

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNIČKI FAKULTET U BORU

Aleksandar D. Krstić

**RAZVOJ I IMPLEMENTACIJA HIBRIDNOG
VIŠEODZIVNOG MODELA U FAZI
OKRUŽENJU ZA OPTIMIZACIJU
PARAMETARA PROCESA TEHNOLOŠKOG
POSTUPKA EKSTRUZIJE**

doktorska disertacija

Bor, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE
TECNICAL FACULTY IN BOR

Aleksandar D. Krstić

**DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF
A HYBRID MULTI-RESPONSE MODEL IN THE
FUZZY ENVIRONMENT FOR OPTIMIZATION
OF PROCESS PARAMETERS OF THE
TECHNOLOGICAL PROCESS OF EXTRUSION**

Doctoral Dissertation

Bor, 2023

Komisija za pregled i odbranu:

Mentor:

prof.dr Đorđe Nikolić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Članovi komisije:

prof.dr Snežana Urošević, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

prof.dr Predrag Đorđević, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

prof.dr Miloš Papić, vanredni profesor
Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku

Datum odbrane doktorske disertacije

Zahvalnost

Zahvaljujem se svima koji su mi na bilo koji način olakšali rad, omogućili realizaciju i svojim zalaganjem doprineli izradi doktorske disertacije.

Koristim ovu priliku da se srdačno zahvalim svom mentoru, prof. dr Đorđu Nikoliću, na svesrdnoj i veoma profesionalnoj podršci, dragocenim savetima i sugestijama u svim fazama izrade ove disertacije. Zahvaljujem se članovima komisije, na korisnim sugestijama u toku završne faze izrade ovog rada.

Zahvaljujem se rukovodstvu kompanije za preradu i proizvodnju proizvoda od plastičnih masa „Peštan“ iz Aranđelovca koja je omogućila eksperimentalni rad, rukovodiocu procesa Stojkov Dejanu na samopregornom i nesebičnom zalaganju tokom eksperimentalnog istraživanja, a osoblju Laboratorije na angažovanju i trudu prilikom ispitivanja uzoraka.

Na kraju, ništa manje važna i zaslužna za moj uspeh je i moja porodica kojoj dugujem veliku zahvalnost na razumevanju, zato što je verovala u mene i pružila podršku tokom izrade disertacije.

Autor

Razvoj i implementacija hibridnog višedozivnog modela u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije

Izvod: U cilju poboljšanja procesa ekstruzije i postizanja optimalnijih tehnoloških uslova za unapređenje tehničkih karakteristika kvaliteta proizvoda od neplastificiranog PVC-a (polivinil hlorida), u doktorskoj disertaciji je predložen i verifikovan hibridni višedozivni model za optimalno upravljanje kvalitetom procesa. Doktorska disertacija sa navedenim naslovom prezentuje rezultate istraživanja procesa izrade PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije. Istraživanje se fokusira na minimiziranje varijacija procesa i probleme sa kvalitetom proizvoda koji negativno utiču na proces proizvodnje. Cilj ovog istraživanja je bio formiranje višedozivnog hibridnog optimizacionog modela za proces proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije PVC proizvoda identifikacijom seta optimalnih procesnih parametara, pri čemu je model trebalo da omogući uspostavljanje analitičke zavisnosti između ključnih tehnoloških procesnih parametara i višestrukih odziva procesa posmatranih kroz fizičke i mehaničke karakteristike kvaliteta.

Taguchi-fazi metodologijom se sistemski pristupa dizajnu eksperimenta iz postojećih vrednosti tehnoloških procesnih parametara kako bi se identifikovale moguće izlazne vrednosti odziva procesa. Prema rezultatima dobijenim kroz istraživanje, predloženim modelom u radu utvrđen je optimalan set tehnoloških procesnih parametara koji omogućavaju smanjenje varijacija procesa i prosečno poboljšanje šest korelisanih karakteristika kvaliteta: čvrstoće prstena, fleksibilnosti prstena, debljine zida, TIR test, uzdužnog skupljanja i debljine spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja za 24%. U ovoj disertaciji, predloženim optimizacionim modelom postiže se veći sinergetski efekat nego parcijalnom optimizacijom pojedinačnih karakteristika kvaliteta, a u cilju postizanja istovremene i sveobuhvatne optimizacije značajnih karakteristika kvaliteta proizvoda od neplastificiranog PVC-a. Cilj koji se želi ostvariti u praksi primenom predloženog modela je implementacija koncepta robusnog inženjeringa kvaliteta čime se ostvaruje mogućnost adekvatnog reagovanja na globalnu konkurentnost minimizacijom varijacija procesa i podizanjem nivoa kvaliteta procesa, što implicira kontinualno unapređenje kvaliteta proizvoda i podizanje na viši nivo. Dodatni cilj je da se tokom perioda eksploatacije proizvoda minimizira mogućnost degradacije onih karakteristika kvaliteta proizvoda koje su za korisnike najznačajnije, smanjenje troškova proizvodnje, proizvodnja bez škarta, stvaranje generičkih, vlasničkih i novih znanja o proizvodu i procesu koja se mogu primeniti na buduće proizvode. Pored postizanja visokog nivoa kvaliteta, poboljšanjem procesa optimizacijom, predupredili bi se problemi kompleksnosti postupka ekstruzije sa aspekta upravljanja i kontrole procesa. U širem kontekstu, model kojim se uspostavlja analitička zavisnost između ključnih tehnoloških procesnih parametara i korelisanih višestrukih performansi procesa posmatranih kroz fizičko-mehaničke karakteristike kvaliteta i podizanje nivoa kvaliteta može se primeniti u cilju minimiziranja proizvodnih troškova ali ujedno ostvariti željeni nivo kvaliteta proizvoda.

Ideja o univerzalnom višedozivnom hibridnom optimizacionom modelu, nastala je sa intencijom upotpunjenja eksperimentalnih istraživanja i iniciranja primene u praksi, jer se isti može koristiti kao uzor u kompanijama za preradu i proizvodnju proizvoda od plastičnih masa tehnološkim postupkom ekstruzije. Predstavljeni model prikazan je na primeru procesa proizvodnje troslojne UPVC cevi, ocenjen u istraživačkom postupku i kroz studiju slučaja sproveden u praksi na primeru kompanije za proizvodnju i distribuciju proizvoda od polimera „Peštan“ iz Arandelovca.

Ključni doprinos ove doktorske disertacije predstavlja poboljšanje kvaliteta procesa izrade PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije. Predloženi rad predstavlja prvo istraživanje u kome je podešavanjem osam tehnoloških procesnih parametara: brzina vuče linije, temperatura dizne alata, dozer ekspandera, obrtaji puža ekstrudera, obrtaji puža koekstrudera, temperatura cilindra, dozer smeše ekstrudera i dozer smeše koekstrudera istovremeno optimizovano šest odziva procesa koji su suprotstavljeni i optimalno rešenje nije jedinstveno. Osnovni motiv izrade ovog rada je prevashodno praktična primena predloženog univerzalnog modela u realnom proizvodnom sistemu.

Sa aspekta praktične primenljivosti, važno je istaći da optimizovani proces izrade PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije koristi standardnu opremu proizvodnih linija, koja se nalazi u većini kompanija za proizvodnju PVC proizvoda, dok osnovni materijali za izradu predstavljaju komercijalno dostupne, standardne materijale.

Ključne reči: Taguchi metod, fazi logika, optimizacija, procesni parametri, ekstruzija, ANOVA.

Naučna oblast: tehničko-tehnološke nauke

Uža naučna oblast: Inženjerski menadžment

UDK: 005(043.3)

658.562(043.3)

510.644(043.3)

311.16(043.3)

519.8(043.3)

Development and implementation of a hybrid multi-response model in the fuzzy environment for optimization of process parameters of the technological process of extrusion

Abstract: In order to improve the extrusion process and achieve more optimal technological conditions for improving the technical characteristics of the quality of unplasticized PVC (polyvinyl chloride), a doctoral dissertation proposed and verified a model for optimal quality management of the production process. The doctoral dissertation with the stated title presents the results of the research of the process of making PVC products by the technological process of extrusion. The research focuses on minimizing process variations and product quality problems that negatively affect production. The aim of this research was to form a multi-responsive hybrid optimization model for the production process by the technological process of extrusion of PVC products by identifying a set of optimal process parameters, where the model was supposed to enable the establishment of analytical dependence between key technological process parameters and multiple process responses observed through physical-mechanical quality characteristics.

The Taguchi–fuzzy methodology systematically approaches the design of the experiment from the existing values of technological process parameters in order to identify possible output values of the process response. According to the results obtained through research, the proposed model in the paper determined the optimal set of technological process parameters that allows reducing process variations and average improvement of six quality output characteristics: ring strength, ring flexibility, TIR test, wall thickness, longitudinal shrinkage and outer and inner layer thickness by 24%. In this dissertation, the proposed optimization model achieves a greater synergetic effect than partial optimization of individual quality characteristics, in order to achieve simultaneous and comprehensive optimization of significant quality characteristics of unplasticized PVC products. The goal that is to be achieved in practice by applying the proposed model is implementation which achieves robust product quality, minimizes process variation that raises the level of process quality and implies continuous improvement of product quality and rise to a higher level. Also, during the period of product exploitation, the possibility of degradation of those product quality characteristics that are most important for users is minimized, production costs are reduced, production is without scrap, creating generic, proprietary and new knowledge about the product and process that can be applied to future products. In addition to achieving high levels of quality by improving the process by optimization, the problems of the complexity of the extrusion process from the aspect of process management and control would be prevented. In a broader context, a model that establishes analytical dependence between key technological process parameters and correlated multiple process performance observed through physical-mechanical quality characteristics and raising quality levels can be used to reduce production costs but also achieve desired product quality.

The idea of a universal multi-responsive hybrid optimization model was created with the intention of enriching experimental research and encouraging its application in practice, because it can be used as a model in companies for processing and production of plastic products by extrusion technology.

The presented model is shown on the example of the production process of three-layer UPVC pipe, evaluated in the research procedure and implemented in practice through a case study on the example of the company for production and distribution of polymer products „Peštan“ from Arandjelovac.

The key contribution of this doctoral dissertation is the improvement of the process quality of making PVC products by the technological process of extrusion. The proposed work is the first research in which the setting of eight technological process parameters: line traction speed, nozzle tools temperature, expander dozer, extruder auger speed, coextruder auger speed, cylinder temperature, extruder mixture dozer and coextruder dozer mixture, simultaneously optimizes six output quality characteristics which are contrasted to one another and the optimal solution is not a uniform one. The main motive for this paper is primarily its practical application in a real production system due to the universality of the proposed model. From the aspect of practical applicability, it is important to point out that the optimized process of manufacturing PVC products by applying the technological process of extrusion uses standard equipment found in most companies for the production of PVC products, and basic materials are commercially available, standard materials.

Keywords: Taguchi method, fuzzy logic, optimization, process parameters, extrusion, ANOVA.

Scientific area: Technical-technological sciences

Narrow scientific field: Engineering Management

UDC: 005(043.3)

658.562(043.3)

510.644(043.3)

311.16(043.3)

519.8(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Uvodna razmatranja... ..	1
1.2. Predmet istraživanja.....	2
1.3. Ciljevi istraživanja i struktura disertacije.....	2
1.4. Polazne hipoteze	3
1.5. Literaturni pregled.....	4
1.6. Literaturna praznina	10
2. TEORIJSKI OKVIR	14
2.1. Ekstruzija	14
2.2. Proizvodnja cevi.....	17
2.2.1. Prednosti i nedostaci postupka.....	18
2.3. Industrija plastike kompanija „Peštan”	19
2.4. Proizvodni program.....	19
2.5. PVC cevi	19
2.6. Materijali.....	22
2.6.1. Polivinil hlorid (PVC).....	22
2.6.2. Punila	22
2.6.3. Titanium dioksid	23
2.6.4. Stabilizator	23
2.6.5. Crna kreda	23
2.6.6. Stearinska kiselina i pigmenti	23
2.7. Politika kvaliteta kompanije.....	24
3. METODOLOŠKI OKVIR	26
3.1. Metodologija istraživanja.....	26
3.1.1. Vrste prikupljanja podataka	26
3.1.2. Primarni podaci	26
3.1.3. Sekundarni podaci.....	26
3.2. Značaj predmeta istraživanja	27
3.3. Definisane istraživačkog modela	28
3.4. Definicija kvaliteta	29
3.5. Optimizacija	30
3.6. Matematički modeli i optimizacija	30
3.7. Taguchi metoda.....	32
3.8. Primena Taguchi metode u planiranju eksperimenta	34
3.9. Ortogonalni nizovi	34
3.10. S/N odnos.....	35
3.11. Teorija fazi logike	37
3.12. ANOVA (Analiza varijanse).....	39
4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA.....	42
4.1. Definisane plana eksperimenta	42
4.2. Eksperimentalni dizajn	42
4.3. Izrada uzoraka	45
4.4. Ispitivanje i merenje.....	47
4.5. Čvrstoća prstena	47
4.6. Fleksibilnost prstena	49
4.7. TIR test.....	50
4.8. Debljina zida	52
4.9. Uzdužno skupljanje.....	54
4.10. Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja.....	55

5. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA	58
5.1. Definisane S/N odnosa i rezultati parcijalne optimizacije odziva procesa	58
5.2. Analiza varijanse (ANOVA).....	68
5.3. Primena fazi logike za matematičko modelovanje uticaja procesnih parametara na odzive procesa	74
5.4. Fazi logika u programskom rešenju Matlab.....	74
5.5. Rezultati višeodzivne optimizacije procesa	75
5.6. Analiza varijanse (ANOVA).....	78
5.7. Eksperimentalna verifikacija optimuma	81
5.8. Rezultati primene predloženog modela.....	82
5.9. Diskusija rezultata.....	84
6. ZAKLJUČAK.....	86
7. NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI.....	88
Literatura.....	90
Prilozi.....	101
Publikacije koje su proizašle kao rezultat istraživanja prikazanih u disertaciji.....	112
Biografija	113

SPISAK SLIKA

Slika 1. Najzastupljenije tehnologije proizvodnje proizvoda od plastike	14
Slika 2. Šematski prikaz procesa ekstruzije	15
Slika 3. Skica jednopužnog ekstrudera	16
Slika 4. Primeri ekstrudiranih cevi i profila	16
Slika 5. Tipični layout mešač	17
Slika 6. Šematski prikaz proizvodne linije za ekstruziju cevi.....	18
Slika 7. Postupak ekstrudiranja cevi	18
Slika 8. Uzdužni presek troslojne PVC cevi sa strukturiranim zidom.....	20
Slika 9. Poprečni presek troslojne PVC cevi sa strukturiranim zidom	21
Slika 10. Osnovne faze i struktura modela istraživanja	28
Slika 11. Dizajn robusnog sistema	33
Slika 12. Faze implementacije Taguchi metoda	33
Slika 13. Šema Taguchi eksperimentalnog plana	34
Slika 14. Proces fazi zaključivanja	39
Slika 15. Tandem dvopužnih ekstrudera.....	46
Slika 16. Prikaz glave za mešanje i adaptera u realnom okruženju	46
Slika 17. Ekstrudirane PVC cevi a) test cevi nakon procesa ekstruzije i b) finalni proizvod.....	46
Slika 18. Interakcije procesnih parametara i odziva procesa	47
Slika 19. Dinamometar za ispitivanje čvrstoće i fleksibilnosti prstena	48
a) Shimadzu, AGS-X 20 kN i b) uzorak postavljen između dve paralelne ploče	
Slika 20. Deformacija okrugle cevi pod vertikalnim opterećenjem.....	48
Slika 21. Uređaj za ispitivanje otpornosti na spoljne udare obodnom metodom a) IMPACT 2000 (Srbija) i b) uzorak postavljen u „V“ blok	51
Slika 22. Podešavanje parametara za ispitivanje	51
Slika 23. Digitalno kljunasto pomično merilo sa nonijusom	52
Slika 24. Određivanje debljine zida a) merenje pomičnim kljunastim merilom i b) merna mesta na uzorku	53
Slika 25. Obeleženi uzorci za određivanje uzdužnog skupljanja.....	54
Slika 26. Postupak ispitivanja uzdužnog skupljanja cevi (1) peć-sušara, (2) uzorak i (3) talk	54
Slika 27. IR termometar HT6889.....	54
Slika 28. Određivanje debljine slojeva od UPVC-a a) lupa sa milimetarskom podelom i b) merenje debljine slojeva	55
Slika 29. Snimak slojeva UPVC cevi.....	56
Slika 30. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv čvrstoća prstena.....	60
Slika 31. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv čvrstoća prstena.....	60
Slika 32. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv fleksibilnost prstena	61
Slika 33. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv fleksibilnost prstena	62
Slika 34. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv TIR test.....	63
Slika 35. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv TIR test	63
Slika 36. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv debljina zida	64
Slika 37. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv debljina zida.....	65
Slika 38. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv uzdužno skupljanje.....	66
Slika 39. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv uzdužno skupljanje	66
Slika 40. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja	67
Slika 41. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja	68

Slika 42. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv čvrstoća prstena.....	69
Slika 43. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv fleksibilnost prstena	70
Slika 44. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv TIR test.....	71
Slika 45. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv debljina zida	71
Slika 46. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv uzdužno skupljanje.....	72
Slika 47. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja	73
Slika 48. Sumarni doprinos tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa	74
Slika 49. Struktura računarske arhitekture šest ulaza i jednog izlaza fazi logičke jedinice.....	75
Slika 50. Definisana funkcija pripadnosti za odziv čvrstoća prstena.....	76
Slika 51. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva za COM.....	78
Slika 52. Dijagram standardizovanih reziduala	80
Slika 53. Dijagram odstupanja standardizovanih reziduala u odnosu na nultu liniju	80

SPISAK TABELA

Tabela 1. Rezime pregledanih radova.....	10
Tabela 2. Ortogonalni niz OA ₄ (2 ³).....	35
Tabela 3. Tehnološki procesni parametri, njihovi nivoi i odzivi procesa.....	43
Tabela 4. Prikaz plana eksperimenta-Ortogonalni niz L ₁₈ (2 ¹ ×3 ⁷).....	43
Tabela 5. Struktura plana eksperimenta dobijena primenom L ₁₈ ortogonalnog niza.....	44
Tabela 6. Formulacija suvog praha (kg) za proizvodnju PVC cevi.....	45
Tabela 7. Rezultati testa čvrstoće prstena.....	49
Tabela 8. Rezultati fleksibilnosti prstena.....	50
Tabela 9. Rezultati TIR testa.....	52
Tabela 10. Rezultati izmerenih vrednosti debljina zida.....	53
Tabela 11. Rezultati merenja uzdužnog skupljanja.....	55
Tabela 12. Vrednosti izmerenih debljina slojeva.....	56
Tabela 13. Eksperimentalni rezultati izmerenih vrednosti odziva procesa.....	58
Tabela 14. Rezultati S/N odnosa odziva procesa.....	59
Tabela 15. S/N odnos za odziv čvrstoća prstena.....	59
Tabela 16. Relativna vrednost efekata faktora za odziv čvrstoća prstena.....	60
Tabela 17. S/N odnos za odziv fleksibilnost prstena.....	61
Tabela 18. Relativna vrednost efekata faktora za odziv fleksibilnost prstena.....	61
Tabela 19. S/N odnos za odziv TIR test.....	62
Tabela 20. Relativna vrednost efekata faktora za odziv TIR test.....	63
Tabela 21. S/N odnos za odziv debljina zida.....	64
Tabela 22. Relativna vrednost efekata faktora za odziv debljina zida.....	64
Tabela 23. S/N odnos za odziv uzdužno skupljanje.....	65
Tabela 24. Relativna vrednost efekata faktora za odziv uzdužno skupljanje.....	66
Tabela 25. S/N odnos za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja.....	67
Tabela 26. Relativna vrednost efekata faktora za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja.....	67
Tabela 27. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv čvrstoća prstena.....	69
Tabela 28. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv fleksibilnost prstena.....	69
Tabela 29. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv TIR test.....	70
Tabela 30. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv debljina zida.....	71
Tabela 31. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv uzdužno skupljanje.....	72
Tabela 32. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja.....	72
Tabela 33. Prikaz odziva i procesnih parametara sa najvećim doprinosom.....	73
Tabela 34. Dobijene vrednosti COM.....	77
Tabela 35. Analiza varijanse (ANOVA) za COM.....	78
Tabela 36. Procenjeni koeficijenti regresije (za COM).....	79
Tabela 37. Rezultati verifikacionog testa.....	81
Tabela 38. Sumarni prikaz rezultata.....	82
Tabela 39. Komparacija vrednosti odziva u zavisnosti od proizvodnih uslova.....	83

Poglavlje 1

UVOD

1. UVOD

1.1. Uvodna razmatranja

Usled sve većih zahteva kupaca za kvalitetnim proizvodima, većina današnjih industrijskih procesa generiše proizvode koje definiše više karakteristika kvaliteta. Ekstrudiranje polimernih materijala za proizvodnju gotovih proizvoda za industrijske ili potrošačke aplikacije predstavlja integrisani kontinuirani proces sa višestrukim ulazima i višestrukim izlazima. Kompleksnost procesa ekstruzije i veliki broj tehnoloških procesnih parametara otežava održavanje procesa pod kontrolom. U principu, neki od glavnih uzroka problema sa kvalitetom su formulacija suvog praha, procesna problematika, defekti tokom procesa hlađenja, pakovanja i nedostaci koji su posledica tehnološkog postupka ekstruzije, dok se karakteristike kvaliteta definišu na sledeći način: mehanička svojstva, dimenzije ili merljive karakteristike i atributi (Rajul i dr., 2014). Prema (Gadekar i dr., 2015) proces ekstrudiranja cevi je najzastupljeniji postupak proizvodnje cevi u industriji prerade plastike. U navedenom postupku ekstrudiranja, učestala je pojava različitih nedostaka koji pored uticaja na kvalitet imaju značajnog uticaja i na produktivnost. Autor Ayele, (2019) navodi da je za poboljšanje stope proizvodnje optimizacija parametara procesa veoma značajana kao i poboljšanje produktivnosti.

Tradicionalna heuristička metodologija naglašava pristup pokušaja i pogrešaka, bazira se na iskustvenim saznanjima procesnih inženjera za određivanje optimalnih vrednosti parametara kontrole procesa. Navedeno rezultira podešavanjem manje nego optimalnih vrednosti operativnih tehnoloških procesnih parametara. Optimizaciji parametara procesa pristupa se rutinski, posebno u postavljanju konačnih optimalnih vrednosti parametara. Optimalno podešavanje parametara procesa prepoznato je kao jedan od najvažnijih koraka u industriji prerade polimera za poboljšanje kvaliteta proizvoda proizvedenih tehnološkim postupkom ekstruzije (Sharma i dr., 2017). U širem kontekstu, suočeni sa globalnom konkurencijom u industriji prerade polimera i proizvodnju proizvoda od plastičnih masa, pristup tradicionalne heurističke metodologije nije više dovoljan uslov za proces proizvodnje. Stoga, postoji potreba za određivanjem optimalnih parametara za kontrolu procesa ekstrudiranja, koji mogu osigurati robusan kvalitet, minimalne varijacije i pouzdanost procesa. Istraživanje uticaja tehnoloških procesnih parametara na pojedinačne i višestruke odzive procesa predstavlja suštinu procesa proizvodnje. U skladu sa definisanim zahtevima, industrija za preradu plastike snažno se fokusira na tri važna faktora kao što su kvalitet, vreme i troškovi (Kumar i dr., 2019; Kerealme i dr., 2016; Kahraman i dr., 2006).

Njihovim sinergičnim dejstvom kompanije ostvaruju mogućnost adekvatnog reagovanja na globalnu konkurentnost i ispunjavanje povećane potražnje za kvalitetnim proizvodom sa specifikiranim zahtevima, korelisanih i konzistentnih karakteristika i niskim troškovima. Na ovaj način postiže se robusni kvalitet proizvoda, minimiziraju se varijacija procesa čime se i podiže nivo kvaliteta proizvoda. Osim smanjenja vremena ciklusa i nižih troškova proizvodnje, jedan od glavnih ciljeva tehnološkog postupka ekstruzije je poboljšanje tehničkih kvaliteta ekstrudiranih delova. Međutim, rešavanje problema vezanih za kvalitet direktno utiče na očekivanu dobit kompanija tokom procesa prerade polimera i egzistenciju na konkurentnom tržištu (Raju i dr., 2014).

S tim u vezi, najčešće je potrebno ispuniti zahteve za određenim karakteristikama kvaliteta proizvoda koji su proizvedeni primenom postupka ekstruzije. Plastični materijali zauzimaju značajan udeo u izgradnji kompleksnih infrastrukturnih sistema cevovoda od plastičnih masa za odvođenje svih vrsta zaprljanih i otpadnih voda u sistemima niskogradnje iz neposredne čovekove okoline i njihovo odvođenje do uređaja za prečišćavanje ili direktnog ispusta u odgovarajući prijemnik. Plastične cevi proizvedene tehnološkim postupkom ekstruzije najčešće se primenjuju za transport odvoda, sekundarnu i tercijarnu distribuciji pitke vode i kanala za optička vlakna. Proizvodni proces zasnovan je na tehnološkom postupku ekstruzije poliolefina (PO) i polivinil hlorida (PVC). Poliolefin uključuje polipropilenske (PPR) i polietilenske (HDPE i LDPE) cevi. Polivinil hlorid je već decenijama priznat i prepoznat plastični materijal koji se zbog svojih svojstava sve više primenjuje. U proizvodnji cevovoda, ovaj materijala nalazi primenu u vodosnabevanju, odvodnji, kao i u slučajevima odvodnje agresivnih industrijskih otpadnih voda.

Proizvodnja polivinil hlorida bazirana je na sintetičku polimerizaciju gasa vinilhlorida, koji se dobija spajanjem acetilen plina sa plinovitom solnom (hlorovodoničnom) kiselinom. U praksi dominiraju cevi proizvedene od tvrdog ili neplastificiranog polivinil hlorida UPVC (*eng. Unplasticized Polyvinyl Chloride, PVCu*).

Jednostavna ugradnja, kompletna mogućnost recikliranja PVC-a, takođe doprinosi ispunjavanju značajnih ekoloških kriterijuma u odnosu na konkurentne materijale. Definisane strategije poboljšanja kvaliteta u industriji prerade plastike za optimalno upravljanje parametrima procesa izrade PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije treba da doprinese postizanju optimalnijih tehnoloških uslova proizvodnje PVC proizvoda. Razvoj hibridnih višeodzivnih optimizacionih modela orjentisan je na optimizaciju procesa proizvodnje i tehnoloških postupaka sa ciljem poboljšanja višestrukih odziva procesa, analize, identifikacije i utvrđivanja efekata dejstva kontrolabilnih tehnoloških procesnih parametara na pojedinačne i višestruke odzive procesa (Ayele A., 2019; Pandey i Dubey, 2013; Bose i dr., 2013; Pattnaik i dr., 2013; Hsiang i dr., 2012).

1.2. Predmet istraživanja

Predmet ovog istraživanja jeste ispitivanje i sistematska analiza uticaja tehnoloških procesnih parametara na višestruke odzive procesa proizvodnje cevi od neplastificiranog PVC-a (polivinil hlorida) tehnološkim postupkom ekstruzije.

S tim u vezi, u okviru doktorske disertacije biće formiran strukturni višeodzivni hibridni optimizacioni model procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije koji predstavlja polaznu osnovu u proučavanju predmetne oblasti i ima za cilj identifikaciju, selekciju i analizu uticaja tehnoloških procesnih parametara na višestruke odzive procesa. Pri čemu, višestruki odzivi procesa biće razmatrani kroz fizičko-mehaničke karakteristike kvaliteta ekstrudiranog proizvoda i optimizaciju tehnoloških procesnih parametara. U tu svrhu, eksperimentalno istraživanje je sprovedeno u privatnoj kompaniji za proizvodnju i distribuciju proizvoda i rešenja od polimera „Peštan“ iz Arandelovca.

1.3. Ciljevi istraživanja i struktura disertacije

Osnovni cilj istraživanja, predstavljenog u ovoj disertaciji, je razvoj hibridnog višeodzivnog modela za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije, pri čemu model treba da omogući uspostavljanje analitičke međuzavisnosti između ključnih tehnoloških procesnih parametara i višestrukih odziva procesa posmatranih kroz fizičke i mehaničke karakteristike kvaliteta proizvoda.

Navedeni opšti cilj biće realizovan kroz sledeće posebne ciljeve:

- Realizaciju eksperimentalnih istraživanja na osnovu Taguchi eksperimentalnog plana i razvoj višeodzivnog hibridnog optimizacionog modela koji će omogućiti aproksimiranje i optimizaciju procesa proizvodnje podešavanjem tehnoloških procesnih parametara na optimalni nivo;
- Utvrđivanje uticaja tehnoloških procesnih parametara na pojedinačne i višestruke odzive procesa;
- Identifikaciju ključnih tehnoloških procesnih parametara i njihovih nivoa;
- Određivanje optimalne postavke seta procesnih parametara za kontrolne faktore koji doprinose minimiziranju varijacija procesa;
- Eksperimentalnu verifikaciju seta optimalnih tehnoloških procesnih parametara na osnovu razvijenog strukturnog višeodzivnog hibridnog optimizacionog modela;
- Pored upoznavanja šire naučne javnosti sa dobijenim rezultatima, cilj je ponuditi kompanijama za preradu polimera i proizvodnju proizvoda od plastičnih masa rezultate istraživanja a sa namerom njihove praktične primene.

Takođe, razvijen model može biti od koristi brojnim zainteresovanim stranama (projektantima, izvođačima, inženjerima, korisnicima i kontrolnim ustanovama) da proizvod koji se koristi poseduje sve potrebne karakteristike kvaliteta za nesmetanu, stabilnu, neproblematičnu dugoročnu eksploataciju. Ovako dobijeni rezultati imaju veliki naučni značaj, ali istovremeno i praktičnu primenu od strane procesnih inženjera u industriji prerade palstike. Poboľjšane karakteristike kvaliteta omogućuju da se tokom perioda eksploatacije proizvoda minimizira mogućnost degradacije onih karakteristika koje su za korisnike najznačajnije, minimizirajući troškova proizvodnje-proizvodnja bez škarta kao i stvaranje generičkih, vlasničkih i novih znanja o proizvodu i procesu koja se mogu primeniti na buduće proizvode.

Disertacija je strukturirana u sedam celina. U preostalih šest poglavlja predstavljani su teorijski i metodološki okvir istraživanja, eksperimentalna istraživanja, rezultati istraživanja sa analizom i diskusijom kao predlog daljih pravaca istraživanja, naučni doprinos istraživanja i mogućnost primene u praksi. U drugom poglavlju disertacije definisani su i analizirani: tehnološki postupak ekstruzije, prednosti i nedostaci postupka, studija slučaja i proizvodni program, materijali, PVC cevi i politika kvaliteta. U trećem poglavlju, prikazan je metodološki okvir, u okviru kojeg je određena metodologija istraživanja, način prikupljanja podataka, obrazložen značaj samog istraživanja. Takođe, u ovom poglavlju je definisan model sa prikazanim fazama, objašnjenjem cilja, metoda i rezultata istraživanja, definisan je kvalitet. U četvrtom poglavlju disertacije prikazan je eksperimentalni plan, u okviru kojeg je definisan eksperimentalni dizajn, nivoi i ortogonalni niz tehnoloških procesnih parametara, prezentovan je postupak proizvodnje cevi tehnološkim postupkom ekstruzije, detaljno su obrazložene metode ispitivanja i merenja vrednosti odziva procesa.

U okviru poglavlja, objašnjeni su postupci ispitivanja i merenja: čvrstoće prstena, fleksibilnosti prstena, TIR testa, debljine zida, uzdužnog skupljanja i debljine spoljašnjeg i unutrašnjeg glatkog sloja od PVC-a. U okviru petog poglavlja rada, prikazani su eksperimentalni rezultati istraživanja, parcijalna optimizacija pojedinačnih odziva procesa primenom S/N odnosa (Signal-to-Noise Ratio) i analize varijanse (ANOVA). Primenom fazi logike i analizom varijanse (ANOVA), rezultati istraživanja u petom poglavlju odnosili su se na sveobuhvatnu optimizaciju odziva procesa, na osnovu rezultata definisan je set optimalnih tehnoloških procesnih parametara, čime je formiran strukturni hibridni višeodzivni optimizacioni model za optimalno upravljanje parametrima procesa tehnološkog postupka ekstruzije. Takođe, peto poglavlje rada sadrži rezultate eksperimentalne verifikacije analitički definisanog optimuma. U šestom poglavlju disertacije, prikazana su zaključna razmatranja, s pregledom i analizom rezultata istraživanja, kao i s predlogom budućih pravaca istraživanja. U sedmom poglavlju rada, prikazan je naučni doprinos istraživanja i mogućnost primene u praksi.

1.4. Polazne hipoteze

Na osnovu navedenog predmeta i ciljeva istraživanja, polazne hipoteze su definisane na osnovu opsežnog pregleda i analize literature koja se bavi proučavanjem optimizacije parcijalnih i višestrukih odziva procesa razvojem hibridnih optimizacionih modela primenom fazi-Taguchi metodologije (Abda i dr., 2016; Rajabloo i dr., 2014; Gupta i dr., 2011). Stoga se osnovna hipoteza definiše na sledeći način:

H₀: Primenom fazi-Taguchi metodologije može se formirati hibridni višeodzivni optimizacioni model kojim je moguće optimizovati ključne tehnološke parametre procesa proizvodnje troslojnih cevi od neplastificiranog PVC-a tehnološkim postupkom ekstruzije i uspostaviti analitičku međuzavisnost između ključnih procesnih parametara i višestrukih korelisanih odziva procesa.

Pored opšte hipoteze, mogu se definisati i sledeće posebne hipoteze, koje predstavljaju osnovni okvir za istraživanje u ovom radu:

H₁: Moguće je ispitati direktni uticaj tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa PVC proizvoda, dobijenih tehnološkim postupkom ekstruzije.

H₂: Optimalni set procesnih parametara za jedan odziv nije ekvivalentan sa setom procesnih parametara koji optimizuje drugi odziv procesa.

H₃: Postoji direktan uticaj jednog tehnološkog procesnog parametara na više pojedinačnih odziva procesa.

H₄: Moguće je identifikovati optimalni set kontrolnih tehnoloških procesnih parametara i optimizovati višestruke korelisane odzive procesa.

H₅: Primenom fazifikacije prilikom formiranja višedozivnog optimizacionog modela moguće je ublažiti nepreciznost i nejasnoće informacija u modelu, čime bi se postigli optimalniji tehnološki uslovi proizvodnje PVC proizvoda.

1.5. Literaturni pregled

Literaturni pregled je zasnovan na podacima proisteklim iz pretrage radova publikovanih u akademskim časopisima pomoću Web of Science. Na osnovu analize, može se zaključiti da je aktuelnost ovih istraživanja primetna po broju publikacija, ne samo u industriji za preradu polimera već i ostalim industrijskim sektorima.

Proces proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije je neprestano aktuelan problem za proizvođače i istraživače. Mehaničke i fizičke osobine ekstrudiranih proizvoda koje zavise od određenog broja faktora, među njima su identifikovani kontrolni tehnološki procesni parametri koji imaju direktan uticaj na odzive procesa. Podešavanjem tehnoloških procesnih parametara za proces proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije, moguće je uticati na mehaničke i fizičke karakteristike finalnog proizvoda, minimiziranjem varijacija odziva procesa i pojave uzroka nastanka defekta. Takođe, osim izbora seta optimalnih vrednosti tehnoloških procesnih parametara, povećanje nivoa kvaliteta finalnog proizvoda moguće je i variranjem formulacije kompaunda kao polazne sirovine procesa, kao i modifikacijom postojećih i integriranjem ovih komponenti u proces.

Autori Lin i saradnici (2000) su u svom radu optimizovali stopu i brzinu uklanjanja materijala električnog pražnjenja, podešavanjem mašinskih operativnih parametara, vremenskog impulsa, faktora opterećenja, napona i strujne tečnosti fluida, pronalaženjem optimalnog polariteta primenom Taguchi-fazi metodologije.

Kroz istraživanje koje su realizovali Trang i saradnici (2000) primenom fazi logike i Taguchi metode, optimizovali su proces elektrolučnog zavarivanja sa višestrukim odzivima procesa. Ortogonalni niz L₈, odnos signal-šum, indeks performansi višestrukih odziva i analiza varijanse primenjeni su za proučavanje odziva u procesu elektrolučnog zavarivanja. Parametri procesa, odnosno struja luka, napon luka, brzina zavarivanja, izbočenje elektrode i temperatura predgrevanja su optimizovani uzimajući u obzir karakteristike performansi, uključujući brzinu taloženja i razblaživanje. Rezultati optimizacije pokazuju poboljšanje odziva procesa brzina taloženja za 18.8% i razblaživanje za 16.7%.

Pregledom literature Lan (2010) došao je do zaključka da su analizirani atributi parametara optimizacije Taguchi-fazi dedukcije značajno poboljšani u poređenju sa onima iz benčmarka. Razmatrana su četiri parametara u tri nivoa za optimizaciju višeatributivnog završnog CNC procesa struganja na osnovu L₉ ortogonalnog niza. Rezultati istraživanja pokazuju da je definisano devet fazi kontrolnih pravila sa pet adekvatnih lingvističkih ocena za svaki atribut. Osim toga, primenjena je TOPSIS metoda za integraciju i procenu višestrukih odziva procesa.

U sprovedenom istraživanju Sharma (2010) je analizirao proces mlaznog sečenja vodom, ispitivanjem uticaja dva odziva procesa, dubinu i širinu sečenja. Optimizacija procesa u cilju povećanja produktivnosti izvršena je primenom Taguchi-fazi metodologije.

Rezultati istraživanja ukazuju da je optimalna kombinacija procesnih parametara: pritisak 300 Kgf/cm², brzina pomeranja mlaza 18.41 mm/s, distanca 5 mm i broj prolaza 3. Takođe, utvrđeno je da pritisak (65.46%) predstavlja najuticajniji procesni parametar, zatim distanca (14.08%), brzina prelaska (11.68%) i broj prolaza (8.78%).

U istraživanju objavljenom 2011. godine, Gupta i saradnici se bave višeodzivnom optimizacijom CNC tokarenja velike brzine AISI P-20 alatnog čelika korišćenjem prevlaka od volfram karbida obloženih TiN primenom hibridne fazi-Taguchi metodologije. Procesni parametri obrade (brzina rezanja, brzina pomaka, dubina rezanja, poluprečnik nosa i okruženje rezanja) su optimizovani razmatrajući višestruke performanse procesa (hrapavost površine, vek trajanja alata, sila rezanja i utrošak potrebne energije). Eksperimentalni dizajn bio je baziran na ortogonalnom nizu L₂₇. Taguchi koncept ortogonalnih nizova, S/N odnos, ANOVA i primena fazi logike u cilju optimizacije parametara, kroz jednu sveobuhvatnu izlaznu meru (COM). Analiza rezultata pokazuje da je brzina rezanja 160 m/min, poluprečnik nosa od 0.8 mm, pomak od 0.1 mm/obr., dubina reza od 0.2 mm i kriogeno okruženje predstavljaju optimalne vredosti parametara za CNC struganje alatnog čelika AISI P-20 (Gupta i saradnici, 2011).

U istraživanju koje su sprovedeli Bose i saradnici (2013) primenom hibridnog pristupa razvijen je TMI (tempirano ubrizgavanje u razvodnik) primenom ECU (elektronske kontrolne jedinice) sa različitom strategijom ubrizgavanja za isporuku vodonika u usisnu granu. Usvajanjem navedene tehnike u postojećem dizel motoru primećeno je značajno poboljšanje performansi i parametara sagorevanja. Studija takođe pokušava da objasni primenu Taguchi analize zasnovane na fazi logici za optimizaciju parametara performansi, tj. BSEC (specifična potrošnja energije kočnice), Vol. Eff. (volumetrijska efikasnost) i BTHE (termalna efikasnost kočnice) za različite strategije ubrizgavanja vodonika.

Autori Hsiang i saradnici (2012) su u svojoj studiji istraživali uticaj četiri procesna parametra: temperature zagrevanja gredice, brzinu ekstruzije, temperature kontejnera i lubirkanata koji maksimiziraju višestruke karakteristike performansi procesa ekstruzije nosača za bicikle od legure magnezijuma AZ31 i AZ61. Odnosi signal-šum (S/N) za tri karakteristike kvaliteta: čvrstoća spljoštenja, čvrstoća loma u T-prorezu i opterećenje ekstruzijom, izračunati su na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih definisanim eksperimentalnim planom primenom ortogonalnog niza L₉. Konačno, mehanička svojstva nosača za bicikle od legure magnezijuma AZ31, AZ61 i legure aluminijuma A6061 testirana su u cilju identifikacije razlike između materijala. Rajabloo i saradnici (2014) su istraživali optimizaciju procesa proizvodnje kobalt sulfida. Rezultati metode Taguchi su potvrđeni, optimalni uslovi za proizvodnju CoS₂ sastoje od odnosa S/Co od 8 i temperature reakcije od 70°C. Takođe, rangiranje efektivnih parametara temperatura reakcije i odnos S/Co su najznačajniji i najuticajniji procesni parametri. Modeliranjem rezultata dobijenih primenom Taguchi metode od strane ANFIS-a identifikovana je interakcija između parametra temperature reakcije i odnosa S/Co.

Abd i saradnici (2016) u svom radu istražuju problem multi-objektivne optimizacije dinamičkog rasporeda u robotskim fleksibilnim montažnim ćelijama (RFAC). Hibridnim pristupom integracijom Taguchi metode sa teorijom fazi logike postignuta je višeciljna optimizacija dinamičkog rasporeda RFACs. Primenom L₉ ortogonalnog niza, četiri ulazna parametra: sekvenciranje, pravilo otpremanja, korišćenje ćelije i limitiranje roka, sa tri odziva vremensko-troškovni profit, ukupno kašnjenje i broj nerealizovanih aktivnosti, identifikovane su optimalne vrednosti različitih faktora za pravilo sekvenciranja TLPT, pravilo dispečerstva SNK, korišćenje ćelije od 95% i limitiranje rokova. Najznačajniji faktori koji utiču na strategiju planiranja su identifikovani kao faktor C (stepen iskorišćenja ćelije) i faktor D (limitiranost roka), koji čine približno 92%. Rezultati istraživanja pokazuju poboljšanje od 11%.

Khan i saradnici (2014) u svom radu fokusiraju se na različite nedostatke u procesu ekstruzije cevi i njihovom uticaju na kvalitet proizvoda. Analizom i pregledom literature zaključuju da je za

pouzdan proces proizvodnje cevi tehnološkim postupkom ekstruzije, neophodno identifikovati, kontrolisati i pratiti parametre procesa koji doprinose kvalitetu proizvoda. U radu navode, da je neadekvatno podešavanje operativnih procesnih parametara jedan od uzroka pojave problema sa kvalitetom proizvoda i da je sistemskim pristupom moguće poboljšanje procesa ekstruzije, minimiziranjem uzroka pojave nedostataka.

Autori Kumar i saradnici (2015) u svom radu se bave primenom Taguchi metoda za parcijalnu optimizaciju parametara procesa i poboljšanje kvaliteta komponenti. Cilj ove studije je bio da se ilustracija postupka koji je usvojen, primeni Taguchi metoda na mašini za ekstruziono duvanje folije. Ortogonalni niz, odnos S/N primenjen je za proučavanje karakteristika performansi zatezne čvrstoće, veći odnos S/N odgovara boljim karakteristikama kvaliteta. Stoga, optimalan nivo parametara procesa bio je nivo sa najvećim odnosom vrednosti S/N. U ovoj analizi razmatrana su četiri parametra: temperatura topljenja, brzina ekstruzije, pritisak ekstruzije i brzina namotavanja. Shodno tome, odabran je odgovarajući ortogonalni niz i eksperimenti su realizovani. Nakon sprovedenih eksperimenata, izmerena je zatezna čvrstoća i izračunate su vrednosti S/N. Pomoću grafikona i tabele, određene su optimalne vrednosti parametara procesa.

Autori Kumar i Dubey (2015) u svom istraživanju predstavljaju sistematski pristup za pronalaženje osnovnih uzroka pojave defekata i disperzije u procesu proizvodnje plastičnih cevi tehnološkim postupkom ekstruzije. Ključno je i prioritetno, u procesu proizvodnje plastičnih cevi identifikovati procesni parametar i defekt, zatim pristupiti optimizaciji procesa. Za optimizaciju u ovom radu primenjena je Taguchi metoda, koja predstavlja statistički pristup za parcijalnu optimizaciju procesa i poboljšanje kvaliteta ekstrudiranog proizvoda. Eksperiment je analiziran primenom Minitab 17 statističkog softvera, izvršena je interpretacija rezultata i izabrana su optimizovana podešavanja vrednosti tehnoloških parametara. U ovoj analizi su razmatrana tri procesna parametra: brzina izlivanja, temperatura topljenja, brzina ekstrudera. Shodno tome, odabran je odgovarajući ortogonalni niz i sprovedeni su eksperimenti. Nakon realizacije eksperimenata, izmereni su dijometri i izračunate vrednosti odnosa signal/šum.

Sharma i saradnici (2017) su pažnju posvetili pitanju otpora zida na pritisak kod cevi od polietilena visoke gustine (HDPE) koje imaju širok spektar primene prilikom distribuiranja vode, odvođenja otpadnih voda ili potencijalno štetnih fluida kroz podzemne kanale. Dakle, navedene cevi su izložene pritisku fluida koji se transportuje. Ovaj rad podrazumeva optimizaciju otpornosti na pritisak HDPE cevi primenom Taguchi metode u predloženoj strategiji optimizacije. Sprovodi se plan eksperimenata (DOE), pri čemu se analiziraju različite kombinacije kontrolnih parametara procesa uzimajući u obzir više nivoa podešavanja svakog kontrolnog procesnog parametra. Primenjen je koncept odnosa signal-šum (odnos S/N) i na kraju su dobijene optimalne vrednosti podešavanja kontrolnih parametara procesa: temperatura potisne zone 166°C, brzina prebacivača 0.8 o/min i temperatura glave matrice 192°C. Izveden je još jedan ciklus eksperimenata, u cilju verifikacije rezultata analize i istraživanja, a izmerene vrednosti su bile u saglasnosti sa izmerenim centralnim eksperimentalnim nalazima. Rezultati istraživanja prikazuju da je postignuto značajno poboljšanje otpora zida cevi na pritisak sa 0.60 na 1.004 Mpa.

Kako bi se istražio uticaj parametra vezanog za ubrizgavanja materijala u kalup na ponašanje proizvoda od polietilenske plastike u vezi sa protokom, Lal i saradnici (2013) razmatraju različita zapažanja kod polietilenskog materijala niske gustine (LDPE) koji se koristi kao sirovina za proces proizvodnje plastičnih proizvoda. Primenom Taguchi metode, navedeno istraživanje je pokazalo da vreme hlađenja predstavlja primarni faktor za LDPE materijal, a pritisak pri dopuni i ubrizgavanju, pokazali su minimum efekta dejstva.

Ikram i saradnici (2013) u radu razmatraju efekat i optimizaciju osam kontrolnih parametara na brzinu uklanjanja materijala (MRR), hrapavost površine i preoz u procesu mašinske obrade električnim pražnjenjem (VEDM) za alatni čelik D2. Primenjen je Taguchi L₁₈ ortogonalni niz za formiranje eksperimentalnog dizajna. Eksperimenti su realizovani podešavanjem procesnih parametara: brzina dodavanja žice, dielektrični pritisak, vreme uključenja impulsa, vreme isključenja impulsa, otvoreni napon, napetost žice i servo napon variranjem debljine materijala. Analiza varijanse

(ANOVA) i odnos S/N primenjuju se kao statističke analize u cilju identifikacije značajnih kontrolnih faktora i postizanje optimalnih nivoa vrednosti procesnih parametara. Pored toga, razvijeni su modeli linearne regresije i nadogradnje za hrapavost površine, prorez i brzinu uklanjanja materijala (MRR). Utvrđeno je da su rezultati verifikacionih eksperimenata u saglasnosti sa prediktivnim rezultatima. Takođe, utvrđeno je da je vreme uključenja impulsa najznačajniji faktor koji utiče na hrapavost površine, prorez i brzinu uklanjanja materijala.

Patil i Sadaphale (2018) su u svom istraživanju istakli da parametri procesa imaju značajan uticaj na kvalitet procesa proizvodnje bilo kog proizvoda i da je veliki broj procesnih parametara involviran u različite proizvodne procese. Taguchi metoda uključuje identifikaciju odgovarajućih kontrolnih faktora za postizanje optimalnih rezultata procesa. U radu su dati parametri procesa koji su uključeni u proces ekstruzije i identifikovana je potreba za optimizacijom. U navedenom radu, razmatrani su sledeći operativni tehnološki procesni parametri: brzina izlivanja, brzina zavrtnja, temperatura, vakuumski pritisak, temperatura matrice, temperatura potisne zone, temperatura topljenja, temperatura bubnja za punjenje, brzina ekstruzije, temperatura zavrtnja, vreme duvanja, vreme izduvanja/hlađenja. Nakon toga, u skladu sa navedenim, odabrali su adekvatan ortogonalni niz i pristupili realizaciji eksperimenata sa ciljem pravilnog razumevanja procesa ekstruzije, minimiziranju nedostataka i njihovog uticaja na proizvod.

Autor Mekonnen, u svom istraživanju publikovanom 2018. godine (Mekonnen, 2018), se bavi kompanijom *Etiopija Plastika* (EPSC) u cilju minimiziranja gubitaka i postizanja definisanih poslovnih ciljeva. Naime, primenjena je Taguchi metoda za optimizaciju procesa, eksperimentalni plan (DOE) i funkcija gubitka. Gubitak kvaliteta kod definisanog oblika realizacije procesa, procenjen je primenom Taguchi funkcije gubitka i dokazana je potreba za poboljšanjem i optimizacijom procesa. U cilju poboljšanja, primenjen je DOE za optimizaciju operativnih parametara proizvodnog procesa. Temperature zone su razmatrane kao tehnološki procesni parametri. Ortogonalni nizovi primenjeni u ovom procesu optimizacije su bili L₈, L₁₆ i L₂₇, za proces proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije. Eksperiment je analiziran primenom komercijalnog softvera Minitab 15, izvršena je interpretacija rezultata i izabrana su optimizovana podešavanja parametara. Primenom identifikovanih vrednosti parametara procesa, vrednost učinka je predviđena, na osnovu prediktivnih vrednosti osobina proizvoda, izračunata je funkcija gubitka i izvršena komparacija vrednosti sa gubitkom kvaliteta pre implementacije DOE. Na osnovu navedenog, moglo se zaključiti da se primenom Taguchi metode DOE dolazi do poboljšanja kada je reč o gubitku kvaliteta koji nastaje zbog odstupanja u realizaciji (uključujući otpad) za oko 89.95% u odnosu na odabrane finalne proizvode iz proizvodnog programa kompanije.

Autor Dao (2016) je u svom radu optimizovao višestruke karakteristike kvaliteta mehanizama za usmeravanje (CGM), kompaktne veličine koji služi kao precizna platforma za pozicioniranje elektronskog mikroskopa. U istraživanju je primenjen hibridni pristup zasnovan na Grey-Taguchi fazi metodologiji.

Autori Sisay i saradnici (2013) u svom istraživanju razmatraju određene uzroke neusaglašenosti u procesu ekstruzije plastike. Analizirani su podaci o primarnim uzrocima defekta proizvoda i proučavan je relativan uticaj na cevi (HDPE Ø50mm, obična cev Ø25mm), vodove (F/C Ø16mm) i poluproizvode (F/B 8cm/220µm). Ispitivan je uticaj četiri nezavisna parametra procesa: vakuumski pritisak, brzina izlivanja, brzina zavrtnja i temperatura. Identifikovani su nedostaci kao što su hrapavost površine i ogrebotine, konveksnost, tragovi potonuća, asimetričnost debljine zida, neujednačena širina folije, varijacije u dimenzijama, problemi sa centriranjem, kidanje i tragovi. Na ovom konkretnom primeru, primenom Taguchi funkcije gubitka, izračunata je funkcija gubitka i izvršena komparacija vrednosti sa gubitkom kvaliteta pre primene DOE. Na osnovu analize došlo se do zaključka da se primenom Taguchi metode dolazi do poboljšanja kada je reč o gubitku kvaliteta zbog odstupanja u realizaciji za 85.31% u odnosu na odabrane proizvode.

Sandip i saradnici (2015) proučavali su nedostatke procesa ekstruzije analizirajući određene karakteristike kvaliteta cevi, u cilju optimizacije procesa proizvodnje plastičnih cevi primenom Taguchi metode. Za istraživački rad odabrana je kompanija *Šivraj HI-Tek*, koja se bavi proizvodnjom

cevi za navodnjavanje. Eksperiment je analiziran primenom komercijalnog softvera Minitab 16, izvršena je interpretacija i izabrana su optimizovana podešavanja vrednosti procesnih parametara. Nakon predikcije rezultata, izračunata je funkcija gubitaka kvaliteta i izvršena komparacija vrednosti funkcije pre implementacije DOE. Istraživački radovi su optimizacijom poboljšali postojeći proces povećanjem i održavanjem nivoa kvaliteta proizvoda.

Autori Kerealm i saradnici (2016) su u svojoj studiji sistematski proučavali proces proizvodnje cevi od neplastificiranog PVC-a tehnološkim postupkom ekstruzije. Studija počinje: identifikacijom potencijalnih problema u kvalitetu proizvoda koji negativno utiču na stopu prerade ili recikliranja, određivanjem prioriteta kod onih problema u kvalitetu za koje je potrebna intervencija najvišeg menadžmenta kompanije u cilju minimizacije i izvođenjem analize uzroka i posledica da bi se ojačali i dijagnostikovali uzroci koji odgovaraju identifikovanim, prioritarnim problemima u kvalitetu. Konačno, Taguchi planu eksperimenta se sistematski pristupa iz postojećih zadatih polaznih tačaka temperature ekstrudera APF da bi se identifikovale moguće izlazne vrednosti odziva koje su približne ili najbliže Taguchi dizajnu, L_{27} OA. Pored toga, Taguchi funkcija gubitka je detaljno razmotrena.

Kumar i Dubey (2015) u svom radu razmatraju osnovne uzroke nastanka različitih vrsta defekata i disperzije u industriji prerade plastike, procesu proizvodnje cevi tehnološkim postupkom ekstruzije. Za optimizaciju u ovom radu primenjena je Taguchi metoda. Eksperiment je analiziran primenom Minitab 17 softvera, izvršena je interpretacija i izabrane su optimizovane vrednosti podešavanja procesnih parametara. U sprovedenom istraživanju, razmatrana su tri faktora: brzina izlivanja, temperatura topljenja i brzina ekstrudera. Shodno tome, odabran je odgovarajući ortogonalni niz i sprovedeni su eksperimenti. Nakon sprovođenja eksperimenata, izmereni su dijametri i izračunate su vrednosti odnosa signal/šum. Identifikovan je set optimalnih vrednosti podešavanja tehnoloških procesnih parametara.

Autori Kumar i saradnici (2019) u svom eksperimentalnom istraživačkom radu bazirali su se na proučavanje tehnoloških procesnih parametara uključenih u proces proizvodnje PVC cevi. Nakon procesa ekstruzije uočeni su brojni defekti kao što su asimetričnost u debljini zida, neujednačen dijametar, hrapava površina i niska zatezna čvrstoća. Primarni fokus bila je debljina zida cevi, posmatrali su i analizirali relevantne procesne parametre, primenjena je Taguchi metoda. Uz pomoć softvera za statističku obradu Minitab 18 i primenom L_9 ortogonalnog niza, četiri procesna parametra su optimizovana, što rezultira većom produktivnošću i minimiziranjem pojave defekta. U istraživanju koje su sproveli Joshi i Goyal (2018), fokus autora bio je maksimizacija produktivnosti i kvaliteta HDPE cevi. Tokom procesa proizvodnje, uočeni su problemi kao što su niska zatezna čvrstoća, problem centriranja, asimetričnost u debljini zida cevi, pukotine i varijacija u prečniku, što rezultira niskom produktivnošću. Softver Minitab 18 je primenjen za izračunavanje vrednosti S/N odnosa, a Taguchi pristup za parcijalnu optimizaciju u cilju poboljšanja zatezne čvrstoće HDPE cevi \varnothing 90 mm. Odabran je L_9 ortogonalni niz i radi postizanja boljeg rezultata odabran je pristup „Veće je bolje.“ U radu su razmatrani procesni parametri: brzina ekstruzije, temperatura topljenja, brzina namotavanja i pritisak ekstruzije. Eksperimenti su izvedeni, zatezna čvrstoća je proverena na različitim trakama i identifikovan je set optimalnih vrednosti podešavanja tehnoloških procesnih parametara.

Ariani i saradnici (2019) bazirali su istraživanje na problem usklađenosti plastičnih cevi sa zahtevima standarda za (5.5%) i prebačajem tolerancije ($\pm 1\%$), koji su definisani politikom kvaliteta kompanije. U ovoj studiji, primenjen je metod sedam koraka unapređenja kvaliteta i Taguchi metoda za analizu i poboljšanje karakteristike kvaliteta cevi. Metod sedam koraka, primenjuje se za identifikaciju faktora koji utiču na pojavu defekta. Taguchi metod daje optimalnu kombinaciju faktora koji definišu procesne parametre: nivo temperature rashladne tečnosti 20°C na nivou 2, temperatura ekstrudera od 150°C na nivou 1, brzina izvlačenja od 18 m/s na nivou 1 i pritisak od 0.06 MPa štampanja na nivou 1, predstavljaju približno optimalni set vrednosti operativnih procesnih parametara.

Pawar i saradnici (2017) istraživali su uticaj parametra procesa ekstruzije za parcijalnu optimizaciju odziva procesa, debljina zida PVC cevi primenom Taguchi metode. Eksperimentalno istraživanje je realizovano u kompaniji za proizvodnju plastičnih cevi, *Jain Irrigation Systems*

Limited. Eksperimenti su analizirani primenom Minitab 17 statističkog softvera, izvršena je interpretacija rezultata i izabrana su optimizovana podešavanja vrednosti parametara.

Ayele (2019) je fokus istraživanja usmerio na optimizaciju procesnih parametara u procesu ekstruzije troslojne cevi od neplastificiranog PVC-a integracijom metoda eksperimentalnog dizajna Taguchi i RSM. U radu se razmatraju potencijalni problemi sa kvalitetom proizvoda kao posledica procesa ekstruzije. Sistematskim pristupom analizira se pet tehnoloških procesnih parametara i njihov uticaj na odzive procesa. Identifikuje se set optimalnih procesnih parametara koji optimizuje dva odziva procesa debljinu i širinu PVC cevi. Optimalni nivo parametara S/N odnosa za minimalnu vrednost varijacije debljine i širine cevi je brzina napajanja-1, pritisak vakuuma-2, brzina smicanja-1, brzina pužnog vijka-1, temperatura barela u prvoj zoni-3, temperatura drugoj zoni -1 i temperatura u zoni tri-2 (A₁, B₂, C₁, D₁, E₃, F₁, G₂). Prema sprovedenom istraživanju Huang i Liao (2002), uviđaju da temperatura mlaznice alata i brzina protoka imaju značajan uticaj na dijametar i debljinu ekstrudanta u postupku kontinuiranog ekstruzionog duvanja polietilena visoke gustine (HDPE).

Oke i saradnici (2006), bazirali su svoje istraživanje na optimizaciji protoka u postupku ekstruzije plastike. Ulazni parametri procesa efektivna sila trenja između površina materijala, zidova ekstruzione komore i prečnika ekstruzione komore, definišu brzinu protoka čvrstog otpadnog materijala koji se reciklira kroz komoru za ekstruziju. Navedenom problematikom bavili su se Kamarudin i saradnici (2010) koji su istraživali performanse plastike (75% polipropilena i 25% polietilena LPDE niske gustine) u smislu ponašanja proizvoda tokom procesa uzdužnog skupljanja. U istraživanju je prikazano da optimalno ukupno uzdužno skupljanje iznosi 0.1521 cm. Na osnovu rezultata analize, identifikovan je set optimalnih vrednosti procesnih parametara.

U istraživanju Narasimha i Rejikumar (2013) predstavljen je sistematski pristup u pronalaženju osnovnih uzroka nastanka defekata i škarta u procesu ekstruzije plastike. Dijagram uzroka i posledica je implementiran u cilju identifikacije osnovnih uzroka nastanka defekata u procesu. Četiri nezavisna operativna parametra procesa: pritisak vakuuma, temperatura, brzina vijka, brzina smicanja (take-off speed) i karakteristike materijala, identifikovani su kao najznančajniji uzroci pojave defekata iz dijagrama uzroka i posledica. Gubitak kvaliteta za trenutnu varijaciju performansi je izračunat primenom Taguchi principa funkcije gubitka i verifikovan je zahtev za poboljšanjem. U ovom radu primenjen je dizajn eksperimenta (DOE) za optimizaciju parametara procesa ekstruzije cevi od polietilena visoke gustine (HDPE) Ø50mm i obične cevi Ø25mm. Autori Cirak i Kozan (2019) obrazložili su u svom istraživanju efekat uticaja parametara procesa ekstruzije temperature barela i brzine pužnog vijka na debljinu sloja premaza žice.

Mu i saradnici (2013) u svom istraživanju bavili su se ispitivanjem uticaja procesnih parametara tehnološkog postupka ekstruzije plastičnih profila sa metalnim umetkom na tok procesa topljenja polimera. Kroz istraživanje detaljno su prikazali ekvilibrijum protoka koji je postignut optimalnim dizajnom dva procesna parametra uključujući volumen brzine protoka i brzinu kretanja metalnog umetka.

U istraživanju koje su realizovali Mamailis i saradnici (2012), ispitivanjem uticaja procesnih parametara na uslove obrade alata za ekstrudiranje, precizirali su uslove obrade koji rezultiraju maksimizacijom homogenosti protoka na mlaznici dizne alata tokom postupka ekstruzije cevi od polietilena visoke gustine (HDPE).

Pareek i Bhamniya (2013) u svom istraživanju obrazložili su postupak utvrđivanja optimalnih vrednosti i uticaja parametara na proces. Autoru su utvrdili optimalne vrednosti procesnih parametara uključujući temperaturu topljenja, pritisak ubrizgavanja i vreme hlađenja za tehnološki postupak brizganja plastičnih masa. Prema istraživanjima nekih autora, moguća je istovremena optimizacija višestukih korelisanih odziva procesa što dovodi do poboljšanja kvaliteta finalnih proizvoda u industriji za proizvodnju i preradu proizvoda od plastičnih masa tehnološkim postupkom brizganja (Chen i dr., 2013). Uticaj parametara procesa izučavali su Lal i Vasudevan (2013) i obrazložili u svom istraživanju optimalnu kombinaciju procesnih uslova za skupljanje u kalupu polietilena niske gustine (LDPE) tokom procesa brizganja.

Autori Kumar i Goyal (2019) u svom istraživanju su sistematski proučavali uticaj procesnih parametara na pojavu defekta ekstrudiranih PVC cevi. Fokusirali su se na procesne parametre koji najčešće utiču na analiziranu karakteristiku kvaliteta, debljinu zida cevi u cilju povećanja produktivnosti i minimiziranjem nastanka defekta. Optimizacijom su identifikovani operativni parametri procesa i rezultati istraživanja pokazuju da debljina zida ima zahtevanu nominalnu vrednost podešavanjem operativnih parametara procesa na sledeće vrednosti: temperatura barela 205°C, temperatura mlaznice 170°C, brzina ekstrudera 25 o/min i pritisak ekstrudera 175 MPa.

1.6. Literaturna praznina

Da bi se dobilo dovoljno informacija i najbolje razumevanje predmeta i oblasti proučavanja, prilikom pretrage uključeni su različiti literaturni izvori u obliku udžbenika, časopisa, članaka, vesti, izveštaja, pregledanih radova. Sažetak literature, prikazan je u tabeli 1.

Tabela 1. Rezime pregledanih radova

Referenca	Autori	Godina	Problem kvaliteta proizvoda/procesa	Metoda
				Materijal
1	Trang i saradnici	2000	Elektrolučno zavarivanje	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
2	Lin	2000	Eliminacija materijala električnog pražnjenja	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
3	Lan	2010	Mašinska obrada metala-CNC struganje	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
4	Sharma	2010	Sečenje mlazom vode velike brzine	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
5	Gupta i saradnici	2011	CNC tokarenje AISI P-20 alatnog čelika	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
6	Hsiang i saradnici	2012	Ekstruzija nosača za bicikle od legure magnezijuma AZ31 i AZ61	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
7	Bose i saradnici	2013	Tempirano ubrizgavanje u razvodnik	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
8	Rajabloo i saradnici	2014	Optimizacija procesa proizvodnje kobalt sulfida	Taguchi metoda, fazi logika, ANOVA
9	Abda i saradnici	2016	Multi-objektivna optimizacija dinamičkog rasporeda u robotskim fleksibilnim montažnim ćelijama	Taguchi metoda, fazi logika, analiza varijanse, (ANOVA)
10	Dao	2017	Karakteristike kvaliteta mehanizama za usmeravanje (CGM)	Taguchi-Grey-fazi metodologija
11	Ayele	2019	Ekstruzija PVC cevi, debljina i širina zida cevi	Taguchi metoda, RSM, ANOVA

Tabela-Nastavak I				
12	Huang i Liao	2002	Ekstruzija cevi od polietilena visoke gustine HDPE	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, ANOVA
13	Oke i saradnici	2006	Ekstruzija plastike-brzina protoka	Taguchi metoda, S/N odnos, analiza varijanse (ANOVA)
14	Kamarudin i saradnici	2010	Ekstruzija cevi od polietilena niske gustine LPDE	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, analiza varijanse (ANOVA)
15	Mamailis i saradnici	2012	Ekstruzija cevi od polietilena visoke gustine HDPE	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, analiza varijanse (ANOVA)
16	Narasimha i Rejikumar	2013	Ekstruzija cevi od polietilena visoke gustine HDPE	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, analiza varijanse (ANOVA)
17	Mu i saradnici	2013	Ekstruzija plastičnih profila sa metalnim umetkom	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, analiza varijanse (ANOVA)
18	Pareek i Bhamniya	2013	Brizganje	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, analiza varijanse (ANOVA)
19	Chen i saradnici	2013	Brizganje	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, analiza varijanse
20	Lal i Vasudevan	2013	Brizganje	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, analiza varijanse (ANOVA)
21	Ikram i saradnici	2013	Mašinske obrade (VEDM) za alatni čelik	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, analiza varijanse (ANOVA)
22	Sisay i saradnici	2013	Ekstruzija cevi od polietilena visoke gustine HDPE	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, ANOVA
23	Khan i saradnici	2014	Ekstruzija plastičnih cevi	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, ANOVA
24	Sandip i saradnici	2015	Ekstruzija plastičnih cevi	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, ANOVA
25	Kerealm i saradnici	2016	Ekstruzija UPVC cevi	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, ANOVA
26	Pawar	2017	Ekstruzija PVC cevi	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, analiza varijanse, (ANOVA)

Tabela-Nastavak II				
27	Joshi i Goyal	2018	Ekstruzija plastičnih HDPE cevi	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, ANOVA
28	Kumar i Goyal	2019	Ekstruzija UPVC cevi	Taguchi metoda, DoE, S/N odnos, ANOVA
29	Kumar	2019	Ekstruzija UPVC cevi	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, ANOVA
30	Cirak i Kozan	2019	Debljina sloja premaza žice	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, ANOVA
31	Ariani i saradnici	2019	Ekstruzija UPVC cevi	Taguchi metoda, S/N odnos, DoE, ANOVA

Na osnovu analize, može se izvesti zaključak da postoji zainteresovanost za navedenu temu, o čemu svedoči broj publikacija.

Literaturni pregled otkriva da se u najvećem broju vodećih radova uglavnom razmatra parcijalna optimizacija. Taguchi tehnika robusnog dizajna uspešno je primenjena u velikom broju optimizacija procesa u odnosu na jednu definisanu karakteristiku kvaliteta. U slučaju kada postoje zahtevi kupca za više karakteristika kvaliteta, potrebno je identifikovati set procesnih parametara koji obezbeđuje jedinstven skup optimalnih vrednosti parametara procesa, sa funkcijom cilja i sposobnosti da zadovolji specificirane zahteve za sve karakteristike. Stepenn kompleksnosti problema se znatno povećava u slučaju kada su karakteristike kvaliteta u međusobnoj korelaciji, što je veoma česta pojava. Stoga, optimizacija procesa u odnosu na više karakteristika kvaliteta postaje sve aktuelniji problem u savremenom proizvodnom okruženju.

Pregledane praznine u literaturi su sažete na sledeći način:

- Na osnovu raspoložive literature širokog literaturnog pregleda, došlo se do zaključka da ne postoji istraživanje koje na sistematski način prikazuje istovremenu i sveobuhvatnu optimizaciju višestrukih korelisanih odziva u procesu ekstruzije plastike.

- Većina pregledane literature nije razmatrala integraciju Taguchi metode i fazi logike u procesu ekstruzije plastike.

I pored velikog broja istraživanja sprovedenih u industriji prerade plastičnih masa, rezultati istraživanja ne prikazuju više od dva osnovna uzroka za pojavu neusaglašenosti i načinu za njihovo otklanjanje tokom procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije.

Dakle, u ovom istraživanju prikazana je optimizacija osam tehnoloških procesnih parametara uz istovremeno poboljšanje šest odziva procesa posmatranih kroz korelisane mehaničko-fizičke karakteristika kvaliteta UPVC cevi integracijom Taguchi metode i fazi logike.

Poglavlje 2
TEORIJSKI OKVIR

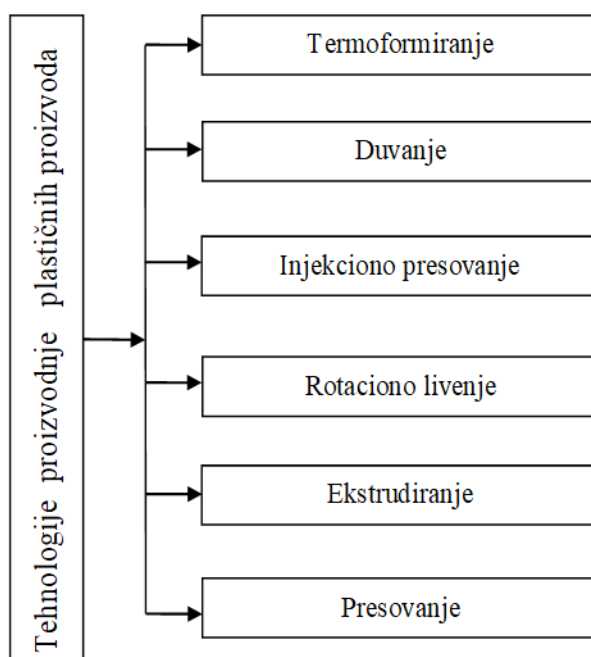
2. TEORIJSKI OKVIR

2.1. Ekstruzija

Prerada plastičnih masa obuhvata sve postupke kojima se od polimera (sirovine) dobijaju poluproizvodi ili finalni proizvodi. Postupak prerade određuje vrsta, sastav i stanje polimera (Harold i dr., 2005). Tehnički progres i dinamični uslovi okruženja, zahtevaju proširenje asortimana proizvoda u savremenim proizvodnim sistemima, poboljšanje i održavanje nivoa kvaliteta proizvoda sa koreliranim karakteristikama, smanjenjem rokova i troškova proizvodnje, kontinuiranom potrebom unapređenja procesa, itd.

Autori (Nedić i Đukić, 2004) navode da se postupci prerade mogu klasifikovati prema tehnologiji prerade, nezavisno od hemijskih i fizičkih promena koje se odigravaju tokom postupka prerade. Prema istim autorima, primenjuju se dva bazična postupka za preradu polimera: postupak bez upotrebe pritiska i postupak uz upotrebu pritiska.

Diferencijacija tehnologija za proizvodnju proizvoda od plastike, šematski je prikazana je na slici 1.



Slika 1. Najzastupljenije tehnologije proizvodnje proizvoda od plastike (Matin, 2014)

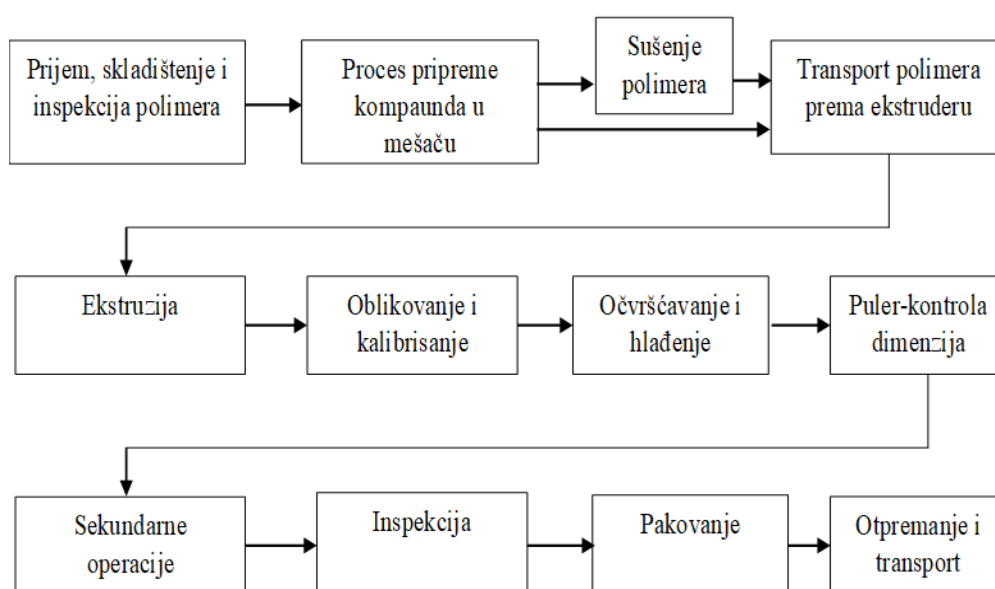
Ekstrudiranje ili istiskivanje, potiskivanje predstavlja jedan od najstarijih i najpopularnijih primenjivanih postupaka prerade polimernih materijala. Prva mašina za ekstruziju termoplastičnih materijala, konstruisana je 1935. godine u Nemačkoj. Osnovni princip dvostrukog pužnog vijka ekstrudera za termoplastične materijale patentiran je u Italiji iste godine. Od 1950. godine, intenzivira se broj naučnih istraživanja procesa ekstruzije (Rauwendaal, 2014).

Ekstrudiranje polimernih materijala za proizvodnju gotovih proizvoda za industrijske ili potrošačke aplikacije predstavlja integrisani kontinuirani proces sa višestrukim ulazima i kompleksnim višestrukim izlazima. U odnosu na prerađene količine polimernih materijala, postupak ekstrudiranja je na prvom mestu (Matin, 2014).

Zbog specifičnih zahteva tržišta, ekstruzija kao kontinuirani proces može se prilagoditi za proizvodnju širokog spektra finalnih ili polugotovih proizvoda. Autori Goff i Whelan (2000) navode da se proizvodi dobijeni navedenom tehnologijom mogu se podeliti na:

- Sirovine za druge proizvodne procese: ekstruderi su u širokoj upotrebi kao dozeri ili mikseri. Izlaz iz kompresora ekstrudera je usitnjeni granulat koji se dalje primenjuje kao sirovina za drugu vrstu procesa, kao što je ekstruziono brizganje.
- Filmove i folije,
- Plastične cevi,
- Plastična creva ,
- Oplastane žice i kablovi,
- Profile,
- Vlakena, filamente (folio-niti) i mreže,
- Glatke ploče,
- Veštačke pene.

Finalni proizvodi široke potrošnje neophodno je da zadovoljavaju definisane zahteve standarda i specificirane zahteve potražnje. Na slici 2 šematski je prikazan bazični proces ekstruzije, a svaka faza u nastavku opisana.



Slika 2. Šematski prikaz procesa ekstruzije (Izvor: Harold i dr., 2005)

U prvoj fazi procesa ekstruzije, pristupa se prijemu, pregledu i skladištenju polimernih materijala. Postupak prerade kompaunda se realizuje u dve faze, prva faza obuhvata pripremanje kompaunda koji se najčešće naziva suvi prah. Ovaj proces se realizuje u mešaču velike brzine.

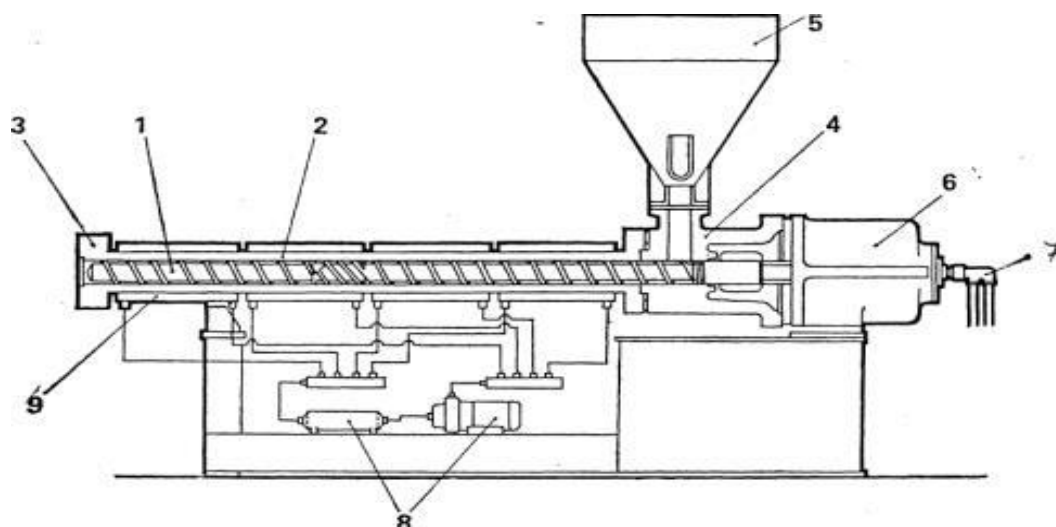
Kompaud se uglavnom sastoji od polimera, punila, sredstva za ekspanziju (SZE)-kiker i raznih vrsta aditiva.

Kada se mešavina polimera propisno osuši i sastojci homogenizuju, formulacija se doprema i ubacuje u ekstruder. Navedenim postupkom počinje druga faza procesa, transformacija kompaunda u neprekidni termoplastični materijal, usmerava se i transportuje u kalup za oblikovanje ekstrudata.

Nakon izlaska iz kalupa, proizvod se hladi i učvršćuje u željeni oblik i povlači se iz ekstrudera konstantnom brzinom da bi se postigao odgovarajući poprečni presek. Treća faza postupka ekstruzije obuhvata sekundarne operacije: obeležavanje, sečenje, itd. Na kraju, proizvod se pregleda, pakuje, skladišti ili transportuje.

Šematski prikaz jedne mašine za ekstrudiranje sa svojim osnovnim elementima, prikazan je na slici 3. U ekstruder, punjenjem levka za doziranje (5), polaznom sirovinom u čvrstom stanju najčešće u obliku granula ili praha, gravitacijskim unošenjem postepeno propada u slobodni prostor pužnog cilindra (2) u kome je smešten pužni vijak (1), kod dvopužnih ekstrudera dva paralelna ili konična pužna vijka, gde se pod uticajem dovedene toplote plastična masa zagreva i dovodi u plastično stanje.

Pod dejstvom pogona za obrtanje rotirajućih pužnih vijaka (6) i savladavanjem otpora koji nastaju, rastopljena plastična masa se homogenizuje, transportuje i potiskuje kroz sito, prstenasti alat, uređaj za kalibrisanje, zatim u komoru za hlađenje i uređaj za izvlačenje i sečenje. Primeri ekstrudiranih cevi i profila dati su na slici 4.



Slika 3. Skica jednopužnog ekstrudera. 1-pužni vijak, 2-barel, 3-spojnica, 4-hidro hlađenje ulazna zona, 5-levak za doziranje, 6-elektromotor za pokretanje ekstrudera, 7-temperiranje pužnog vijka, 8-sistem za hlađenje i temperiranje cilindra, 9-grejači za grejanje cilindra (Izvor: www.dpm.ftn.uns.ac.rs)

Primarna razlika u principu rada između jednopužnog i dvopužnog ekstrudera je u pristupu prenosa materijala u ekstruder. Jednopužni ekstruder primenjuje trenje između materijala i cilindra za prenošenje materijala, kod dvopužnog ekstrudera se materijal u zoni ulaza prenosi prinudnim putem (www.dpm.ftn.uns.ac.rs).



Slika 4. Primeri ekstrudiranih cevi i profila (Izvor: Peštan)

Postupkom ekstrudiranja se proizvode cevi i profili od različitih polimernih materijala, sastav i kvalitet zavise od namene, pritiska i temperature cevi i profila za određenu namenu u transportu fluida ili druge potrebe.

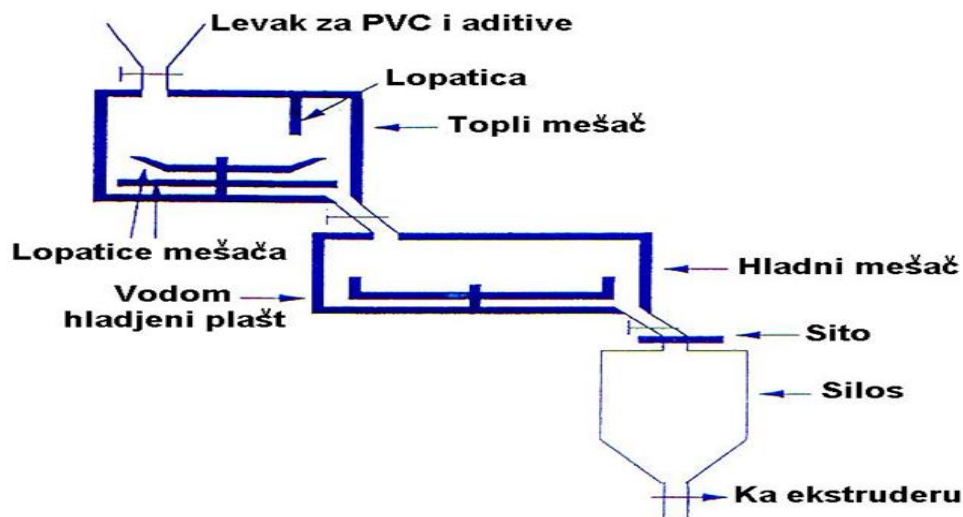
2.2. Proizvodnja cevi

Za proces proizvodnje cevi od PVC-a, uglavnom se primenjenjuje dvopužni ekstruder, dok se za proces proizvodnje cevi od ostalih termoplasta i duroplasta, najčešće koristi jednopužni ekstruder. Prerada kompaunda se realizuje u dve faze:

- priprema kompaunda (suvog praha) i
- ekstruzija kompaunda u cev.

Proces proizvodnje suvog praha realizuje se u mešaču velike brzine. Sve komponente se u komoru mešača plasiraju u jednoj fazi. Naime, u određenim slučajevima se punilo i pigment dodaju za vreme procesa mešanja, kada punjenje dostigne temperaturu od 90°C. Naknadnim dodavanjem, smanjuje se skidanje materijala sa površine čvrstog tela miksera izazvano mehaničkim uzrocima kretanja materijala i postiže se efekat eksplicitnije boje (Škobalj, 2014).

Procesom zagrevanja, PVC granule se otvaraju i delimično upijaju podmazivače. Proces proizvodnje kompaunda, šematski je prikazan na slici 5.

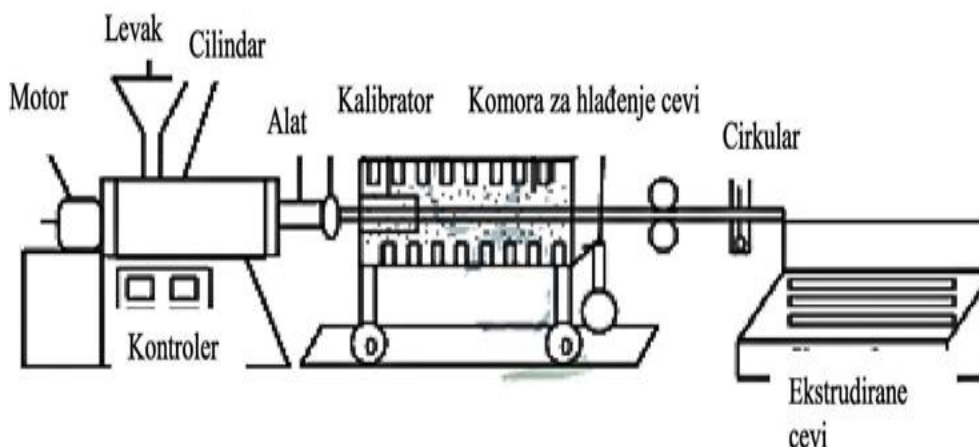


Slika 5. Tipični layout mešač (Izvor: Škobalj, 2014)

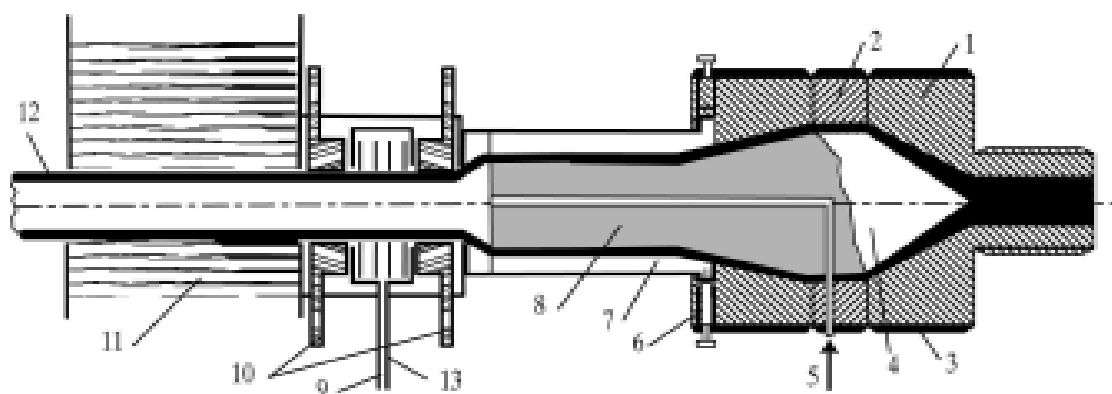
Za proces proizvodnje višeslojnih (troslojnih) cevi sa strukturiranim zidom koristi se tehnološki postupak ekstruzije i koekstruzije. Tokom navedenog postupka, kompaund se transformiše u neprekidni termoplastični materijal.

Za proces proizvodnje cevi tehnološkim postupkom ekstruzije primenjuju se dva tipa ekstrudera, konični ili paralelni ekstruderi. Koekstrudiranje se definiše kao tehnološki postupak prerade plastičnih masa pri kojem se primenjuje nekoliko heterogenih materijala. Predstavlja modifikovani oblik ekstrudiranja, tehnološki postupak pri kojem iz dva ili više ekstrudera izlaze plastični materijali različitih svojstava koji se inkorporiraju u adapteru za regulisanje željene debljine slojeva (Nedić, 2008).

Prema (Nedić i Đukić, 2004) sloj debljine se kontroliše relativnim brzinama ekstrudera koji isporučuju materijale. Postupak je složen jer zahteva egzaktno održavanje temperaturnih granica za određene vrste plastičnih masa kao i rigoroznu proveru i regulaciju debljine slojeva. Šematski prikaz proizvodne linije za ekstruziju cevi (slika 6), dok je na slici 7 prikazan postupak ekstrudiranja cevi.



Slika 6. Šematski prikaz proizvodne linije za ekstruziju cevi (Izvor: Harold i dr., 2005)



Slika 7. Postupak ekstrudiranja cevi: 1-Priključak na ekstruder, 2-kalup, 3-grejači, 4-špic trna za kalibraciju cevi, 5-dovod vazduha, 6-centriranje trna na nosaču alata, 7-kalibar spoljašnjeg prečnika cevi, 8-trn za unutrašnju kalibraciju cevi, 9-završno kalibrisanje, 10-rashladna voda, 11-hladnjak, 12-ekstrudirana cev, 13-komora sa potpritiskom (Izvor: Šljivić, 2007)

Pomoću ekstrudera koji je priključen na mestu (1) polimer se potiskuje prema trnu i kalupu (2, 4), gde se definiše osnovni profil cevi koji se zatim potiskuje prema kalibru (7, 8) koji definiše unutrašnji i spoljašnji dijametar cevi. Zatim, zagrejana cev se provodi kroz finalno kalibrisanje (9), kroz sistem komora za hlađenje vodom (10) i komora sa potpritiskom (13), nakon čega se transportuje u kadu vodom (11) gde se cev hladi i dovodi u potpuno konzistentno stanje. Krute i hlađene cevi se seku na potrebne dužine.

2.2.1. Prednosti i nedostaci postupka

U odnosu na ostale tehnologije, proces proizvodnje artikala od plastike je prevashodno ekonomičan, a cena opreme i alata relativno niska. Ekstruzija predstavlja značajan tehnološki postupak u industriji prerade polimera i vrlo popularan postupak u preradi plastike. Primarnu prednost navedenog postupka predstavlja visok stepen iskorišćenja plastičnog materijala, sposobnost adaptacije za proizvodnju široke potrošnje finalnih i polugotovih proizvoda, visoka stopa proizvodnje (u poređenju sa drugim procesima) zbog nižih troškova materijala, profili poput cevi se mogu proizvoditi u različitim dužinama i različitim dijametara. Proces ekstruzije karakterišu i određeni nedostaci: limitirane tolerancije, jer na taj način dolazi do nekontrolisane promene debljine sloja proizvoda i ograničenje u oblikovanju uniformnih preseka cevi (Ayele 2019, Harold i dr., 2005).

2.3. Industrija plastike kompanija Peštan

Kompanija za proizvodnju, preradu i distribuciju proizvoda i rešenja od plastike „Peštan“ zauzima lidresku poziciju na Balkanu. Kompanija je osnovana 1989. godine i primarno se bazirala na proces proizvodnje polietilenskih cevi za vodosnabdevanje. U skladu sa tržišnim uslovima, misijom i vizijom, involviranjem novih vrsta materijala (polipropilena i polivinil hlorida), kompanija razvija nove proizvoda i prilagođava proizvodni program potrebama tržišta.

Unapređenje poslovnih procesa implementacijom SAP ERP-a sa pratećim modulima, primena WMS sistema, korišćenje savremenih tehnoloških rešenja za proces prerade polimera postupcima ekstruzije i brizganja pod pritiskom, omogućuje kompaniji globalnu konkurentnost u industriji prerade polimera i proizvodnju proizvoda od plastičnih masa.

Sedište kompanije i proizvodni pogoni nalaze se u Aranđelovcu, Srbiji, oko 80 kilometara južno od Beograda. Godišnji prihod koji se generiše uz pomoć 1.000 zaposlenih i prelazi 130 miliona evra. Prerada materijala na godišnjem nivou iznosi više od 68.000 tona (Izvor: Peštan).

2.4. Proizvodni program

U okviru proizvodnog programa kompanije „Peštan,“ nalazi se 8500 proizvoda podeljenih u četiri kategorije:

- cevovodna rešenja,
- rešenja za kupatila,
- rešenja za poljoprivredu,
- rešenja za domaćinstva.

Proizvodni program prve kategorije proizvoda obuhvata cevi za visokogradnju i niskogradnju.

Proizvodi su izrađeni tehnološkim postupkom ekstruzije i brizganja pod pritiskom od polietilena (PE), polietilena PE RC (*eng. Resistant to Crack*), polipropilena (PP) i polivinil hlorida (PVC).

Druga kategorija proizvodnog asortimana kompanije „Peštan,“ rešenja za kupatila, obuhvata sledeće proizvode: slivnike, ugradne vodokotliće i konzole.

Treću kategoriju proizvodnog programa karakterišu proizvodi koji su proizvedeni tehnološkim postupkom ekstruzije primenom posebno razvijenih vrsta polimera namenjenih primeni u teškoj industriji i poljoprivredi. Namenjeni su sistemima navodnjavanja kap po kap.

U okviru četvrte kategorije, rešenja za domaćinstva, nalaze se prozori i profili proizvedeni od PVC-a i baštenske garniture.

2.5. PVC cevi

Plastični materijali zauzimaju značajan udeo u izgradnji kompleksnih infrastrukturnih sistema cevovoda od plastičnih masa za odvođenje svih vrsta zaprljanih i otpadnih voda u sistemima niskogradnje iz neposredne čovekove okoline i njihovo odvođenje do uređaja za prečišćavanje ili direktnog ispusta u odgovarajući prijemnik. Jednostavna ugradnja, kompletna mogućnost recikliranja PVC-a, takođe, doprinosi ispunjavanju ekoloških kriterijuma u odnosu na konkurentne materijale. Relativno niski troškovi, dobre hidrauličke osobine, održavanje sistema cevovoda praktično bez troškova, dug vremenski period eksploatacije i niz drugih specifičnih svojstava daju im prednost u odnosu na cevi proizvedene od tradicionalnih materijala. U poređenju sa betonskim cevima, proizvodnja PVC cevi zahteva oko četiri puta manje energije i minimizira gubitke sirovine PVC-a. U funkcionalnom smislu, ekstrudirane cevi od PVC-a, kontinuirano zamenjuju metalne cevi i prema procenama oko 60% od ukupne svetske proizvodnje plastičnih cevi odnosi se na PVC cevi (Pipes market, 2021). Imajući u vidu navedene prednosti PVC cevi, potražnja za njima je u kontinuiranom porastu i na ukupnom svetskom tržištu zauzimaju značajan udeo. Međutim, sistem cevovoda treba da obezbedi funkcionalne zahteve, prvenstveno stabilnost prenosa fluida a da pri tom fluid ne napušta

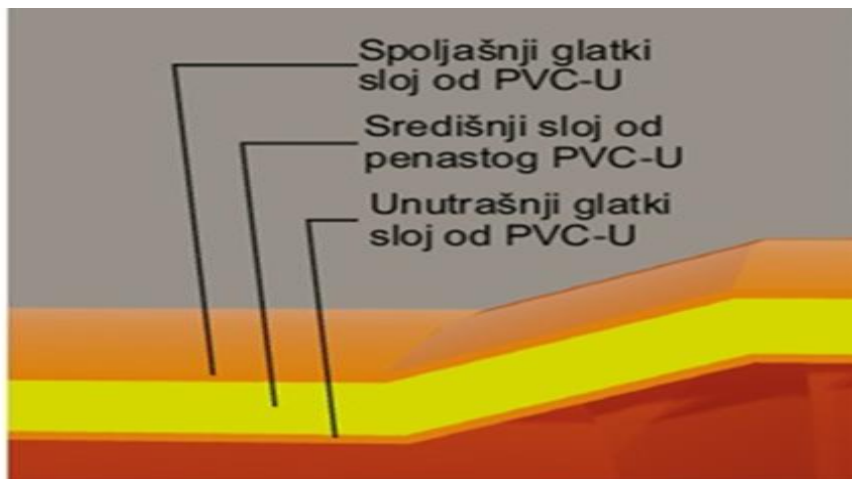
cev, izdržljivost, operativni kapacitet, dielektričnost, otpornost prema koroziji, postojanost, otpornost na mehaničke uticaje i niz drugih zahteva, jer oni predstavljaju neposrednu posledicu mehaničkih i fizičkih svojstva cevi koje su strukturni element ugrađen u sistem cevovoda. Navedeni zahtevi se postižu variranjem formulacije suvog praha i konzistentnim fizičkim i mehaničkim karakteristikama kvaliteta koje obezbeđuju stabilan i pouzdan sistem. Polimer, od koga je proizveden valjaksti i šuplji cilindar koji se primenjuje za transport fluida u tečnom ili gasovitom stanju ili kao strukturni element, naziva se plastična cev. U osnovi radi se o strukturnom elementu za izvođenje kompleksnog sistema odvodnje.

U praksi dominiraju tvrdi ili neplastificirani polivinil hlorid (*eng. Unplasticized Polyvinyl Chloride, PVCu*.) i termoplastični polietilen (PE), pri čemu vodeća pozicija pripada polivinil hloridu PVC-u. Stoga se, za pojedinačne namene proizvode različite vrste cevi :

- PVC vodovodne cevi,
- PVC cevi za kućne odvode,
- PVC cevi za sisteme uličnih odvoda,
- PVC cevi za zaštitu kablova,
- PVC korugovane cevi za sistem uličnih odvoda.

Peštan PVC cevi za sisteme uličnih odvoda, zajedno sa odgovarajućim spojnicama, namenjene su za odvođenje svih vrsta otpadnih voda u sistemima niskogradnje. Jednostavan način ugradnje i spajanja sa međusobno spojnim elementima, obezbeđuje potpunu zaptivenost spoja. Navedeni tip cevi proizvodi od veoma lakog materijala, što omogućava jednostavnu manipulaciju i transport. Peštan PVC cevi za sisteme ulične kanalizacije izrađuju se kao troslojne (EN 13476) i kompaktne (EN 1401) cevi.

Tehnološkim postupkom ekstruzije i koekstruzije, proizvodi se strukturirana troslojna PVC cev glatkih zidova od neplastificiranog polivinil hlorida (UPVC). Izgled strukturirane troslojne PVC cevi, sa diferenciranim slojevima prikazan je na slici 8.



Slika 8. Uzdužni presek troslojne PVC cevi sa strukturiranim zidom (Izvor: Peštan)

S obzirom da je cev troslojna, funkcija slojeva je jasno diferencirana. Prvi sloj, unutrašnji glatki, ima funkciju minimiziranja mogućnosti nagomilavanja taloga i umanjenja abrazije na cevima. Središnji sloj od penastog PVC-a, osnažen je punilom na mineralnoj bazi koji cevima pruža neophodnu čvrstoću i fleksibilnost. Spoljašnji glatki sloj, cevima obezbeđuje veći stepen otpornosti na udar, sigurnost prilikom manipulacije i ugradnje proizvoda.

Plastične cevi, samim tim i cevi proizvedene od neplastificiranog UPVC-a, poseduju posebne karakteristike koja koja im daju prednost u odnosu na druge vrste cevi:

- Otpornost prema koroziji u alkalnim, kiselim i agresivnim okruženjima, a time i velika dugotrajnost;
- Odlične hidrauličke karakteristike što je posledica glatkih unutrašnjih zidova;
- Mala masa što olakšava transport, manipulaciju i ugradnju;
- Rezistentnost do +60°C;
- Rezistentnost na mraz, zbog čega su pogodne za montažu kod temperatura i ispod 0°C;
- Dielektričnost;
- Jednostavan način transporta i montaže (obrada, sečenje i spajanje);
- Dugotrajnost, više od 50 godina;
- Održavanje sistema cevovoda praktično bez troškova;
- Sposobnost recikliranja materijala (ispunjavanje ekoloških kriterijuma).

Određeni aspekti ograničenja primene:

- Nestabilnost na visokim temperaturama tako da se ove cevi mogu primeniti za transport fluida do najviše 60°C;
- Ograničena mogućnost primene za transport određenih vrsta fluida koji sadrže visok procenat derivata nafte ili acetona.

PVC cevi za sisteme uličnih odvoda su izložene različitim uticajima: podloga, statičko i dinamičko opterećenje, slučajni spoljašnji udari, šljunak, itd. U fazi manipulacije, prilikom transporta, tokom njihove ugradnje postavljanjem u iskopane rovove kao i tokom perioda eksploatacije. Poprečni presek troslojne PVC cevi sa strukturiranim zidom, prikazan je na slici 9.



Slika 9. Poprečni presek troslojne PVC cevi sa strukturiranim zidom (Izvor: Peštan)

Kupcima je veoma značajno da cevi poseduju potrebna mehanička i fizička svojstva koja će obezbediti neophodne performanse, pouzdanost, sposobnost da izdrže horizontalna i vertikalna opterećenja, sigurnost da je proizvod neosetljiv na spoljašnje udare. Na taj način stvaraju se uslovi za funkcionisanje stabilnog i pouzdanog sistema odvodnje što se može obezbediti kontinualnim unapređenjem kvaliteta, povećanjem robusnosti u fazi eksploatacije i održavanjem permanentnog nivoa kvaliteta ekstrudiranih cevi.

2.6. Materijali

Kompaund za proizvodnju PVC cevi predstavlja multi-komponentni sistem u koji ulazi PVC, najčešće u granulama ili prahu i predstavlja osnovni gradivni materijal, punila, stabilizator, sredstva za ekspanziju (SZE)-kiker zaslužnog za ekspanovanje polimernih smeša, titanijum dioksid, crna kreda, stearinska kiselina (maziva) i pigment.

2.6.1. Polivinil hlorid (PVC)

Polivinil hlorid ili PVC predstavlja termoplastični materijal izveden iz obične soli i fosilnih goriva. Niska cena, laka preradivost i dugotrajnost, definišu PVC kao materijal koji ima širok spektar primene u građevinskoj industriji (cevi, izolacija, prozori, vrata, podovi) i najzastupljeniji materijal za proizvodnju vodovodnih cevi i sistema cevovoda. Termoplastični polimer polivinil hlorid poseduje dobra mehanička svojstva. Prema (Škobalj, 2014) PVC prah se sastoji od morske soli (57%) i nafe ili gasa (43%). Proizvodnja PVC smole uglavnom se u velikoj meri oslanja na upotrebu hlora i sirove nafte. Za proces proizvodnje PVC-a, najzastupljenije su četiri vrste procesa: metoda suspenzije, metoda mase, metoda emulzije/disperzije i metoda rastvora (Ayele, 2019). PVC poseduje visok tvrdoće tvrdoću i značajna mehanička svojstva, koja se rastom molekulske mase povećavaju, ali sa povećanjem temperature smanjuju. Većina PVC prahova ima K-vrednost u opsegu od 55 do 80 (Marković, 2013).

Prema (Ayele, 2019) u strukturi PVC cevi se po jedinici mase nalazi od 70% - 90% PVC-a, dok se preostali procenat kompaunda za proces proizvodnje sastoji od aditiva koji hemijski reaguju i kombinuju sa PVC-om radi optimizacije obrade i stvaranja fizičkih karakteristika finalnog proizvoda.

Različitim formulacijama suvog praha, njenim varijacijama i adaptacijama, vrste i količine navedenih sastojaka u kompaundu, mogu se proizvoditi cevi različitih namena: vodosnabdevanje, navodnjavanje, odvođenje otpadnih voda i cevi za zaštitu kablova.

2.6.2. Punila

Punila predstavljaju neizostavan dodatak polimernim smešama. Primarna funkcija dodavanja punilaca je uticaj na mehanička svojstva i cenu koštanja finalnih proizvoda. Takođe, ona omogućuju poboljšanje mehaničkog rada ekstrudera. Punilima se standardno utiče na cenu koštanja proizvoda i tendencija svih proizvođača je njihova maksimalna primena, ali uz uslov da se njihovom primeneom ne degradiraju karakteristike proizvoda definisne zahtevima standarda. Prema (Radovanović, 2016) aktivna punila imaju značajnog uticaja na poboljšanje karakteristika proizvoda svojim hemijskim sastavom i oblikom. Neaktivna punila imaju komercijalnu namenu, smanjenje cene bez mogućnosti uticaja na definisana svojstva proizvoda. Najčešći predstavnik aktivnih punila je kalcijum karbonat CaCO_3 .

Najzastupljenije punilo koje se koristi u recepturi suvog praha za proces proizvodnje cevi je kalcijum karbonat, prevučen stearinskom kiselinom. Kalcijum karbonat CaCO_3 je jedno od najpopularnijih mineralnih punila koji se koriste u industriji plastike. Jednostavan proces obrade mlevenjem, dostupnost, kompatibilnost sa širokim spektrom polimernih smola i ekonomičnost, doprinose njegovoj masovnoj primeni.

Kao aditiv u plastičnim jedinjenjima, CaCO_3 doprinosi smanjenju površinske energije i obezbeđuje neprozirnost i površinski sjaj, što poboljšava završnu obradu površine finalnog proizvoda. Takođe, kontrolisanom veličinom čestica, CaCO_3 utiče na povećanje stepena udarne čvrstoće i modula savijanja (krutost). Kalcijum karbonat se takođe smatra nereaktivnim sastojkom, iako određene klase poboljšavaju protok rastopa i mogu se kombinovati sa drugim sastojcima u cilju optimizacije karakteristika gotovog proizvoda.

2.6.3. Titanijum dioksid TiO₂

Titanijum dioksid je najčešći zaštitni agens koji se koristi u procesu proizvodnje PVC cevi. Dobre disperzne i optičke karakteristike, visoka otpornost na atmosferske uticaje, titanijum dioksid se primenjuje se kao zaštitno sredstvo za optimizaciju zaštite PVC cevi i fittinga. Zaštitno sredstvo za PVC može se ugraditi u sam materijal tokom procesa kompaundiranja. Posедуje sposobnost apsorpcije UV vidljivog zračenja, čime štiti molekule PVC-a. Nezaštićeni PVC koji je izložen sunčevoj svetlosti, ultraljubičasto (UV) zračenje izaziva niz složenih reakcija koje rezultiraju degradacijom polimera.

2.6.4. Stabilizator

Primarna eksterna pojava toplotne degradacije PVC-a je razvoj hlorovodonika (HCl), razvoj boje i degradacija hemijskih i fizičkih svojstva. S obzirom da se PVC zagreva tokom procesa ekstruzije ili oblikovanja, neophodno je sprečiti proces eliminacije hlorovodonika usled toplote i naknadnog razlaganja. Stabilizator u određenoj meri sprečava početnu eliminaciju hlorovodonika iz PVC-a. Dakle, upotreba stabilizatora (metalnih jedinjenja) je neophodna da bi se sprečila lančana reakcija raspadanja. Stabilizator štiti jedinjenja PVC cevi i složene polimerne lance od termičke degradacije tokom procesa ekstruzije. Takođe, neophodno je da mera njihovog procetualnog udela bude dovoljna da nakon procesa prerade ostane adekvatna zaštita koja će dati ekstrudiranoj cevi determinisan period eksploatacije (<http://www.pveagleinc.com/literature/tb/tb-s3.pdf>).

2.6.5. Crna kreda

Crna kreda ili čađ kao jedan od sastojaka kompaunda u procesu proizvodnje, u cilju da obezbedi svojstva finalnom proizvodu: boju, UV zaštitu i provodljivost. Takođe, doprinosi poboljšanju mehaničkih svojstva termoplasta i obradi navedenih materijala. Disperzija u plastičnoj masi iznosi približno od 25 do 40% po jedinici težine (Ayele, 2019). Veličina i struktura čestica (stepen trajne agregacije čestica) su dve najvažnije karakteristike u određivanju njenih performansi.

2.6.6. Stearinska kiselina i pigmenti

U industriji prerade plastičnih masa, stearinska kiselina se kao dodatak formulaciji kompaundu, koristi za proizvodnju PVC plastičnih cevi, limova, profila i filmova. To je PVC toplotni stabilizator sa dobrom svetlosnom i toplotnom stabilnošću, kao i sa mazivnim svojstvima. Stearinska kiselina deluje kao interno i eksterno mazivo, takođe, deluje kao depozit viskoznosti u procesiranju PVC-a. Prema (Škobalj, 2014) u ekstruziji rigidnog PVC-a, efekat „podmazivanja“ kalcijum stearata je verovatno posledica povećanog trenja sa rezultujućom evolucijom toplote i višom temperaturom mase, što dovodi do smanjenog viskoziteta plastičnog rastopa. Navedeno je u skladu sa rezultatima ekstruzionih eksperimenata. Temperatura mase i potrošnja energije se smanjuju dodavanjem stearinske kiseline i povećava kada se formulaciji doda kalcijum stearat (Fredriksen i dr., 2003). Primarno, dodavanje pigmenata ima za cilj da proizvod dobije određenu boju i u principu nemaju uticaja na njegove fizičke i mehaničke karakteristike. Takođe, mogu hemijski da reaguju sa polimerima (uključujući PVC) inicirajući degradativne procese ili katalizujući oksidaciju PVC-a ili njegovih aditiva.

2.7. Politika kvaliteta

Menadžment i zaposleni u kompaniji „Peštan“ primarno su usmereni na:

- Implementiranju, održavanju, unapređenju i poboljšanju sistema upravljanja kvalitetom prema zahtevu ISO 9001:2008.
- Definisaniu ciljeva kvaliteta i reviziji relevantnih procesa industrije najmanje jednom godišnje.
- Obezbeđivanju i održavanju reputacije kvaliteta celokupnog proizvodnog programa od polimera.
- Prijemnom kontrolom kvaliteta usporuke, procesnom i završnom kontrolom u skladu sa zahtevima standarda.
- Razvoju stalnog programa izgradnje kapaciteta i razvoju posvećenih i motivisanih ljudskih resursa za realizaciju definisanih ciljeva kompanije i industrije za preradu plastike.
- Promovisanju kreativnosti, inicijative i timskog rada među zaposlenima u rešavanju problema i stalnom unapređenju u upravljanju kvalitetom obezbeđivanjem svih neophodnih resursa.
- Sprovođenju interne provere u planiranom intervalu, kao i pokretanju, sprovođenju i kontroli korektivnih mera.
- Zaštiti zdravlja i bezbednosti na radu zaposlenih kroz obuku o prevenciji i promovisanju koncepta kulture prevencije bezbednosti i zdravlja na radu.

Kompanija je kreirala politiku kvaliteta ne samo u cilju provere nivoa kvaliteta proizvoda, nego kroz segment kontrole kvaliteta razmatra i zadovoljstvo kupaca isporukom i tehničkom podrškom. Politikom kvaliteta su precizno definisane sve zainteresovane strane i ciljevi: u potpunosti ispuniti zahteve kroz plasiranje na tržište proizvoda visokog i premanetnog kvaliteta u skladu sa zahtevima standarda.

Poglavlje 3
METODOLOŠKI OKVIR

3. METODOLOŠKI OKVIR

3.1. Metodologija istraživanja

Primarna svrha istraživanja je, generalno, poboljšanje i povećanje izlaznih preformansi višeodzivnog procesa proizvodnje PVC cevi kao i rešavanje određenih problema kompleksnosti proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije. Takođe, povećanje obima kroz smanjenje troškova proizvodnje i minimiziranje mogućnosti degradacije onih karakteristika kvaliteta koje su za korisnike najznačajnije tokom perioda eksploatacije. Dakle, istraživanje je koncipirano sa aspekta strategije istraživanja, vrste, fokusa, osnovnog cilja i specifičnih ciljeva, potencijalnih istraživačkih hipoteza, načinu izbora, veličini i konstrukciji uzorka, mesta eksperimentalnog istraživanja.

Za adekvatnu realizaciju neophodna je i primena naučnih metoda za prikupljanje i analizu podataka, realizaciju definisanih ciljeva istraživanja i prihvatanje postavljenih hipoteza u doktorskoj disertaciji.

3.1.1. Vrste prikupljanja podataka

Prikupljanje podataka predstavlja intenzivan resursni proces tokom kojeg je neophodno u okviru sistema za svaki jedinični proces prikupiti kvantitativne i kvalitativne podatke koji su relevantni za realizaciju istraživanja. Postoje dve metode prikupljanja podataka kao što su primarno i sekundarno prikupljanje podataka.

U ovom istraživanju primenjene su obe metode i izvori podataka koji su korišćeni su primarni i sekundarni izvori podataka. U okviru ove dve metode za potrebe istraživanja korišćeni su relevantni podaci iz proizvodne dokumentacije, dokumentacije o reklamacijama na proizvod od strane kupaca, laboratorijski izveštaji predhodnih ispitivanja i merenja, pregled stručne literatura, intervju sa zaposlenima u kompaniji „Peštan,“ tehnički podaci i opservacija.

3.1.2. Primarni podaci

Prikupljanje primarnih podataka je jedna od metoda korišćenih u ovom istraživanju. Za prikupljanje podataka korišćena je metoda opservacije.

Detaljnija analiza zahteva prikupljanje što relevantnijih i kompletnijih podataka, u cilju formiranja što objektivnije slike realnog stanja opserviranog sistema. Podaci o procesu proizvodnje PVC cevi, u najvećoj meri su bazirani na analizi proizvodne linije i to su tzv. „foreground“ podaci.

Sa ciljem razumevanja činjenica o industriji prerade plastike, neophodna je opservacija procesa proizvodnje PVC cevi, odnosno, na koji način i kako tačno funkcioniše postojeći sistem, situacije u kojima kompanija radi, na koji način se ostvaruje potencijal zaposlenih u aktivnostima za uspostavljanje definisanih zahteva kvaliteta proizvoda. Pored navedenih podataka, korišćeni su i sekundarni izvori koji predstavljaju veoma značajni izvor podataka.

3.1.3. Sekundarni podaci

U okviru sekundarnog prikupljanja podataka primenjene su dve najčešće korišćene metode: pregled stručne literature prethodnih istraživanja i proizvodna dokumentacija (tehnološka i procesna). S obzirom na predmet istraživanja, korišćene su i predhodno urađene studije iz oblasti ekstruzije plastičnih cevi. Takođe, drugi značajan izvor podataka predstavljaju podaci iz evidencije kompanije, pre svega podaci iz SAP baze podataka, potom WCM evidencija, izveštaji kontrole kvaliteta, ispitivanja i merenja. Na ovaj način, dobijeni su tzv. „background“ podaci.

3.2. Značaj predmeta istraživanja

Jedan od strategijskih ciljeva kompanija je da proizvede proizvode visokog kvaliteta i obezbedi njihov plasman na tržište uz maksimiziranje očekivane dobiti bez povećanja troškova.

Permanentno održavanje nivoa kvaliteta proizvoda i njegovo kontinuirano poboljšanje, predstavljaju ključne faktore za kompanije da steknu i održe konkurentsku prednost. Rešavanjem problema vezanih za kvalitet, direktno se utiče na očekivanu dobit kompanija tokom procesa prerade polimera. Kompanije za proizvodnju proizvoda od plastičnih masa suočavaju se navedenim problemima i globalnom konkurencijom. U tom kontekstu, u doktorskoj disertaciji formiran je hibridni višeodzivni optimizacioni model kojim se prvo parcijalno optimizuju pojedinačni odzivi procesa, zatim se pristupa i sveobuhvatnoj višeodzivnoj optimizacija primenom fazi logike i ANOVE gde se postiže veći sinergetski efekat nego parcijalnom optimizacijom. Postoji jasno iskazana potreba za održavanjem i unapređenjem kvaliteta određivanjem optimalnih vrednosti tehnoloških procesnih parametara za kontrolu procesa ekstrudiranja, koji mogu osigurati visok nivo kvaliteta proizvoda i veću pouzdanost, što implicira sledeće:

- Poboljšanje procesa;
- Poboljšanje kvaliteta proizvoda;
- Porast obima proizvodnje;
- Unapređenje efikasnosti proizvodnje;
- Poboljšanje postojećih tehnoloških postupaka;
- Unapređenje, osavremenjivanje i promena proizvodnog programa i proizvoda;
- Očuvanje postojećih i osvajanje novih tržišta;
- Razvijanje istraživačko-razvojnog rada.

Navedeni su određeni strategijski ciljevi koji omogućuju kompanijama da se prilagode očekivanim promenama u okruženju koji se postižu kontinuiranim poboljšanjem procesa i upravljanjem procesima. Kompanija za preradu i proizvodnju proizvoda od plastičnih masa „Peštan“ iz Arandelovca kao regionalni lider, takođe i veliki broj kompanija iz industrije za preradu polimera i plastičnih masa, suočavaju se sa brojnim izazovima. Imajući u vidu zahteve za potražnjom proizvoda, poboljšanjem kvaliteta procesa/proizvoda i opštu problematiku procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije PVC-a kao i povećanom potražnjom proizvoda na domaćem i inostranom tržištu, nameće se potreba za optimizacijom procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije proizvoda od neplastificiranog PVC-a. Takođe, analiziran je proces koji je predmet istraživanja doktorske disertacije, identifikovan je u kompaniji „Peštan“ kao proces koji treba preispitati, jer je u direktnoj vezi sa određenim ciljem koji je potrebno ispuniti. Proces je prepoznat kao prioritetan, kritičan i ključni.

Na osnovu analize naučne i stručne literature (Poglavlje 1.6.), može se zaključiti da postoji nedostatak literature o predmetu istraživanja. Pored značajnog broja studija i radova koji se bave istraživanjem i problematikom optimizacije različitih procesa i samim procesom proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije u različitim industrijskim sektorima, postoji nedostatak literature o predmetu istraživanja. Odnosno, vrlo mali broj studija koje se bave istraživanjem i analizom uticaja tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa izrade PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije. Štaviše, dosadašnja literatura nije na metodološki potpun način dala model koji na adekvatan način primenjuje prednosti postojeće fazi Taguchi metodologije u cilju razvoja hibridnih optimizacionih modela za dati predmet istraživanja. Integracijom relevantne literature iz ove oblasti zajedno sa razvojem originalnih hibridnih optimizacionih modela pored empirijskog doprinosa, dobijeni rezultati mogu dati značajne podatke kompanijama za proizvodnju proizvoda od plastičnih masa. Na taj način postiže se robusni kvalitet proizvoda, minimiziraju se varijacija procesa čime se u podiže nivo kvaliteta procesa. Pored postizanja visok nivoa kvaliteta, imajući u vidu aktuelnost problematike, poboljšanjem procesa optimizacijom, predupredili bi se problemi kompleksnosti postupka ekstruzije sa aspekta upravljanja i kontrole procesa. Definisane strategije poboljšanja kvaliteta u industriji prerade plastike za optimalno upravljanje parametrima procesa izrade PVC

proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije treba da doprinese postizanju optimalnijih tehnoloških uslova proizvodnje PVC proizvoda.

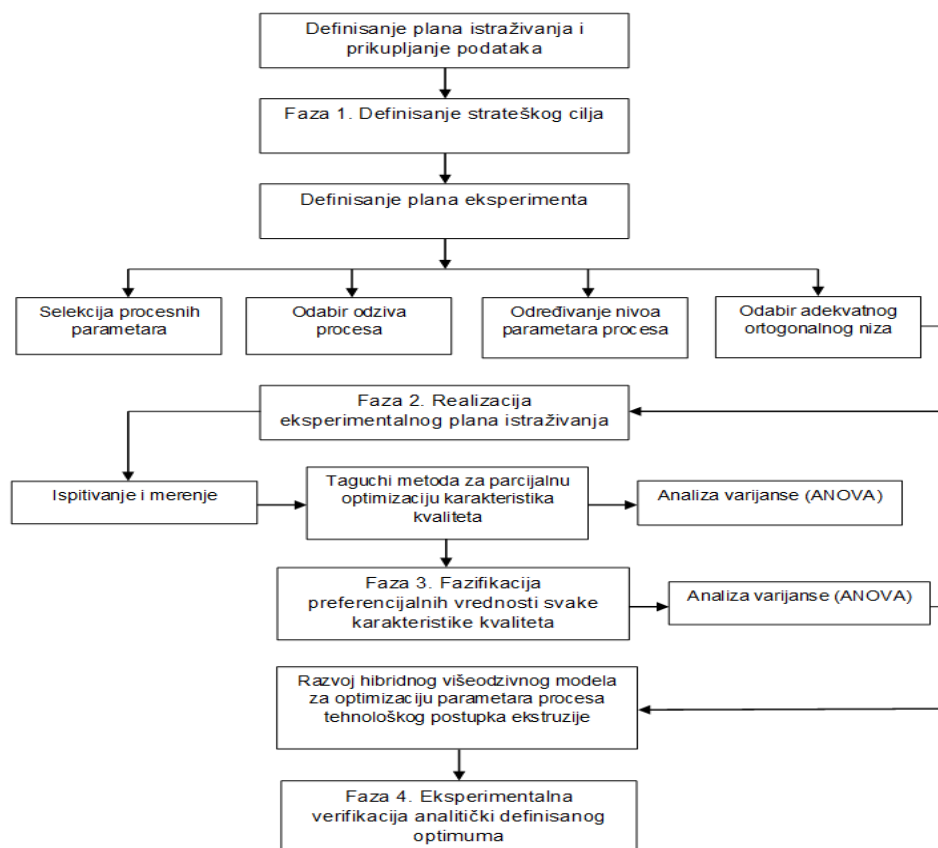
Imajući to u vidu, implementacijom istraživanja u okviru ove disertacije, očekuje se ostvarivanje sledećih naučnih doprinosa:

- Primenom fazi Taguchi metodologije projektovaće se hibridni optimizacioni model kojim će biti moguća višeodzivna optimizacija procesa proizvodnje troslojne PVC cevi tehnološkim postupkom ekstruzije, čime se postiže podizanje nivoa kvaliteta;
- Utvrdiće se efekat dejstva i analitička međuzavisnost između kontrolabilnih tehnoloških procesnih parametara pojedinačnih i višestrukih odziva procesa;
- Utvrdiće se koji set projektovanih kontrolabilnih tehnoloških procesnih parametara daje optimalan efekat na fizičke i mehaničke karakteristike proizvoda, robustan kvalitet i pouzdanost procesa;
- Definišaće se odgovori koji doprinose razumevanju složenih odnosa interakcija između tehnoloških parametara procesa i višestrukih odziva procesa.

3.3. Definisane istraživačkog modela

Dinamično okruženje i kontinuirane promene, zahtevaju sistemski pristup koji omogućava rešavanje problema višestrukih karakteristika kvaliteta.

Na osnovu toga i u skladu s postavljenim hipotezama i ciljevima rada, u ovom poglavlju predstavljene su osnovne faze i struktura modela istraživanja, što je šematski prikazano na slici 10, a svaka faza je u nastavku detaljno opisana.



Slika 10. Osnovne faze i struktura modela istraživanja

U okviru istraživanja, prva faza predloženog modela obuhvata analizu literaturnih izvora i definisanje strateškog cilja koji doprinosi ostvarivanju vizije kompanije i predstavlja željeno buduće stanje odnosno, poziciju na tržištu koju kompanija teži da ostvari u budućem periodu.

Takođe, u okviru ove faze se determiniše eksperimentalni plan koji podrazumeva: selekciju tehnoloških procesnih parametara, definisanje odziva procesa, određivanje nivoa parametara procesa i odabir adekvatnog ortogonalnog niza.

U drugoj fazi predloženog modela, realizuje se determinisani eksperimentalni plan, u cilju izrade uzoraka i njihove analize. Pristupa se ispitivanju i merenju odziva procesa posmatranih kroz višestruke mehaničko-fizičke karakteristike kvaliteta, parcijalnoj optimizaciji odziva procesa primenom Taguchi metode. Pored navedenog, primenjuje se analiza varijase ANOVA za uspostavljanje analitičke međuzavisnosti i ispitivanje efekta dejstva između tehnoloških procesnih parametara i pojedinačnih odziva procesa.

U trećoj fazi pristupa se fazifikaciji preferencijalnih vrednosti svake karakteristike kvaliteta sa ciljem transformacije šest odziva procesa u jedan odziv, kao i u predhodnoj fazi, primenjuje se analiza varijase ANOVA, u ovom slučaju za uspostavljanje analitičke međuzavisnosti i efekta dejstva između tehnoloških procesnih parametara i višestrukih odziva procesa. Cilj treće faze predloženog modela bio je razvoj originalnog hibridnog višedozivnog modela za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije.

U poslednoj, četvrtoj fazi predloženog modela sprovodi se eksperimentalna verifikacija analitički definisanog optimuma. S tim u vezi, za potrebe eksperimentalne verifikacije, primenjene su vrednosti identifikovanog seta optimalnih vrednosti tehnoloških procesnih parametara koji istovremeno optimizuju višestruke karakteristika kvaliteta. Na bazi tri uzastopne repeticije eksperimenta tački optimuma, dobijene su vrednosti optimalnih parametara procesa ekstruzije za šest odziva.

3.4. Definicija kvaliteta

Opšti pristup kvalitetu obuhvata način razmišljanja i delovanja usmeren prema poboljšanju postojećeg. Prema (Yamalik, 2007) pitanje kvaliteta je postalo imperativ i poseban akcenat se stavlja na pitanje kvaliteta nego u predhodnim periodima. Pregledom literature može se uočiti da ne postoji jedinstven koncept kvaliteta i da autori (istraživači) prilikom deskripcije kvaliteta, definišu koncept na različite načine. U širem smislu, kvalitet može da zavisi od: aspekata njegovog posmatranja, nivoa posmatranja, vrste entita i njegovih karakteristika, može biti vezan za individualnu percepciju vrednosti za novac, kao i za očekivanja performansi i izgleda.

Kontinualno poboljšavanje kvaliteta je jedan od strateških ciljeva svih poslovno-proizvodnih sistema. Primarni cilj upravljanja kvalitetom je stvaranje konkurentne prednosti, što samo dodatno naglašava neophodnu potrebu za promenama i reagovanjem organizacije na događaje u okruženju. Definicija obezbeđenja kvaliteta, prema ISO 9000:2015 glasi: „Obezbeđenje kvaliteta je deo sistema menadžmenta kvalitetom usmerenog na izgradnju poverenja uz ispunjavanje osnovnih zahteva u vezi sa kvalitetom“ (International Organization for Standardization). Pored kontrole kvaliteta, organizacije uvode osiguranje kvaliteta kroz kontinualan razvoj i poboljšanje svih organizacionih procesa koji utiču na kvalitet proizvoda.

Unapređenje pojedinih procesa će dovesti do ukupnog poboljšanja organizacije. Prema Agus (2011), kontinuirano poboljšanje procesa postaje vežba u optimizovanju efikasnosti i efektivosti uz poboljšanje procesne kontrole i osnaživanje internih mehanizama za odgovarajuću reakciju na modifikacije potreba korisnika.

Autor Ayele (2019) navodi da su kompanije identifikovale jedan od mogućih načina za postizanja viskog kvaliteta sopstvenih proizvoda, i da je ključ njihove poslovne strategije primena inženjeringa kvaliteta. Inženjering kvaliteta kao skup operativnih, menadžerskih i inženjerskih aktivnosti koje kompanija koristi u cilju omogućavanja da karakteristike kvaliteta proizvoda budu na nominalnom ili zahtevanom nivou (Montgomeri i dr., 2002). Inženjering kvaliteta se fokusira na funkcionalnost generičkih funkcija sistema, a zatim vrši procenu komponente sistema prema tri kategorije funkcija, faktor signala, kontrolni faktor i faktor greške u cilju optimizacije sistema. Takođe, inženjeringu kvaliteta jedan od ciljeva je da, koliko god je to moguće, usmeri razvoj procenom dobrih i loših aspekata tehnologija u prethodnim fazama procesa komercijalizacije

proizvoda. Postoji značajan povraćaj ulaganja od poboljšanog kvaliteta i od uspešnog korišćenja kvaliteta kao sastavnog dela ukupne poslovne strategije. Pristupajući poboljšanju kvaliteta na naveden način, kompanije mogu kreirati ili redizajnirati procese, proizvode i usluge vrhunskih performansi.

Kao rezultat toga, mogu da smanje troškove proizvodnje ili usluga i mogu povećati broj svojih kupaca kvalitetnijim proizvodima i reputacijom brenda (Persse, 2006; Papadakis, 2007). Ekonomske prednosti proizvoda višeg kvaliteta uključuju smanjene stope povlačenja proizvoda i niže troškove garancije proizvoda za kompanije.

Oblast kvaliteta karakterišu značajne promene što se ogleda u modifikaciji njegove definicije, paradigmi, pristupima, tehnikama i obimu primene. Promene u očekivanjima kupaca dovele su do promena u tehnologiji projektovanja i proizvodnje, koja postaje sve važnija u ispunjavanju individualnih očekivanja kupaca. Navedeno takođe zahteva posebnu pažnju na inženjerske aspekte kvaliteta. Kvalitet je postao jedan od najvažnijih faktora odluke potrošača u izboru između konkurentskih proizvoda i usluga (Nembhard i dr., 2010). Shodno tome, razumevanje i poboljšanje kvaliteta su ključni faktori koji vode ka uspehu, rastu i poboljšanju konkurentске pozicije na tržištu. Prema (Ayele, 2019) opšti trendovi u inženjerskom istraživanju kvaliteta pokazuju da se alati kontinualno unapređuju, integrišu, kompjuterizuju i proširuju svoje baze primene, gde se ukazuju potencijalne mogućnosti pravaca daljih istraživanja. Jednom od prioritarnih aktivnosti u proizvodnoj delatnosti ističe se kontinualno poboljšanje procesa koje zahteva savremeni pristup o ponašanju procesa ili proveru kvaliteta procesa u cilju shvatanja mogućnosti optimizacije ili unapređenja (Stojanović i dr., 2016). Autori (Mast i dr., 2011) navode da se u užem smislu, diferenciraju dva tipa poboljšanja procesa: ustaljivanje, koje označava se upravljanjem procesa postiže stanje statističke kontrole pomoću aktivnosti odstranjivanja i sprečavanja poremećaja, što je opisano i kao „fiksiranje procesa,” i optimizacija, kada se parametri procesa podešavaju u cilju poboljšanja ponašanja procesa.

3.5. Optimizacija

Optimizacija je proces traženja optimalnog rešenja. Optimizacija znači nalažnje kompromisa između više konfliktnih zahteva.

Pojam optimizacije, u širem smislu definiše se kao nauka koja određuje najbolje rešenje iz niza mogućih, određenih matematički definisanih problema, sa aspekta klase problema koji se optimizuje, na efikasan i sistematičan način, korišćenjem različitih tehnika i metoda. Primarni zadatak procesa optimizacije je pronalaženje rešenja koje pruža krajnju tačku definisane vrednosti funkcije cilja, maksimalnu ili minimalnu, kao i utvrđivanje adekvatne vrednosti faktora. Cilj optimizacije se ostvaruje preko funkcije cilja i optimizacionog kriterijuma u matematičkoj formi, tako da se rezultat optimizacije izražava kvantitativno. Optimalno rešenje je kompromis kriterijuma i ograničenja, predstavlja ono rešenje koje u datim uslovima, prema usvojenom sistemu kriterijuma i prilikom delovanja skupa ograničavajućih faktora, označava najbolje rešenje. Rezultat optimizacije je uvek funkcija definisanog cilja optimizacije.

Optimizovanje podrazumeva promenu određenih uslova, tzv. odlučujućih varijabli, u cilju maksimiziranja ili minimiziranja određenog predefinisanih kriterijuma, koji se naziva funkcijom cilja. Moguća rešenja se susreću sa potrebom ispunjavanja određenih zahteva, koji se nazivaju ograničenjima. Prema tome, optimizovati proces znači odrediti vrednosti skupa kontrolisanih varijabli kako bi proces ispunjavao ciljeve date funkcijom cilja uzevši u obzir i sva ograničenja (Banga i dr., 2003). Cilj optimizacije sistema je da izvrši odabir optimalne varijante iz potencijalnih ili prihvatljivih opcija i u kontekstu prihvaćenog kriterijuma i označava najbolje rešenje optimizacionog zadatka.

3.6. Matematički modeli i optimizacija

Matematička optimizacija u širem smislu, ima primenu u svim naučnim oblastima. Matematički modele realnog sistema implicira skup matematičkih relacija koje na adekvatan način prikazuju rad sistema (Deretić, 2011).

Tri osnovna elementa (MM, L, F) definišu optimizacioni matematički model gde je:

MM- matematički model (odnos između veličina u sistemu),

L-ograničavajući faktori,

F-kriterijumska funkcija.

Formiran matematički model definisan je funkcijama ograničenja i funkcijama stanja. Proces se prikazuje matematičkom apstrakcijom u matematičkom modelu koja izražava ključne odlike procesa (Radovanović, 2018).

Matematički model optimizacije formuliše se postavljanjem funkcije cilja. U cilju projektovanja i procesa proizvodnje visoko kvalitetnog proizvoda sa nižim cenama koštanja, inženjeri primenju različite metode i tehnike kako bi odabrali optimalni skup parametara kojim bi se ovi ciljevi dostigli. Proces kojim se dolazi do adekvatnih parametara u dizajnu i proizvodnji je optimizacija. Tokom procesa optimizacije uvek se mora računati na delovanje skupa ograničavajućih faktora. Cilj optimizacije je da se pronađu vrednosti parametara x kojim se postiže traženi optimum funkcije $f(x)$.

Matematičkim jezikom:

$$\text{optimizacija: } f(x), \quad (3.1)$$

$$\text{pod dejstvom: } g_i(x) \leq 0, \quad i=1, \dots, I, \quad (3.2)$$

$$h_j(x) = 0, \quad j=1, \dots, J. \quad (3.3)$$

gde $g_i(x)$ predstavljaju set ograničenja nejednakosti, a $h_j(x)$ set ograničenja jednako (Beyer i Sendhoff, 2007).

Autor Ljung (2001) navodi da su modeli osnovni elementi za sprovođenje optimizacije, simulacije i formiranje sistema kontrole. Na osnovu diferencijacije, modele je moguće klasifikovati u tri kategorije:

1. Modeli prvog principa (bela kutija) koji se formiraju na osnovu dobro poznatih fizičkih i hemijskih odnosa i precizno definisanih principa funkcionisanja i upravljanja sistemom.
2. Modeli kontrolisani na osnovu podataka (crna kutija), koji su empirijske prirode. Ne postoji uvid u fizičke parametre koji bi se mogli koristiti za modeliranje. Ovi modeli su vrlo fleksibilni i pokazuju dobre rezultate u primeni.
3. Hibridni modeli (siva kutija), kombinacija prethodna dva (Banga i dr., 2003). U ovom slučaju postoji fizički uvid u pojedine parametre ali postoje i brojni parametri koji treba da se utvrde iz dobijenih podataka. Postoje dva podtipa ovog slučaja:
 1. Fizičko modelovanje: struktura modela se formira na osnovu fizičkih parametara, a određeni parametri se procenjuju na osnovu podataka.
 2. Polu-fizičko modelovanje: uvid u fizičke parametre se koristi da bi se predložile nelinearne kombinacije izmerenih signalnih podataka. Ovi signali se koriste za formiranje modela crne kutije.

Optimizacija predstavlja izuzetno kompleksan proces u kome se mogu pojaviti po strukturi heterogene klase problema različitog stepena kompleksnosti.

Važna klasa problema, povezana je sa procenom parametara i dizajnom eksperimenata gde je cilj da se definiše eksperimentalni plan tako da dobijeni rezultati imaju najbolji mogući statistički kvalitet.

Parametri koji se biraju su samo prezentacija realnog sistema, što pretpostavlja određena odstupanja i pojednostavljanja i može doći do gubitaka veoma važnih informacija. Nakon nalaženja optimalnog seta parametara mogu se javiti problemi tokom procesa implementacije. Tehnološka optimizacija obuhvata optimizaciju proizvodnih i tehnoloških procesa (Bijelić, 2018). Prema autorima (Todić, 2011; Stanić, 1998; Mečanin i dr., 1992), proces optimizacije tehničko-tehnoloških ili tehnoeekonomska optimizacija predstavlja integraciju ekonomskog kriterijuma valorizacije i optimizacije tehničko-tehnoloških indikatora efikasnosti sistema. Optimizacija procesa je disciplina adaptiranja procesa u cilju optimizovanja određenog skupa parametara bez narušavanja determinisanih ograničenja. Najčešći ciljevi su minimiziranje troškova, maksimiziranje u celini i/ili

efikasnost, ovo je jedan od glavnih alata u industrijskom donošenju odluka. Prilikom optimizacije specifikacije procesa, zadržavajući sve ostale unutar svojih ograničenja (Karna i dr., 2012).

Definisanje modela u industriji prerade plastike karakterišu određene specifičnosti jer su ovi procesi nelinearni i dinamički. U proizvodnji tehnološkim postupkom ekstruzije PVC-a postoji veliki broj varijabli koje se teško kontrolišu, koje se prostorno distribuiraju i veoma su jaki međusobni uticaji na odzive procesa. Proces prerade PVC-a susreću se sa velikim brojem ograničenja, sistem je u znatnoj meri nehomogen. Kod procesa koji uključuju promenu temperature tj. zagrevanje i hlađenje javljaju se promene koje treba uzeti u razmatranje. Modeli koji su pomenuti, primenom u industriji prerade plastike, često ne daju rezultate koji zadovoljavaju zahteve robusnosti. Optimalna rešenja često nisu jedinstvena i nemoguće ih je primeniti ukoliko dođe i do sasvim male promene vrednosti parametara. Ne postoje dovoljno razvijene baze sa podacima čime je otežana primena softvera za optimizaciju, variranje formulacije suvog praha i njegovog masenog udela, promena spoljašnje temperature i niz drugih proizvodnih i tehnoloških faktora u značajnoj meri utiču na proces proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije.

3.7. Taguchi metoda

Taguchi metoda predstavlja statističku metodu koju je razvio dr Genichi Taguchi u cilju poboljšanja kvaliteta procesa proizvodnje, koncipiranjem metodologije za primenu projektovanih eksperimenata. Takođe, Taguchi je radio na poboljšanju i unapređenju statističkog metoda koji je razvio Fisher, u cilju adekvatnije i efikasnije primene u proizvodnom procesu. Tokom 1980-ih, Taguchi je razvio metod koji omogućuje stvaranje procesnih uslova za proizvodnju visoko kvalitetnih proizvoda, nezavisno od promene vrednosti procesnih parametara. Takvi procesi se nazivaju robusni procesi jer su neosetljivi na šum. Relacija između deficita i tehničkih odlika proizvoda prikazuje se funkcijom gubitka. U zavisnosti uslova ili izmena (eksterni uslovi, tolerantne promene, itd.) izazivaju pojavu različitih odstupanja u sistemu, umanjujući njegove optimalne performanse. U cilju minimiziranja nastanka takvih promena i njihovog povećanja, neophodno je razviti robusne proizvode-stabilnih performansi i njihovo optimalno funkcionisanje u određenim nestabilnim uslovima. Taguchi filozofija je imala dugoročne posledice, ali je zasnovana na tri vrlo jednostavna koncepta. Prema autorima Tarcolea i Paris (2011), njegove tehnike u potpunosti proizilaze iz koncepcije:

1. Kvalitet treba da bude dizajniran u proizvodu, a ne da se kontrolišu u njemu.

2. Kvalitet se bolje postiže minimiziranjem odstupanja od cilja. Proizvod treba da bude tako dizajniran da bude neosetljiv na nekontrolisane faktore okoline.

3. Kvalitet troškova treba meriti kao funkciju odstupanja od standarda, a gubitke treba meriti u celom sistemu (Kumar i dr., 2015).

Taguchi je predložio metod za poboljšanje kvaliteta baziran na dizajnu eksperimenata DOE (Design of Experiments) koji pretpostavlja izvođenje malog broja eksperimenata kako bi se pronašao pouzdan dizajn za proizvodnju i obezbedile performanse što bliže optimalnim. Metod je efikasan prilikom ispitivanja 3 do 50 varijabli, kada između varijabli postoji minimalna interakcija i samo manji broj varijabli je značajan.

Doprinos Taguchi filozofije kvalitetu ogleda se kroz tri segmenta:

1. Funkcija gubitka kvaliteta;
2. Ortogonalni nizovi;
3. Robusni dizajn.

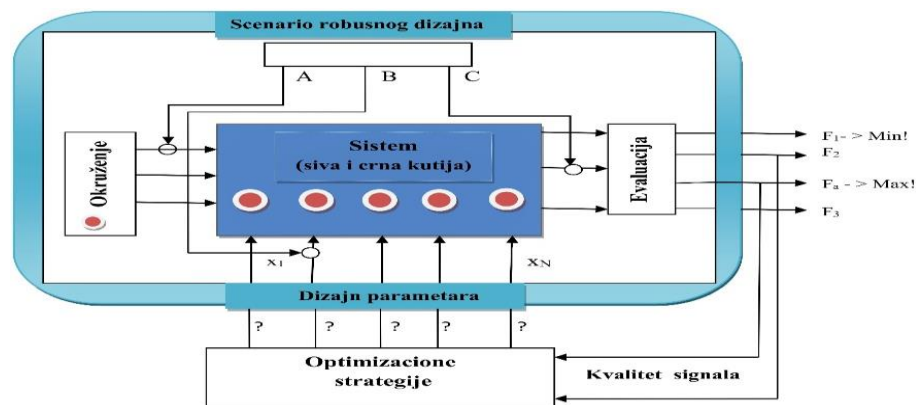
Taguchi metodologija kvaliteta bazirana je u tri nivoa. Proces je definisan sledećim fazama:

1. Određivanje sistema;
2. Određivanje parametara;
3. Određivanje tolerancije odstupanja: fino podešavanje optimizovanih parametara dobijenih na drugom nivou (Taguchi, 2005).

Taguchi metode su takođe poznate kao inženjering kvaliteta i sadrže sledeće determinante:
- dizajn parametara,

- određivanje varijacija,
- idealan kvalitet - off-line kontrola kvaliteta,
- funkcija gubitka kvaliteta,
- odnos signal-šum,
- čvrsta filozofija dizajna.

Osnovna razlika između Taguchi metoda i klasičnih metoda optimizacije je u tome što se uzimaju u obzir promene performansi pod dejstvom faktora koji nisu pod uticajem dizajnera. Postoje dve vrste promenljivih koje predstavljaju ulazne komponente funkcije optimizacije: kontrolisani parametri (x) koji mogu biti podešeni na optimalnu vrednost i faktori šuma ξ koji se teško kontrolišu od strane dizajnera. Izgled standardnog modela dizajna robusnog sistema prikazan je na slici 11. Faktori šuma mogu biti posledica neizvesnih operacionih uslova A, dizajna parametara tolerancije B, neizvesnosti koje se tiču performansi opserviranog sistema C.



Slika 11. Dizajn robusnog sistema (Izvor: Beyer i Sendhoff, 2007)

Procedura nalaženja optimalnog rešenja kod robusnog dizajna je optimizacija dizajna proizvoda off-line. Cilj robusnog dizajna je da optimalno rešenje i njegove performanse ostaju nepromenjeni u različitim uslovima. Upravljanje kvalitetom nije u pokušajima da se smanje izvori odstupanja u proizvodima, već u tome da se sistem proizvodnje ili sam proizvod učini što manje osetljivim na izvore nekontrolisanih šumova ili spoljašnje uticaje.

Taguchi metoda je sistemska primena dizajna i analize eksperimenata u cilju projektovanja i poboljšanja kvaliteta proizvoda. Šematski prikaz faza implementacije Taguchi metoda prikazan je na slici 12.



Slika 12. Faze implementacije Taguchi metoda (Yang i Huang, 2012)

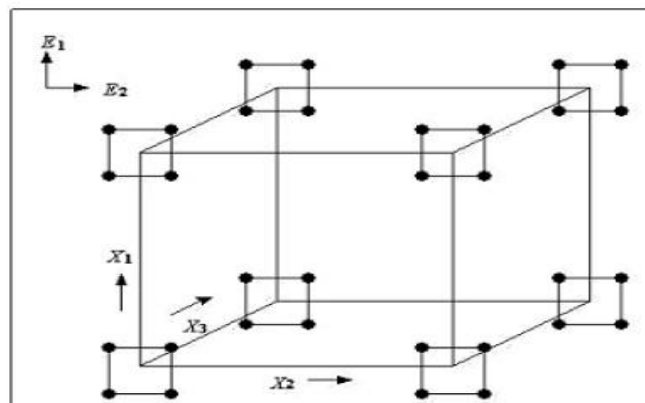
Generalno, postoje dve najvažnije razlike između Taguchi metoda i ostalih statističkih metoda eksperimentalnog dizajna (Gupta N.L., 2011; Niani i dr., 1999):

- parametri koji utiču na eksperiment mogu se ispitati kao kontrolabilni i parametri nad kojima kontrol nije moguća (faktor šuma),
- Taguchi metod se može koristiti za više od dva nivoa parametara.

3.8. Primena Taguchi metode u planiranju eksperimenta

Osnovna ideja Taguchi metodologije je primena tehnika eksperimentalnog planiranja u cilju definisanja nivoa kontrolisanih faktora koji proces čine robusnim i u prisustvu nekontrolisanih faktora (šum). Prisutni šumovi u velikoj meri imaju uticaj na odziv procesa, odnosno na kvalitet proizvoda i negativna dejstva uticaja nije moguće kontrolisati ili je finansijski neispaltivo održavati na određenoj definisanoj vrednosti. Šumovi predstavljaju primarne faktore koju utiču na pojavu varijacija u sistemu. Taguchi metod definiše kvalitet proizvoda kao odstupanje ili odstupanje određenog odgovora/odziva od željene ciljne vrednosti. Eksperimenti se realizuju na način da se definiše opseg varijabilnosti koji je rezultat varijacije kontrolisanih i nekontrolisanih faktora (šum).

Taguchi predlaže primenu ortogonalne matrice eksperimentalnog plana, kompletnog eksperimentalnog plana, po jedan za svaku od dve grupe faktora (kontrolisane varijable i šum). Prostor ovog tipa eksperimenta, eksterna matrica 2^2 uslova šuma (E) i interna matrica 2^3 uslova procesnih parametara (X), prikazan je na slici 13. Pristup koji Fisher definisao, pretpostavlja da je greška raspoređena nasumično unutar plana, Taguchi metod omogućava analizu uticaja šuma na odgovor.



Slika 13. Šema Taguchi eksperimentalnog plana (Izvor: Topalušić, 2014)

Nivoi procesnih parametara formiraju internu matricu, dok kompletan plan formira eksternu matricu. Taguchi plan je šematski predstavljen kao tipičan kontrolisani faktorski plan sa internom matricom, i dodatkom eksterne matrice šuma svakom uglu unutrašnje matrice (slika 13). Kombinacija nivoa kontrolisanih faktora koji odgovaraju najvišoj vrednosti S/N predstavlja najrobusnije uslove proizvodnje u granicama ispitivanih efekata faktora šuma.

3.9. Ortogonalni nizovi

Tehniku definisanja uslova (dizajna) eksperimenata koji uključuju više faktora prvi je predložio R.A.Fisher. Metoda je popularno poznata kao faktorski dizajn eksperimenata. Potpuni faktorski dizajn identifikuje sve moguće kombinacije za dati skup faktora. S obzirom da većina industrijskih eksperimenata uključuje značajan broj faktora, potpuni rezultati faktorskog dizajna mogu obuhvatiti veliki broj eksperimenata.

Faktori su različite varijable koje određuju funkcionalnost, performanse proizvoda ili sistema. Autori Pawar i dr., (2017) izvršili su klasifikaciju faktora na sledeći način:

1. Projektni parametri koji utiču na performanse;
2. Ulaz koji se može kontrolisati;
3. Projektni parametri koji se ispituju radi utvrđivanja njihovog uticaja na optimalni učinak.

Odabir adekvatnog ortogonalnog niza je presudan za uspeh eksperimenta. Zависи od broja stepena slobode, ciljeva eksperimenta i budžeta. Ortogonalni nizovi omogućuju da se utvrde zavisnosti između parametara a da se pri tom izvede minimalan broj eksperimenata. Stepene slobode se odnose na broj komparacija koje treba sprovesti u cilju utvrđivanja povoljnijeg nivoa i za koliko je bolji od drugog. Broj stepeni slobode je za 1 manji od broja nivoa povezanih sa faktorom. Broj stepeni slobode koji se odnose na interakcije između faktora jednak je proizvodu stepeni slobode parametara. Interakcija između parametara može biti zanemarena ukoliko međusobni uticaji parametara ne postoje ili nisu presudni.

Ortogonalni niz se, najčešće, bira iz kataloga Taguchi ortogonalnih nizova, koji sadrži 20 nizova od kojih je 18 ortogonalnih. Ortogonalni niz (ortogonalni niz sa fiksnim elementima) od s elemenata, (Kacker i dr., 1991) označava se kao $OA_N(s^m)$ je matrica dimenzija $N \times m$ čije kolone imaju osobinu da se u svakom paru kolona svaki od uređenih parova elemenata pojavljuje isti broj puta .

Ortogonalni niz $OA_4(2^3)$ odakle se vidi da se parovi (1, 1), (1, 2), (2, 1) i (2, 2) i svakom paru kolona ponavljaju samo po jednom, prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2. Ortogonalni niz $OA_4(2^3)$

Broj redova	Broj kolona		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Ortogonalni nizovi se mogu koristiti kao planovi za eksperimente sa više faktora gde kolone predstavljaju faktore, vrednosti unete u kolonama nivoa koji se testiraju za pojedine faktore i redovi predstavljaju broj testiranja.

Moguće je formirati i ortogonalne nizove sa mešovitim elementima. Prema (Kacker i dr., 1991) ortogonalni niz sa mešovitim elementima označen sa $OA_N(s^m \times t^n)$ je matrica sa N redova i $m+n$ kolona od kojih prvih m kolona svaka ima s elemenata, sledećih n kolona ima t elemenata, i u svakom paru kolona svaki mogući par elemenata pojavljuje se isti broj puta.

Iz definicije ortogonalnih nizova proizilazi da niz ostaje ortogonalan i ako se: redovi permutuju, kolone permutuju, i elementi unutar kolona permutuju.

Prilikom planiranja eksperimenata, sledeći predhodne permutacije, redosled faktora, i elemenata unutar faktora tj. izvođenje eksperimenata je proizvoljno.

Pronalaženje adekvatnog ortogonalnog plana za izvođenje eksperimenata sa maksimalnim brojem faktora i minimalnim brojem eksperimenata a da se pri tome ispune uslovi ekonomičnosti nije jednostavan zadatak.

Eksperimenti se sprovode na osnovu plana koji je kreiran primenom ortogonalnih nizova. Predstavljaju niz ispitivanja različitih uslova koji su kombinovani uz pomoć ortogonalnih nizova. Eksperimenti se realizuju slučajnim redosledom.

3.10. S/N odnos

Odnos signala i šuma (odnos S/N) predstavlja mernu skalu koja se primenjuje u elektronskoj industriji telekomunikacija. Odnos signala i šuma se primenjuje za merenje osetljivosti karakteristike kvaliteta koja se istražuje na kontrolisan način. Prema (Kamarudin i dr., 2017) u Taguchi metodi, termin „signal“ predstavlja željeni efekat (srednju vrednost) za izlaznu karakteristiku, a termin „šum“ predstavlja neželjeni efekat (poremećaj signala, standardnu devijaciju) za izlaznu karakteristiku koji utiču na ishod usled spoljašnjih faktora, odnosno faktora buke.

Taguchi metodologija kvaliteta predstavlja višestepeni proces, naime, koncipirana je na tri nivoa, dizajn sistema, dizajn parametara i dizajn tolerancije. U skladu sa tim, razvijena je strategija inženjeringa kvaliteta koja se može koristiti u oba konteksta. Proces karakterišu tri ključne faze (Kumar i dr., 2015):

- projektovanje sistema,
- projektovanje parametara,
- određivanje tolerancije odstupanja.

U prvoj fazi procesa, projektovanje sistema, fokus je na definisanju opštih parametara proizvodnje i obuhvata fazu dizajna procesa i fazu dizajna proizvoda. U fazi projektovanja proizvoda, definišu se aktivnosti: izbor materijala, komponente i okvirne vrednosti proizvodnih parametara.

Prema (Kumar i dr., 2015; Nalbant i dr., 2006) faza projektovanja procesa obuhvata: analizu obrađenih sekvenci, selekciju proizvodne opreme i okvirne vrednosti procesnih parametara. Takođe, uključuje inovacije i znanje iz primenljive oblasti nauke i tehnologije.

U drugoj fazi procesa, projektovanje parametara predstavlja optimizaciju podešavanja vrednosti procesnih parametara radi poboljšanja karakteristika performansi postizanjem zahtevanog nivoa kvaliteta i identifikaciju vrednosti procesnih parametara proizvoda, podešenih na optimalni nivo (Montgomery, 1997).

Optimalni uslov je odabran kada uticaj nekontrolisanih faktora (šuma) izaziva minimalnu varijaciju sistema performanse. Prema (Kumar i dr., 2015) odnosi signal-šum (odnosi S/N) se primenjuju za merenje efekta „šuma“ na sistem, i robustan (neosetljiv) sistem će imati visok odnos signal/šum. Pored toga, očekuje se da optimalne vrednosti procesnih parametara dobijene iz parametarskog dizajna budu neosetljive na varijacije uslova životne sredine i drugih faktora šuma. Autori Nalbant i dr. (2006) u svom radu naovde da parametarski dizajn predstavlja ključni korak Taguchi metode za postizanje visokog kvaliteta bez povećanja troškova.

Treća faza procesa, određivanje tolerancije odstupanja predstavlja fino podešavanje optimizovanih vrednosti parametara dobijenih u drugoj fazi, postavlja se tolerancija na odstupanja u opsegu dostupnih vrednosti oko ciljne vrednosti kontrolnih parametara (Gupta N.L., 2011; Taguchi i dr., 2005).

Faktore šuma moguće je klasifikovati na osnovu uticaja delovanja, odnosno da li potiču iz internog ili eksternog okruženja. Interni faktori šuma mogu biti u projektovanom sistemu ili sam sistem. Eksterni faktori šuma su varijacije koje su nametnute okolnostima koje nastaju nakon isporuke proizvoda, posledica spoljašnjih uslova, npr. temperatura, degradacija karakteristika proizvoda, itd. Taguchi koristi S/N u cilju utvrđivanja odstupanja karakteristike od željene vrednosti.

Rezultati eksperimenata se analiziraju korišćenjem odnosa S/N (Signal-to-Noise Ratio) kako bi se identifikovali faktori robusnog dizajna. Obrazloženje korišćenja S/N je da postoji interakcija sa kvadratnom funkcijom gubitka. Za svaki nivo procesnih parametara S/N odnos se izračunava na osnovu S/N analize.

Prema (Nalbant i dr., 2006; Sun i dr., 2015) bez obzira na kategoriju karakteristika performansi, veća vrednost S/N odnosa daje bolje karakteristike performansi. Stoga, optimalni nivo parametara procesa je nivo sa najvećim S/N odnosom. U zavisnosti od postavljenog cilja, definisane su tri karakteristike kvaliteta. Matematički se može prikazati relacijama (Ross, 2005):

1. Manje-bolje („Smaller-the-better“) cilj je minimizirati učinak.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N} \right) \quad (3.4)$$

gde y označava indikator učinka, oznaka i redni broj eksperimenta i N broj ponavljanja eksperimenta.

2. Veće-bolje („Larger-the-better“), cilj je maksimizirati učinak.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N 1/y_i^2}{N} \right) \quad (3.5)$$

gde y predstavlja izlaz određenih varijabli usled uticaja određenih ulaznih parametara. S/N odnosi su izračunati preko izraza odgovarajućeg Taguchi ortogonalnog niza.

3. Nominalno je najbolje („Nominal-is-best“), cilj je dostići predviđenu nominalnu vrednost.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{y}}{s} \right)^2 \right] \\ \bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_N}{N} \\ s = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1} \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Bez obzira na kategoriju kvaliteta karakteristike, veći S/N odgovara boljem kvalitetu posmatrane karakteristike. Prilikom obrade eksperimentalnih rezultata, računa se S/N odnos za svaki analizirani odziv.

3.11. Teorija fazi logike

Fazi logika se može razmatrati kao logika koja se bavi neodređenim. Fuzzy logika se kao ideja prvi put pojavljuje još 1965. godine u radu Zadeha. Prema istom autoru, ona predstavlja pogodan matematički aparat za tretiranje neizvesnosti, neodređenosti, subjektivnosti i dr. (Zadeh, 1965). Fuzzy model se definiše kao model zasnovan na ljudskom konceptu, tj korišćenjem prirodnog jezika.

Fazi skupovi i simbolička logika predstavljaju osnovu koncepta fazi logike. Takođe, predstavlja generalizaciju viševrednosne logike u kontekstu da fazi relacije i fazi skupove primenjuje kao alat u sistemu viševrednosne logike i može se razmatrati kao logika koja se bavi neodređenim.

Fazi logika punu afirmaciju doživljava u segmentu automatskog upravljanja, robotike, analize podataka, itd. Kao metodologija za modeliranje i analizu sistema je od ključnog značaja, zbog svoje specifičnosti da modelira kvantitativno i kvalitativno određene klase problema koji u svojoj strukturi uključuju nejasnoće i nepreciznosti.

Modeli zasnovani na fazi logici najčešće su iterativnog karaktera. U prvoj fazi razvoja modela, neophodna je identifikacija kritičnih promenljivih i parametara sistema. Potrebno je da utvrđene varijable i parametri budu definisani adekvatnom funkcijom pripadnosti. Takođe, neophodno je identifikovati aktivnosti na kontroli sistema i opisati u kontekstu lingvističkih pravila. U drugoj fazi, sistem se kontroliše na osnovu predhodno definisanih pravila. Omogućeno je da se merenja vrednosti promenljivih realizuju tokom trajanja procesa. Izmerene vrednosti procesa se transformišu na osnovu definisanih pravila, u adekvatne lingvističke termine. Nakon analize generisanih rezultata, ukoliko je neophodno, pristupa se korekciji i modifikaciji određenih pravila i/ili funkcija pripadnosti. Zatim se korigovanim pravilima i/ili funkcijama pripadnosti još jednom ispituje definisani model. Rezultat primene fazi logike u sistemima jeste taj da se definišu pozicije na kojima se može delovati i kontrolisati sistem.

Primenom fazi logike moguće je da se od raspoloživih podataka na efikasan način formira matematički model kao osnova za analizu. Uz pomoć lingvističkih promenljivih, kojim se okarakteriše fazi skup, omogućava se karakterizacija kompleksnih ili neadekvatno definisanih fenomena (Owens

i Coppola, 2012). Definisanjem fazi skupova na navedeni način, formira se funkcija pripadnosti koja karakteriše stepen pripadnosti elemenata određenom fazi skupu.

Fazi modeli predstavljaju matematički način predstavljanja neodređenosti i nepreciznosti informacije, shodno navedenom ovi modeli su nazvani fazi. Ravi (2005) navodi da ovi modeli imaju sposobnost prepoznavanja, predstavljanja, manipulacije, tumačenja i korišćenja informacija ili podataka koji su nejasni. Naime, u određenim situacija nije moguće znanje o sistemu predstaviti na apsolutno jasan i određen način. U cilju tačnog, pravilnog i jasnog prezentovanja znanja navedenih sistema, potrebno je promeniti pristup, da se umesto binarne logike primeni faza logika. Hanovich (2010) definiše skupove fazi logike kao objekte koji se koriste za modeliranje neodređenosti i neizvesnosti, kao i onih koji su prisutni lingvistički kada opisujemo stvari, koncepte i ideje bez jasno i precizno definisanih granica. Teorija fazi logike pruža metode za približno rezonovanje procesa na bazi nesigurnih, nepotpunih, nepreciznih i neodređenih informacija. Štaviše, alati fazi logike pružaju mogućnost da se definišu određeni zaključci na osnovu nejasnih, dvosmislenih, nepreciznih podataka ili u situacijama kada je količina raspoloživih informacija neodovoljna ili postoji potpun nedostatak informacije. Prema (Helman, 2001) fazi logika predstavlja efektivan i pogodan alat za kontrolu i upravljanje složenim procesima u industriji, ekspertskim sistemima i za adekvatno korišćenje u određenim aplikacija. Takođe, omogućava specifičan pristup upravljaju problemskom situacijom i njenom i klasifikacijom. Fokus modela je baziran na rešavanju problema a ne na iznalaženju matematičkog modela, u slučaju da on postoji. Međutim, sa druge strane fazi sistem zahteva potrebno ekspertsko znanje za formiranje baza pravila, kombinaciju fazi skupova i defazifikaciju.

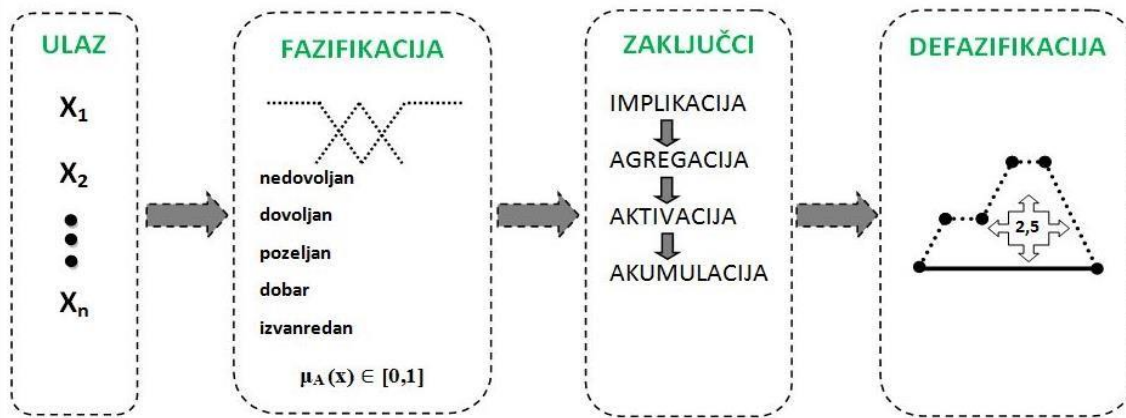
Za veoma kompleksne procese, u situacijama kada za njih ne postoji jednostavan matematički model, za nelinearne procese ili za obradu jezičko formulisanog stručnog znanja, primena fazi logike je svrsishodna i relevantna (Helman, 2001).

Autori McGill i Ayyub (2007), navode da osnovu za formiranje modela fazi logike čine lingvističke promenljive opisane fazi brojevima. Naime, kod klasičnih skupova koji su jasni, čija je vrednost jasno definisana, fazi broj je fazi skup definisan u skupu realnih brojeva čije je numeričko značenje nejasno definisano. Osnovna prednost koncepta fazi skupova jeste sposobnost da modeluje nepouzdana i dvosmislene informacije. Razlika fazi skupova u odnosu na klasične skupove (Reviez i Leon, 2009) jeste funkcija pripadnosti koja nije diskretna već neprekidna, gde različiti stepeni pripadnosti imaju vrednost između činjenica da i ne, vrednosti 0 i 1, činjenica istinito i neistinito. Generalo, funkcija pripadnosti predstavlja liniju koja definiše prelaz između skupova. Različitosti fazi logike, kao ako-onda pravilo i posredni način zaključivanja, svrstavaju je u posebni sistem (Zadeh, 1994).

Fazifikacija predstavlja postupak pretvaranja ulaznih podataka u fazi skup ili fazi broj. U ovom postupku, ulazi se zovu jasni ulazi jer sadrže precizne specifične informacije o procesnim parametrima. Baza fazi definiše rezultat ili izlaznu veličinu za svaku kombinaciju ulaznih promenljivih.

Veći broj pravila u kojima se kvalitativno opisuje rešenje neke problemske situacije predstavlja fazi pravila. Takođe, može egzistirati više ulaznih promenljivih. Glavni deo fazi sistema je baza znanja u kojoj se nalaze baza podataka i baza pravila. Autor Zadeh, (1994) navodi da bazu podataka definišu funkcije članstva fazi skupova koji se koriste kod fazi pravila gde u bazi pravila egzistira niz fazi ako-onda pravila.

Baza fazi pravila (koja se sastoji od grupe pravila ako) je formirana da izrazimo odnos između ulaza i izlaza. Zaključni sistem ili odlučivanje - donosi zaključke o operacijama performansi jedinica za određena pravila. Ona upravlja na način na koji su kombinovana pravila. Proces aproksimativnog rezonovanja završava defazifikacijom, postupkom kojim se rezultat fazi zaključivanja kovertuje u realan broj. Fazi zaključivanje koristi stepen saglasnosti između činjenica i preduslova pravila sa ciljem proračuna zaključka. Proces karakteriše nekoliko uzastopnih aktivnosti kojim se od fazi-ulaza, preko baze fazi pravila, generiše rešenje (fazi-izlaz), kao osnove za budući pravac upravljanja procesima (slika 14).



Slika 14. Proces fazi zaključivanja (Izvor: Mičić i dr., 2016)

Mamdani fazi model zasniva se na kolekciji ako-onda pravila. Autor (Garg, 2010), navodi da Mamdani model predstavlja najčešće korišćenu tehniku za rešavanje velikog broja realnih problema. Prema istom autoru, prednost ovog modela je to što bazu pravila formira ekspert iz oblasti koja se istražuje. Proces aproksimativnog rezonovanja završava defazifikacijom.

Defazifikacija predstavlja postupak kojim se rezultat fazi zaključivanja pretvara u realan broj. Dakle, defazifikacija-izlaz generiše zaključivački blok koji je uvek u prirodi nejasan. Ne postoji mogućnost primne rezultata fazi zaključivanja u dobijenom obliku, pa je neophodno fazi zaključke transformisati u jasne, zbog budućeg toka procesa primene (Sivanandam i dr., 2007).

3.12. ANOVA (Analiza varijanse)

Analiza varijanse je postupak za poređenje više uzoraka, gde svaki uzorak predstavlja poseban osnovni skup. U uslovima proizvodnje, ANOVA identifikuje koji od procesnih parametara ima najveći uticaj na odziv procesa (Rajabloo i dr., 2014; Abda i dr., 2016; Dao, 2017; Cirak i Kozan, 2019; Ayele, 2019; Kumar, 2019). Analiza varijanse razdvaja celokupan varijabilitet na određeni broj delova pri čemu se svaki od njih integriše posebnim sistemom promene tako da je moguće definisati ne samo koji su izvori promene u pitanju nego i vrednost parcijalni doprinosa svakog dela u ukupnom variranju. Prvo se izračunava stepen slobode za sve faktore: $f_T = N - 1$ gde N predstavlja broj eksperimenata.

Za svaki pojedinačni faktor $f_x = k_x - 1$ gde je k broj nivoa za faktor x . Zatim se izračunava suma kvadrata odstupanja od srednje vrednosti, matematički se može prikazati relacijom:

$$S_T = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N} \quad (3.7)$$

U relaciji za sumu kvadrata odstupanja od srednje vrednosti drugi član je zajednički za sve varijanse i obeležava se sa C , matematički se može prikazati :

$$C = \frac{(\sum Y)^2}{N} \quad (3.8)$$

Suma kvadrata odstupanja od srednje vrednosti za izračunavanje varijanse između grupa, može se dobiti preko izraza:

$$S_Y = \frac{(Y_{n_1})^2}{n_1} + \frac{(Y_{n_2})^2}{n_2} + \dots + \frac{(Y_{n_n})^2}{n_n} - C \quad (3.9)$$

Vrednosti varijanse greške za sve faktore zajedno i za svaki faktor pojedinačno, može se dobiti pomoći izraza:

$$V = \frac{S}{f} \quad (3.10)$$

Fisher test F i njegova vrednost se izračunavaju deljenjem varijanse grupa V_Y sa ukupnom varijansom V_T . Ova vrednost se može upotrebiti kako bi se utvrdio koji faktori imaju značajan uticaj na željene performanse procesa, može se dobiti sledećim izrazom:

$$F_Y = \frac{V_Y}{V_T} \quad (3.11)$$

Na kraju se računa doprinos za svaki faktor P (%) koji pokazuje relativnu snagu faktora na smanjanje varijacija može se prikazati izrazom:

$$P_Y = \frac{S_Y}{S_T} \quad (3.12)$$

Prema (Pareek i Bhamniya, 2013) navedeni rezultati omogućavaju da se odredi kombinacija faktora i njihovih nivoa koji daju najbolji rezultat. P -vrednost predstavlja verovatnoću koja meri dokaze protiv nulte hipoteze i izračunava se za svaki faktor posebno. Niže verovatnoće pružaju jače dokaze protiv nulte hipoteze. Nivo značajnosti od 0.05 ukazuje na 5% rizik zaključivanja da udruživanje postoji kada nema stvarne asocijacije. Takođe, kada je P vrednost > 0.05 , ukazuje da analizirani faktor značajano utiče na karakteristike kvaliteta, kada je vrednost P za faktor ≤ 0.05 , ukazuje na njegov minimalni značaj i može se zanemariti.

Poglavlje 4
EKSPERIMENTALNA
ISTRAŽIVANJA

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

4.1. Definisane plana eksperimenta

Eksperimentalna istraživanja realizovana u ovoj disertaciji mogu se podeliti u četiri segmenta koja čine:

- i. Eksperimentalni dizajn koji ima za cilj definisanje tehnoloških procesnih parametara, njihovih nivoa i ortogonalnog niza.
- ii. Izrada uzoraka prema definisanom eksperimentalnom planu.
- iii. Ispitivanje i merenje odziva procesa, čiji će rezultati omogućiti formiranje hibridnog višedozivnog optimizacionog modela za proces proizvodnje PVC cevi tehnološkim postupkom ekstruzije i identifikaciju seta optimalnih tehnoloških procesnih parametara.
- iv. Eksperimentalna verifikacija hibridnog višedozivnog optimizovanog modela, na osnovu uzastopnih ponavljanja eksperimenta na tački optimuma.

4.2. Eksperimentalni dizajn

Eksperimentalni dizajn predstavlja sistematični način planiranja eksperimenata u cilju njihove realizacije na adekvatan način. Za projektovanje eksperimenta Taguchi metodom, neophodno je utvrditi broj parametara (faktora) i njihove nivoe. Istraživanjem literature (Ayele, 2019; Ariani i dr., 2019; Pawar, 2017; Kumar, 2019; Kumar i Goyal, 2019; Kerealm i dr., 2016) i u saradnji sa procesnim inženjerima kompanije „Peštan“ koji su neposredno uključeni za proces proizvodnje troslojne cevi od neplastificiranog UPVC-a tehnološkim postupkom ekstruzije, definisani su kriterijumski zahtevi za selekciju i odabir tehnoloških procesnih parametara. Neophodno je da procesni parametri imaju direktan uticaj na proces transformacije materijala, kontrolabilnost, interakcijska međuzavisnost između parametara minimalna ili ne postoji, i da tehnološki procesni parametar ima direktan uticaj na odziv procesa posmatran kroz fizičko-mehaničku karakteristiku kvaliteta. Identifikovano je osam operativnih tehnoloških procesnih parametara prema definisanim kriterijumskim zahtevima koji će biti korišćeni u ovom istraživanju. Ne postoji interakcija između identifikovanih parametara.

- Brzina vuče. Veličina sa kojom se polimerni materijal vuče od alata. Za izvlačenje kalibrisanih cevi koriste se namenski uređaji, na principu beskonačne trake, koji obuhvatanjem veće površine cevi sprečava nastanak lokalne deformacije. Brzina linije se koristi za kontrolu produktivnosti i glatkoću površine. Vrlo je važno da uređaj za izvlačenje cevi radi neprekidno i bez zastoja.

- Temperatura dizne alata. Temperature se koriste za proces uravnoteženja toka materijala, strukturu neprekidne termoplastične materije kao i sekundarne karakteristike koje mogu uticati na površinski sjaj i boju.

- Dozer ekspandera. Funkcija dozera ekspandera je regulacija doziranja sredstva za ekspanziju, značajan uticaj na proces i definisanje mehaničkih karakteristika cevi.

- Obrtaji puža ekstrudera. Broj obrtaja puža je veličina kojom se reguliše uticaj na opterećenje i pritisak materijala prilikom ulaska u alat za ekstrudiranje i količinu sloja u odnosu na koekstruder. U slučaju da se je zapreminska ispunjenost velika, brzina puža kontroliše kapacitet ekstrudera.

- Obrtaji puža koekstrudera. Broj obrtaja puža je veličina kojom se reguliše uticaj na opterećenje i pritisak materijala prilikom ulaska u alat za ekstrudiranje i količinu sloja u odnosu na ekstruder. U slučaju da se je zapreminska ispunjenost velika, brzina puža kontroliše kapacitet koekstrudera.

- Temperature cilindra ekstrudera i koekstrudera. Podešavanjem temperatura u zonama cilindra omogućava se kontrola prekomerne fuzije i toka materijala, ima značajan je uticaj na proces želiranja, homogenost rastopa u skladu sa formulisanim komponentama.

- Dozer smeše ekstrudera. Efektivno kontroliše ispunjenost zavojnice puža materijalom. Ako su zavojnice pune, tada će puž prerađivati tvrdi materijal preko energije smicanja.

- Dozer smeše koekstrudera. Efektivno kontroliše ispunjenost puža materijalom. Ako su zavojnice pune, tada će puž prerađivati tvrdi materijal preko energije smicanja.

Nakon definisanja tehnoloških procesnih parametara, definisani su kriterijumski zahtevi za selekciju i odabir odziva procesa. Sa druge strane, potrebno je da se odziv može tačno i precizno izmeriti, da je u direktnoj vezi sa transformacijom energije, tj. povezani sa osnovnim mehanizmom procesa proizvodnje i da bude integralan, odziv koji u potpunosti opisuje vezu ulaz-izlaz procesa.

Odzivi procesa su definisani i bazirani na šest najznačajnijih fizičkih i mehaničkih karakteristika kvaliteta (Prilog 1). Definisani tehnološki procesni parametri i njihovi nivoi kao i odzivi procesa su prikazani u tabeli 3. Nakon usvajanja tehnoloških procesnih parametara koji će biti uvršteni u plan eksperimenta a koji čini osam faktora i definisanih nivoa, kreira se eksperimentalni plan. Plan eksperimenta koji će biti korišćen za formiranje modela prikazan je u tabeli 4. Plan je kreiran odabirom ortogonalnog niza $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ koji predviđa 18 eksperimenata primenom softvera Minitab 17.

Tabela 3. Tehnološki procesni parametri, njihovi nivoi i odzivi procesa

Faktor	Faktori/procesni parametri	Jedinica	Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3
A	Brzina vuče linije	(m/min)	8.8	9.1	-
B	Temperatura dizne alata	(°C)	201	206	211
C	Dozer ekspandera	(o/min)	19.2	21.2	23.2
D	Obrtaji puža ekstrudera	(o/min)	16.5	17.5	18.5
E	Obrtaji puža koekstrudera	(o/min)	39.6	40.6	41.6
F	Temperatura cilindra \bar{T} Ekstrudera + koekstrudera	(°C)	174	176	178
G	Dozer smeše ekstrudera	(o/min)	24.1	26.1	28.1
H	Dozer smeše koekstrudera	(o/min)	34.4	36.4	38.4
Odzivi procesa: čvrstoća prstena, fleksibilnost prstena, TIR test, debljina zida, uzdužno skupljanje, debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja					

Tabela 4. Prikaz plana eksperimenta - Ortogonalni niz $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

Redni broj eksperimenta	Tehnološki procesni parametri i njihovi nivoi							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1.	1	1	1	1	1	1	1	1
2.	1	1	2	2	2	2	2	2
3.	1	1	3	3	3	3	3	3
4.	1	2	1	1	2	2	3	3
5.	1	2	2	2	3	3	1	1
6.	1	2	3	3	1	1	2	2
7.	1	3	1	2	1	3	2	3
8.	1	3	2	3	2	1	3	1
9.	1	3	3	1	3	2	1	2
10.	2	1	1	3	3	2	2	1
11.	2	1	2	1	1	3	3	2
12.	2	1	3	2	2	1	1	3
13.	2	2	1	2	3	1	3	2
14.	2	2	2	3	1	2	1	3
15.	2	2	3	1	2	3	2	1
16.	2	3	1	3	2	3	1	2
17.	2	3	2	1	3	1	2	3
18.	2	3	3	2	1	2	3	1

Struktura eksperimentalnog plana sa kvantifikovanim vrednostima dobijena primenom L_{18} ortogonalnog niza data je u tabeli 5. Kao što se vidi u tabeli 5, sedam tehnoloških procesnih parametara definisano je u tri nivoa, jedan parametar je definisan u dva nivoa.

Tabela 5. Struktura plana eksperimenta dobijena primenom L_{18} ortogonalnog niza

Redni broj eksperimenta	Tehnološki procesni parametri i njihovi nivoi							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1.	8.8	201	19.2	16.5	39.6	174	24.1	34.4
2.	8.8	201	21.2	17.5	40.6	176	26.1	36.4
3.	8.8	201	23.2	18.5	41.6	178	28.1	38.4
4.	8.8	206	19.2	16.5	40.6	176	28.1	38.4
5.	8.8	206	21.2	17.5	41.6	178	24.1	34.4
6.	8.8	206	23.2	18.5	39.6	174	26.1	36.4
7.	8.8	211	19.2	17.5	39.6	178	26.1	38.4
8.	8.8	211	21.2	18.5	40.6	174	28.1	34.4
9.	8.8	211	23.2	16.5	41.6	176	24.1	36.4
10.	9.1	201	19.2	18.5	41.6	176	26.1	34.4
11.	9.1	201	21.2	16.5	39.6	178	28.1	36.4
12.	9.1	201	23.2	17.5	40.6	174	24.1	38.4
13.	9.1	206	19.2	17.5	41.6	174	28.1	36.4
14.	9.1	206	21.2	18.5	39.6	176	24.1	38.4
15.	9.1	206	23.2	16.5	40.6	178	26.1	34.4
16.	9.1	211	19.2	18.5	40.6	178	24.1	36.4
17.	9.1	211	21.2	16.5	41.6	174	26.1	38.4
18.	9.1	211	23.2	17.5	39.1	176	28.1	34.4

Tehnološki parametar A, brzina vuče linije, definisan je u dva nivoa u cilju minimiziranja rizika od nastupanja procesne havarije na proizvodnoj liniji.

Rizik promene brzine vuče linije:

- Prekid procesa proizvodnje na proizvodnoj liniji zbog opadanja vrednosti pritiska vakuuma u kadi za kalibrisanje, odnosno, oblikovanja cevi u konačni poprečni presek. Opseg definisanih vrednosti vakuuma kreće se u intervalu od 0.2-0.3 bara. Povećanjem brzine vuče linije dolazi do istežanja cevi, posledično nastupa izjednačavanje atmosferskog pritiska i potpritiska u kadi za kalibrisanje. Pod navedenim uslovima ne postoji mogućnost oblikovanja cevi.

- Ekstrudirana cev, nema definisan precizan presek izlaznog otvora alata. Nakon izlaska plastičnog materijala iz mlaznice dolazi do njegove ekspanzije i izuzetno je veliko pri radu s niskim temperaturama prerade i velikim brzinama.

Moguća je i suprotna pojava, odnosno, da se presek pri izlasku iz mlaznice minimizira. Uzrok navedenog defekta je veća brzina izvlačenja od brzine ekstruzije materijala iz alata. Dobija se asimetrična cev sa povećanim promerom i smanjenom debljinom zida.

4.3. Izrada uzoraka

Cevi su izrađene od komercijalno dostupnih materijala za proces proizvodnje troslojne cevi od neplastificiranog UPVC-a tehnološkim postupkom ekstruzije. Kompaund (suvi prah) je polimerna smeša koja predstavlja višekomponentni sistem u koji ulaze UPVC granule, stabilizator, punioc, pigmeti, hemijski aditivi, lubirkanti. PVC garnule, Ongrovil S-5167 (proizvođač Borsod Chem Zrt. Mađarska), punilo (kalcijum karbonat CaCO_3 , Omia, Srbija). PVC stabilizator, Advapak (dobavljač PMC Group, USA). Stearinska kiselina (lubirkant), trgovačko ime LKO, dodaje se da bi se olakšalo mešanje i protok polimera i pigmenta. Hemijski aditiv, (titanium dioksid, Baisha Plastics, Kina).

Pigmenti boje se primenjuju za definisanje boje gotovog proizvoda. Pigment Carbon Black, Harvest Enterprise, (proizvođačka oznaka HFN 6207).

Sredstvo za ekspaniranje, (azodikarbonamid), čije se doziranje reguliše neposredno tokom procesa, dozerom ekspandera, jedan od procesnih parametara koji se tokom realizacije eksperimentalnog plana varira.

Precizna formulacija kompaunda nije dostupna zbog zaštite proizvoda, ali se približna proporcija može dobiti na osnovu informacija operatera za pripremu postupka ekstruzije i kapaciteta mešača suvog praha. Na osnovu predhodno navedenog, razvijen je inventar sirovina i količina u cilju definisanja ulaza za proces proizvodnje PVC cevi. Formulacija suvog praha je prikazana u tabeli 6.

Tabela 6. Formulacija suvog praha (kg) za proizvodnju PVC cevi

Broj	Sirovina	Odnos formulacije kompaunda (kg)
1	PVC granule	150 kg
2	Stabilizator	4.5 kg
3	Punioč (kalcijum karbonat)	8.5 kg
4	Titanium dioksid	0.25 kg
5	Pigment carbon black (čada)	0.025 kg
6	Stearinska kiselina (lubirkant)	0.35 kg
7	Pigment-boja	0.02 kg
Ukupno		163.7 kg

Uzorci cevi su izrađeni na dvopužnim ekstruderima austrijskog proizvođača Theysohn.

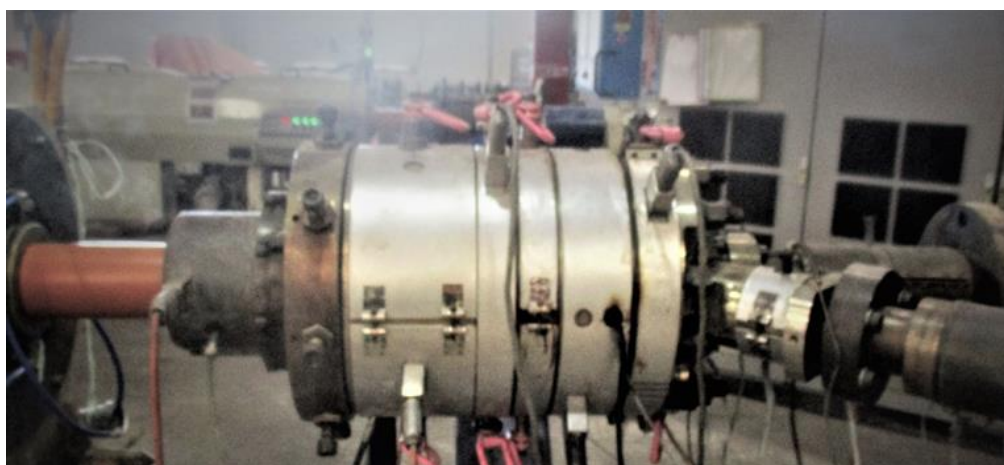
Za proces proizvodnje troslojne cevi od neplastificiranog UPVC-a spoljašnjeg prečnika $\varnothing 110$ mm sa strukturiranim zidom koristi se tehnološki postupak ekstruzije i koekstruzije (detaljnije opisano u poglavlju 2.1. Ekstruzija, 2.2. Proizvodnja cevi i poglavlju 2.4. PVC cevi). Korišćen je tandem ekstrudera, koji sadrži dva odvojena ekstrudera i glavu za mešanje, adapter koji se nalazi između prvog i drugog ekstrudera (slika 15).

Funkcije ekstrudera su diferencirane. Na osnovu stepena diferenciranosti u funkcionalnom i strukturalnom smislu, prvi ekstruder tokom procesa proizvodnje direktnim uticajem na proces transformacije materijala formira središnji sloj cevi od penastog neplastificiranog UPVC-a. Funkcija drugog ekstrudera je formiranje spoljašnjeg i unutrašnjeg glatkog sloja od UPVC-a. Svaki od ekstrudera ima odvojen pogon, različite brzine puža, temperature cilindra i dozere smeše.

Uzorci su proizvedeni u skladu sa standardom EN 13476. Na slici 16 prikazna je glava za mešanje i adapter instalirani u realnom okruženju. Ekstrudirani test uzorci PVC cevi prikazani su na slici 17a. Finalni proizvod prikazan je na slici 17b.



Slika 15. Tandem dvopužnih ekstrudera (Theysohn)



Slika 16. Prikaz glave za mešanje i adaptera u realnom okruženju



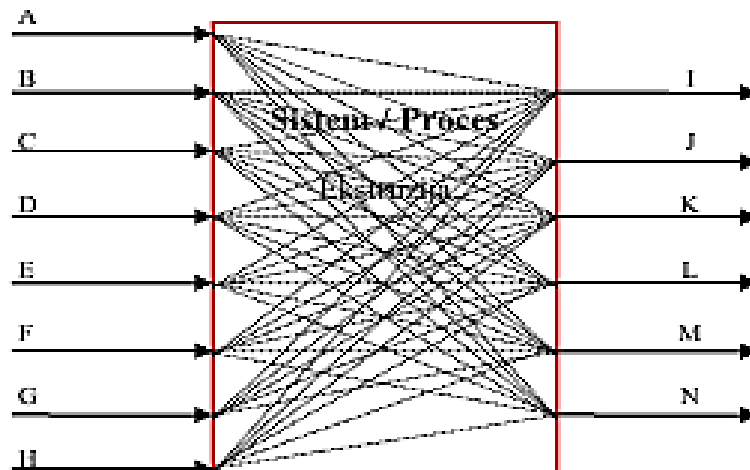
a)

b)

Slika 17. Ekstrudirane PVC cevi
a) test cevi nakon procesa ekstruzije i b) finalni proizvod

Eksperiment je baziran na osam ključnih tehnoloških procesnih parametara koji ispunjavaju definisane kriterijumske zahteve i imaju direktan uticaj na odzive procesa i uticaj na kvalitet PVC cevi. Eksperimenti su izvođeni slučajnim redosledom prema definisanom eksperimentalnom planu dobijenom primenom ortogonalnog niza L_{18} , prikazanog u tabeli 5.

S obzirom da se tokom postupka ekstruzije direktnim dejstvom i uticajem tehnoloških parametara procesa formulacija suvog praha transformiše i nakon procesa transformacije efekat dejstva parametara procesa ogleda se u višestrukim odzivima procesa-izlaznim karakteristikama kvaliteta posmatranim kroz mehaničko-fizičke karakteristike proizvoda. Ulazno-izlazne interakcije procesnih parametara, procesa i odziva, prikazane su na slici 18.



Slika 18. Interakcije procesnih parametara i odziva procesa (Izvor: Autor, 2022)

Obeležja I, J, K, L, M i N označavaju odzive procesa koji su predmet istraživanja. Odgovori koji doprinose razumevanju složenih odnosa interakcija između ulaza (tehnoloških parametara procesa) i izlaza (odziva procesa). Realizovano je ukupno 18 eksperimenata.

4.4. Ispitivanje i merenje

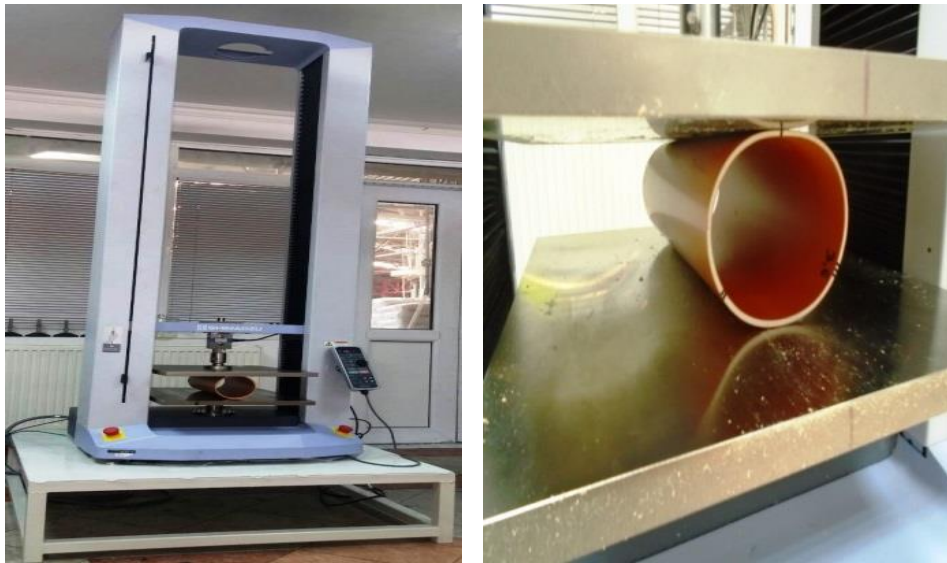
U laboratoriji kompanije „Peštan“ u Aranđelovcu, 24 časa nakon procesa proizvodnje jer nakon navedenog vremena dolazi do stabilizacije materijala cevi, izvršena su ispitivanja i merenja odziva procesa. Određena su svojstva i veličine sledećih mehaničkih i fizičkih karakteristika kvaliteta dobijenih uzoraka UPVC cevi prema definisanim standardima koji se primenjuju u proizvodnji troslojnih cevi od neplastificiranog UPVC-a: čvrstoća prstena [kN/m^2], fleksibilnost prstena [N], TIR test [%], debljina zida [mm], uzdužno skupljanje [%] i debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja cevi [mm].

4.5. Čvrstoća prstena

Neophodno je da cev poseduje određena mehanička svojstva i potrebne konstrukcione karakteristike, u cilju ispunjavanja zahteva kompleksnih uslova eksploatacije infrastrukturnog sistema. Čvrstoća prstena predstavlja mehaničko svojstvo čvrstinu odnosno krutost, otpornost cevi prema deformaciji (promeni promera) koji utiče na njihovu upotrebljivost tokom perioda eksploatacije (npr. vodonepropusnost). Kod statičkih opterećenja, vertikalna deformacija dijametra pri merodavnom opterećenju od 6%. PVC cevi predstavljaju deformabilnu strukturu odnosno preuzimaju naprezanje bez nastanka pukotina i razaranja. Vertikalno opterećenje izaziva deformaciju cevi, smanjenje njene vertikalne visine a cev poprima elipsast oblik.

Ispitivanje prstenaste krutosti vršeno je na dinamometru proizvođača Shimadzu, AGS-X 20 kN, (Japan), prikazanom na slici 19a. Uzorak postavljen između paralelnih poloča prikazan je na slici 19b.

Parametri ispitivanja su definisani standardom SRPS EN ISO 9969:2016, temperatura okoline $23 \pm 2^\circ\text{C}$, tip testa kompresija, brzina sabijanja $5\text{mm}/\text{min}$, način testiranja pojedinačni, dužina uzorka 300 mm . Deformacija okrugle cevi pod vertikalnim opterećenjem, prikazana je na slici 20 .



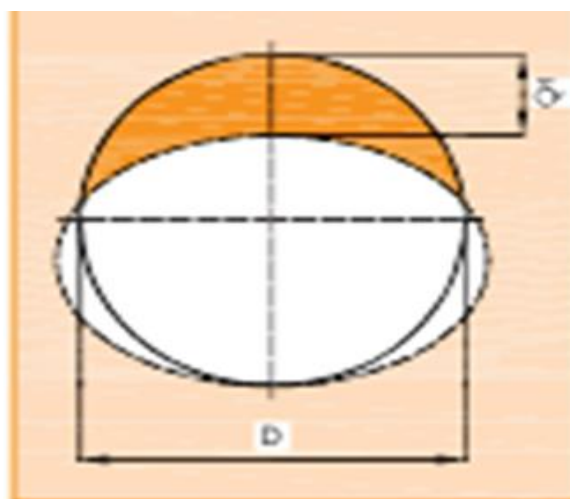
a)

b)

Slika 19. Dinamometar za ispitivanje čvrstoće i fleksibilnosti prstena
a) Shimadzu, AGS-X 20 kN i b) uzorak postavljen između dve paralelne ploče

Uzorkovana cev se iseče na tri jednaka dela dužine $300 \pm 10\text{mm}$ (uzorak a, b, c). Izvrši se merenje uzoraka u vidu epruvete dužine $300 \pm 10\text{mm}$. Mere se spoljašnji dijametar, debljina zida, dužina i masa uzoraka. Prvi uzorak se obeležava na mestu gde je minimum debljine zida, a sledeća dva na 120° odnosno 240° od početne tačke.

Predhodno izmerena vrednost dijametara (za sve tri tačke) umanjuje se za 3% - unutrašnji prečnik 103.6mm , $103.6 - (0,03 \times 100) = 100.6\text{mm}$. Pomično kljunasto merilo sa nonijusom se podesi na dobijenu vrednost za svaku tačku. Pripremljeni uzorak postavlja se u uređaj za ispitivanje čvrstoće i fleksibilnosti između dve paralelne ploče (slika 27b). Aktivacijom komande na aparaturi gornja pokretna ploča vertikalnom silom sabijanja deluje na uzorak. Ispitivanje je završeno kada gornja strana uzorka dodirne pipak pomičnog kljunastog merila koje je podešeno za svaku tačku. Vrednosti čvrstoće prstena cevi su određene i prikazane su u tabeli 7.



Slika 20. Deformacija okrugle cevi pod vertikalnim opterećenjem

Tabela 7. Rezultati testa čvrstoće prstena

Redni broj	Čvrstoća prstena [kN/m ²]
1.	4.40
2.	7.40
3.	6.50
4.	6.00
5.	5.60
6.	6.50
7.	4.60
8.	6.80
9.	5.90
10.	4.20
11.	5.10
12.	5.60
13.	4.50
14.	4.70
15.	5.00
16.	4.70
17.	5.10
18.	7.20

Rezultati merenja pokazuju da uzorci dobijeni u drugom eksperimentu imaju najvišu vrednost za svojstvo čvrstoća prstena 7.40 kN/m², pri brzini vuče od 8.8 (m/min), temperaturi dizne alata 201(°C), dozeru ekspandera 21.2 (o/min), obrtajima puža ekstrudera 17.5 (o/min), obrtajima puža koekstrudera 40.6 (o/min), temperaturi cilindra ekstrudera i koekstrudera 176(°C), dozeru smeše ekstrudera 26.1 (o/min) i dozeru smeše koekstrudera 36.4 (o/min). Najniža vrednost ispitivanog svojstva uzorka na analizirani odziv je zabeležena u prvom eksperimentu, 4.40 kN/m².

4.6. Fleksibilnost prstena

Određivanjem savitljivosti po obodu utvrđuje se mehanička karakteristika da li cev ispunjava zahtev da podnese deformaciju veću 30% u odnosu na njen spoljašnji dijametar. Za određivanje fleksibilnosti prstena, korišćen je dinamometar Shimadzu, AGS-X 20 kN, (Japan), prikazan na slici 27a.

Neophodno je da cev ispunjava određene konstrukcione karakteristike u cilju da zadovolji uslove eksploatacije. Pored odgovarajuće krutosti, neophodno je da cev poseduje fleksibilnost (savitljivost) i otpornost na dinamička i statička opterećenja. Ispitivanja su sprovedena u skladu sa standardom SRPS EN ISO 13968:2009; temperatura okoline 23±2°C, tip testa kompresija, brzina sabijanja 5mm/min, način testiranja pojedinačni, dužina uzorka 300 mm.

Postupak merenja:

Nije potrebno meriti unutrašnji dijametar u označenim tačkama, jer se ova metoda odnosi na sabijanje 30% od spoljašnjeg dijametra cevi. Ispitivanje je završeno kada je cev sabijena 30% od svog spoljašnjeg dijametra (ili njenim pucanjem), zatim se postavlja sledeći uzorak i postupak se ponavlja. Vrednosti fleksibilnosti prstena nakon ispitivanja, prikazane su u tabeli 8.

Tabela 8. Rezultati testa fleksibilnosti prstena

Redni broj	Fleksibilnost prstena [N]
1.	969.70
2.	969.70
3.	1153.90
4.	1258.40
5.	1224.50
6.	1172.80
7.	1005.60
8.	1166.80
9.	1142.90
10.	862.50
11.	982.80
12.	1028.60
13.	1032.50
14.	1061.40
15.	1142.00
16.	975.80
17.	1136.00
18.	1240.50

Uzorci ispitani na svojstvo fleksibilnost prstena pokazuju najvišu vrednost u četvrtom eksperimentu, pri brzini vuče od 8.8 (m/min), temperaturi dizne alata 206(°C), dozeru ekspandera 19.2 (o/min), obrtajima puža ekstrudera 16.5 (o/min), obrtajima puža koekstrudera 40.6 (o/min), temperaturi cilindra ekstrudera i koekstrudera 176(°C), dozeru smeše ekstrudera 28.1 (o/min) i dozeru smeše koekstrudera 38.4 (o/min) od 1258.40N. Najnižu vrednost ispitivanog odziva procesa imao je uzorak izrađen u desetom eksperimentu, 862.50 N.

4.7. TIR test

Metoda ispitivanja otpornosti na spoljne udare obodnom metodom kojom se utvrđuje mera otpornosti na spoljašnji udar proverom da li će se cev i fitting oštetiti prilikom transporta, skladištenja i sklapanja ili ugradnje. Za ispitivanje otpornosti na spoljne udare korišćena je aparatura za ispitivanje otpornosti na spoljne udare, IMPACT 2000; Tehnički fakultet Čačak, prikazana na slici 21a. Parametri ispitivanja propisani su standardom SRPS EN ISO 3127:2018; broj udara 6, visina tega 1600 mm, brzina pada 5.50 m/s, masa tega 0.80kg, cev je predhodno kondicionirana na 0°C. Uzorak za ispitivanje postavljen u „V“ blok aparature, prikazn je na slici 21b. Podešavanje vrednosti za ispitivanje je izvršeno preko digitalne jedinice, prikazane na slici 22.



a)

b)

Slika 21. Uređaj za ispitivanje otpornosti na spoljne udare obodnom metodom
a) IMPACT 2000 (Srbija) i b) uzorak postavljen u „V“ blok



Slika 22. Podešavanje parametara za ispitivanje

Opis postupka:

Ravnomerno obeležavanje poprečnog preseka cevi po obimu, linije označavaju mesta udara. Broj udara je unapred definisan standardom SRPS EN 13476-2. Montira se teg predviđene mase, koji se ispušta slobodnim padom sa unapred definisane visine na uzorak cevi. Vršni se predviđen broj udara. Step en oštećenja se procenjuje kao faktički udar TIR (*eng. True impact rate*) za seriju proizvoda gde je maksimalna vrednost 10% (TIR= ukupan broj oštećenja podeljen sa ukupnim brojem udara, izražava se kao %).

Prema zahtevu standarda EN13476-2 i 3, postoji samo jedan zahtev: TIR<10% pri temperaturi 0°C. Rezultati ispitivanja TIR testa, su prikazani u tabeli 9 .

Tabela 9. Rezultati TIR testa

Redni broj	TIR test [%]
1.	4.40
2.	7.40
3.	6.50
4.	6.00
5.	5.60
6.	6.50
7.	4.60
8.	6.80
9.	5.90
10.	4.20
11.	5.10
12.	5.60
13.	4.50
14.	4.70
15.	5.00
16.	4.70
17.	5.10
18.	7.20

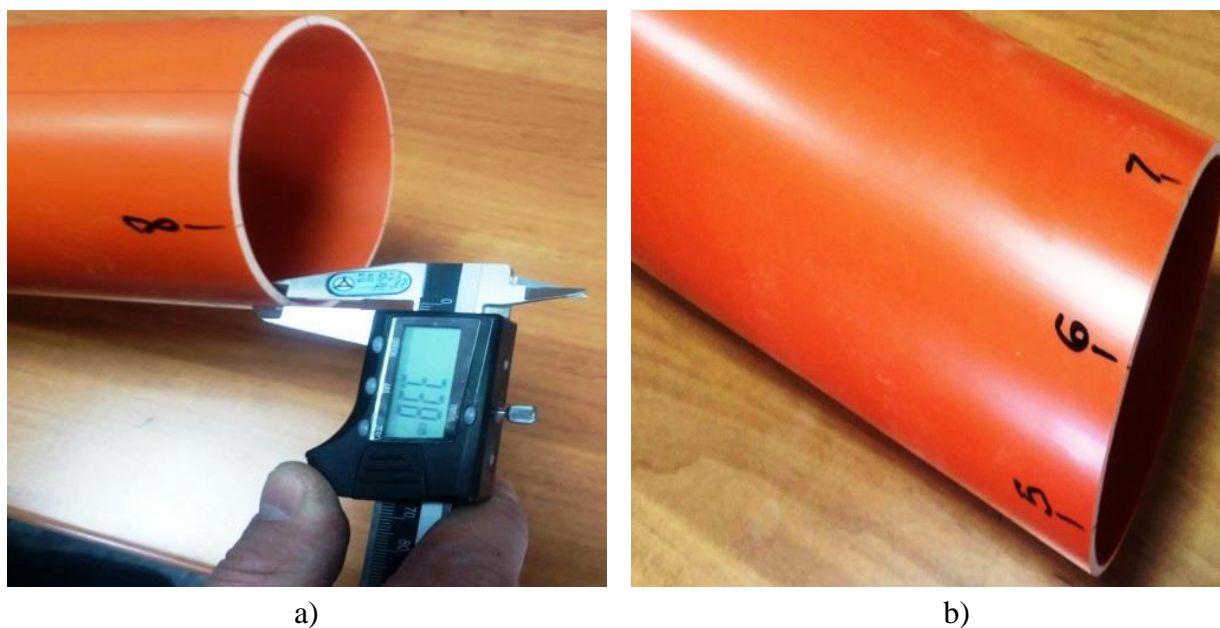
Rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci dobijeni u destom eksperimentu pokazuju najmanju vrednost za svojstvo TIR 4.20%, pri brzina vuče od 9.1 (m/min), temperaturi dizne alata 201(°C), dozeru ekspandera 19.2 (o/min), obrtajima puža ekstrudera 18.5 (o/min), obrtajima puža koekstrudera 41.6 (o/min), temperaturi cilindra ekstrudera i koekstrudera 176(°C), dozeru smeše ekstrudera 26.1 (o/min) i dozeru smeše koekstrudera 34.4 (o/min). Najmanja vrednost ispitivanog svojstva uzorka zabeležena u prvom eksperimentu i iznosi 4.40%.

4.8. Debljina zida

Za merenje debljine zida cevi primenjeno je digitalno kljunasto pomično merilo sa nonijusom Orion, preciznosti 0.01mm (slika 23). Primenjen je standard SRPS EN ISO 3126:2009. Postupak merenja dimenzija zida cevi (slika 24a). Merenja su izvršena na 8 obeleženih mernih mesta po obodu cevi (slika 24b) i kao relevantna vrednost usvaja se aritmetička sredina max. i min. vrednosti debljine zida. Debljina zida predstavlja mehaničku karakteristiku koja ima direktan uticaj na čvrstoću prstena.



Slika 23. Digitalno kljunasto pomično merilo sa nonijusom



Slika 24. Određivanje debljine zida
a) merenje pomičnim kljunastim merilom i b) merna mesta na uzorku

Rezultati izmerenih vrednosti debljina zida na osam mernih mesta i izračunate aritmetičke sredine izrađenih uzoraka, prikazane su u tabeli 10.

Tabela 10. Rezultati izmerenih vrednosti debljina zida

Redni broj eksperimenta	Debljina zida [mm] min.	Debljina zida [mm] max.	Debljina zida [mm] srednja
1.	2.83	3.38	3.10
2.	3.18	3.98	3.58
3.	3.23	3.78	3.50
4.	3.13	3.43	3.28
5.	2.93	3.58	3.25
6.	3.33	3.93	3.63
7.	2.83	3.58	3.20
8.	3.13	3.83	3.48
9.	3.03	3.68	3.35
10.	2.73	3.28	3.00
11.	2.93	3.58	3.25
12.	3.03	3.48	3.25
13.	3.03	3.28	3.15
14.	3.13	3.48	3.30
15.	3.23	3.48	3.35
16.	2.73	3.48	3.10
17.	2.83	3.58	3.20
18.	3.23	3.88	3.55

Rezultati merenja pokazuju da se varijacija debljine zida nalazi u mernom opsegu 3.00-3.63mm. Zahtevom standrada SRPS EN ISO 3126:2009 definisane su donja i gornja granica tolerancije koja se nalazi u opsegu 3.20-3.80mm.

Nominalna mera debljine zida iznosi 3.50mm, izmerena vrednost uzorka trećeg eksperimenta. Takođe, analizirani uzorci iz eksperimenta 2, 8 i 18 pokazuju da je izmerena vrednost debljine zida približna definisanoj nominalnoj meri. Osim u eksperimentima 1, 10, 14 i 16, rezultati izmerenih vrednosti ispitivanog odziva nalaze se u definisanom mernom opsegu.

4.9. Uzdužno skupljanje

Uzdužno skupljanje predstavlja dimenzionalnu stabilnost cevi pri zagrevanju, fizičko-mehaničku karakteristiku kojom se određuje procenat uzdužnog skupljanja nakon zagrevanja na 150⁰C. Obeleženi uzorci za određivanje uzdužnog skupljanja, prikazani su na slici 25.

Za određivanje uzdužnog skupljanja korišćena je laboratorijska peć-sušara Binder E 28, Nemačka, (slika 26-1). Ispitivanja su vršena u skladu sa standardom SRPS EN ISO 2505:2013. Uzorci cevi (slika 26-2), su horizontalno postavljeni na staklenu podlogu na kojoj se nalazi talk (slika 26-3) u cilju eliminacije direktanog kontakta sa metalnim dnom peći i na taj način onemogućeno pregrevanje uzoraka. Temperatura u unutrašnjosti peći kontrolisana je primenom termoparova, dok je temperatura cevi merena primenom beskontaktnog IR termometra HT6889 (slika 27).



Slika 25. Obeleženi uzorci za određivanje uzdužnog skupljanja



Slika 26. Postupak ispitivanja uzdužnog skupljanja cevi: Slika 27. IR termometar HT6889
(1) peć-sušara, (2) uzorak i (3) talk

Merenje se vrši na hladnoj cevi od 23⁰C i na osnovu rezultata utvrđuje procenat uzdužnog skupljanja. Vrednosti procentualnog uzdužnog skupljanja, prikazani su u tabeli 11.

Tabela 11. Vrednosti procentualnog uzdužnog skupljanja

Redni broj	Uzdužno skupljanje [%]
1.	7.47
2.	5.77
3.	5.47
4.	6.57
5.	5.67
6.	6.57
7.	5.47
8.	6.87
9.	4.57
10.	7.97
11.	5.17
12.	6.17
13.	7.77
14.	7.17
15.	6.37
16.	6.47
17.	6.17
18.	5.77

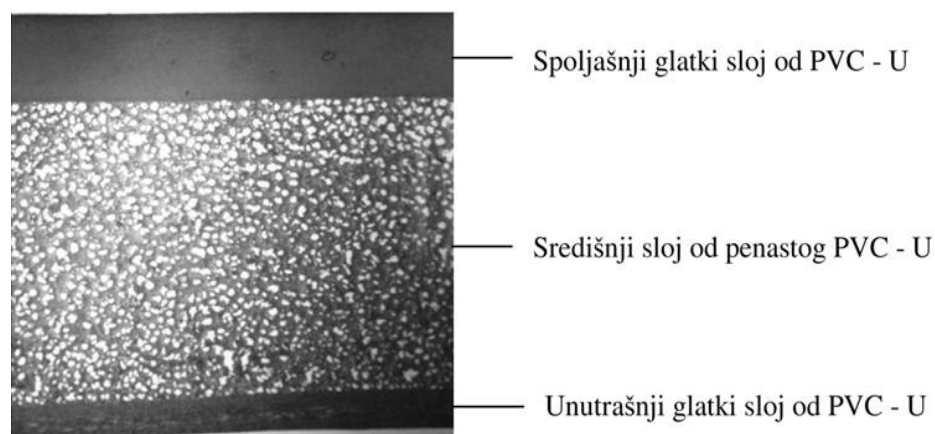
Uzorci ispitani na svojstvo uzdužno skupljanje najbolji rezultat pokazuju u devetom eksperimentu od 4.57%, pri brzini vuče od 8.8 (m/min), temperaturi dizne alata 211(°C), dozeru ekspandera 23.2 (o/min), obrtajima puža ekstrudera 16.5 (o/min), obrtajima puža koekstrudera 41.6 (o/min), temperaturi cilindra ekstrudera i koekstrudera 176 (°C), dozeru smeše ekstrudera 24.1 (o/min) i dozeru smeše koekstrudera 36.4 (o/min).

4.10. Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

U cilju utvrđivanja debljine spoljašnjeg unutrašnjeg glatkog sloja zida troslojne cevi od neplastificirnaog UPVC-a, korišćena je lupa mernog opsega 8x10mm visine 45mm, Atorn, Nemačka sa milimetarskom podelom, prikazanoj na slici 28a. Ispitivanja i merenja su vršena u skladu sa standardom SRPS EN 3126 kojim je definisan kao postupak analize i merenja raslojavanje zida cevi i utvrđena je pojedinačna debljina slojeva uzoraka. Postupak merenja prikazan je na slici 28b, dok su na slici 29 prikazani diferencirani slojevi UPVC cevi.



Slika 28. Određivanje debljine slojeva od UPVC-a
a) lupa sa milimetarskom podelom i b) merenje debljine slojeva



Slika 29. Snimak slojeva UPVC cevi

Kao odziv u istraživanju, definisana je ukupna debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja cevi. Na mernom mestu postavi se uređaj i očita izmerena dimenzija. Na slici 29 prikazana je fotografija slojeva cevi pri uvećanju 20x. Vrednosti izmerenih debljina slojeva, prikazane su u tabeli 12.

Tabela 12. Vrednosti izmerenih debljina slojeva

Redni broj eksperimenta	Spoljašnji sloj [mm]	Unutrašnji sloj [mm]	Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja [mm]	Aritmetička srednja vrednost [mm]
1.	0.262	0.332	0.594	0.297
2.	0.266	0.446	0.711	0.356
3.	0.421	0.383	0.803	0.401
4.	0.354	0.421	0.775	0.388
5.	0.375	0.391	0.767	0.383
6.	0.369	0.438	0.807	0.403
7.	0.383	0.343	0.725	0.363
8.	0.376	0.447	0.823	0.411
9.	0.484	0.334	0.819	0.409
10.	0.372	0.279	0.650	0.325
11.	0.375	0.446	0.821	0.410
12.	0.363	0.378	0.741	0.371
13.	0.301	0.264	0.565	0.282
14.	0.305	0.319	0.625	0.312
15.	0.300	0.315	0.615	0.307
16.	0.440	0.344	0.784	0.344
17.	0.382	0.343	0.725	0.363
18.	0.372	0.334	0.706	0.353

Na slici 29 prikazna je PVC cev kod koje je uočljivo da je zid cevi strukturiran i sastoji se od tri diferencirana sloja, koji se međusobno razlikuju prema svojoj debljini i strukturi: spoljašnji glatki sloj od PVC-U, središnji sloj od penastog PVC-U i unutrašnji glatki sloj od PVC-U. Mikroskopskom analizom moguće je uočiti razliku u strukturi posmatranih oblasti uzorka. Spoljašnji i unutrašnji sloj (čvrsti slojevi) su strukturalno i funkcionalno identični, dimenziono se razlikuju. Središnji sloj od penastog PVC-U, razlikuje se u funkcionalnom i strukturalnom smislu u odnosu na predhodne slojeve.

Poglavlje 5
ANALIZA REZULTATA I
DISKUSIJA

5. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

5.1. Definisanje S/N odnosa i rezultati parcijalne optimizacije odziva procesa

Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti odziva procesa, prikazanih u tabeli 13 izvršena je statistička analiza rezultata primenom softverskog paketa Minitab v17.

Za parcijalnu optimizaciju tehnoloških procesnih parametara na osnovu jednog odziva, obezbeđujući optimalan skup vrednosti ulaznih parametara procesa koji zadovoljava definisanu vrednost karakteristike kvaliteta i minimizira varijaciju karakteristike, u zavisnosti od postavljenog cilja, vrlo je bitan odabir adekvatne relacije za proračun vrednosti S/N odnosa. U tabeli 13 prikazani su eksperimentalni rezultati izmerenih vrednosti šest odziva procesa ispitanih uzoraka.

- U cilju minimiziranja vrednosti odziva procesa TIR test i uzdužno skupljanje, primenjena je relacija (3.4).

- U cilju postizanja maksimalne vrednosti odziva čvrstoća prstena i fleksibilnost prstena, primenjena je relacija (3.5).

- U cilju postizanja nominalne vrednosti odziva procesa debljina zida cevi i debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja, primenjena je relacija (3.6).

Tabela 13. Eksperimentalni rezultati izmerenih vrednosti odziva procesa

Redni broj eksperimenta	Čvrstoća prstena [kN/m ²] I	Fleksibilnost prstena [N] J	TIR test [%] K	Debljina zida [mm] L	Uzdužno skupljanje [%] M	Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja [mm] N
1.	4.40	969.70	7.90	3.10	7.47	0.59
2.	7.40	969.70	7.90	3.58	5.77	0.71
3.	6.50	1153.90	15.60	3.50	5.47	0.80
4.	6.00	1258.40	7.30	3.28	6.57	0.78
5.	5.60	1224.50	30.60	3.25	5.67	0.77
6.	6.50	1172.80	7.70	3.63	6.57	0.81
7.	4.60	1005.60	1.00	3.20	5.47	0.73
8.	6.80	1166.80	13.40	3.48	6.87	0.82
9.	5.90	1142.90	5.60	3.35	4.57	0.82
10.	4.20	862.50	1.50	3.00	7.97	0.65
11.	5.10	982.80	1.50	3.25	5.17	0.82
12.	5.60	1028.60	9.20	3.25	6.17	0.74
13.	4.50	1032.50	3.40	3.15	7.77	0.56
14.	4.70	1061.40	8.40	3.30	7.17	0.63
15.	5.00	1142.00	8.40	3.35	6.37	0.62
16.	4.70	975.80	7.90	3.10	6.47	0.78
17.	5.10	1136.00	14.20	3.20	6.17	0.73
18.	7.20	1240.50	7.90	3.55	5.77	0.71

Svi ispitani uzorci jasno pokazuju da promenom nivoa tehnoloških procesnih parametara nastupa promena analiziranih odziva procesa. Očigledno, da razlike u nivoima procesnih parametara i njihova kombinacija imaju značajan uticaj. Rezultati S/N odnosa za svaki uzorak i odziv procesa proizvodnje PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije, prikazani su u tabeli 14.

Tabela 14. Rezultati S/N odnosa odziva procesa

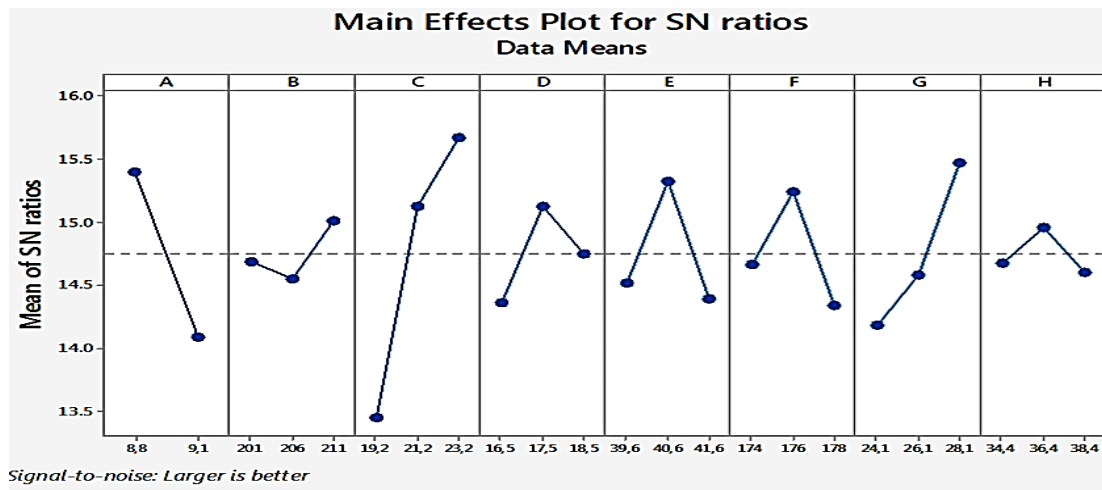
Redni broj eksperimenta	Čvrstoća prstena [kN/m ²] I	Fleksibilnost prstena [N] J	TIR test [%] K	Debljina zida [mm] L	Uzdužno skupljanje [%] M	Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja [mm] N
1.	12.869	59.732	-17.952	-0.818	-17.466	-0.114
2.	17.384	59.732	-17.952	-0.240	-15.223	3.488
3.	16.258	61.243	-23.862	-1.071	-14.759	-1.840
4.	15.563	61.996	-17.266	-1.885	-16.351	-0.894
5.	14.963	61.759	-29.714	-0.535	-15.071	-2.508
6.	16.258	61.384	-17.729	-0.971	-16.351	-0.895
7.	13.255	60.048	-1.584	-0.106	-14.759	-1.657
8.	16.650	61.339	-22.542	-0.522	-16.739	-0.892
9.	15.417	61.160	-14.963	-0.609	-13.198	1.538
10.	12.465	58.715	-3.5218	-0.745	-18.029	0.549
11.	14.151	59.849	-3.5218	-0.535	-14.269	-0.893
12.	14.963	60.244	-19.275	-1.305	-15.805	-2.509
13.	13.064	60.277	-10.629	-2.033	-17.808	-1.413
14.	13.442	60.517	-18.485	-1.708	-17.110	-2.425
15.	13.979	61.153	-18.485	-2.091	-16.082	-2.425
16.	13.442	59.787	-17.952	-0.011	-16.218	0.464
17.	14.151	61.107	-23.045	-0.106	-15.805	-1.656
18.	17.146	61.871	-17.952	-0.747	-15.223	-1.659

Rezultati S/N odnosa i odgovora srednjih vrednosti u cilju identifikacije optimalnog nivoa za svaki procesni parametar u odnosu na odziv procesa, jačine efekta dejstva procesnih parametara na karakteristike odziva i utvrđivanje korelacije nivoa faktora sa odzivom procesa, dati su u tabelama (15-26). Tabele S/N odnosa prikazuju sumiran S/N odnos za svaki nivo parametara, prosečnu vrednost izabrane karakteristike za svaki nivo parametra, uključuju rangove zasnovane na Delta statistici, koja poredi relativnu veličinu efekata. Tabele relativne vrednosti efekata faktora za odziv, takođe pružaju značajnu mogućnost uvida i pokušaj identifikacije najuticajnijih faktora na srednju vrednost i podešavanje vrednosti parametra na nivo približan željenoj ciljnoj vrednosti.

U tabelama 15-26 prikazani su rezultati S/N odnosa i odgovora srednjih vrednosti.

Tabela 15. S/N odnos za odziv čvrstoća prstena

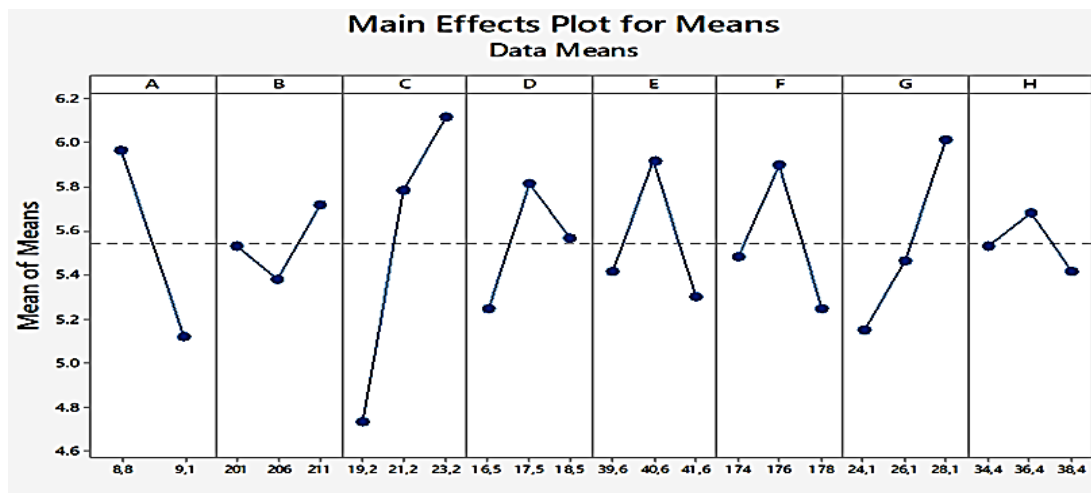
Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	15.40	14.68	13.44	14.36	14.52	14.66	14.18	14.68
2	14.09	14.55	15.12	15.13	15.33	15.24	14.58	14.95
3	0.00	15.01	15.67	14.75	14.39	14.34	15.47	14.61
Delta	1.31	0.47	2.23	0.77	0.94	0.89	1.29	0.35
Rang	2	7	1	6	4	5	3	8



Slika 30. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv čvrstoća prstena

Tabela 16. Relativna vrednost efekata faktora za odziv čvrstoća prstena

Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	5.967	5.533	4.733	5.250	5.417	5.483	5.150	5.533
2	5.122	5.383	5.783	5.817	5.917	5.900	5.467	5.683
3	0.00	5.717	6.117	5.567	5.300	5.250	6.017	5.417
Delta	0.844	0.333	1.383	0.567	0.617	0.650	0.867	0.267
Rang	3	7	1	6	5	4	2	8



Slika 31. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv čvrstoća prstena

Intrpretacija rezultata:

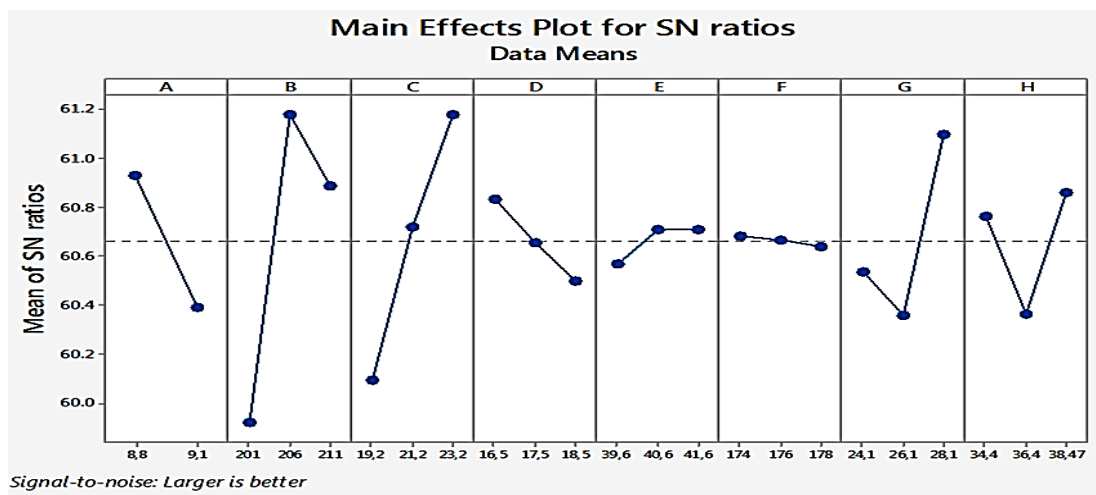
Tabele odziva procesa i grafikoni glavnih efekata za S/N odnos primenjuju se u cilju identifikacije faktora sa najvećim uticajem na S/N odnos, koji su za analizirani odziv čvrstoća prstena, (Veće-je-bolje). U ovom slučaju (tabela 15), faktor sa najvećim uticajem na S/N odnos je dozer ekspandera (Delta=2.23, Rang=1). Faktor sa najmanjim uticajem na S/N odnos je dozer smeše koekstrudera (Delta=0.35, Rang=8). U cilju minimiziranja šuma na odziv (tj. smanjenje varijacije čvrstoće prstena), moguće postavke kombinacija parametara su one sa većim vrednostima S/N odnosa u svakom faktoru.

Optimalni nivo parametara S/N odnosa za minimalnu vrednost varijacije čvrstoće prstena: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-3, dozer ekspandera-3, obrtaji puža ekstrudera-2, obrtaji puža koekstrudera-2, temperatura cilindra \bar{T} -2, dozer smeše ekstrudera-3, dozer smeše koekstrudera-2, (A₁, B₃, C₃, D₂, E₂, F₂, G₃, H₂).

Uvidom u tabelu relativne vrednosti efekata faktora za odziv (tabela 16) i dijagrama glavnih efekata za srednju vrednost (slika 31), može se uočiti da je faktor sa najvećim uticajem na srednju vrednost dozer ekspandera (Delta=1.383, Rang=1). Dok je faktor sa najmanjim uticajem na srednju vrednost dozer smeše koekstrudera (Delta=0.267, Rang=8). Dijagram glavnih efekata za srednju vrednost su korisni za podešavanje srednje vrednosti na ciljnoj vrednosti, onih nivoa parametara približno željenoj ciljnoj vrednosti čvrstoće prstena i pružajući mogućnost uvida u vrednosti parametara procesa, što znači da je optimalni nivo parametara za maksimalnu vrednost čvrstoće prstena, (A₁, B₃, C₃, D₂, E₂, F₂, G₃, H₂).

Tabela 17. S/N odnos za odziv fleksibilnost prstena

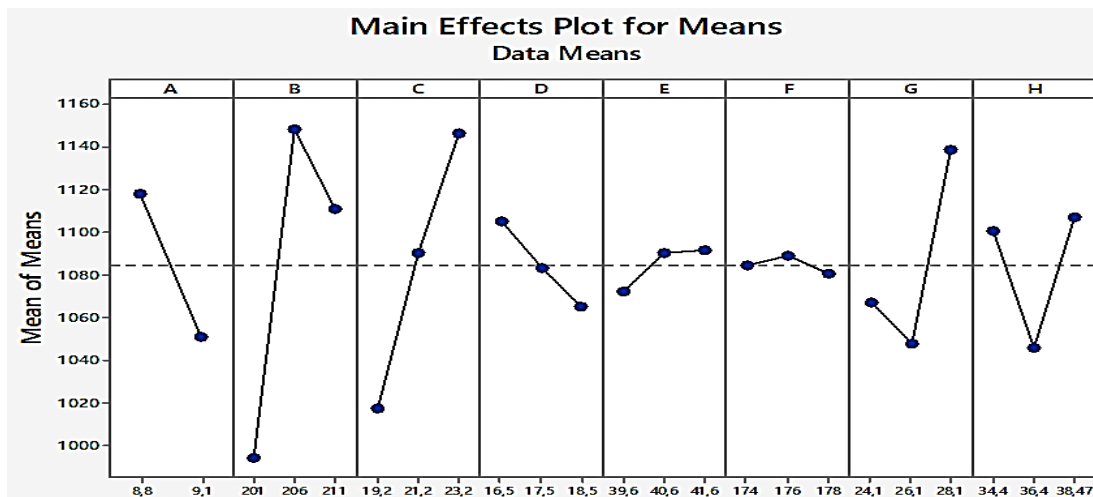
Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	60.93	59.92	60.09	60.83	60.57	60.68	60.53	60.76
2	60.39	61.18	60.72	60.66	60.71	60.67	60.36	60.37
3	0.00	60.89	61.18	60.50	60.71	60.64	61.10	60.86
Delta	0.54	1.26	1.08	0.34	0.14	0.04	0.74	0.49
Rang	4	1	2	6	7	8	3	5



Slika 32. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv fleksibilnost prstena

Tabela 18. Relativna vrednost efekata faktora za odziv fleksibilnost prstena

Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1118.3	994.5	1017.4	1105.3	1072.1	1084.4	1067.2	1101.0
2	1051.3	1148.6	1090.2	1083.6	1090.2	1089.2	1048.1	1046.1
3	0.00	1111.3	1146.8	1065.5	1092.1	1080.8	1139.2	1107.3
Delta	66.9	154.1	129.4	39.8	19.9	8.5	91.0	61.2
Rang	4	1	2	6	7	8	3	5



Slika 33. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv fleksibilnost prstena

Interpretacija rezultata:

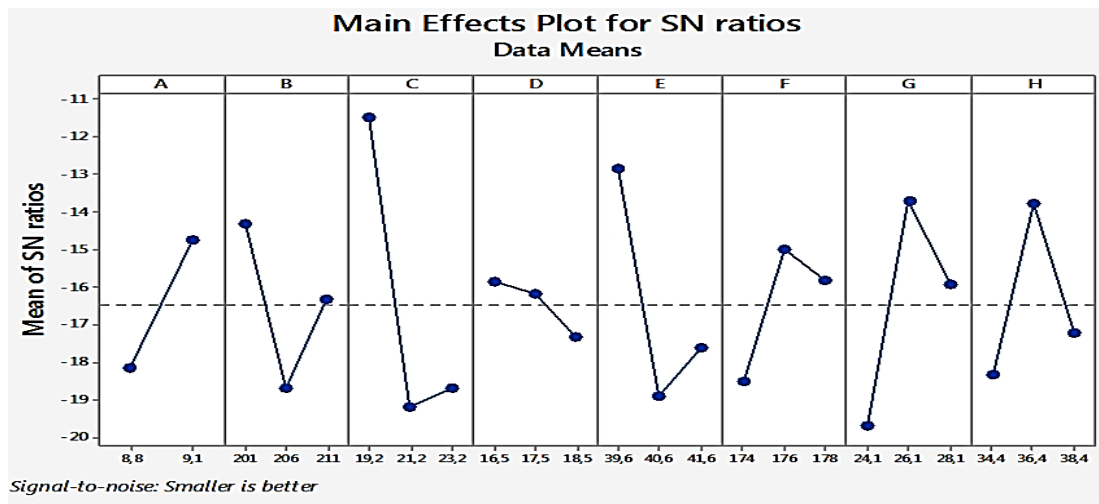
Rezultati S/N odnosa za odziv fleksibilnost prstena (tabela 17) pokazuje da u cilju identifikacije faktora sa najvećim uticajem na S/N odnos, minimizira se varijacija karakteristike oko željene (Veće-je-bolje) vrednosti i faktor sa najvećim uticajem je temperatura dizne alata (Delta=1.26, Rang=1). Faktor sa najmanjim uticajem na S/N odnos je temperatura cilindra \bar{T} (Delta=0.04, Rang=8). U cilju minimiziranja uticaja šuma na odziv procesa (minimiziranje oko varijacije fleksibilnosti prstena), moguće postavke kombinacija parametara su one sa većom vrednosti S/N odnosa u svakom faktoru.

Optimalni nivo parametara S/N odnosa za minimalnu vrednost varijacije fleksibilnosti prstena: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-2, dozer ekspandera-3, obrtaji puža ekstrudera-1, obrtaji puža koekstrudera-2, temperatura cilindra \bar{T} -1, dozer smeše ekstrudera-3, dozer smeše koekstrudera - 3 (A₁, B₂, C₃, D₁, E₂, F₁, G₃, H₃).

Uvidom u tabelu relativne vrednosti efekata faktora za odziv (tabela 18) i dijagrama glavnih efekata za srednju vrednost (slika 33), može se uočiti da je faktor sa najvećim uticajem na srednju vrednost temperatura dizne alata (Delta=154.1, Rang=1). Faktor sa najmanjim uticajem na srednju vrednost je temperatura cilindra \bar{T} (Delta=8.5, Rang=8). Dijagram glavnih efekata za srednju vrednost su značajni za podešavanje srednje vrednosti na ciljnoj vrednosti, onih nivoa parametara približno željenoj ciljnoj vrednosti fleksibilnosti prstena i omogućavaju uvid u vrednosti parametara procesa, što znači da je optimalni nivo parametara za maksimalnu vrednost fleksibilnost prstena, (A₁, B₂, C₃, D₁, E₂, F₁, G₃, H₃).

Tabela 19. S/N odnos za odziv TIR test

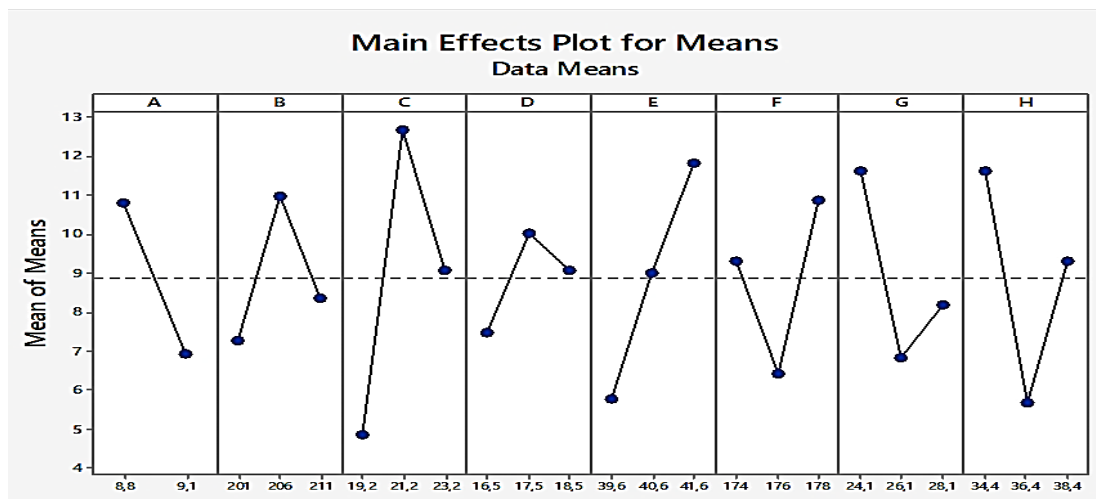
Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-18.09	-14.35	-11.36	-15.87	-12.75	-18.53	-19.72	-18.36
2	-14.76	-18.72	-19.21	-16.06	-18.91	-15.02	-13.59	-13.79
3	0.00	-16.21	-18.71	-17.35	-17.62	-15.73	-15.96	-17.13
Delta	3.33	4.37	7.58	1.48	6.17	3.51	6.13	4.57
Rang	7	5	1	8	2	6	3	4



Slika 34. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv TIR test

Tabela 20. Relativna vrednost efekata faktora za odziv TIR test

Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	10.800	7.267	4.867	7.483	5.767	9.300	11.600	11.617
2	6.933	10.967	12.667	10.033	9.017	6.433	6.817	5.667
3	0.00	8.367	9.067	9.083	11.817	10.867	8.183	9.317
Delta	3.867	3.700	7.800	2.550	6.050	4.433	4.783	5.950
Rang	6	7	1	8	2	5	4	3



Slika 35. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv TIR test

Interpretacija rezultata:

Rezultati S/N odnosa za odziv TIR test pokazuju da u cilju identifikacije faktora sa najvećim uticajem na S/N odnos (tabela 19), minimiziranje varijacija karakteristike oko željene (Manje-je-bolje) vrednosti, faktor sa najvećim uticajem na S/N odnos je dozer ekspandera (Delta=7.58, Rang=1).

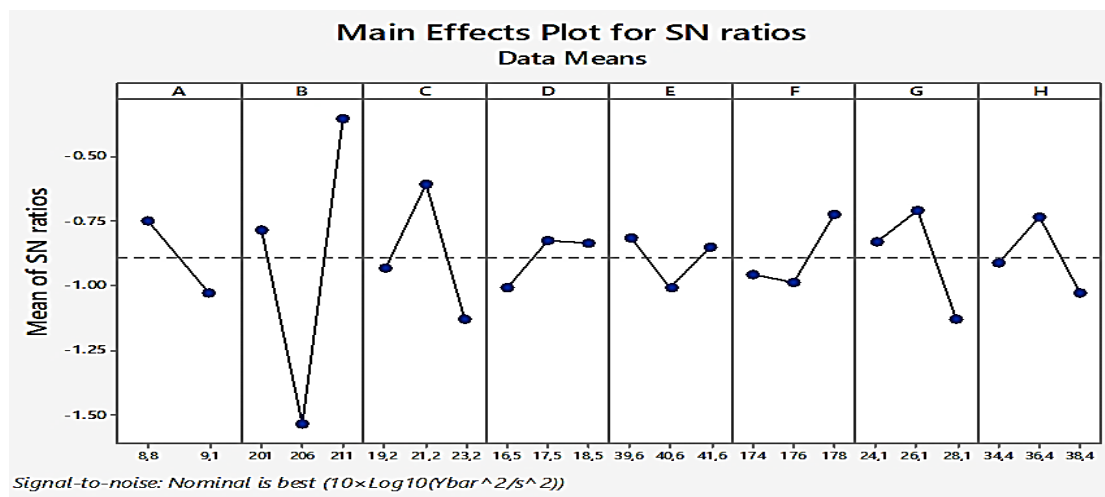
Faktor sa najmanjim uticajem na S/N odnos, obrtaji puža ekstrudera (Delta=1.48, Rang=8). U cilju minimiziranja uticaja šuma na odziv (minimiziranje oko varijacije TIR test), moguće postavke kombinacija parametara su one sa većim vrednostima S/N odnosa u svakom faktoru.

Optimalni nivo parametara S/N odnosa za minimalnu vrednost varijacije TIR test: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-2, dozer ekspandera-2, obrtaji puža ekstrudera-2, obrtaji puža koekstrudera-3, temperatura cilindra \bar{T} -3, dozer smeše ekstrudera-1, dozer smeše koekstrudera-1, (A₁, B₂, C₂, D₂, E₃, F₃, G₁, H₁).

Uvidom u tabelu relativne vrednosti efekata faktora za odziv (tabela 20) i dijagrama glavnih efekata za srednju vrednost (slika 35), može se uočiti da je faktor sa najvećim uticajem na srednju vrednost dozer ekspandera (Delta=7.80, Rang=1). Faktor sa najmanjim uticajem na srednju vrednost, obrtaji puža ekstrudera (Delta=2.55, Rang=8). Dijagrami glavnih efekata za srednju vrednost su korisni za podešavanje srednje vrednosti ciljnoj vrednosti, onih nivoa parametara približno željenoj ciljnoj vrednosti za TIR test i daje mogućnost uvida u vrednosti parametara procesa i što znači da je optimalni nivo parametara brzina vuče linije-2, temperatura dizne alata-1, dozer ekspandera-1, obrtaji puža ekstrudera-1, obrtaji puža koekstrudera-1, temperatura cilindra \bar{T} -2, dozer smeše ekstrudera-2, dozer smeše koekstrudera-2, (A₂, B₁, C₁, D₁, E₁, F₂, G₂, H₂).

Tabela 21. S/N odnos za odziv debljina zida

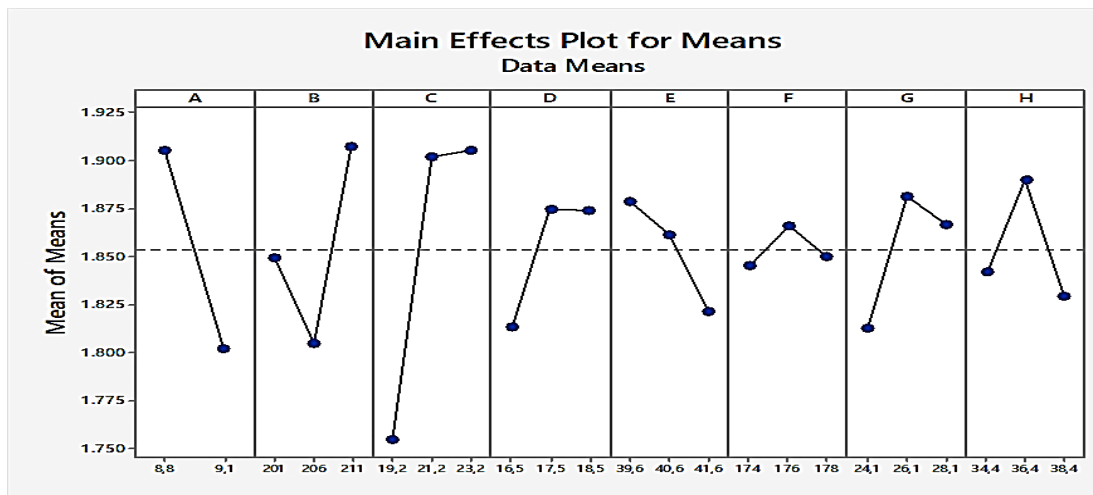
Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0.751	-0.786	-0.933	-1.008	-0.814	-0.960	-0.831	-0.910
2	-1.031	-1.537	-0.608	-0.828	-1.009	-0.989	-0.710	-0.733
3	0.00	-0.350	-1.132	-0.838	-0.850	-0.725	-1.132	-1.030
Delta	0.280	1.187	0.524	0.180	0.195	0.264	0.422	0.297
Rang	5	1	2	8	7	6	3	4



Slika 36. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv debljina zida

Tabela 22. Relativna vrednost efekata faktora za odziv debljina zida

Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1.905	1.849	1.755	1.813	1.878	1.845	1.813	1.842
2	1.802	1.805	1.902	1.876	1.861	1.866	1.881	1.890
3	0.00	1.907	1.905	1.874	1.821	1.867	1.867	1.830
Delta	0.103	0.102	0.150	0.061	0.057	0.021	0.069	0.060
Rang	2	3	1	5	7	8	4	6



Slika 37. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv debljina zida

Interpretacija rezultata:

Za odziv procesa debljina zida potrebna je nominalna mera parametra odziva. Rezultati S/N odnosa za odziv debljina zida pokazuju da u cilju identifikacije faktora sa najvećim uticajem na S/N odnos (tabela 21), minimiziranje varijacija karakteristike oko željene (Nominalno-je-najbolje) vrednosti, faktor sa najvećim uticajem na odnos S/N je temperatura dizne alata (Delta=1.87, Rang=1).

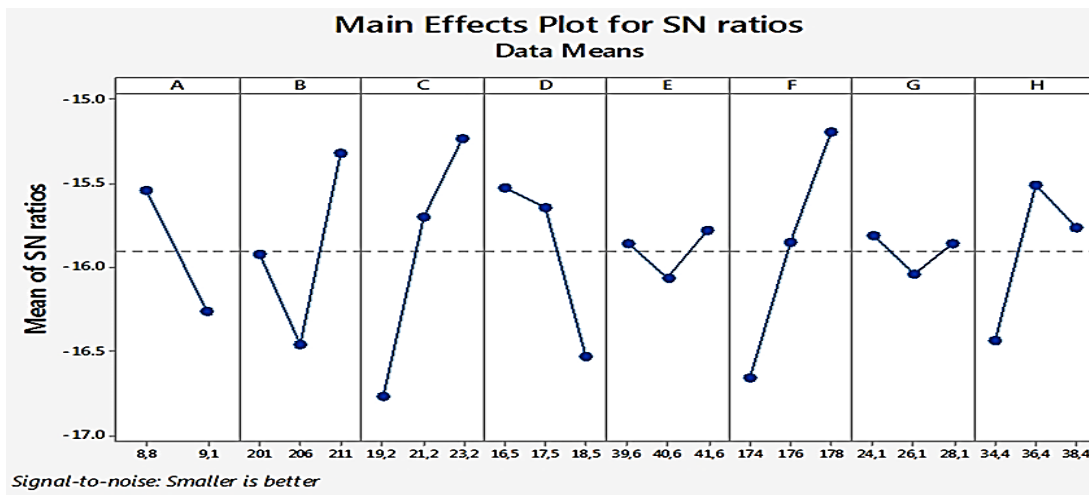
Da bi se smanjio uticaj šuma na odziv (minimiziranje oko varijacije debljina zida), moguće postavke kombinacija parametara su one sa većim vrednostima S/N odnosa u svakom faktoru.

Optimalni nivo parametara S/N odnosa za minimalnu vrednost varijacije odziva debljina zida: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-3, dozer ekspandera-2, obrtaji puža ekstrudera-2, obrtaji puža koekstrudera-1, temperatura cilindra \bar{T} -3, dozer smeše ekstrudera-2, dozer smeše koekstrudera-2, (A₁, B₃, C₂, D₂, E₁, F₃, G₂, H₂).

Uvidom u tabelu relativne vrednosti efekata faktora za odziv (tabela 22) i dijagrama glavnih efekata za srednju vrednost (slika 37), može se uočiti da je faktor sa najvećim uticajem na srednju vrednost dozer ekspandera (Delta=0.150, Rang=1). Faktor sa najmanjim uticajem na srednju vrednost je temperatura cilindra \bar{T} (Delta=0.021, Rang=8). Grafikonu glavnih efekata za srednju vrednost su značajni za podešavanje srednje vrednosti na ciljnoj vrednosti, onih nivoa parametara približno željenoj ciljnoj vrednosti debljine zida i da je optimalni nivo vrednosti parametara: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-3, dozer ekspandera-3, obrtaji puža ekstrudera-2, obrtaji puža koekstrudera-1, temperatura cilindra \bar{T} -3, dozer smeše ekstrudera-3, dozer smeše koekstrudera-2, (A₁, B₃, C₃, D₂, E₁, F₃, G₃, H₂).

Tabela 23. S/N odnos za odziv uzdužno skupljanje

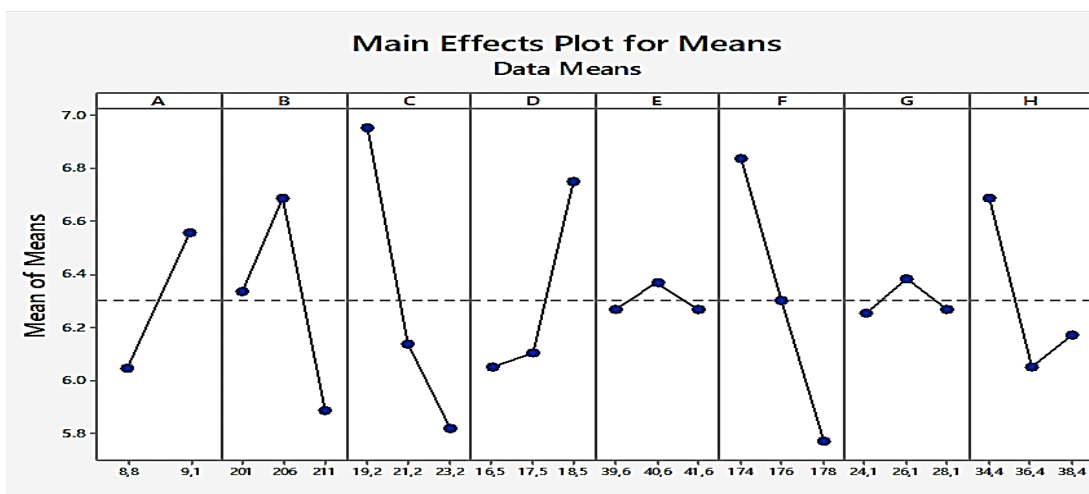
Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-15.55	-15.93	-16.77	-15.53	-15.86	-16.66	-15.81	-16.44
2	-16.26	-16.46	-15.70	-15.65	-16.07	-15.86	-16.04	-15.51
3	0.00	-15.32	-15.24	-16.53	-15.78	-15.19	-15.86	-15.77
Delta	0.71	1.41	1.54	1.01	0.29	1.47	0.23	0.92
Rang	6	3	1	4	7	2	8	5



Slika 38. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv uzdužno skupljanje

Tabela 24. Relativna vrednost efekata faktora za odziv uzdužno skupljanje

Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	6.048	6.337	6.953	6.053	6.270	6.837	6.253	6.687
2	6.559	6.687	6.137	6.103	6.370	6.303	6.387	6.053
3	0.00	5.887	5.820	6.753	6.270	5.770	6.270	6.170
Delta	0.511	0.800	1.133	0.700	0.100	1.067	0.133	0.633
Rang	6	3	1	4	8	2	7	5



Slika 39. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv uzdužno skupljanje

Interpretacija rezultata:

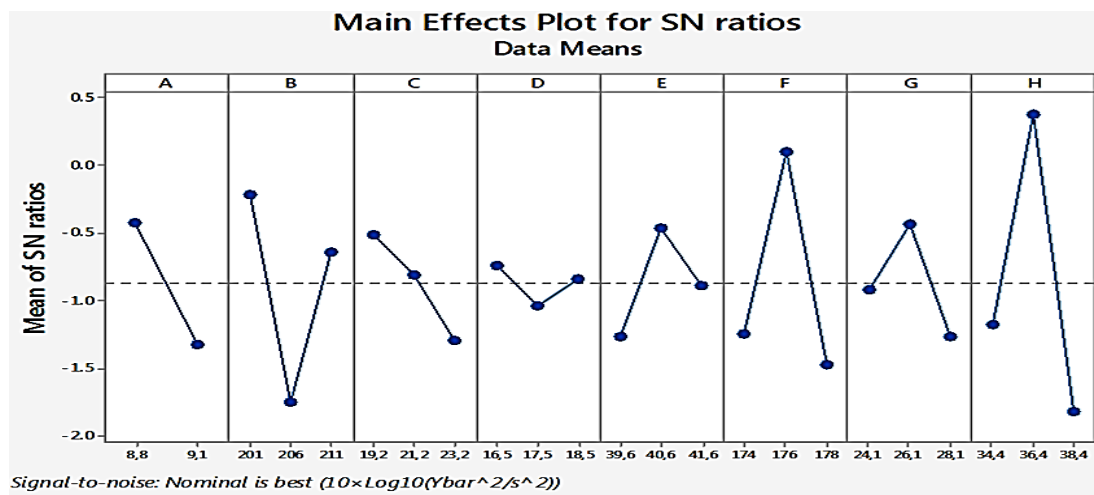
Rezultati S/N odnosa za odziv uzdužno skupljanje pokazuju da u cilju identifikacije faktora sa najvećim uticajem na S/N odnos (tabela 23), minimiziranje varijacija karakteristike oko željene (Manje-je-bolje) vrednosti, faktor sa najvećim uticajem na S/N odnos je dozer ekspandera (Delta=1.54, Rang=1). Takođe, faktor sa minimalnim uticajem na S/N odnos je dozer smeše ekstrudera (Delta=0.23, Rang=8). U cilju minimiziranja uticaja šuma na odziv (smanjenje oko varijacije odziva), moguće postavke kombinacija parametara su one sa većim odnosom S/N u svakom faktoru.

Optimalni nivo parametara odnosa S/N za minimalnu vrednost varijacije: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-3, dozer ekspandera-3, obrtaji puža ekstrudera-1, obrtaji puža koekstrudera-1, temperatura cilindra \bar{T} -3, dozer smeše ekstrudera-1, dozer smeše koekstrudera-2, (A₁, B₃, C₃, D₁, E₃, F₃, G₁, H₂).

Uvidom u tabelu relativne vrednosti efekata faktora za odziv, prikazanih u tabeli 24 i dijagrama glavnih efekata za srednju vrednost (slika 39), prikazuju da je faktor sa najvećim uticajem na srednju vrednost dozer ekspandera (Delta=1.133, Rang=1). Dok je faktor sa najmanjim uticajem na srednju vrednost, obrtaji puža koekstrudera (Delta=0.100, Rang=8). Dijagram glavnih efekata za srednju vrednost su korisni za podešavanje srednje vrednosti ciljnoj vrednosti, onih nivoa parametara približno željenoj ciljnoj vrednosti uzdužnog skupljanja, i pružajući mogućnost uvida u vrednosti parametara procesa, što znači da je optimalni nivo parametara: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-2, dozer ekspandera-1, obrtaji puža ekstrudera-3, obrtaji puža koekstrudera-2, temperatura cilindra \bar{T} -1, dozer smeše ekstrudera-2, dozer smeše koekstrudera-1, (A₁, B₂, C₁, D₃, E₂, F₁, G₂, H₁).

Tabela 25. S/N odnos za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

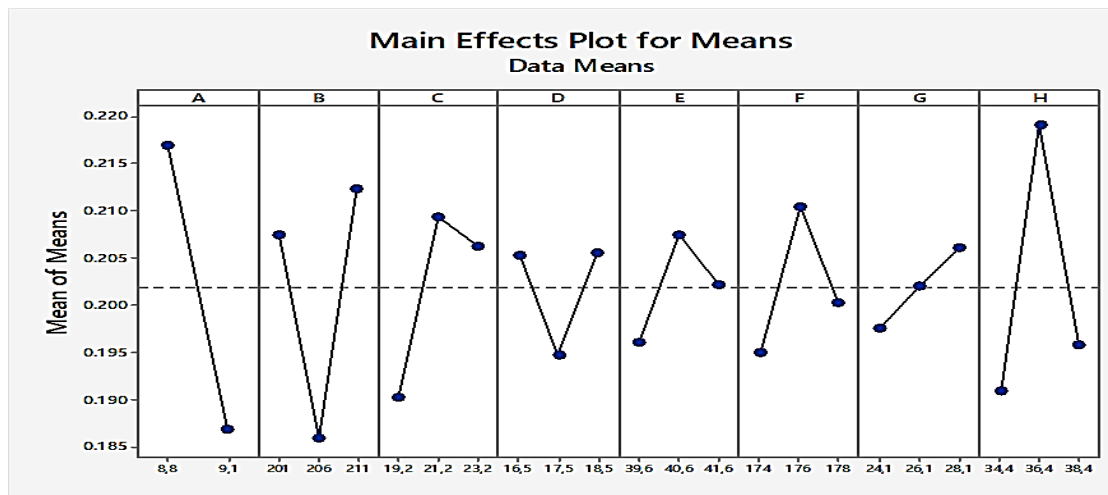
Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0.419	-0.220	-0.510	-0.740	-1.274	-1.246	-0.926	-1.175
2	-1.330	-1.760	-0.815	-1.043	-0.461	0.993	-0.433	0.382
3	0.00	-0.643	-1.298	-0.840	-0.888	-1.476	-1.265	-1.830
Delta	0.910	1.540	0.788	0.302	0.812	1.576	0.833	2.212
Rang	4	3	7	8	6	2	5	1



Slika 40. Dijagram glavnog efekta S/N odnosa za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

Tabela 26. Relativna vrednost efekata faktora za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

Nivo	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0.217	0.207	0.190	0.205	0.196	0.195	0.197	0.190
2	0.187	0.186	0.209	0.194	0.207	0.210	0.202	0.219
3	0.00	0.212	0.206	0.206	0.202	0.200	0.206	0.196
Delta	0.300	0.0265	0.019	0.010	0.011	0.015	0.008	0.028
Rang	1	3	4	7	6	5	8	2



Slika 41. Dijagram glavnog efekta srednjih vrednosti za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

Interpretacija rezultata:

Za odziv procesa debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja potrebna je nominalna mera parametra odziva. Rezultati S/N odnosa za odziv pokazuju da faktor sa najvećim uticajem na S/N odnos, minimiziranje varijacija karakteristike oko željene (Nominalno-je-najbolje) vrednosti (tabela 25), faktor sa najvećim uticajem na S/N odnos je brzina vuče linije (Delta=0.910, Rang=1). Faktor sa minimalnim uticajem na S/N odnos, obrtaji puža ekstrudera (Delta=0.302, Rang=8).

U cilju minimiziranja faktora šuma na odziv, moguće postavke kombinacija parametara su one sa većim S/N odnosom u svakom faktoru. Optimalni nivo parametara odnosa S/N za minimalnu vrednost varijacije debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata-1, dozer ekspandera-1, obrtaji puža ekstrudera-1, obrtaji puža koekstrudera-1, temperatura cilindra \bar{T} -2, dozer smeše ekstrudera-2, dozer smeše koekstrudera-2, (A₁, B₁, C₁, D₁, E₂, F₂, G₂, H₂).

Uvidom u tabelu relativne vrednosti efekata faktora za odziv (tabela 26) i dijagrama glavnih efekata za srednju vrednost (slika 41), može se uočiti da je faktor sa najvećim uticajem na srednju vrednost dozer ekspandera (Delta=0.300, Rang=1), i da je faktor sa najmanjim uticajem na srednju vrednost dozer smeše ekstrudera (Delta=0.008, Rang=8). Dijagram glavnih efekata za srednju vrednost su značajni za podešavanje srednje vrednosti na ciljnoj vrednosti, onih nivoa parametara približno željenoj ciljnoj vrednosti debljine spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja i pruža mogućnost uvida u vrednosti parametara procesa, što znači da je optimalni nivo parametara: brzina vuče linije-1, temperatura dizne alata -3, dozer ekspandera -2, obrtaji puža ekstrudera-3, obrtaji puža koekstrudera-2, temperatura cilindra \bar{T} -2, dozer smeše ekstrudera-3, dozer smeše koekstrudera-2, (A₁, B₃, C₂, D₃, E₂, F₂, G₃, H₂).

5.2. Analiza varijanse (ANOVA)

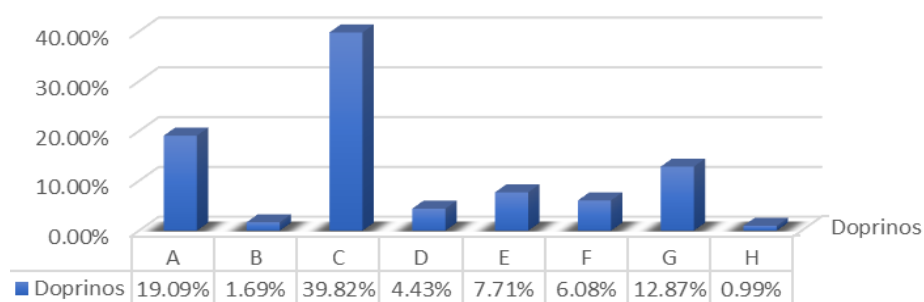
Statistička obrada rezultata ispitivanja S/N odnosa odziva procesa (tabela 14) prema eksperimentalnom planu (tabela 5), realizovana je u softveru za statističku obradu podataka Minitab v.17.

U tabelama 27-32 su prikazani rezultati analize varijanse (ANOVA), dok je prikaz odziva i faktora sa najvećim doprinosom efekta dejstva na odziv, prikazan u tabeli 33. Iz tabele 27 može se uočiti da najveći doprinos efektu dejstva faktora na odziv čvrstoća prstena ima faktor C dozer ekspandera (C=39.82%), faktor sa najmanjim doprinosom je dozer smeše koekstrudera (H=0.99%). Značajnost modela potvrđuje F-vrednost.

Tabela 27. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv čvrstoća prstena

Faktor	DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
A	1	7.753	19.09%	7.753	7.753	5.22
B	2	0.686	1.69%	0.686	0.343	0.23
C	2	16.172	39.82%	16.171	8.086	5.44
D	2	1.80	4.43%	1.780	0.900	0.61
E	2	3.130	7.71%	3.130	1.565	1.05
F	2	2.469	6.08%	2.429	1.234	0.83
G	2	5.228	12.87%	5.228	2.614	1.76
H	2	0.402	0.99%	0.402	0.201	0.14
Greška	2	2.970	7.32%	2.970	1.485	
Ukupno	17	40.610	100%			

Čvrstoća prstena

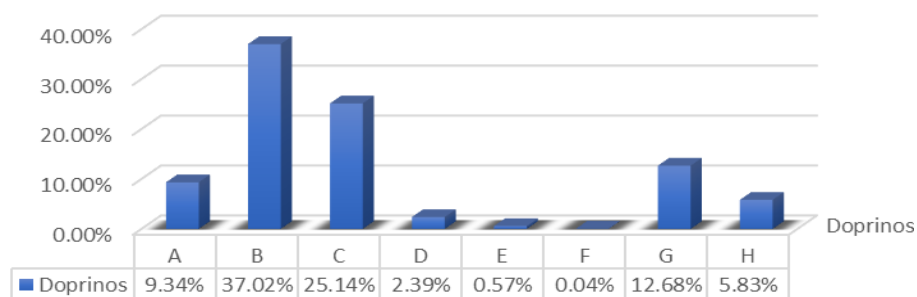


Slika 42. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv čvrstoća prstena

Tabela 28. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv fleksibilnost prstena

Faktor	DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
A	1	1.319	9.34%	1.319	1.319	2.67
B	2	5.226	37.02%	5.226	2.612	5.29
C	2	3.548	25.14%	3.549	1.774	3.59
D	2	0.338	2.39%	0.337	0.169	0.34
E	2	0.081	0.57%	0.008	0.040	0.08
F	2	0.005	0.04%	0.005	0.002	0.01
G	2	1.789	12.68%	1.790	0.895	1.81
H	2	0.823	5.83%	0.822	0.411	0.83
Greška	2	0.988	7.00%			
Ukupno	17	14.118	100%			

Fleksibilnost prstena



Slika 43. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv fleksibilnost prstena

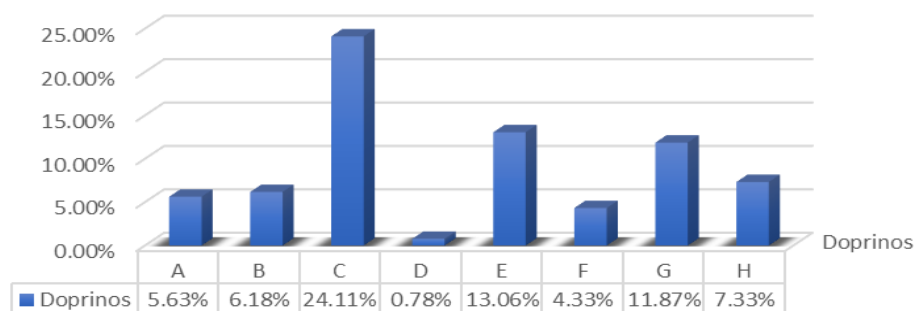
S obzirom da tokom variranja tehnoloških procesnih parametara, njihov uticaj na odziv procesa je varijabilan u zavisnosti od odziva. Vrednosti sa najvećim i najmanjim doprinosom efektu dejstva, prikazane su u tabeli 29. Najveći efekat dejstva ima faktor B temperatura dizne alata (B=37.02%), dok je da je faktor sa najmanjim doprinosom na odziv procesa temperatura cilindra \bar{T} (F=0.04%).

Tabela 29. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv TIR test

Faktor	DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
A	1	52.349	5.63%	52.394	52.349	0.42
B	2	57.459	6.18%	57.459	28.730	0.23
C	2	224.344	24.11%	224.344	112.172	0.90
D	2	7.266	0.78%	7.266	3.633	0.03
E	2	121.488	13.06%	121.488	60.744	0.49
F	2	40.274	4.33%	40.274	20.137	0.16
G	2	110.460	11.87%	110.460	55.230	0.44
H	2	68.188	7.33%	68.188	34.094	0.27
Greška	2	248.651	26.72%	248.651	124.326	
Ukupno	17	930.479	100%			

Uticaj tehnoloških procesnih parametara na odziv procesa TIR test, su prikazani u tabeli 29. Tabela prikazuje promenu efekta dejstva tehnoloških procesnih parametara u odnosu na odziv. Iz tabele se takođe može uočiti da faktor C, dozer ekspandera (C=24.11%) najviše doprinosi odzivu procesa. Obrtaji puža ekstrudera (D=0.78%) je faktor sa minimalnim doprinosom na odziv.

TIR test

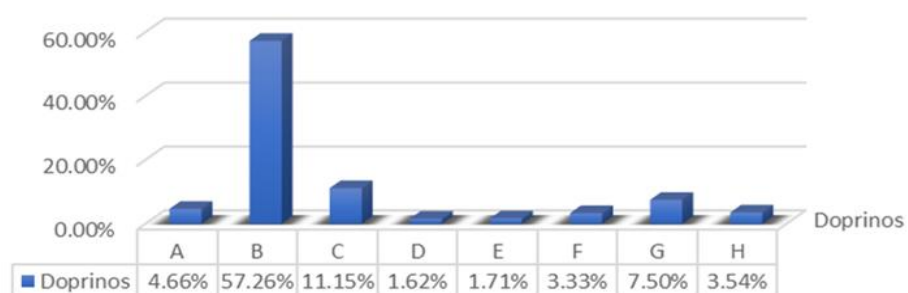


Slika 44. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv TIR test

Tabela 30. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv debljina zida

Faktor	DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
A	1	0.352	4.66%	0.352	0.352	1.01
B	2	4.327	57.26%	4.327	2.163	6.21
C	2	0.842	11.15%	0.842	0.421	1.21
D	2	0.122	1.62%	0.122	0.061	0.18
E	2	0.129	1.71%	0.129	0.646	0.19
F	2	0.251	3.33%	0.251	0.125	0.36
G	2	0.567	7.50%	0.567	0.283	0.81
H	2	0.267	3.54%	0.267	0.133	0.38
Greška	2	0.697	9.23%	0.697	0.349	
Ukupno	17	7.558	100%			

Debljina zida



Slika 45. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv debljina zida

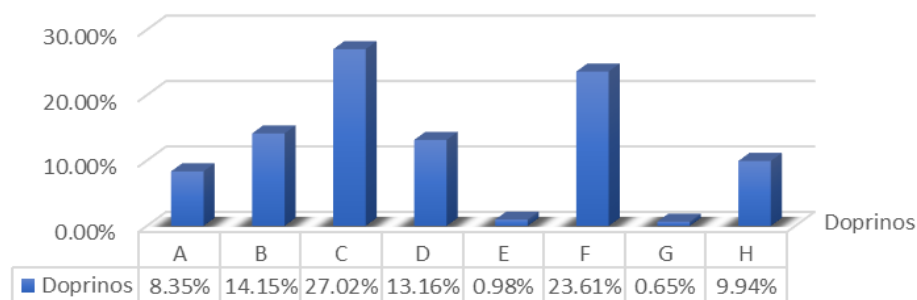
Iz tabele 30 može se uočiti da je najveći doprinos efektu dejstva faktora na odziv procesa debljina zida, zabeležio faktor B, temperatura dizne alata (B=57.26%). Obrtaji puža ekstrudera (D=1.62%) predstavljaju faktor sa minimalnim doprinosom na odziv procesa.

U tabeli 31 prikazani su rezultati ANOVA za uzdužno skupljanje. Najveći doprinos efektu dejstva ima faktor C, dozer ekspandera (C=27.02%). Takođe, tabela prikazuje da faktor sa najmanjim doprinosom na odziv procesa je dozer smeše ekstrudera (G=0.65%).

Tabela 31. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv uzdužno skupljanje

Faktor	DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
A	1	2.298	8.35%	2.299	2.299	7.76
B	2	3.893	14.15%	3.893	1.947	6.57
C	2	7.434	27.02%	7.434	3.717	12.55
D	2	3.620	13.16%	3.620	1.810	6.11
E	2	0.269	0.98%	0.269	0.135	0.45
F	2	6.469	23.61%	6.496	3.248	10.96
G	2	0.178	0.65%	0.178	0.089	0.30
H	2	2.738	9.94%	2.734	1.367	4.61
Greška	2	0.592	2.15%	0.593	0.296	
Ukupno	17	27.516	100%			

Uzdužno skupljanje

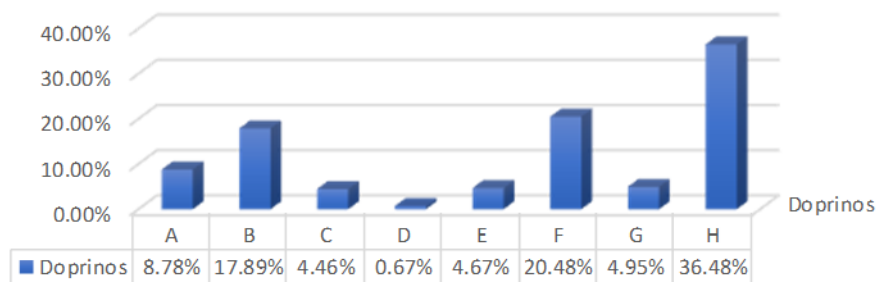


Slika 46. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv uzdužno skupljanje

Tabela 32. Analiza varijanse (ANOVA) za odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

Faktor	DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
A	1	3.727	8.78%	3.727	3.727	10.86
B	2	7.797	17.89%	7.597	3.789	11.07
C	2	1.895	4.46%	1.895	0.948	2.76
D	2	0.285	0.67%	0.285	0.142	0.42
E	2	1.192	4.67%	1.982	0.991	2.89
F	2	8.695	20.48%	8.696	4.347	12.67
G	2	2.103	4.95%	2.103	1.051	3.06
H	2	15.488	36.48%	15.489	7.443	22.57
Greška	2	0.686	1.62%	0.686	0.343	
Ukupno	17	42.459	100%			

Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja



Slika 47. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva na odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja

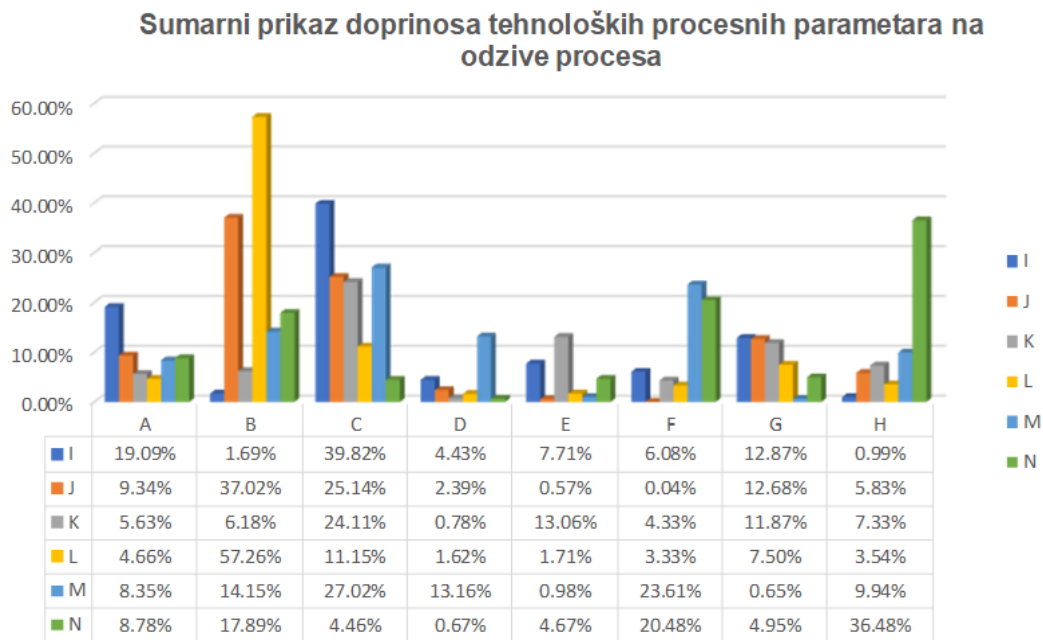
Iz tabele 32 može se zaključiti da najveći doprinos efektu dejstva faktora na odziv debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja ima faktor H, dozer smeše koekstrudera ($H=36.48$). Takođe, tabela prikazuje da faktor sa najmanjim doprinosom na odziv procesa je faktor D obrtaji puža ekstrudera, ($D=0.67\%$).

Rezultati parcijalne optimizacije parametara procesa u odnosu na jedan odziv, obezbedili su optimalan skup vrednosti ulaznih tehnoloških parametara procesa koji zadovoljava definisanu vrednost jedne karakteristike kvaliteta, što je prikazano u tabeli 33. Iz tabele se može uočiti da su setovi optimalnih ulaznih parametara procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije različiti za svaki odziv procesa. Takođe, iz tabele prikaza odziva i procesnih parametara sa najvećim doprinosom, uočljivo je da jedan procesni parametar može uticati na više različitih odziva procesa.

Tabela 33. Prikaz odziva i procesnih parametara sa najvećim doprinosom

Odziv procesa	Odnos faktora	Najuticajniji procesni parametar
Čvrstoća prstena	A ₁ , B ₃ , C ₃ , D ₂ , E ₂ , F ₂ , G ₃ , H ₂	C-39.82%
Fleksibilnost prstena	A ₁ , B ₂ , C ₃ , D ₁ , E ₂ , F ₁ , G ₃ , H ₃	B-37.02%
TIR test	A ₂ , B ₁ , C ₁ , D ₁ , E ₁ , F ₂ , G ₂ , H ₂	C-24.32%
Debljina zida	A ₁ , B ₃ , C ₂ , D ₂ , E ₁ , F ₃ , G ₂ , H ₂	B-57.26%
Uzdužno skupljanje	A ₁ , B ₃ , C ₃ , D ₁ , E ₃ , F ₃ , G ₁ , H ₂	C-27.02%
Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja	A ₁ , B ₁ , C ₁ , D ₁ , E ₂ , F ₂ , G ₂ , H ₂	H-36.48%

Rezultati ispitivanja pokazuju (tabela 33), da procesni parametar C dozer ekspandera, ima najveći uticaj na odzive procesa: čvrstoća prstena ($C=39.82\%$), TIR test ($C=24.32\%$) i uzdužno skupljanje ($C=27.02\%$). Procesni parametar temperatura dizne alata, faktor B ima najveći uticaj na odziv fleksibilnost prstena ($B=37.02\%$) i debljina zida ($B=57.26\%$). Dozer smeše koekstrudera H, ima najveći uticaj na odziv procesa debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja ($H=36.48\%$). Sumarni doprinos tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa prikazan je na slici 48.



Slika 48. Sumarni doprinos tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa

Stoga je jasno da se fazi logika primeni za rešavanje problema koji sadrži ogromne i neizvesne podatke na jednostavan način koristeći matematički model.

5.3. Primena fazi logike za matematičko modelovanje uticaja procesnih parametara na odzive procesa

Cilj ovog istraživanja jeste da se formira hibridni višeodzivni model za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije, pri čemu model treba da omogući uspostavljanje analitičke međuzavisnosti između ključnih tehnoloških procesnih parametara i višestrukih odziva procesa posmatranih kroz fizičke i mehaničke karakteristike kvaliteta proizvoda.

U tom smislu, potrebno je identifikovati set optimalnih vrednosti tehnoloških parametara procesa koji optimizuje višestruke korelisane odzive procesa i zadovoljava zahteve svih karakteristika kvaliteta. Problem sagledavanja uticajih faktora bez obzira na njihove interakcije, može se uspešno rešiti primenom fazi skupova i fazi logičkog zaključivanja. Primena fazi logike i fazi skupova omogućuje adekvatno tretiranje poremećajnih i upravljačkih (kontrolnih) faktora i pruža mogućnost formiranja modela koji u sebi sadrži sinergetski efekat fenomena višeodzivne optimizacije i njegovih parcijalnih elemenata. Takođe, prilikom formiranja višeodzivnog optimizacionog modela moguće je ublažiti nepreciznost i nejasnoće informacija u modelu, čime bi se postigli optimalniji tehnološki uslovi proizvodnje PVC proizvoda.

5.4. Fazi logika u programskom rešenju Matlab

U cilju identifikacije optimalnog seta procesnih parametara za višeodzivnu optimizaciju procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije PVC-a, za dobijanje optimalnih odziva od kontrolnih parametara i, u najvećoj meri eliminisati ili ublažiti uticaj poremećajnih faktora (šuma), primenjena je fazi logika. Korišćen je alat za fazi logičko zaključivanje u programskom paketu Matlab-u pod nazivom *Fuzzy Logic Toolbox* (FLT). FLT nudi funkcije i aplikacije za modelovanje kompleksnog stanja sistema (kompleksnog sistemskog ponašanja) primenom jednostavnih logičkih pravila i njihovu implementaciju u fazi zaključni sistem.

Uz pomoć navedenog alata mogu se modelirati sistemi *Fuzzy Inference System* (FIS), predstaviti i primeniti kao podrška u različitim sistemima kontrole, upravljanja i odlučivanja. Za kreiranje, uređivanje i pregled fazi sistema zaključivanja, *Fuzzy Inference System Modeling* se poziva iz liste alatki u Matlab-u.

Komande koje su korišćene u cilju formiranja i optimizacije modela, *fuzzi logic designer*, za definisanje broja ulaznih i izlaznih varijabli u FIS editoru, *membership function editor*, za definisanje funkcija pripadnosti svih ulaznih i izlaznih varijabli, svih funkcija pripadnosti koje u potpunosti definišu njen oblik povezanih sa svakom promenljivom. Funkcija *rule editor*, za editovanje pravila u kome se stanja pojedinih ulaznih promenljivih mogu međusobno kombinovati „i“ i „ili“ operacijama što za posledicu ima odgovarajuće stanje izlazne promenljive. Funkcija *rule viewer* preglednik pravila, za unos vrednosti ulaznih promenljivih na osnovu čega se vrši zaključivanje i omogućuje pregled dijagrama fazi zaključivanja. Funkcija *surface viewer*, za pregled zavisnosti defazifikovane vrednosti izlazne promenljive od ulaznih vrednosti, odnosno generiše i iscrtava mapu izlazne površine za sistem.

Za slučaj višestrukih odziva procesa, primeniće se fazi logička jedinica FLU (*engl. Fuzzy Logic Unit*) sa ciljem da transformiše višestruke korelirane i konzistentne odzive procesa u jedinstveni odziv.

Nakon definisanja podataka, funkcija pripadnosti u cilju transformacije šest ulaza u jedan izlaz nazvan sveobuhvatna izlazna mera COM (*engl. Comprehensive Output Measure*). Kao rezultat navedenog dobija se: sveobuhvatna izlazna mera (COM), vrednosti COM za svaki eksperiment, površinski grafikoni funkcija i sveobuhvatne izlazne mere (COM) za kombinacije ulaznih parametara.

5.5. Rezultati višedozivne optimizacije procesa

Fazi sistem tj. fazi logička jedinica sastoji se od fazifikatora, funkcija pripadnosti, baze fazi pravila, fazi zaključnog sistema i defazifikatora. Na slici 49 šematski je prikazana struktura računarske arhitekture sa šest ulaza i jednim izlazom fazi logike primenjene u ovom istraživanju.

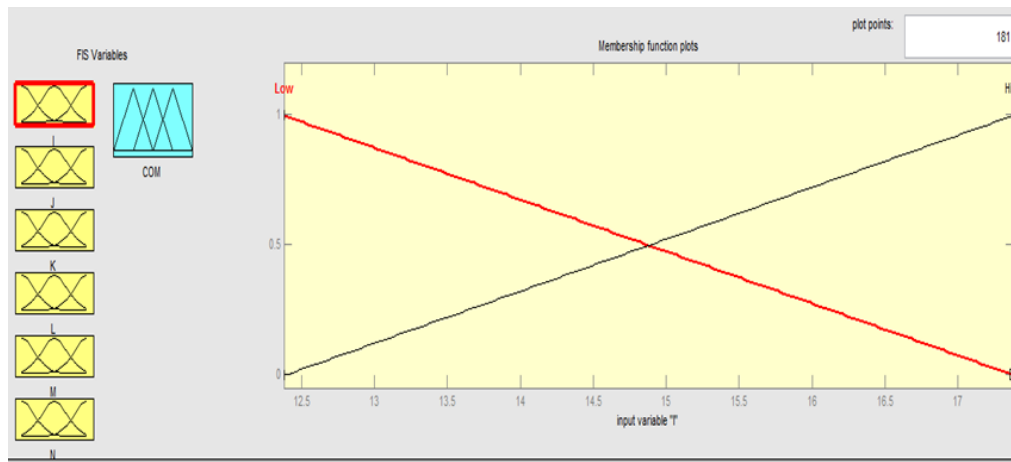


Slika 49. Struktura računarske arhitekture šest ulaza i jednog izlaza fazi logičke jedinice
(Izvor: Autor, 2022)

Gde je:

- x_1 : S/N vrednosti čvrstoće prstena;
- x_2 : S/N vrednosti fleksibilnosti prstena;
- x_3 : S/N vrednosti TIR testa;
- x_4 : S/N vrednosti debljine zida;
- x_5 : S/N vrednosti uzdužnog skupljanja;
- x_6 : S/N vrednosti debljine spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja;
- y : COM.

Definisane su funkcije pripadnosti za svaki ulaz dodeljivanjem dve fazi vrednosti, nisko i visoko (slika 50). Izlaz sistema sadrži pet fazi podgrupa. Pet fazi podgrupa za izlaz sistema su: najniži, nizak, srednji, visok i najviši. Detaljan prikaz dat je u prilogu 2.



Slika 50. Definisana funkcija pripadnosti za odziv čvrstoća prstena

Kod primene fazi logike (detaljnije u poglavlju 3.24), postoje pravila na osnovu kojih je izvršen proračun. Definisana su 64 fazi pravila, sa pretpostavkom da što je veći S/N odnos, odzivi procesa su adekvatniji. Detaljan prikaz (Prilog broj 3).

Uzimajući max-min kompozicione operacije, fazi obrazloženje pomenutih 64 pravila daje fazi izlaz. Ako pretpostavimo da su x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 i x_6 šest ulaznih vrednosti fazi logičke jedinice, funkcija članstva izlaza fazi obrazloženja, matematički se može prikazati:

$$\begin{aligned} \mu_{C_0}(y) = & (\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \wedge \mu_{C_1}(x_3) \wedge \mu_{D_1}(x_4) \wedge \mu_{E_1}(x_5) \wedge \mu_{F_1}(x_6) \mu_{G_1}(y)) \\ & \vee \dots (\mu_{A_n}(x_1) \wedge \mu_{B_n}(x_2) \wedge \mu_{C_n}(x_3) \wedge \mu_{D_n}(x_4) \wedge \mu_{E_n}(x_5) \\ & \wedge \mu_{F_n}(x_6) \mu_{C_n}(y)) \end{aligned} \quad (5.1)$$

gde je \wedge minimum operacija a \vee maksimum operacija.

Defazikacioni metod, nazvan metodom centar gravitacije, ovde je usvojen za transformaciju fazi izlaznih zaključaka μ_{C_0} u ne-fazi vrednosti y_0 . Matematički se može prikazati relacijom (Sivanandam i dr., 2007):

$$y_0 = \frac{\sum y \mu_c(y)}{\sum \mu_c(y)} \quad (5.2)$$

Ne-fazi vrednosti y_0 definisane su kao COM. Bazirano na prethodnoj diskusiji, veća vrednost COM daje veće performanse. Kreirani su površinski grafikoni funkcija i sveobuhvatne izlazne mere (COM) za kombinacije ulaznih parametara. Detaljan prikaz (Prilog broj 4). Rezultati transformacije šest odziva procesa u jedan odgovor, sveobuhvatnu izlaznu meru (COM), su prikazani u tabeli 34.

Tabela 34. Dobijene vrednosti COM

Broj eksperimenta	COM vrednost
1.	0.432
2.	0.615
3.	0.521
4.	0.468
5.	0.518
6.	0.504
7.	0.519
8.	0.512
9.	0.583
10.	0.376
11.	0.530
12.	0.445
13.	0.359
14.	0.373
15.	0.440
16.	0.484
17.	0.470
18.	0.540

Eksperiment broj dva pokazao je najveću COM vrednost (COM=0.615), dok je najnižnu COM vrednost pokazao eksperiment broj trinaest (COM=0.359).

5.6. Analiza varijanse (ANOVA)

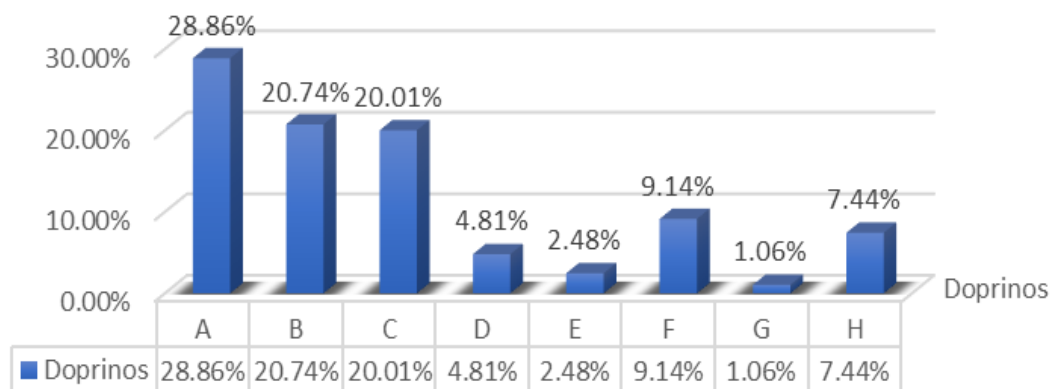
Statistička obrada rezultata izračunatih COM vrednosti (tabela 35), realizovana je u softveru Minitab v.17.

Rezultati analize varijanse (ANOVA) dati su u tabeli 35. Kao što se vidi u tabeli 35, iz analize varijanse mogu se uočiti visoke vrednosti tri procesna parametara koji imaju najveći efekat dejstva na višestruke odzive, faktor A brzina vuče linije (A=28.86%) i vrlo malu razliku između vrednosti dva faktora, temperature dizne alata (B=20.74%) i dozera ekspandera (C=20.01%). Tabela 35 takođe daje prikaz interakcije faktora sa znatno manjim efektom dejstava na odzive procesa, temperatura cilindra (F=9.14%), dozer smeše koekstrudera (7.44%), obrtaji puža ekstrudera (4.81%), obrtaji puža koekstrudera (2.48%) i dozer smeše ekstrudera (1.06%). F-test se takođe može primeniti u cilju definisanja procesnog parametra i njegovog efekta dejstva na odziv procesa. Promena procesnog parametra ima značajan uticaj na karakteristike performansi kada je F vrednost velika. Iz table 35 se može zaključiti da F vrednosti slede značaj uticaja faktora. S obzirom na predhodno navedeno, preduslovi za realizaciju ANOVA su zadovoljeni. Koeficijenti regresije za COM su prikazani u tabeli 36.

Tabela 35. Analiza varijanse (ANOVA) za COM

Faktor	Srednja vrednost COM po nivoima			DF	Seq SS	Doprinos (%)	Adj SS	Adj MS	F
	1	2	3						
A	0.519	0.446	0.00	1	8.293	28.86%	8.293	8.293	10.60
B	0.486	0.444	0.518	2	5.960	20.74%	5.960	2.980	3.81
C	0.440	0.503	0.506	2	5.749	20.01%	5.749	2.875	3.67
D	0.487	0.499	0.462	2	1.383	4.81%	1.383	0.691	0.88
E	0.483	0.494	0.471	2	0.712	2.48%	0.712	0.356	0.46
F	0.497	0.492	0.502	2	2.625	9.14%	2.625	1.312	1.68
G	0.484	0.494	0.514	2	0.304	1.06%	0.304	0.152	0.19
H	0.470	0.538	0.484	2	2.183	7.44%	2.183	1.069	1.37
Greška				2	1.565	5.45%	1.565	0.783	
Ukupno				17	28.733	100%			

ANOVA za COM



Slika 51. Grafički prikaz doprinosa efekta dejstva za COM

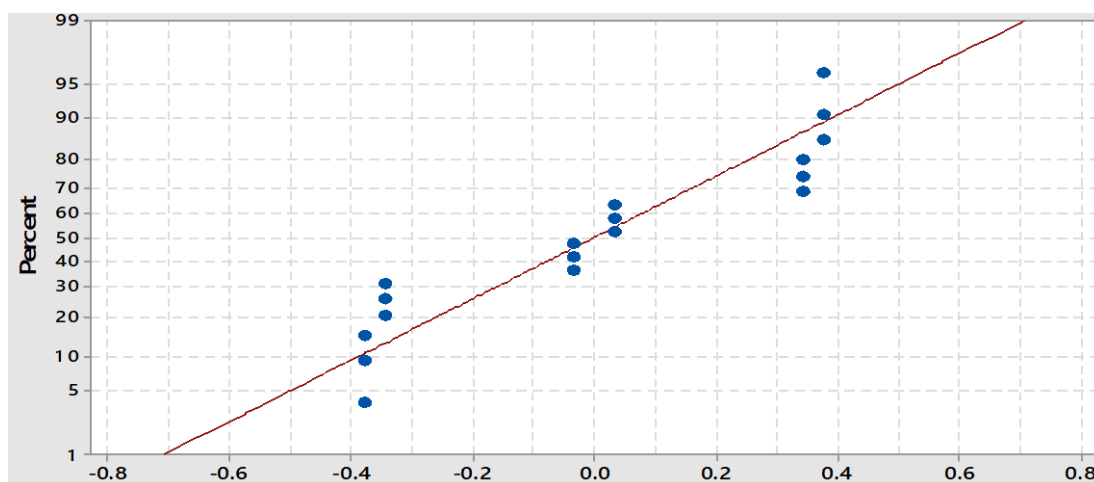
Tabela 36. Procenjeni koeficijenti regresije (za COM)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VF
Constant	-6.416	0.209	-30.77	0.001	
A					
8.8	0.679	0.209	3.26	0.083	1.00
9.1	-0.679	0.209	3.26	0.083	*
B					
201	0.046	0.295	0.16	0.0891	1.33
206	-0.727	0.295	-2.46	0.133	1.33
211	0.681	0.295	2.31	0.147	*
C					
19.2	-0.797	0.295	-2.70	0.114	1.33
21.2	0.351	0.295	1.19	0.356	1.33
23.2	0.446	0.295	1.51	0.269	*
D					
16.5	0.120	0.295	0.41	0.724	1.33
17.5	0.263	0.295	0.89	0.466	1.33
18.5	-0.383	0.295	-1.30	0.323	*
E					
39.6	0.021	0.295	0.07	0.950	1.33
40.6	0.233	0.295	0.79	0.513	1.33
41.6	-0.253	0.295	-0.86	0.481	*
F					
174	-0.508	0.295	-1.72	0.227	1.33
176	0.096	0.295	0.33	0.775	1.33
178	0.412	0.295	1.40	0.297	*
G					
24.1	-0.183	0.295	-0.62	0.599	1.33
26.1	0.073	0.295	0.25	0.827	1.33
28.1	0.110	0.295	0.37	0.746	*
H					
34.4	-0.217	0.295	-0.74		1.33
36.4	0.486	0.295	1.65		1.33
38.4	-0.269	0.295	0.91		*

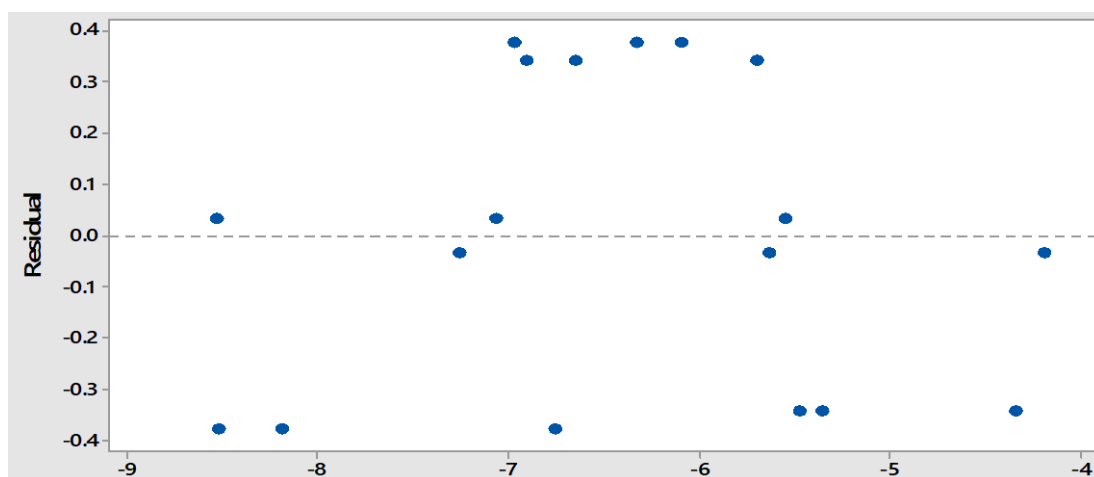
Jednačina regresije

$$\begin{aligned}
\text{COM} = & -6.416 + 0.679 A_{8.8} - 0.679 A_{9.1} + 0.046 B_{201} - 0.727 B_{206} + 0.681 B_{211} \\
& - 0.797 C_{19.2} + 0.351 C_{21.2} + 0.446 C_{23.2} + 0.120 D_{16.5} + 0.263 D_{17.5} \\
& - 0.383 D_{18.5} + 0.021 E_{39.6} + 0.233 E_{40.6} - 0.253 E_{41.6} - 0.508 F_{174} \\
& + 0.096 F_{176} + 0.412 F_{178} - 0.183 G_{24.1} + 0.073 G_{26.1} + 0.110 G_{28.1} \\
& - 0.217 H_{34.4} + 0.486 H_{36.4} - 0.269 H_{38.4}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Sa dijagrama predstavljenog na slici 52 može se uočiti da reziduali prate normalnu raspodelu. Takođe, dijagram odstupanja standardizovanih reziduala, prikazan na slici 53 ne pokazuje trend, što znači da regresioni model dobro opisuje problem.



Slika 52. Dijagram standardizovanih reziduala



Slika 53. Dijagram odstupanja standardizovanih reziduala u odnosu na nultu liniju

Uvidom u tabelu 35, moguće je definisati optimizovanu vrednost svakog tehnološkog procesnog parametra i tako dobiti skup vrednosti koje omogućavaju postizanje optimalnih vrednosti višestrukih odziva proizvodnog procesa UPVC cevi tehnološkim postupkom ekstruzije. Vrednosti optimalnih parametara procesa: brzina vuče linije na prvom nivou, 8.8 (m/min), temperatura dizne alata na trećem nivou, 211(°C), dozer ekspandera na trećem nivou, 23.2 (o/min), obrtaji puža ekstrudera na drugom nivou, 17.5 (o/min), obrtaji puža koekstrudera na drugom nivou, 40.6 (o/min), srednjoj temperaturi cilindra ekstrudera i koekstrudera na trećem nivou, 178(°C), dozer smeše ekstrudera na trećem nivou, 28.1 (o/min) i dozeru smeše koekstrudera na drugom nivou, 36.4 (o/min) ili A₁, B₃, C₃, D₂, E₂, F₃, G₃, H₂.

Primenom ovako odabranih vrednosti optimalnih parametara proizvodnog procesa izvršena je eksperimentalna verifikacija optimuma, analiza je predstavljena u narednoj tački.

5.7. Eksperimentalna verifikacija optimuma

Za eksperimentalnu verifikaciju optimuma korišćena su tri uzorka cevi. Realizovana i izvedena eksperimentalna procedura opisana je u radu. S tim u vezi, za potrebe eksperimentalne verifikacije odabrane su vrednosti i nivoi tehnoloških procesnih parametara koji omogućuju optimizaciju i zadovoljavaju zahteve za šest međusobno zavisnih odziva procesa.

Generalno, verifikacija optimuma predstavlja problem sa visokim stepenom složenosti kojem su istraživači pridali naročitu pažnju. Za potrebe eksperimentalne verifikacije koja je prikazana u ovom radu, korišćena je metodologija predložena od strane (Antony, 2003).

Na osnovu tri ponavljanja eksperimenta podešavanjem vrednosti parametara na optimalni nivo, u tabeli 37 su prikazani rezultati verifikacionog testa koji su dobijeni za eksperimentalno izmerene vrednosti odziva procesa primenom optimalnih ulaznih tehnoloških parametara procesa proizvodnje cevi od UPVC-a tehnološkim postupkom ekstruzije, koji su modelirani u ovom radu.

Uočljivo je da su izmerene vrednosti odziva u skladu definisanim ciljnim vrednostima i da se može utvrditi minimum varijacija odziva, koje obezbeđuje predloženi formirani hibridni višeodzivni optimizacioni model. Iz tabele 37 se može uočiti da je prosečna vrednost čvrstoće prstena 7.09kN/m², fleksibilnost prstena 1385.89N, TIR test 0%, debljina zida 3.67mm, uzdužno skupljanje 6.37%, debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja 0.80mm. Značajno je napomenuti da tokom ispitivanja cevi na spoljašnje udare (TIR test), nije nastupilo pucanje ispitivanih uzoraka. Sumarni prikaz rezultata merenja odziva procesa inicijalnog nivoa i rezultata ostvarenih primenom hibridnog višeodzivnog optimizacionog modela, su prikazani u tabeli 38.

Tabela 37. Rezultati verifikacionog testa

Redni broj eksperimenta	Čvrstoća prstena [kN/m ²]	Fleksibilnost prstena [N]	TIR test [%]	Debljina zida [mm]	Uzdužno skupljanje [%]	Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja [mm]
I	J	K	L	M	N	
1.	7.30	1428.04	0	3.60	5.8	0.80
2.	7.20	1366.25	0	3.75	6.5	0.80
3.	6.77	1363.39	0	3.65	6.8	0.80
AS	7.09	1385.89	0	3.67	6.37	0.80

Konfirmacioni test sproveden je u cilju kontrole tačnosti analiziranih rezultata realizovanih eksperimenata. Predviđanje i verifikacija poboljšanja odziva procesa primenom identifikovanog seta ulaznih optimalnih procesnih parametara na osnovu procene S/N odnosa (Pandey i Dubei, 2013), može se dobiti sledećim izrazom:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (5.4)$$

gde je :

η_m ukupna srednja vrednost COM svih eksperimentalnih serija

$\bar{\eta}_i$ srednja vrednost COM na optimalnom nivou

q je broj parametara procesa koji značajno utiču na višestruke odzive procesa.

Procenjeni indeks performansi višestrukih odziva koristeći optimalne parametre. Najveća COM vrednost je zabeležena u realizovanom eksperimentu pod rednim brojem 2, (COM = 0.615).

$$\hat{\eta}_{optimal} = 0.468 + (0.519 - 0.468) + (0.518 - 0.468) + (0.506 - 0.468) + (0.499 - 0.468) + (0.494 - 0.468) + (0.502 - 0.468) + (0.514 - 0.468) + (0.538 - 0.468) = 0.813 \quad (5.5)$$

Tabela 38. Sumarni prikaz rezultata

Nivo	Inicijalni	Optimalni	Poboljšanje
Odziv procesa	(A ₁ B ₁ C ₂ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂ H ₂)	(A ₁ B ₃ C ₃ D ₂ E ₂ F ₃ G ₃ H ₂)	
Čvrstoća prstena [kN/m ²]	7.40	7.09	-4%
Fleksibilnost prstena [N]	969.70	1385.89	+43%
TIR test [%]	7.09	0	+100%
Debljina zida [mm]	3.58	3.67	+2.5%
Uzdužno skupljanje [%]	5.77	6.37	-10%
Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja [mm]	0.71	0.80	+13%
COM	0.615	0.813	+32%

Na osnovu sumarnih rezultata ispitivanja i merenja, koji su prikazani u tabeli 38, konačno je moguće izvršiti komparaciju između vrednosti odziva procesa ostvarenih na inicijalnom nivou i vrednosti ostvarenih primenom hibridnog višeodzivnog optimizacionog modela procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije UPVC-a. Uočljivo je da su vrednosti odziva procesa značajno povećane, osim u slučaju minimalnog i nerelevantnog gubitka zabeleženog kod odziva čvrstoća prstena od -4% i uzdužnog skupljanja od -10%.

U poređenju rezultata, primetno je da vrednosti odziva procesa dobijene primenom hibridnog optimizacionog modela omogućuju prosečno poboljšanje od približno 24%.

Kada je u pitanju poboljšanje vrednosti COM, može se utvrditi značajno povećanje COM vrednosti, (COM=32%).

5.8. Rezultati primene predloženog modela

U cilju provere i analize praktične primenljivosti kao i adekvatnosti formiranog i usvojenog hibridnog višeodzivnog optimizacionog modela, izvršeno je uzorkovanje sa aspekta procesnih uslova, a dobijene vrednosti ispitivanja i merenja odziva su prikazane u tabeli 39.

Korišćeni su uzorci definisanih procesa serijske proizvodnje kompanije, međustanja i identifikovanog jedinstvenog skupa optimalnih vrednosti parametara procesa. Međustanje označava stanje procesa proizvodnje od trenutka podešavanja procesnih parametara do stabilizacije proizvodne linije.

Za potrebe provere adekvatnosti modela i njegove praktične primenljivosti, nakon usvojenog vremena od 24h od proizvodnje uzoraka, izvršeno je određivanje vrednosti odziva procesa.

S obzirom da je komparacija izvršena na osnovu tri uzorka stanja procesa tokom serijske proizvodnje i primenom optimalnih vrednosti procesnih parametara, usvojene su njihove aritmetičke sredine, zbog čega su vrednosti odziva procesa (tabela 39) označene zvezdicama. Tabela 39 takođe daje prikaz i rezultata komparacije dobijenih vrednosti odziva u zavisnosti od proizvodnih uslova, kao i procentualno poboljšanje odziva procesa (%) za ispitane uzorke.

Tabela 39. Komparacija vrednosti odziva u zavisnosti od proizvodnih uslova

Redni broj	Uslov	Čvrstoća prstena [kN/m ²]	Fleksibilnost prstena [N]	TIR test [%]	Debljina zida [mm]	Uzdužno skupljanje [%]	Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja [mm]
1.	Serijska proizvodnja	4.7	1022	5.5	3.20	6.4	0.7
2.	Serijska proizvodnja	4.8	1066	6.5	3.15	7.2	0.6
3.	Serijska proizvodnja	4.8	1066	6	3.20	7	0.65
AS	Serijska proizvodnja	4.77*	1051.33*	6*	3.18*	6.87*	0.65*
4.	Međustanje	6.1	1255	5	3.45	6.1	0.7
5.	Optimalni set	7.30	1428.04	0	3.60	5.8	0.80
6.	Optimalni set	7.20	1366.25	0	3.75	6.5	0.80
7.	Optimalni set	6.77	1363.39	0	3.65	6.8	0.80
AS	Optimalni set	7.09*	1385.89*	0*	3.67*	6.37*	0.80*
Poboljšanje		+48.64%	+29.25%	+100%	+15.41%	+7.28%	+23.08%

Analizom rezultata ispitivanja i merenja uzoraka, dobijene su vrednosti odziva procesa serijske proizvodnje, međustanja i ostvarenih vrednosti primenom hibridnog višeodzivnog optimizacionog modela. Iz tabele 39 se može uočiti da dobijeni rezultati pokazuju jak i direktan uticaj tehnoloških procesnih parametara na svih šest odziva procesa.

Sa stanovišta mehaničkih i fizičkih karakteristika, najveći uticaj procesnih parametara je ostvaren za odziv TIR test i iznosi 100%, zatim sledi za čvrstoću prstena od 48.64%, fleksibilnost prstena od 29.25%, debljinu spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja 23.08%, debljinu zida od 15.41% i uzdužno skupljanje od 7.28% što značajno doprinosi ukupnom poboljšanju mehaničkih i fizičkih karakteristika.

Uočljivo je da primena hibridnog višeodzivnog hibridnog optimizacionog modela procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije PVC-a omogućuje istovremeno prosečno poboljšanje za više karakteristika kvaliteta u odnosu na proizvodne uslove serijske proizvodnje od 39.28%. Na ovaj način, minimizira se mogućnost degradiranja mehaničkih i fizičkih karakteristika kvaliteta tokom perioda eksploatacije, a time se i ispunjavaju zahtevi za više međusobno zavisnih karakteristika kvaliteta.

5.9. Diskusija rezultata

U sprovedenoj analizi na primeru kompanije za proizvodnju i distribuciju proizvoda i rešenja od polimera „Peštan“ iz Arandjelovca, rezultati optimizacije procesa na bazi zahteva za više međusobno zavisnih karakteristika kvaliteta dobijeni primenom predloženog modela, predstavljaju značajnu osnovu i generički pristup za formiranje strategije upravljanja procesom u cilju optimizacije specifičnih problema u odnosu na različite tipove, odnosno, prirode karakteristika kvaliteta, njihovih korelacija i ograničenja, pri čemu su njihove međusobne relacije (analitički modeli) nepoznate.

Upravljanje procesom zasnovano na višeodzivnoj optimizaciji obezbedilo bi značajne rezultate na minimiziranju varijacija karakteristika kvaliteta a samim tim moguće je dobiti optimalne performanse od kontrolnih i, u najvećoj meri izbeći ili ublažiti uticaj poremećajnih faktora. Iz analize rezultata dobijenih predloženim modelom može se zaključiti da pojedni odzivi procesa imaju visok nivo poboljšanja mehaničkih karakteristika, na primer TIR test-ispitivanje kojim se utvrđuje mera otpornosti na spoljašnji udar proverom da li će nastupiti oštećenje cevi i fitinga prilikom transporta, skladištenja i sklapanja ili ugradnje cevi. Slična situacija je kod fleksibilnosti prstena, sposobnosti cevi da podnese deformaciju veću 30% u odnosu na spoljašnji dijametar, što doprinosi većoj otpornosti na dinamička i statička opterećenja.

Na osnovu rezultata provere adekvatnosti i praktične primenljivosti, predloženi model višeodzivne optimizacije zasnovan na fazi logičkom zaključivanju omogućava sagledavanje postojećih činilaca i pronalaženja odgovora na praktične probleme u upravljanju procesima i unapređenju kvaliteta u kompleksnom, industrijskom okruženju. Rezultati dobijeni na ovaj način ukazuju da je definisani hibridni višeodzivni model u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije ovoj razmatranoj studiji slučaja na primeru kompanije „Peštan“ pouzdan, i da se on kao takav može uspešno primeniti za proces proizvodnje PVC cevi tehnološkim postupkom ekstruzije u drugim kompanijama i u drugim studijama.

Model višeodzivne optimizacije u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije razvijen u ovoj disertaciji, predstavlja nov i funkcionalan način sagledavanja upravljanja kvalitetom proizvodnog procesa na bazi više kriterijuma i tehnološkog postupka ekstruzije PVC-a. Pored toga, predloženi model predstavlja originalno rešenje koje omogućava istovremenu optimizaciju procesa za više vrsta karakteristika kvaliteta i njihovih korelacija, relacija između kontrolnih faktora i karakteristika kvaliteta. Upravljanje procesom bazirano na optimizaciji, kroz sagledavanje relacija procesnih parametara i višestrukih odziva procesa tehnološkog postupka ekstruzije, pruža jasne smernice za kreiranje politike kvaliteta u industriji prerade plastičnih masa.

Poglavlje 6
ZAKLJUČAK

6. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati u ovoj disertaciji prvenstveno polaze od osnovnog cilja i posebnih ciljeva formuliranih u uvodnom delu.

Sa aspekta realizacije opšteg cilja, disertacija je rezultovala razvojem i primenom hibridnog višeodzivnog modela za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije, i na taj način ostvarena mogućnost uspostavljanja analitičke međuzavisnosti između glavnih tehnoloških parametara procesa i višestrukih odziva procesa posmatranih kroz fizičke i mehaničke karakteristike kvaliteta proizvoda.

U pogledu posebnih ciljeva, u disertaciji je ostvarena identifikacija relevantnog jedinstvenog skupa optimalnih vrednosti tehnoloških procesnih parametara koji zadovoljava nominalne vrednosti na osnovu više karakteristika kvaliteta, što je omogućilo postizanje specificirane srednje vrednosti i minimizaciju varijacije karakteristike.

Primarno eksperimentalno istraživanje u disertaciji bilo je bazirano na primeni dizajna eksperimenta DOE. S obzirom da je za realizaciju bilo kojeg inženjerskog eksperimenta značajno da se svi planirani eksperimenti realizuju u jednoj fazi, primenom Taguchi ortogonalnih nizova, omogućeno je da se minimalnim brojem eksperimenata ispune uslovi ekonomičnosti.

Generalno, ova doktorska disertacija predstavlja doprinos rešavanja problema kompleksnog tehnološkog postupka ekstruzije u slučaju kada postoje zahtevi kupca za više različitih karakteristika kvaliteta koje su u međusobnoj korelaciji, što je u savremenoj poslovnoj praksi veoma zastupljeno.

Postignuti rezultati istraživanja u okviru ove doktorske disertacije ukazuju i potvrđuju, da razmatranje uticaja procesnih parametara na višestruke odzive procesa, omogućuje različite aspekte analize problema, odnosno omogućuje širu i potpuniju sliku, a u ovom određenom slučaju uticaja na proces proizvodnje troslojnih cevi od neplastificiranog PVC tehnološkim postupkom ekstruzije.

I pored toga što je fokus na industriji prerade plastike kao veoma značajnoj grani industrijske proizvodnje na globalnom nivou, ova disertacija predstavlja signifikantan primer, ali i kvalitetan fundament za korišćenje koncepta hibridnih višeodzivnih modela u upravljanju procesima i u drugim oblastima industrijske proizvodnje. Tu se, pre svega, misli na Taguchi metodu i fazi logiku, kao i na razvijeni model za optimizaciju procesa proizvodnje PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije.

U posebnoj i za praktičnu primenu u potpunosti definisanom kontekstu, ova doktorska disertacija predstavlja alat za uspešno i sigurno upravljanje procesom u industrijskim sistemima za (proizvodnju PVC cevi) preradu plastike tehnološkim postupkom ekstruzije. Takođe, potrebno je istaći da je razvijeni model pružio mogućnost uvida u osnovne aspekte relacija uticaja procesnih parametara na odzive procesa, obezbeđivanjem informacija o nivoima i vrednostima na kojima treba održavati tehnološke procesne parametre, kako bi skup vrednosti procesnih parametara zadovoljavao zahteve za više međusobno zavisnih karakteristika kvaliteta. Značajno je napomenuti da je hibridni višeodzivni model u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije razvijeni u disertaciji omogućio značajno sveobuhvatno poboljšanje više odziva procesa, i na taj način postignut je veći sinergetski efekat nego parcijalnom optimizacijom odziva.

Prema rezultatima eksperimentalno dobijenih vrednosti, prosečno poboljšanje odziva procesa čvrstoća prstena, fleksibilnost prstena, TIR test, debljina zida, uzdužno skupljanje i debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja, iznosi 24%. Primena razvijenog višeodzivnog modela predloženog u ovom radu, omogućava poboljšanje u odziva procesa u odnosu na proizvodne uslove serijske proizvodnje, što čini poboljšanje za 39%.

Sa aspekta mogućnosti praktične primene, značajno je napomenuti da upravljanje procesom bazirano na formiranom hibridnom optimizacionom modelu izrade PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije, razvijeno je u okruženju sa standardom opremom koja se nalazi u većini kompanija za proizvodnju PVC proizvoda tehnološkim postupkom ekstruzije, a osnovni materijali za izradu predstavljaju tržišno dostupne materijale.

Poglavlje 7

NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI

7. NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI

Naučni doprinosi istraživanja disertacije mogu se interpretirati kroz dva segmenta.

Primarni rezultat koji je proistekao iz ove disertacije jeste hibridni višeodzivni model za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije.

Model omogućuje uspostavljanje analitičke međuzavisnosti između ključnih tehnoloških procesnih parametara i višestrukih odziva procesa posmatranih kroz fizičke i mehaničke karakteristike kvaliteta proizvoda, kao i optimizaciju sa aspekta upravljanja procesom u cilju postizanja specificirane srednje vrednosti i minimiziranje varijacije karakteristika.

Razvijeni model predstavlja originalno rešenje jer dosadašnji modeli nisu uzimali u obzir više od pet tehnoloških procesnih parametara i dva odziva procesa.

Dobijen je pouzdan model za upravljanje procesom na bazi optimizacije povećanih izlaznih performansi procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije i optimalnim ulaznim parametrima, što potvrđuje opravdanost primene svih navedenih metoda, u procesu proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije neplastificiranog UPVC-a.

Rezultati eksperimentalne verifikacije u okviru ove doktorske disertacije, argumentuju efikasnost razvijenog modela i njegovu primenljivu vrednost.

Razvijeni model i optimizovani proces proizvodnje PVC cevi tehnološkim postupkom ekstruzije, imaju značajnu mogućnost za praktičnu primenu u industriji za preradu plastičnih masa. U odnosu na inicijalni eksperiment i na serijsku proizvodnju, primenom iste recepture kompaunda, eksperimentalno je verifikovan skup optimalnih vrednosti ulaznih tehnoloških parametara procesa koji omogućavaju dobijanje rezultata i do 24% odnosno 39% poboljšanih u odnosu na inicijalne rezultate uz uslova serijske proizvodnje.

Razvijeni hibridni višeodzivni model u fazi okruženju za optimizaciju proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije na bazi zahteva za više međusobno zavisnih karakteristika kvaliteta, omogućuje naučno zasnovano upravljanje procesom.

Uzevši u obzir polazne hipoteze koje predstavljaju osnovni okvir za istraživanje koje je realizovano u ovoj doktorskoj disertaciji, moguće je izvesti sledeće zaključke:

Nulta hipoteza (H_0) koja glasi: „Primenom fazi-Taguchi metodologije može se formirati hibridni višeodzivni optimizacioni model kojim je moguće optimizovati ključne tehnološke parametre procesa proizvodnje troslojnih cevi od neplastificiranog UPVC-a tehnološkim postupkom ekstruzije i uspostaviti analitičku međuzavisnost između ključnih procesnih parametara i višestrukih korelisanih odziva procesa,“ potvrđena je istraživanjem predstavljenim u petom poglavlju ove doktorske disertacije. Istraživanje je pokazalo da je moguće razviti hibridni višeodzivni model u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije. Razvoj hibridnog višeodzivnog modela sa osam ulaznih parametara i šest izlaznih performansi procesa realizovan je primenom Taguchi-fazi metodologije.

Hipoteza (H_1) koja glasi: „Moguće je ispitati direktan uticaj tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa PVC proizvoda, dobijenih tehnološkim postupkom ekstruzije,“ potvrđena je primenom programskog rešenja za statističku obradu podataka, predstavljenim u petom poglavlju disertacije.

Na osnovu parcijalne i sveobuhvatne analize dobijenih vrednosti, može se zaključiti da postoji direktan uticaj tehnoloških procesnih parametara na odzive procesa.

Hipoteza (H_2) koja glasi: „Optimalni set procesnih parametara za jedan odziv nije ekvivalentan sa setom procesnih parametara koji optimizuje drugi odziv procesa,“ je potvrđena. Rezultati parcijalne optimizacije parametara procesa u odnosu na jedan odziv, obezbedili su optimalan skup vrednosti ulaznih parametara procesa koji zadovoljava definisanu vrednost jedne karakteristike kvaliteta, predstavljeno je u petom poglavlju. Šest različitih setova optimalnih ulaznih parametara procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije za šest odziva procesa.

Hipoteza (H₃): „Postoji direktan uticaj tehnološkog procesnog parametra na više pojedinačnih odziva procesa,“ bila je dokazana u petom poglavlju ove disertacije. Sa aspekta utvrđivanja uticaja tehnoloških procesnih parametara na više karakteristika kvaliteta, u disertaciji je obrazložen odabir svih ulaznih procesnih parametara, pri čemu su opsezi ulaznih vrednosti bili odabrani dovoljno široko da omoguće uspešno modeliranje procesa, jer može se zaključiti da jedan tehnološki procesni parametar može imati najveći uticaj efekta dejstva na više različitih odziva procesa. Rezultati ispitivanja pokazuju, da procesni parametar C dozer ekspandera, ima najveći uticaj na odzive procesa: čvrstoću prstena (C=39.82%), TIR test (C=24.32%) i uzdužno skupljanje (C=27.02%). Procesni parametar temperatura dizne alata, faktor B ima najveći uticaj na fleksibilnost prstena (B=37.02%) i debljinu zida (B=57.26%). Dozer smeše koekstrudera, H ima najveći uticaj na odziv procesa debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja (H=36.48%).

Hipoteza (H₄): „Moguće je identifikovati optimalni set kontrolnih tehnoloških procesnih parametara i optimizovati višestruke korelisane odzive procesa.“ Ova hipoteza je dokazna primenom fazi logike na eksperimentalnim vrednostima, što je takođe predstavljeno u petom poglavlju disertacije. Dokazano je da se primenom fazi logike može identifikovati set optimalnih vrednosti parametara procesa koji optimizuje višestruke korelisane odzive procesa i zadovoljava zahteve svih karakteristika. Takođe, problem sagledavanja uticajih faktora bez obzira na njihove interakcije, može se uspešno rešiti primenom fazi skupova i fazi logičkog zaključivanja.

Hipoteza (H₅): „Primenom fazifikacije prilikom formiranja višedozivnog hibridnog optimizacionog modela moguće je ublažiti nepreciznost i nejasnoće informacija u modelu, čime bi se postigli optimalniji tehnološki uslovi proizvodnje PVC proizvoda.“ Ova hipoteza potvrđena je uspešnom eksperimentalnom verifikacijom. U petom poglavlju disertacije predstavljeni su rezultati eksperimentalne verifikacije analitički definisanog optimuma.

Na osnovu svih ostvarenih i prethodno predočenih rezultata, može se zaključiti da je istraživanje uspešno izvršeno i da su ispunjeni svi definisani ciljevi ove doktorske disertacije.

Disertacija je nastala u cilju pronalaženja odgovora na praktične i realne probleme u upravljanju procesima u kompleksnom fazi industrijskom okruženju, i kontinualnom unapređenju kvaliteta.

Ostvareni rezultati predstavljaju kvalitetnu osnovu za nastavak istraživanja, kako u oblasti proizvodnje PVC ekstrudiranih cevi tako i u širem kontekstu industrijske proizvodnje.

U pogledu nastavka istraživanja, mogući pravci budućih istraživanja u okvirima proizvodnje PVC cevi tehnološkim postupkom ekstruzije, jedan od njih je svakako variranje i modifikacija formulacije kompaunda za proces proizvodnje od koje u velikoj meri zavise karakteristike kvaliteta ekstrudiranog proizvoda. Tehnološke granice procesnih parametara koje su korišćene u slučaju autentičnog istraživanja, ovde bi trebalo ponovo ispitati, dok bi glavni uticaj i signifikantnost međusobnog uticaja između tehnoloških procesnih parametara i odziva procesa mogle biti potpuno drugačije. U okviru drugog pravca, akcenat istraživanja bio bi uključivanje većeg broja tehnoloških procesnih parametara od kojih zavise mehanička i fizička svojstva. S tim u vezi, eksperimentalni dizajn bi u ovom slučaju mogao da doprinese iznalaženju optimalnog skupa ulaznih vrednosti u cilju postizanja specificirane srednje vrednosti i minimiziranju varijacija odziva procesa.

Literatura

- [1] Aggarwal, A., Singh, H., Kumar, P., Singh, M. (2008a). Multi-characteristic process optimization of CNC turned parts using principal component analysis. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 3(1/2), 208–223.
- [2] Agarwal, V., Vimal, J., Chaturvedi, V. (2012). Optimization of Extrusion Blow Molding Process Parameters By Grey relational analysis and Taguchi method. *International Journal of Research in Engineering And Applied Sciences*, 2(2), 407-417.
- [3] Antony, J. (2000). Multi-response optimization in industrial experiments using Taguchi quality loss function and principle component analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 16, 3-8.
- [4] Antony, J. (2003). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Butterworth Heinemann, New York, U.S.A.
- [5] Ashish, D., Vikhar, J.P., Modak, J.P. (2015). Formulation of Approximate, Generalized Field Data Based Mathematical Model for PVC Pipe Manufacturing Process. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(02).
- [6] Anderson, P., Ferreira, J.R., Baletrassi, P.P. (2007). A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 26–35.
- [7] Aggarwal, A., Singh, H., Kumar, P., Singh M. (2008b). Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique-A comparative analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 200, 373–384.
- [8] Ariani, F., Siregar, K., Syahputri, K., Rizkya, I. (2019). Improving Quality of PVC Pipes Using Taguchi Method. *E3S Web of Conferences* 125, 22004 ICENIS 2019.
- [9] Abda, K., Abharyb, K., Marianb, R. (2016). Multi-objective optimisation of dynamic scheduling in robotic flexible assembly cells via fuzzy-based Taguchi approach. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 250–259.
- [10] Ayele, A. (2019). Integrating Taguchi and Response Surface Methodology for Process Parameter Optimization of Extrusion Process. Case in Ethiopia Plastic Industry, Addis Ababa Institute Of Technology School Of Mechanical and Industrial Engineering.
- [11] Banga, J., Balsa-Canto, E., Moles, C., Alonso, A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology* 14, 131-144.
- [12] Barma, D., Roy, J., Saha, S., C. (2012). Process Parametric Optimization of Submerged Arc Welding by using Utility based Taguchi Concept. *Journal of Advanced Materials Research*, 1194-1198.
- [13] Bariran, S.E. S., Sahari, K. S. M. (2013). Taguchi Method-Based Optimization in Plastic Injection Moulding: A Novel Literature Review-Based Classification and Analysis, 1st International conference on robust quality engineering (ICRQE 2013), Kuala Lumpur, Malaysia, 1-4.
- [14] Byon, S.M., Hwang, S.M. (2003). Die shape optimal design in cold and hot extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 316-324.
- [15] Bose, P., K., Deb, M., Banerjee, R., Majumder, A. (2013). Multi objective optimization of performance parameters of a single cylinder diesel engine running with hydrogen using a Taguchi-fuzzy based approach. *Energy*, 63, 375-386.

- [16] Behara, U. (2011). Application of Fuzzy Logic and TOPSIS in the Taguchi Method for Multi-Response Optimization in Electrical Discharge Machining (EDM). National Institute of Technology, Rourkela.
- [17] Bolboacă, S., Jäntschi, L. (2007). Design of Experiments: Useful Orthogonal Arrays for Number of Experiments from 4 to 16. *Entropy*, 198-232.
- [18] Beyer, H., Sendhoff, B. (2007). Robust optimization-A comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196, 3190-3218.
- [19] Buyukozkan, G., Feyzioglu, O., Ruan, D. (2004). Fuzzy group decision-making to multiple preference formats in quality function deployment. *Computers in Industry*, 58, 392-402.
- [20] Bijelić, Z. (2018). Razvoj modela optimizacije upravljanja integrisanim razvojnim promenama. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [21] Chen, W.C., Nguyen, M.H., Chiu, W.-H., Chen, T.-N., Tai, P.H. (2016). Optimization of the plastic injection molding process using the Taguchi method, RSM, and hybrid GA-PSO. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9-12), 1873-1886.
- [22] Chen, R. S., Lee, H. H., Yu, C.Y. (1997). Application of Taguchi's method on the optimal process design of an injection molded PC/PBT automobile bumper. *Composite Structures*, 39, 3-4, 209-214.
- [23] Chen, G., Pham, T.T. (2001). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. CRC Press LLC. ISBN0-8493-1658-8.
- [24] Chan, F. T. S., Chan, H. K., Kazerooni, A. (2003). Real time fuzzy scheduling rules in FMS. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 341-350.
- [25] Chen, W. L., Huang, C.Y. (2013). Finding efficient frontier of process parameters for plastic injection molding. *Journal of Industrial Engineering International*, 9(25).
- [26] Ciszewski, M., Waclawski, M., Buratovski, T., Giergiel, M., Kurc, K. (2015). Design, modelling and laboratory testing of a pipe inspection robot, *Archive of Mechanical Engineering*, 62(3), 395-407.
- [27] Dao, T. P. (2016). Multi-response Optimization of a Compliant Guiding Mechanism Using Hybrid Taguchi-Grey Based Fuzzy Logic Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5386893>.
- [28] Dhas, J., Satheesh, M. (2003). Multiple Objective Optimization of Submerged Arc Welding Process Parameters Using Grey Based Fuzzy Logic. *Journal of Advances in Production Engineering and Management*, 7, 5-16.
- [29] Duan, X., Velay, X., Sheppard, T. (2004). Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A369*, 66-75.
- [30] Elsayed, E. A., Chen, A. (1993). Optimal levels of process parameters for products with multiple characteristics. *International Journal of Production Research*, 31(5), 1117-1132.
- [31] Enteman, C.W. (2000). A Fuzzy logic with interval truth value, *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 161-189.
- [32] Engel, A. (2010). *Verification, Validation, and Testing of Engineered Systems*. Hoboken, N.J. Wiley.
- [33] EN13476-1:2018-BSI Standards Publication-Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage-Structured wall piping systems of unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U), polypropylene (PP) and polyethylene (PE).

- [34] European Standards, (2019). Dostupno na: <https://www.en-standard.eu/bs-en-1401-1-2019-plastics-piping-systems-for-non-pressure-underground-drainage-and-sewerage-unplasticized-poly-vinyl-chloride-pvc-u-specifications-for-pipes-fittings-and-the-system/>.
- [35] ECVN - The European Council of Vinyl Manufacturers, dostupno na: <https://pvc.org/about-pvc/pvc-additives/stabilisers/>
- [36] Fredonia, World plastic pipe, (2015). Industry study, dostupno na: <http://www.fredoniagroup.com>
- [37] Fredonia, Plastic Competitive Pipe, (2017). Industry study, dostupno na: <http://www.fredoniagroup.com>
- [38] Gupta, A., Singh H., Aggarwal, A. (2011). Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel. *Expert Systems with Applications*, 38, 6822-6828.
- [39] Garvin, D. (1987). Competing on the eight dimensions of quality. *Harvard Business Review*, 65 (6), 101.
- [40] Gupta, P., Arvind Kumar Lal, A.K., Sharma, R.K., Jai Singh, J. (2007). Analysis of reliability and availability of serial processes of plastic-pipe manufacturing plant A case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24(4), 404-419.
- [41] Gupta, N.L. (2011). Optimization of micro-wire EDM operation using Grey Taguchi method. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela.
- [42] Garg, A. (2010). A Fuzzy-Taguchi Approach for Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling (FDM) Built Parts. National Institute of Technology, Rourkela.
- [43] Giles, H., F., John R. Wagner, J., R., Eldridge, M., M. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. William Andrew Publishers.
- [44] Goff, J., Whelan, T. (2000). *The Dynisco Extrusion Processors Handbook*, 2nd edition. DYNISCO Publishers.
- [45] Gadekar, S., S. (2015). Defects in extrusion process and their impact on product quality, 3(3), 187-194.
- [46] Garg, A. (2010). A Fuzzy-Taguchi Approach for Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling (FDM) Built Parts. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Rourkela.
- [47] Global Polyvinyl Chloride PVC Market, (2017), dostupno na: <https://www.reportlinker.com/p05171155/Global-Polyvinyl-Chloride-PVC-Market.html>
- [48] Hasenkamp, T., Arvidsson, M., Gremyr, I. (2009). A review of practices for robust design methodology, *Journal of Engineering Design*, 20(6), 645-657.
- [49] Han, C. H., Kim, K. J., Choi, S. H. (2004). Prioritizing engineering characteristics in quality function deployment with incomplete information: A linear partial ordering approach. *International Journal of Production Economics*, 91, 235-249.
- [50] Harding, J. A., Popplewell, K., Fung, R. Y. K., Omar, A. R. (2001). An intelligent information framework relating customer requirements and product characteristics. *Computers in Industry*, 44(1), 51-65.
- [51] Habiballa, H., Novak, V. (2000). Fuzzy general resolution. Research report: Institute for research and applications of fuzzy modeling, University of Ostrava, <http://ac030.osu.cz/irafm/ps/rep47.ps>
- [52] Hanovich, R. L. (2010). Fuzzy deterrence. Master thesis, Forces Staff College, Advanced Warfighting School, Norfolk Virginia.

- [53] Harold F. Giles, Jr., John R. Wagner, Jr., Eldridge M. M. (2007). *Extrusion The Definitive: Processing Guide and Handbook*, William Andrew publishing.
- [54] Hosseini, A., Farhangdoost, Kh., Manoochehri, M. (2012). Modelling of extrusion process and application of Taguchi method and ANOVA analysis for optimization the parameters. *MECHANIKA*, 18(3), 301-305.
- [55] Hejazi, T.H., Mirmehdi Seyyed-Esfahani, M.S., Antony, J. (2017). A new methodology based on multistage stochastic programming for quality chain design problem. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 24(1) .
- [56] Hsiang, S., H., Lin, Y.,W., Lai, J.,W., (2012). Application of fuzzy-based Taguchi method to the optimization of extrusion of magnesium alloy bicycle carriers. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, 629-638.
- [57] Hsiang, S. H., Lin, Y. W. (2008). Optimization of the extrusion process for magnesium alloy sheets using the Fuzzy-based Taguchi method. In *The 11th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies*, AMPT-CA0199022.
- [58] Hsiang, S. H., Kuo, J. L. (2005). Applying ANN to predict the forming load and mechanical property of magnesium alloy underhot extrusion. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 970-977.
- [59] Hu, Y., Lai, Z., Zhang, Y. (2007). The study of cup-rod combined extrusion process of magnesium alloy (AZ61A). *Journal of Materials Processing Technology*, 187(188), 649-652.
- [60] Helman, M., (2001). Fuzzy logic introduction, dostupno na: <http://epsilon.nought.de/tutorials/fuzzy/fuzzy.pdf>
- [61] Huang H-X, Liao C-M. (2002). Prediction of parison swell in plastics extrusion blow molding using a neural network method. *Polymer Testing*, 21(7), 745- 749.
- [62] Ikram,A., Mufti, N., Saleem, M., Q., Ahmed Raza Khan, A., R. (2013). Parametric optimization for surface roughness, kerf and MRR in wire electrical discharge machining (WEDM) using Taguchi design of experiment, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(7).
- [63] International Organization for Standardization. Dostupno na: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>
- [64] Kamaruddin, S., Khan, Z.A., Foong, SH. (2010). Application of Taguchi method in the optimization of injection moulding parameters for manufacturing products from plastic blend. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(6), 574-580.
- [65] Karna, S. K., Singh R. V., Sahai, R. (2012). Application of Taguchi method in process optimization. In: *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering*.YMCA University of Science & Technology, Faridabad, Haryana, October 19-20.
- [66] Kumar, P., Barua, B., Gaindhar, J. L. (2000). Quality optimization multi-characteristics through Taguchi technique and utility concept. *Quality and Reliability Engineering International*,16, 475-485.
- [67] Kumar, D., Goyal, S., Joshi R. (2019). Optimization of process parameters in extrusion of PVC pipes, using Taguchi method. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8 (1), 70-72.
- [68] Kumar, D., Kumar, S. (2015). Process parameters optimization for HDPE material in Extrusion Blown Film Machinery using Taguchi method. *International Organization of Scientific Research Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 12(4).

- [69] Kumar, M., Dubey, M. (2015). Optimization of Process Parameters of Plastic Extrusion in Pipe Manufacturing. *International Journal of Engineering and Management Research*, 5(6), 276-280.
- [70] Karayel, D. (2008). Simulation of direct extrusion process and optimal design of technological parameters using FEM and artificial neural network. *Key Engineering Materials*, 367, 185-192.
- [71] Kerealme, S., Srirangarajalu, N., Asmare, A. (2016). Parameter Optimization of Extrusion Machine Producing UPVC Pipes using Taguchi Method: A Case of Amhara Pipe Factory. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(1).
- [72] Kumar, P., Barua, P.B., Gaidher, J.L. (1996). Quality of V-process method through the Taguchi technique. *Quality and Reliability Engineering International*, 12, 421-427.
- [73] Kung, S.M. (2004). CNC milling process optimization using Taguchi-Fuzzy-ANN approach. Master Thesis of National Kaohsiung First University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan.
- [74] Klir, G. J., Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic*. Prentice Hall PTR. New Jersey ISBN 0-13-101171-5. 574.
- [75] Kim, K. J., Moskowitz, H., Dhingra, A., Evans, G. (2000). Fuzzy multicriteria models for quality function deployment. *European Journal Operational Research*, 121, 504-518.
- [76] Kimura, F. (2013). IT support for product and process development in Japan and future perspective. *Digital Product and Process Development Systems*, 411, 11-23.
- [77] Khan, J. G., Dalu, R. S., Gadekar, S. S. (2014). Defects in extrusion process and their impact on product quality. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(3).
- [78] Kacker, R., Lagergren, E., Filliben, J. (1991). Taguchi's Orthogonal Arrays Are Classical Designs of Experiments. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 96(5), 577-591.
- [79] Jovanović, M., Lazić, V., Adamović, D., Ratković, N. (2003). *Mašinski materijali*, Mašinski fakultet, Kragujevac.
- [80] Jurkovic, Z., Jurkovic, M., Buljan, S. (2006). Optimization of extrusion force prediction model using different techniques. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17, 353-356.
- [81] Lee, H. H., (2000). *Taguchi methods: Principles and practices of quality design*. Taiwan: Gau Lih Book CO. LTD.
- [82] Lee, J. M., Kim, B. M., Kang, C.G. (2004). Effect of chamber shapes of porthole die on elastic deformation and extrusion process in condenser tube extrusion. *Mater. Des.*, 26, 327-336.
- [83] Lee, H.T., Yur, J.P. (2000). Characteristic analysis of EDMed surfaces using Taguchi approach, *Materials and Manufacturing Processes*, 15(6), 781-806.
- [84] Lee, R.C.T. (1982). Fuzzy logic and resolution principle, *Journal of the Association for Computing*, 109-119.
- [85] Lin, C. L., Lin, J. L., Ko, T. C. (2002). Optimization of the EDM process based on the orthogonal array with Fuzzy logic and grey relational analysis method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 271-277.
- [86] Lin, J.L., Wang, K.S., Yan B.H. (2000). Optimization of electrical discharge machining process based on Taguchi method with fuzzy logics. *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 48-55.

- [87] Lin, S. P., Yang, C. L., Chan, Y. H., Sheu, C. (2010a). Refining Kano's 'quality attributes-satisfaction' model: A moderated regression approach. *International Journal of Production Economics*, 126 (2), 255–263.
- [88] Li, M. (2013). The method for product design selection with incomplete linguistic weight information based on quality function deployment in a fuzzy environment. *Mathematical Problems in Engineering*. Article ID 943218.
- [89] Liu, H.T. (2013). An integrated fuzzy decision approach for product design and evaluation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 25, 709–721.
- [90] Liu, H. T., Wang, C. H. (2010). An advanced quality function deployment model using fuzzy analytic network process. *Applied Mathematical Modelling*, 34, 3333-3351.
- [91] Lebaal, N, Puissant, S., Schmidt, F. (2010). Application of a response surface method to the optimal design of the wall temperature profiles in extrusion die. *International Journal of Material Forming*, 3(1), 47-58.
- [92] Lal, SK., Vasudevan, H. (2013). Optimization of injection moulding process parameters in the moulding of low density polyethylene (LDPE). *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(5), 35–39.
- [93] Ljung, L. (2001). Black-box Models from Input-output Measurements. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE. Budapest*.
- [94] Mamalis, A.G., Vortselas, A., Kouzilos, G. (2012). Tube-extrusion of polymeric materials: optimization of processing parameters. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(1), 186-193.
- [95] Mast, J. D., Schippers, W. A., Does R. J, Van Den Heuvel, E. R. (2000). Steps and strategies in process improvement. *Quality and Reliability Engineering International*, 16(4), 301-311.
- [96] Matin, I. (2014). *Modularni sistemi za projektovanje alata za injekciono presovanje plastike. Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.*
- [97] Mamdani, E. H. (1987). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems. *IEEE Transactions on Computers*, 26, pp.1189-1191.
- [98] Mizumoto, M. (1985). Fuzzy reasoning inder new new competional rules of inference. *Kybernetes*, pp. 107-117.
- [99] Mahapatra, S.S., Nanda, S.K., Prasanna, K. Garg, S. (2010). Prediction of Erosion Wear Rate of Cement By-pass Dust Filled Hybrid Composites using Fuzzy Logic. *Journal of material and design*, 30(8), 2791-2801.
- [100] Marković, M. (2013). *Zaštita podnih obloga prevlakama na osnovu polivinil hlorida, Master rad, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki Fakultet, Novi Sad.*
- [101] Mekonnen, A. (2018). *Uses and Applications of Quality Engineering For Plastic Production Process. International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2(1).
- [102] McGill, W.L, Ayyub, B.M. (2007). Multicriteria security system performance assessment using fuzzy logic. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 4, 356–376.
- [103] Mečanin, V., Rakanović, R., Đorđević Lj. (1992). *Tehno-ekonomska optimizacija obradnih procesa u teškoj mašinogradnji. 24. savetovanje proizvodnog mašinstva, Novi Sad.*
- [104] Myers, R.,H., Montgomery, D.C. (2002). *Response Surface Methodology: Process and product optimization using Designed Experiments. Second Edition, Wiley- Interscience, New York.*
- [105] Mu Y, Zhao, G., Wu, X. (2013). Optimization approach for processing design in the extrusion process of plastic profile with metal insert. *e-Polymers*, 12(1), 353-366.

- [106] Myer, K. (2011). *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*. Ed.: 1st ed. Amsterdam: William Andrew.
- [107] Muralisrinivasan, N., S. (2011). Update on troubleshooting the PVC extrusion process. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, RapraTechnology Ltd.
- [108] Markarian, J. (2008). PVC extrusion: Extruder developments drive productivity improvements for rigid PVC. In *Plastics, Additives and Compounding*, 10(6), 22-26.
- [109] Mehat, N.M., Shahrul Kamaruddin, Sh. (2011). Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1989-1994.
- [110] Montgomery, D.C. (2003). *Design and analysis of experiments*, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [111] Mihelic, A., Stok B. (1998). Tool design optimization in extrusion processes. *Computers & Structures*, 68, 283-293.
- [112] Murphy, E.T., Tsui, K.L., Vaughn, M.Mc. (2008). Signal-to-Noise Ratios for Robust Design, *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. John Wiley & Sons, New York. DOI: 10.1002/9780470061572.eqr042.
- [113] Narasimha, M., Rejikumar, R. (2013). Plastic pipe defects minimization. *International Journal of Innovative Research & Development*, 2 (5), 1337-1351.
- [114] Nedić, B., Đukić. (2004). *Plastične mase*, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet.
- [115] Nedić, B. (2008). *Projektovanje proizvoda od plastičnih masa*, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet.
- [116] Nian, C.Y., Yang, W.H., Tarng, Y.S. (1999). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 95, 90-96.
- [117] Nembhard, B., H., Aktan, M. (2010). *Real Options in Engineering Design, Operations, and Management*. Boca Raton: CRC Press.
- [118] Nalbant, M., Gokkaya, H., Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & Design*, 28(4), 1379-1385.
- [119] Nian, C.Y., Yang, W.H., Tarng, Y.S. (1999). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 95, pp. 90-96.
- [120] Oke, S., A., Johnson, A. O., Charles-Owaba, O., E., Oyawale, F., A., Popoola, I., A. (2006). A neuro-fuzzy linguistic approach in optimizing the flow rate of a plastic extruder process. *International Journal of Science & Technology*, 1(2), 115-123.
- [121] Owens, B., Coppola, E. A. (2012). *Fuzzy Set Theory (or Fuzzy Logic) to Represent the Messy Data of Complex Human (and other) Systems*. White paper.
- [122] Önüt, S., Kara, S. S., Efendigil, T. (2008). A hybrid fuzzy MCDM approach to machine tool selection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 443-453.
- [123] Ozcelik, B. (2011). Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 38(8), 1067-1072.
- [124] Pareek, R., Bhamniya, J. (2013). Optimization of Injection Moulding Process using Taguchi and ANOVA. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(1).
- [125] Pattnaik, S., Karunakar, D. B., Jha P. K. (2014). Utility-fuzzy-Taguchi based hybrid approach in investment casting process. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 8, 77-89.

- [126] Patil, M. P., Sadaphale, D.B. (2018). A Study of Plastic Extrusion Process and its Defects. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)* 7, IX.
- [127] Pawar, K., Jadhav, S., Dumbre, A., Sunny, A. V., Girish, H. S., Yadav, A. (2017). Experimental Investigation to Optimize the Extrusion Process for PVC Pipe: A Case of Industry. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas In Education*, 3(2).
- [128] Papadakis, V. (2007). Growth through mergers and acquisitions: how it won't be a loser's game. *Business Strategy Series*, 8(1), 43-50.
- [129] Pita, V.J.R.R., Sampaio, E.M., Monteiro, E. E. C. (2002). Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing. *Polymer Testing*, 21(5), 545-551.
- [130] Pandey, A., K., Dubey, A., K. (2013). Multiple quality optimization in laser cutting of difficult-to-laser-cut material using grey-fuzzy methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 421–431.
- [131] Persse, R. J. (2006). *Process Improvement Essentials: Cmmi, Six Sigma, and Iso 9001*, O'reilly, Incorporated.
- [132] Perošević, B. (1995). *Kalupi za injekciono presovanje termoplasta*. Naučna knjiga, Beograd.
- [133] PVC Pipes Market-Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2017-2022, dostupno na: <http://www.reportlinker.com/p04715157-summary/view-report.htm>, Accessed in February, 2022.
- [134] *Plastics Today*, (2011): Plastic pipe demand to rise, but ductile iron and concrete do better. Dostupno na: <https://www.plasticstoday.com/content/plastic-pipe-demand-rise-ductile-iron-and-concrete-do-better/28416980615741>.
- [135] Radhakrishnan, R., Ramasamy, R., Muthukrishnan, N. (2011). Optimization of machining parameters for turning Al-SiC (10P) MMC using Taguchi grey relational analysis. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 18(11).
- [136] Rajabloo, T., Ghafarinazari, A., Seyed Faraji, L., Mozafari, M. (2014). Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics of cobalt disulfide nanostructures. *Journal of Alloys and Compounds*, 607, 61-66.
- [137] Radovanović, M. (2018). *Inženjerske metode. Autorizovana predavanja*. Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet. Dostupno na : <https://pdfcoffee.com/optimizacija-procesa-pdf-free.html>
- [138] Refaie, A. (2017). Optimal Performance of Plastic Extrusion Process Using Fuzzy Goal Programming, *World Academy of Science, Engineering and Technology*. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 11(3).
- [139] Rauwendaal, Ch. (2017). How to Collect and Interpret Process Data in Extrusion. *Plastics Technology*, 63(3), 40-44.
- [140] Reveiz, A., León, C. (2009). Operational risk management using a fuzzy logic inference system. *Borradores de Economía* 574, Banco de la Republica de Colombia.
- [141] Raju, G., M., Sharma, M., Meena, L. (2014). Recent Methods for Optimization of Plastic Extrusion Process: A Literature Review. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4(6), 583-588.
- [142] Roy, R.K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 6 steps to product and process improvemen*. Wiley-Interscience, New York.
- [143] Ross, P. (2005). *Taguchi techniques for quality engineering*. Tata McGraw Hill Publishing Co Ltd.

- [144] Rauwendaal, Ch. (2014). *Polymer Extrusion 5E*. 5th edition, Hanser publishing.
- [145] Sisay, G. Woldearegay, Achamyeleh, A., Kassie, M. Narasimha, R., Rejikumar, R. (2013). Experimental Investigation About Influences of Processing Parameters in Plastic Extrusion Process. *International Journal of Research in Computer Application and Management*, 3(6).
- [146] Sandip, S G., Javed, G., Khan, R., Dalu, S. (2015). Analysis of Process Parameters for Optimization of Plastic Extrusion in Pipe Manufacturing. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(5), 71-74.
- [147] Sharma, G., V., S., S., R., Rao, U., P., Rao S. (2017). A Taguchi approach on optimal process control parameters for HDPE pipe extrusion process. *Journal of Industrial Engineering International*, 13, 215-228.
- [148] Sharma, P., Verma, A., Sidhu, R. K., Pandey, O. P. (2005). Process parameter selection for strontium ferrite sintered magnets using Taguchi L_9 orthogonal design. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 147-151.
- [149] Syrcos, G. P. (2003). Die casting process optimization using Taguchi methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 135, 68-74.
- [150] Sibalija, V., T., Majstorović, D.V. (2009). Multi-response optimisation of thermosonic copper wire-bonding process with correlated responses. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 363–371.
- [151] Sivasamy, K., Arumugam, C., Devadasan, S., Muruges, R., Thilak, V. (2016). Advanced models of quality function deployment: a literature review. *Quality & Quantity*, 50(3), 1399-1414.
- [152] Stanić, J. (1998). *Uvod u teoriju tehno-ekonomske optimizacije*, Mašinski fakultet, Beograd.
- [153] Šljivić, M. (2007). *Tehnologija prerade plastičnih masa*, Mašinski fakultet, Banja Luka.
- [154] Škobalj, D. (2014). *Proizvodnja prozorskih profila sa aspektom zaštite životne sredine*, dostupno na: [https://www.futura.edu.rs / assets/dosc/](https://www.futura.edu.rs/assets/dosc/).
- [155] Sun, G., Fang, J., Tian, X., Li, G., Li, Q. (2015). Discrete robust optimization algorithm based on Taguchi method for structural crashworthiness design. *Expert Systems with Applications* 42, 4482-4492.
- [156] Tarng, Y., S., Yang, W. H., Juang, S. C. (2000). The Use of Fuzzy Logic in the Taguchi Method for the Optimisation of the Submerged Arc Welding Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 688-694.
- [157] Taguchi, G. (1990). *Introduction to quality engineering*. Asian Productivity Organization, Tokyo.
- [158] Taguchi, G. (1993). *Taguchi on robust technology development: bringing quality engineering upstream*, ASME Press, New York.
- [159] Taguchi, G., Jugulum, R. (2002). *The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System*, John Wiley & Sons, Inc.
- [160] Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, Inc.
- [161] Tarcolea, C., Paris, A.S. (2011). Loss Functions Used In The Quality Theory, *U.P.B. Sci. Bull. Series A*, 73, 1.
- [162] Tadić, D., Stanojević, P., Aleksić, M., Mišković, V., Bukvić, V. (2006). *Teorija fazi skupova primene u rešavanju menadžment problema*. Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet.
- [163] Todić, V. (2011). *Tehnološka logistika i preduzetništvo*, FTN Izdavaštvo, Novi Sad.

- [164] Topalušić, M. (2014). Šest sigma i palniranje eksperimenta. Diplomski rad, Fakultet mašinstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.
- [165] Tong, L.-I., Su, C.-T. (1997). Optimizing multi-response problems in Taguchi method by fuzzy multiple attribute decision making. *Quality and Reliability Engineering International*, 13, 25-34.
- [166] Tong, L.I., Su, C. T., Wang, C. H. (2015). The optimization of multi-response problems in the Taguchi method, dostupno na: <http://www.emeraldinsight.com>
- [167] Ulysse, P. (1999). Optimal extrusion die design to achieve flow balance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1047–1064.
- [168] Verma, K M., Dubey, M. (2015). Optimization of Process Parameters of Plastic Extrusion in Pipe Manufacturin. *International Journal of Engineering and Management Research*, 5(6), 276-280.
- [169] Walia, R.S., Shan, H.S., Kumar, P. (2005). Parametric optimization of centrifugal force assisted abrasive flow machining by the Taguchi Method. *Journal of Materials and Manufacturing Processes*, 21(4).
- [170] Wang, Sh.T., Lee, R. Sh., Li, H.Y., Chen, Ch.H. (2006). Optimal die design for three-dimensional porthole extrusion using the Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(6).
- [171] Wu, D.H., M.S. Chang, M.S. (2004). Use of Taguchi methods to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process, *Materials Science and Engineering* 379, 366-371.
- [172] Wu, F. Ch. (2008). Simultaneous optimization of robust design with quantitative and ordinal data. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 15(2), 231-238.
- [173] Wu, Y., A.Wu, A. (2000). Taguchi methods for robust design. ASME, New York.
- [174] Woldearegay, G., S., Kassie, A., Narasimha, M., Rejikumar, R. (2013). Experimental Investigation About Influences Of Processing Parameters In Plastic Extrusion Process. *International Journal of Research In Computer Application and Management*, 3(6).
- [175] Yang, C. L., Chuang, S. P., & Huang, R. H. (2009). Manufacturing evaluation system based on AHP/ANP approach for wafer fabricating industry. *Expert Systems with Applications*, 36, 11369-11377.
- [176] Yang, T., Chen, X., Hu, H., Chu, Y. L., Cheng, P. (2008). A fuzzy PID thermal control system for casting dies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 375-382.
- [177] Yang, W.H., Tarng, Y., S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84, 122-129.
- [178] Yu, J.C., Chen, X.X., TR Hung, TR., Thibault, F., 2004. Optimization of extrusion blow molding processes using soft computing and Taguchi's method. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15, 625–634.
- [179] Yang, Y.S., Huang, W. (2012). A grey-fuzzy Taguchi approach for optimizing multi-objective properties of zirconium-containing diamond-like carbon coating. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 743-750.
- [180] Yamalik, N. (2007). Quality systems in dentistry Part 1. The increasing pressure for quality and implementation of quality assurance and improvement (QA/I) models in health care. *International dental journal*, 57(5), 338-346.

- [181] Yayla, P., Bilgin, Y. (2007). Squeeze-off of polyethylene pressure pipes: Experimental analysis. *Polymer Testing*, 26(1), 132–141.
- [182] Yıldız, A. R. (2008). Hybrid Taguchi-harmony search algorithm for solving engineering optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 15(3), 286-293.
- [183] Zhang, C., Zhao, G., Hao Chen, H., Yanjin Guan, Y., Li, H. (2012). Optimization of an aluminum profile extrusion process based on Taguchi's method with S/N analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60, 589–599.
- [184] Zou, L., Xia, J., Wang, X.Y., Hu, G. (2003). Optimization of die profile for improving die life in the hot extrusion process. *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 659-664.
- [185] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control* 8.3, 338-353.
- [186] Zadeh, L. A. (1994). *Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing*. Communications of the ACM, 37, 77-84.
- [187] Zadeh, L. A. (2002). From computing with numbers to computing with words from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 12(3), 307-324.
- [188] Zimmermann, H.J., (1996). *Fuzzy set theory – and its application*. Kluwer Academic Publisher, Boston/Dordrecht/London.

Internet izvori:

<http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/predmeti/Tehnologije%20oblikovanja%20plastike/Ekstruzija%20sve.pdf>
<https://pestan.net/sr/>
<http://ba.absmanufacturer.com/info/what-is-extrusion-25507176.html>
<https://www.kvalitet.org.rs/infrastruktura/standardi/iso-9001>
<http://www.pveagleinc.com/literature/tb/tb-s3.pdf>
<https://www.pipelife.rs/infrasruktura/otpadne-vode.html>

PRILOZI

Prilog 1

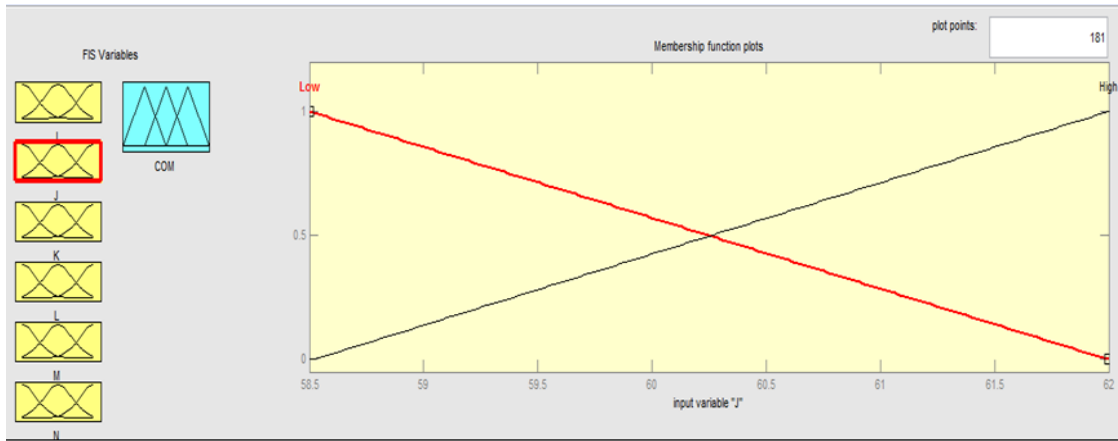
Relevantnost odziva procesa proizvodnje tehnološkim postupkom ekstruzije

Odziv procesa	Relevantnost odziva procesa za proizvod	Relevantnost odziva procesa sa aspekta korisnika	Relevantnost odziva procesa sa aspekta proizvođača
Čvrstoća prstena	Predstavlja čvrstinu, odnosno krutost cevi. Egzistiraju različite klase čvrstoće: SN2, SN 4 i SN8 kN/m ² .	Prilikom izgradnje sistema cevovoda, uvek je potrebno definisati krutost cevi, koja je strukturni element. Poboľšanjem čvrstoće cevi, povećava se stepen rezerve koeficijenta sigurnosti. Koeficijent je faktor koji je potrebno da obezbedi visok stepen elastičnosti prstena cevi i stabilnost da pod opterećenjem dinamičkim i statičkim, u situaciji kada na cevi deluje sila. Delovanjem sile nastupa promena u prečniku cevi, vertikalna deformacija.	Ispunjavaju se definisani zahtevi standarda korisnika. Minimizacija verovatnoće nastanka disfunkcije sistema cevovoda sa aspekta manje nosivosti od potrebne za strukturni element. Zahtev standarda kada je ispunjen, omogućuje sertifikaciju proizvoda.
Fleksibilnost prstena	Pored potrebne krutosti, neophodno je da cev poseduje određen stepen fleksibilnosti i otpornosti na dinamička i statička opterećenja.	Sigurnost da nakon ugradnje i nepredviđenih opterećenja neće nastupiti lom cevi usled sabijanja. Zahtev standarda, strukturni element može da podnese sabijanje-deformaciju preko 30% u odnosu na spoljašnji prečnik cevi.	Ispunjavanje specificiranih i definisanih zahteva kupaca. Minimizacija verovatnoće od nastanka disfunkcije sistema cevovoda usled manje nosivosti od potrebne za strukturni element. Zahtev standarda kada je ispunjen, omogućuje sertifikaciju proizvoda.
Debljina zida	Debljina zida direktno utiče na čvrstoću prstena cevi i dimenzije mufa.	Odgovarajuća debljina zida omogućava i odgovarajuću čvrstoću cevi. Takođe, i adekvatna dimenzija mufa, ukoliko su ispunjeni i ostali zahtevi kroz dimenzije alata za proces sa definisanim procesnim parametrima mufovanja.	Ispunjenost zahteva za definisanom debljinom zida, stvaraju se mogućnosti za ispunjenost drugih zahteva za određenim i potrebnim mehaničko-fizičkim svojstvima proizvoda. Zahtev standarda kada je ispunjen, omogućuje sertifikaciju proizvoda.

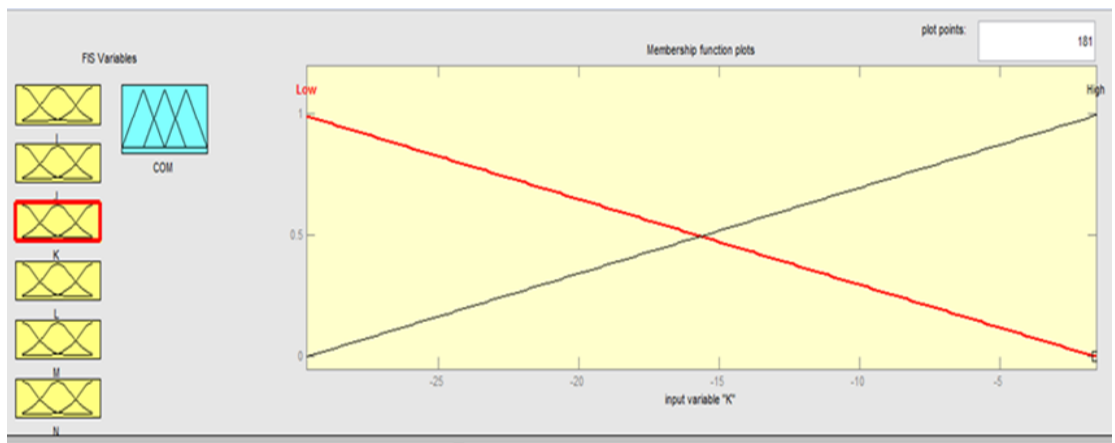
<p>Uzdužno skupljanje</p>	<p>Karakteristika cevi kojim se uzdužno skupljanje definiše nakon procesa zagrevanja cevi -150°C od 60 (30) minuta što zavisi od debljine zida. Postupak merenje se vrši na hladnoj cevi od 23°C. Neophodn uslov je da na ispitivanom uzorku cevi, longitudinalna reverzija do 5% bez pojave mehurića i pukotina.</p>	<p>Visok procenat uzdužnog skupljanja implicira proces izvlačenja cevi iz mufa i pri tome do lošeg spoja što može dovesti do odliva fluida iz cevi.</p>	<p>Zahtev standarda kada je ispunjen, omogućuje sertifikaciju proizvoda.</p>
<p>Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg glatkog sloja od UPVC-a</p>	<p>Direktni uticaj na sve ostale mehaničko-fizičke karakteristike cevi.</p>	<p>Preko ispunjenosti zahteva, ispunjavaju se svi potrebni uslovi i mogućnosti za ispunjenost drugih zahteva za odgovarajućim fizičko-mehaničkim svojstvima kao i definisanim kvalitetom cevi.</p>	<p>Ispunjenost zahteva za definisanom debljinom zida, stvaraju se mogućnosti za ispunjenost drugih zahteva za određenim i potrebnim mehaničko-fizičkim svojstvima proizvoda. Zahtev standarda kada je ispunjen, omogućuje sertifikaciju proizvoda.</p>

Prilog 2

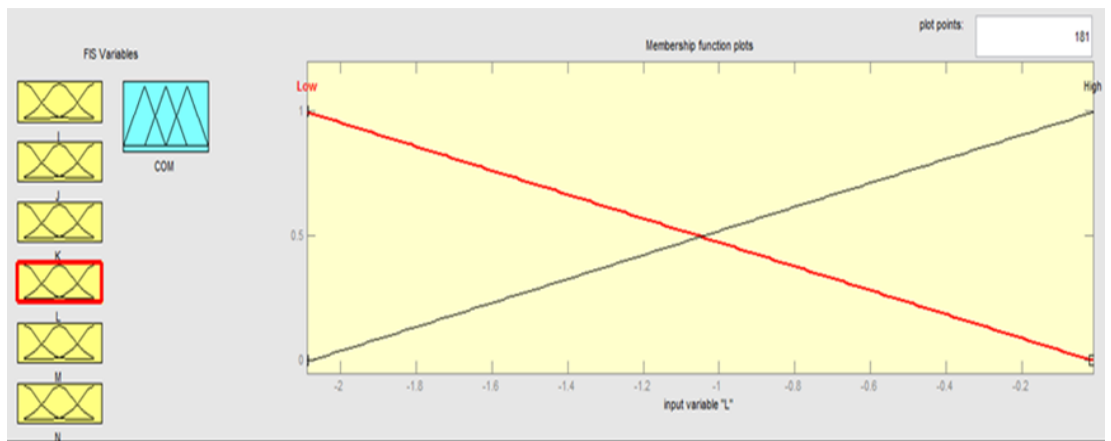
Prikaz funkcija pripadnosti odziva procesa i COM



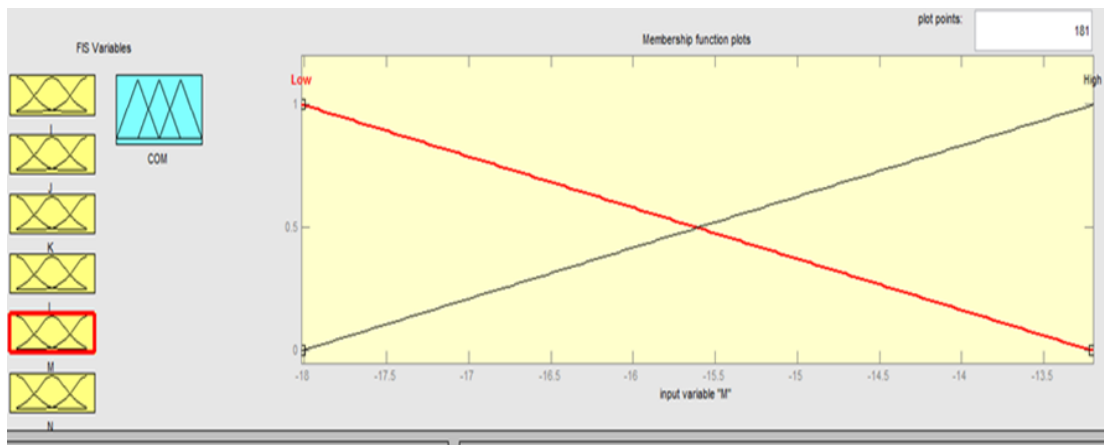
Fleksibilnost prstena



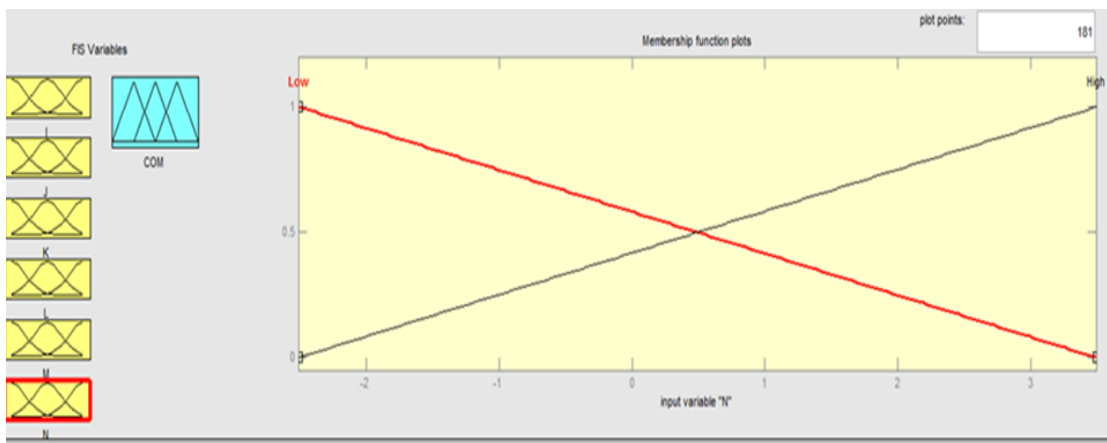
TIR test



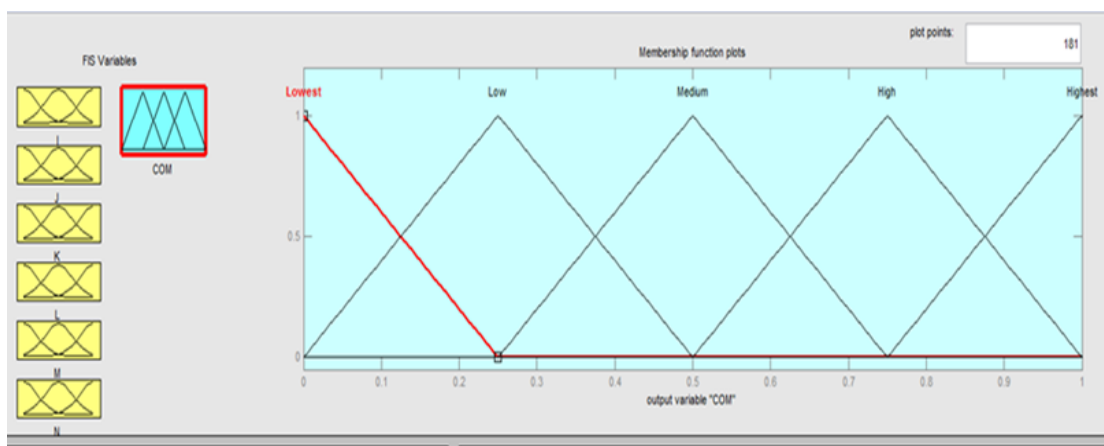
Debljina zida



Uzdužno skupljanje



Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja



COM

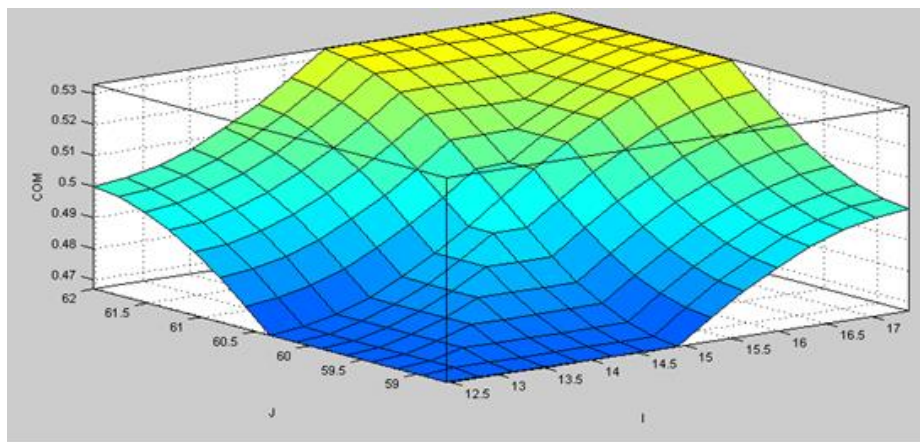
Prikaz tabele fazi pravila za šest ulaznih vrednosti

S/N odnos						COM
Čvrstoća prstena	Fleksibilnost prstena	TIR test	Debljina zida	Uzdužno skupljanje	Debljina spoljašnjeg i unutrašnjeg sloja	
Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Najniži
					Visok	Nizak
				Visok	Nizak	Nizak
					Visok	Nizak
			Visok	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Nizak
				Visok	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
		Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Nizak
				Visok	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
			Visok	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
				Visok	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
	Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Nizak
				Visok	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
			Visok	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
				Visok	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
		Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
				Visok	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Nizak
				Visok	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
			Visok	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
				Visok	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
		Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji

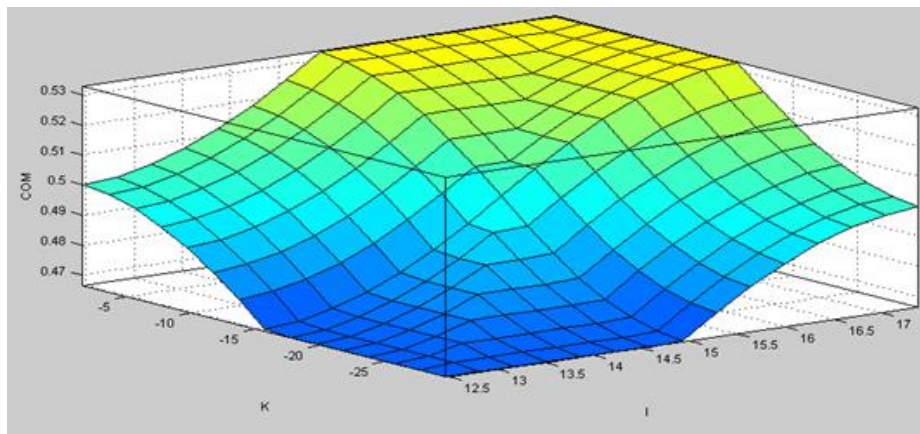
				Visok	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
			Visok	Nizak	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
				Visok	Nizak	Visok
					Visok	Visok
	Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak	Nizak
					Visok	Srednji
				Visok	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
			Visok	Nizak	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
				Visok	Nizak	Visok
					Visok	Visok
		Visok	Nizak	Nizak	Nizak	Srednji
					Visok	Visok
				Visok	Nizak	Visok
					Visok	Visok
			Visok	Nizak	Nizak	Visok
					Visok	Visok
				Visok	Nizak	Visok
					Visok	Najviši

Prilog 4

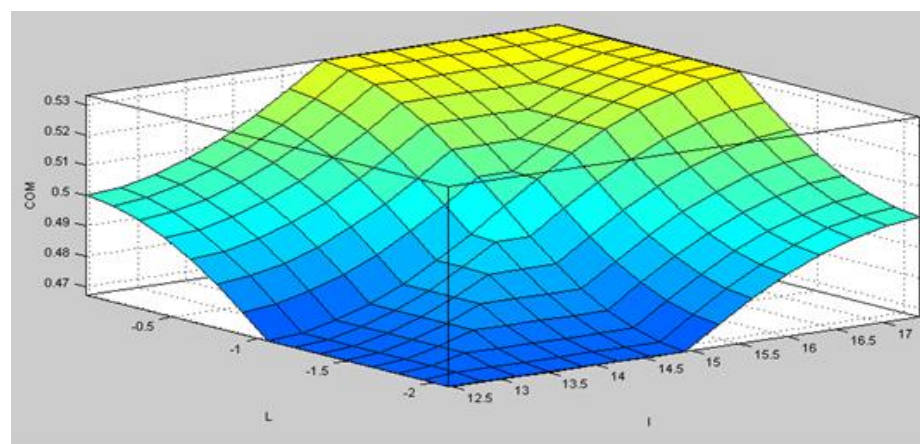
Površinski grafikoni funkcija i sveobuhvatne izlazne mere (COM) za kombinacije ulaznih parametara



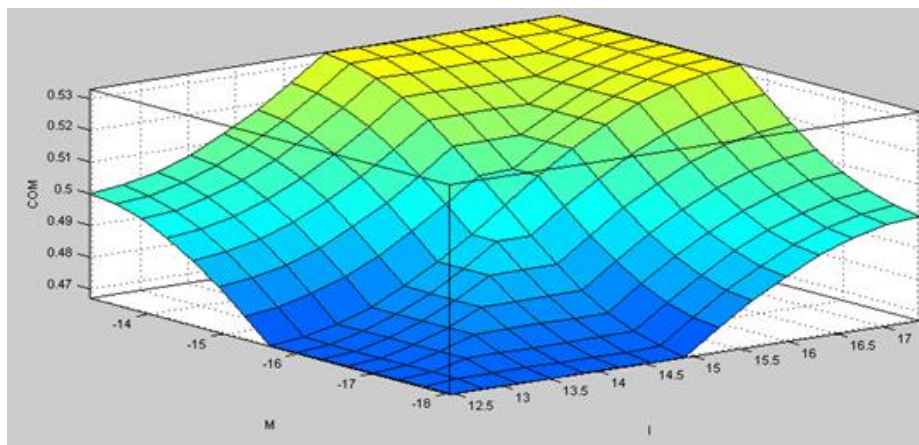
Površinski grafikon za ulazne parametre I i J



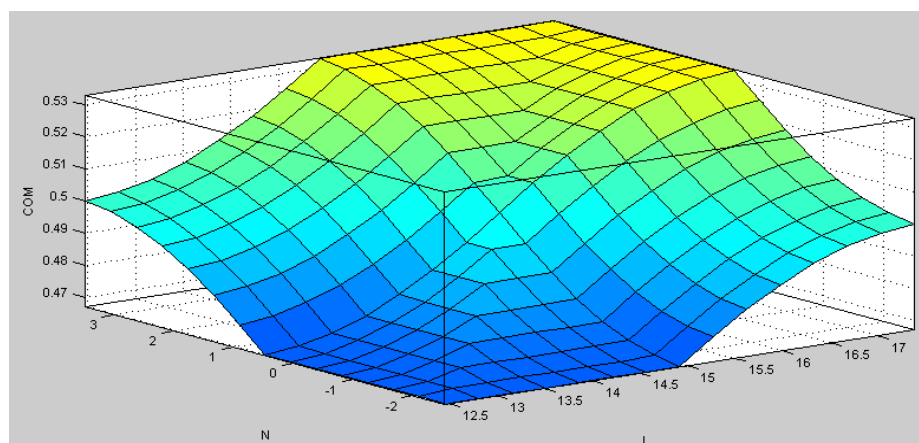
Površinski grafikon za ulazne parametre I i K



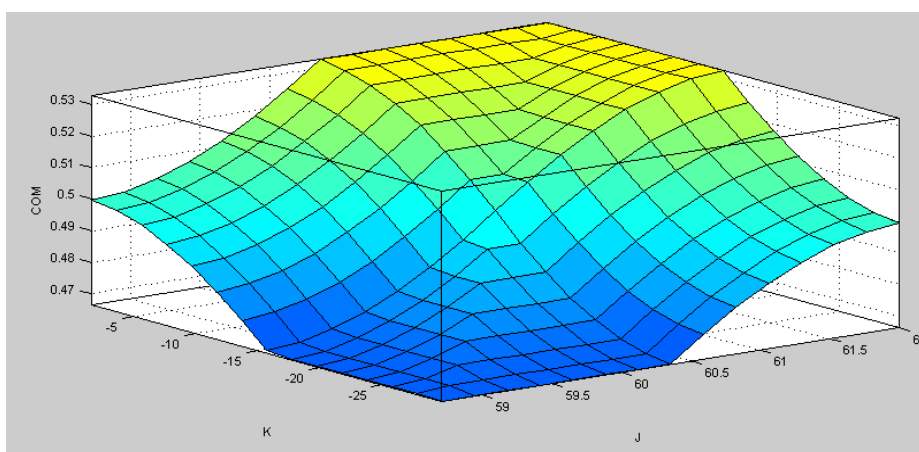
Površinski grafikon za ulazne parametre I i L



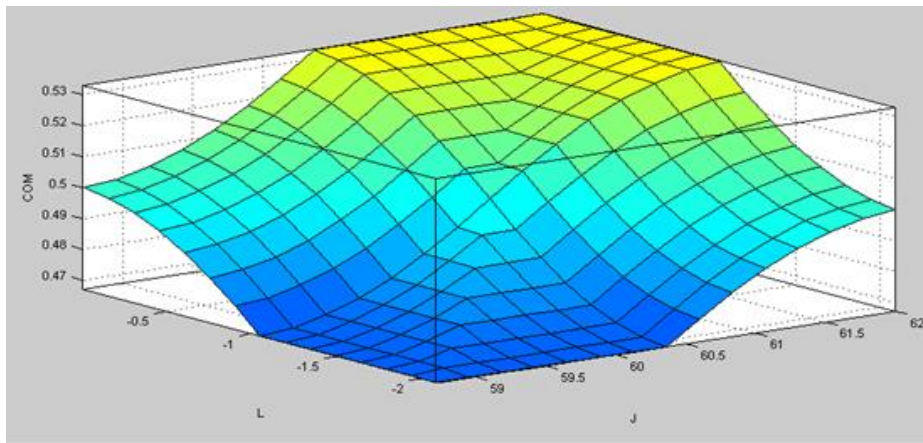
Površinski grafikon za ulazne parametre I i M



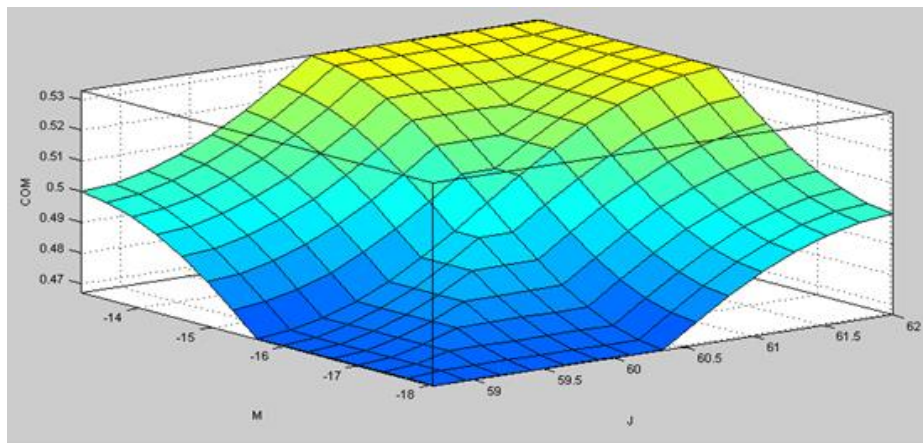
Površinski grafikon za ulazne parametre I i N



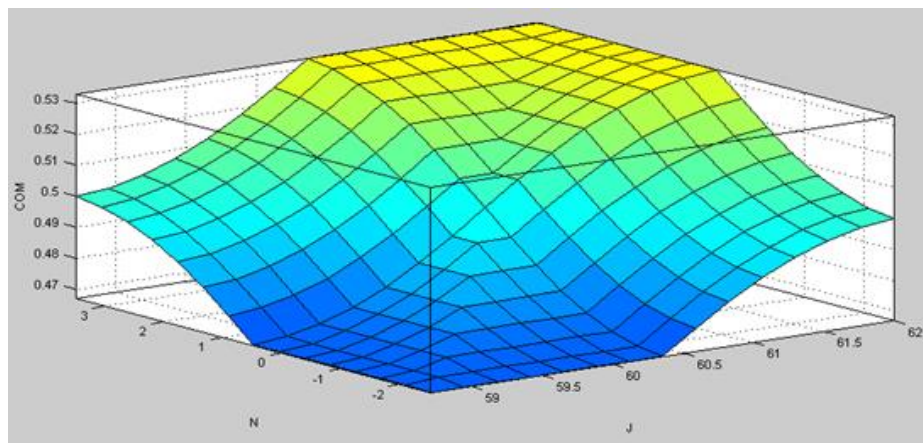
Površinski grafikon za ulazne parametre J i K



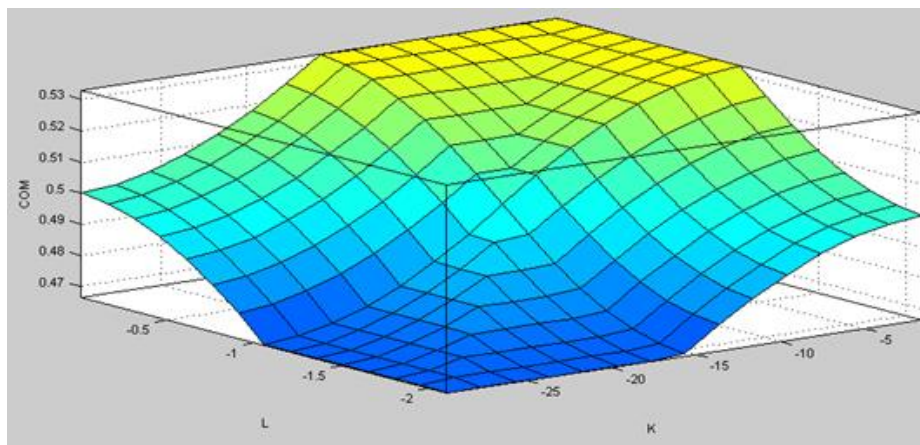
Površinski grafikon za ulazne parametre J i L



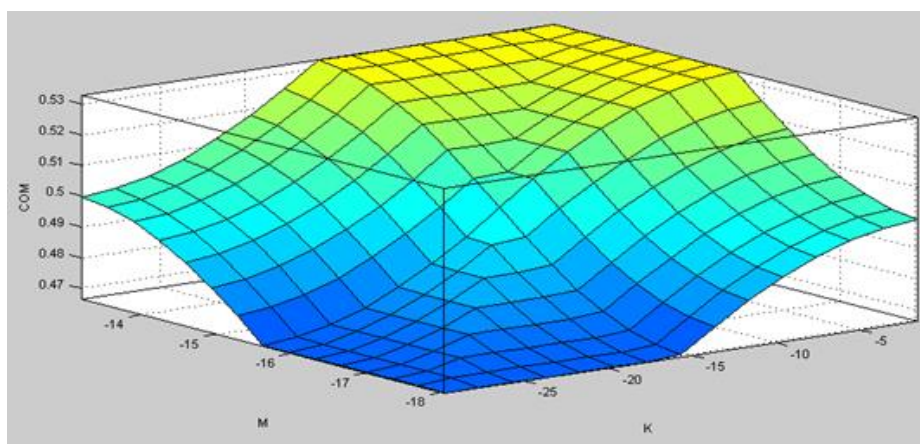
Površinski grafikon za ulazne parametre J i M



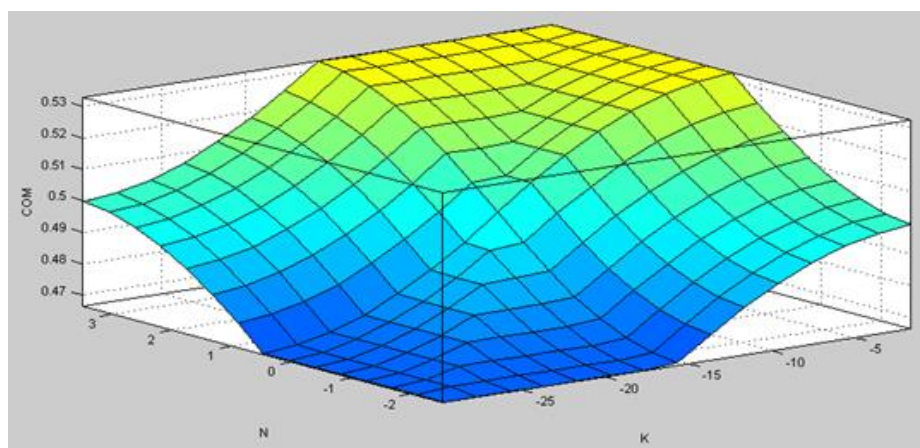
Površinski grafikon za ulazne parametre J i N



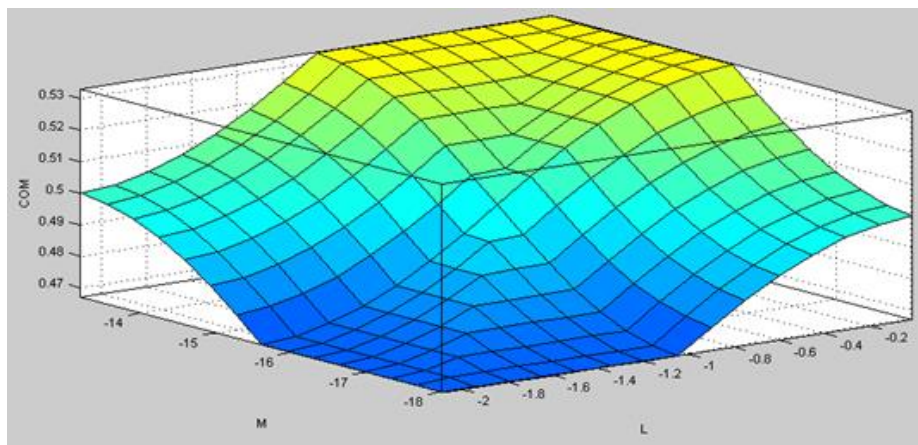
Površinski grafikon za ulazne parametre K i L



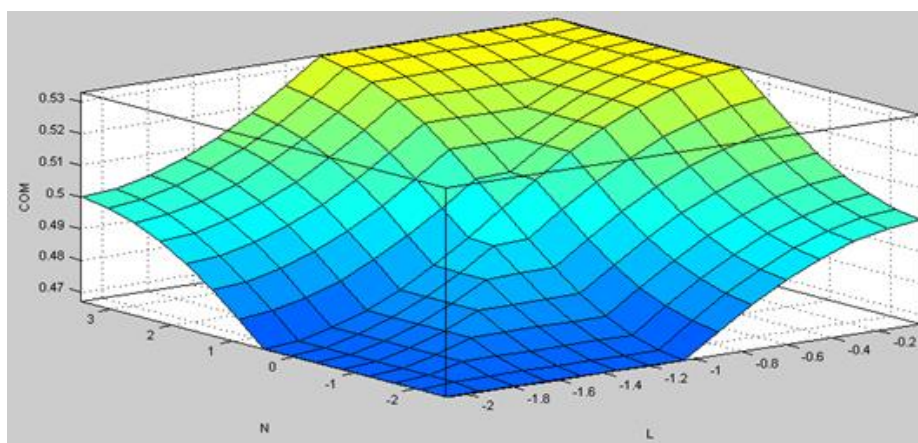
Površinski grafikon za ulazne parametre K i M



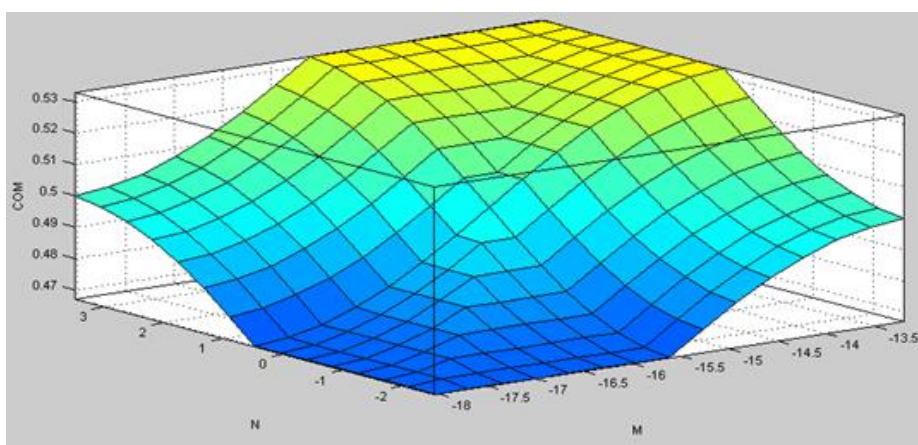
Površinski grafikon za ulazne parametre K i N



Površinski grafikon za ulazne parametre L i M



Površinski grafikon za ulazne parametre L i N



Površinski grafikon za ulazne parametre M i N

PUBLIKACIJE KOJE SU PROIZAŠLE KAO REZULTAT ISTRAŽIVANJA PRIKAZANIH U DISERTACIJI

Radovi u časopisima:

Radovi publikovani u međunarodnim časopisima sa SCI liste (M23)

1. **Krstić, A.**, Nikolić, Đ., Papić, M. (2021). A hybrid multi-output approach to optimisation of PVC pipe quality characteristics. *International Journal of Numerical Methods for Calculation and Design in Engineering (RIMNI)*, Scipedia S.L, 37(3), 32, 2021, DOI: 10.23967/j.rimni.2021.09.001. SCIE IF 2020 = 0.513, SJR 2020 = 0.21.

Radovi publikovani u međunarodnim časopisima izvan SCI liste (nekategorisani međunarodni časopisi)

1. **Krstić, A.**, Nikolić, Đ. (2018). A Taguchi Approach on Optimal Process Control Parameters for PVC Pipe Extrusion Process. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 6(4) (2018) 335-339 ISSN 2347-3258, ISIIF 2018 = 1.437.

Saopštenja sa međunarodnih skupova štampana u celini (M33)

1. **Krstić, A.**, Urošević S., Nikolić, Đ., Optimization of process parameters in production of PVC products to improve quality by the technological extrusion process using Taguchi method, *International May Conference on Strategic Management – IMCSM 22 May 28 - 30, 2022, Bor, Serbia*, An international serial publication for theory and practice of Management Science, Vol. XVIII (1) (2022) pp.75-85, ISSN 2620-0597.

BIOGRAFIJA

Aleksandar Krstić rođen je 30.01.1975. godine u Skoplju, u Makedoniji. Osnovnu i srednju školu-Gimnaziju prirodno-matematičkog smera sa odličnim uspehom završava u Uroševcu. Fakultet Tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu, završava 2007. godine na smeru Industrijski menadžment sa prosečnom ocenom 8.19/10 i ocenom 10/10 na diplomskom radu i time stiče zvanje diplomirani inženjer za industrijski menadžment.

Nakon završetka osnovnih studija, školske 2008/09 upisuje specijalističke studije u trajanju od godinu dana na istom fakultetu, na smeru Inženjerski menadžment. Specijalistički rad pod nazivom „Mogućnosti primene programskih rešenja za poslovno odlučivanje“ odbranio je 20.10.2010. godine sa ocenom 10/10 i prosečnom ocenom tokom studija 9.20/10 i time stiče zvanje specijaliste tehničkih nauka.

Školske 2011/12. godine upisuje doktorske akademske studije na Tehničkom fakultetu u Boru, Univerziteta u Beogradu, na studijskom programu Inženjerski menadžment, gde je tokom studija položio sve ispite sa prosečnom ocenom 9.78/10.

Od 2000-2007.godine, radio je u OŠ „Svetolik Ranković“ u Aranđelovcu kao nastavnik tehničke i informatičke grupe predmeta. Od 2007-2010. godine, radi na Tehničkom fakultetu u Čačku kao saradnik u nastavi a zatim i kao asistent na grupi predmeta u užoj naučnoj oblasti menadžment i operaciona istraživanja.

Sve vreme je bio angažovan na izvođenju vežbi iz sledećih nastavnih predmeta: operaciona istraživanja, teorija odlučivanja, strategijski menadžment, menadžment proizvodnjom, upravljanje istraživanjem i razvojem. Od 2010. godine, radi u OŠ „Svetolik Ranković“ u Aranđelovcu kao nastavnik informatičke grupe predmeta.

U dosadašnjem radu objavio je 10 naučnih radova, od kojih je 1 štampan u međunarodnim časopisima sa SCI (Science Citation Index) liste, a ostali u vrhunskim časopisima od nacionalnog značaja, časopisima od međunarodnog značaja i referisani na međunarodnim i domaćim simpozijumima i konferencijama i publikovani u odgovarajućim zbornicima.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Aleksandar Krstić

Broj indeksa 1/2021

Izjavljujem

Da je doktorska disertacija pod naslovom:

Razvoj i implementacija hibridnog višedozivnog modela u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije

- rezultat sopstvenog istrativačkog rada;
- da predložena disertacija ni u celini, niti u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni;
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

**Izjava o istovetnosti štampane i elektronske
verzije doktorskog rada**

Ime i prezime autora Aleksandar Krstić

Broj indeksa 1/2021

Studijski program Inženjerski menadžment

Naslov rada: Razvoj i implementacija hibridnog višeodzivnog modela u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije

Mentor dr Đorđe Nikolić, redovni profesor

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci u pogledu dobijanja akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković” da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Razvoj i implementacija hibridnog višeodzivnog modela u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju, sa svim priložima, predao sam u elektronskom formatu, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu, mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu licencu od šest ponuđenih licenci. Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.