

Analiza mogućnosti unaprjeđenja proizvodnog procesa u pogonu za proizvodnju transformatora

Čanić, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:259510>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Čanić

Zagreb, 2024

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Hrvoje Cajner, dipl. ing.

Student:

Ante Čanić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Hrvoju Cajneru na savjetima, pomoći i strpljenju prilikom pisanja rada.

Zahvaljujem se poduzeću Končar D&ST na pruženim informacijama, podacima, pomoći i znanju koje sam stekao. Posebne zahvale zaposlenicima Mariju Čoviću, Danielu Lamplu, Adriani Grdić, Dariu Trbušiću i odjelu održavanja.

Posebne zahvale upućujem svojoj obitelji bratu Tomislavu, majci Anici i ocu Deanu na pruženoj podršci i strpljenju tijekom dosadašnjeg studija. Zahvaljujem i ostalim članovima obitelji, prijateljima i kolegama koji su pomogli da ovaj studij prođe što bezbolnije.

Ante Čanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1 | |
| Ur.broj: 15 – 24 – | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Čanić** JMBAG: **0035226991**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mogućnosti unaprjeđenja proizvodnog procesa u pogonu za proizvodnju transformatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Assessment of potential enhancements for the production process at the transformer manufacturing plant**

Opis zadatka:

Metode optimizacije temeljene na konceptima vitke proizvodnje i šest sigma nude efikasnu strategiju za unaprjeđenje kvalitete proizvoda i usluga. Implementacija ovih koncepata rezultira konkurentnijim poslovanjem kroz smanjenje troškova uzrokovanih niskom kvalitetom ili nedostatnom produktivnošću. Postignuti rezultati mogu se pratiti putem različitih ključnih pokazatelja, poput smanjenja neusklađenosti, povećanja produktivnosti, poboljšanja efikasnosti opreme te smanjenja vodećeg vremena. Fokus ovog rada će biti na prikupljanju relevantnih podataka kroz snimanje aktivnosti i tokova materijala, analizi primjenom odgovarajućih statističkih metoda te prijedlogu poboljšanja dijela proizvodnog procesa proizvodnje transformatora.

U okviru ovog rada, potrebno je:

1. Objasniti mogućnost unaprjeđenja odabranog procesa primjenom koncepata šest sigma i vitke metodologije.
2. Snimiti postojeće stanje odabranog dijela proizvodnoga procesa.
3. Analizirati rezultate te elaborirati mogućnosti unaprjeđenja.
4. Interpretirati rezultate dobivene analizom te dati prijedlog konkretnih aktivnosti unaprjeđenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

24. 4. 2024.

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ..... | i |
| POPIS SLIKA..... | iii |
| POPIS TABLICA..... | iv |
| POPIS OZNAKA..... | v |
| SAŽETAK..... | vi |
| SUMMARY..... | vii |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. LEAN METODOLOGIJA..... | 2 |
| 2.1. Kratka povijest Lean metodologije..... | 2 |
| 2.2. Načela Lean metodologije..... | 3 |
| 2.2.1. Identificiranje vrijednosti..... | 3 |
| 2.2.2. Mapiranje toka vrijednosti(Value stream mapping) | 4 |
| 2.2.3. Protočnost..... | 4 |
| 2.2.4. Povlačenje..... | 5 |
| 2.2.5. Konstantna poboljšanja i težnja k izvrsnosti..... | 6 |
| 2.3. Tipovi gubitaka po Leanu..... | 6 |
| 2.3.1. Prekomjerna proizvodnja..... | 6 |
| 2.3.2. Transport..... | 6 |
| 2.3.3. Čekanje..... | 7 |
| 2.3.4. Prekomjerna obrada | 7 |
| 2.3.5. Zalihe..... | 7 |
| 2.3.6. Nepotrebni pokreti..... | 7 |
| 2.3.7. Škart..... | 7 |
| 2.4. Lean alati..... | 8 |
| 2.4.1 5S | 9 |
| 2.4.2. Gemba..... | 10 |
| 2.4.3. SMED..... | 10 |
| 2.4.4. PDCA..... | 11 |
| 2.5. Lean Six Sigma..... | 13 |
| 2.5.1. Six sigma metodologija..... | 13 |
| 2.5.2. Lean Six Sigma metodologija..... | 14 |

| | |
|--|----|
| 2.5.3. Podjela uloga prema Lean Six Sigma metodologiji..... | 14 |
| 2.5.4. DMAIC | 17 |
| 3. SHEMA PROCESA PROIZVODNJE U REZNOME CENTRU..... | 19 |
| 3.1. O poduzeću..... | 19 |
| 3.2. Transformatori..... | 19 |
| 3.2.1. Jezgra transformatora..... | 21 |
| 3.3. Tehnološki proces izrade jezgara transformatora u reznome centru..... | 22 |
| 3.3.1. Prikaz toka materijala..... | 25 |
| 3.3.2. Vrsta otpada trafo lima u reznome centru..... | 26 |
| 4. KVANTIFIKACIJA I ANALIZA UTROŠENOG MATERIJALA U PROCESU POPREČNOG REZANJA..... | 27 |
| 4.1. Analiza po stroju..... | 27 |
| 4.1.1. Odabir raspodjele..... | 27 |
| 4.1.2. Log-normalna raspodjela po stroju..... | 31 |
| 4.1.3. Analiza rezultata i varijance sa jednim promjenjivim faktorom..... | 34 |
| 4.1.4. Vizualna reprezentacija rasipanja vrijednosti strojeva sa njihovim graničnim vrijednostima. | 36 |
| 4.2. Analiza po proizvođaču..... | 39 |
| 4.2.1. Odabir raspodjele po proizvođaču..... | 39 |
| 4.2.2. Analiza rezultata i varijance sa jednim promjenjivim faktorom po proizvođaču.. | 41 |
| 4.3. Analiza po širini trake lima..... | 43 |
| 4.3.1. Raspodjela po širini trake..... | 44 |
| 4.3.2. Analiza podataka i varijance sa jednim promjenjivim faktorom po širini trafo lima..... | 46 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 47 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Principi Leana..... | 3 |
| Slika 2. Mapa toka vrijednosti..... | 4 |
| Slika 3. Kanban ploča..... | 5 |
| Slika 4. 5S..... | 9 |
| Slika 5. PDCA..... | 13 |
| Slika 6. Površine ispod normalne krivulje..... | 14 |
| Slika 7. DMAIC..... | 18 |
| Slika 8. Logotip KONČAR D&ST..... | 19 |
| Slika 9. Uljni distributivni transformator..... | 20 |
| Slika 10. Tipovi jezgri transformatora..... | 22 |
| Slika 11. Sektori proizvodnje..... | 22 |
| Slika 12. Bala lima na liniji za uzdužno rezanje..... | 23 |
| Slika 13. Prikaz lijepljene jezgre transformatora..... | 24 |
| Slika 14. Tok materijala..... | 25 |
| Slika 15. Histogram podataka odstupanja od očekivane količine lima na stroju 1..... | 28 |
| Slika 16. Normalna distribucija stroja 1..... | 29 |
| Slika 17. Normalna distribucija logaritmiranih vrijednosti za sva 4 stroja..... | 29 |
| Slika 18. Odnos normalne i lognormalne distribucije..... | 31 |
| Slika 19. Utjecaj parametra sigma na oblik krivulje..... | 33 |
| Slika 20. Raspodjela skupova podataka po strojevima..... | 34 |
| Slika 21. Grafički prikaz udjela dodatnog tafo lima koji prelazi 5% na stroju 1..... | 37 |
| Slika 22. Grafički prikaz udjela dodatnog tafo lima koji prelazi 5% na stroju 2..... | 37 |
| Slika 23. Grafički prikaz udjela dodatnog tafo lima koji prelazi 5% na stroju 3..... | 38 |
| Slika 24. Grafički prikaz udjela dodatnog tafo lima koji prelazi 5% na stroju 4..... | 38 |
| Slika 25. Prikaz sučelja podataka za širinu trake lima 155mm..... | 40 |
| Slika 26. Box plot dijagram prosječnog odstupanja dodatne količine trafo lima po proizvođaču..... | 42 |
| Slika 27. Legenda Box plot dijagrama..... | 43 |
| Slika 28. Pozicija jezgre transformatora..... | 44 |
| Slika 29. Poprečni presjek pozicije jezgre transformatora..... | 44 |
| Slika 30. Prikaz odstupanja po širini trake..... | 46 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Odstupanje od očekivane količine lima x..... | 28 |
| Tablica 2. Logaritmiranje odstupanja (varijable x)..... | 29 |
| Tablica 3. Parametri strojeva | 29 |
| Tablica 4 . Izrazi za izračun medijana, moda i očekivane vrijednosti u log-normalnom području..... | 33 |
| Tablica 5. Vrijednosti statističkih parametara na uzorcima po strojevima | 34 |
| Tablica 6. Tablica ANOVA-e po faktoru strojeva | 35 |
| Tablica 7 Fishero LSD test između strojeva..... | 36 |
| Tablica 8. Prikaz proizvođača u radnome nalogu | 40 |
| Tablica 9. Statistički parametri uzoraka po proizvođaču | 41 |
| Tablica 10. Očekivane teoretske vrijednosti po proizvođaču..... | 41 |
| Tablica 11. Tablica ANOVA-e po faktoru proizvođaču | 42 |
| Tablica 12 Popis tipova traka i dimenzija | 45 |
| Tablica 13. Skupovi podataka za različite širine traka | 45 |
| Tablica 14. Očekivane vrijednosti po širini trake..... | 46 |
| Tablica 15. Tablica ANOVA-e po faktoru širine trafo lima | 46 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Opis |
|---------------|---|
| σ | Standardna devijacija u normalnoj raspodjeli a u lognormalnoj parametar razmjera distribucije |
| kVA | Mjerna jedinica za prividnu snagu u električnom krugu |
| MVA | Mjerna jedinica za prividnu snagu u električnom krugu |
| E[X] | Prosjek ponderiran vjerojatnošću svih mogućih vrijednosti |
| e | Matematička konstanta e, još nazvan i Eulerov broj. $e \approx 2.71828$ |
| μ | U lognormalnoj distribuciji predstavlja parametar lokacije a u normalnoj srednju vrijednost |
| Med[X] | Predstavlja vrijednost koja se nalazi na pola podataka lognormalne distribucije |
| Mode[X] | Predstavlja globalni maksimum distribucije |
| ANOVA | Analiza varijance skup je statističkih modela |
| LSD | Least significant difference - postupak testiranja u dva koraka za uparene usporedbe nekoliko skupina |

SAŽETAK

Ovaj završni rad istražuje primjenu Lean upravljanja i Six Sigma metodologije u proizvodnim procesima u reznom centru KONČAR D&ST. Cilj je kvantitativno analizirati proizvodnju kako bi se identificirale neučinkovitosti i poboljšala efikasnost i kvaliteta proizvoda. Korištenjem PDCA kruga i DMAIC metodologije, rad pokazuje kako ove metode mogu smanjiti otpad i povećati preciznost proizvodnje. Analiza podataka identificirala je ključna područja za poboljšanje, dok primjena novih tehnologija i automatizacije dodatno optimizira procese. Na temelju rezultata, predložene su preporuke za daljnja poboljšanja, čime se osigurava dugoročna održivost i konkurentnost poduzeća. Ovaj rad služi kao temelj za buduću analizu i smjer optimizacije.

Ključne riječi: Lean, Six Sigma, Lean Six Sigma, PDCA krug, DMAIC metodologija, Fishbone dijagram, KONČAR D&ST, ANOVA.

SUMMARY

This final paper investigates the application of Lean management and Six Sigma methodology in production processes in the cutting center KONČAR D&ST. The goal is to quantitatively analyze the production in order to identify inefficiencies and improve the efficiency and quality of the product. Using the PDCA circuit and DMAIC methodology, the paper shows how these methods can reduce waste and increase production precision. Data analysis has identified key areas for improvement, while the application of new technologies and automation further optimize processes. Based on the results, recommendations for further improvements are proposed, thus ensuring the long-term sustainability and competitiveness of the company. This work serves as a foundation for future analyzes and optimizations.

Keywords: Lean, Six Sigma, Lean Six Sigma, PDCA circle, DMAIC methodology, Fishbone diagram, KONČAR D&ST, ANOVA.

1. UVOD

U današnjem dinamičnom poslovnom okruženju, proizvodne kompanije suočavaju se s izazovima povećanja produktivnosti, smanjenja otpada i postizanja konkurentske prednosti. S obzirom na sve veću potražnju za visokokvalitetnim proizvodima i uslugama, tvrtke su prisiljene neprestano unapređivati svoje proizvodne procese kako bi zadovoljile očekivanja kupaca i tržišta. Upravo su Lean metodologija i Six Sigma postali ključni alati za optimizaciju poslovanja, smanjenje varijacija u procesima i eliminaciju gubitaka.

Lean se temelji na maksimiziranju vrijednosti za kupce uz istovremenu eliminaciju nepotrebnih aktivnosti i otpada. Cilj je stvoriti učinkovit sustav proizvodnje koji omogućuje brzo i fleksibilno prilagođavanje promjenama na tržištu, dok Six Sigma koristi statističke metode za kontrolu i poboljšanje kvalitete procesa. Ova dva pristupa, iako različita u fokusima, zajedno čine snažan okvir za postizanje operativne izvrsnosti.

KONČAR D&ST, kao lider u proizvodnji transformatora u regiji, suočen je s potrebom neprekidnog unapređenja svojih proizvodnih procesa kako bi zadržao konkurentnost na globalnom tržištu. Implementacija Lean i Six Sigma metodologija omogućava ovom poduzeću da smanji škart, poveća efikasnost proizvodnje te optimizira korištenje resursa.

Cilj ovog rada je analizirati proizvodne procese u reznom centru KONČAR D&ST, identificirati područja s najvećim potencijalom za poboljšanje te ponuditi preporuke za optimizaciju uz primjenu Lean Six Sigma alata. Kao što je rekao W. Edwards Deming, pionir u području upravljanja kvalitetom: "Bez podataka ti si još samo jedna osoba s mišljenjem". Upravo ovaj princip vodi ovaj rad prema sustavnom pristupu poboljšanju proizvodnje.

2. LEAN METODOLOGIJA

Kao filozofski pristup, Lean metodologija ima široku primjenjivost na procese unutar poduzeća bilo koje veličine zbog svoje sposobnosti da pomogne organizacijama da postignu poslovne ciljeve na zdraviji, pametniji i održiviji način. Lean management omogućuje organizacijama da optimiziraju cijeli tok vrijednosti – od skraćivanja vremena ciklusa vizije do vrijednosti, do poboljšanja brzine i povećanja ukupne kvalitete kroz proizvodni proces, do poboljšanja aspekata koji utječu na isporuku – sve u nastojanju da se u konačnici doda vrijednost kupcima.

2.1. Kratka povijest Lean metodologije

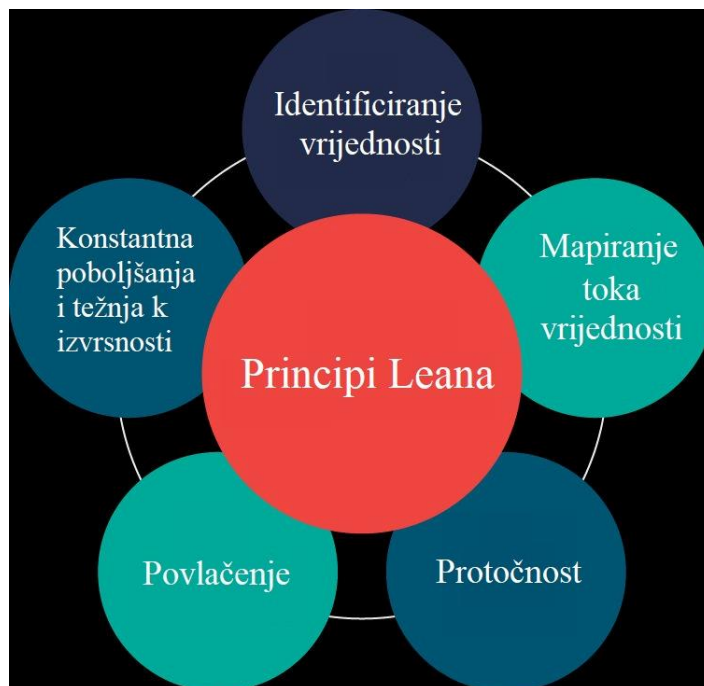
1980-ih i 90-ih zapadni proizvođači borili su se da održe korak s učinkovitijim japanskim tvrtkama, pa su imali dvije mogućnosti: smanjiti ili zatvoriti. Počeli su usvajati praksu japanskih tvrtki kako bi poboljšali svoju brzinu, produktivnost i isplativost kako bi ostali konkurentni.

Tijekom tog vremena Lean se svodio na pretjerano jednostavne ideje, koje su se općenito koristile da opravdaju nemilosrdno rezanje troškova. Danas proizvodna industrija zapošljava puno manje ljudi nego nekada. Također ima manje igrača u ovom prostoru; mršavije su, ali veće.

U godinama koje su uslijedile rodile su se mnoge varijante Lean metodologije, uključujući Total Quality Management, Just-in-Time, Six Sigma i Theory of Constraints. Svaki od ovih pokreta uključivao je različite prakse iz onoga što su Japanci radili, a koje su ih razlikovale od konkurencije, iako sa sigurnošću možemo reći da je ono čemu su težili sada poznato kao Lean. Mnogi od ovih popularnih “Lean” okvira upravljanja bili su po prirodi vrlo preskriptivni i zahtijevali su značajnu obuku da bi se u potpunosti usvojili.[1]

2.2. Načela Lean metodologije

Bitno je razmotriti utjecaj koji će vaš rad imati na iskustvo korisnika. Leanovih pet temeljnih načela pomaže timovima organizirati zadatke i voditeljima projekata omogućuje nadzor. Ovih pet temeljnih načela uključuju:



Slika 1. Principi Leana

2.2.1. Identificiranje vrijednosti

Da biste isporučili vrijednost svojim klijentima, prvo morate razumjeti njihove potrebe. To možete učiniti na sljedeći način: Izravan kontakt s klijentima kako bi se saznalo o njihovim bolnim točkama. Prepoznavanje načina na koji vaš proizvod pomaže ublažiti te bolne točke. Zatim morate definirati vrijednost vašeg proizvoda u zadovoljavanju potreba kupaca i to komunicirati sa svojim timom. To možete učiniti tako da timski rad osmislite oko toga kako to utječe na korisničko iskustvo i istražite najbolje alate koji će vašem timu pomoći da isporuči vrijednost vašim klijentima. Prepoznavanje vrijednosti štedi vrijeme i novac osiguravajući da vaš tim gradi samo značajke koje dodaju vrijednost za vaše klijente.

2.2.2. Mapirajte tok vrijednosti(Value stream mapping)

Aktivnosti potrebne za pružanje kvalitetnih korisničkih iskustava djelomično dolaze iz toka vrijednosti. Mapiranje toka vrijednosti koristi dijagrame za vizualizaciju procesa projekta, pomažući u upravljanju tokom vrijednosti, što je ključno za eliminaciju rasipanja.

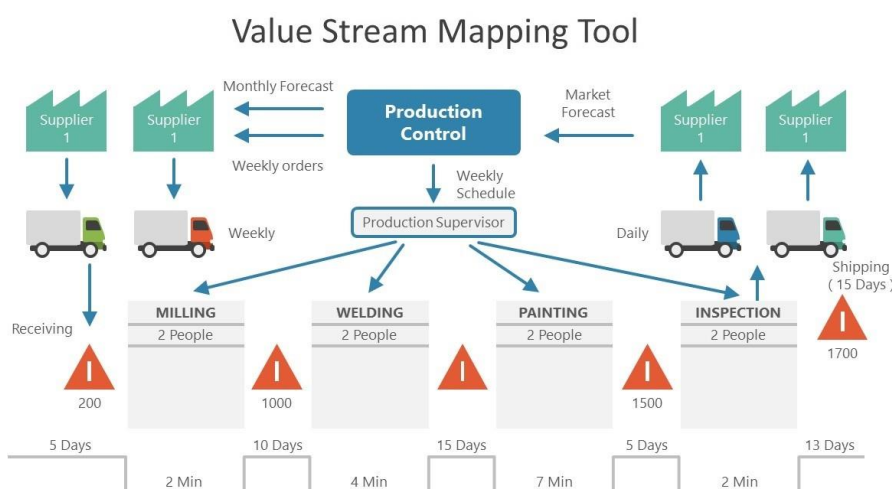
Mapiranje toka vrijednosti uključuje sljedeće aktivnosti:

-Prepoznajte problem i odaberite pravi tim: Prepoznajte glavne bolne točke svojih kupaca, a zatim odaberite tim s vještinama za rješavanje tih problema.

-Vezati i mapirati proces: Ograničite opseg projekta na potrebne aktivnosti. Zatim možete mapirati proces pomoću predloška Scrum ploče u Jiri i postaviti datume za svaki rezultat.

-Prikupite podatke: Shvatite koji su resursi potrebni praćenjem podataka kao što su sati koje tim provede radeći na projektu.

-Procijenite i prilagodite: Kako biste osigurali kontinuirano poboljšanje procesa, stalno procjenjujte procese i postavljajte pitanje: "Postoji li bolji način za to?"



Slika 2. Mapa toka vrijednosti

2.2.3. Protočnost

Stanje protoka je kada je tim u ritmu i posao teče glatko, toliko da ne primjećujemo protok vremena. Stvaranje stanja protoka povećava angažman i učinak tima. Tijek tima odražava učinkovitost tijekom vrijednosti, koji možete kontinuirano fino podešavati pomoću stalne

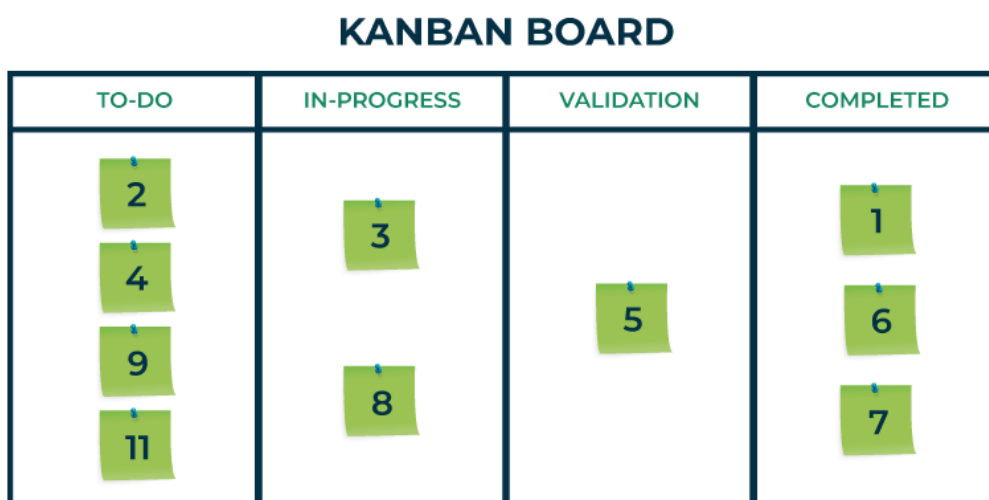
povratne petlje. Lean metodologija zahtijeva glatki i kontinuirani tijek kako bi se smanjila kašnjenja i minimiziralo vrijeme prijenosa.

"Kada provodite Lean, usredotočite se na protok", kaže Atlassianov moderni radni trener Mark Cruth. "Protok je u središtu svakog elementa Lean-a, bilo da se radi o smanjenju otpada, eliminaciji silosa ili stalnom poboljšanju... svi elementi se vraćaju u tok!"

Možete poboljšati protok svog tima implementacijom sljedećeg:

Međufunkcionalna suradnja: Silosi su kriptonit Leana. Vaš tim bi trebao sudjelovati u cijelom procesu i surađivati s drugim timovima, ako je potrebno, kako bi izvršili svoje zadatke. Na primjer, to može uključivati petlju u timovima za uspjeh kupaca i dobivanje njihovih informacija o bolnim točkama kupaca. Štoviše, vaš tim može produbiti svoje znanje o tome kako funkcioniraju drugi odjeli.

Praćenje zadataka: Kanban ploče ili Kanban predložak u Jiri mogu vam pomoći da dodijelite zadatke, vizualizirate rad i koordinirate svoj tim. Ove kartice pomažu timovima da prate napredak zadataka tijekom životnog ciklusa projekta.



Slika 3. Kanban ploča

2.2.4. Povlačenje

Stabilan tijek rada osigurava timovima izvršavanje zadataka s većom učinkovitošću i manjim naporom. Kako bi se postigao takav stabilan tijek rada, važno je uspostaviti sustav povlačenju skladu s Lean metodologijom. U ovakvom sustavu, poslovi se aktiviraju tek kada postoji stvarna potreba za njima. Ovaj pristup omogućuje optimizaciju iskorištavanja resursa te isporuku proizvoda ili usluga samo kada postoji stvaran zahtjev za njima.

2.2.5. Konstantna poboljšanja i težnja k izvrsnosti

Lean zahtijeva način razmišljanja o rastu i težnji savršenstvu kroz stalna poboljšanja, koristeći stalnu petlju povratnih informacija kako bi pomogli voditelju projekta, timu i tvrtki smanjiti otpad i povećati učinkovitost.[2]

2.3. Tipovi gubitaka po Leanu

Održavanje opreme je prioritet u svakom proizvodnom pogonu. Operateri strojeva, tehničari i drugo osoblje moraju osigurati da sve radi učinkovito kako bi se proizveli proizvodi na vrijeme. Međutim, to možda neće uvijek biti moguće zbog neočekivanih događaja poput kvara opreme. Tu se razumijevanje šest velikih gubitaka pokazuje korisnim.

Razvijeno kao način kategoriziranja vrsta problema povezanih s opremom koji mogu usporiti proizvodnju, šest velikih gubitaka pomaže proizvođačima identificirati područja za poboljšanje proizvodnih procesa i produktivnosti u tvornici.

2.3.1. Prekomjerna proizvodnja

Prekomjerna proizvodnja je problem koji se javlja kada se proizvodi više nego što tržište može apsorbirati. To dovodi do stvaranja proizvoda koji se ne mogu plasirati na tržištu, a često uključuje izvođenje operacija koje nisu neophodne. Također, prekomjerna administracija doprinosi ovom problemu, jer se stvara dokumentacija koju nitko nije zahtijevao niti će je kasnije koristiti. Loše predviđanje prodaje i tržišnih zahtjeva dodatno pogoršava situaciju, jer se proizvodi više nego što je potrebno. Osim toga, slanje uputa prema previše ljudi ili premalo ljudi uzrokuje dodatne komplikacije i neefikasnost. Proizvodnja "za svaki slučaj" često rezultira stvaranjem zaliha koje se kasnije ne mogu prodati, što generira nepotrebne troškove skladištenja i održavanja. Sve ove prakse zajedno vode ka velikim gubicima i smanjenju profitabilnosti, jer resursi i energija se troše na aktivnosti koje ne donose stvarnu vrijednost.

2.3.2. Transport

Nepotrebni transport predstavlja gubitak kroz suvišno kretanje materijala između operacija ili skladišnih površina. Često se koristi stari, neučinkovit raspored kretanja materijala, što zahtijeva racionalniji layout i bolji međusobni raspored operacija, poput proizvodnih ćelija. Osim fizičkog transporta materijala, neučinkovit transport informacija također pridonosi gubicima. Neuspješna komunikacija rezultira gubitkom podataka, nekompatibilnošću i nepouzdanošću informacija, što dodatno usporava proces i povećava troškove. Sve ove neefikasnosti zajedno vode ka većim operativnim troškovima i smanjenju produktivnosti.

2.3.3. Čekanje

Čekanje je gubitak u Leanu koji uključuje vrijeme čekanja materijala između operacija i radnika na strojevima ili materijal zbog lošeg planiranja. Potrebno je proučiti pokrete, sinkronizirati i ujednačiti proizvodnju. Također, čekanje na podatke, odluke, potpise, te kašnjenja u isporuci, dodatno usporavaju proces i smanjuju produktivnost.

2.3.4. Prekomjerna obrada

Prekomjerna obrada kao gubitak u Leanu uključuje korištenje predimenzioniranih strojeva, krive ili nedostajuće tehnološke opreme, te dugo pripremno-završno vrijeme i čišćenje između obrade. Ovaj gubitak nastaje zbog previše procesa obrade i predetaljne obrade proizvoda. Loš dizajn proizvoda, koji zahtijeva previše koraka obrade, također doprinosi prekomjernoj obradi. Prekompleksan proizvod povećava vrijeme i resurse potrebne za završetak, što dovodi do nepotrebnih troškova i smanjenja efikasnosti. Optimizacija dizajna i pojednostavljivanje procesa mogu značajno smanjiti ove vrste gubitaka.

2.3.5. Zalihe

Zalihe kao gubitak u Leanu predstavljaju visoke zalihe povezane s prekomjernom proizvodnjom, što rezultira "zamrznutim kapitalom" u skladištima. To povećava troškove skladištenja i smanjuje likvidnost resursa.

2.3.6. Nepotrebni pokreti

Nepotrebni pokreti su vrsta gubitaka u Leanu koji nastaju zbog lošeg rasporeda strojeva, što prisiljava radnike na nepotrebno gibanje. Ovi pokreti uključuju situacije gdje se ljudi moraju premješati kako bi došli do potrebnih informacija, što troši vrijeme i energiju. Također, često se koristi ručni rad kako bi se kompenzirali nedostaci u procesu proizvodnje, što dodatno povećava neefikasnost. Sve ove aktivnosti ne dodaju vrijednost proizvodnom procesu, već povećavaju umor radnika i smanjuju produktivnost. Optimalan raspored strojeva i poboljšanje procesa mogu značajno smanjiti ove vrste gubitaka.

2.3.7. Škart

Škart predstavlja gubitak uzrokovan prekidom toka zbog grešaka, nepotrebno utrošenog vremena, i troškova. To uključuje i prostor za analizu i otklanjanje problema. Nepotpune, netočne ili nepravodobne informacije dodatno doprinose ovom gubitku, otežavajući procese i

zahtijevajući dodatne napore za ispravke. Sve ovo smanjuje efikasnost, kvalitetu i profitabilnost poslovanja.

2.4. Lean alati

Temeljnim vitkim alatima smatraju se [4]:

- 5S
- Andon
- Analiza uskih grla
- Kontinuirani tok
- Gemba
- Heijunka (niveliranje proizvodnje)
- Hoshin kanri (usmjerenost menadžmenta)
- Jidoka (alat za poboljšanje organizacijske učinkovitosti)
- JIT (engl. *Just In Time*)
- Kaizen (kontinuirani proces poboljšanja kvalitete i učinkovitosti)
- Kanban
- Ključni indikatori učinkovitosti
- Muda (eliminacija gubitaka)
- OEE - mjerenje učinkovitosti strojeva (engl. *Overall Equipment Effectiveness*)
- PDCA (engl. *Plan – Do – Check – Act*)
- Poka-yoke
- Analiza glavnog uzroka
- SMED (engl. *Single Minute Exchange Of Die*)
- Šest velikih gubitaka
- Pametni ciljevi (engl. *SMART goals*)
- Standardizacija rada
- Taktno vrijeme
- TPM (engl. *Total Productive Maintenance*)
- VSM (engl. *Value Stream Mapping*)
- Vizualna tvornica.

Prema nekim autorima PDCA, JIT, Jidoka, Kanban, 5S, Poka-yoke, SMED analiza i standardizacija

rada najvažniji su vitki alati. Svi ti alati istinski su predstavnici vitkog poslovanja i za poduzeće se ne može reći da je vitko sve dok te alate ne integrira u svoje poslovanje. Prema tome standardizacija rada mora biti kvalitetno odrađena i nadograđivana kako bi poslovanje bilo profitabilnije i održivo. U ovom poglavlju bit će detaljnije objašnjeni vitki alati koji će se koristiti kod primjene u kasnijem praktičnom projektu, a to su 5S, Gemba, SMED i PDCA. [4].

2.4.1. 5S

5S je sustav za smanjenje otpada i optimizaciju produktivnosti održavanjem urednog radnog mjesta i korištenjem vizualnih znakova za postizanje dosljednijih operativnih rezultata. Implementacija ove metode "čisti" i organizira radno mjesto u osnovi u postojećoj konfiguraciji, a obično je prva Lean metoda koju organizacije primjenjuju.

Stupovi 5S, Sortiraj (Seiri), Postavi u red (Seiton), Sjaj (Seiso), Standardiziraj (Seiketsu) i Održi (Shitsuke), pružaju metodologiju za organiziranje, čišćenje, razvoj i održavanje produktivnog radnog okruženja. U svakodnevnom radu tvrtke, rutine koje održavaju organizaciju i red ključne su za nesmetan i učinkovit tijek aktivnosti. Ova lean metoda potiče radnike da poboljšaju svoje radne uvjete i pomaže im da nauče smanjiti otpad, neplanirane zastoje i zalihe u procesu.[5]



Slika 4. 5s

- **Sortiraj (Seiri):** Uklanjanje nepotrebnih predmeta sa radnog mjesta. Cilj je zadržati samo ono što je neophodno za obavljanje posla. Ovo pomaže u smanjenju nereda, poboljšanju efikasnosti i smanjenju rizika od nesreća.
- **Stabiliziraj (Seiton):** Organizacija i uređenje potrebnih predmeta tako da su lako dostupni i spremni za upotrebu. Svaki predmet treba imati svoje mjesto kako bi se smanjilo vrijeme traženja i povećala produktivnost.
- **Sjaji (Seiso):** Održavanje radnog mjesta čistim i urednim. Redovno čišćenje pomaže u identifikaciji i prevenciji problema, održavanju opreme u dobrom stanju i stvaranju sigurnijeg radnog okruženja.
- **Standardiziraj (Seiketsu):** Uspostavljanje standardnih procedura i pravila za održavanje prvih tri "S". Ovo osigurava dosljednost u primjeni i pomaže u održavanju visokog nivoa organizacije i čistoće.
- **Samo-discipliniraj (Shitsuke):** Implementacija kulture kontinuirane primjene 5S-a kroz obuku, redovne revizije i poboljšanja. Ovo uključuje razvoj navika koje podržavaju disciplinu i stalno unapređenje procesa.[6]

2.4.2. Gemba

Gemba (現場) je japanski izraz za "stvarno mjesto", često se koristi za radnju ili bilo koje mjesto gdje se zapravo odvija rad koji stvara vrijednost. Također se piše genba. Lean mislioci koriste ga za označavanje mjesta gdje se stvara vrijednost. Japanske tvrtke često dopunjuju gembu srodnim pojmom "genchi gembutsu" - u biti "idi i vidi" - kako bi naglasile važnost empirizma.

2.4.3. SMED

SMED (Single Minute Exchange of Die) je metodologija koja se koristi za smanjenje vremena potrebnog za promjenu alata ili postavljanje strojeva u proizvodnim procesima. Sastoji se od osam osnovnih principa:

1. **Razdvojiti unutarnje od vanjskih aktivnosti:** Unutarnje aktivnosti su one koje se mogu obaviti samo kada je stroj zaustavljen, dok se vanjske aktivnosti mogu obaviti

dok stroj radi. Ključ je u identifikaciji i premještanju što većeg broja aktivnosti iz unutarnjih u vanjske.

2. **Pretvoriti unutarnje u vanjske aktivnosti:** Ovo podrazumijeva restrukturiranje zadataka tako da se što više aktivnosti može obavljati dok stroj još radi. Na primjer, priprema alata ili materijala prije nego što stroj bude zaustavljen.
3. **Standardizacija funkcija, a ne oblika:** Fokusira se na standardizaciju funkcionalnih aspekata opreme, kao što su stezanje, centriranje i dimenzioniranje, umjesto na same oblike alata. Ovaj princip omogućava bržu i efikasniju promjenu.
4. **Koristiti funkcionalne stezaljke ili eliminirati sve pričvršćivače:** Korištenje univerzalnih ili multifunkcionalnih stezaljki može smanjiti vrijeme promjene jer eliminira potrebu za specifičnim pričvršćivačima za svaki alat.
5. **Koristiti među-držače alata:** Dodatni držači alata omogućuju brzu zamjenu cijelih modula umjesto pojedinačnih alata, što ubrzava proces postavljanja i smanjuje greške.
6. **Primijeniti paralelne operacije:** Kada je stroj dizajniran za rad s dvije strane, može se postići znatna ušteda vremena ako dva radnika simultano obavljaju različite zadatke s obje strane stroja.
7. **Eliminirati namještanja:** Namještanje često zauzima 50-70% vremena unutarnjih aktivnosti. Eliminacijom ili značajnim smanjenjem tih operacija moguće je postići znatno smanjenje ukupnog vremena promjene.
8. **Mehanizacija / Automatizacija:** Uvođenje mehanizacije ili automatizacije u proces promjene može značajno smanjiti vrijeme potrebno za obavljanje aktivnosti, poboljšati preciznost i smanjiti ljudske pogreške.

Implementacijom ovih osam principa, proizvodne tvrtke mogu postići značajno smanjenje vremena promjene alata, što rezultira povećanjem produktivnosti, fleksibilnosti i konkurentnosti na tržištu.[7]

2.4.4. PDCA

U 1950-ima, savjetnik za menadžment dr. William Edwards Deming razvio je metodu utvrđivanja zašto neki proizvodi ili procesi ne rade kako se nadao. Njegov je pristup od tada postao popularan strateški alat, koji koriste mnoge različite vrste organizacija. Omogućuje im da formuliraju teorije o tome što treba promijeniti, a zatim ih testiraju u "kontinuiranoj petlji povratnih informacija".[8]

PDCA ciklus sastoji se od četiri faze: Planiranje (*eng. Plan*) - određivanje ciljeva za proces i potrebnih promjena za njihovo postizanje. Izvođenje (*eng. Do*) - provođenje promjena. Provjera (*eng. Check*) - evaluacija rezultata u smislu performansi. Akcija (*eng. Act*) - standardizacija i stabilizacija promjene ili ponovno započinjanje ciklusa, ovisno o rezultatima.

Plan

Prvi korak u optimizaciji procesa i poboljšanju proizvoda ili usluge je planiranje. Važno je uskladiti strateške ciljeve tvrtke s očekivanjima kupaca kako bi se učinkovito prešlo na sljedeće faze.

Prvo, potrebno je provesti dijagnozu kako bi se identificirali postojeći problemi, definirali prioriteta za poboljšanje ili čak otkrile nove prilike. Nakon definiranja cilja, potrebno ga je razložiti na realne i opipljive ciljeve. U ovoj fazi ključno je prikupiti podatke i informacije kako bi se definirao opseg rada.

Kada se tim okupi, vrijeme je za izradu akcijskog plana koji sadrži zadatke potrebne za postizanje ciljeva. Ovaj plan treba uključivati rokove, raspored i određivanje odgovornih osoba. Također, potrebno je definirati ključne pokazatelje uspješnosti (KPI-eve) koji će poslužiti kao metrike za analizu u sljedećoj fazi.

Do

Nakon planiranja, sljedeći korak je implementacija. Tim bi trebao dobiti specifičnu obuku za učinkovitu provedbu plana. Tijekom provedbe, važno je prikupljati podatke kako bi se pratili procesi i mjerili rezultati, bilježeći i pozitivne i negativne ishode.

Check

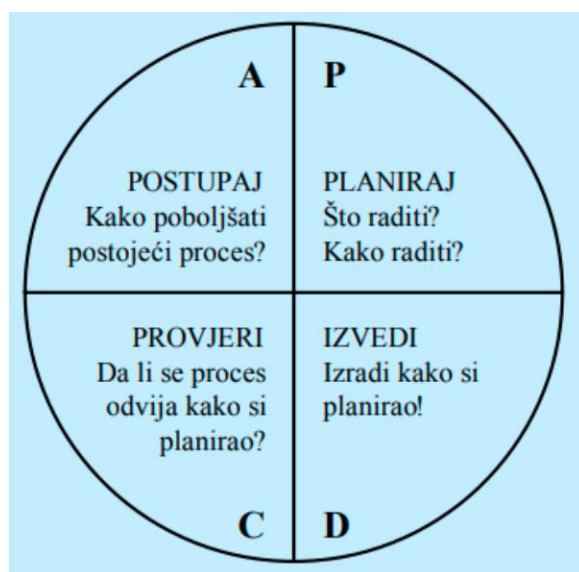
Sljedeća faza uključuje analizu rezultata. Potrebni su objektivni i kvantitativni parametri za točnu procjenu poboljšanja procesa i standarda kvalitete te njihovu usporedbu s prethodnim ciklusima. Ova faza pomaže identificirati probleme ili nedostatke u procesu koji se mogu kasnije prilagoditi.

Act

"A" u PDCA također znači "prilagoditi" (adapt), što predstavlja akcije poduzete za ispravljanje otkrivenih nedostataka. U ovoj fazi mogu se identificirati rješenja za probleme, a planiranje se može prilagoditi prema novim rezultatima. Postoje dva moguća ishoda:

1. Ako je očekivani rezultat postignut, može poslužiti kao referenca za druge procese, odjele ili jedinice unutar tvrtke.
2. Ako rezultat nije ispunio očekivanja, treba ga analizirati kako bi se pronašla nova rješenja.

Važno je napomenuti da je tržište vrlo dinamično, s tehnološkim inovacijama koje se stalno pojavljuju. Stoga, čak i uspješna strategija može zahtijevati daljnje poboljšanje ponovnim prolaskom kroz PDCA ciklus.[9]



Slika 5. PDCA

2.5. Lean Six Sigma

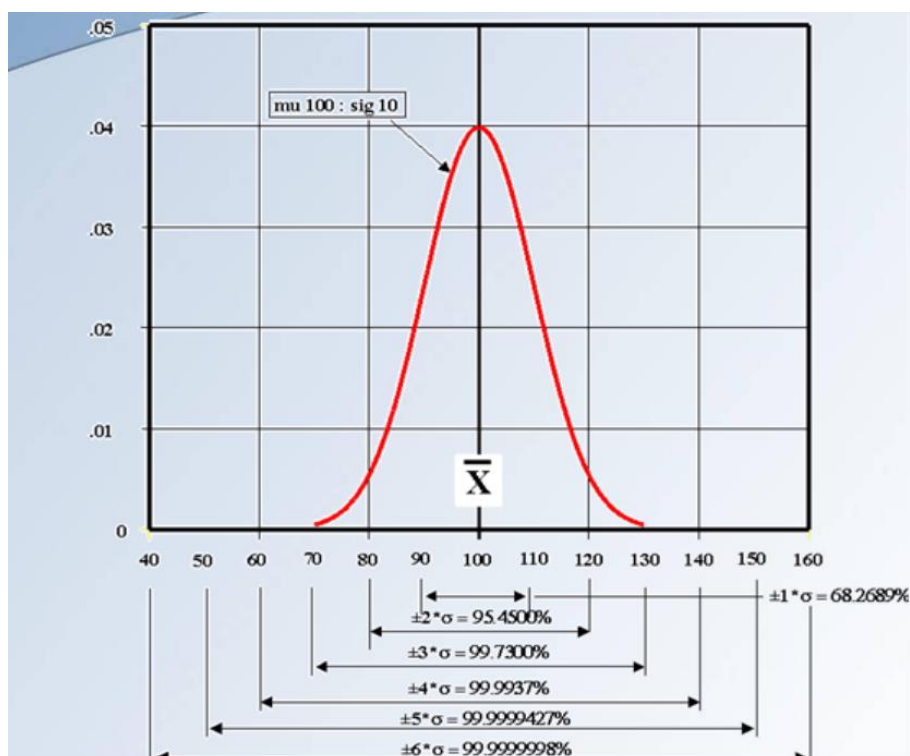
2.5.1. Six sigma metodologija

Izraz "Six Sigma" odnosi se na statističku mjeru koliko proces odstupa od savršenstva. Proces koji radi na šest sigma ima stopu neuspjeha od samo 0,00034%, što znači da ne proizvodi gotovo nikakve nedostatke. Six Sigma razvila je Motorola 1980-ih, a od tada su je usvojile mnoge druge tvrtke diljem svijeta, uključujući General Electric, Toyotu i Amazon.

Six Sigma je skup metodologija i alata koji se koriste za poboljšanje poslovnih procesa smanjenjem nedostataka i pogrešaka, smanjenjem varijacija te povećanjem kvalitete i učinkovitosti. Cilj Six Sigme je postići razinu kvalitete koja je gotovo savršena, sa samo 3,4 kvara na milijun prilika. To se postiže korištenjem strukturiranog pristupa pod nazivom DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) za prepoznavanje i uklanjanje uzroka varijacija i poboljšanje procesa.

Etimologija se temelji na grčkom simbolu "sigma" ili " σ ", statističkom izrazu za mjerenje odstupanja procesa od srednje vrijednosti procesa ili cilja. "Šest sigma" dolazi od zvonaste krivulje koja se koristi u statistici, gdje jedna sigma simbolizira jednu standardnu devijaciju od srednje vrijednosti. Ako proces ima šest sigmi, tri iznad i tri ispod srednje vrijednosti, stopa nedostataka je klasificirana kao "izuzetno niska".

Grafikon normalne distribucije u nastavku (Slika 6) naglašava statističke pretpostavke modela Six Sigma. Što je veća standardna devijacija, veći je raspon vrijednosti na koje se nailazi. Dakle, procesi, gdje je srednja vrijednost najmanje 6σ udaljena od najbliže granice specifikacije, usmjereni su na Six Sigma.[10]



Slika 6. Površine ispod normalne krivulje [22]

2.5.2. *Lean Six Sigma metodologija*

U suštini, Six Sigma i Lean sustavi imaju isti cilj. Obojica nastoje eliminirati otpad i stvoriti najučinkovitiji mogući sustav, ali imaju različite pristupe postizanju tog cilja. Najjednostavnije rečeno, glavna razlika između Lean-a i Six Sigma-e je ta što različito identificiraju glavni uzrok otpada.

Praktičari Lean-a vjeruju da otpad dolazi od nepotrebnih koraka u proizvodnom procesu koji ne dodaju vrijednost gotovom proizvodu, dok zagovornici Six Sigma tvrde da je otpad rezultat varijacija unutar procesa[11].

Lean Six Sigma je filozofija poboljšanja utemeljena na činjenicama i podacima koja cilja prevenciju nedostataka više od otkrivanja nedostataka. Potiče zadovoljstvo korisnika i krajnje rezultate smanjenjem varijacija, otpada i vremena ciklusa, istovremeno promičući korištenje standardizacije rada i protoka, čime se stvara konkurentna prednost. Primjenjuje se svugdje gdje postoje varijacije i otpad, a svaki bi zaposlenik trebao biti uključen. [12]

2.5.3. *Podjela uloga prema Lean Six Sigma (LSS) metodologiji*

Podjela uloga vrši se na:

- Bijeli pojas (engl. *White Belt*)
- Žuti pojas (engl. *Yellow Belt*)
- Zeleni pojas (engl. *Green Belt*)
- Crni pojas (engl. *Black Belt*)
- Majstor crnog pojasa (engl. *Master Black Belt*).

Bijeli pojas (engl. *White Belt*)

Bijelim pojasevima smatraju se zaposlenici koji nisu prošli nikakvu dodatnu obuku zasnovanu na LSS metodologiji, no upućeni su u trenutne projekte koji se provode u radnoj organizaciji te su svjesni da i sami svojim radom doprinose u uspješnoj provedbi projekata.

Žuti pojas (engl. *Yellow Belt*)

Zaposlenici sa žutim pojasom prošli su osnovnu obuku o metodologiji poboljšanja kvalitete te su izravno uključeni u LSS projekte unutar radne organizacije. Oni uz svoje uobičajene radne obaveze mogu pružati podršku Zelenim i Crnim pojasevima.

Zeleni pojas (engl. *Green Belt*)

Zeleni pojas odnosi se na zaposlenike koji su prošli ozbiljnu obuku u području LSS metodologije. Njihov primarni fokus na poslu nije na provedbi LSS projekata. Oni obavljaju svoje svakodnevne radne obaveze u okviru pozicije koju imaju unutar poduzeća, no ujedno usko surađuju s Crnim pojasevima te im u dogovorenim vremenskim rokovima dostavljaju kvalitetne analize podataka koje će poslužiti kao temeljni izvor informacija u provedbi projekata.

Crni pojas (engl. *Black Belt*)

Crni pojas je voditelj tima prilikom provedbe LSS projekata i u poduzeću se tim poslom bavi s punim radnim vremenom. Zadužen je za formiranje i vođenje svojih timova te je prethodno morao proći vrhunsku obuku kako bi imao napredna znanja o statističkim i financijskim analizama, upravljanju projektima i LSS alatima. Njegova obuka trajala je minimalno 160 sati te uz tehničke vještine mora posjedovati liderske i komunikacijske vještine.

Tijekom provedbe projekata, zaposlenik s crnim pojasom savjetuje Zelene i Žute pojaseve te ujedno radi na njihovoj kontinuiranoj edukaciji u područjima poboljšanja kvalitete. Uz to, zadužen je za komunikaciju sa sponzorima i rukovoditeljima uključenima u projekt čime na sebe preuzima odgovornost uspješnog ostvarenja ciljeva projekta.

U ranije spomenutoj kompaniji General Electric, koja je provela izrazito uspješnu implementaciju LSS metodologije, svi menadžeri se obučavaju minimalno do razine Crnog pojasa.

Majstorski crni pojas (engl. *Master Black Belt*)

Kao i kod Crnog pojasa, pozicija Majstorskog crnog pojasa također se izvršava u punom radnom vremenu. Zaposlenik s certifikatom Majstorskog crnog pojasa stručnjak je u području implementacije LSS projekata na razini organizacije, sa značajnim iskustvom u radu na prijašnjim projektima.

Obično nije izravno uključen u projektne timove, već ima ulogu savjetnika Crnih pojaseva i rukovodstva radne organizacije. S obzirom da ima najviši stupanj znanja i iskustva prema hijerarhiji o ulogama u LSS projektnoj metodologiji, nositelj Majstorskog crnog pojasa kvalificiran je za školovanje i mentoriranje svih ostalih Pojaseva. [13]

2.5.4. DMAIC

DMAIC model jedan je od najpopularnijih i najčešće korištenih metoda za poboljšanje poslovnih funkcija ili cijele organizacije.

DMAIC metodologija sastoji se od pet faza, a to su definiranje, mjerenje, analiza, poboljšanje i kontrola (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control). Ove faze čine stupove DMAIC-a, omogućujući nam da poboljšamo postojeću poslovnu funkciju ili cijelu organizaciju kako bismo postigli poboljšanje i učinkovitost.

DMAIC proces je vođen podacima i prolazi kroz svaki zamršeni detalj. Nudi sveobuhvatne načine poboljšanja poslovnog procesa ili funkcije. Ovaj model je primjenjiv u svakoj industriji ili području. Međutim, najpoznatiji je po svom simboličnom doprinosu i primjeni u Six Sigma i Lean Six Sigma.

Definirati:

Faza definiranja jedan je od ključnih koraka u DMAIC pristupu, jer se bavi definiranjem problema. Problem mora biti dobro definiran i mora biti u skladu s ciljem organizacije. Zatim, nakon što imate mjerljivu i razumljivu definiciju problema, radite na čimbenicima koji utječu na proces. To vas vodi do stvaranja učinkovite izjave o problemu i definiranja varijabli koje izravno utječu na vaš cilj.

Mjeriti:

Ova faza bavi se rastavljanjem našeg problema u sažet i lako prepoznatljiv rezultat. Također, ključni ulazi ili varijable dodatno se filtriraju kako bi se odvojili u smislu njihovog utjecaja na naš problem. S ovom fazom odlazimo s mjerljivim vrijednostima našeg problema i ključnim inputima koji izravno utječu na problem. To se postiže izradom operativne definicije i plana mjerenja, uz prikupljanje i analizu podataka. Ova faza uključuje korištenje matrice uzroka i posljedice, FMEA itd.

Analizirati:

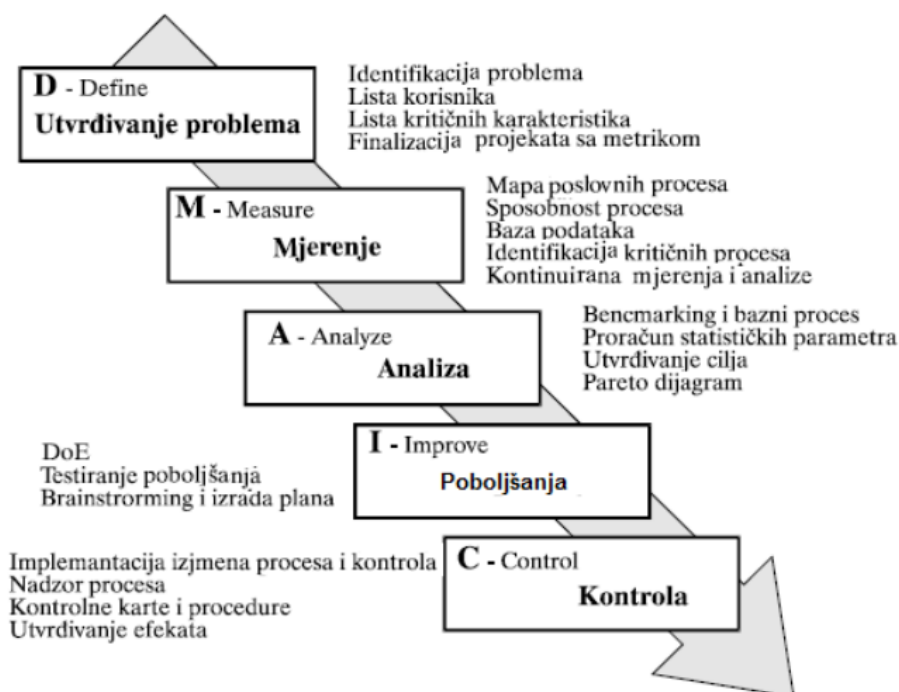
U ovoj fazi radimo na pojednostavljenju procesa i izolaciji grešaka koje je potrebno ispraviti. Faza analize pomaže nam razumjeti jaz između trenutne izvedbe i očekivane razine izvedbe. Ova je faza važna jer nam omogućuje da prodremo duboko u srž problema. To nam omogućuje da dobijemo uvide koji se često propuštaju jer su ugrađeni duboko u proces. Projekt je tada pojednostavljen i imate jasnu sliku ostvarivih ciljeva projekta.

Poboljšati:

Faza poboljšanja fokusira se na poboljšanje. Ali ovo je jedna od najizazovnijih faza DMAIC procesa. Iz faze analize dobivamo temeljne uzroke problema. Sada se okrećemo njihovom popravljanju. Ova faza vas tjera da razmišljate o gotovim rješenjima koja su inovativna i dosljedna. To trebate učiniti jer jedna funkcija ili proces utječe na druge određenom promjenom. Vaš je posao osigurati da sve teče glatko, s postavljenim planom i mapom procesa.

Kontrolirati:

Ova faza i njezin uspjeh izravno koreliraju s tim koliko smo uspješni u prethodne četiri faze. Ova je faza uglavnom povezana s promjenama performansi ili unosa proizašlim iz prethodnih faza. Dakle, ako sve stvari izgledaju dobro, glavni zadatak je osigurati da proces ili funkcija uvijek budu pod kontrolom. To uključuje izradu plana kontrole procesa, obrazovne zahtjeve (ako ih ima), itd. Potrebno se pobrinuti da su ključne varijable uvijek u prihvaćenom rasponu varijance.[14]



Slika 7. DMAIC

3. SHEMA PROCESA PROIZVODNJE U REZNOME CENTRU,

U ovom poglavlju će ukratko biti predstavljeno odabrano poduzeće za završni rad, opisat će se koji su finalni proizvodi koje ovaj proces proizvodi te skice i sheme procesa.

3.1. O poduzeću

KONČAR – Distributivni i specijalni transformatori d.d. (KONČAR D&ST) je hrvatska tvrtka koja je regionalni lider u proizvodnji distributivnih, srednjih energetske i specijalnih transformatora do 160 MVA i 170 kV, slijedi tradiciju dugu 100 godina u proizvodnji elektrotehničkih proizvoda u glavnom gradu Hrvatske, Zagrebu.



Slika 8. Logotip KONČAR D&ST

U posljednjih 70 godina KONČAR D&ST je isporučio transformatore u više od 110 zemalja širom svijeta. Dizajnirani i proizvedeni prema najvišim standardima kvalitete, plod su najnaprednijih metoda proračuna i dizajna, proizvodnih procesa i završne kontrole.

Godišnje isporučuje više od 10.000 transformatora i tako stvara nove vrijednosti za dioničare, kupce, zaposlenike, dobavljače i zajednicu u kojoj djeluje.[15]

3.2. Transformatori

Transformatori su električni uređaji koji se koriste za promjenu izmjeničnog napona, tj. podići ili smanjiti (ovdje se koristi fenomen elektromagnetske indukcije). Stoga, bez obzira na to podižu li ili snižavaju napon, transformatori mogu biti gore i dolje, s tim promjenama, frekvencija struje ostaje nepromijenjena.

Transformator omogućuje da se električna energija proizvodi na najekonomičnijem naponu za generatore, da se energija prenosi na najekonomičnijem naponu za tu namjenu i, konačno, da se koristi na najekonomičnijem i najprikladnijem naponu za pojedine potrošače.

Rad transformatora temelji se na principu elektromagnetske indukcije. Transformator je uređaj koji se koristi za promjenu izmjeničnog napona, a time i izmjenične struje. Sastoji se od dvije zavojnice – primarne i sekundarne, koje su namotane na željeznu jezgru izrađenu od tankih limova. Transformator radi na principu međusobne elektromagnetske indukcije primara i sekundara. Kada kroz primar teče izmjenična struja koja stvara promjenjivo magnetsko polje, tada se u sekundaru javlja inducirana elektromotorna sila.

S obzirom na broj namota na sekundaru može se dobiti veći ili niži napon od napona na primaru. Onoliko puta koliko je broj namotaja na sekundaru veći (ili manji) nego na primaru, toliko će i napon na sekundaru biti veći (ili niži) od napona na primaru.

Transformatori imaju veliku važnost u prijenosu električne energije na velike udaljenosti. Naime, elektrane proizvode električnu energiju velike snage i relativno niskog napona. Ako bi se ta električna energija vodila dalekovodima do mjesta potrošnje, koje može biti jako udaljeno od elektrane, ti vodovi bi morali imati veliki presjek i dolazilo bi do gubitaka zbog stvaranja Jouleove topline. Zato se u elektranama postavljaju transformatori koji struju niskog napona velike jakosti pretvaraju u struju visokog napona niske jakosti. Time se smanjuju gubici zbog stvaranja topline, a električni vodovi mogu biti malog presjeka. Kada se ovakva struja visokog napona, npr. 100 000 V, dovede do točke potrošnje, mora se ponovno transformirati u struju niskog napona (npr. 220 V), i to velike jakosti. [16]



Slika 9. Uljni distributivni transformatori

3.2.1. Jezgra transformatora

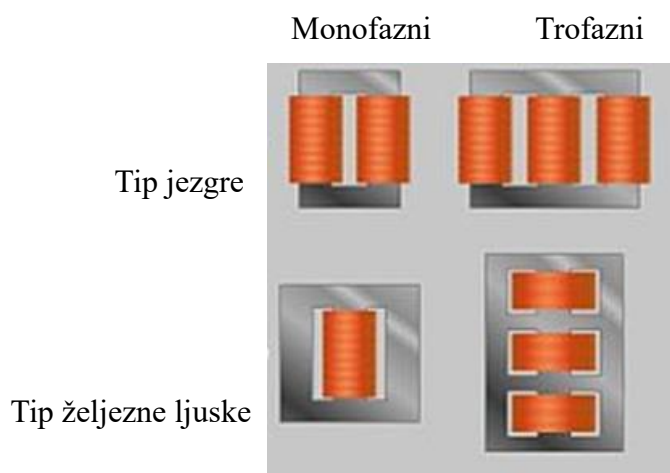
Srce svakog transformatora je njegova jezgra. Kako bi se smanjila histereza i gubitak vrtložne struje željezne jezgre pod djelovanjem izmjeničnog magnetskog toka, željezna jezgra izrađena je od visokokvalitetnih limova od silikonskog čelika debljine 0,35 mm ili tanjih.

Jezgra se sastoji od dva dijela: stupa sa željeznom jezgrom i željeznog jarma. Stup jezgre prekriven je zavojnicama, a željezni jaram povezuje stup željezne jezgre u zatvoreni magnetski krug. Prema rasporedu namota u jezgri, transformator se dijeli na dvije vrste: tip jezgre i tip željezne ljsuke (ili skraćeno tip jezgre i ljsuke).

Jednofazni stupac s dvije jezgre. Ovaj tip transformatora ima dva pola jezgre, koji su povezani gornjim i donjim željeznim jarmom u zatvoreni magnetski krug. Oba pola jezgre obložena su visokonaponskim i niskonaponskim namotajima. Općenito, niskonaponski namot postavljen je na unutarnjoj strani, to jest blizu željezne jezgre, a visokonaponski namot postavljen je na vanjskoj strani, tako da je lako zadovoljiti zahtjeve razine izolacije.

Trofazni jezgri transformator ima dvije strukture: trofazni stupac i trofazni peterožilni stupac. Trofazni petožilni polni tip (ili trofazni petopolni tip) naziva se i trofazni trožilni bočni tip jarma. Sastoji se od dva bočna jarma (željezne jezgre bez namota) izvan trofaznog trožilnog stupa (ili trofaznog trolnog tipa). Međutim, presjek i visina gornjeg i donjeg željeznog jarma manji su od onih običnog trofaznog trolnog tipa. Time se smanjuje visina cijelog transformatora.

Trofazni trožilni stup trebao bi postaviti tri namota od tri faze na tri stupa sa željeznom jezgrom. Tri pola jezgre također su povezana gornjim i donjim željeznim jarmom kako bi formirali zatvoreni magnetski krug. Raspored namota je isti kao kod jednofaznog transformatora. U usporedbi s trofaznom željeznom jezgrom, trofazni peterožilni stup ima još dva pola sa željeznom jezgrom na lijevoj i desnoj strani stupa sa željeznom jezgrom, koji postaje bočna prigušnica. Namoti svake naponske razine redom su namotani na tri pola jezgre u sredini prema fazi, dok bočni jaram nema namota, tvoreći tako trofazni peterožilni transformator.[17] Ovaj tip jezgre transformatora je ujedno i tip jezgre koji se proizvodi u reznom centru odabranog poduzeća i koji ćemo kasnije detaljnije proći u načinu izrade.

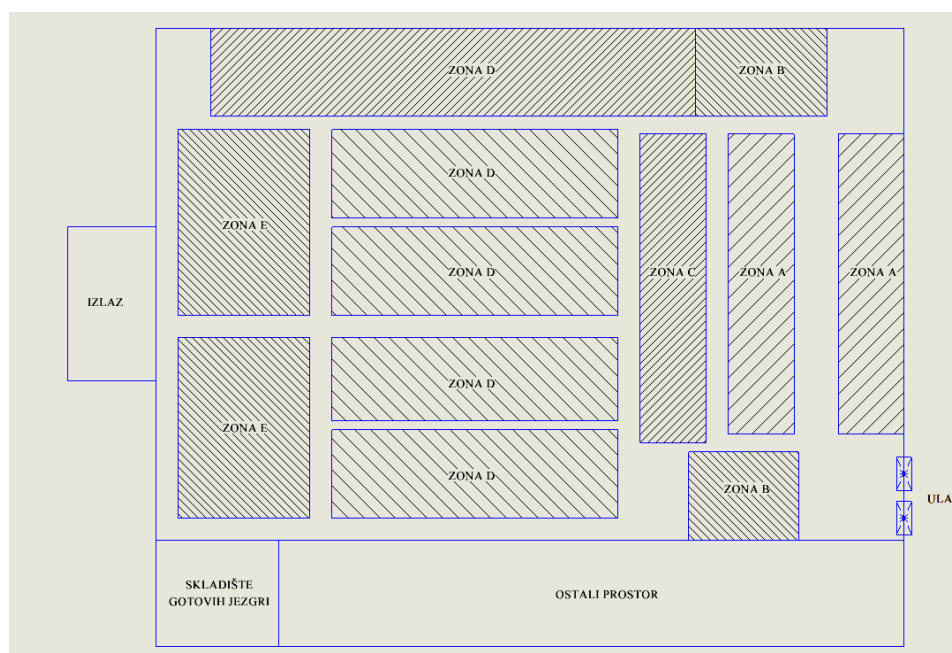


Slika 10. Tipovi jezgri transformatora

3.3. TEHNOLOŠKI PROCES IZRADE JEZGARA TRANSFORMATORA U REZKOM CENTRU

Rezni centar projektira se za proizvodnju jezgara distributivnih transformatora snaga 50-2000 kVA, za proizvodnju jezgara specijalnih transformatora do 8 MVA i za rezanje limova jezgara srednjeenergetskih transformatora snaga do 100 MVA.

Rezni centar formiran je kao jedinstveni prostor u kojem se skladište bale lima, uzdužno se režu u trake potrebne širine, poprečno se režu limovi jezgre i slažu jezgre.



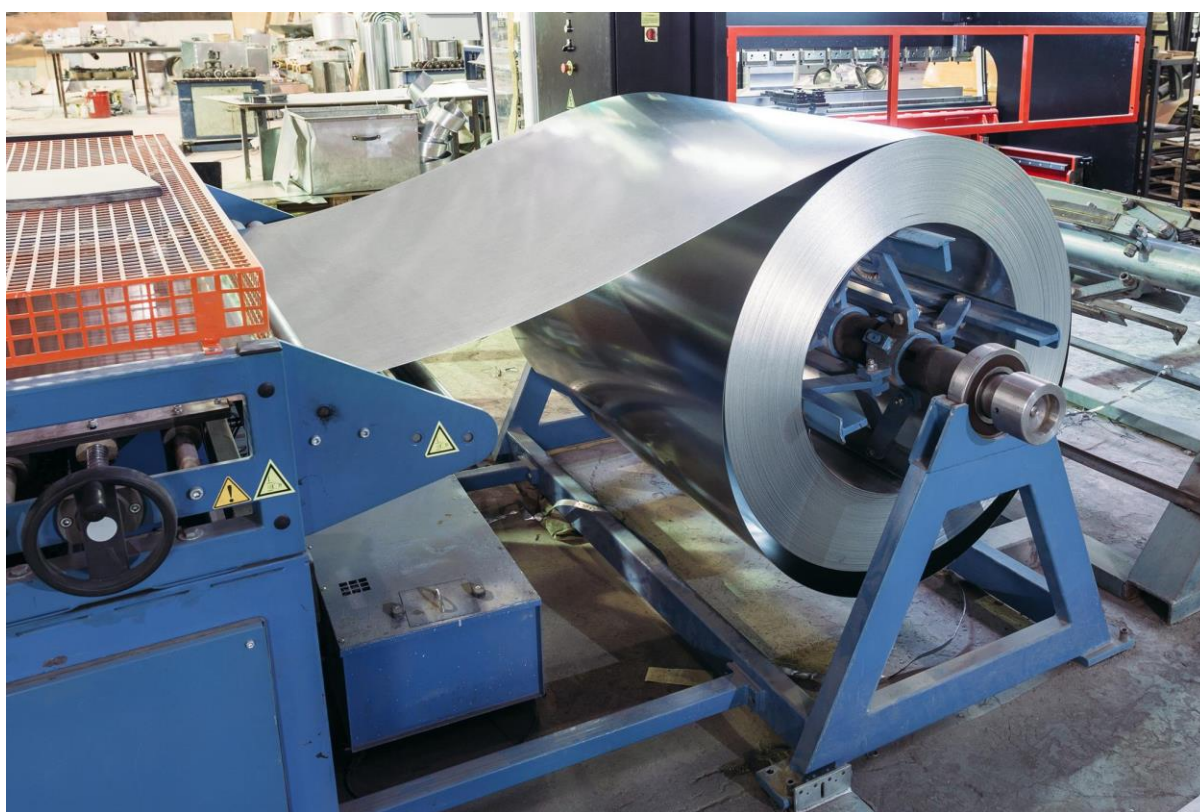
Slika 11. Sektori proizvodnje

A. Skladištenje bala limova

Bale transformatorskog lima transportiraju se kamionom ili kontejnerom do ulaza u skladište bala lima. Bale lima se odlažu transportnim sredstvom na odgovarajući način u skladište bala lima, zona „A“ na crtežu. Svaka bala lima ima svoju identifikacijsku kartu i skladišnu adresu. Bale transformatorskog lima se sortiraju prema vrsti lima, debljini lima i specifičnim gubicima transformatorskog lima.

B. Uzdužno rezanje

Na temelju radnog naloga za uzdužno rezanje bala lima izuzimaju se određene bale sa skladišta i transportiraju mosnom dizalicom do linije za uzdužno rezanje transformatorskog lima. Na linji za uzdužno rezanje, bala lima se uzdužno reže prema radnom nalogu na trake lima određene širine, zona „B“ na crtežu.



Slika 12. Bala lima na liniji za uzdužno rezanje.

C. Odlaganje izrezanih traka lima

Nakon završetka postupka rezanja, na trake lima se postavljaju identifikacijske karte i transportiraju mosnom dizalicom se do skladišta traka lima. Trake lima se odlažu na čelične regale ili na podno skladište, zona „C“ na crtežu.

D. Poprečno rezanje limova

Prema radnom nalogu za poprečno rezanje izuzimaju se određene trake lima sa skladišta traka lima i transportiraju se mosnom dizalicom do linija za poprečno rezanje traka lima. U radionici se nalaze više linija za poprečno rezanje traka lima ovisno o širini trake lima. Na liniji za poprečno rezanje se trake lima režu u zadane oblike limova jezgre, a to su limovi stupova jezgre i limovi jarmova jezgre, zona „D“ na crtežu. Izrezani limovi jezgre odlažu se na palete za nošenje.

U sklopu radionice nalazi se i skladište za odlaganje elemenata steznog sustava jezgre, izolacijskih dijelova i vijčanog materijala.

E. Slaganje jezgara

Palete za nošenje limova se transportiraju do naprava za slaganje jezgara. Naprave za slaganje jezgara se razlikuju prema gabaritima jezgre i nosivosti naprave. Radnici na naprava slažu jezgre transformatora prema određenom planu slaganja oblika limova jezgre, zona „E“ na crtežu.

Složena jezgra se lijepi ili bandažira ovisno o gabaritima i masi jezgre. Jezgre se nakon provedenog postupka lijepljenja ili bandažiranja odlažu na skladište gotovih jezgara. Gotova jezgra se označava identifikacijskom kartom.

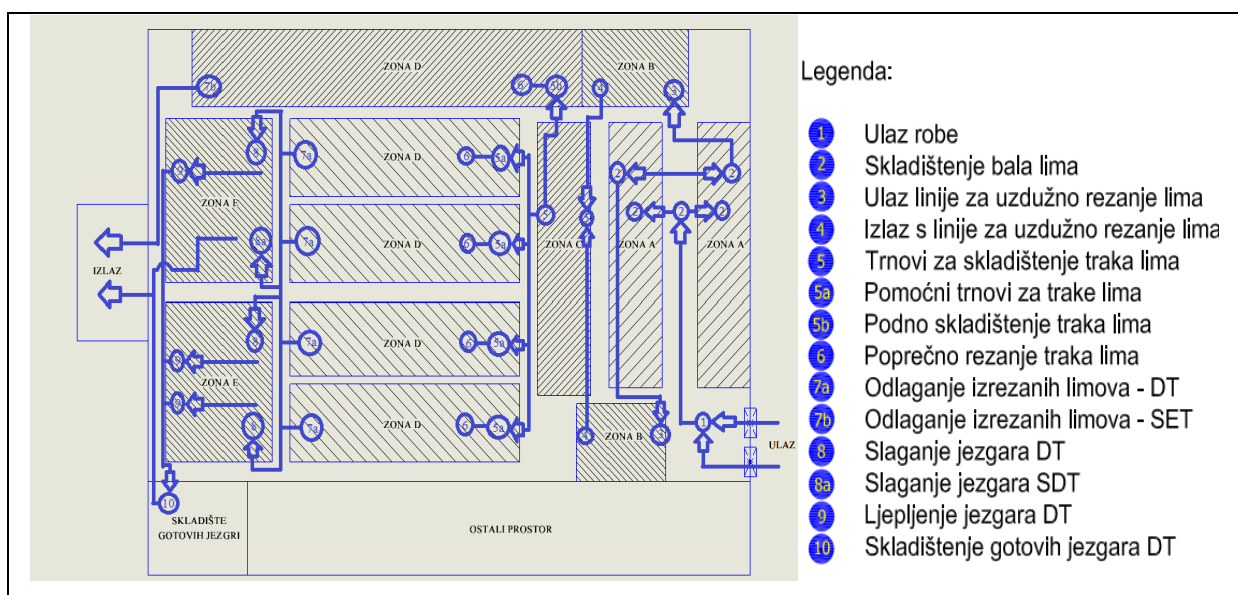
Jezgra se transportira transportnim sredstvom do radionice montaže aktivnog dijela transformatora.



Slika 13. Prikaz lijepljene jezgre transformatora

3.3.1. Prikaz toka materijala

Tehnološki tok materijala u proizvodnji jezgri transformatora ključan je za osiguranje kvalitete, efikasnosti i ekonomičnosti proizvodnog procesa. Pravilno upravljanje materijalima smanjuje otpade, optimizira korištenje resursa i osigurava konzistentnost proizvoda. Precizno praćenje i kontrola materijala doprinosi smanjenju troškova i povećava konkurentnost, te omogućava održavanje visokih standarda u performansama i pouzdanosti transformatora.



Slika 14. Tok materijala

3.3.2. Vrste otpada trafo lima u reznome centru

Otpad se može klasificirati prema fazama obrade lima:

- **Uzdužno rezanje:** Otpad uključuje špenu (rub bale koji se uklanja tokom rezanja) i deformirane dijelove bale na unutarnjem ili vanjskom promjeru.
- **Poprečno rezanje SET:** Otpad se sastoji od V isječaka, točaka od probijačica, početaka i krajeva traka, deformiranog lima te viškova lima.
- **Poprečno rezanje DT:** Otpad uključuje V isječke, točke od probijačica, početke i krajeve traka, deformirani i pogrešno izrezani lim, te viškove lima.
- **Slaganje jezgri:** Otpad se sastoji od deformiranog lima i viškova.

4. KVANTIFIKACIJA i ANALIZA UTROŠENOG MATERIJALA U PROCESU POPREČNOG REZANJA

Jedno od osnovnih ciljeva Lean Six Sigma je eliminirati otpad i stvoriti najučinkovitiji mogući sustav. Kako bi se to ostvarilo i uspješno osigurati zadovoljstvo korisnika proces je potrebno kvantificirati i analizirati te, pronaći način kako smanjiti varijaciju i spustiti sveukupni prosjek i očekivane vrijednosti troškova.

Kako bi se popratila i snimilo stanje proizvodnje tijekom poprečnog rezanja potrebni su podaci koji se nalaze u izvješćima-poprečno rezanje limova jezgara transformatora. Izvještaji sadrže sve bitne informacije koje su potrebne kako bi se mogla usporediti očekivana količina lima sa utrošenom količinom.

Kroz analizu izvješća moći će se popratiti razlika idealne i stvarne utrošenosti lima kroz različite parametre poput stroja, vrsta dobavljača, širine i debljine trake lima te ustvrditi je li postoji korelacija koja uzrokuje dodatno odstupanje unutar proizvodnje po tim parametrima.

4.1. Analiza po stroju

Jedan od najočitijih i najlakše razumljivijih načina za utvrditi gdje dolazi do prekomjerne količine škarta je da se rezultata strojeva međusobno usporede i utvrdi koja su optimalna rješenja za proizvodnju.

1. korak -Odabrati vrstu raspodjele(statističku metodu) i provjeriti njenu valjanost
2. korak -Odabrati veličine koje nam daju bitne informacije iz obrade podataka (raspodjela, devijacija, očekivana vrijednost...)
3. korak -Rezultate analizirati i donijet zaključak

4.1.1. Odabir raspodjele

Kako bi se analizirali podatci potrebno ih je smjestiti u određenu distribuciju. Najpoznatija distribucija je normalna, također poznata kao Gaussova raspodjela, to je vrsta kontinuirane raspodjele podatka koja je simetrična oko svog očekivanja (aritmetičke sredine ili μ). Očekivanje označava srednju vrijednost svih mogućih ishoda i predstavlja središte raspodjele. Standardna devijacija(σ) je mjera disperzije podataka, koja pokazuje koliko su vrijednosti udaljene od očekivanja. U normalnoj raspodjeli, većina podataka (oko 68%) nalazi se unutar jedne standardne devijacije od očekivanja, dok se 95% podataka nalazi unutar dvije standardne

devijacije. Grafički prikaz normalne raspodjele ima oblik zvona, gdje je vrh na očekivanju, a krivulje opadaju prema rubovima (slika 6).

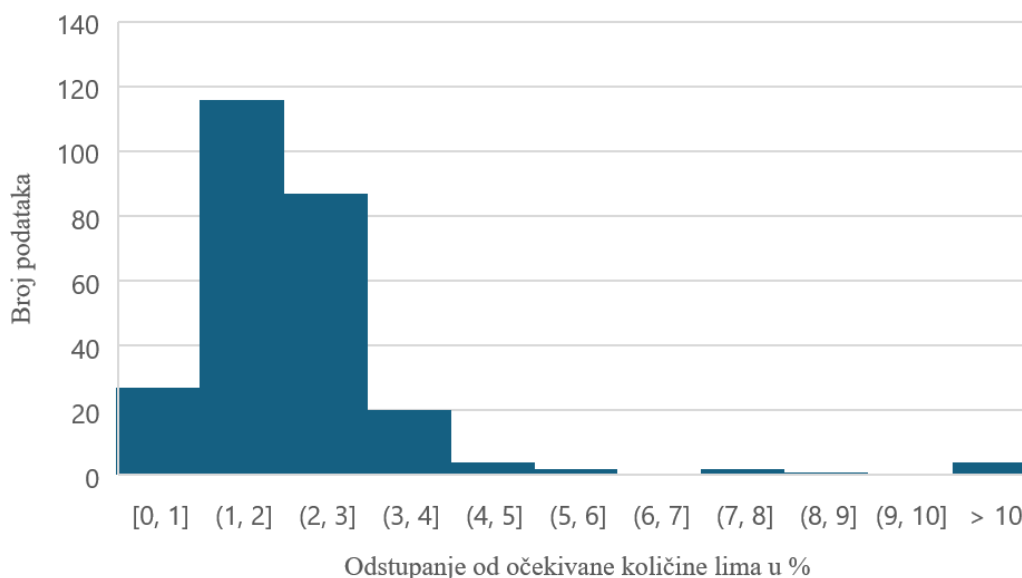
Međutim kako bi se odabrala raspodjela potrebno je vidjeti ponašanje podataka. Zato odabrane podatke treba prikazati u histogramu da se vidi njihovo ponašanje. Podaci će biti prikazani u obliku postotka odstupanja rasknjižene od idealne količine lima (1). Na slici 15 može se vidjeti primjer podatka kako su pretvoreni u mjernu varijablu (x) koja predstavlja odstupanje od očekivane vrijednosti utroška lima koja će se koristiti za daljnju analizu. U analizi po stroju raspoloženo se s 1507 takvih podataka podijeljenih na četiri stroja, što predstavlja dovoljno veliku količinu podataka da se uzorak smatra valjanim, odnosno reprezentativnim.

Tablica 1. Odstupanje od očekivane količine lima x

| Utrošeno(a) | Očekivano(b) | Odstupanje(x) |
|-------------|--------------|---------------|
| 9834,441 | 9636,48 | 2,054287458 |
| 6102,615 | 5962,04 | 2,357833896 |
| 2301,11 | 2267,16 | 1,497468198 |
| 1510,932 | 1487,36 | 1,584821429 |

$$x = ((a/b) - 1) * 100$$

(1)



Slika 15. Histogram podataka odstupanja od očekivane količine lima na stroju 1.

Iz danog grafa na slici 15. vidi se da raspodjela podataka nema simetrični oblik zvona kakvog normalna distribucija nalaže već je njezino težište nagnuto prema nultoj vrijednosti sa dugačkim repom u desnu stranu. Time se može zaključiti da se potencijalno radi o log-normalnoj distribuciji.

Kako bi se osiguralo da je riječ o log-normalnoj distribuciji, potrebno je logaritmirati dane podatke (parametre x) po Eulerovom broju. Zatim, ako se ti podaci mogu opisati normalnom distribucijom, tako bi se transformirane vrijednosti trebale ponašati po normalnoj distribuciji, što znači da bi trebali imati simetričan oblik zvona.

Tablica 2. Logaritmiranje odstupanja (varijable x)

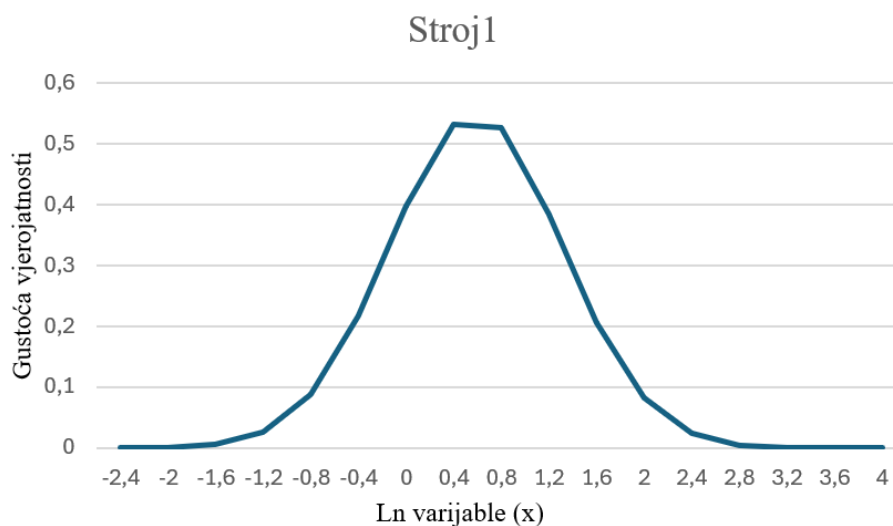
| Utrošeno | Očekivano | Odstupanje | Ln |
|----------|-----------|-------------|-------------|
| 9834,441 | 9636,48 | 2,054287458 | 0,719929052 |
| 6102,615 | 5962,04 | 2,357833896 | 0,857743357 |
| 2301,11 | 2267,16 | 1,497468198 | 0,403775814 |
| 1510,932 | 1487,36 | 1,584821429 | 0,460471738 |
| 826,68 | 814,24 | 1,52780507 | 0,42383211 |

Kako bi logaritmirani podatci bili prikazali u normalnoj distribuciji potrebno je izračunati parametre aritmetičke sredine i standardnu devijaciju(2).

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_i x_i}{n} \text{ and } \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i (x_i - \hat{\mu})^2}{n} \quad (2)$$

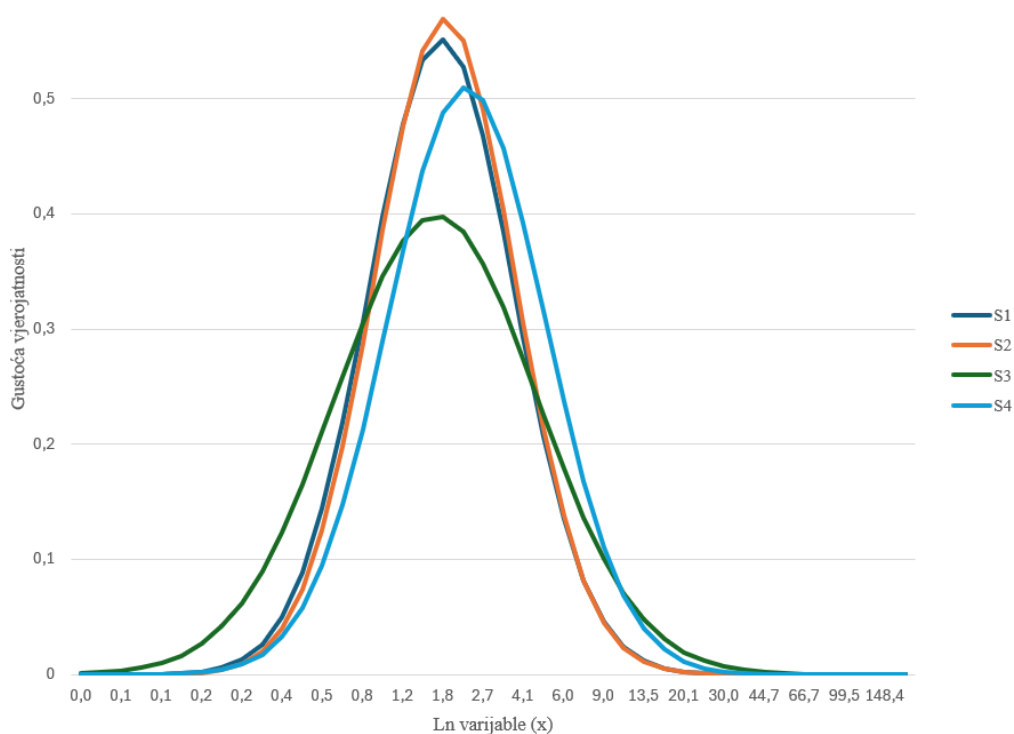
Tablica 3. Parametri strojeva

| | σ | μ |
|--------|----------|---------|
| Stroj1 | 0,72379 | 0,5856 |
| Stroj2 | 0,70117 | 0,61918 |
| Stroj3 | 1,00257 | 0,5389 |
| Stroj4 | 0,78151 | 0,83376 |



Slika 16. Normalna distribucija stroja 1

Iz dobivenog grafa vidljivo je da se logaritmirane vrijednosti varijable x na stroju 1 dobro mogu opisati krivuljom normalne distribucije, što daje zaključiti da podaci potječu iz skupa log-normalnom distribucijom.

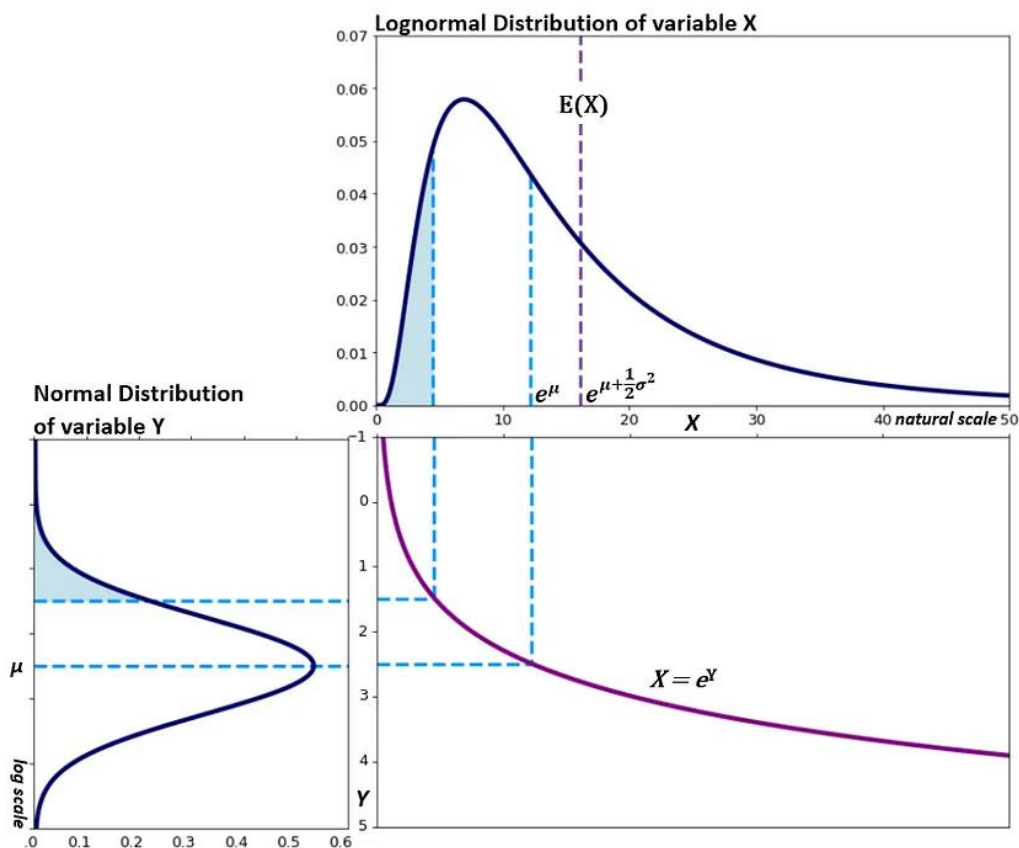


Slika 17. Normalna distribucija logaritmiranih vrijednosti za sva 4 stroja

4.1.2. Log-normalna raspodjela po stroju

Log-normalna distribucija je desna zakošena kontinuirana distribucija vjerojatnosti, što znači da ima dugi rep prema desno. Koristi se za modeliranje različitih prirodnih fenomena kao što su raspodjela prihoda, duljina šahovskih partija ili vrijeme potrebno za popravak sustava koji se može održavati [18].

Naziv "log-normalna" distribucija ukazuje na povezanost s logaritmima i normalnom distribucijom. Ako podaci odgovaraju log-normalnoj distribuciji, uzimanjem logaritma svih podatkovnih točaka te transformirane točke će odgovarati normalnoj distribuciji. To znači da, kada se uzmu logaritmi log-normalnih podataka, rezultirajuća distribucija postaje normalna što se vidi na slici 18.



Slika 18. Odnos normalne i log-normalne distribucije[18]

Podatkovne točke za log-normalnu distribuciju opisane su varijablom x . Kada se log-transformira ta varijabla x ($y=\ln(x)$), dobiva se varijabla y koja je normalno distribuirana.

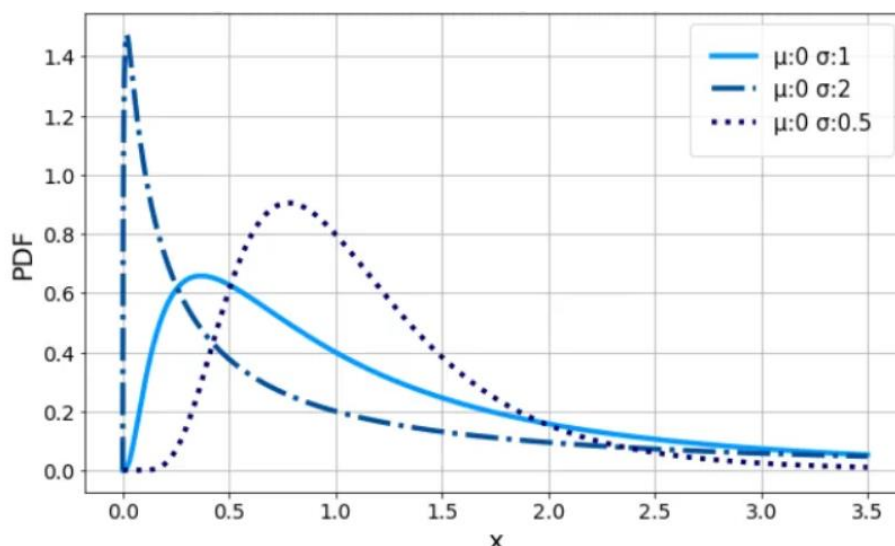
Ovaj proces može se obrnuti tako da se krene od varijable y . Ako y ima normalnu distribuciju i uzme se eksponencijal od y ($x=\exp(y)$), vraća se na varijablu x , koja sada ima log-normalnu distribuciju. Ovaj vizualni prikaz koristan je za razumijevanje važnih svojstava log-normalne distribucije.

Parametri log-normalne distribucije, μ i σ , mogu se procijeniti korištenjem metode procjene maksimalne vjerojatnosti (MLE). Ova metoda je popularna za aproksimaciju parametara distribucije jer pronalazi one parametre koji čine pretpostavljenu distribuciju vjerojatnosti najvjerojatnijom za promatrane podatke. Procjenitelji maksimalne vjerojatnosti za normalnu distribuciju već su prikazani i izračunati u poglavlju 4.1.1., ali ovdje je cilj dobiti procjenitelje maksimalne vjerojatnosti za μ i σ u log-normalnoj distribuciji, koji su:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_k \ln x_k}{n} \quad \text{and} \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_k (\ln x_k - \hat{\mu})^2}{n} \quad (3)$$

Iz slike 24. vidljivo je da je razlika između μ i σ u normalnom i log-normalnom području rezultat logaritmiranja podataka x . Budući da su ti podaci već logaritmirani u testiranju iz poglavlja 4.1.1., jasno je da će μ i σ imati iste vrijednosti, ali će pripadati različitim područjima. μ predstavlja parametar lokacije, a σ parametar razmjera distribucije. Ova dva parametra ne treba brkati s poznatijim pojmovima srednje vrijednosti i standardne devijacije u normalnoj distribuciji.

Kada se logaritamski normalni podaci transformiraju putem logaritma, μ se može smatrati srednjom vrijednošću (transformiranih podataka), a σ standardnom devijacijom (transformiranih podataka). Međutim, bez te transformacije, μ i σ su jednostavno parametri koji definiraju log-normalnu distribuciju, a ne srednja vrijednost ili standardna devijacija.



Slika 19. Utjecaj parametra sigma na oblik krivulje

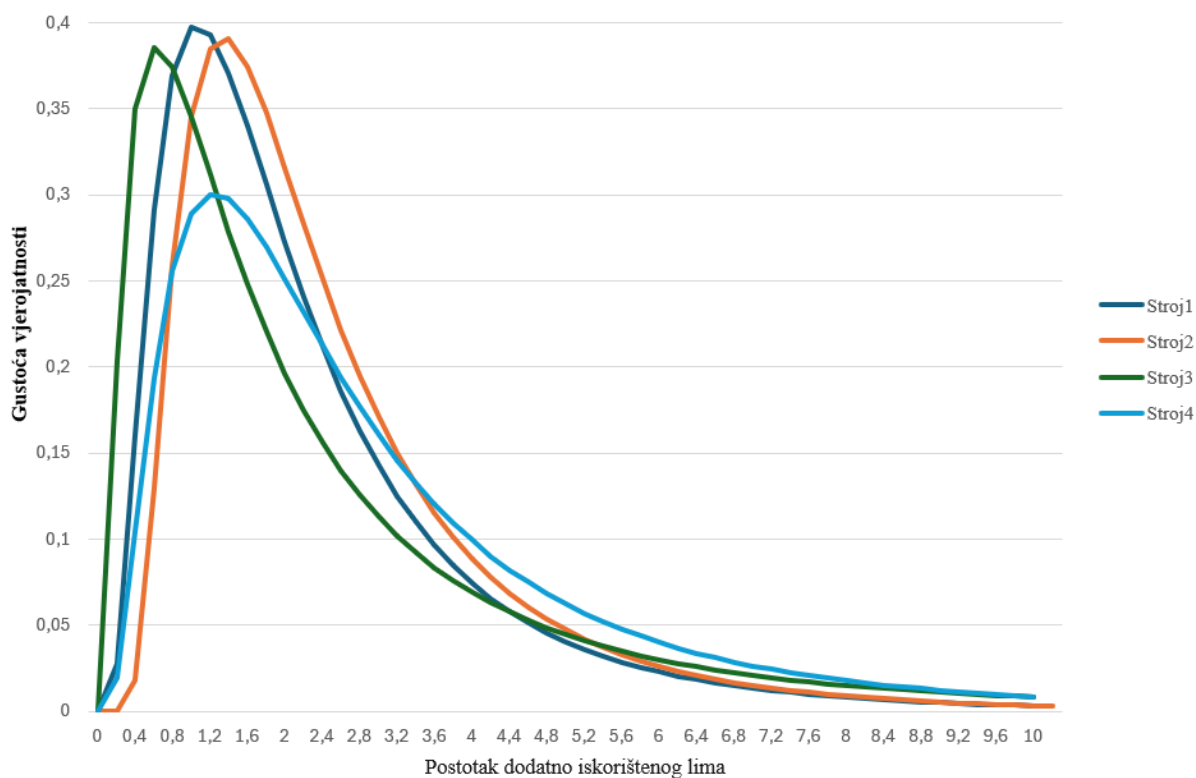
Pomoću parametara μ i σ moguće je izračunati ključne veličine log-normalne distribucije te ih iskoristiti za prikaz i usporedbu ponašanja distribucije na grafu. Veličine koje ćemo izračunavati su medijan (Median), mod (Mode) i srednja teoretska vrijednost (Mean). Medijan se izvodi uzimanjem funkcije log-normalne kumulativne distribucije, postavljanjem na 0,5 i zatim rješavanjem ove jednadžbe ili jednostavnije nam opisuje na kojem parametru x -a se nalazi 50% podataka. Mod predstavlja globalni maksimum funkcije i predstavlja gdje će nam se nalaziti najviše podataka. Srednja vrijednost (također poznata kao očekivana vrijednost) logaritamske normalne distribucije je prosjek ponderiran vjerojatnošću svih mogućih vrijednosti[18].

Tablica 4. Izrazi za izračun medijana, moda i očekivane vrijednosti u log-normalnom području

| Property | Formula |
|----------|--|
| Median | $\text{Med}[X] = e^{\mu}$ |
| Mean | $E[X] = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}$ |
| Mode | $\text{Mode}[X] = e^{\mu - \sigma^2}$ |

Tablica 5. Vrijednosti statističkih parametara na uzorcima po strojevima

| | Medijan | Mod | Očekivanaa vrijednost |
|--------|-------------|-------------|-----------------------|
| Stroj1 | 1,796073084 | 1,063673955 | 2,3339 |
| Stroj2 | 1,857408531 | 1,136036297 | 2,37501 |
| Stroj3 | 1,703841721 | 0,623586311 | 2,81641 |
| Stroj4 | 2,30195277 | 1,249812808 | 3,1241 |



Slika 20. Raspodjela skupova podataka po strojevima

4.1.3. Analiza rezultata i varijance sa jednim promjenjivim faktorom

Iz izračunatih vrijednosti može se primijetiti da stroj 1 i stroj 2 imaju najmanje srednje odstupanje rasknjiženog lima od očekivanog u procesu proizvodnje jezgre transformatora, s odstupanjima od otprilike 2,3% do 2,4%. Nasuprot tome, stroj 3 i stroj 4 pokazuju veća odstupanja, 2,8% i 3,1%, u usporedbi s prva dva stroja. Razlog za veća odstupanja kod strojeva 3 i 4 može se pripisati tehnologiji rezanja. Strojevi 1 i 2 su stariji modeli (iz 2004. i 2007.), dok su strojevi 3 i 4 noviji (iz 2019. i 2023.) i koriste sekvencijalno rezanje, što omogućuje rezanje svih 5 pozicija jezgre transformatora istovremeno. Suprotno tome, strojevi 1 i 2 mogu rezati

samo 2 pozicije. Sekvencijalno rezanje, iako štedi vrijeme, dovodi do dodatnog otpada zbog simultanog rezanja svih 5 pozicija.

Za donošenje zaključka o razmjeru ovih razlika između strojeva, potrebno je provesti analizu varijance sa jednim promjenjivim faktorom. ANOVA (analiza varijance) je ključna metoda za određivanje značajnosti utjecaja promatranih parametara (faktora) na proces. Postoje različite vrste ANOVA-e, kao što su jednosmjerna (koja se koristi u ovom slučaju s jednim faktorom) i višesmjerna ANOVA (koja se primjenjuje kada je prisutno više faktora), ovisno o složenosti eksperimentalnog dizajna.

Tablica 6. Tablica ANOVA-e po faktoru strojeva

| <i>Izvor varijacije</i> | <i>Suma kvadrata</i> | <i>Stupnjevi</i> | <i>Srednji kvadrat</i> | <i>F</i> | <i>p-vrijednost</i> | <i>F crit</i> |
|-------------------------|----------------------|------------------|------------------------|----------|---------------------|---------------|
| Između uzoraka | 20,93809131 | 3 | 6,97936377 | 10,37301 | 9,31941E-07 | 2,610847 |
| Unutar uzoraka | 1007,239557 | 1497 | 0,672838716 | | | |
| Ukupno | 1028,177649 | 1500 | | | | |

Iz tablice 6. može se vidjeti da je F-vrijednost 10,37301, dok je kritična F-vrijednost 2,610847. Budući da je F-vrijednost veća od kritične F-vrijednosti, nulta hipoteza, koja tvrdi da nema razlika između srednjih vrijednosti grupa, odbacuje se. Ovo sugerira da postoji statistički značajna razlika između barem jedne od grupa.

P-vrijednost, koja je puno manja od uobičajenog nivoa značajnosti (0,05), dodatno potvrđuje značajnost rezultata. Ovo ukazuje na to da varijacije između grupa nisu slučajne i da se grupe međusobno razlikuju na statistički značajan način.

Kako bi se utvrdilo koja specifična grupa ili grupe značajno odstupaju od drugih, potrebno je provesti post-hoc analizu. Post hoc, što na latinskom znači 'nakon ovoga', odnosi se na statističku analizu provedenu nakon završetka istraživanja i prikupljanja podataka. Nakon što se odbaci nulta hipoteza u ANOVA-i, post-hoc testovi pomažu u identificiranju koje srednje vrijednosti populacije su različite.

Jedan od post-hoc testova koji se koristi nakon ANOVA-e je Fisherov LSD test. Fisherov LSD (najmanje značajna razlika) test je metoda koja uspoređuje srednje vrijednosti u analizama varijance kada postoji više od dvije grupe podataka. Ako ANOVA test pokaže značajnu razliku između grupa, LSD test omogućuje prepoznavanje specifičnih grupa koje se razlikuju. Test

funkcionira tako da izračunava najmanju značajnu razliku između parova grupa. Ako je razlika u sredinama između dvije grupe veća od ove minimalne vrijednosti, zaključuje se da su te dvije grupe značajno različite.

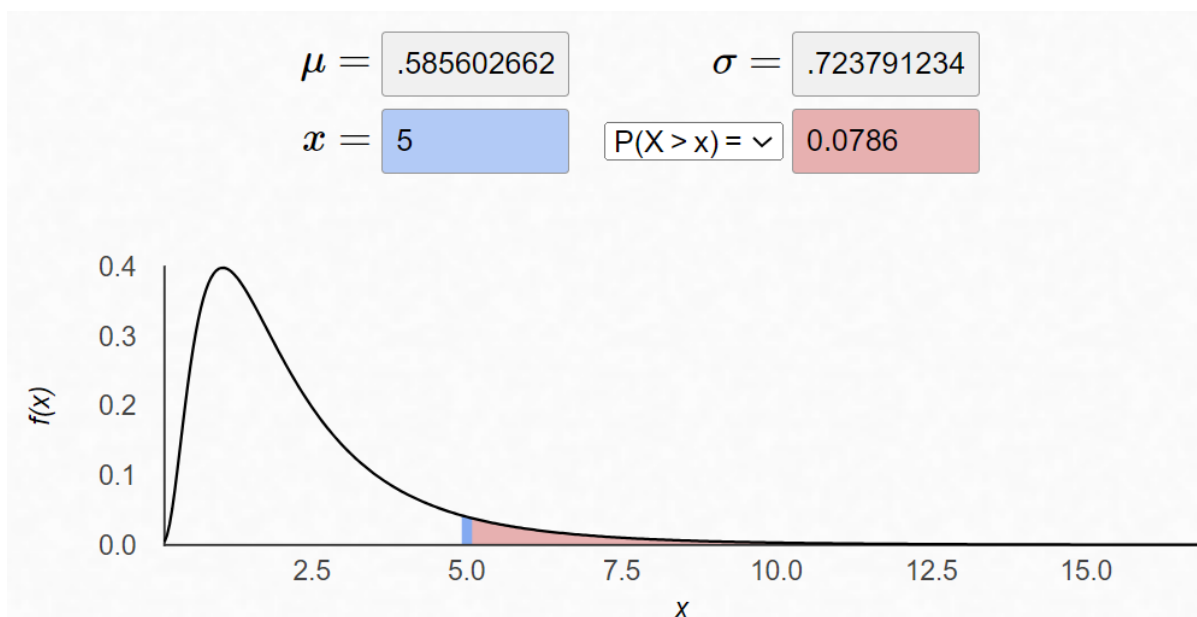
Tablica 7. Fisherov LSD test između strojeva

| | T kritično | 1,96155 | |
|--------|---|----------|------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | Apsolutna razlika prosječne vrijednosti | LSD | |
| 1 sa 2 | 0,033579591 | 0,127544 | Ne možemo odbiti |
| 1 sa 3 | 0,048433029 | 0,126814 | Ne možemo odbiti |
| 1 sa 4 | 0,248155131 | 0,126521 | Odbijamo |
| 2 sa 3 | 0,08201262 | 0,112527 | Ne možemo odbiti |
| 2 sa 4 | 0,21457554 | 0,112196 | Odbijamo |
| 3 sa 4 | 0,29658816 | 0,111365 | Odbijamo |

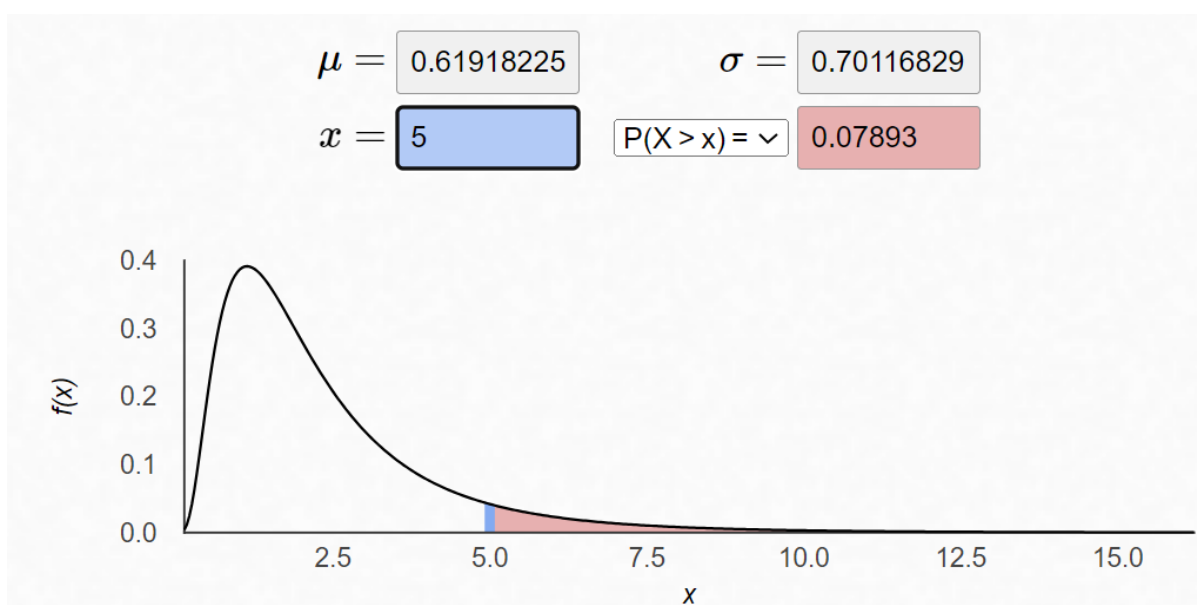
Na temelju Fisherovog LSD testa (Tablica 7.) vidljivo je da se odbija 3 para u kojima je apsolutna razlika veća od LSD, pa se može zaključiti da su te grupe značajno različite. Što se još može zaključiti da ta 3 para uvijek sa sobom sadrže grupu podataka od stroja 4 te time potvrđuje da stroj 4 ima podatke koji su značajno različiti od ostalih strojeva.

4.1.4. Vizualna reprezentacija rasipanja vrijednosti strojeva sa njihovim graničnim vrijednostima.

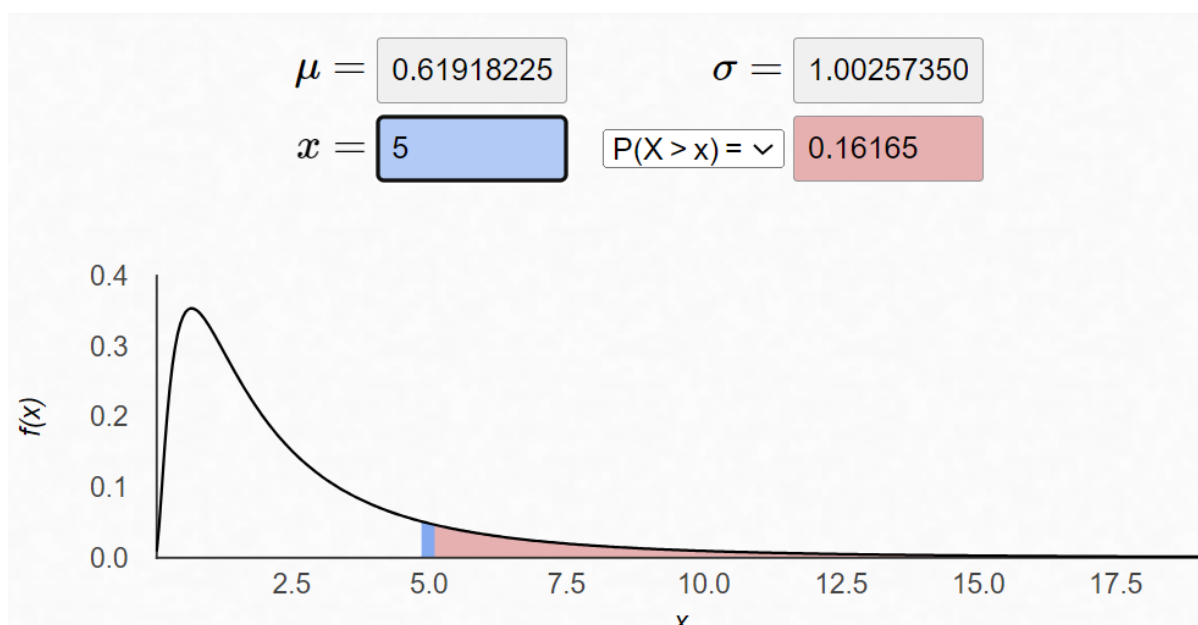
U procesu proizvodnje kako nebi došlo do lutanja u podacima važno je odrediti neku granicu u kojoj se smatra da dolazi do prekomjerne količine pojave dodatnog otpada trafo lima. Zbog toga u proizvodnom pogonu maksimalna granica koja se nebi smjela prelaziti iznosi 5% dodatno iskorištenog lima u odnosu na idealnu količinu.



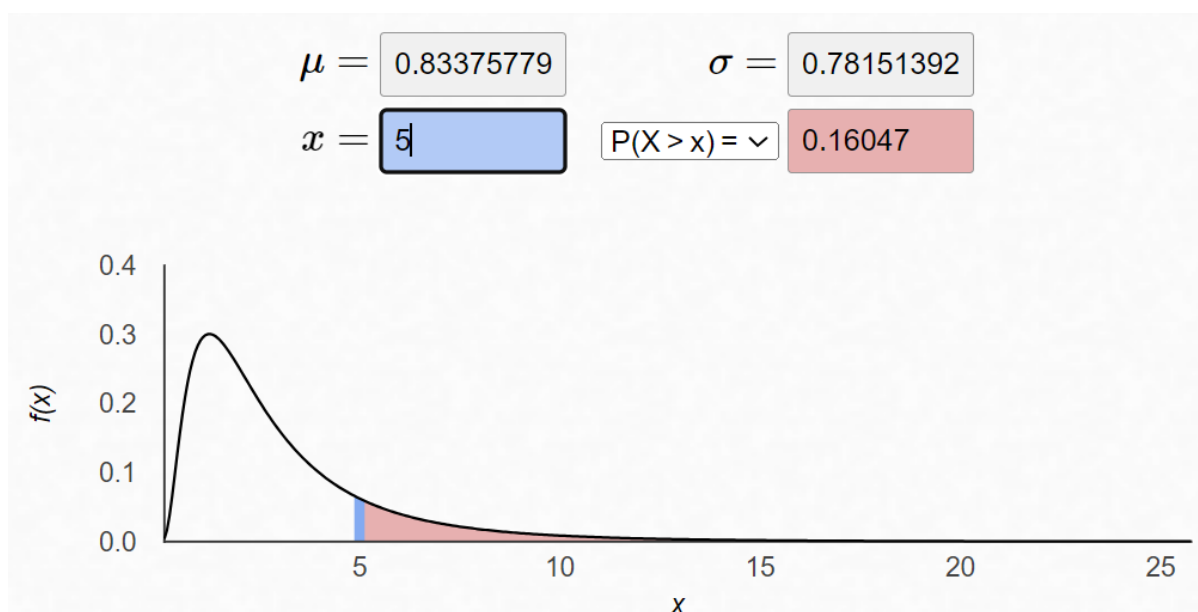
Slika 21. Grafički prikaz udjela dodatnog trafo lima koji prelazi 5% na stroju 1



Slika 22. Grafički prikaz udjela dodatnog trafo lima koji prelazi 5% na stroju 2



Slika 23. Grafički prikaz udjela dodatnog trafo lima koji prelazi 5% na stroju 3



Slika 24. Grafički prikaz udjela dodatnog trafo lima koji prelazi 5% na stroju 4

Na slikama 21., 22., 23. i 24. prikazani su podaci u grafu na temelju očekivane vrijednosti i standardne devijacije u log-normalnoj distribuciji. U tim grafovima je izračunata i vizualno prikazana vjerojatnost da postotak dodatno iskorištenog lima od idealne procjene premašuje

5%. Stroj 3 i 4 imaju najveću šansu pojave dodatno iskorištenog lima preko 5% te time dokazuju da u budućnosti ako će se vršiti optimizacija na temelju dodatno utrošenog lima treba glavni fokus biti na ta dva stroja, pogotovo stroj 4 pošto njegov uzorak ne prati uzorke otpada druga 3 stroja.

4.2. Analiza po proizvođaču trake lima

Analiza odabira proizvođača transformatorskog lima prema parametru dodatnog postotka škarta tijekom obrade je ključna iz nekoliko razloga. Prvo, viši postotak škarta direktno povećava troškove proizvodnje jer se više materijala gubi, što zahtijeva nabavku dodatnog lima za postizanje istih proizvodnih ciljeva. Drugo, veći škart ukazuje na lošiju kvalitetu materijala ili neusklađenost sa proizvodnim procesima, što može rezultirati češćim kvarovima i smanjenjem pouzdanosti konačnog proizvoda. Treće, manji škart doprinosi održivijem poslovanju, smanjujući otpad i negativan utjecaj na okoliš. Stoga, izbor proizvođača s nižim postotkom škarta može značajno poboljšati ekonomsku efikasnost, kvalitetu proizvoda i ekološku održivost proizvodnje transformatora. Analiza ovih parametara omogućava donošenje informiranih odluka koje optimiziraju ukupne performanse i dugoročnu profitabilnost poduzeća.

4.2.1. Odabir raspodjele po proizvođaču

Postupak računja i analize bit će isti kao u poglavlju 4.1, što uključuje analizu pomoću log-normalne distribucije. Histogram će se praviti, a logaritmirani podaci će se obraditi u normalnoj distribuciji kako bi se potvrdila log-normalna distribucija. Dok su u poglavlju 4.1. grafovi i parametri razmjera distribucije korišteni za uočavanje područja s dodatnim otpadom lima i utjecaj na njih, u ovom slučaju ne može se izravno utjecati na kvalitetu proizvodne trake. Umjesto toga, fokus će biti na odabiru proizvođača.

Stoga će se analiza usmjeriti na varijancu i očekivanu teoretsku vrijednost, umjesto na grafove raspodjele.

Važno je napomenuti pri proizvodnji jezgre transformatora dopušteno je koristiti više proizvođača unutar jednog radnog naloga. Zbog toga na našem izvješću će se često pojavljivati da za istu širinu trake su korištena dva ili više proizvođača ili jednostavnije podatak o rasknjiženoj i očekivanoj količini lima se dijeli na dva ili više proizvođača . Zbog toga veliki broj podataka će biti odbačeno te neće imati toliku točnost kao 4.1..

Tablica 8. Prikaz proizvođača u radnome nalogu

| IZREZAN TRANSFORMATORSKI LIM: | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------------|--------------|---------------------------|--|--|
| UKUPNO: | | | | | 33083.21 | GENERIRAJ IZVJEŠTAJ | | | | |
| R.b r. | Broj dijela trake | Opis trake | Širina trake (mm) | Debljina (mm) | Masa trake (kg) | Duljina trake (m) | Oznaka trake | Dobavljač | | |
| 1 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 383.21 | 1473 | SUM240106B | SUMITOMO DEUTSCHLAND GMBH | | |
| 2 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 504.42 | 1930 | SUM240496B | B | | |
| 3 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 459.33 | 1753 | SUM240422B | B | | |
| 4 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 543.26 | 2080 | SUM240112B | B | | |
| 5 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 64.65 | 246 | AKS240359D | B | | |
| 6 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 209.30 | 805 | SUM240106C | A | | |
| 7 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 569.81 | 2197 | BAO230211C | B | | |
| 8 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 632.78 | 2430 | SUM240105C | C | | |
| 9 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 636.20 | 2426 | SUM240484D | B | | |
| 10 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | 652.97 | 2490 | SUM240484B | B | | |

| IZREZAN TRANSFORMATORSKI LIM: | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|----------|
| UKUPNO: | | | | | 0.00 | 33083 | 32490 | 145957 | 145188 | Napomena |
| R.b r. | Broj dijela trake | Opis trake | Širina trake (mm) | Debljina (mm) | NAPOMENA UZ TRAKU | Rasknjižena masa [kg] | Očekivana masa [kg] | Rasknjižena duljina [m] | Očekivana duljina [m] | |
| 1 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | | 13567 | 13296.96 | 52002 | 51912 | |

Slika 25. Prikaz sučelja podataka za širinu trake lima 155mm

Postoji 14 različitih proizvođača bali trafo lima od kojih je njih 5 najjačih čini preko 95% proizvodnje. Tih 5 proizvođača neće se imenovati u ovom završnom radu već će biti označeni A, B, C, D, E.

Za proizvođača A izuzeto je 77 podataka, za proizvođača B 208 podataka, proizvođača C 99 podataka, za D 68 podataka i zadnjeg proizvođača E 53 podatka. Ovo u sumi nam daje 505 podataka što je za trećinu manje nego u prošloj analizi ali, zadržava uvjete dovoljne veličine i reprezentativnosti uzorka.

Iz jednadžbe (3) korištene u 4.1.2. moguće je odrediti parametre prikazane u tablici 9.

Tablica 9. Statistički parametri uzoraka po proizvođaču

| Proizvođač | σ | μ |
|------------|-------------|-------------|
| A | 0,870779238 | 0,579302563 |
| B | 0,751291644 | 0,736248161 |
| C | 0,661625649 | 0,526074685 |
| D | 0,529803077 | 0,602676133 |
| E | 0,507407901 | 0,788307956 |

Parametri iz tablice 9. upotpunjeni su teoretskim očekivanim vrijednostima, a dani su u tablici 10.

Tablica 10. Očekivane teoretske vrijednosti po proizvođaču

| Proizvođač | σ | μ | Mean |
|------------|-------------|-------------|---------|
| A | 0,870779238 | 0,579302563 | 2,6076 |
| B | 0,751291644 | 0,736248161 | 2,76895 |
| C | 0,661625649 | 0,526074685 | 2,10633 |
| D | 0,529803077 | 0,602676133 | 2,10228 |
| E | 0,507407901 | 0,788307956 | 2,50187 |

4.2.2. Analiza dobivenih podataka i varijance sa jednim promjenjivim faktorom

Iz izračunatih podataka uočava se da razlike u odstupanju nisu toliko velike kao u poglavlju 4.1, te se nalaze u rasponu od 2,1% do 2,77%. Na temelju ovih rezultata moglo bi se zaključiti da su proizvođači C i D optimalni i da bi se trebali preferirati. Međutim, količina škarta nije jedini kriterij za odabir proizvođača transformatorskog lima. Cijena je također važan faktor. Iako niža cijena može biti privlačna, ne smije doći na račun kvalitete i pouzdanosti.

Jedan od važnih ekonomskih pojmova u Lean metodologiji je Točno-Na-Vrijeme (eng. just-in-time – JIT), strategija koja se fokusira na smanjenje troškova u proizvodnji. Ova strategija postiže kraće vrijeme skladištenja dijelova, repromaterijala ili sirovina, ili potpuno izbjegavanje skladištenja, te omogućuje njihovu brzu integraciju u proizvodni proces. Pri odabiru optimalnog proizvođača transformatorskog lima, osim količine škarta, važno je uzeti u obzir pouzdanost proizvođača i njegovu fleksibilnost.

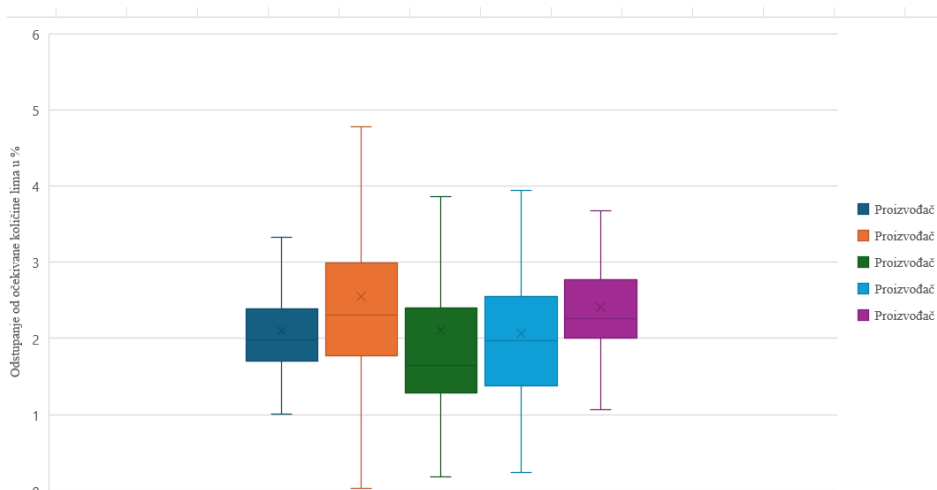
Kako bi se odredila značajnost utjecaja parametra proizvođača, potrebno je provesti analizu varijance (ANOVA), posebno s obzirom na to da su vrijednosti u ovom slučaju manje od onih u poglavlju 4.1.

Tablica 11. Tablica ANOVA-e po faktoru proizvođaču

| ANOVA | | | | | | |
|------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|----------|--------------|----------|
| Izvor varijacije | Suma kvadrata odstupanja | Stupnjevi slobode | Srednji kvadrat odstupanja | F | p-vrijednost | F crit |
| Između uzoraka | 4,854026891 | 4 | 1,213506723 | 2,439451 | 0,046129501 | 2,389911 |
| Unutar uzoraka | 246,7355439 | 496 | 0,497450693 | | | |
| Ukupno | 251,5895708 | 500 | | | | |

Na temelju rezultata ANOVA testa u tablici 11, gdje je izračunata F-vrijednost 2,439451, a kritična F-vrijednost 2,389911, može se zaključiti da postoji statistički značajna razlika između očekivanih vrijednosti grupa. Budući da je F-vrijednost veća od kritične F-vrijednosti, nulta hipoteza se odbacuje na razini značajnosti od 5%.

P-vrijednost iznosi 0,046129501, što je manje od alfa nivoa od 0,05, što dodatno potvrđuje statističku značajnost razlika između grupa, iako su te razlike manje značajne u usporedbi s prethodnim ANOVA testom po stroju. Ovi rezultati sugeriraju da se srednje vrijednosti barem jedne grupe razlikuju od drugih, ali razlika nije drastična jer se p-vrijednost (0,046129501) nalazi blizu alfa nivoa od 0,05.



Slika 26. Box Plot dijagram prosječnog odstupanja dodatne količine trafo lima po proizvođaču



Slika 27. Legenda Box plot dijagrama

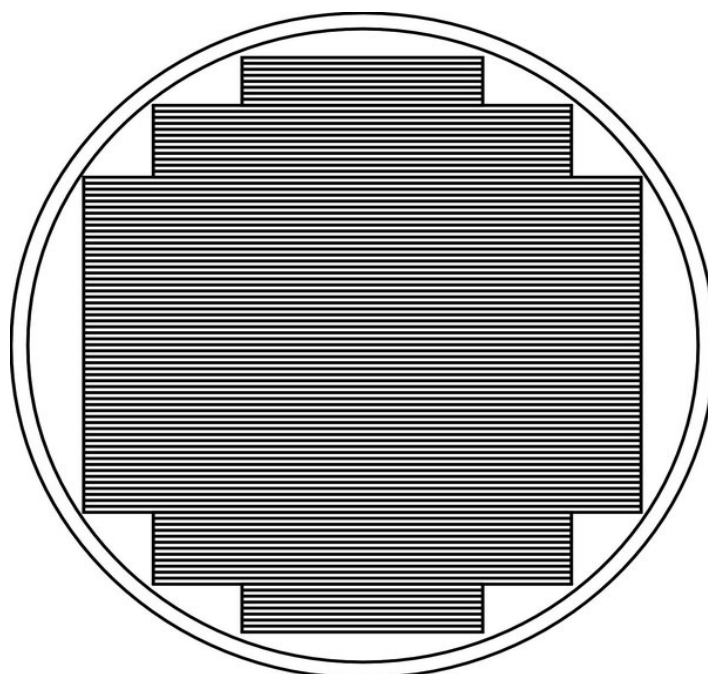
Na box plotu su prikazane raspodjele prosječnog odstupanja dodatne količine trafo lima za različite proizvođače (Proizvođač 1 do Proizvođač 5). Svaka kutija predstavlja interkvartilni raspon (IQR), koji uključuje srednjih 50% podataka (od 25. do 75. percentila), dok su "brkovi" (linije iznad i ispod kutije) definirane kao minimalna i maksimalna vrijednost unutar određenog raspona. Na temelju dijagrama i tablice 11. može se zaključiti kako odabir proizvođača utječe na varijabilnost te može utjecati na količinu utrošenog lima međutim značajnost tog utjecaja je puno manja nego utjecaj stroja preko kojeg režemo lim. Zbog toga pri optimizaciji proizvodnje i odabiru utjecajnih parametara na troškove, prvo će se fokusirati na utjecaj stroja pa potom na utjecaj proizvođača.

4.3. Analiza po širini trake lima,

Idući faktor koji može potencijalno utjecati na količinu pojave dodatnog škarta trafo lima je širina trake lima. Kako je već ustanovljeno jezgra transformatora se sastoji od 3 stupa i 2 jarma. Svaka od tih pozicija u poprečnom presjeku pokušava imitirati ovalni oblik radi optimalnije raspodjele kružnog toka, minimiziranja gubitaka uslijed vrtložnih struja, mehaničke stabilnosti i drugo... te zato kako bi pozicija dobila kružni presjek ona se slaže u limovima različitih širina počevši od najmanje širine prema najvećoj i onda opet nazad prema najmanjoj što se vidi na slikama 30. i 31.



Slika 28. Pozicija jezgre transformatora



Slika 29. Poprečni presjek pozicije jezgre transformatora

Ideja ove analize je utvrditi je li postoji korelacija između širine trake i otpada koji nastaje, kako utječe povećanje širine trake lima na količinu dodatno nastalog škarta i koji su načini na koje se to područje može proizvodnje unaprijediti.

4.3.1. Raspodjela po širini trake

U ovom slučaju opet će se koristiti log-normalnu raspodjelu kako bi se numerički popratila utrošenost materijala u procesu poprečnog rezanja ali ovaj put kategorizirano po širini trake lima.

Tablica 12. Popis tipova traka i dimenzija

| UKUPNO: | | | | | 0.00 | 16703 | 16358 |
|----------|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------|
| Š. b. r. | Broj dijela trake | Opis trake | Širina trake (mm) | Debljina (mm) | NAPOMENA UZ TRAKU | Rasknjižena masa [kg] | Očekivana masa [kg] |
| 1 | TR-CZ8924-155 | M80-23P5 / SIRINA 155MM | 155 | 0.225 | | 7227 | 7066.8 |
| 2 | TR-CZ8924-145 | M80-23P5 / SIRINA 145MM | 145 | 0.225 | | 4383 | 4288.2 |
| 3 | TR-CZ8924-135 | M80-23P5 / SIRINA 135MM | 135 | 0.225 | | 1661 | 1630.8 |
| 4 | TR-CZ8924-125 | M80-23P5 / SIRINA 125MM | 125 | 0.225 | | 1097 | 1070 |
| 5 | TR-CZ8924-115 | M80-23P5 / SIRINA 115MM | 115 | 0.225 | | 599 | 585.8 |
| 6 | TR-CZ8924-105 | M80-23P5 / SIRINA 105MM | 105 | 0.225 | | 715 | 707.4 |

Na tablici 12. u izvještaju jasno su prikazane rasknjižena i očekivana masa po parametru širine rezne trake. Kao i u poglavlju 4.1, može se zadržati velika količina podataka. Međutim, širine trake poput 195 mm i 205 mm pojavljuju se u manjim količinama, stoga su ti podaci isključeni jer njihova veličina nije dovoljna za garantiranje točnosti izračuna. Konačan broj podataka koji se koristi je 1457.

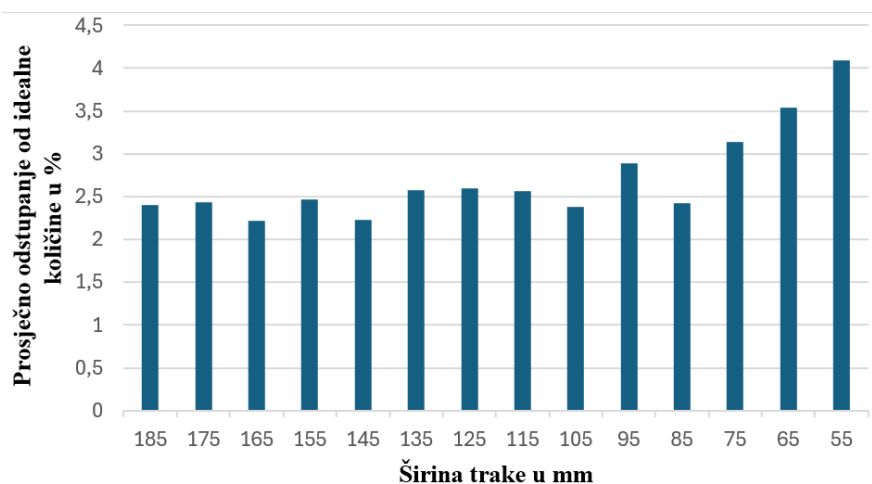
Tablica 13. Skupovi podataka za različite širine traka

| | Broj podataka |
|----------|---------------|
| 185 mm | 24 |
| 175 mm | 48 |
| 165 mm | 79 |
| 155 mm | 120 |
| 145 mm | 121 |
| 135 mm | 125 |
| 125 mm | 127 |
| 115 mm | 124 |
| 105 mm | 130 |
| 95 mm | 132 |
| 85 mm | 124 |
| 75 mm | 112 |
| 65 mm | 104 |
| 55 mm | 87 |
| Σ | 1457 |

Proces obrade podataka je identičan onome u prikazanom u poglavljima 4.1. i 4.2., a rezultati su prikazani u tablici 14. i na slici 29.

Tablica 14. Očekivane vrijednosti po širini trake

| | | | | | | | |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Širina lima | 185 | 175 | 165 | 155 | 145 | 135 | 125 |
| Srednje odstupanje | 2,3998 | 2,42981 | 2,21564 | 2,47056 | 2,22983 | 2,57478 | 2,59475 |
| Širina lima | 115 | 105 | 95 | 85 | 75 | 65 | 55 |
| Srednje odstupanje | 2,56575 | 2,37576 | 2,89259 | 2,42826 | 3,13778 | 3,54263 | 4,09345 |



Slika 30. Prikaz odstupanja po širini trake

4.3.2. Analiza podataka i varijance sa jednim promjenjivim faktorom po širini trafo lima

Iz grafa prema širini može se zaključiti da se vrijednosti većinom kreću oko 2,5%, dok pri manjim širinama trake rastu do 4,1%. Uske trake širine 55 i 65 mm predstavljaju najveći izazov za strojeve za preradu lima. Zbog svoje delikatnosti i zahtjevne obrade, ove trake su najteže za prerađivanje, što objašnjava povećanu potrošnju i najveći postotak otpada. (Pogledati tablicu 12 koja prikazuje količinu željeza potrebno za veće širine u odnosu na manje.)

Tablica 15. Tablica ANOVA-e po faktoru širine trafo lima

| ANOVA | | | | | | |
|------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|---------|--------------|-------------|
| Izvor varijacije | Suma kvadrata odstupanja | Stupnjevi slobode | Srednji kvadrat odstupanja | F | p-vrijednost | F crit |
| Između uzoraka | 10,08743129 | 10 | 1,008743129 | 1,76249 | 0,062931001 | 1,838454183 |
| Unutar uzoraka | 697,6815989 | 1219 | 0,572339294 | | | |
| Ukupno | 707,7690302 | 1229 | | | | |

Iako se očekivane vrijednosti mijenjaju i to značajno prema širini trake, rezultati iz tablice 15 pokazuju da je izračunata F-vrijednost 1,762491, dok je kritična F-vrijednost 1,838454183. Na temelju ovih rezultata, nema dovoljno dokaza za odbacivanje nulte hipoteze na odabranom nivou značajnosti. P-vrijednost iznosi 0,062931001, što je veće od uobičajenog praga značajnosti od 0,05. To znači da se ne mogu potvrditi statistički značajne razlike između srednjih vrijednosti analiziranih grupa. Stoga, razlike između grupa vjerojatno nastaju slučajno, a ne zbog stvarnog efekta.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su proizvodni procesi u reznom centru KONČAR D&ST s ciljem optimizacije efikasnosti i smanjenja otpada koristeći Lean metodologiju i Six Sigma alate. Identificirani su ključni gubici u procesu rezanja trafo lima, uključujući prekomjernu potrošnju materijala i varijacije u proizvodnim parametrima. Analiza je pokazala da noviji strojevi, iako troše više materijala, doprinose značajnim uštedama u vremenu zahvaljujući naprednim tehnikama sekvencijalnog rezanja. Također, statistička analiza ANOVA pokazala je da postoje značajne varijacije među strojevima i proizvođačima lima, što ukazuje na potrebu daljnje optimizacije u odabiru dobavljača i prilagodbi strojeva specifičnim zahtjevima materijala.

Implementacijom Lean metodologije, posebno alata poput 5S i PDCA ciklusa, omogućeno je kontinuirano poboljšanje proizvodnih procesa, dok je Six Sigma pružila statističku osnovu za smanjenje varijacija i optimizaciju kvalitete. Ove metode omogućile su prepoznavanje ključnih područja gdje se mogu postići najveći pomaci u efikasnosti, uključujući smanjenje škarta i poboljšanje protočnosti.

Iako su postignuti značajni rezultati, daljnje optimizacije su potrebne, posebno u primjeni novih tehnologija i automatizacije koje bi dodatno smanjile otpad i povećale produktivnost. Dugoročne preporuke uključuju redovitu reviziju proizvodnih procesa te prilagodbu tehnologijama kako bi se održala konkurentnost poduzeća na tržištu. Primjena Lean Six Sigma metodologija u ovom kontekstu pokazala se opravdanom i nužnom za daljnji razvoj održive i profitabilne proizvodnje.

LITERATURA

- [1] What is Lean methodology PLANVIEW <https://www.planview.com/resources/guide/lean-principles-101/what-is-lean/>
- [2] What is Lean methodology by ATLISSIAN <https://www.atlassian.com/agile/project-management/lean-methodology>
- [3] Six Big Losses in Lean Manufacturing by AUGMENTIR <https://www.augmentir.com/lean-manufacturing/six-big-losses>
- [4] Lekšić I. Model izbora vitkih alata pri restrukturiranju poduzeća [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [5] Lean Thinking and Methods - 5S by EPA <https://www.epa.gov/sustainability/lean-thinking-and-methods-5s>
- [6] 5S Lean alata Miro Hegedić https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/129100/mod_resource/content/0/Lean%20Meand%C5%BEment%205S%20Alat%20Hegedi%C4%87.pdf
- [7] Brza izmjena alata SMED Miro Hegedić https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/129101/mod_resource/content/0/Brza%20izmjena%20alata%20SMED%20-%20MHegedic.pdf
- [8] PDCA (Plan Do Check Act) MIND TOOLS <https://www.mindtools.com/as215i1/pdca-plan-do-check-act>
- [9] PDCA Cycle: What Are the Stages and How Does It Work? By SYDLE <https://www.sydle.com/blog/pdca-cycle-61ba2a15876cf6271d556be9>
- [10] What is Six Sigma by simplilearn <https://www.simplilearn.com/what-is-six-sigma-a-complete-overview-article>
- [11] Six Sigma vs. Lean Six Sigma by Villanova university <https://www.villanovau.com/articles/six-sigma/six-sigma-vs-lean-six-sigma/>
- [12] What is Six Sigma by ASQ <https://asq.org/quality-resources/six-sigma>
- [13] M. Šimić Primjena Lean six sigma alata u poboljšanju proizvodnih procesa [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [14] DMAIC: Approach to Continuous Improvement <https://www.6sigma.us/dmaic-process/>
- [15] <https://www.koncar.hr/hr/koncar-distributivni-i-specijalni-transformatori>
- [16] Transformatori by STEM <https://www.stem.ba/fizika/tutorijali/item/105-transformatori>
- [17] Detaljan opis jezgra transformatora by SCOTECH <http://ba.scotech-electrical.com/info/detailed-description-of-transformer-core-75841309.html>

[18] Log-Normal distribution by Medium <https://towardsdatascience.com/log-normal-distribution-a-simple-explanation-7605864fb67c>

[19] Analiza varijance, Dr. sc. Hrvoje Cajner FSB https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/158616/mod_resource/content/1/Anova_2015.pdf

[20] Significance and use of Post-hoc Analysis studies
<https://www.cwauthors.com/article/significance-and-use-of-post-hoc-analysis-studies>

[21] Fisher's Least Significant Difference (LSD) by GraphPad
https://www.graphpad.com/guides/prism/latest/statistics/stat_fishers_lsd.htm

[22] Raspodjele podataka, Dr. sc. Hrvoje Cajner https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/158614/mod_resource/content/3/Nastavni_materijali/Raspodjele_2018_v3.pdf