenje.

U **Tablici 5** vidljivo je kako masa tijesta koja je bila izlazna varijabla (Y1=m_T) u prvome dijelu procesa , postaje ulazna varijabla za drugi dio procesa – pečenje. Obzirom da nijedna ulazna veličina za proces pečenja nije mijenjana, sve su veličine trebale ostati konstantne. Međutim, podaci u tablici pokazuju da nisu. Vrijednosti kod plamenika se mijenjaju u svakoj seriji što govori da oblikovano tijesto koje dolazi u peć vjerojatno nije istih svojstava kao prethodno ili sljedeće pa se dotok zraka mora povećati ili smanjiti ovisno o željenome rezultatu. Nadalje, vrijednosti mjerenih izlaznih veličina se također razlikuju kod svake serije što je i za očekivati obzirom da su i mase oblikovanoga tijesta bile drugačije za svaku promjenu brzine rotacije valjka ulagača.

Vrijednosti elemenata vektora izlaznih veličina $\vec{Y}_{2-4}$ (R_P, d_P i m_P) za izraze [6] i [7] mijenjale bi se za svaku promjenu bilo kojeg elementa (varijable) u vektoru ulaznih veličina $\vec{Y}_{6-31}$ (izraz [6]) odnosno $\vec{Y}_{5-31}$ (izraz [7]). Matematički je zahtjevno, ali za praktičnu primjenu i nepotrebno, računati svaku od navedenih vrijednosti $\vec{Y}_{5-31}$ u zasebnoj polinomnoj jednadžbi višeg stupnja. Ove se vrijednosti u proizvodnji neprekidno mijenjaju zbog niza slučajnih varijabli u procesu proizvodnje. Analizu utjecaja ulaznih varijabli na izlazne jednostavnije je odrediti analizom glavnih komponenti, PCA.

Na **Slici 4** može se vidjeti kako kod svih serija treće mjerenje odstupani kako gotovo niti jedna brzina rotacije valjka ulagača ne daje masu tijesta od 50 g. Razlog tome vjerojatno nije u prilagođavanju ulaznih vrijednosti već je možda u pitanju zamjes tijesta, problem tehničke prirode, odnosno zatupljenost noža, istrošenost trake, neadekvatna vlažnost trake i pritisak gumenih valjaka. Najveća točnost pri izračunavanju vrijednosti zadanih varijabli postiže se modeliranjem primjenom polinoma 4. stupnja koji ima gotovo 100 %-tnu točnost u izračunavanju mase tijesta (R^2=0,999998) što je vidljivo na **Slici 4** i **Slici 5**.

Iz izraza [11] za računanje brzine rotacije valjka ulagača dobivena je vrijednost x=0,82377 m min^{-1}. To znači da je od nominalne brzine rotacije (v_v=6 m min^{-1}) potrebno izračunati 82,377 % te se dobije vrijednost v_v=4,94265 m $min^{-}1$, koja predstavlja potrebnu brzinu rotacije valjka ulagača kako bi se dobila masa tijesta od 50 g. Ove vrijednosti vrijede za idealne uvjete i u stvarnoj proizvodnji bi ih trebalo provjeriti kako bi se vidjelo daju li one rezultat. Ukoliko zamjes tijesta ne bi bio odgovarajući, ovaj model ne bi bio promjenjiv. Također, ukoliko bi postojao problem konstrukcijske prirode ili ako neka od ulaznih veličina ne bi bila kao u **Tablici 6**, model također ne bi odgovarao i morao bi se izraditi novi.

Na **Slici 6** kemometrijska analiza pokazuje sa 100 %-tnom vjerojatnošću da najveću varijabilnost u fazi oblikovanja tijesta imaju brzina rotacije valjka i položaj noža jer su te ulazne veličine najviše udaljene od ishodišta. Njihovim bi se reguliranjem gotovo u potpunosti moglo upravljati proizvodnjom i proizvoditi tijesto mase 50 g, ali to ponajprije ovisi o zamjesu i konstrukcijskim osobinama linije.

Slična situacija je i s analizom ulaznih i izlaznih veličina tijekom faze pečenja tijesta i proizvodnje keksa. Radi jednostavnosti modeliranja, za ovaj je dio procesa korištena analiza glavnih komponenti. Iz grafičkoga prikaza na **Slici 7** vidljivo je da za ulazne mase tijesta od 49,82 g do 50,82 g (podaci iz **Tablice 4** i **Tablice 5**) najveću varijabilnost po obje faktorske ravnine tijekom pečenja pokazuju vrijednosti P1, P2 i P3. Ako se izaberu stalne vrijednosti svih ostalih ulaznih veličina u procesu pečenja keksa, bilo bi moguće proizvoditi keks stalnoga promjera, debljine i mase ponajprije regulacijom vrijednosti P1, a zatim i P2 i P3. Snagom plamenika u sve tri zone (P1, P2 i P3) možemo značajno utjecati na izlazna svojstva peciva, ali i smanjiti potrebu za promjenom ostalih varijabli u sustavu. Također se na **Slici 7** vidi da veliki utjecaj imaju temperatura i vrijeme pečenja. To znači da bi se optimiranjem temperaturne krivulje tijekom pečenja mogla značajno smanjiti varijabilnost u proizvodnji keksa. Temperature pečenja po zonama su 182; 174; 181 °C, a možda bi mogle biti, npr. 150; 185; 150 °C čime bi se smanjila među ostalim i potrošnja energije. Neke od varijabli grupirane su u klastere jer imaju međusobno visoku korelaciju, a razlike izračunate za prvi faktor (*Factor 1*) važnije su i imaju veći utjecaj od razlika za drugi faktor (*Factor 2*). Izračunom doprinosa prethodno opisanih utjecaja pojedinih varijabli, i brojčano je vidljivo u **Tablici 7**. kako najveći utjecaj na proizvodnju tijesta i peciva ima položaj noža (l_N) i brzina rotacije valjka ulagača (v_v) te premda nešto manji, ali svejedno značajan utjecaj imaju i temperature pečenja u 1. i 3. zoni te snaga plamenika, P1. Ove izračune potvrđuje i **Slika 8** gdje se grafički može vidjeti koje su varijable udaljenije od ishodišta i imaju veću varijabilnost i snažniji utjecaj na promjenjivost svojstava.

Slika 9 pokazuje kako su doprinosi analiziranih veličina ukupnoj varijabilnosti mase tijesta, mase, promjera i debljine peciva zanemarivi iz aspekta Faktora 2 i Faktora 3.

5. ZAKLJUČCI

Polinomna regresijska analiza 4. stupnja i analiza glavnih komponenti primijenjene su za izračunavanje i određivanje utjecaja ulaznih procesnih veličina na svojstva tijesta i gotovog keksa.

Predloženi model (jednadžba [11]) za izračun mase tijesta od 50 g vrijedi samo u slučaju kada je promjenjiva samo jedna ulazna veličina – brzina rotacije valjka ulagača. Ukoliko bi došlo do promjene još neke ulazne varijable, tada model ne bi bio primjenjiv za proizvodnju i bilo bi potrebno izraditi novi višestruki polinomni model.

Izračunate vrijednosti za postizanje mase tijesta od 50 g primjenjive su na idealne uvjete. U uvjetima industrijske proizvodnje trebalo bi provjeriti daje li model željene rezultate. Realno je za očekivati da možda ni tada model ne bi točno izračunao ulazne vrijednosti za proizvodnju točno 50 g tijesta jer u okviru ovog diplomskoga rada nisu obavljana mjerenja u fazi zamjesa tijesta. Faza zamjesa tijesta ima jako veliki utjecaj na sve ostale faze proizvodnje, ali u industrijskim uvjetima, za potrebe izrade ovog rada nije bilo izvedivo provesti potrebna mjerenja u predfazi proizvodnje tijesta. Moguće je i da postoje problemi, koji su 'slučajne varijable' u procesu i modelu, poput smanjene oštrine noža, neodgovarajuće napetosti i vlažnosti trake te pritisaka gumenih valjaka.

Najveću varijabilnost u fazi oblikovanja tijesta imaju brzina rotacije valjka te položaji valjka i noža (**Slika 8**). Njihovom regulacijom bi se gotovo u potpunosti moglo upravljati proizvodnjom i proizvoditi tijesto mase 50 g.

U fazi pečenja veliki je broj ulaznih varijabli i polinomne regresijske metode neprikladne su za izračunavanje fizičkih svojstava keksa. Zbog toga je korištena analiza glavnih komponenti, PCA. Najveću varijabilnost u fazi pečenja pokazuju vrijednosti veličina koje se odnose na rad sva tri plamenika. Ukoliko bi se izabrale stalne vrijednosti svih ostalih ulaznih veličina u procesu pečenja keksa, bilo bi moguće preciznom kontrolom rada plamenika proizvoditi keks stalnog promjera, debljine i mase. Snagom plamenika u sve tri zone može se značajno utjecati na izlazna svojstva peciva, ali i smanjiti potrebu za promjenom ostalih varijabli u sustavu. Osim toga, optimiranjem temperaturne krivulje tijekom pečenja bilo bi moguće značajno smanjiti varijabilnost sustava.

Generalno govoreći, najveći utjecaj na proizvodnju tijesta i peciva imaju položaji noža i valjka i brzina rotacije valjka ulagača. Premda nešto manji, svejedno značajan utjecaj imaju i temperature pečenja u 1. i 3. zoni te snaga plamenika.

Prema kemometrijskoj analizi i dobivenim grafovima, vidljivo je da su neke varijable udaljenije od ishodišta što ukazuje na veću varijabilnost i snažniji utjecaj na promjenjivost svojstava peciva. Radi se o brzini rotacije valjka ulagača, položaju noža, temperaturi pečenja i snazi plamenika. Te ulazne veličine potrebno je mijenjati u procesu jer je njihov utjecaj najveći i njihovim podešavanjem na optimalne vrijednosti moguće je najbrže postići optimalne uvjete proizvodnje i željene izlazne vrijednosti svojstava pečenog keksa.

Na temelju provedenih mjerenja, izrađen je polinomni model koji opisuje ovisnost mase tijesta o jednoj ulaznoj veličini (brzini rotacije valjka ulagača). Za izračunavanje ovisnosti mase tijesta o nekoj drugoj ulaznoj veličini potreban je novi model. Ne može se sa sigurnošću reći je li model primjenjiv iako je gotovo 100 % točan stoga bi ga trebalo provjeriti u industrijskim uvjetima proizvodnje na velikom broju serija mjerenja.

Obzirom da je ulaznih veličina puno i u prihvatnome košu i procesu pečenja, kemometrijske metode analize su svakako prikladnije za određivanje traženih zavisnosti. Primjenom analize glavnih komponenti na ulazne i izlazne varijable drugog dijela procesa (faza pečenja) određena je snaga utjecaja pojedinih ulaznih varijabli na fizička svojstva gotovog keksa. Najsnažniji utjecaj na svojstva keksa i njihovu varijabilnost imaju položaj noža (l_N) i brzina rotacije valjka ulagača (v_v) te premda nešto manji, ali svejedno značajan utjecaj imaju i temperature pečenja u 1. i 3. zoni te snaga plamenika, P1.

Iz provedenih mjerenja, matematičke i statističke obrade podataka moguće je zaključiti kako su regresijske metode prikladne za mali broj varijabli u sustavu. Ako je potrebno analizirati vrijednosti i utjecaj većeg broja ulaznih i izlaznih varijabli prikladnije je koristiti analizu glavnih komponenti.

6. LITERATURA

Boobier, W. J., Baker, J. S., Davies, B. (2006) Development of a healthy biscuit: An alternative approach to biscuit manufacture. Nutr. J.,5, 1–7.

Brereton RG: Applied Chemometrics for scientists, Wuley, Chichester, 2007.

Hinkle, D., Wiersma, W.,Jurs, S., Applied statistics for the behavioral sciences, 5. izdanje, Boston, London, 2003.

Jakobek L: Ambalaža i ambalažni materijali – nastavni materijali. PTF, Osijek, 2016.

Jaredić, J. (2017). "'Modeliranje proizvodnje bioplina'", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

Kaluđerski, G., Žeželj, M., Gavrilović M., Kaluđerski S., Tošić M.: Tehnologija proizvodnje i prerade brašna, Zavod za izdavanje udžbenika i zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Novi Sad, Beograd, Titograd, 1989

Katić, L. (2019). "'Razvrstavanje krušnog brašna prema zahtjevima prerađivača primjenom statističkih metoda'", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

Koceva Komlenić D, Jukić M: Tehnologija proizvodnje tjestenine i keksarskih proizvoda, keks, kreker, trajno slano i čajno pecivo – nastavni materijali. PTF, Osijek, 2019.

Kuzmić, I. (2020). "'Trajnost keksa bez šećera s dodatkom nusproizvoda prosa i heljde'", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet

M. Benšić, N. Šuvak, Primijenjena statistika, Sveučilište J.J. Strossmayera, Odjel za

matematiku, Osijek, 2013.

Narodne novine, Ministarstvo poljoprivrede NN 81/2016

Pecina M.: Metode multivarijantne analize-osnove, Interna skripta, Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2006

Rajčić, K. (2015). Usporedba analize glavnih komponenti i faktorske analize (Diplomski rad)

Stojanović, F. (2019). "'Primjena kemometrijskih metoda za razvrstavanje namjenskog brašna prema zahtjevima prerađivača'", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

Ugarčić-Hardi Ž: Proizvodnja tjestenine i keksa. Interna skripta. PTF, Osijek, 1999.

WEB [1] https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/PREDAVANJE11.pdf

WEB [2] http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NjExNg==