

# Primjena računalnih simulacija za vizualizaciju i analizu procesa proizvodnje kombiniranih mjernih transformatora tipa VAU

---

Mikola Krmpotić, Josipa

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:371078>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PRIMJENA RAČUNALNIH SIMULACIJA ZA VIZUALIZACIJU  
I ANALIZU PROCESA PROIZVODNJE KOMBINIRANIH  
MJERNIH TRANSFORMATORA TIPA VAU**

Rijeka, srpanj 2024.

Josipa Mikola Krmpotić

0069078888

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PRIMJENA RAČUNALNIH SIMULACIJA ZA VIZUALIZACIJU  
I ANALIZU PROCESA PROIZVODNJE KOMBINIRANIH  
MJERNIH TRANSFORMATORA TIPA VAU**

Mentor: Doc. dr. sc. David Ištoković

Komentor: Prof. dr. sc. Mladen Perinić

Rijeka, srpanj 2024.

Josipa Mikola Krmpotić

0069078888

Rijeka, 11.03.2024.

Zavod:                   Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment  
Predmet:                Računalna simulacija proizvodnih procesa

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik:           **Josipa Mikola Krmpotić (0069078888)**  
Studij:                Sveučilišni diplomski studij strojarstva (1100)  
Modul:                 Industrijsko i proizvodno inženjerstvo (1121)  
Zadatak:              **Primjena računalnih simulacija za vizualizaciju i analizu procesa proizvodnje kombiniranih mjernih transformatora tipa VAU / Application of computer simulations for the visualization and analysis of the production process of combined instrument transformers - type VAU**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno obrazložiti mogućnost primjene računalnih simulacija u svrhu analize proizvodnih procesa te prikazati prednosti i nedostatke. Klasificirati metode simulacije. Opisati osnovne značajke simulacije diskretnih događaja i kontinuirane simulacije. Objasniti odabrani proizvodni proces te opisati njegove značajke (proizvodni program, redoslijed i vremena operacija, raspored radnih mjesta, transportna sredstva, međuskладиšta). Izraditi simulacijski model odabranog proizvodnog procesa unutar softvera Tecnomatix Plant Simulation. Provesti postupke verifikacije i validacije na izrađenom simulacijskom modelu. Prikazati i analizirati rezultate dobivene provedenim simulacijskim eksperimentima. Predložiti moguća poboljšanja.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku:    20.03.2024.

Mentor:  
doc. dr. sc. David Ištoković

Komentor:  
prof. dr. sc. Mladen Perinić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod nazivom „Primjena računalnih simulacija za vizualizaciju i analizu procesa proizvodnje kombiniranih mjernih transformatora tipa VAU“ izradila samostalno sukladno Pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija, članak 11., Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci pod mentorstvom doc. dr.sc. Davida Ištokovića i komentora, prof. dr. sc. Mladena Perinića koristeći se vlastitim znanjem, literaturom i provedenim istraživanjima.

Rijeka, srpanj 2024.

Potpis

Josipa Nikola K.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr.sc. Davidu Ištokoviću i komentoru, prof. dr. sc. Mladenu Periniću, na stručnom vodstvu, izdvojenom vremenu, danim savjetima i smjernicama za izradu ovog diplomskog rada.

Želim se zahvaliti i svim djelatnicima poduzeća KONČAR – Mjerni transformatori na pomoći i vremenu koje su nesebično izdvojili tijekom izrade ovog diplomskog rada a posebno se želim zahvaliti rukovoditelju Odjela tehnologije, Ivanu Janjišu i timu Tehnologije na pruženim idejama, savjetima i pomoći.

Velika zahvala ide mojoj obitelji, suprugu i prijateljima na neizmjernom strpljenju, razumijevanju, bodrenju i pruženoj podršci na putu do cilja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KONČAR - MJERNI TRANSFORMATORI.....	3
2.1. Proizvodni program tvrtke .....	3
2.2. Kombinirani transformator - tip VAU .....	4
2.3. Proizvodni procesi za izradu transformatora tipa VAU .....	7
2.4. Proizvodni proces po fazama .....	10
3. RAČUNALNA SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA.....	12
3.1. Prednosti i nedostaci računalne simulacije.....	12
3.2. Metode simulacije .....	14
3.2.1. Monte Carlo metoda.....	15
3.2.2. Kontinuirana simulacija .....	15
3.2.3. Simulacija zasnovana na agentima.....	16
3.2.4. Simulacija diskretnih događaja .....	17
3.3. Koncept simulacije .....	19
3.4. Simulacijski alati .....	20
3.4.1. Tecnomatix Plant Simulation .....	21
4. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA .....	22
4.1. Postavljanje skladišta repromaterijala .....	28
4.2. Postavljanje ulaznih i izlaznih metoda za radne stanice .....	29
4.3. Objekt „Montažna stanica“ .....	34
4.4. Postavljanje vremena operacija .....	35
4.5. Provjera ispravnosti izrađenog simulacijskog modela .....	37
4.5.1. Verifikacija simulacijskog modela.....	40
4.5.2. Validacija simulacijskog modela .....	44
4.6. Određivanje iskoristivosti proizvodnih kapaciteta i identifikacija uskog grla.....	45

5. UNAPRJEĐIVANJE OSNOVNOG SIMULACIJSKOG MODELA I USPOREDBA SIMULACIJSKIH MODELA.....	49
5.1. Prva varijanta - unaprjeđivanje prema planovima tvrtke .....	49
5.2. Druga varijanta – unaprjeđivanje osnovnog simulacijskog modela prema provedenim analizama iskoristivosti proizvodnih kapaciteta .....	52
5.3. Usporedba simulacijskih modela .....	53
6. ZAKLJUČAK .....	58
LITERATURA.....	60
POPIS SLIKA .....	61
POPIS TABLICA.....	63
SAŽETAK.....	64



## 1. UVOD

Transformatori su električni uređaji koji se koriste za promjenu napona i struje u elektroenergetskom sustavu. Dizajnirani su za korištenje izmjenične struje. Osnovna svrha transformatora je prijenos električne energije između različitih dijelova elektroenergetskog sustava. Uloga transformatora u prijenosu električne energije je da prilagođavaju električnu energiju kako bi zadovoljili različite potrebe potrošača, osiguravajući da svaki uređaj prima točno onoliko energije koliko mu je potrebno za pouzdani i siguran rad. Postoji nekoliko vrsta transformatora a neke od njih su energetski transformatori, autotransformatori, mjerni transformatori, itd.

Mjerni transformatori se koriste za mjerenje struje ili napona u električnom sustavu. Glavna svrha mjernih transformatora je osigurati precizno mjerenje struje ili napona u električnom sustavu za potrebe nadzora, upravljanja i zaštite elektroenergetskih mreža. Koriste se za izoliranje mjernih i zaštitnih uređaja od visokog napona te za smanjivanje napona i struje do sigurnosnog raspona koji je prilagođen mjernim i zaštitnim uređajima unutar definiranog razreda točnosti.

Za potrebe ovog diplomskog rada promatrati će se proizvodni procesi izrade kombiniranih mjernih transformatora tipa VAU u tvrtki KONČAR - Mjerni transformatori kako bi se dobili svi potrebni podaci za izradu simulacijskog modela odabranog proizvodnog procesa unutar softvera Tecnomatix Plant Simulation. Proizvodni proces je sustavni niz koraka ili aktivnosti koje se poduzimaju kako bi se sirovine ili ulazni resursi pretvorili u gotove proizvode ili usluge. Ovaj proces obično uključuje kombinaciju ljudskog rada, opreme, tehnologije i drugih resursa kako bi se postigli određeni ciljevi proizvodnje. Glavni ciljevi proizvodnog procesa uključuju efikasnost, kvalitetu proizvoda, smanjenje troškova i zadovoljstvo potrošača. Proces može biti različit u ovisnosti od vrste proizvoda ili usluge koja se proizvodi, kao i od industrije u kojoj se proces odvija.

Računalna simulacija je proces modeliranja i analize ponašanja stvarnog sustava ili procesa pomoću računalnih programa ili softvera. Ova tehnika omogućuje simuliranje dinamike, ponašanja ili karakteristika stvarnog sustava putem matematičkih modela koji se izvršavaju na računalu. Računalna simulacija može imati širok raspon primjena u različitim područjima, uključujući znanstvena istraživanja, inženjering, financije, medicinu, obrazovanje i mnoga druga područja. Može biti snažan alat koji omogućuje analizu složenih sustava, testiranje različitih

scenarija i donošenje informiranih odluka prije stvarnog implementiranja ili intervencije u stvarnom svijetu.

Cilj diplomskog rada je dobivanje podataka o stvarno potrebnom vremenu za izradu kombiniranih uljnih transformatora tipa VAU te izraditi simulaciju proizvodnog procesa aktivnog dijela kombiniranih uljnih transformatora kako bi se mogle donesti odluke o mogućem poboljšanju proizvodnog procesa.

## **2. KONČAR - MJERNI TRANSFORMATORI**

KONČAR - Mjerni transformatori su jedan od 14 društava unutar KONČAR grupe. Grupa KONČAR - Mjerni transformatori preko 75 godina proizvodi mjerne transformatore na temelju vlastitih iskustava i razvoja kako bi se kupcima omogućile značajne prednosti. Trenutni broj zaposlenika je oko 335 od čega je najveći broj ljudi zaposlen u proizvodnom pogonu.

KONČAR - Mjerni transformatori izvozi 95% kapaciteta. Neke od zemalja koje čine prodajno tržište proizvedenih kapaciteta su: SAD, Australija, Novi Zeland, Njemačka, Francuska, Slovenija, Poljska, Nizozemska, Češka, Španjolska, Austrija, Filipini, Kanada, Srbija, Mađarska, Litva, Estonija, Grčka itd.

### **2.1. Proizvodni program tvrtke**

Proizvodni program tvrtke KONČAR - Mjerni transformatori može se podijeliti na:

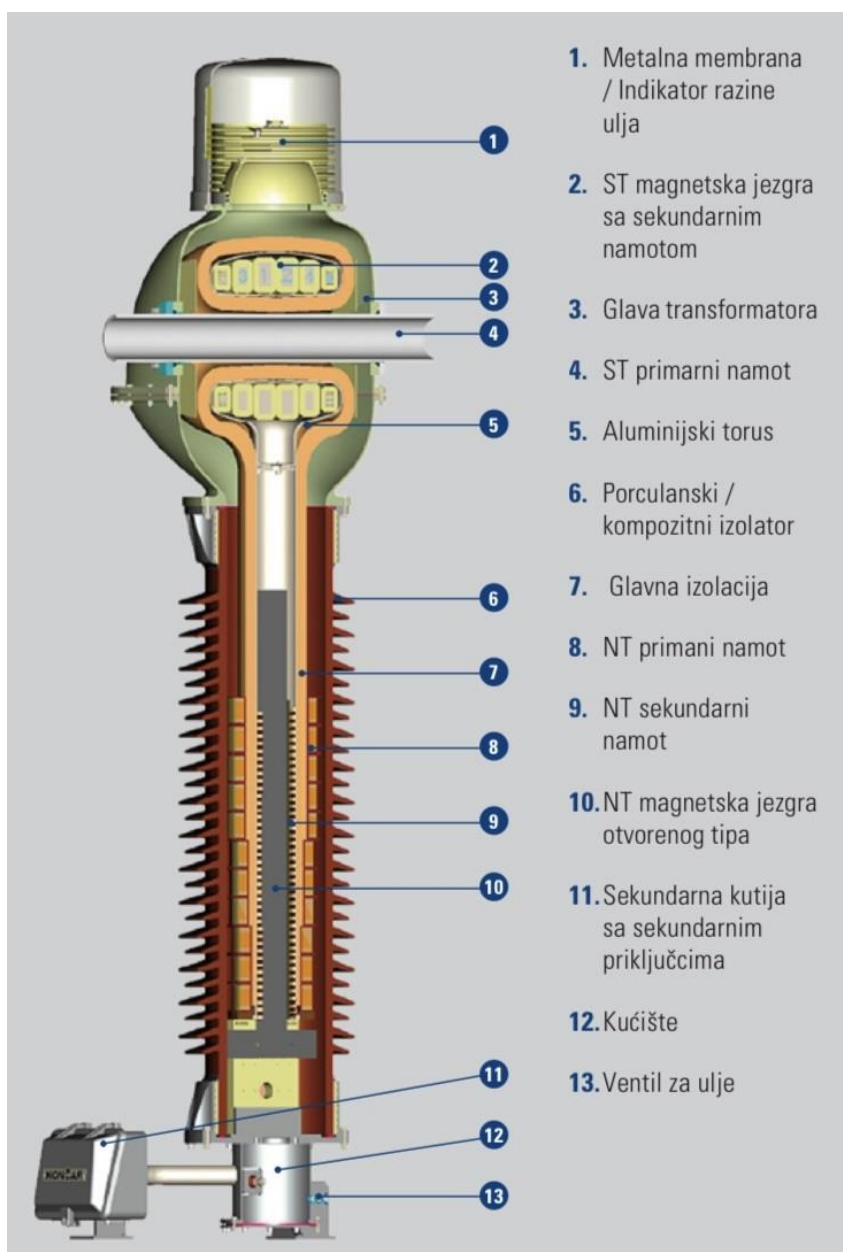
- visokonaponski uljem izolirani mjerni transformatori,
- srednje naponski mjerni transformatori,
- specijalni mjerni transformatori. [1]

Visokonaponski uljem izolirani mjerni transformatori imaju važnu ulogu u prijenosnoj, odnosno distribucijskoj mreži, gdje se koriste za izoliranje mjernih i zaštitnih uređaja od visokog napona, kao i za transformaciju mjerenih struja i napona na iznos prilagođen mjernim i zaštitnim uređajima unutar definiranog razreda točnosti. Njih se može podijeliti na:

- strujne transformatore – tip AGU,
- naponske transformatore – tip VPU,
- kombinirane transformatore – tip VAU,
- kapacitivne naponske transformatore – tip VCU,
- naponske transformatore velike snage – tip VPT. [1]

## 2.2. Kombinirani transformator - tip VAU

Vrsta visokonaponskog mjernog transformatora koji je dizajniran kao kombinacija strujnog mjernog transformatora tipa AGU i naponskog mjernog transformatora tipa VPU. Kombinirani mjerni transformatori koriste se za prilagodbu mjerenih visokih struja i napona na iznose unutar definirane točnosti pogodne za priključak uređaja za mjerenje, zaštitu i upravljanje. Ujedno izoliraju priključene uređaje od visokog napona mreže. Kombinirani transformator sastoji se od dvije mjerne jedinice: induktivnog naponskog transformatora i strujnog transformatora. [2]



Slika 2.1. Crtež presjeka kombiniranog mjernog transformatora [2]

Aktivni dio strujnog transformatora nalazi se unutar glave transformatora, izrađene od lijevanog aluminijskog. Ista je dizajnirana anatomski sa ciljem da se postigne minimalno potrebna količina ulja. Svaki odljev provjeren je na nepropusnost ispitivanjem helijem. Aktivni dio strujnog transformatora sastoji se od motanih prstenastih jezgara u aluminijskom kućištu (torusu), aluminijskog ili bakrenog primarnog namota te glavne izolacije. Transformator sadrži jezgre namijenjene uređajima za mjerenje ili zaštitu, prema zahtjevu. Ovisno o traženim karakteristikama, mogu biti izrađene od hladno valjanog orijentiranog magnetskog lima, mekih magnetskih materijala ili amorfnih materijala. Jezgre sa sekundarnim namotima smještene su unutar zaštićenog kućišta od lijevanog aluminijskog.

Magnetska jezgra naponskog transformatora je štapnog oblika složena od hladno valjanih transformatorskih limova. Izvedba otvorene jezgre osigurava lineariziranu magnetsku karakteristiku transformatora, koja eliminira mogućnost ferorezonancije u energetsom sustavu. Sekundarni namoti izvedeni su od visokokvalitetne lakirane bakrene žice, motane direktno na jezgru u direktnom kontaktu s uljem. Izvedba namota omogućava kontroliranu raspodjelu magnetskog toka u jezgri kao i kompenzaciju utjecaja struje magnetiziranja na kutnu pogrešku. Jedna od prednosti izvedbe s otvorenom jezgrom leži u činjenici da se primarni namot sastoji od većeg broja međusobno odvojenih sekcija, jednoliko raspoređenih po visini transformatora. To osigurava kontroliranu raspodjelu dielektričkih napreznja unutarnje i vanjske izolacije, kao i izvrsna svojstva hlađenja. Budući da se sastoji od neovisnih i odvojenih sekcija, primarni namot je siguran od rasprsnuća uzrokovanih kvarom unutar svojih zavoja. U malo vjerojatnom slučaju proboja izolacije između zavoja ili slojeva primarnog namota, kvar ostaje lokaliziran na samo jednu sekciju i ne može se proširiti na cijeli primarni namot. Ovo čini prirodnu sigurnost od rasprsnuća svojstvenu ovom tipu transformatora.

Visokonaponska strana transformatora izolirana je od niskonaponske glavnom izolacijom od uljem impregniranog papira visoke dielektrične čvrstoće. Naponski transformator s otvorenom jezgrom omogućava izvedbu u kojoj i strujni i naponski aktivni dio koriste zajedničku glavnu izolaciju. Velik broj poluvodljivih kapacitivnih obloga umeće se u slojeve papirne izolacije, kako bi se adekvatno rasporedilo dielektrično opterećenje. Papirna izolacija se potom suši u vakuumu i impregnira mineralnim transformatorskim uljem. Ulje je vrhunske kvalitete, s dodatkom inhibitora, potpuno otplinjeno i osušeno. Papirno-uljna izolacija je hermetički zatvorena i odvojena od utjecaja okolnog zraka membranom od nehrđajućeg čelika. Membrana kompenzira toplinsku dilataciju ulja te istovremeno služi kao pokazivač razine ulja. Sve prethodno navedeno osigurava odlična i dugotrajna dielektrička svojstva glavne izolacije transformatora.

Izolator može biti porculanski ili kompozitni, ovisno o zahtjevu kupaca. Porculanski izolatori izrađeni su od najkvalitetnijeg porculana kvalitete C130. Osnovu kompozitnih izolatora čini cijev od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima na koju su vulkanizirana silikonska rebra. Kućište transformatora je izrađeno od visokokvalitetnog vruće cinčanog čelika i dodatno je obojano radi dugotrajnije otpornosti na koroziju. Alternativno, kućište može biti izrađeno i od lijevanog aluminija. Na njemu se nalaze sekundarne priključne kutije, zajedno s ostalim dodacima kao što su natpisna pločica, ventil za uzimanje uzoraka ulja, hvatišta za podizanje transformatora, priključci za uzemljenje, priključak za mjerenje kuta dielektričkih gubitaka izolacije te indikator nadpritiska ulja (prema zahtjevu).

Primarni priključci izrađeni su od aluminijske legure ili, alternativno, od elektrolitskog bakra zaštićenog od korozije kositrenjem ili elektrolitičkim srebrenjem. Oblik i tip priključka odabiru se prema nazivnim strujama i primijenjenim normama, ukoliko drugačije nije navedeno u zahtjevu. Sekundarni priključci, zajedno s priključkom za uzemljenje, smješteni su sekundarnim priključnim kutijama. Ulazi u kutije izvedeni su kabelskim uvodnicama na pločama prema potrebama kupca. Standardni sekundarni priključci su veličine M8 i u obliku vijka. Izrađeni su od nehrđajućeg čelika. [2] Dimenzije kombiniranih transformatora tipa VAU prikazane su u tablici 2.1. i odnose se na standardnu izvedbu sa porculanskim izolatorom. Vrijednosti se mogu mijenjati u ovisnosti o zahtjevima kupaca.

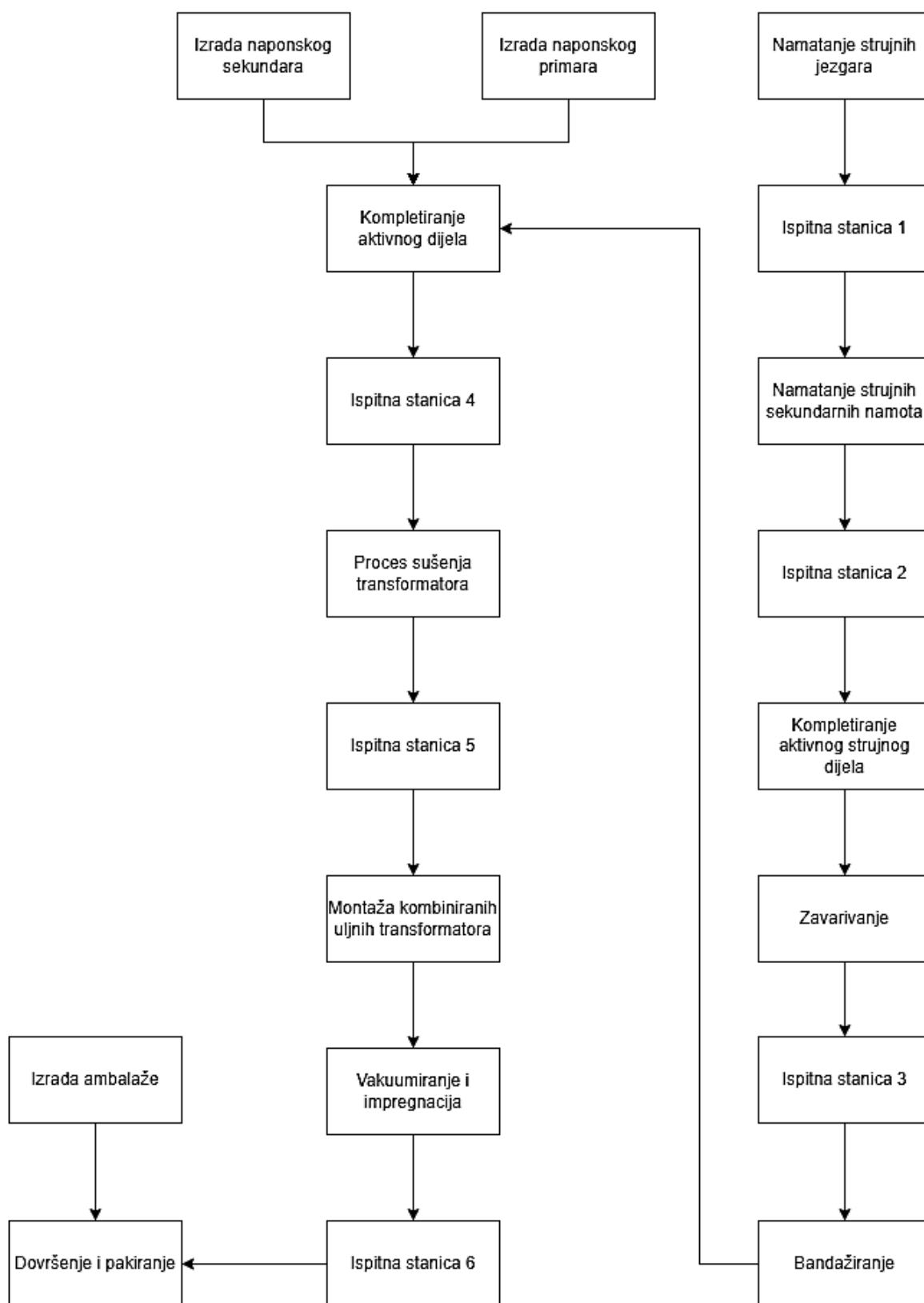
*Tablica 2.1 Dimenzije transformatora [2]*

<b>Tip</b>	<b>Najviši napon sustava</b>	<b>Ukupna visina</b>	<b>Visina priključka</b>	<b>Ukupna masa</b>	<b>Masa ulja</b>
	kV	mm	mm	kg	kg
VAU – 72,5	72,5	2500	1900	500	85
VAU – 123	123	2550	2100	520	85
VAU – 145	145	2700	2200	550	105
VAU – 170	170	3100	2400	660	160
VAU – 245	245	3720	3120	900	220
VAU – 300	300	3900	3300	1100	250
VAU – 362	362	4700	3860	1300	330
VAU – 420	420	5330	4550	1600	400
VAU – 525	525	6150	5170	2500	600

### **2.3. Proizvodni procesi za izradu transformatora tipa VAU**

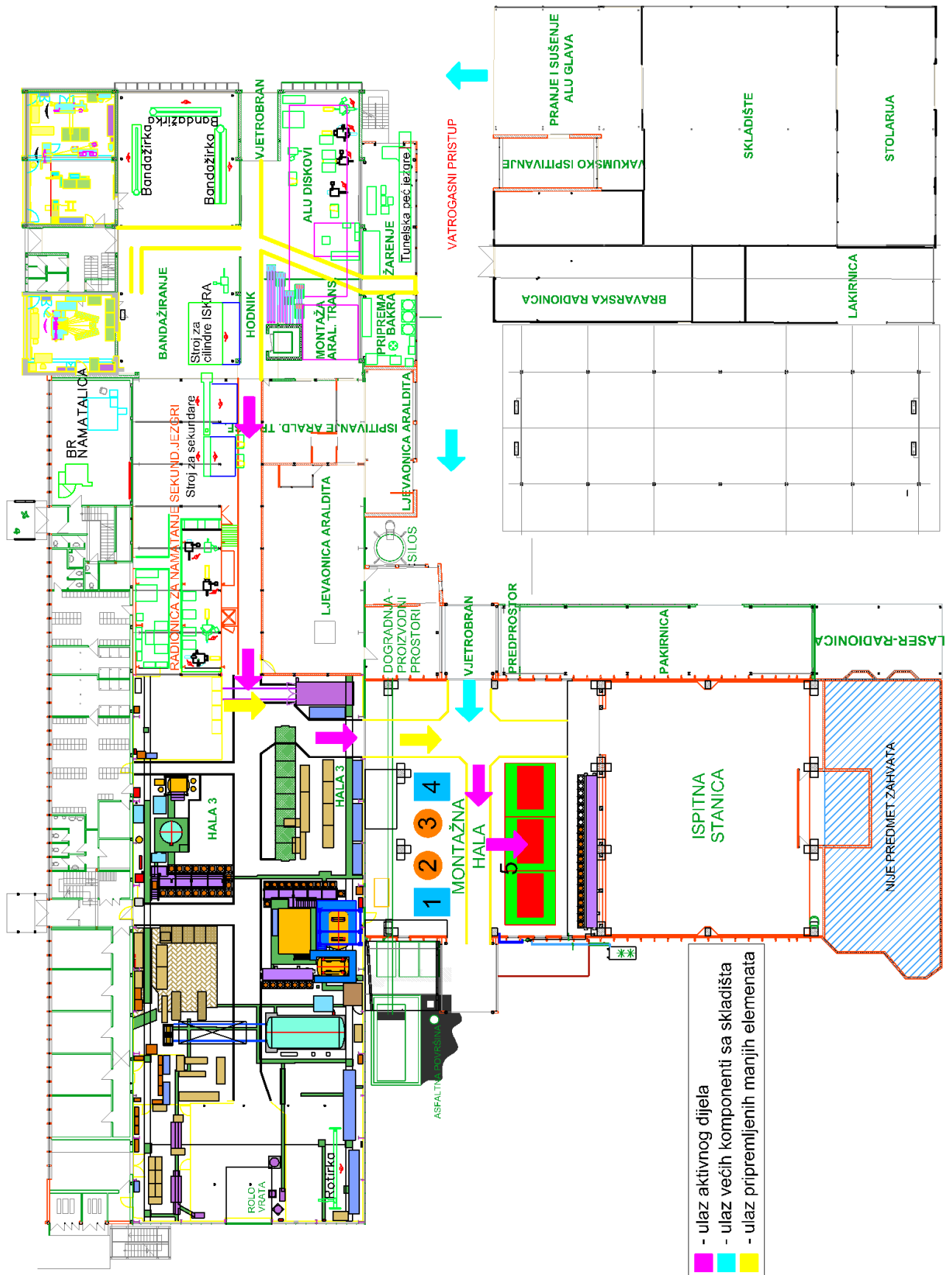
Za izradu ovog diplomskog rada potrebno je pratiti vrijeme trajanja proizvodnog procesa izrade kombiniranog mjernog transformatora tipa VAU. Kao što je ranije navedeno u poglavlju 2., kombinirani mjerni transformator tipa VAU (dalje u tekstu VAU transformator) je dizajniran kao kombinacija strujnog mjernog transformatora tipa AGU i naponskog mjernog transformatora tipa VPU. Ono što također karakterizira pojedine transformatore je i naponski nivo transformatora. Naponski nivo transformatora se odnosi na maksimalni radni napon koji taj transformator može podnijeti ili na kojem može raditi bez prekida, npr. VAU 145 kV znači da je VAU transformator dizajniran za rad s maksimalnim naponom od 145 kV. Za potrebe kupca iz Makedonije potrebno je proizvesti 3 komada VAU transformatora naponskog nivoa 123 kV i njihov proizvodni proces biti će detaljno promatran u svrhu izrade ovog diplomskog rada kako bi se dobila vremena potrebna za izradu svakog dijela. Vrijeme se snimalo na način da se svaka faza promatrala uživo u proizvodnom pogonu i njeno trajanje se mjerilo sa štopericom.

Schema proizvodnje VAU transformatora prikazana je na slici 2.2. dok je tlocrt proizvodnog pogona prikazan na slici 2.3.



Slika 2.2. Shema proizvodnje kombiniranih transformatora VAU





Slika 2.3. Tlocrt proizvodnog pogona

## 2.4. Proizvodni proces po fazama

Faze proizvodnog procesa izrade transformatora, oprema, radno mjesto, broj radnika i trajanje svake faze prikazani su u tablici 2.2. Kako ne bi došlo do zastoja u pojedinim fazama, svaka faza ima svoje međuskladište odnosno palete na koje se odlažu obrađeni dijelovi koji su spremni za daljnju obradu. Za međufazno kretanje proizvoda za faze označene brojevima 10 – 100 upotrebljava se paletar a za preostale faze se koriste viličari kao transportna sredstva ili dizalice, ovisi o potrebi faze.

Tablica 2.2. Proizvodni proces izrade VAU transformatora

Broj faze	Naziv	Oprema	Broj ljudi na radnom mjestu	Vrijeme (h)
10	Namatanje strujnih jezgara	Namatalica strujnih jezgara, peć za žarenje	2	4
20	Ispitna stanica 1	Ispitna oprema	1	0,25
30	Namatanje strujnih sekundarnih namota	Strojevi RUFF i JOVIL	3	1,166
40	Ispitna stanica 2	Ispitna oprema	1	0,416
50	Kompletiranje aktivnog strujnog dijela	Alat za skidanje izolacije, alat za uprešavanje kablinskih stopica	1	0,416
60	Zavarivanje	Zavarivač, brusilica, ljepilo, dizalica, vijci i matice	1	1
70	Ispitna stanica 3	Ispitna oprema	1	0,583
80	Bandažiranje	Bandažirka, PRECIZ, dizalica	13	4,583
90	Izrada naponskog primara	BR Namatalica, RUFF bandažirka	3	9
100	Izrada naponskog sekundara	Stroj za namatanje naponskih sekundara,	2	2

		dizalica		
110	Kompletiranje aktivnog dijela	Dizalica, alat za skidanje izolacije, lemilica, ručni alati za obradu žice (alat za skidanje kablskih stopica, skalpel itd.)	1	1,166
120	Ispitna stanica 4	Ispitna oprema	1	0,166
130	Proces sušenja transformatora	Peć za sušenje	1	168
140	Ispitna stanica 5	Ispitna oprema	1	0,333
150	Montaža kombiniranih uljnih transformatora	Dizalica, električni regulacijski ključ, ručni alati (ključevi, pneumatski pištolj itd.)	4	1,583
160	Vakuumiranje i impregnacija	Razvodi za vakuumiranje i impregnaciju	1	48
170	Ispitna stanica 6	Ispitna oprema	1	0,416
180	Izrada ambalaže	Pila, ručni alati (električni čekić, pneumatski pištolj itd.)	2	1
190	Dovršenje i pakiranje	Ručni alati (električni čekić, pneumatski pištolj itd.)	3	0,75

### 3. RAČUNALNA SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA

Simulacija je proces ili tehnika koja se koristi za stvaranje modela stvarnog sustava ili procesa i reproduciranje njegovog ponašanja u kontroliranom okruženju. Osnovna ideja simulacije je stvaranje digitalne ili fizičke verzije nekog sustava kako bi se proučilo njegovo ponašanje, analizirali različiti scenariji ili testirale različite strategije bez stvarnog rizika ili troškova. Simulacija se koristi u različitim područjima, uključujući inženjering, znanost, vojnu obuku, ekonomiju, medicinu, i mnoge druge. [3]

U kontekstu računalne simulacije, simulacija se izvodi pomoću računalnih programa koji koriste matematičke modele kako bi opisali ponašanje sistema. Kroz simulaciju, korisnici mogu eksperimentirati s različitim parametrima, strategijama i uvjetima kako bi bolje razumjeli sustav i donijeli informirane odluke. [3]

Općenito, ciljevi simulacije uključuju [3]:

- Analizu ponašanja sustava: Razumijevanje kako će se sustav ponašati pod različitim uvjetima ili scenarijima.
- Optimizaciju: Pronalaženje najboljih parametara ili strategija kako bi se postigao određeni cilj, kao što su maksimizacija performansi ili minimizacija troškova.
- Donošenje odluka: Koristeći simulaciju kao alat za informiranje o odlukama, omogućujući analizu različitih opcija i njihovih potencijalnih ishoda prije donošenja stvarnih akcija.

#### 3.1. Prednosti i nedostaci računalne simulacije

Računalna simulacija ima mnoge prednosti, ali i nekoliko nedostataka. Evo pregleda nekih od ključnih prednosti [4]:

- Fleksibilnost: Simulacija omogućuje eksperimentiranje s različitim parametrima i scenarijima bez stvarnog rizika ili troškova, mogućnost detaljnog predstavljanja složenih sustava iz realnog okruženja bez ometanja rada realnog sustava.
- Analitička složenost: Omogućuje modeliranje složenih sustava koji se teško analitički rješavaju ili zahtijevaju pojednostavljene pretpostavke.

- Vremenska i financijska ušteda: Eliminira potrebu za stvarnim eksperimentima ili prototipovima, što može rezultirati uštedom vremena i novca.
- Ponovljivost eksperimenata: Omogućuje ponovno izvođenje istih eksperimenata s malim ili nikakvim dodatnim troškovima radi provjere rezultata, jednom izrađen model može se koristiti za različite analize.
- Smanjenje rizika: Simulacija omogućuje identifikaciju potencijalnih problema ili rizika prije nego što se sustav ili proces implementira u stvarnom svijetu.

Nedostaci računalne simulacije [4]:

- Potreba za validacijom: Simulacija može biti samo točna kao i njeni ulazni podaci i modeli. Potrebno je provesti temeljitu validaciju kako bi se osigurala njena pouzdanost.
- Ovisnost o modelima: Simulacije se temelje na matematičkim modelima koji mogu biti pojednostavljeni ili idealizirani, što može dovesti do nedostatka točnosti u stvarnim situacijama te se javlja potreba za poznavanjem velikog broja odgovarajućih alata i modela modeliranja.
- Vremenska i resursna potrošnja: Izrada kompleksnih simulacija može zahtijevati znatne resurse u pogledu vremena, računalne snage i stručnosti za razvoj i interpretaciju te je sam proces modeliranja relativno dug.
- Nedostatak intuicije: Ponekad je teško intuitivno razumjeti rezultate simulacije, posebno u složenim sustavima s mnogo varijabli i interakcija.
- Ograničena točnost: Simulacije su uvijek približne stvarnom ponašanju sustava i mogu imati ograničenu točnost, posebno ako su modeli pojednostavljeni ili ne uzimaju u obzir sve relevantne faktore.

Ipak cijena može biti jedan od nedostataka računalne simulacije, posebno u određenim kontekstima. Nekoliko načina na koje cijena može biti faktor koji ograničava ili otežava primjenu računalne simulacije:

- Troškovi softverskih alata: Kvalitetni softverski alati za simulaciju mogu biti skupi, posebno ako se koriste u industrijskim ili poslovnim okruženjima gdje su potrebne napredne značajke ili podrška za velike simulacijske modele.

- Potrebna računalna infrastruktura: Izvođenje složenih simulacija može zahtijevati računalne resurse poput moćnih računala, visokokapacitetskih servera ili oblakom baziranih resursa, što može rezultirati visokim troškovima nabavke i održavanja opreme.
- Vrijeme i ljudski resursi: Razvoj i izvođenje simulacija zahtijeva stručnjake s odgovarajućim znanjem i vještinama, što može rezultirati visokim troškovima za obuku ili zapošljavanje kvalificiranog osoblja.
- Održavanje i podrška: Nakon implementacije, simulacijski modeli mogu zahtijevati redovito održavanje, a korisnici mogu trebati podršku softverskih dobavljača ili vanjskih konzultanata, što može dodatno povećati troškove.
- Alternativni pristupi: Ponekad postoje jeftinije ili brže alternative za rješavanje problema ili analizu procesa, poput analitičkih metoda ili stvarnih eksperimenata, što može učiniti računalnu simulaciju neisplativom.

Iako cijena može biti prepreka, važno je uzeti u obzir potencijalne koristi i uštede koje računalna simulacija može donijeti. U mnogim slučajevima, iako je početna investicija visoka, dugoročne koristi u smislu smanjenja troškova, poboljšanja procesa ili povećanja učinkovitosti mogu biti značajne.

### **3.2. Metode simulacije**

Odabir simulacijskog modela ovisi o različitim faktorima, uključujući specifičnosti problema koji se simulira, dostupnost podataka, ciljeve simulacije i resurse na raspolaganju. Postoje četiri osnovne metode simulacijskog modeliranja [4]:

- Monte Carlo metoda simulacija,
- kontinuirana simulacija,
- simulacija zasnovana na agentima, i
- simulacija diskretnih događaja.

### 3.2.1. Monte Carlo metoda

Naziv "Monte Carlo" potječe od poznatog kazina i luksuznog odmarališta u kneževini Monako, Monte Carlo. Ova metoda je nazvana po Monte Carlu zbog svoje povezanosti s kockanjem i slučajnošću. Monte Carlo metoda je statistička tehnika koja se koristi za simuliranje različitih fenomena ili procesa putem stohastičkih simulacija. Ova metoda koristi generiranje slučajnih brojeva kako bi se modelirala nesigurnost ili varijabilnost u procesima, te se često koristi za rješavanje problema u kojima je analitičko rješenje teško ili nemoguće postići.

Osnovna ideja iza Monte Carlo metode je da se generiraju veliki brojevi slučajnih uzoraka u skladu s određenom raspodjelom vjerojatnosti koja opisuje varijaciju ulaznih podataka. Zatim se ti uzorci koriste za simuliranje ponašanja sustava ili procesa, te se statistički analiziraju rezultati kako bi se dobile informacije o distribuciji mogućih izlaza ili rezultata. Međutim, važno je napomenuti da Monte Carlo metoda može zahtijevati veliki broj uzoraka kako bi se postigla precizna simulacija, posebno za probleme s kompleksnim modelima ili velikom varijabilnošću.

Monte Carlo metoda se koristi u različitim područjima, uključujući financijsku analizu, inženjering, fiziku, računarstvo, biologiju, ekonomiju, i mnoge druge. Ključna prednost Monte Carlo metode leži u njezinoj sposobnosti rješavanja složenih problema i analize rizika putem stohastičkih simulacija, što je čini moćnim alatom za različita područja znanosti, inženjeringa i poslovanja. Primjeri primjene uključuju simulaciju ponašanja financijskih tržišta, predviđanje ponašanja materijala pod određenim uvjetima, analizu rizika u poslovanju i mnoge druge. [4, 5]

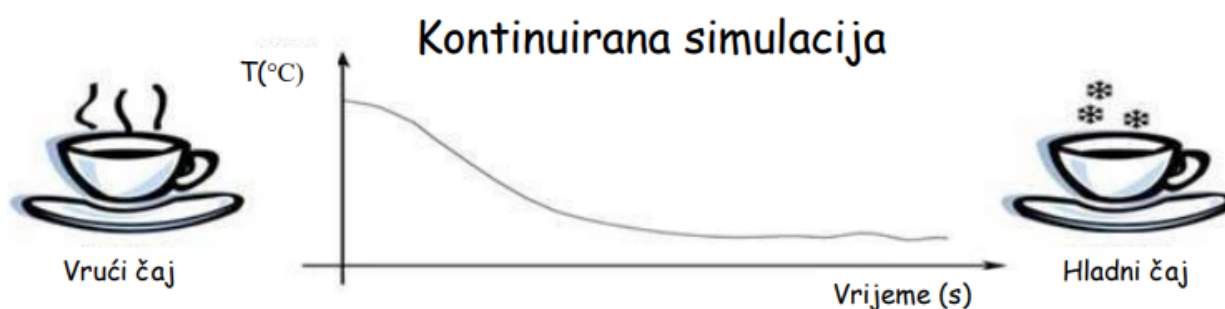
### 3.2.2. Kontinuirana simulacija

Kontinuirana simulacija je metoda simulacije koja se koristi za modeliranje procesa koji se kontinuirano odvijaju kroz vrijeme. Ova metoda koristi diferencijalne jednadžbe ili druge matematičke tehnike kako bi opisala promjene u varijablama tijekom vremena. Kontinuirana simulacija je moćan alat koji omogućuje modeliranje i analizu kontinuiranih procesa i dinamičkih sustava. Prednosti joj leže u preciznom modeliranju procesa, analizi dinamike sustava i predviđanju budućih trendova. [4]

Prednosti kontinuirane simulacije uključuju:

- Precizno modeliranje kontinuiranih procesa: Kontinuirana simulacija omogućuje precizno modeliranje procesa koji se kontinuirano odvijaju, kao što su tokovi tekućina, temperaturne promjene, kemijske reakcije, ekonomske promjene itd.
- Analiza dinamičkih sustava: Kontinuirana simulacija omogućuje analizu dinamičkih sustava i promjena u vremenu. To je korisno za razumijevanje ponašanja sistema pod različitim uvjetima i za predviđanje budućih trendova.
- Identifikacija graničnih uvjeta: Kontinuirana simulacija omogućuje identifikaciju graničnih uvjeta i kritičnih točaka u procesima. To može pomoći u optimizaciji sustava i poboljšanju performansi.
- Proučavanje stabilnosti sustava: Kontinuirana simulacija omogućuje proučavanje stabilnosti sustava i identifikaciju faktora koji utječu na stabilnost. To može pomoći u predviđanju potencijalnih problema i sprječavanju neželjenih događaja.
- Simulacija realnih situacija: Kontinuirana simulacija omogućuje simuliranje realnih situacija u kojima su promjene u vremenu ključne. To može pomoći u donošenju informiranih odluka i planiranju budućih aktivnosti.

Slika 3.1. prikazuje primjer kontinuirane simulacije na primjeru hlađenja čaja. Kada se skuha čaj, čaj bude vruć i on se kontinuirano prirodno hladi bez prekida u procesu hlađenja.



Slika 3.1. Primjer kontinuirane simulacije [6]

### 3.2.3. Simulacija zasnovana na agentima

Modeliranje i simulacija temeljena na agentima relativno je nov pristup modeliranju složenih sustava koji se sastoje od međudjelovanja, autonomnih 'agenata'. Agenti imaju ponašanja, često

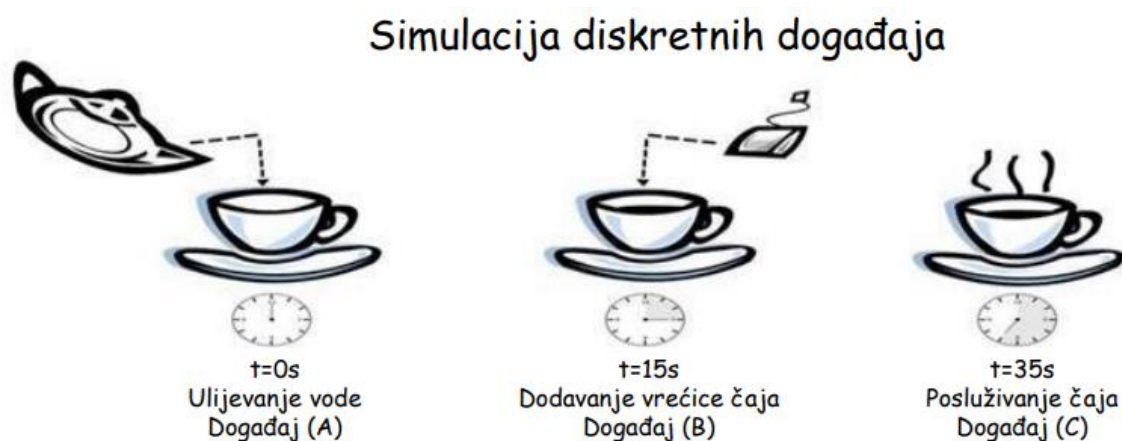


opisana jednostavnim pravilima, i interakcije s drugim agentima, što zauzvrat utječe na njihovo ponašanje. Pojedinačnim modeliranjem agenata mogu se promatrati potpuni učinci raznolikosti koja postoji među agentima u njihovim atributima i ponašanjima jer to dovodi do ponašanja sustava kao cjeline. Modeliranje temeljeno na agentima nudi način modeliranja društvenih sustava koji se sastoje od agenata koji međusobno komuniciraju i utječu jedni na druge, uče iz svojih iskustava i prilagođavaju svoja ponašanja tako da bolje odgovaraju svojoj okolini. Modeliranje i simulacija temeljena na agentima se temelji na nizu znanstvenih područja a neka od njih su fizičke znanosti, biološke znanosti, društvene znanosti i IT tehnologija. [4, 8]

### 3.2.4. Simulacija diskretnih događaja

Simulacija diskretnih događaja (DES) je vrsta simulacije koja modelira ponašanje sustava gdje se promjene događaju u diskretnim vremenskim koracima, pri čemu se svaki događaj odvija u određenom trenutku. Ova vrsta simulacije je posebno korisna za modeliranje sustava gdje se događaji javljaju u diskretnim intervalima vremena ili gdje su bitni pojedinačni događaji, kao što su dolazak korisnika u sustav, transakcije u računalnoj mreži ili proizvodnja na proizvodnoj liniji. [3, 4, 6, 9]

Slika 3.2. prikazuje primjer simulacije diskretnih događanja na primjeru posluživanja čaja. Događaj A predstavlja trenutak kada se ulijeva vruća voda u šalicu. Tek nakon što smo ulili vruću vodu u šalicu, možemo dodati čaj što predstavlja događaj B. Nakon što su se dogodili događaji A i B, možemo poslužiti čaj – događaj C. Priprema čaja je primjer gdje vidimo kako je nemoguće postići događaj C bez da su se prethodni dogodili redom događaji A i B.



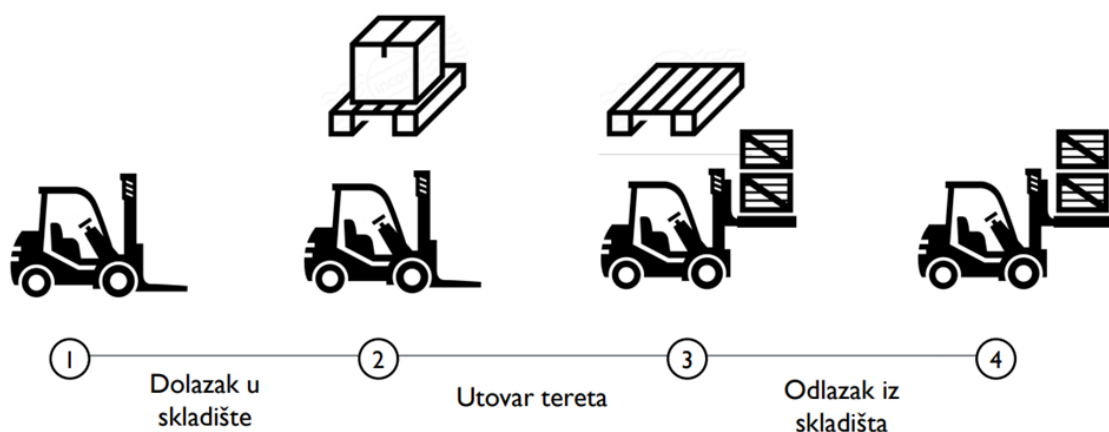
Slika 3.2. Primjer simulacije diskretnih događaja [6]

Glavni elementi simulacije diskretnih događaja uključuju:

- Događaj: Predstavlja jedinstveni događaj koji se događa u sustavu u određenom trenutku. Može predstavljati dolazak korisnika, završetak procesa, prijenos poruke, ili bilo koji drugi relevantan događaj u kontekstu problema koji se simulira.
- Vremenska traka: Simulacija diskretnih događaja koristi vremensku traku kako bi pratila redoslijed događaja tijekom simuliranog vremena. Svaki događaj ima svoje vrijeme početka i završetka, a simulacija se izvršava korak po korak, pri čemu se događaji obrade u vremenskom slijedu.
- Red čekanja: U DES-u, često se koristi red čekanja ili red događaja kako bi se pratili događaji koji čekaju na obradu. Kada se događaj pojavi u sustavu, može se dodati u red čekanja dok se ne može obraditi prema redoslijedu dolaska.

Simulacija diskretnih događaja koristi se za modeliranje i analizu različitih vrsta sustava, uključujući proizvodne procese, distribucijske centre, računalne mreže, prometne tokove, redove čekanja, i mnoge druge. U diskretnoj (diskontinuiranoj) promjeni vremena, vrijeme "skače" s trenutka kada se dogodio posljednji događaj na trenutak kada će se dogoditi sljedeći događaj. Ova vrsta simulacije omogućuje detaljnu analizu i optimizaciju performansi sustava u situacijama gdje se događaji odvijaju diskretno u vremenu. [3]

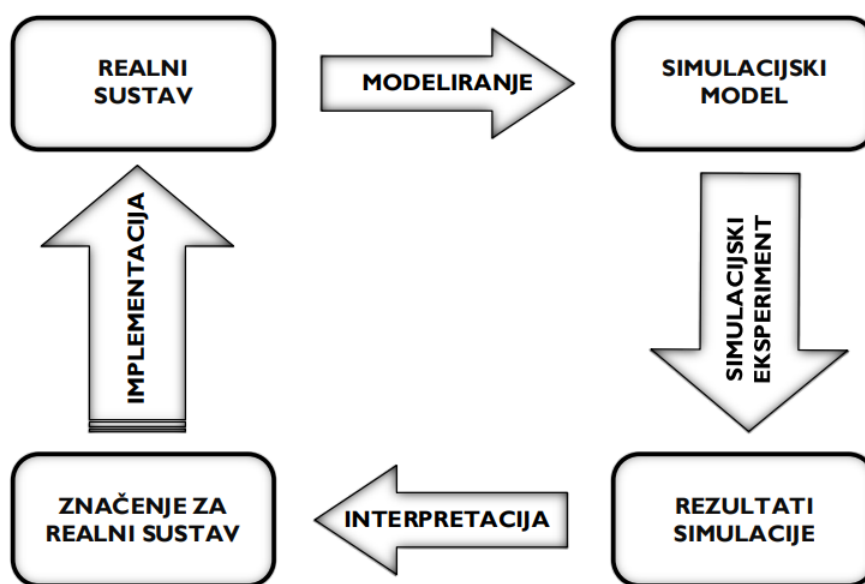
Na slici 3.3. prikazan je primjer simulacije diskretnog događaja na primjeru viličara. Korak 1 predstavlja kretanje viličara gdje kretanje od 1 do 2 predstavljaju dolazak viličara u skladište. Kada se viličar nalazi u skladištu, može započeti kretanje od 2 do 3 koja predstavlja utovar tereta. Nakon što je viličar utovarao teret, nalazi se u točki 3 i započinju kretanje od 3 do 4 koje predstavljaju odlazak viličara sa teretom iz skladišta.



Slika 3.3. Primjer simulacije diskretnog događaja na primjeru viličara [6]

### 3.3. Koncept simulacije

Koncept simulacije odnosi se na stvaranje modela, sustava ili procesa koji imitiraju stvarne procese, događaje ili okolinu. Simulacija se koristi u različitim područjima kao alat za analizu, planiranje, obuku, istraživanje i donošenje odluka. Slika 3.4. prikazuje koncept simulacije. Koncept simulacije započinje od realnog sustava. Kako bi se izradio simulacijski model, potrebno je prvo prikupiti sve potrebne podatke o realnom sustavu i modelirati ih kako bi se stvorio simulacijski model. Kada je stvoren simulacijski model, u njemu se provode razni eksperimenti kako bi se vidjeli rezultati simulacije. Nakon što su prikupljeni rezultati simulacije, potrebno ih je interpretirati tako da se vidi koje bi bilo njihovo značenje za realni sustav. Kada su se dobili zadovoljavajući rezultati i uvidjelo njihovo značenje za realni sustav, potrebno je sada ta rješenja primijeniti u realnom sustavu. [3, 7]



Slika 3.4. Koncept simulacije [7]

Simulacijski model je matematički ili računalni model koji se koristi za simuliranje ponašanja nekog sustava ili procesa. Ovaj model pokušava prikazivati ključne karakteristike stvarnog sustava ili procesa kako bi se omogućilo razumijevanje, analiza ili predviđanje njegovih performansi ili ponašanja. Kako bi izrada simulacijskog modela bila uspješna, potrebno je pratiti devet ključnih koraka [3, 7, 9]:

1. **Definicija cilja:** Prvi korak je jasno definiranje cilja simulacije. To uključuje identifikaciju problema ili izazova koje treba riješiti kroz simulaciju i postavljanje ciljeva koji se žele postići.
2. **Identifikacija sustava:** Sljedeći korak je identifikacija sustava koji će se simulirati. To uključuje definiranje svih komponenti, procesa ili elemenata sustava koji će biti uključeni u simulaciju.
3. **Prikupljanje i analiza podataka o sustavu:** Nakon identifikacije sustava, prikupljaju se relevantni podaci o njegovom ponašanju, performansama ili karakteristikama. Ovi podaci se potom analiziraju kako bi se bolje razumjelo ponašanje sustava.
4. **Izrada simulacijskog modela:** Na temelju prikupljenih podataka i analiza, izrađuje se simulacijski model. To može uključivati odabir odgovarajućeg računalnog alata ili softvera te definiranje parametara i pravila ponašanja sustava unutar modela.
5. **Verifikacija modela:** Nakon izrade modela, provodi se verifikacija kako bi se osiguralo da model točno reproducira stvarno ponašanje sustava. To uključuje provjeru ispravnosti implementacije modela.
6. **Validacija modela:** Validacija je proces provjere da li simulacijski model točno odražava ponašanje stvarnog sustava.
7. **Planiranje i izvođenje simulacijskih eksperimenata:** Nakon verifikacije i validacije, planiraju se simulacijski eksperimenti koji će se provesti radi postizanja ciljeva simulacije.
8. **Analiza rezultata:** Rezultati simulacijskih eksperimenata se analiziraju kako bi se razumjeli utjecaji promjena ili alternativa unutar sustava te kako bi se donijeli zaključci o izvedbi sustava.
9. **Zaključci i preporuke:** Na temelju analize rezultata, izvlače se zaključci o ponašanju sustava i daju se preporuke za moguće poboljšanje ili optimizaciju sustava.

### 3.4. Simulacijski alati

Simulacijski alati su softverski alati ili programi koji omogućuju izradu, vođenje i analizu simulacija različitih sustava ili procesa. Ovi alati omogućuju korisnicima da modeliraju stvarne ili planirane situacije, testiraju različite scenarije, identificiraju potencijalne probleme i optimiziraju performanse prije donošenja stvarnih odluka. Neki od simulacijskih alata su: FlexSim, AnyLogic, Arena, Simulink, Tecnomatix Plant Simulation, itd.

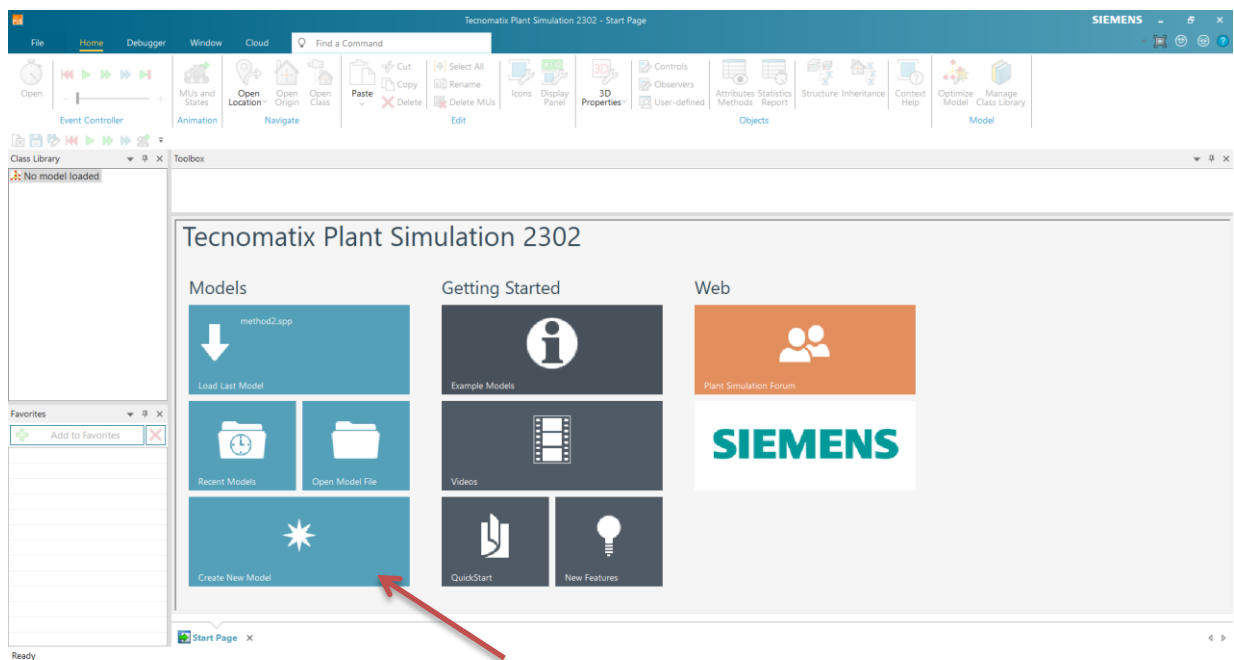
### 3.4.1. Tecnomatix Plant Simulation

Tecnomatix Plant Simulation je softverski alat razvijen od strane tvrtke Siemens. Specijaliziran je za simulaciju i analizu proizvodnih sustava, logističkih procesa i lanaca opskrbe. Ovaj alat omogućuje korisnicima da stvore virtualne modele svojih proizvodnih pogona ili procesa kako bi analizirali performanse, testirali različite scenarije i optimizirali procese prije implementacije u stvarnom okruženju. Koristi se u različitim industrijama poput automobilske industrije, proizvodnje, logistike, zračnog prometa i drugih kako bi povećali efikasnost, smanjili troškove i optimizirali resurse.

Tecnomatix Plant Simulation koristi intuitivno grafičko sučelje koje omogućuje korisnicima da stvore složene modele proizvodnih pogona, logističkih procesa i lanaca opskrbe pomoću različitih grafičkih objekata kao što su strojevi, transporteri, skladišta itd. Alat dolazi s bogatom bibliotekom standardnih objekata koji se često koriste u proizvodnji i logistici, što olakšava kreiranje simulacijskih modela. [10, 11]

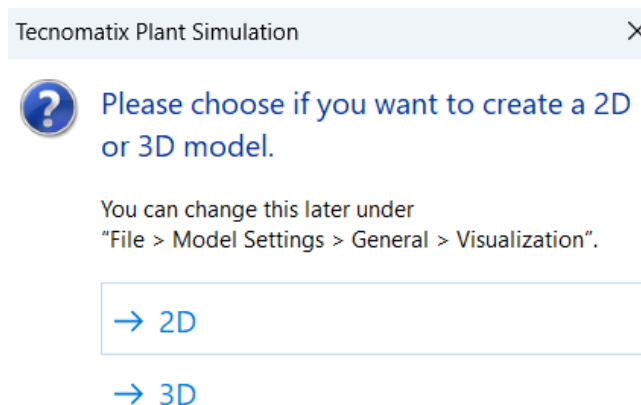
## 4. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA

Pokretanjem programa Tecnomatix Plant Simulation otvara se prozor koji je prikazan na slici 4.1. Za izradu novog simulacijskog modela potrebno je odabrati *Create new model*.



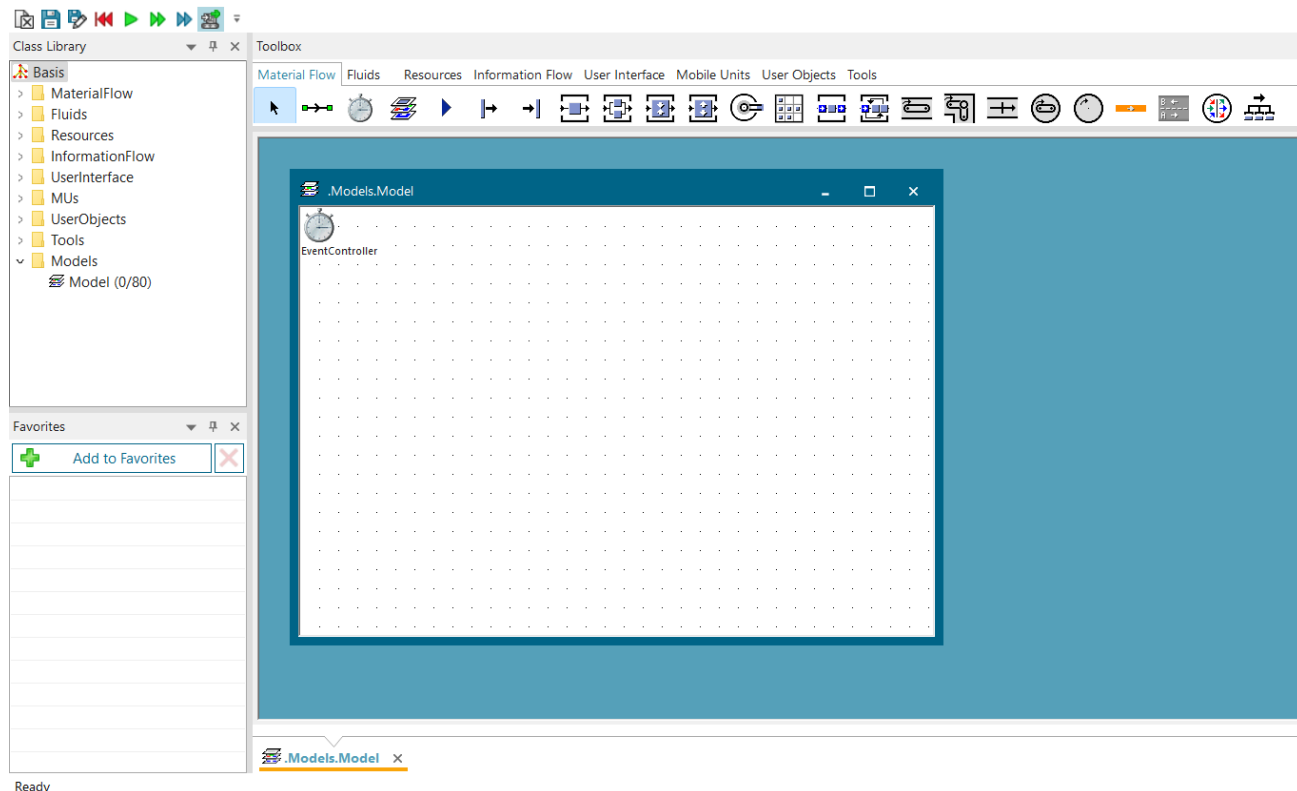
Slika 4.1. Izgled sučelja programskog paketa Tecnomatix Plant Simulation

Nakon odabira *Create new model* otvara se novi prozor prikazan na slici 4.2. gdje program pita želimo li stvoriti 2D ili 3D model.



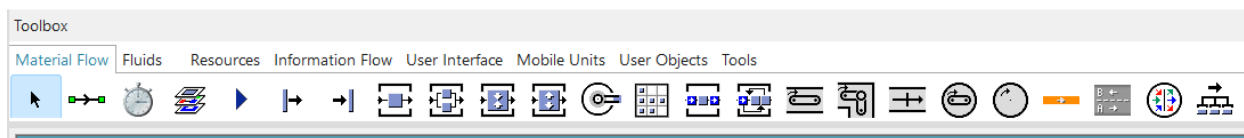
Slika 4.2. Prikaz prozora za odabir modela

2D modeli predstavljaju simulacije koje se prikazuju u dvodimenzionalnom prostoru što znači da se objekti i procesi prikazuju kao ravne slike na ravnim površinama. S druge strane, 3D modeli prikazuju simulacije u trodimenzionalnom prostoru gdje objekti imaju širinu, visinu i dubinu te se mogu promatrati iz različitih kutova. Glavna razlika između ova dva tipa modela je u načinu prikaza prostornih odnosa i detalja. 3D modeli pružaju dublji uvid u prostorne odnose objekata i omogućuju bolje razumijevanje kako će se procesi odvijati u stvarnom prostoru, dok 2D modeli nude pojednostavljeni prikaz i često se koriste za brže analize ili za simulacije koje ne zahtijevaju detaljnu prostornu analizu. Izabran je 2D model jer se tokom rada može prebaciti na 3D model u slučaju potrebe za 3D modelom. Nakon odabira 2D modela, otvara se korisničko sučelje programa prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3. Prikaz korisničkog sučelja Tecnomatix Plant Simulation

Desnim klikom na *frame Model* koji se nalazi u *ClassLibrary* prikazano na slici 4.3., odabire se opciju *Rename* kako bi se promijenilo ime modela iz *Model* u ime *Proizvodni\_pogon*. Sada je potrebno dodati sve objekte koji će predstavljati dijelove proizvodnog pogona koji su potrebni za izradu aktivnog dijela VAU transformatora. Dodavanje objekata vrši se principom *drag and drop* sa alatne trake koja sadrži različite operatore potrebne za izradu simulacijskog modela prikazana na slici 4.4.



Slika 4.4. Prikaz alatne trake sa operatorima

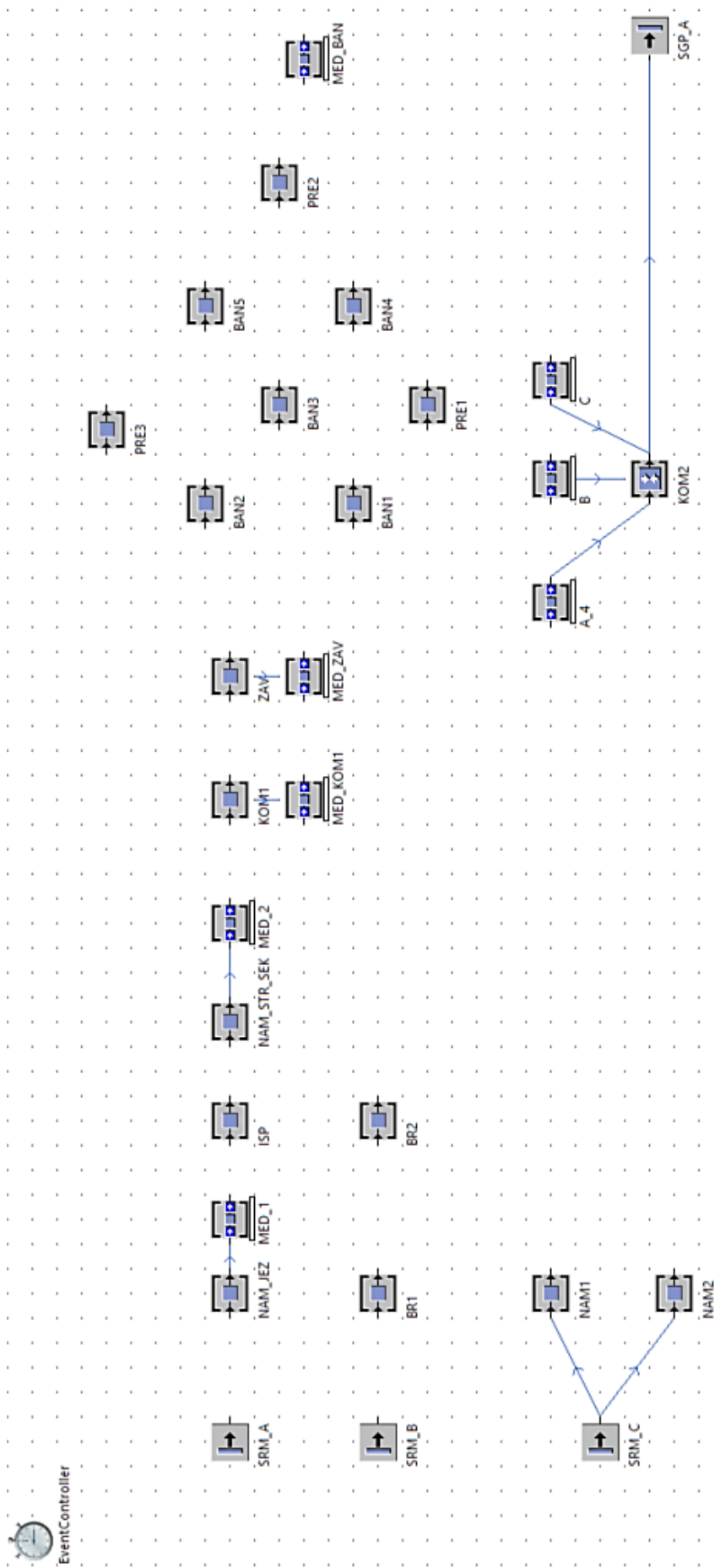
Za simulaciju izrade aktivnog dijela VAU transformatora potrebno je koristiti tri objekta *Source* koji predstavljaju tri skladišta repromaterijala, skraćeno SRM. SRM\_A će predstavljati skladište repromaterijala koje je potrebno za izradu strujnog dijela VAU transformatora, SRM\_B će predstavljati skladište repromaterijala potrebno za izradu naponskog primara, a SRM\_C će predstavljati skladište repromaterijala potrebno za izradu naponskog sekundara. Nakon toga dodaju se radne stanice koristeći objekt *Station*. Radne stanice potrebne za proizvodni proces izrade aktivnog dijela VAU transformatora su:

- Namatalica jezgara,
- Ispitna stanica,
- Namatanje strujnih jezgara,
- Kompletiranje aktivnog strujnog dijela,
- Zavarivanje,
- Bandažiranje – 5 stanica za ručno bandažiranje i 3 stanice za strojno bandažiranje,
- Izrada naponskog primara - 2 stroja,
- Namatanje naponskog sekundara - 2 stroja,
- Kompletiranje aktivnog dijela.

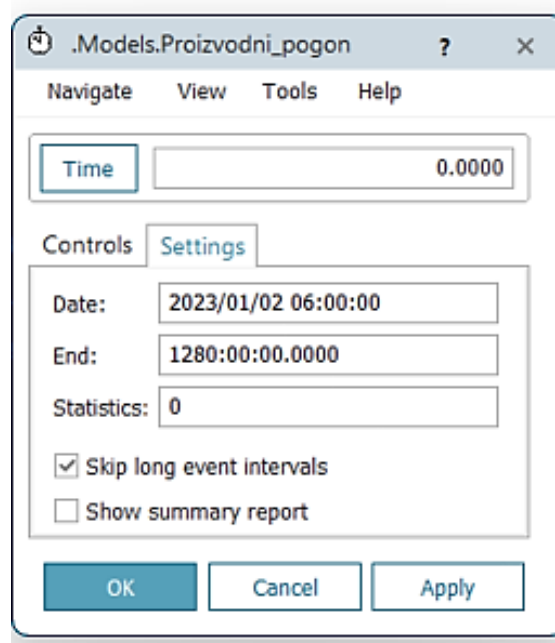
Nakon radnih stanica postavlja se *Drain* koji predstavlja skladište gotovih proizvoda, skraćeno SGP. Slika 4.5. prikazuje izgled početnog simulacijskog modela. Kako ne bi došlo do zastoja, neke radne stanice imaju svoje međuskladište gdje se odlažu dijelovi koji su spremni za daljnju obradu. Potrebno je unijeti zadano vrijeme trajanja simulacije u *Event Controller* koji predstavlja ključnu komponentu koja omogućuje učinkovito upravljanje vremenom i redoslijedom događaja tijekom simulacije. U *Event Controller* se unosi zadano vrijeme trajanja simulacije koje će u ovom slučaju biti 80 radnih dana. Proizvodnja se odvija u dvije smjene: 1. smjena koja traje 06:00 – 14:00 sati i 2. smjena koja traje 14:00- 22:00 sati. S obzirom na to da u jednom radnom danu imamo 16 radnih sati, te sate je potrebno pomnožiti s 80 radnih dana kako bi dobili broj sati koji je potrebno unijeti u *Event Controller*. Kada se to pomnoži, dobije se da trajanje simulacije treba iznositi 1280 sati i taj broj se unosi u *Event Controller* tako da



dvoklikom otvorimo *Event Controller* i klikom na opciju *Settings* otvori se polje gdje se unosi vrijeme završetka simulacije prikazano na slici 4.6.

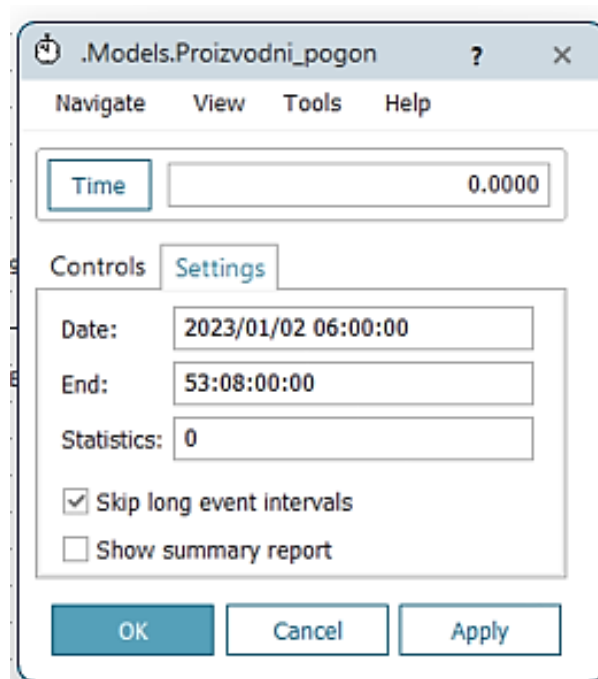


Slika 4.5. Prikaz početnog simulacijskog modela



Slika 4.6. Prikaz unosa vremena trajanja simulacije u Event Controller-u

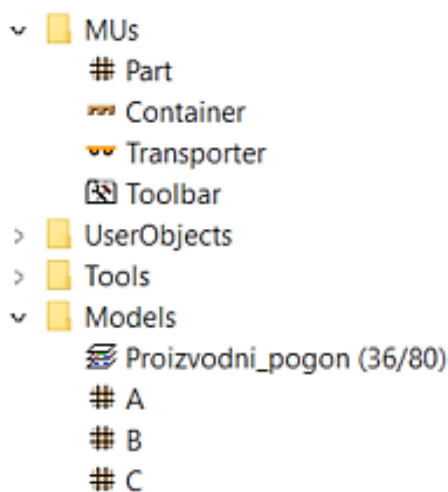
Kada se pritisne tipka za prihvatanje unosa *Apply*, *Event Controller* automatski vrijeme preračuna u dane tako da vrijeme od 1280 sati podijeli sa brojem sati u jednom danu - 24 sata pa sada polje za unos kraja simulacije izgleda kao na slici 4.7.



Slika 4.7. Prikaz vremena trajanja simulacije u Event Controller-u

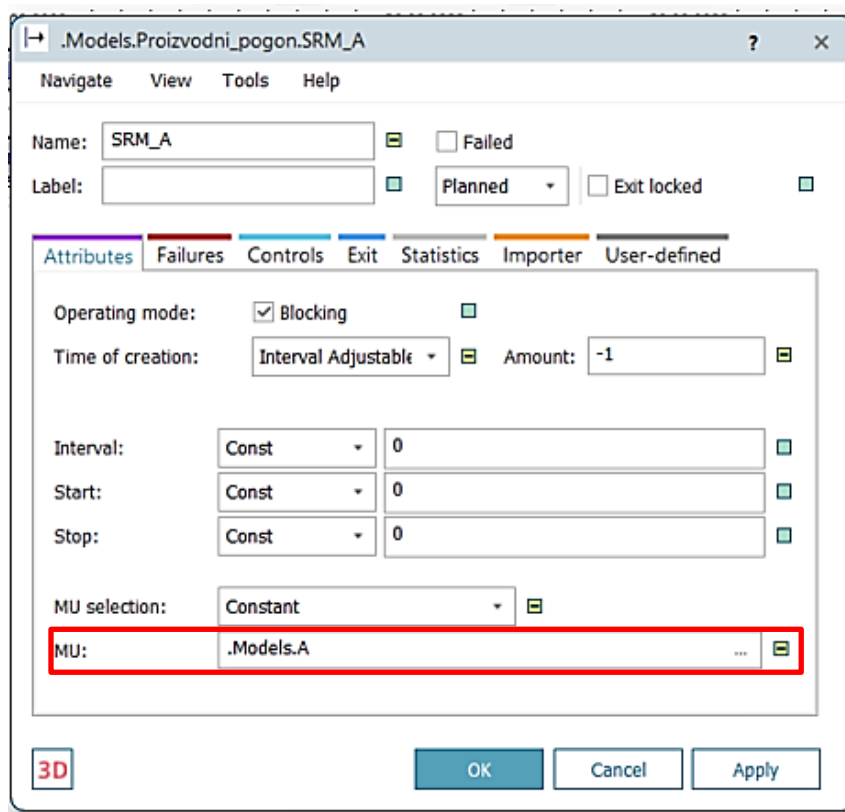
#### 4.1. Postavljanje skladišta repromaterijala

Potrebno je dodati mobilne jedinice koje će predstavljati proizvode u skladišta repromaterijala. Za kreiranje različitih tipova mobilnih jedinica, potrebno je otvoriti karticu *MUs* unutar *Class Library* i duplicirati stavku *Part*, koja predstavlja mobilnu jedinicu. Nakon što je duplicirana, nova stavka *Part* pojavit će se u *User Objects*. Ovaj postupak treba ponoviti tri puta. Zatim je potrebno promijeniti nazive kako bi se razlikovale različite vrste proizvoda - proizvodi A, B i C (slika 4.8).



Slika 4.8. Prikaz dodanih proizvoda A, B i C

Nakon što su stvorene mobilne jedinice A, B i C potrebno ih je pridružiti njihovim skladištima repromaterijala. Dvoklikom na objekt *SRM\_A* otvaraju se postavke skladišta repromaterijala A. Pomoću opcije *drag and drop* skladištu repromaterijala se dodjeljuje proizvod A kao što je prikazano na slici 4.9. Istu stvar je potrebno ponoviti sa proizvodima B i C i za skladišta repromaterijala *SRM\_B* i *SRM\_C*.



Slika 4.9. Prikaz dodjeljivanja proizvoda A

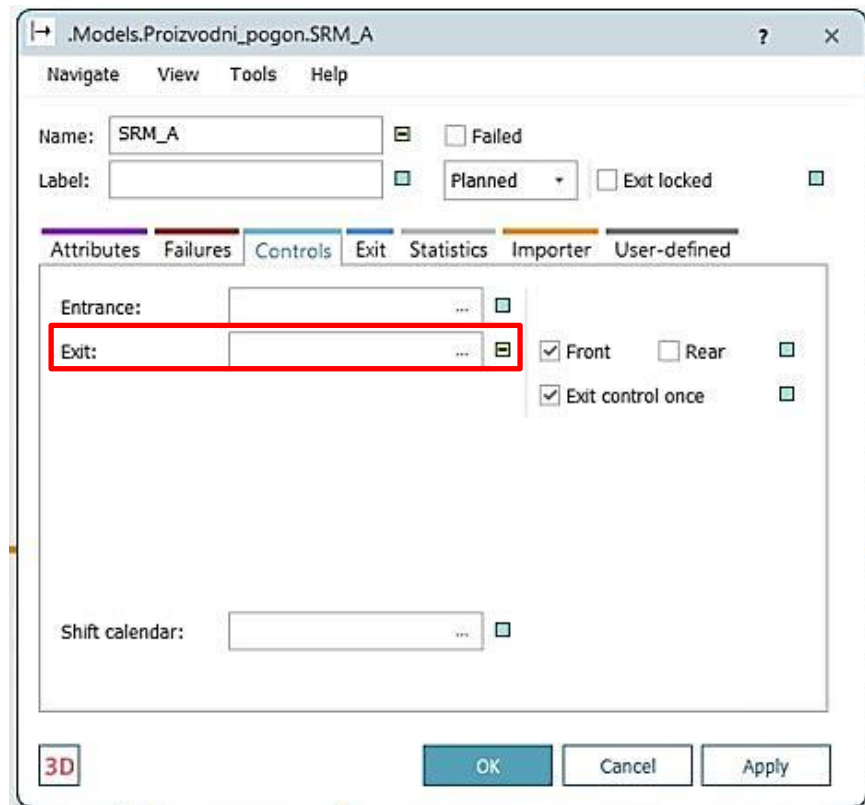
## 4.2. Postavljanje ulaznih i izlaznih metoda za radne stanice

Za funkcionalnost simulacijskog modela, svi objekti moraju biti međusobno povezani pomoću *Connectora* ili alternativno koristeći metode. U ovom primjeru korištene su obadvije opcije.

Simulacijski model započinje od skladišta repromaterijala te je stoga potrebno postaviti izlazne metode za skladišta repromaterijala. Dvoklikom na SRM\_A otvaraju se postavke skladišta repromaterijala A. Pod opcijom *Controls*, u prozoru *Exit* odabere se *Create Control* nakon čega se otvara poseban prozor u koji se unosi naredba za izlaznu metodu (slika 4.10).

Naredba prikazana na slici 4.11. predstavlja programski kod čija je funkcija slanje proizvoda A na radnu stanicu NAM\_JEZ odnosno na radnu stanicu za namatanje strujnih jezgara. Isti postupak je potrebno ponoviti za skladište repromaterijala SRM\_B čija je izlazna metoda prikazana na slici 4.12.

Za kretanje proizvoda C sa skladišta repromaterijala SRM\_C na radne stanice NAM1 i NAM2 korišteni su *Connector*-i kako bi se prikazale obadvije opcije povezivanja objekata. Slika 4.13. prikazuje povezivanje objekta SRM\_C sa radnim stanicama NAM1 i NAM2.



Slika 4.10. Prikaz dodjeljivanja izlazne metode za skladište repromaterijala A

```
-- Izlazna kontrola za SRM_A  
waituntil NAM_JEZ.empty -- Pričekati sve dok radna stanica NAM_JEZ ne bude prazna  
@.move(NAM_JEZ) -- Kada je radna stanica NAM_JEZ prazna, proslijediti proizvod A na nju
```

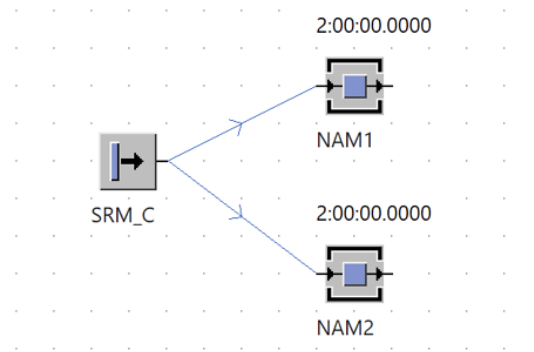
Slika 4.11. Prikaz izlazne metode za skladište repromaterijala A

```

-- Izlazna kontrola za SRM_B
if not BR1.occupied then -- ako radna stanica BR1 nije zauzeta, proslijedi na nju proizvod B
    @.move(BR1);
elseif not BR2.occupied then -- ako je BR1 zauzeta, proizvod B proslijedi na radnu stanicu BR2
    @.move(BR2);
end

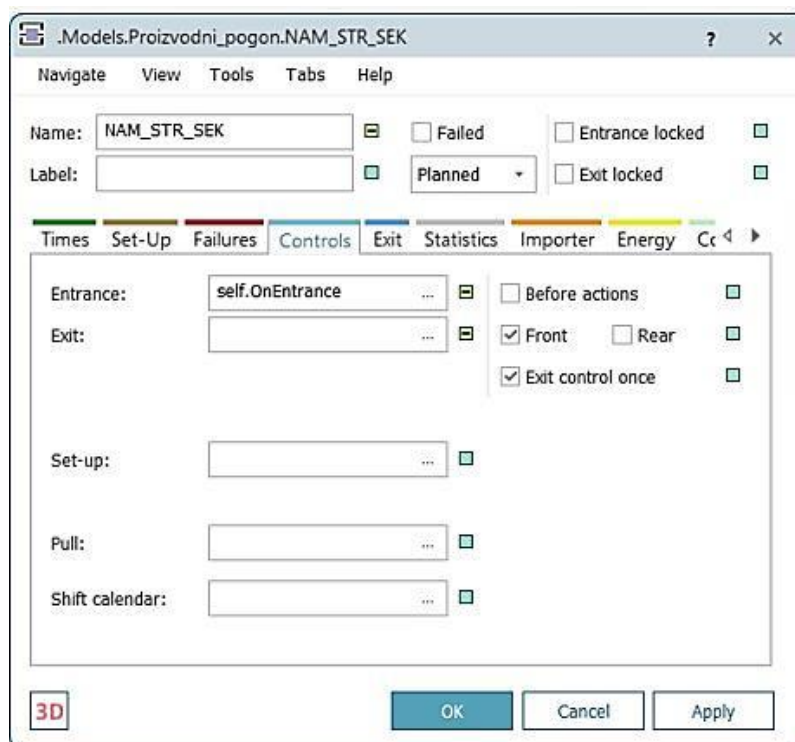
```

Slika 4.12. Prikaz izlazne metode za skladište repromaterijala B



Slika 4.13. Prikaz povezivanja SRM\_C s radnim stanicama NAM1 i NAM2

S obzirom na to da se faze 20, 40 i 60 izvide na istoj radnoj stanici – Ispitna stanica nazvana ISP1, potrebno je napraviti metode koje će omogućiti da radna stanica ISP1 usmjeri proizvod A na ispravnu radnu stanicu nakon svake faze. To će se postići tako da se za ulazne kontrole postave metode koje će mijenjati ime proizvodu prije ulaska na radnu stanicu kako bi radna stanica ISP1 mogla poslati proizvod na ispravnu radnu stanicu. Ulazna metoda prikazana na slikama 4.14. i 4.15. označava programski kod koji će funkcionirati na način da kada na radnu stanicu za namatanje strujnih sekundarnih namota NAM\_STR\_SEK stigne proizvod A, ime mu se promijeni u A\_2. Isti postupak se ponavlja za radnu stanicu za kompletiranje aktivnog strujnog dijela KOM1 čiji je programski kod za ulaznu kontrolu prikazan na slici 4.16.



Slika 4.14. Prikaz postavljene ulazne metode za radnu stanicu NAM\_STR\_SEK

```

if @.name = "A"
  @.name := "A_2" -- ako je na ulazu proizvod A, preimenuj ga u proizvod A_2
  return
end

```

Slika 4.15. Prikaz programskog koda ulazne metode za radnu stanicu NAM\_STR\_SEK

```

if @.name = "A_2"
  @.name := "A_3" -- ako je na ulazu proizvod A_2, preimenuj ga u proizvod A_3
  return
end

```

Slika 4.16. Prikaz programskog koda ulazne metode za radnu stanicu KOM1

Nakon što su napravljene metode koje mijenjaju ime proizvoda A ovisno o tome na kojoj radnoj stanici se nalaze, postavlja se izlazna metoda s radne stanice ISP (slika 4.17.).



```

if @.name = "A" then
  @.move(NAM_STR_SEK); -- ako je na izlazu proizvod A, proslijedi ga na namatanje strujnih sekundara
elseif @.name = "A_2" then
  @.move(KOM1); -- ako je na izlazu proizvod A_2, proslijedi ga na kompletiranje aktivnog strujnog dijela
elseif @.name = "A_3" then
  if not PRE1.occupied then
    @.move(PRE1); -- ako je na izlazu proizvod A_3, proslijedi ga na jedan od tri slobodnih strojeva za strojno bandažiranje
  elseif not PRE2.occupied then
    @.move(PRE2);
  else
    @.move(PRE3);
  end;
end;
end;

```

Slika 4.17. Prikaz izlazne metode sa radne stanice ISP

Faza 80 se sastoji od četiri podfaze:

- faza 82 – Strojno bandažiranje,
- faza 84 – Ručno bandažiranje,
- faza 86 – Strojno bandažiranje,
- faza 88 – Ručno bandažiranje.

Faze 82 i 86 se odvijaju na istim radnim stanicama kao i faze 84 i 88 stoga je potrebno napraviti metode koje će prosljediti proizvod na ispravne radne stanice.

Na radnu stanicu PRE1 koja predstavlja strojno bandažiranje na stroju Preciz, postavlja se izlazna metoda koja je prikazana na slici 4.18. Metoda prikazana na slici 4.18. prosljeđuje proizvod na jednu od slobodnih radnih stanica za ručno bandažiranje. Isti postupak je potrebno ponoviti i za radne stanice PRE2 i PRE3.

```

if not BAN1.occupied then
  @.move(BAN1);
elseif not BAN2.occupied then
  @.move(BAN2);
elseif not BAN3.occupied then
  @.move(BAN3);
elseif not BAN4.occupied then
  @.move(BAN4);
else
  @.move(BAN5);
end;

```

Slika 4.18. Prikaz izlazne metode za radnu stanicu PRE1

Kada se proizvod A\_3 obradi prvi put na radnim stanicama za strojno i ručno bandažiranje, potrebno mu je promijeniti ime kako bi se opet mogao obraditi na tim radnim stanicama kao što je naznačeno u proizvodnim fazama. Prikaz promjene imena proizvoda A\_3 odvija se na ulaznoj kontroli međuskladišta MED\_BAN kao što je prikazano na slici 4.19.

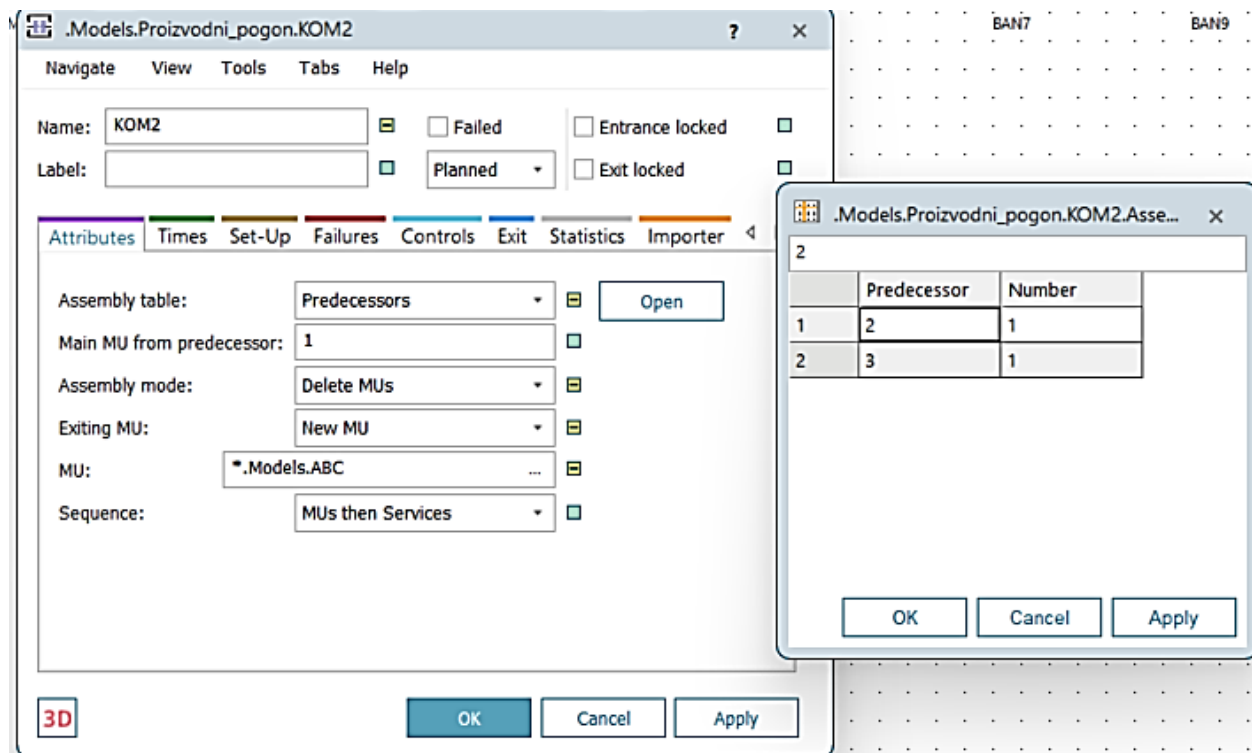
```
if @.name = "A_3"  
  @.name := "A_4" -- ako je na ulazu proizvod A_3, preimenuj ga u proizvod A_4  
  return  
end
```

Slika 4.19. Prikaz ulazne kontrole za međuskladište MED\_BAN

### 4.3. Objekt „Montažna stanica“

Za kompletiranje aktivnog dijela VAU transformatora potrebno je strujni, naponski primarni i naponski sekundarni dio spojiti u jednu cjelinu koja će biti prikazana kao novi *part* ABC koji će se stvoriti na isti način kako su se na početku stvarali proizvodi A, B i C. Kako bi bilo moguće napraviti izradu novog proizvoda u simulaciji, postavljen je objekt *AssemblyStation* koji predstavlja montažnu stanicu. Proizvod A\_4 je nakon faze 88 proslijeđen u međuskladište A\_4, proizvod B je nakon radne stanice za namatanje naponskog primara proslijeđen na međuskladište B a proizvod C je nakon radne stanice za namatanje naponskog sekundara proslijeđen na međuskladište C. Međuskladišta su connectorima povezana sa montažnom stanicom KOM2 koja je na izlazu povezana sa skladištem gotovih proizvoda SGP.

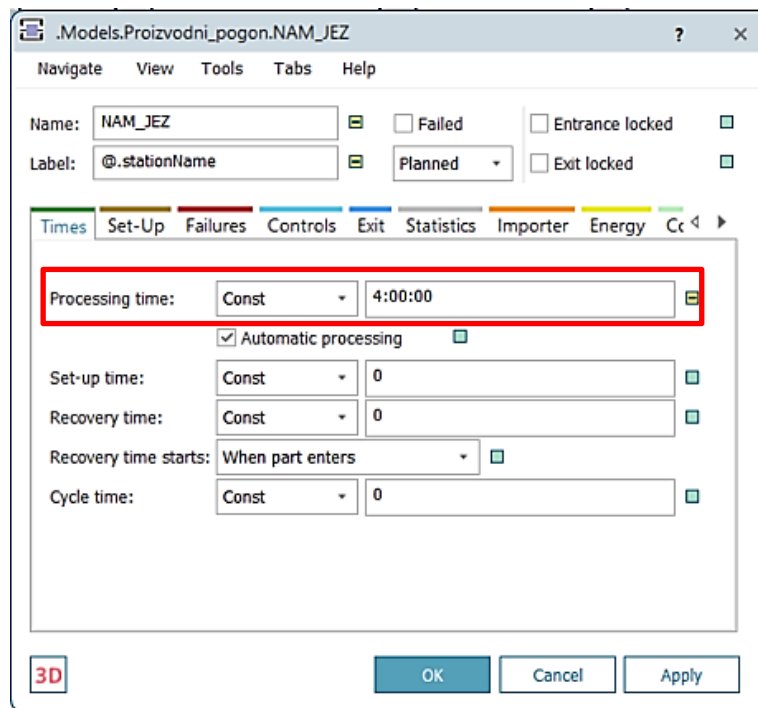
Dvoklikom na montažnu stanicu KOM2 otvara se prozor sa postavkama radne stanice. Odabere se postavka *Assembly table: Predecessors* i klikom na prozor *Open* otvara se novi prozor u kojem se definiraju proizvodi u tablici. Stupac *Predecessors* označava prethodnik odnosno *Connector* kojim su dijelovi povezani na montažnu stanicu KOM2. Za kompletiranje aktivnog dijela je potreban jedan proizvod A odnosno A\_4, jedan proizvod B i jedan proizvod C te se iz tog razloga u tablicu unosi broj 1 u stupac *Number* i nakon toga se zatvori tablica. Sljedeće se postavlja način montiranja odnosno *Assembly Mode* gdje se odabere opcija *Delete MUs* koja označava da se prethodni partovi brišu i dobiva novi proizvod ABC koji se sastoji od proizvoda A\_4, B i C.



Slika 4.20. Prikaz postavka za montažnu stanicu KOM2

#### 4.4. Postavljanje vremena operacija

Nakon dodavanja objekata u simulacijski model, potrebno je postaviti vremena trajanja operacija. Za radne stanice na kojima se obavlja samo jedna faza, dovoljno je unesti vrijeme trajanja u postavkama radne stanice. Dvoklikom na radnu stanicu NAM\_JEZ otvaraju se postavke radne stanice kao što je prikazano na slici 4.21. i unosi se vrijeme trajanja koje iznosi 4 sata.



Slika 4.21. Prikaz unosa vremena operacije

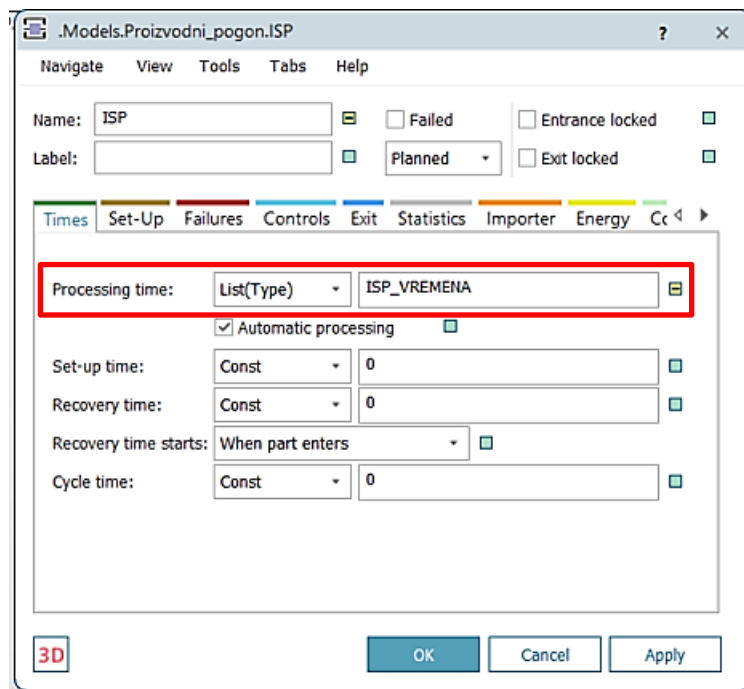
Prethodno opisan postupak postavljanja vremena operacija prikazan na slici 4.21. ponavlja se za sve radne stanice na kojima se odvija jedna operacija. Za radne stanice na kojima se odvija više operacija s različitim vremenom trajanja, vrijeme se unosi preko tablice vremena. U tablicu vremena unosi se trajanje operacije na radnoj stanici za svaki proizvod. Na slici 4.22. prikazana je tablica vremena trajanja operacija na radnoj stanici ISP jer na toj radnoj stanici postoje različita vremena trajanja ispitivanja za pojedine faze izrade VAU transformatora. Tablica vremena trajanja operacija se sastoji od dva stupca: stupac sa nazivom proizvoda i stupac sa vremenima trajanja.

	string 1	time 2
string	MU Type	Time
1	A	15:00.0000
2	A_2	25:00.0000
3	A_3	35:00.0000

Slika 4.22. Prikaz tablice vremena operacija za ispitnu stanicu

Nakon što je napravljena tablica sa vremenima trajanja, u prozor *Times*, pod *Processing time:* iz padajućeg menija se odabere *List(Type)* i onda pomoću *drag and dropa* se umetne tablica

vremena trajanja za ispitnu stanicu kao što je prikazano na slici 4.23. Isti postupak je potrebno ponoviti i za vrijeme trajanja operacija na radnim stanicama za strojno bandažiranje PRE1, PRE2 i PRE3 te na radnim stanicama za ručno bandažiranje BAN1, - BAN5. (slika 4.24.)



Slika 4.23. Postavljanje vremena operacija za ispitnu stanicu

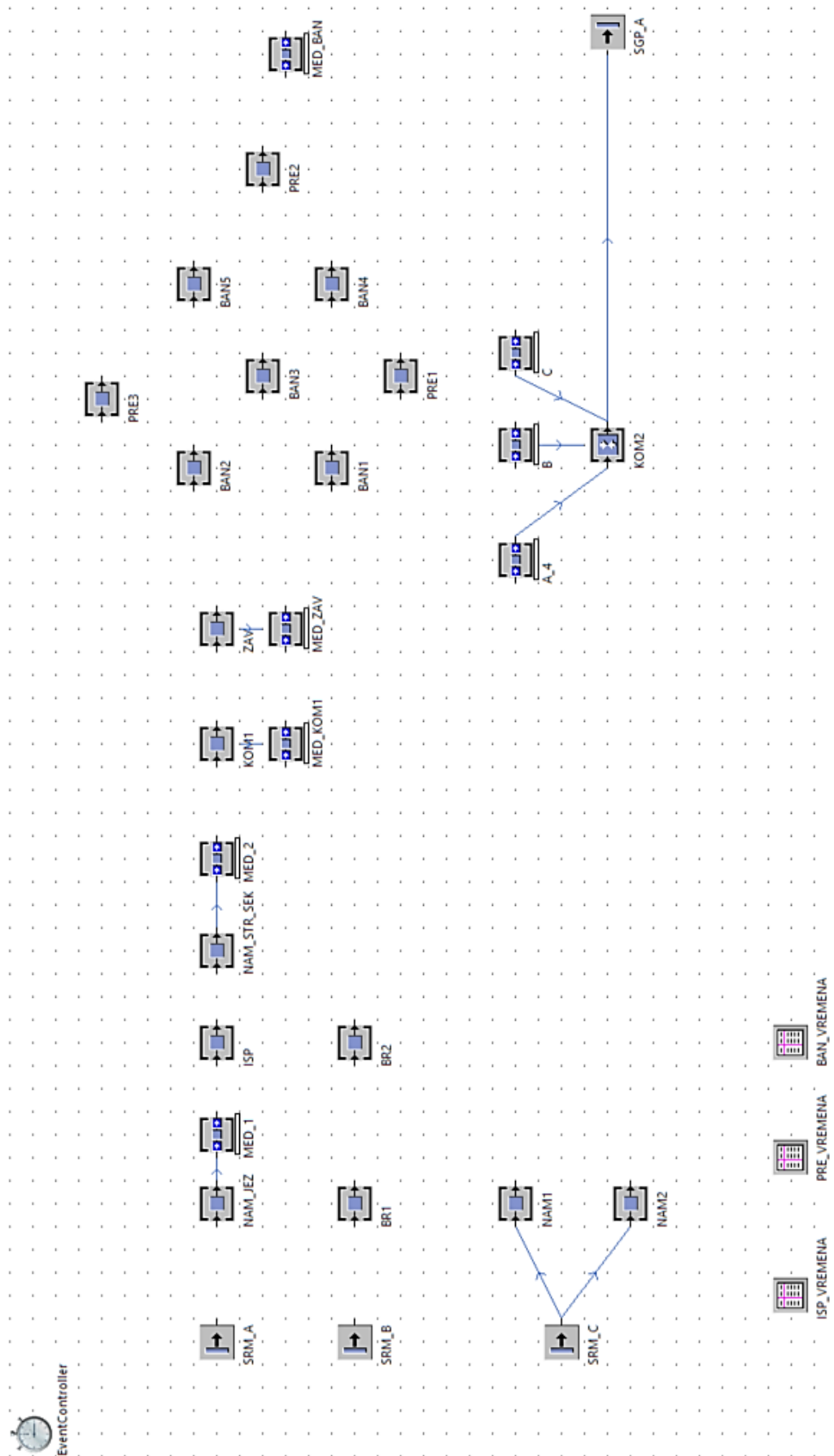


Slika 4.24. Prikaz tablica za vremena operacija

#### 4.5. Provjera ispravnosti izrađenog simulacijskog modela

Izgled simulacijskog modela proizvodnog pogona čiju je ispravnost potrebno provjeriti prikazan je na slici 4.25. Provjera ispravnosti rada izrađenog simulacijskog modela vrši se pomoću dva postupka: verifikacija i validacija. Glavni cilj provjere ispravnosti simulacijskog modela je utvrditi da li je simulacijski model prikladan za određenu upotrebu kako bi se rezultati simulacijskog modela mogli koristiti za donošenje odluka vezanih za stvarni proizvodni sustav s određenom razinom sigurnosti. Bitno je napomenuti da je verifikacija simulacijskog modela

neophodna ali nije dovoljno napraviti samo verifikaciju jer simulacijski model može biti verificiran a da nije valjan pa se zbog tog razloga mora napraviti i validacija simulacijskog modela.

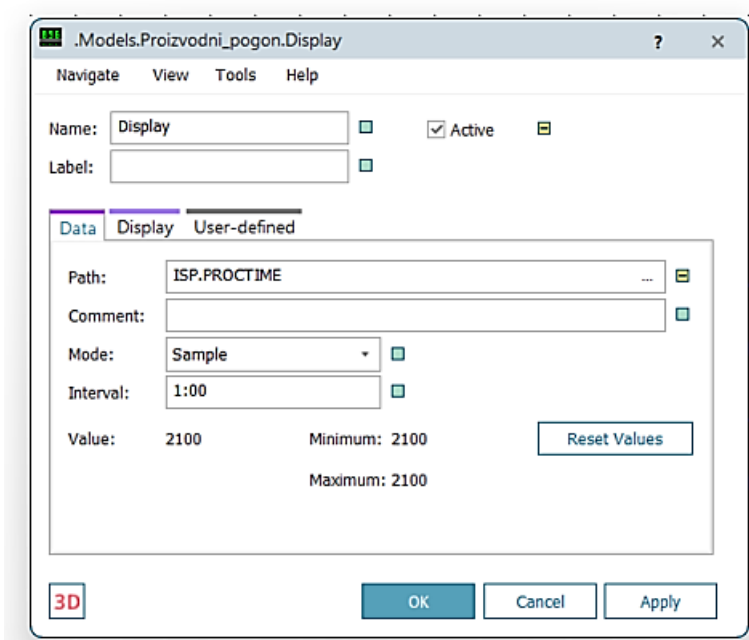


Slika 4.25. Prikaz simulacijskog modela proizvodnog pogona

#### 4.5.1. Verifikacija simulacijskog modela

Verifikacija je proces osiguravanja da model pravilno funkcionira prema svojoj specifikaciji i da je tehnički ispravan. To znači da su sve komponente modela ispravno postavljene i povezane te da se ponašaju na način na koji su zamišljene. Cilj verifikacije je identificirati i ispraviti pogreške u simulacijskom modelu kako bi se osiguralo da simulacija radi ispravno prije nego što se rezultati koriste za donošenje odluka. [3]

Ovaj simulacijski model će biti verificiran tako da će se postaviti objekt *Display* na sve radne stanice kako bi se provjerilo vrijeme trajanja obrade za svaku operaciju. Objekt *Display* se nalazi u kartici *User Interface* na alatnoj traci. Nakon što je postavljen *Display* iznad radne stanice, potrebno je dvoklikom na njega otvoriti njegove postavke gdje se pomoću *drag and drop*-a ubacuje referentni stroj te je potrebno odabrati praćenje vremena kao funkciju i odabrati da se osvježavanje vrši svake minute. Na slici 4.26. prikazano je postavljanje objekta *Display* za ispitnu stanicu kako bi se provjerilo mijenja li se vrijeme obrade za različite operacije na ispitnoj stanici prema tablici vremena sa slike 4.22.

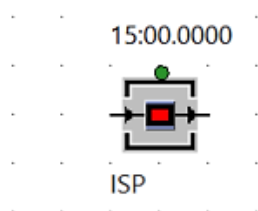


Slika 4.26. Prikaz postavka za objekt *Display* za vrijeme operacija na ispitnoj stanici

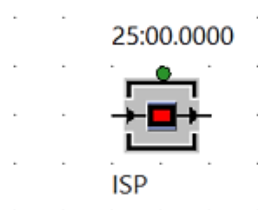
Nakon što su postavljene postavke, potrebno je pokrenuti simulaciju kako bi se verificirao simulacijski model. Na slikama 4.27., 4.28. i 4.29. vidljivo je da su se vremena mijenjala u



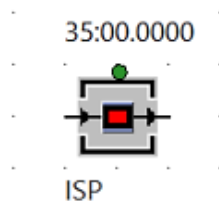
skladu sa zadanim vremena operacija prema tablici prikazanoj na slici 4.22. što znači da je simulacijski model ispravno postavljen i da je verifikacija uspješna.



Slika 4.27. Prikaz trajanja obrade na ispitnoj stanici za proizvod A



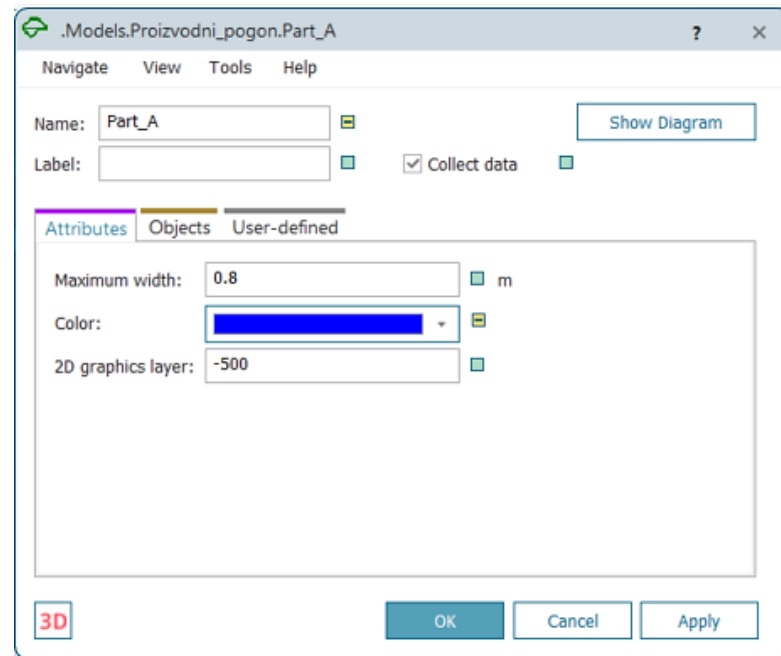
Slika 4.28. Prikaz trajanja obrade na ispitnoj stanici za proizvod A\_2



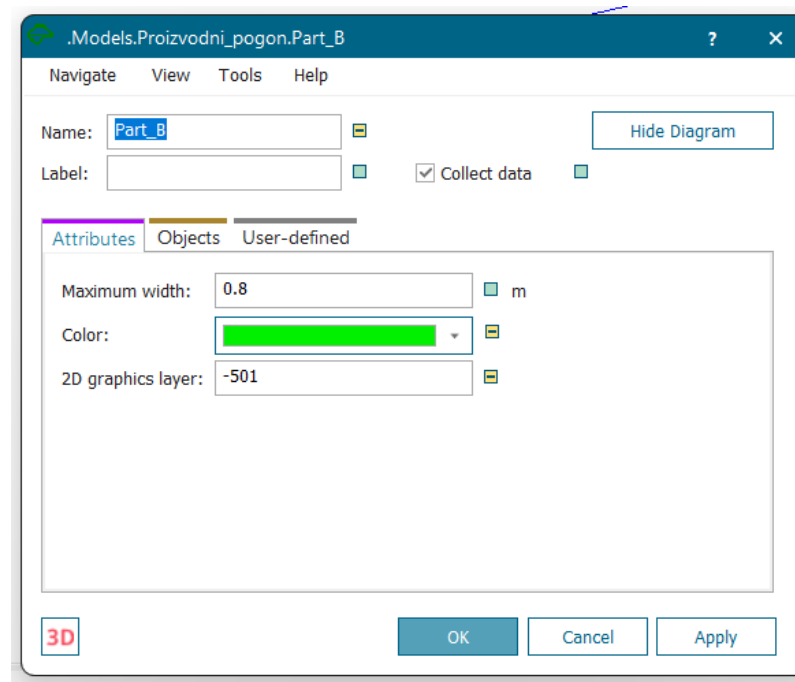
Slika 4.29. Prikaz trajanja obrade na ispitnoj stanici za proizvod A\_3

Korištenjem objekta *SankeyDiagram* također je moguće izvršiti verifikaciju simulacijskog modela. *SankeyDiagram* je vrsta toka dijagrama koji koristi trake za vizualno prikazivanje toka proizvoda. Širina trake je proporcionalna količini toka, što omogućuje lako uočavanje gdje se resursi koriste ili gube. U ovom slučaju, *SankeyDiagram* će pokazati tok materijala kako bi se vizualno vidjelo da li je simulacijski model ispravan. Potrebno je iz alatna trake u kratici *User Interface* pomoću *drag and drop*-a postaviti *SankeyDiagram* u simulacijski model. S obzirom na to da simulacijski model sadrži četiri vrste proizvoda, biti će i četiri *SankeyDiagrama*. Kako bi dijagram prikazao tok proizvoda, potrebno je proizvod *drag and drop*-om povući do ikone *SankeyDiagrama* za svaki proizvod. Nakon što se povukao svaki proizvod do njegove ikone

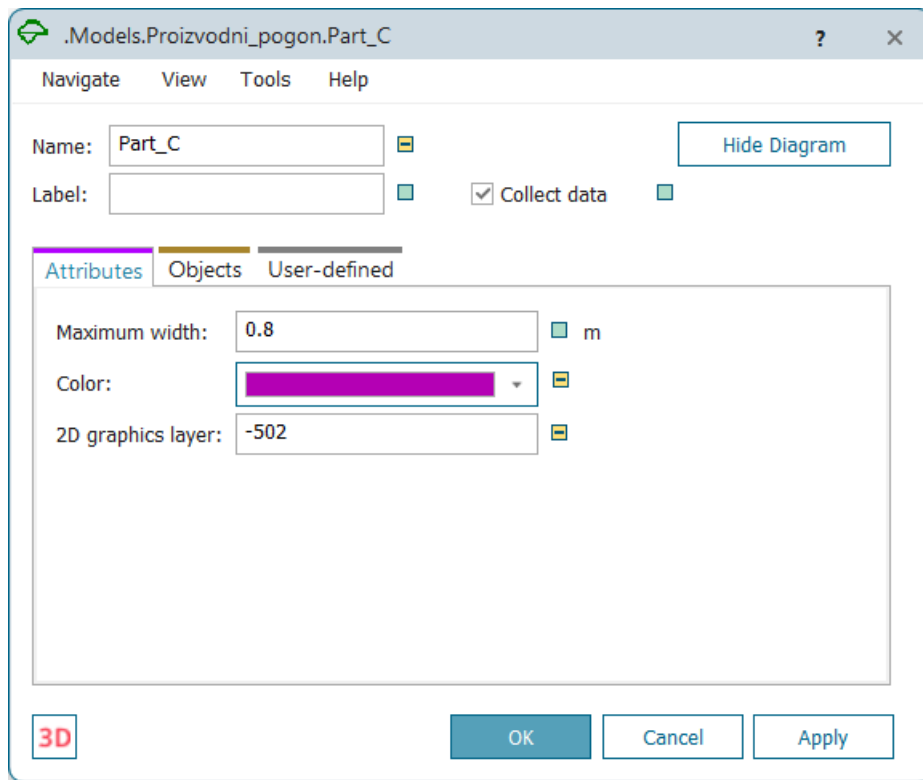
*SankeyDiagrama*, dvoklikom na svaki se otvaraju postavke samog dijagrama gdje će se za svaki proizvod staviti druga boja za bolju vizualizaciju tokova kako je prikazano na slikama 4.30.-4.33. i nakon toga se pokreće simulacija. Kada završi simulacija, potrebno je dvoklikom otvoriti *SankeyDiagram* i odabrati opciju *Show Diagram* kako bi bili vidljivi tokovi kretanja proizvoda.



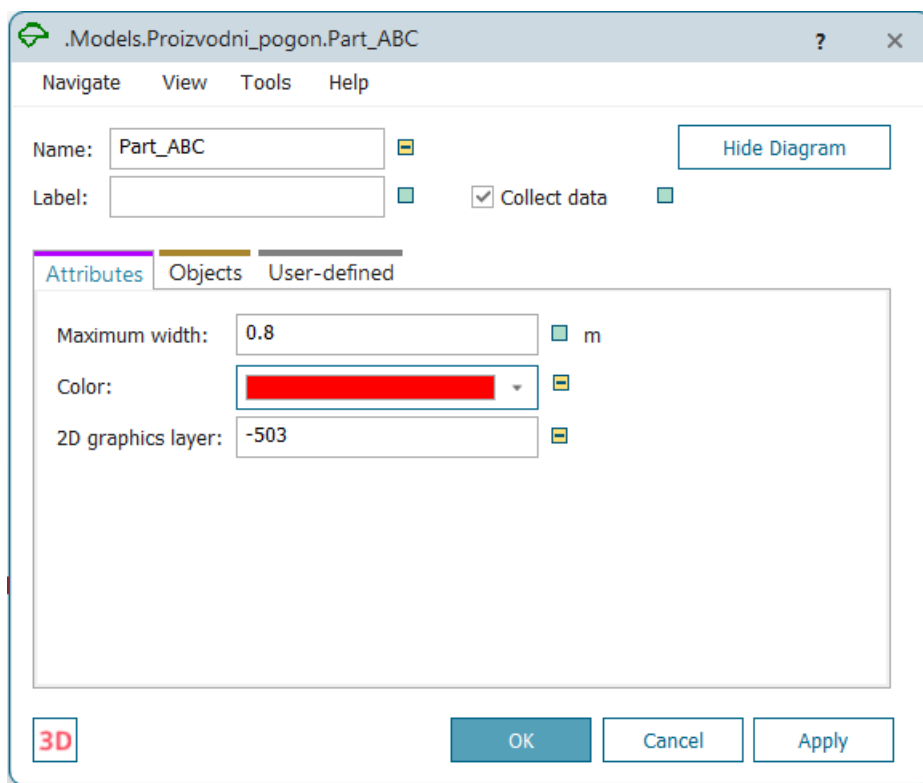
Slika 4.30. Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod A



Slika 4.31. Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod B

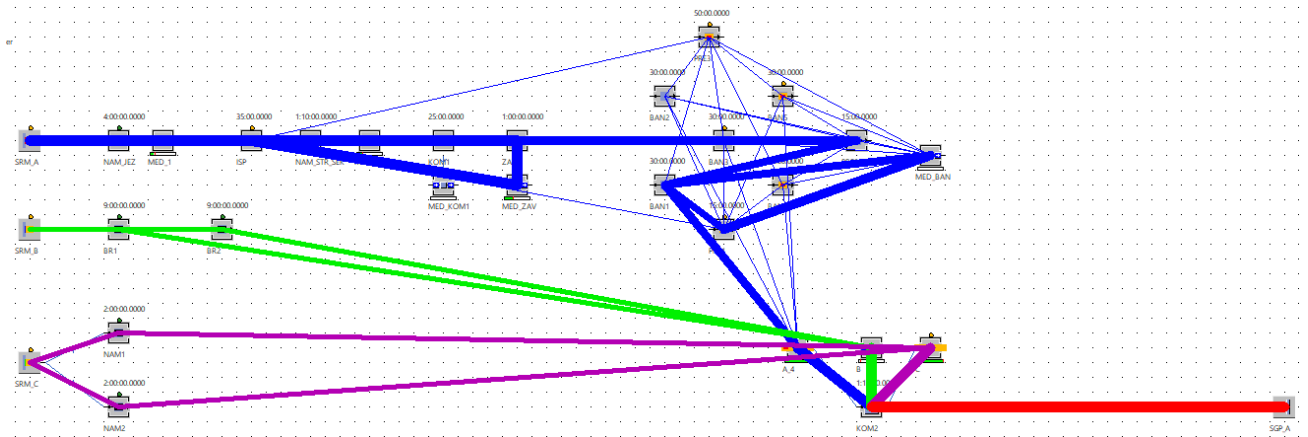


Slika 4.32. Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod C



Slika 4.33. Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod ABC

Slika 4.34. prikazuje tokove proizvoda. Veća širina trake može značiti dvije stvari: veću količinu resursa i/ili veće opterećenje radnih stanica što će biti promatrano u sljedećem poglavlju.



Slika 4.34. Prikaz SankeyDiagrama za sve četiri vrste proizvoda

#### 4.5.2. Validacija simulacijskog modela

Validacija simulacijskog modela je postupak kojim se osigurava da simulacijski model precizno odražava stvarni sustav koji se simulira te da rezultati simulacije odgovaraju stvarnim podacima ili očekivanjima. Dok verifikacija provjerava ispravnost samog modela, validacija se fokusira na to da model ispravno predstavlja stvarni svijet.

Postupak validacije se provodi na način da se provjeri da li je vrijeme trajanja simulacije proizvodnog procesa jednako vremenu koje je početno zadano i uneseno u *Event Controller*. To će se postići tako da se nakon provedene simulacije desnim klikom na objekt SGP odabere opcija *Show Statistics Report* koja predstavlja prikaz statističkog izvještaja. Nakon odabira opcije *Show Statistics Report*, otvara se novi prozor sa svim statističkim podacima resursa gdje se može vidjeti trajanje simulacije. Zadano vrijeme trajanja simulacije je 80 radnih dana, proizvodnja se odvija u dvije smjene po 8h što znači da je vrijeme trajanja simulacije jednako 1280 sati ili kada se preračuna u dane 53 dana i 8 sati. Na slici 4.35. je prikazano vrijeme trajanja simulacije 53 dana i 8 sati, na slici 4.36. vidimo da je to vrijeme koje je uneseno u *Event Controller* što znači da je validacija simulacijskog modela uspješna. Isto tako, na slici 4.35. je vidljivo da je u vremenu od 1280 sati proizvedeno 283 aktivnih dijelova VAU transformatora.

## Tecnomatix Plant Simulation 2302 Statistics

Resource Statistics   Show All   Print This Page   Print All   Save   Refresh

Created on	25. svibnja 2024. 14:26
Model name	C:\Users\Josipa\Documents\DIPLOMSKI-Josipa.spp
Simulation time	53:08:00.0000

### Resource Statistics - Resource Statistics

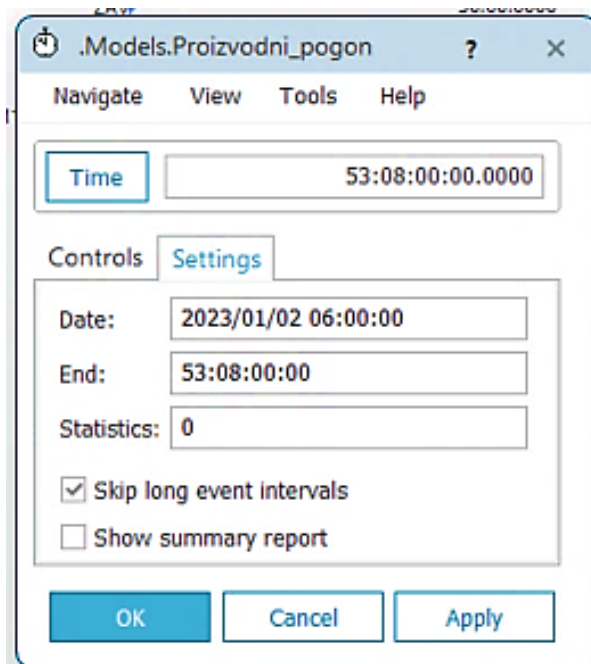
Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
SGP_A	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Portions of the States

Object	Number of Entries	Number of Exits	Minimum Contents	Maximum Contents	Relative Empty	Relative Full	Relative Occupation without Interruptions	Relative Occupation with Interruptions
SGP_A	283	283	0	1	100.00%	-	0.00%	0.00%

Material Flow Properties

Slika 4.35. Prikaz trajanja simulacije proizvodnog procesa

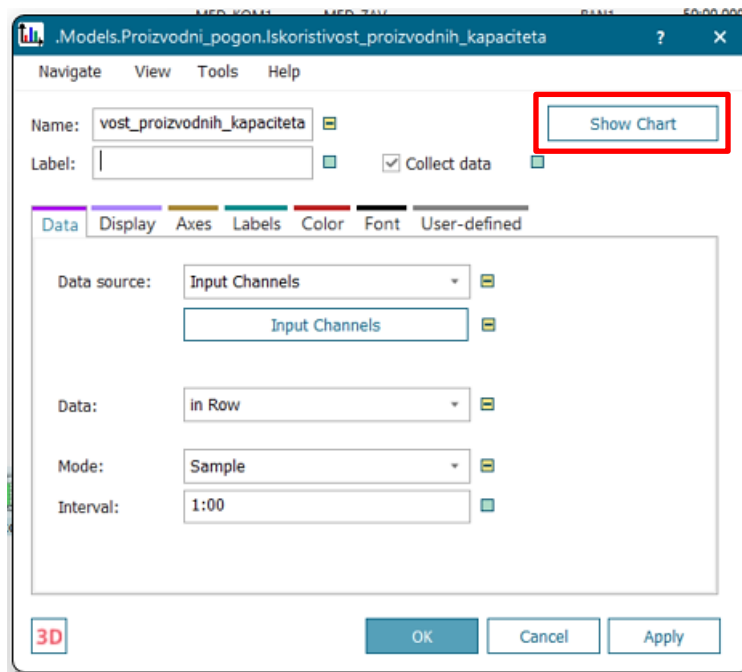


Slika 4.36. Prikaz zadanog vremena trajanja simulacije

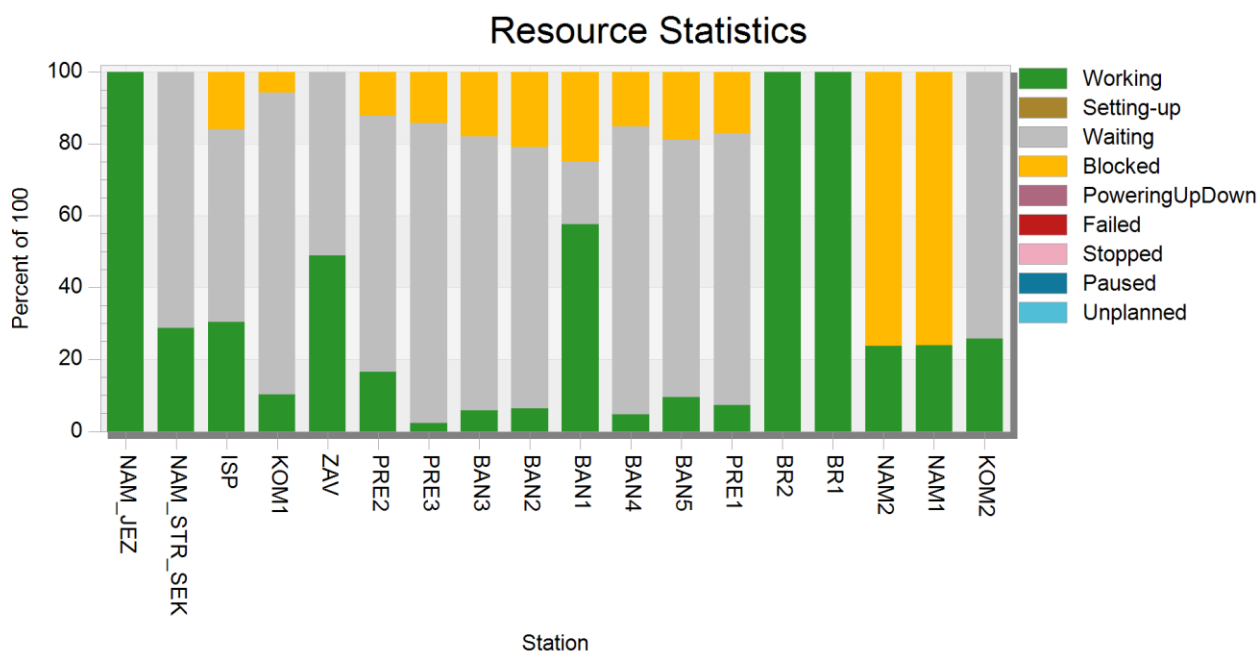
## 4.6. Određivanje iskoristivosti proizvodnih kapaciteta i identifikacija uskog grla

Kako bi se odredila iskoristivost proizvodnih kapaciteta, koristi se grafički prikaz pomoću objekta *Chart*. *Chart* grafički prikazuje skupove podataka koje je simulacija proizvodnog procesa zabilježila tijekom simulacije. Nalazi se na alatnoj traci u prozoru *User Interface*. *Chart* se dodaje u simulacijski model pomoću *drag and drop*-a. Kako bi *Chart* prikazao skupove podataka radnih stanica, potrebno je sve radne stanice povući *drag and drop*-om do ikone koja predstavlja grafikon za prikaz iskoristivosti proizvodnih kapaciteta. Kada je grafikon postavljen,

potrebno je pokrenuti simulaciju kako bi se zabilježili podaci potrebni za izradu grafikona. Nakon što je simulacija završila, dvoklikom na grafikon otvaraju se postavke (slika 4.37) u kojima je potrebno odabrati *Show Chart* čime se otvara dodatni prizor sa prikazom grafikona iskoristivosti proizvodnih kapaciteta prikazan na slici 4.38.



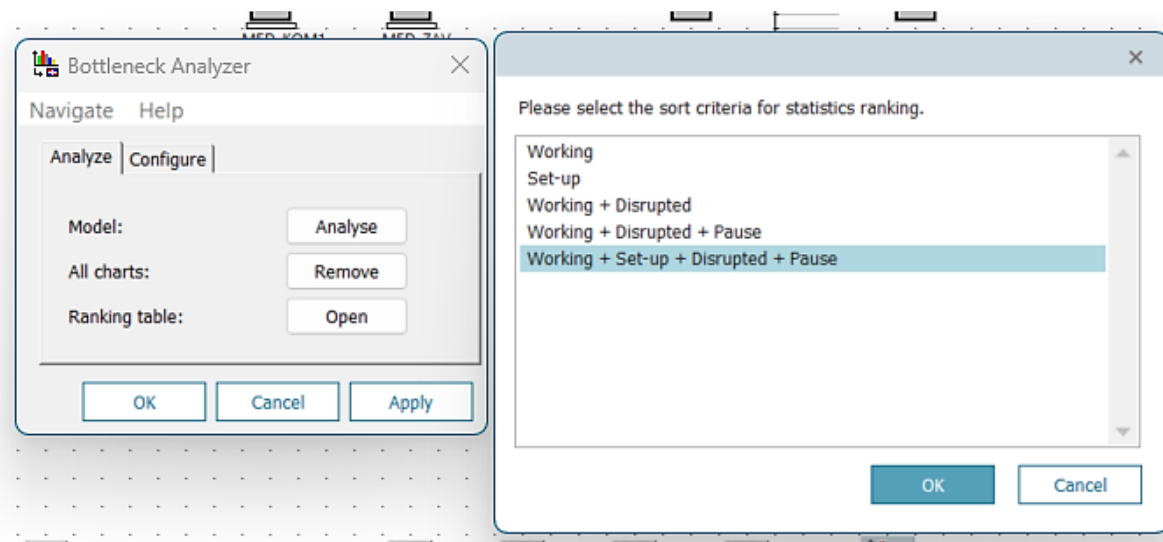
Slika 4.37. Prikaz postavki grafikona



Slika 4.38. Prikaz grafikona iskoristivosti proizvodnih kapaciteta

Iz grafikona iskoristivosti proizvodnih kapaciteta vidljivo je po bojama kakva je iskoristivost pojedinih radnih stanica. Zelena boja predstavlja rad radnih stanica dok siva boja predstavlja čekanje radnih stanica. Radne stanice čiji grafikonu sadržavaju i žutu boju su radne stanice koje su blokirane odnosno sljedeća faza u procesu ih sprječava da otpuste proizvod za daljnju obradu pa ne mogu biti iskorištene u svom punom potencijalu.

Kako bi jasnije vidjeli učinkovitost proizvodnje, uvodi se alat *Bottleneck Analyzer* kako bi se identificirala uska grla proizvodnje. Usko grlo je dio proizvodnog procesa koji ograničava ukupni kapacitet sustava zbog svoje ograničene propusnosti. Za upotrebu *Bottleneck Analyzera* potrebno je dodati objekt *drag and dropom* u simulacijski model koji se nalazi u alatnoj traci pod karticom *Tools*. Nakon dodavanja objekta za identifikaciju uskog grla, potrebno je pokrenuti simulaciju proizvodnog procesa. Kada simulacija završi, dvoklikom na *Bottleneck Analyzer* otvaraju se njegove postavke gdje se odabere *Analyse* i *Ranking table: Open*. Klikom na opciju *Open* otvara se novi prozor u kojem se odabire kakvu vrsta izvještaja identifikacije uskog grla želimo. Odabire se zadnja opcija koja generira podatke o radnom vremenu, vremenu postavljanja, vremenu zastoja i vremenu pauze i klikne se na gumb *OK* čime se otvara novi prozor sa tablicom sa podacima.



Slika 4.39. Prikaz postavki *Bottleneck Analyzera*

Slika 4.40. prikazuje rangiranu tablicu dobivenu *Bottleneck Analyzerom*. Vidljivo je da su uska grla proizvodnog procesa radne stanice BR2, BR1 i NAM\_JEZ koje uzrokuju zastoje u proizvodnji.

	object 1	real 2	real 3	real 4	real 5	real 6	real 7	real 8	real 9	real 10
string	resource	working	set-up	waiting	blocked	poweringUpDown	disrupted	stopped	pause	sortCriteria
1	root.BR2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	root.BR1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	root.NAM_JEZ	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	root.BAN1	57.58	0.00	17.42	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.58
5	root.ZAV	48.91	0.00	51.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.91
6	root.ISP	30.47	0.00	53.68	15.85	0.00	0.00	0.00	0.00	30.47
7	root.NAM_STR_SEK	28.71	0.00	71.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.71
8	root.KOM2	25.86	0.00	74.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.86
9	root.NAM1	23.91	0.00	0.00	76.09	0.00	0.00	0.00	0.00	23.91
10	root.NAM2	23.82	0.00	0.00	76.18	0.00	0.00	0.00	0.00	23.82
11	root.PRE2	16.48	0.00	71.30	12.21	0.00	0.00	0.00	0.00	16.48
12	root.KOM1	10.19	0.00	84.06	5.76	0.00	0.00	0.00	0.00	10.19
13	root.BAN5	9.49	0.00	71.77	18.74	0.00	0.00	0.00	0.00	9.49
14	root.PRE1	7.31	0.00	75.78	16.91	0.00	0.00	0.00	0.00	7.31
15	root.BAN2	6.41	0.00	72.80	20.79	0.00	0.00	0.00	0.00	6.41
16	root.BAN3	5.90	0.00	76.23	17.87	0.00	0.00	0.00	0.00	5.90
17	root.BAN4	4.80	0.00	80.14	15.05	0.00	0.00	0.00	0.00	4.80
18	root.PRE3	2.34	0.00	83.45	14.21	0.00	0.00	0.00	0.00	2.34

*Slika 4.40. Prikaz rangirane tablice dobivene Bottleneck Analyzerom*

Iz grafikona iskoristivosti proizvodnih kapaciteta i alata za identifikaciju uskog grla, vidljivo je da su radne stanice BR2, BR1 i NAM\_JEZ iskorištene maksimalno dok ima poveći broj radnih stanica čiji je rad blokiran stoga ima dovoljno prostora za poboljšanja.



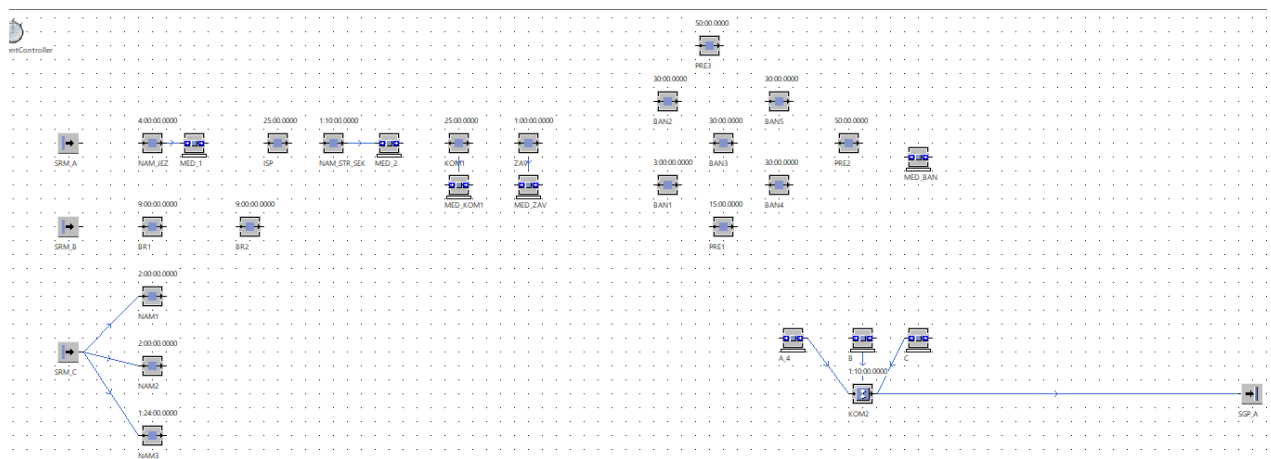
## 5. UNAPRJEĐIVANJE OSNOVNOG SIMULACIJSKOG MODELA I USPOREDBA SIMULACIJSKIH MODELA

Unaprjeđivanje osnovnog simulacijskog modela podrazumijeva sve aktivnosti i strategije koje služe za poboljšanje točnosti, funkcionalnosti i performansi simulacijskog modela kako bi se poboljšala učinkovitost i korisnost simulacijskog modela.

### 5.1. Prva varijanta - unaprjeđivanje prema planovima tvrtke

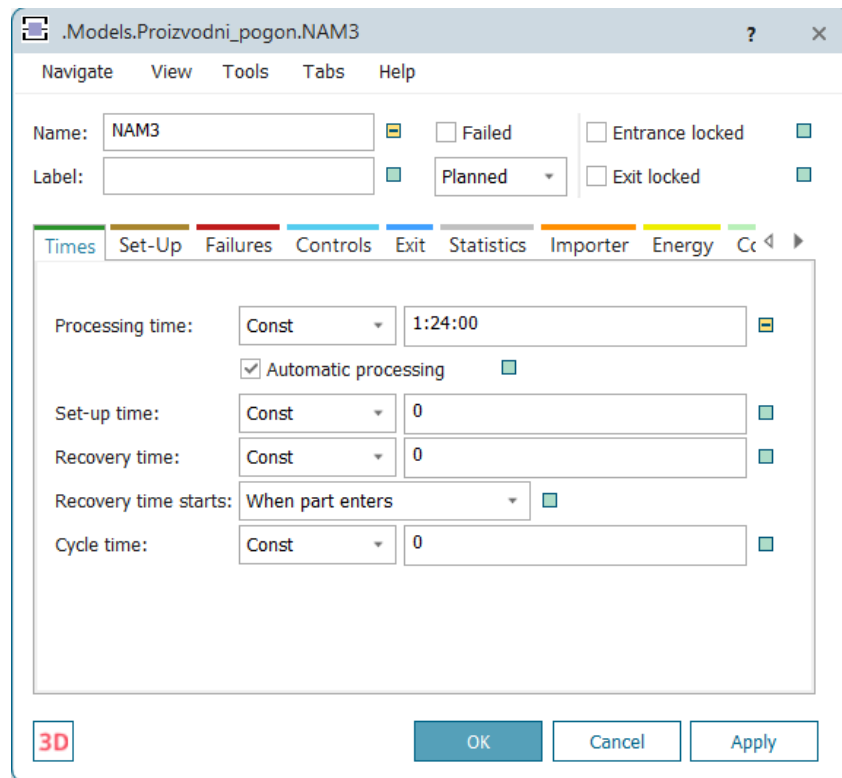
Plan tvrtke je kupnja novog stroja za izradu naponskih sekundara. Novi stroj za izradu naponskih sekundara bio bi 30% brži što znači da bi postojeće vrijeme potrebno za namatanje naponskih sekundarnih namota smanjio sa 2 sata na 1 sat i 24 minute te bi također zahtijevao 1 radnicu na stroju u odnosu na 2 radnice koje su potrebne sada na stroju.

Kako bi se unaprijedio simulacijski model prema zadanim kriterijima, potrebno je dodati u simulacijski model stroj za izradu naponskih sekundara NAM3. Izgled unaprijeđenog simulacijskog modela prikazan je na slici 5.1.



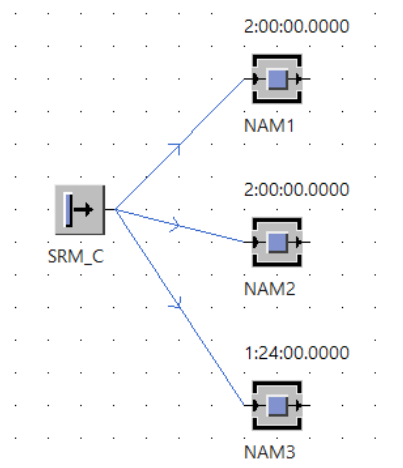
Slika 5.1. Prikaz prve varijante unaprijeđenog simulacijskog modela

Kada se dodao stroj NAM3, potrebno je unesti vrijeme obrade na radnoj stanici. Vrijeme obrade za stroj za izradu naponskog sekundara NAM3 se unosi ručno u postavke radne stanice kao što je prikazano na slici 5.2.



Slika 5.2. Prikaz unosa vremena trajanja obrade za radnu stanicu NAM3

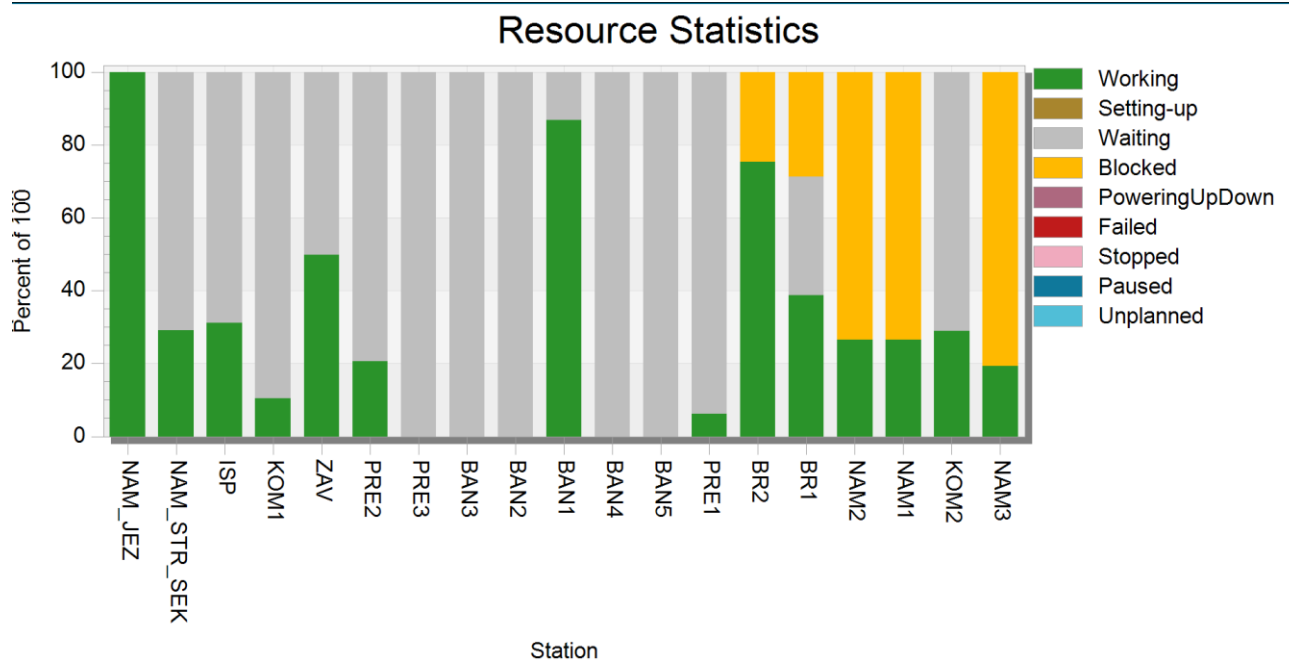
Isto tako je sada potrebno dodati *Display* koji će prikazivati vrijeme obrade na radnoj stanici NAM3 kako je prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3. Prikaz *Display*-a za radne stanice NAM1, NAM2 i NAM3

Pokreće se simulacija te se nakon završetka simulacije otvara grafikon za prikaz iskoristivosti proizvodnih kapaciteta i provodi analiza uskog grla. Na slikama 5.4. i 5.5. vidljivo

je da je sada potencijalni novi stroj blokiran. Razlog leži u tome što su proizvodi B i C, koji se skupa sa proizvodom A\_4 kompletiraju u proizvod ABC na montažnoj stanici, uzrokovali zastoje na međuskладиštima B i C jer cijelo vrijeme čekaju proizvod A\_4 kako bi se kompletirali u proizvod ABC što znači da se u sljedećoj varijanti unaprjeđivanja simulacijskog problema mora riješiti problem uskog grla na radnoj stanici NAM\_JEZ kako bi se vidjelo hoće li onda biti brža izrada proizvoda A\_4.



Slika 5.4. Prikaz iskoristivosti proizvodnih kapaciteta za prvu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela

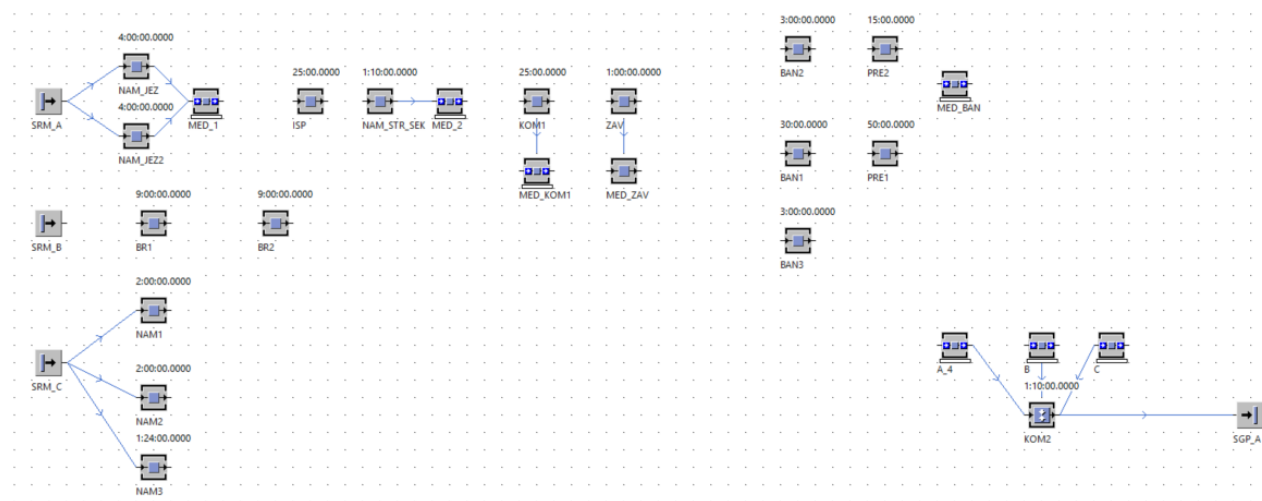
Object 1	real 2	real 3	real 4	real 5	real 6	real 7	real 8	real 9	real 10	
string	resource	working	set-up	waiting	blocked	poweringUpDown	disrupted	stopped	pause	sortCriteria
1	root.NAM_JEZ	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	root.BAN1	86.86	0.00	13.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.86
3	root.BR2	75.35	0.00	0.00	24.65	0.00	0.00	0.00	0.00	75.35
4	root.ZAV	49.82	0.00	50.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	49.82
5	root.BR1	38.78	0.00	32.50	28.72	0.00	0.00	0.00	0.00	38.78
6	root.ISP	31.11	0.00	68.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.11
7	root.NAM_STR_SEK	29.08	0.00	70.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.08
8	root.KOM2	28.89	0.00	71.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.89
9	root.NAM1	26.56	0.00	0.00	73.44	0.00	0.00	0.00	0.00	26.56
10	root.NAM2	26.52	0.00	0.00	73.48	0.00	0.00	0.00	0.00	26.52
11	root.PRE2	20.64	0.00	79.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.64
12	root.NAM3	19.36	0.00	0.00	80.64	0.00	0.00	0.00	0.00	19.36
13	root.KOM1	10.38	0.00	89.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.38
14	root.PRE1	6.26	0.00	93.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.26
15	root.PRE3	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	root.BAN3	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	root.BAN2	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	root.BAN4	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Slika 5.5. Prikaz tablice analize uskog grla

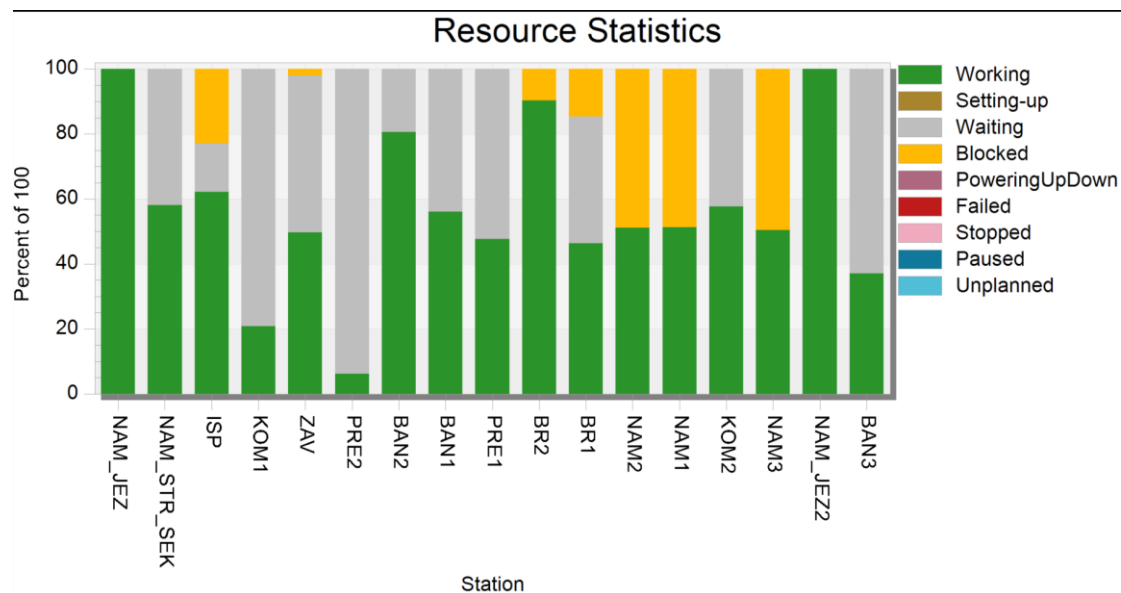
## 5.2. Druga varijanta – unaprjeđivanje osnovnog simulacijskog modela prema provedenim analizama iskoristivosti proizvodnih kapaciteta

Druga varijanta unaprjeđivanja osnovnog simulacijskog modela nadovezuje se na prvo unaprjeđivanje s obzirom da tvrtka već radi na nabavi navedenog stroja i na provedenim analizama iskoristivosti proizvodnih kapaciteta. S obzirom na dobivene podatke iz prve varijante, sada treba poboljšati simulacijski model tako da se ukloni pojava uskog grla na radnoj stanici NAM\_JEZ. To će se postići tako da se dodaje još jedna radna stanica NAM\_JEZ2 koja će imati isto vrijeme trajanja kao i radna stanica NAM\_JEZ. Isto tako, ukloniti će se neke radne stanice koje su prema slici 5.4. cijelo vrijeme bile u poziciji čekanja a to su radne stanice PRE3, BAN2, BAN3, BAN4 i BAN5. S obzirom na to da će se dodati radna stanica NAM\_JEZ2, neće se ukloniti sve radne stanice za ručno bandažiranje jer je za očekivati da će se povećati potreba za ručnim bandažiranjem pa se stoga uklanjaju samo radne stanice PRE3, BAN4 i BAN5.

Unaprjeđeni simulacijski model prikazan je na slici 5.6. gdje je također vidljivo da je postavljen i Display na radnu stanicu NAM\_JEZ2 kako bi se vidjelo vrijeme obrade na toj radnoj stanici. Slike 5.7 i 5.8. prikazuju graf iskoristivosti proizvodnog kapaciteta i analizu uskog grla druge varijante unaprjeđenja osnovnog simulacijskog modela. Sada je vidljivo da se usko grlo javlja na radnim stanicama namatanja strujnih jezgara NAM\_JEZ i NAM\_JEZ2. Taj podatak ne čudi s obzirom na to da je vrijeme potrebno za obradu na te dvije radne stanice duže nego na ostalim radnim stanicama za obradu proizvoda A što stvara zagušenje. Isto tako, na slici 5.7. je vidljivo da ima dosta radnih stanica koje su blokirane jer proizvodi B i C čekaju cijelo vrijeme proizvod A\_4 kako bi se na radnoj stanici KOM2 kompletirali u jedan proizvod ABC.



Slika 5.6. Prikaz unaprjeđenog simulacijskog modela – druga varijanta



Slika 5.7. Prikaz iskoristivosti proizvodnih kapaciteta za drugu varijantu unaprijeđenog simulacijskog modela

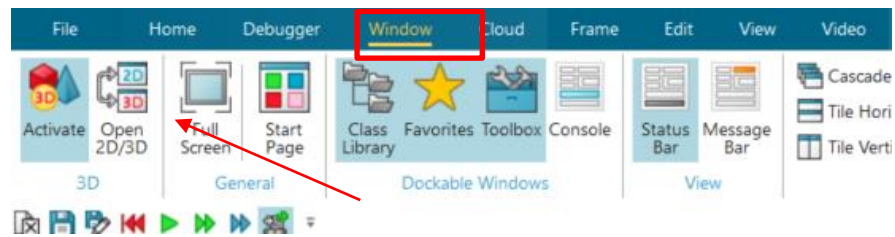
object 1	real 2	real 3	real 4	real 5	real 6	real 7	real 8	real 9	real 10	
string	resource	working	set-up	waiting	blocked	poweringUpDown	disrupted	stopped	pause	sortCriteria
1	root.NAM_JEZ	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	root.NAM_JEZ2	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	root.BR2	90.30	0.00	0.00	9.70	0.00	0.00	0.00	0.00	90.30
4	root.BAN2	80.57	0.00	19.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.57
5	root.ISP	62.21	0.00	14.94	22.85	0.00	0.00	0.00	0.00	62.21
6	root.NAM_STR_SEK	58.15	0.00	41.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.15
7	root.KOM2	57.71	0.00	42.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.71
8	root.BAN1	56.05	0.00	43.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.05
9	root.NAM1	51.25	0.00	0.00	48.75	0.00	0.00	0.00	0.00	51.25
10	root.NAM2	51.11	0.00	0.00	48.89	0.00	0.00	0.00	0.00	51.11
11	root.NAM3	50.42	0.00	0.00	49.58	0.00	0.00	0.00	0.00	50.42
12	root.ZAV	49.75	0.00	48.23	2.02	0.00	0.00	0.00	0.00	49.75
13	root.PRE1	47.62	0.00	52.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.62
14	root.BR1	46.41	0.00	39.05	14.54	0.00	0.00	0.00	0.00	46.41
15	root.BAN3	37.01	0.00	62.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.01
16	root.KOM1	20.77	0.00	79.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.77
17	root.PRE2	6.17	0.00	93.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.17
18	root.MED_ZAV	0.14	0.00	60.72	39.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
19	root.SRM_A	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	root.SRM_B	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	root.SRM_C	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	root.SGP_A	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Slika 5.8. Prikaz tablice analize uskog grla za drugu varijantu unapređivanja osnovnog simulacijskog modela

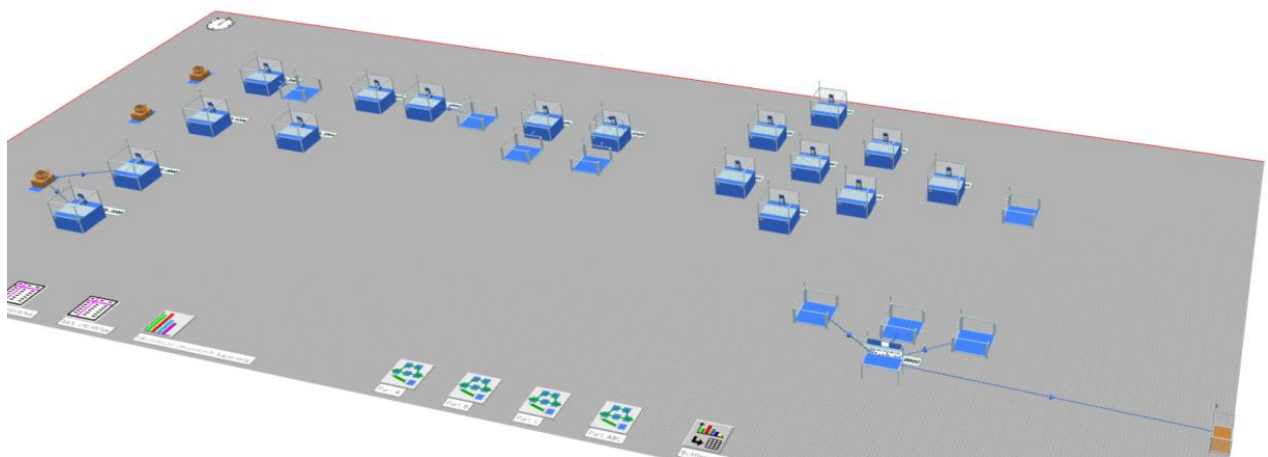
### 5.3. Usporedba simulacijskih modela

Za usporedbu simulacijskih modela prikazati će se izgledi simulacijskih modela u 3D prikazu. Za otvaranje 3D prikaza simulacijskog modela, potrebno je iz alatne trake odabrati

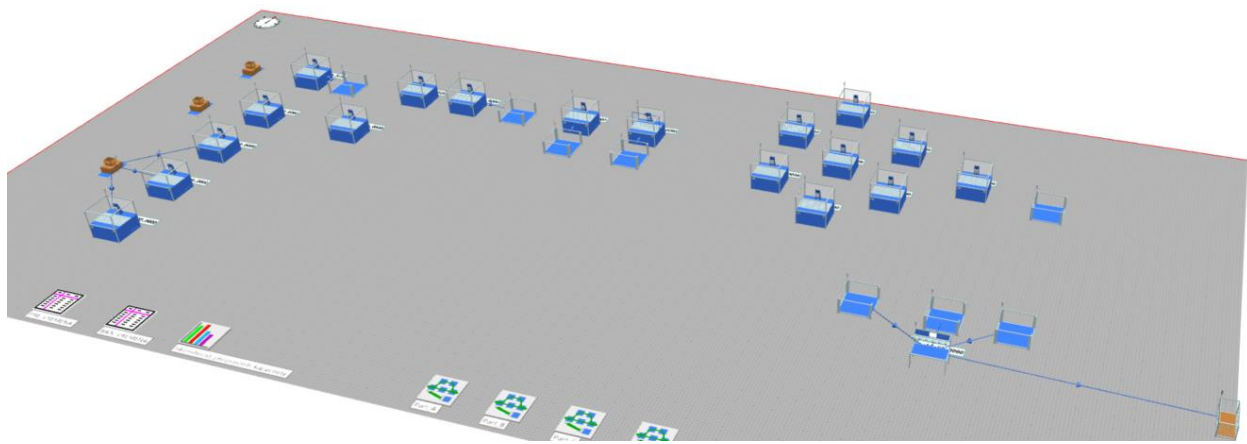
karticu *Window* gdje se odabere opcija *Open 2D/3D* prikazana na slici 5.9. Ta opcija omogućava korisnicima vizualizaciju i rad s modelima u različitim prikazima kako bi se iskoristile prednosti oba prikaza tijekom razvoja i analize modela. Moguće je uređivati model u jednom prikazu i vidjeti promjene u drugom. Na primjer, može se dodati ili premjestiti objekt u 2D prikazu i odmah vidjeti kako se to odražava u 3D prikazu. Na slikama 5.10.-5.12. prikazani su simulacijski modeli u 3D okruženju.



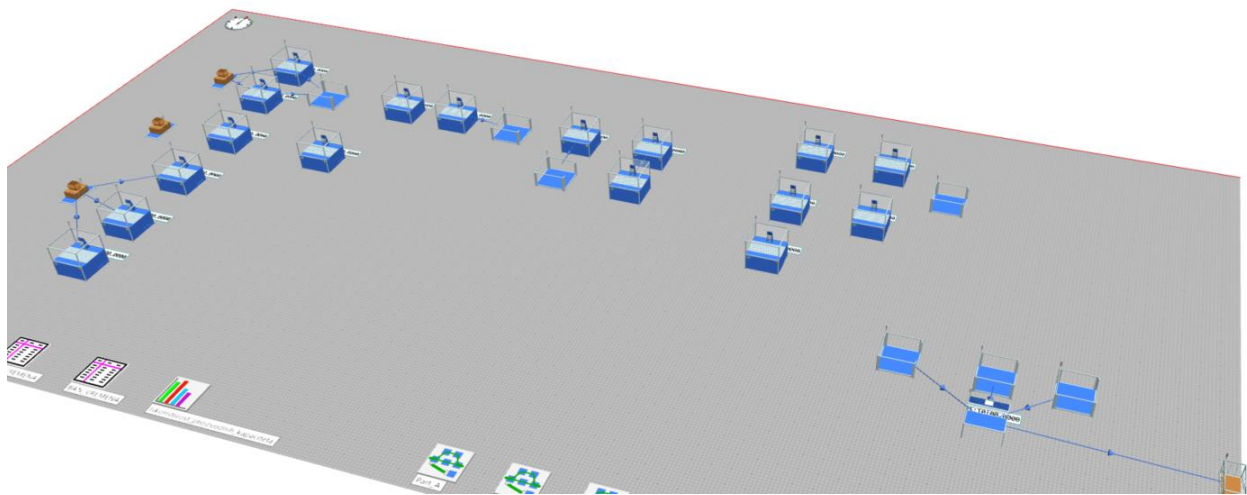
*Slika 5.9. Prikaz opcije za stvaranje 3D modela*



*Slika 5.10. 3D prikaz osnovnog simulacijskog modela*



*Slika 5.11. 3D prikaz prve varijante unaprjeđenog simulacijskog modela*



*Slika 5.12. 3D prikaz druge varijante unaprjeđenog simulacijskog modela*

Kako bi se usporedili rezultati sve tri varijante simulacijskih modela, potrebno je pokrenuti sve tri simulacije i prikazati izvješća za svaku simulaciju tako da se desnim klikom na skladište gotovih proizvoda SGP odabere opcija *Statistics Reports*.

Slika 5.13. predstavlja prikaz statističkog izvještaja za osnovni simulacijski model. Osnovni simulacijski model je prikaz sadašnjeg stanja proizvodnog pogona tvrtke koji omogućava detaljno praćenje svih performansi, uključujući analizu uskih grla i iskoristivosti resursa. Vidljivo je da se za vrijeme trajanja simulacije koje iznosi 53 dana i 8 sati dobije 283 proizvedenih aktivnih dijelova.



## Tecnomatix Plant Simulation 2302 Statistics

Resource Statistics

Created on	16. lipnja 2024. 17:23
Model name	C:\Users\Josipa\Documents\diplomski 17.06.2024\DIPLOMSKI-bez par strojeva-Josipa.spp
Simulation time	53:08:00:00.0000

### Resource Statistics - Resource Statistics

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
SGP_A	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Portions of the States

Object	Number of Entries	Number of Exits	Minimum Contents	Maximum Contents	Relative Empty	Relative Full	Relative Occupation with
SGP_A	283	283	0	1	100.00%	-	

Material Flow Properties

Slika 5.13. Statistički izvještaj za osnovni simulacijski model

Na slici 5.14. prikazan je statistički izvještaj za prvu varijantu unaprjeđenog simulacijskog modela koji se razlikuje od osnovnog simulacijskog modela po tome što je dodan novi stroj za namatanje naponskih sekundara. Vidljivo je kako za isto vrijeme trajanja simulacije za prvu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela dobijemo 317 proizvedenih aktivnih dijelova VAU transformatora što ukazuje na to da je nabava novog stroja dobar poduhvat za poboljšanje proizvodnje.

## Tecnomatix Plant Simulation 2302 Statistics

Resource Statistics

Created on	16. lipnja 2024. 17:25
Model name	C:\Users\Josipa\Documents\diplomski 17.06.2024\DIPLOMSKI-bez par strojeva-Josipa_2.spp
Simulation time	53:08:00:00.0000

### Resource Statistics - Resource Statistics

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
SGP_A	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Portions of the States

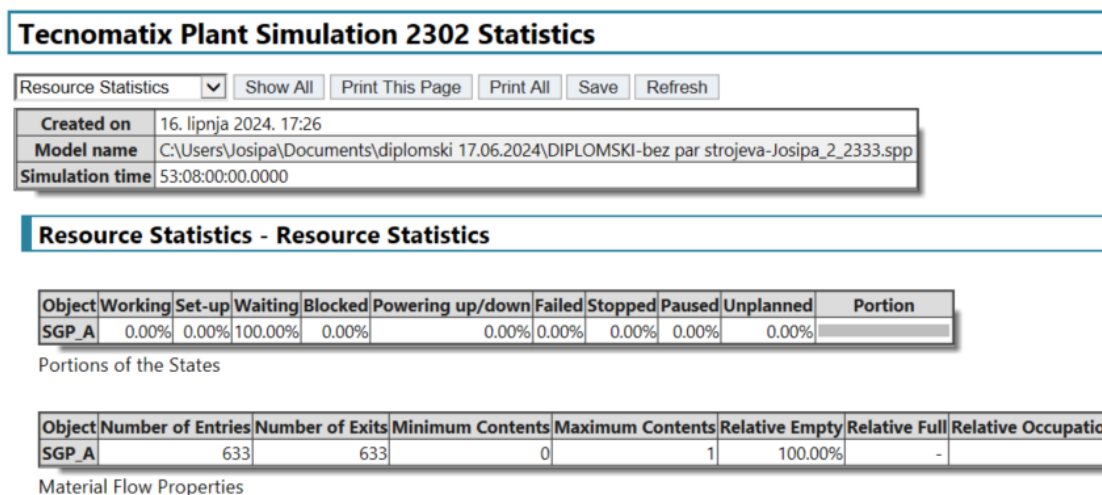
Object	Number of Entries	Number of Exits	Minimum Contents	Maximum Contents	Relative Empty	Relative Full	Relative Occup
SGP_A	317	317	0	1	100.00%	-	

Material Flow Properties

Slika 5.14. Statistički izvještaj za prvu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela



Slikom 5.15. prikazan je statistički izvještaj za drugu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela gdje je vidljivo da dobijemo čak 633 proizvedenih aktivnih dijelova VAU transformatora. Ovi podaci ukazuju na to da su unaprjeđenja svakako donijela poboljšanje za simulacijski model proizvodnog procesa jer se za isto vrijeme dobije više proizvedenih dijelova.



Slika 5.15. Statistički izvještaj za drugu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela

S obzirom na to da proizvodni program tvrtke obuhvaća više vrsta mjernih transformatora, precizniji rezultati i potencijalna poboljšanja mogu se postići izradom simulacijskog modela koji bi obuhvaćao cjelokupni proizvodni proces tvrtke, uključujući sve faze proizvodnje za svaki mjerni transformator. Ova potreba jasno je prikazana na slikama 4.38., 5.4. i 5.7., gdje su prikazani grafovi iskoristivosti proizvodnih kapaciteta. Prema tim grafovima, radne stanice koje su označene žutom bojom su blokirane, dok su radne stanice označene sivom bojom u stanju čekanja, odnosno neiskorištene. U stvarnosti, radne stanice nisu u potpunosti u takvom stanju; u proizvodnom procesu nema značajnih zastoja i čekanja radnih stanica. Svaka radna stanica sudjeluje u izradi barem dvije vrste proizvoda, što znači da, primjerice, radna stanica za namatanje sekundarnih namota u praksi ima znatno veću iskoristivost, kontinuirano radi, nije blokirana i ne stoji u praznom hodu. Tome u prilog ide i činjenica da tvrtka aktivno radi na nabavi dodatnog stroja s boljim performansama za namatanje sekundarnih namota, čime će se dodatno povećati učinkovitost proizvodnog procesa i osigurati još bolji poslovni rezultati.

## 6. ZAKLJUČAK

Računalne simulacije predstavljaju moćan alat za analizu i optimizaciju složenih sustava, uključujući proizvodne procese. Primjenom simulacijskih modela moguće je detaljno analizirati sve aspekte proizvodnje, od ulaznih sirovina do izlaznih proizvoda, te identificirati potencijalna poboljšanja. Korištenje simulacija omogućava predviđanje ponašanja sustava pod različitim uvjetima, testiranje različitih strategija i donošenje informiranih odluka bez ometanja stvarne proizvodnje.

U kontekstu proizvodnog procesa, simulacije omogućavaju bolje razumijevanje dinamike proizvodnje, identificiranje uskih grla, optimizaciju rasporeda resursa i smanjenje zastoja. Pomoću simulacija, tvrtke mogu provoditi "što ako" analize kako bi istražile različite scenarije i njihove učinke na ukupnu učinkovitost i produktivnost. Time se smanjuju rizici i troškovi povezani s uvođenjem novih tehnologija ili promjenama u proizvodnom procesu, što doprinosi poboljšanju kvalitete proizvoda i povećanju konkurentnosti na tržištu.

Računalne simulacije igraju ključnu ulogu u analizi i optimizaciji proizvodnih procesa. Korištenje alata poput Plant Simulationa omogućava detaljno modeliranje svih faza proizvodnje, što olakšava prepoznavanje uskih grla i neiskorištenih resursa. Ova tehnologija omogućava preciznu analizu performansi i testiranje različitih scenarija bez potrebe za stvarnim intervencijama u proizvodnom pogonu. Simulacija proizvodnog procesa u Plant Simulationu donosi značajne prednosti, uključujući povećanje učinkovitosti i poboljšanje kvalitete proizvoda, što u konačnici doprinosi konkurentnosti i održivosti poslovanja.

U ovom diplomskom radu promatran je proizvodni proces izrade kombiniranog mjernog transformatora tipa VAU kako bi se prikupili podaci potrebni za izradu simulacijskog modela proizvodnog procesa izrade aktivnog dijela VAU transformatora. Rezultati istraživanja pokazali su da detaljno praćenje i analiza svakog koraka proizvodnog procesa omogućuju identifikaciju ključnih parametara koji utječu na učinkovitost i kvalitetu krajnjeg proizvoda. Simulacijski model koji je razvijen na temelju prikupljenih podataka pruža koristan alat za optimizaciju proizvodnog procesa. Omogućuje prepoznavanje uskih grla, testiranje različitih scenarija proizvodnje i evaluaciju potencijalnih poboljšanja bez potrebe za prekidom stvarne proizvodnje. Ovaj diplomski rad naglašava važnost integracije simulacijskih modela u proces upravljanja proizvodnjom, što može rezultirati značajnim uštedama vremena i resursa, doprinosi boljem razumijevanju proizvodnog procesa kombiniranog mjernog transformatora tipa VAU i demonstrira potencijal simulacijskih modela kao alata za poboljšanje proizvodnih sustava.

Međutim, određena ograničenja utjecala su na istraživanje, uključujući ograničen proizvodni kapacitet i financijska sredstva. Unatoč ovim ograničenjima, rezultati pružaju vrijedan uvid u proizvodni proces izrade aktivnog dijela VAU transformatora i postavljaju temelje za buduća istraživanja. Također je važno napomenuti da u stvarnosti nema čekanja radnih stanica jer se u proizvodnom pogonu tvrtke odvija proizvodnja više vrsta mjernih transformatora. Svaki stroj korišten u simulacijskom modelu služi za izradu dijelova za barem još jednu vrstu mjernog transformatora. Primjerice, radne stanice BR1, BR2, NAM1, NAM2 i NAM3 u stvarnosti nisu blokirane jer ne čekaju na proizvod A\_4; proizvedeni dijelovi za potrebe VAU transformatora odlažu se u međuskladište kako bi te radne stanice neometano proizvodile dijelove za sve potrebe proizvodnog pogona. Navedene radne stanice osim za izradu aktivnog dijela VAU transformatora služe za izradu aktivnog dijela za još tri vrste transformatora:

- naponske transformatore – tip VPU,
- naponske transformatore velike snage – tip VPT i
- kapacitivne naponske transformatore – tip VCU.

Preporučuje se da buduća istraživanja uključuju čitavi proizvodni program tvrtke kako bi rezultati bili realniji i primjenjiviji cijelom proizvodnom procesu. Daljnja optimizacija simulacijskog modela i njegova primjena mogu dodatno unaprijediti učinkovitost i kvalitetu proizvodnog procesa.

## LITERATURA

- [1] „PROIZVODNI PROGRAM“, s Interneta, [Proizvodi \(koncar-mjt.hr\)](https://www.koncar-mjt.hr/proizvodi)
- [2] „VAU KOMBINIRANI MJERNI TRANSFORMATORI 72,5 do 550 kV“, s Interneta, [Original.pdf \(koncar-mjt.hr\)](https://www.koncar-mjt.hr/original.pdf), 15.03.2024.
- [3] Banks, J. „HANDBOOK OF SIMULATION Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice“, John Wiley and Sons, Inc., Canada 1998.
- [4] „What is Simulation Modeling?“ s Interneta, <https://www.wallstreetmojo.com/simulation-modeling/>
- [5] „What is Monte Carlo Simulation?“ s Interneta, [What Is Monte Carlo Simulation? | IBM](https://www.ibm.com/press/ibm/2017/01/17/what-is-monte-carlo-simulation/)
- [6] Ištoković, D.: „Računalna simulacija proizvodnih procesa“, predavanje 1, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2023
- [7] Ištoković, D.: „Simulacijski okvir za određivanje optimalnog vremenskog iskorištenja višepredmetnog linijskog proizvodnog sustava“, doktorska disertacija, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, Hrvatska, 2021., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:762624>
- [8] „Tutorial on agent-based modelling and simulation“, s Interneta, [Tutorial on agent-based modelling and simulation | Journal of Simulation \(springer.com\)](https://www.springer.com/journal/10034)
- [9] „A gentle introduction to discrete-event simulation“, s Interneta, [A gentle introduction to discrete-event simulation | Software Solutions Studio \(softwaresim.com\)](https://www.softwaresim.com/a-gentle-introduction-to-discrete-event-simulation/)
- [10] „Tecnomatix digital manufacturing software“, s Interneta, <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/>
- [11] „Simulation Modelling using Practical Examples: A Plant Simulation Tutorial“, s Interneta, <https://www.utwente.nl/tutorialplantsimulation>

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Crtež presjeka kombiniranog mjernog transformatora [2].....	4
Slika 2.2 Shema proizvodnje kombiniranih transformatora VAU.....	8
Slika 2.3 Tlocrt proizvodnog pogona.....	9
Slika 3.1 Primjer kontinuirane simulacije [6].....	16
Slika 3.2 Primjer simulacije diskretnih događaja [6].....	17
Slika 3.3 Primjer simulacije diskretnog događaja na primjeru viličara [6].....	18
Slika 3.4 Koncept simulacije [7].....	19
Slika 4.1 Izgled sučelja programskog paketa Tecnomatix Plant Simulation.....	22
Slika 4.2 Prikaz prozora za odabir modela.....	22
Slika 4.3 Prikaz korisničkog sučelja Tecnomatix Plant Simulation.....	23
Slika 4.4 Prikaz alatne trake sa operatorima.....	24
Slika 4.5 Prikaz početnog simulacijskog modela.....	26
Slika 4.6 Prikaz unosa vremena trajanja simulacije u Event Controller-u.....	27
Slika 4.7 Prikaz vremena trajanja simulacije u Event Controller-u.....	27
Slika 4.8 Prikaz dodanih proizvoda A, B i C.....	28
Slika 4.9 Prikaz dodjeljivanja proizvoda A.....	29
Slika 4.10 Prikaz dodjeljivanja izlazne metode za skladište repromaterijala A.....	30
Slika 4.11 Prikaz izlazne metode za skladište repromaterijala A.....	30
Slika 4.12 Prikaz izlazne metode za skladište repromaterijala B.....	31
Slika 4.13 Prikaz povezivanja SRM_C s radnim stanicama NAM1 i NAM2.....	31
Slika 4.14 Prikaz postavljene ulazne metode za radnu stanicu NAM_STR_SEK.....	32
Slika 4.15 Prikaz programskog koda ulazne metode za radnu stanicu NAM_STR_SEK.....	32
Slika 4.16 Prikaz programskog koda ulazne metode za radnu stanicu KOM1.....	32
Slika 4.17 Prikaz izlazne metode sa radne stanice ISP.....	33
Slika 4.18 Prikaz izlazne metode za radnu stanicu PRE1.....	33
Slika 4.19 Prikaz ulazne kontrole za međuskladište MED_BAN.....	34
Slika 4.20 Prikaz postavka za montažnu stanicu KOM2.....	35
Slika 4.21 Prikaz unosa vremena operacije.....	36
Slika 4.22 Prikaz tablice vremena operacija za ispitnu stanicu.....	36
Slika 4.23 Postavljanje vremena operacija za ispitnu stanicu.....	37
Slika 4.24 Prikaz tablica za vremena operacija.....	37

Slika 4.25 Prikaz simulacijskog modela proizvodnog pogona .....	39
Slika 4.26 Prikaz postavka za objekt Display za vrijeme operacija na ispitnoj stanici.....	40
Slika 4.27 Prikaz trajanja obrade na ispitnoj stanici za proizvod A.....	41
Slika 4.28 Prikaz trajanja obrade na ispitnoj stanici za proizvod A_2.....	41
Slika 4.29 Prikaz trajanja obrade na ispitnoj stanici za proizvod A_3.....	41
Slika 4.30 Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod A.....	42
Slika 4.31 Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod B.....	42
Slika 4.32 Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod C.....	43
Slika 4.33 Prikaz postavki SankeyDiagrama za proizvod ABC .....	43
Slika 4.34 Prikaz SankeyDiagrama za sve četiri vrste proizvoda .....	44
Slika 4.35 Prikaz trajanja simulacije proizvodnog procesa.....	45
Slika 4.36 Prikaz zadanog vremena trajanja simulacije .....	45
Slika 4.37 Prikaz postavki grafikona.....	46
Slika 4.38 Prikaz grafikona iskoristivosti proizvodnih kapaciteta .....	46
Slika 4.39 Prikaz postavki Bottleneck Analyzera .....	47
Slika 4.40 Prikaz rangirane tablice dobivene Bottleneck Analyzerom .....	48
Slika 5.1 Prikaz prve varijante unaprjeđenog simulacijskog modela.....	49
Slika 5.2 Prikaz unosa vremena trajanja obrade za radnu stanicu NAM3 .....	50
Slika 5.3 Prikaz Display-a za radne stanice NAM1, NAM2 i NAM3 .....	50
Slika 5.4 Prikaz iskoristivosti proizvodnih kapaciteta za prvu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela.....	51
Slika 5.5 Prikaz tablice analize uskog grla.....	51
Slika 5.6 Prikaz unaprjeđenog simulacijskog modela – druga varijanta .....	52
Slika 5.7 Prikaz iskoristivosti proizvodnih kapaciteta za drugu varijantu unaprjeđenog simulacijskog modela.....	53
Slika 5.8 Prikaz tablice analize uskog grla za drugu varijantu unapređivanja osnovnog simulacijskog modela.....	53
Slika 5.9 Prikaz opcije za stvaranje 3D modela .....	54
Slika 5.10 3D prikaz osnovnog simulacijskog modela .....	54
Slika 5.11 3D prikaz prve varijante unaprjeđenog simulacijskog modela.....	55
Slika 5.12 3D prikaz druge varijante unaprjeđenog simulacijskog modela.....	55
Slika 5.13 Statistički izvještaj za osnovni simulacijski model.....	56
Slika 5.14 Statistički izvještaj za prvu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela.....	56
Slika 5.15 Statistički izvještaj za drugu varijantu unaprjeđenja simulacijskog modela.....	57

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2.1 Dimenzije transformatora [2] .....	6
Tablica 2.2 Proizvodni proces izrade VAU transformatora .....	10

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad bavi se analizom i optimizacijom proizvodnog procesa izrade kombiniranog mjernog transformatora tipa VAU koristeći računalne simulacije i naglašava važnost integracije simulacijskih modela u proces upravljanja proizvodnjom, što može rezultirati značajnim uštedama vremena i resursa. Posebna pažnja posvećena je korištenju Tecnomatix Plant Simulation alata koji omogućava preciznu analizu performansi i optimizaciju resursa. U radu su detaljno objašnjeni svi koraci potrebni za izradu simulacijskog modela proizvodnog procesa izrade aktivnog dijela VAU transformatora. Cilj je da se na temelju ovih koraka može napraviti isti ili sličan model koji će poslužiti za optimizaciju proizvodnog procesa. Simulacijski model izgrađen na temelju prikupljenih podataka omogućuje detaljno praćenje svih faza proizvodnje, identifikaciju uskih grla, te testiranje različitih proizvodnih scenarija. Rezultati istraživanja pokazali su da primjena simulacijskih modela može značajno unaprijediti učinkovitost i kvalitetu proizvodnog procesa bez potrebe za stvarnim intervencijama u pogonu.

**Ključne riječi:** simulacija, Tecnomatix Plant Simulation, VAU transformator, proizvodni proces, optimizacija



## SUMMARY

This master's thesis focuses on the analysis and optimization of the production process for manufacturing combined measurement transformers of VAU type using computer simulations. It underscores the importance of integrating simulation models into production management processes, which can result in significant time and resource savings. Special attention is given to the use of Tecnomatix Plant Simulation tools for precise performance analysis and resource optimization. The thesis provides a detailed explanation of all steps necessary to create a simulation model of the production process for manufacturing the active part of VAU transformers. The goal is to develop a model based on these steps that can be used for process optimization. The simulation model constructed from gathered data allows detailed monitoring of all production stages, identification of bottlenecks, and testing of various production scenarios. Research results indicate that applying simulation models can significantly enhance the efficiency and quality of the production process without the need for actual interventions in the plant.

**Keywords:** simulation, Tecnomatix Plant Simulation, VAU transformer, production process, optimization