

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**ANALÝZA MATERIÁLOVÉHO TOKU VE VÝROBNÍ
LINCE S VYUŽITÍM POČÍTAČOVÉ SIMULACE**

ANALYSIS OF MATERIAL FLOW IN A PRODUCTION LINE USING COMPUTER SIMULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Karas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

BRNO 2024

Ing. Michal Urbánek

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Lukáš Karas
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Michal Urbánek
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza materiálového toku ve výrobní lince s využitím počítačové simulace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracování literární rešerše počítačových softwarů používaných pro modelování a simulaci materiálového toku ve výrobě. Dle navržené koncepce layoutu vytvoření počítačového simulačního modelu výrobní linky, zavážecích okruhů a skladu včetně nastavení základních provozních parametrů s pomocí programu Plant Simulation. Provedení analýzy vlivu parametrů simulačních modelů na pojednávané charakteristiky hlavních i vedlejších materiálových toků.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše počítačových simulací materiálového toku.

Návrh koncepce layoutu zadané výrobní linky včetně vytvoření počítačového modelu layoutu.

Provedení simulačních experimentů dle navržené matice experimentů.

Analýza vlivu parametrů simulačních modelů na vybrané charakteristiky materiálového toku.

Seznam doporučené literatury:

BANGSOW, Steffen. Tecnomatix Plant Simulation. 2nd ed. New York: Springer, 2020, ISBN 978-3-030-41543-3.

PINKER, Alexander a Marco Prügelmeyer. Innovationen in der Logistik. 1. Auflage, Huss-Verlag, 2021, ISBN 978-3-948001-75-9.

NOCHE, Bernd a Mathias BÖS. Simulation der Transportverkehre. MAYER, Gottfried, Carsten PÖGE, Sven SPIECKERMANN a Sigrid WENZEL, ed. Ablaufsimulation in der Automobilindustrie [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, 2020-03-14, s. 155-171 [cit. 2020-10-06]. ISBN 978-3-662-59387-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-59388-2_11.

WENZEL, Sigrid a Matthias WEIß. Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-354-0352-761.

ZEIGLER, Bernard P. Theory of modelling and simulation. New York: Wiley, c1976, xxii, 435 p.
ISBN 04-719-8152-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá tvorbou analyzováním materiálového toku výrobního systému. První část práce je zaměřena na literární rešerši logistiky a počítačových simulačních softwarů. Druhá část se zabývá tvorbou layoutu výrobního systému a tvorbou simulačního modelu. Simulace jsou prováděny pomocí softwaru Technomatix Plant Simulation vyvíjeného firmou Siemens. Ve třetí části je provedena analýza výsledků matice simulačních experimentů. V závěru práce je provedeno zhodnocení výsledků provedených analýz.

KLÍČOVÁ SLOVA

logistika, počítačové simulační softwary, Technomatix Plant Simulation, layout, simulační model, materiálový tok, výrobní systém, analýza, simulace

ABSTRACT

This bachelor 's thesis deals with the creation of a material flow analysis of the production system. The first part of the thesis is focused on the literature search of logistics and computer simulation software. The second part deals with the creation of the layout of the production system and the creation of a simulation model. Simulations are performed using the Technomatix Plant Simulation software developed by Siemens company. In the third part, an analysis of the results of the matrix of simulation experiments is carried out. At the end of the work, an evaluation of the results of the performed analyzes is carried out.

KEYWORDS

logistics, computer simulation software, Technomatix Plant Simulation, layout, simulation model, material flow, production system, analysis, simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KARAS, Lukáš. *Analýza materiálového toku ve výrobě s využitím počítačové simulace*. Online, bakalářská práce. Brno:2024 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Michal Urbánek Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157275>



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Michala Urbánka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Lukáš Karas

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Urbánkovi za podnětné připomínky, zpětnou vazbu a podporu během psaní práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během studia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Teorie počítačových simulací.....	12
1.1 Logistika.....	12
1.2 Logistický řetězec.....	12
1.2.1 Materiálový tok.....	13
1.2.2 Informační tok.....	14
1.3 Simulace materiálové toku.....	15
1.4 Počítačové simulační softwary.....	16
1.4.1 FlexSim.....	16
1.4.2 Arena simulation.....	17
1.4.3 SIMUL8.....	18
1.4.4 MATLAB Simulink.....	19
1.4.5 AnyLogic.....	20
1.4.6 Plant Simulation.....	21
1.5 Volba simulačního softwaru.....	21
2 Simulace výrobního systému.....	22
2.1 Základní představení simulačního modelu.....	22
2.2 Layoutu výrobního systému.....	22
2.3 Popis výrobního systému.....	23
2.4 Zkoumané parametry materiálového toku.....	26
2.5 Důležité provozní charakteristiky materiálového toku.....	26
2.5.1 Směnný režim.....	26
2.5.2 Rychlost dopravníků.....	27
2.5.3 Rychlost manipulačních robotů.....	27
2.5.4 Doba poruch.....	27
2.5.5 Velikost meziskladů.....	27
2.6 Pracovní charakteristiky výrobního systému.....	28
2.6.1 Stanovení optimálního poměru třídění kvality.....	28
2.7 Matice simulačních experimentů.....	29
3 Analýza vlivu vstupních parametrů.....	31
3.1 Analýza vlivu zmetkovitosti.....	31
3.1.1 Analýza vlivu zmetkovitosti na celkovou produkci.....	31
3.1.2 Analýza vlivu zmetkovitosti na vytíženost stanovišť.....	32
3.2 Analýza vlivu intervalu dodání polotovarů.....	33
3.2.1 Analýza vlivu intervalu dodání polotovarů na celkovou produkci.....	33
3.2.2 Analýza vlivu intervalu dodání polotovarů na vytíženosti stanovišť.....	34
3.3 Analýza vlivu rychlosti dopravníků.....	35
3.3.1 Analýza vlivu rychlosti dopravníků na celkovou produkci.....	35
3.3.2 Analýza vlivu rychlosti dopravníků na vytíženost stanovišť.....	35
3.4 Analýza vlivu velikosti zásobníku.....	36
3.4.1 Analýza vlivu velikosti zásobníku na celkovou produkci.....	36
3.4.2 Analýza vlivu velikosti zásobníku na vytíženost stanovišť.....	37

Závěr	39
Použité informační zdroje	40
Seznam příloh.....	42

ÚVOD

Díky pokroku ve výpočetní technice a vývoji simulačního softwaru je dnes možné detailně vytvářet virtuální modely logistických úseků nebo komplexních systémů. Počítačová simulace umožňuje analýzu různých částí logistických systémů bez nutnosti zásahu do reálného provozu, takže nemůže dojít ke ztrátám a vedlejším efektům. Prostřednictvím simulačních experimentů mohou být identifikovány klíčové problémy, nedostatky a překážky a mohou být nalezena nejoptimálnější řešení pro danou situaci. Použití simulace obvykle vyžaduje, aby byli zaměstnání kvalifikovaní pracovníci, kteří umí s daným nástrojem pracovat, a zakoupení softwarové licence. Přestože počáteční investice do vytvoření simulačního modelu může být vysoká, optimalizace a změny v logistických systémech mohou z dlouhodobého hlediska podstatně značné finanční úspory.

Primární náplní této práce je provedení analýzy materiálového toku ve výrobním systému skládajícího se z vstupní a výstupní části a mezi nimi dvou paralelních částí.

Celý výrobní systém je vytvořen pomocí simulačního softwaru Technomatix Plant Simulation. Na tvorbu modelu jsou použité základní prvky obsažené v knihovnách softwaru.

Model znázorňuje obecný výrobní systém, který slouží jako zdroj simulačních dat, která jsou použita pro následnou analýzu vlivu vstupních parametrů na materiálový tok a vyvodit tak na první pohled zřejmé i méně zřejmé závislosti vstupních parametrů materiálového toku. Na základě výsledků analýz je možné v reálném provozu provádět cílené změny ve výrobním systému s cílem zvýšení produktivity a efektivnějšího využití dostupných prostředků. Cílem práce je zjistit závislosti výstupních parametrů na parametrech vstupních.

1 TEORIE POČÍTAČOVÝCH SIMULACÍ

Tato část se zabývá teoretickým popisem základních logistických pojmů. Následuje uvedení do problematiky počítačových simulací materiálového toku a řešerše softwarů používaných pro počítačovou simulaci materiálového toku.

1.1 LOGISTIKA

V současnosti se o logistice mluví především ve spojitosti s výrobou, obchodem a dopravou. Na počátku by pojem logistika spojen především s armádou, kde se používal pro řešení problémů spojených s dopravou, zásobováním, pohybem po bojišti a odvozu raněných. Následně by tento pojem převzat do technických oborů a ekonomiky. [1]

Dnes je možné logistiku definovat jako proces zahrnující plánování, realizaci a kontrolu nad skladováním materiálů, zásobami ve výrobě, hotovými výrobky a informacemi ve výrobě. [1]

Základní činnosti v logistice

- Služby pro zákazníky
- Předpověď poptávky
- Kontrola nad zásobami
- Manipulování s materiálem
- Balení
- Přeprava
- Skladování
- Prodej

Cílem logistiky je souhrn dílčích cílů, jenž je potřeba splnit současně. Současně je za potřebí efektivně zdolávat prostor a čas s cílem uspokojení požadavků na produkty, je tedy nutné racionálně zpracovat celý logistický řetězec a kvůli tomu je nutné dosahovat velké úrovně logistických služeb za zachování udržitelných nákladů zúčastněných článků způsobem, který je možné zopakovat. [2]

1.2 LOGISTICKÝ ŘETĚZEC

Pojem logistický řetězec je nejdůležitějším pojmem v logistice. Termín je používán pro dynamické propojení spotřebitelského trhu s trhem se surovinami, hotovými produkty a díly. Propojení je tedy účelově založené na poptávce koncového zákazníka.

Logistický řetězec se dá také vyložit jako posloupnost činností, jejichž výkon je nezbytný pro splnění požadavků finálního zákazníka, a to v požadovaném čase, množství, kvalitě a na určené místo. Lze jej obecně chápat jako jednotu dvou složek – hmotné a nehmotné. Hmotná složka řetězce tkví v přemísťování věci schopné uspokojit danou potřebu spotřebitele, tj. hotového výrobku, anebo věcí uspokojení podmiňujících. Mezi ně lze zahrnout například obalový materiál, nedokončený výrobek, díly, základní a pomocné materiály a suroviny nutné k výrobě a k distribuci hotových výrobků. Může se ale také jednat o přemísťování osob, například servisních pracovníků. Nehmotná složka řetězce spočívá v pohybu nosičů informací, resp. signálů, tj. zpráv a údajů obsahující informace, které jsou potřebné k uskutečnění přemístění věcí či osob. Součástí nehmotné složky je také přemísťování peněz, které bývá zpravidla v bezhotovostní formě. [3,4]

Koncept logistického řetězce je základním pojmem v oblasti logistiky. Tento termín označuje propojení mezi trhem pro spotřebitele a trhem se hotovými výrobky, jednotlivými díly a surovinami. Toto propojení je navrženo tak, aby odpovídalo poptávce koncového zákazníka. Logistický řetězec lze také interpretovat jako návaznost činností, které jsou nezbytné pro splnění požadavků finálního zákazníka v požadovaném čase, množství, kvalitě a na přesném místě. Také lze obecně brát tento řetězec jako sloučení dvou částí, hmotnou a nehmotnou. Hmotná složka zahrnuje fyzické přesuny věcí, které uspokojují potřeby spotřebitelů, jako jsou hotové výrobky, či komponenty potřebné k jejich výrobě. Sem patří i obalový materiál, nedokončené výrobky, díly, základní a pomocné materiály a suroviny. Nehmotná složka řetězce zahrnuje pohyb informací a signálů, jako jsou zprávy a údaje potřebné pro organizaci přesunu věcí či osob. K této složce patří také převody finančních prostředků, obvykle v bezhotovostní formě. [3,4]

1.2.1 MATERIÁLOVÝ TOK

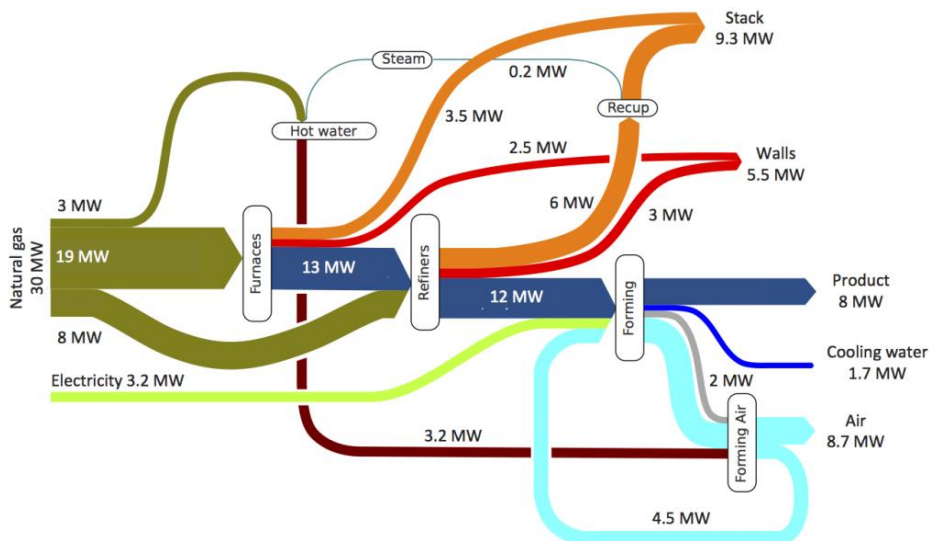
V logistice je pod pojmem materiálový tok myšlen pohyb materiálu v rámci výrobního procesu, je cílevědomě prováděn pomocí aktivních prvků (dopravníků), s cílem uspokojení požadavků jednotlivých výrobních stanovišť po produktech tak aby byl materiál na daném místě v požadovaném množství, v daném okamžiku, bez poškození a s danou spolehlivostí. Lze jej chápat jako pohyb materiálu jedním směrem. [5,2]

Jako materiál jsou myšlena základní suroviny, součásti, nedokončené i dokončené výrobky, odpad vniklý při jejich výrobě, obalový materiál, a zboží, přičemž nezáleží na jeho skupenství (pevné, kapalné, plynné). Daný materiál je možné přemísťovat jako paletové jednotky, jednotlivé kusy, nebo jako volně ložený. [6]

Při návrhu materiálového toku je obtížné popsat všechny činitele, které na něj mají větší či menší vliv. Nejdůležitější je brát v potaz tato ovlivňující faktory: [6]

- Vnější doprava – příjem vstupních materiálů a odvoz konečných produktů
- Objem výroby – při malém objemu je materiálový tok plánován individuálně pro každý výrobek či součást, při velkém objemu je nutná automatizace
- Tvar a velikost dostupného prostoru – při výstavbě nového výrobního závodu je navrhnu a realizovat dokonale podle zásad pro rozmístování jednotlivých stanovišť. Při plánování nové výrobní linky do již stávajícího prostoru je nutné respektovat jeho omezení z hlediska prostoru, při zachování snahy se přiblížit co nejvíce dokonalému rozmístění výrobních stanovišť
- Počet materiálů a součástí v materiálovém toku
- Počet operací – je-li vysoký počet operací je i větší dělení materiálového toku
- Přeprava mezi výrobními stanovišti – volba optimálního způsobu dopravy materiálu mezi stanovišti

Mohutnost materiálového toku je možno vyjádřit pomocí různých veličin např. počet kusů, v kilogramech, v tunách za určitý časový úsek. Pro jednodušší znázornění směru a mohutnosti materiálového toku se používá grafické znázornění za pomoci Sankeyova diagramu, ve kterém je materiálový tok znázorněn pomocí šipek mezi jednotlivými výrobními stanicemi. Jeho mohutnost ne znázorněna pomocí šířky dané šipky. [7]



Obr. 1 Sankeyův diagram [8]

Intenzita a plynulost materiálového toku je převážně ovlivněna těmito faktory: [9]

- Rozmanitost výroby
- Pravidelnost výroby a spotřeby
- Úroveň technického vybavení
- Úroveň výměny informací
- Územní rozmístění výrobních oblastí

Za pohyb materiálu v materiálovém toku pokládáme přesun materiálu z předem daného místa na místo požadované. Pro manipulaci s materiálem zajišťují manipulační prostředky např. podvěsné a pásové dopravníky, výtahy, válečkové trati, jeřáby, vysokozdvizné vozíky. Pohyb materiálu by měl být v ideálním případě usměrněný, rychlý, a vedený nejkratší možnou trasou. [9]

1.2.2 INFORMAČNÍ TOK

Jedná se o nehmotný tok. Z pohledu výroby bereme informační tok jako část materiálového toku. Pohybující se materiál tvoří informace, které lze využít pro vytvoření případně usměrnění jeho dalšího pohybu. Zpracováním informací má vzniknout materiálový tok, který je organizovaný, plynulý, a cílevědomě seřazený. [9]

Největší rozdílem oproti materiálovému toku je, že informační tok probíhá v logistické řetězci oběma směry, což znamená že se pohybuje nejen souběžně s materiálovým tokem, ale i proti jeho směru. Typickým příkladem pohybu souběžně s materiálovým tokem je dodací list. Opačným směrem je veden informační tok např. provedené objednávky. V uzlech logistického řetězce, ve kterých dochází k transformaci materiálu toku, lze mít informační tok tekoucí více směrný. [7]

Realizace a organizace informačního toku se mění společně s vývojem nových informačních technologií. V minulosti se informace uchovávaly na hmotných médiích a přenášely se fyzicky, kdežto v dnešní době je přenos informací uskutečňován pomocí elektroniky, a to buď drátově nebo bezdrátově. [7]

Informační tok může materiálový tok následovat, doprovázet, anebo jej předbíhat. Tento soubor součinností mezi informačním tokem a tokem materiál lze souhrnně označit jako logistický řetězec. [10]

1.3 SIMULACE MATERIÁLOVÉ TOKU

Simulace materiálové toku je reprodukce reálného systému včetně všech procesů, které v něm probíhají, s cílem získat model reálného systému v počítači, na kterém je možné provádět plánované změny či přestavby systému a studovat vlivy provedených změn na chování systému jako celku. V širším pojetí slova znamená simulace přípravu, interpretaci a analýzu daných experimentů prováděných pomocí simulačního modelu. Simulací se vytváří soubory predikovaných logických, matematických a symbolických vztahů mezi jednotlivými entitami v systému a je možné pomocí něj odhadnout výkon systému nebo vliv změn na sledované parametry. Hlavní význam simulace materiálového toku je v získání pohledu na vliv místních změn na celý systém a předcházení jeho selhání. Jestliže dochází k potížím na určitém místě je možné tyto potíže efektivně řešit případně mít vědomí o tom, že zde k problémům může v reálném systému docházet. Úplně vytvořený a validovaný model je schopen dát odpovědi na otázky týkající se reálného systému. Simulace je možné dělit na několik rozdílných typů. [11]

SPOJITÉ SIMULACE

U spojitých simulací se zkoumá chování systému v čase. Nejčastější matematický popis systému je pomocí diferenciálních rovnic. Vyřešením těchto rovnic je možné daný model vyobrazit. V případě nelineárních nebo komplexních rovnic nemusí být řešení vůbec možné.[11]

DISKRÉTNÍ SIMULACE

Diskrétní simulování systémů má ve výrobě velké zastoupení. Oproti spojitým simulacím se zabývá diskrétními událostmi např. stroj je buď zapnutý nebo vypnutý, nebo stroj má poruchu nebo je funkční. Dají se dělit na statické, zabývající se modelováním prostředí, které je na čase nezávislé, a dynamické, které řeší chování systému v průběhu času. Dynamické simulace je dále možné dělit na deterministické, závislost systému jen na zadaných parametrech, a stochastické, všechny události se v systému dějí s danou pravděpodobností, výrobní časy jsou dány průměrným časem a jeho rozptylem.[11]

VÝHODY SIMULACÍ

- možnost prověřit návrh změn na funkci daného modelu bez nutnosti fyzické konstrukce
- umožňuje studium toho, proč se vyskytují určité jevy
- simulovat dlouhý časový úsek (směna, den...) v průběhu několika minut
- navrhování systému napomáhá jeho lepšímu porozumění a poznání
- stanovení částí systému, které jsou pro jeho funkci klíčové

NEVÝHODY SIMULACÍ

- nesprávně nebo nejednoznačně sestavený model bude dávat chybné či nejednoznačné výsledky
- tvorba modelu a následná analýza mohou být časově i finančně náročné

1.4 POČÍTAČOVÉ SIMULAČNÍ SOFTWARE

V současnosti je na trhu velké množství softwarů používaných pro simulování materiálového toku. V části níže je popis nejčastěji používaných simulačních softwarů na trhu.

1.4.1 FLEXSIM

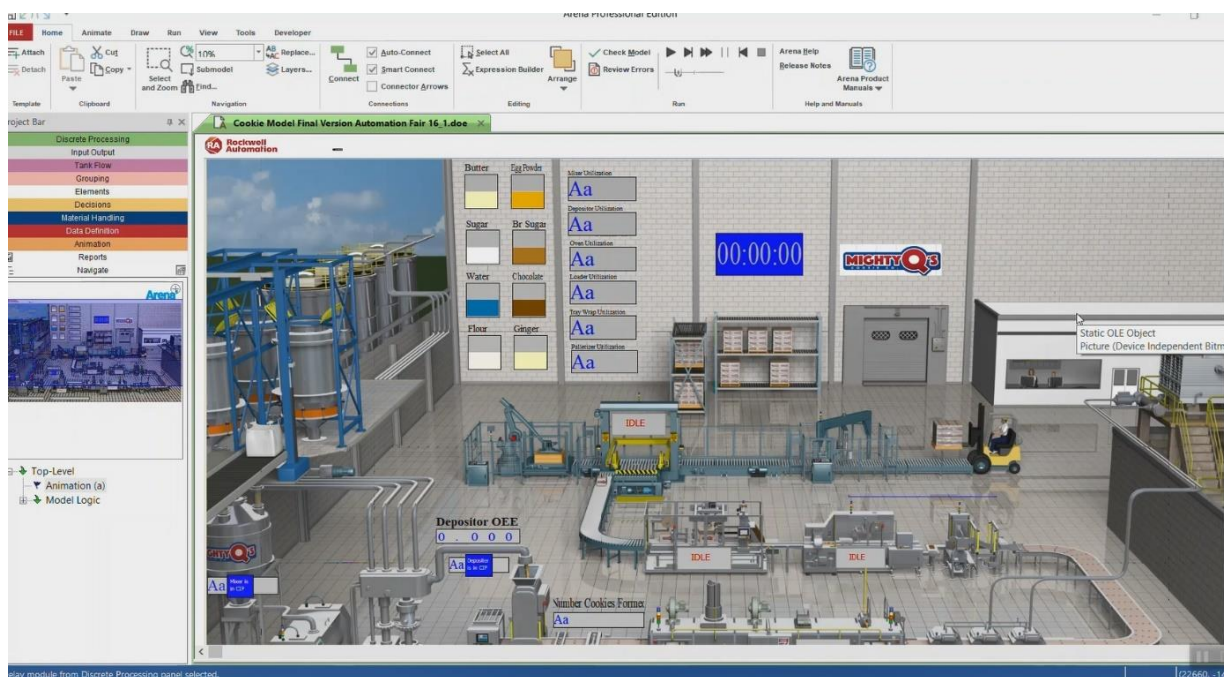
Jedná se objektově orientovaný simulační software, na který se začal vyvíjet roku 2000 a na trh byl uveden v roce 2003. Dnes se jedná o uznávaný software pro simulování diskretních simulací. FlexSim umožňuje dynamické analýzy, zohledňuje čas, prostor, variabilitu a pracovní vztahy. 3D vizualizace procesů usnadňuje pochopení i komplexních mechanismů a umožňuje validaci funkčnosti a efektivity. Nabízí typovou knihovnu zařízení a procesů s předpřipravenou logikou, což zrychluje tvorbu modelů. Software umožňuje nastavení vlastností pomocí rozevíracích seznamů a tvorbu diagramových vývojových map pro zmapování logiky bez nutnosti programování. Výhodou je dále i možnost importu 2D CAD výkresu do modelu jako podklad v daném měřítku a dále na něj přetahovat jednotlivé prvky. Jedná se o výhodnou funkci pro replikaci reálného prostředí do 3D digitálního modelu. Model lze dále rozšiřovat pomocí jazyka FlexScript, který vychází z programovacího jazyku C++. [12,13]



Obr. 2 Ukázka prostředí FlexSim [13]

1.4.2 ARENA SIMULATION

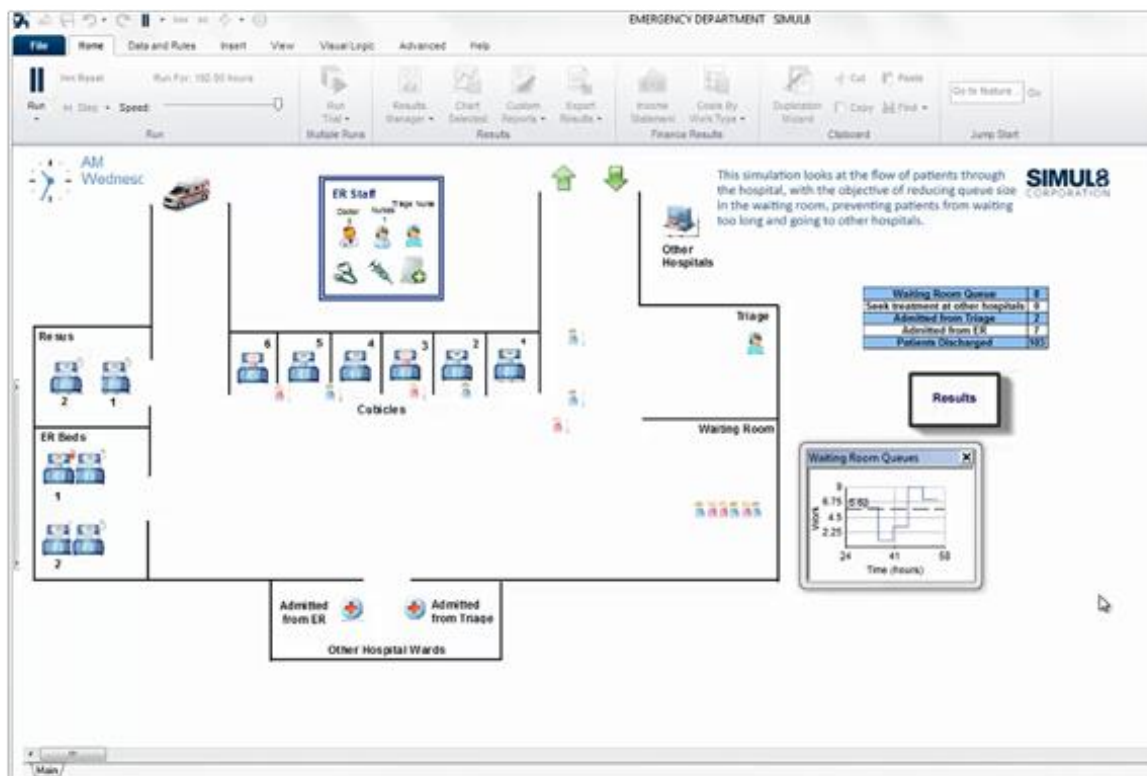
Arena simulation je software určený pro modelování diskretních situací a automatizace. Byl vyvinut firmou System Automation Corporation a v roce 2000 jej odkoupila firma Rockwell Automation. V roce 2020 byla vydána jeho 16 verze, která byla navržena tak aby byla kompatibilní s dalšími softwary od firmy Rockwell Automation prodávaných pod značkou Factory Talk. Tvorba modelu pomocí softwaru Arena Simulation spočívá v umístování objektů ve formě bloků o různých velikostech a tvarech. Tyto bloky mohou reprezentovat buď procesy nebo logiku mezi procesy. Pro propojení těchto bloků se používá spojovacích čar. Software může být propojen s technologiemi od firmy Microsoft. Při tvorbě speciálních algoritmů se možno využít Visual Basic. Importování a exportování dat do modelu se dá využít Microsoft Excel a pro rozsáhlejší databáze Microsoft Access. [14,15]



Obr. 3 Ukázka prostředí Arena Simulation [14]

1.4.3 SIMUL8

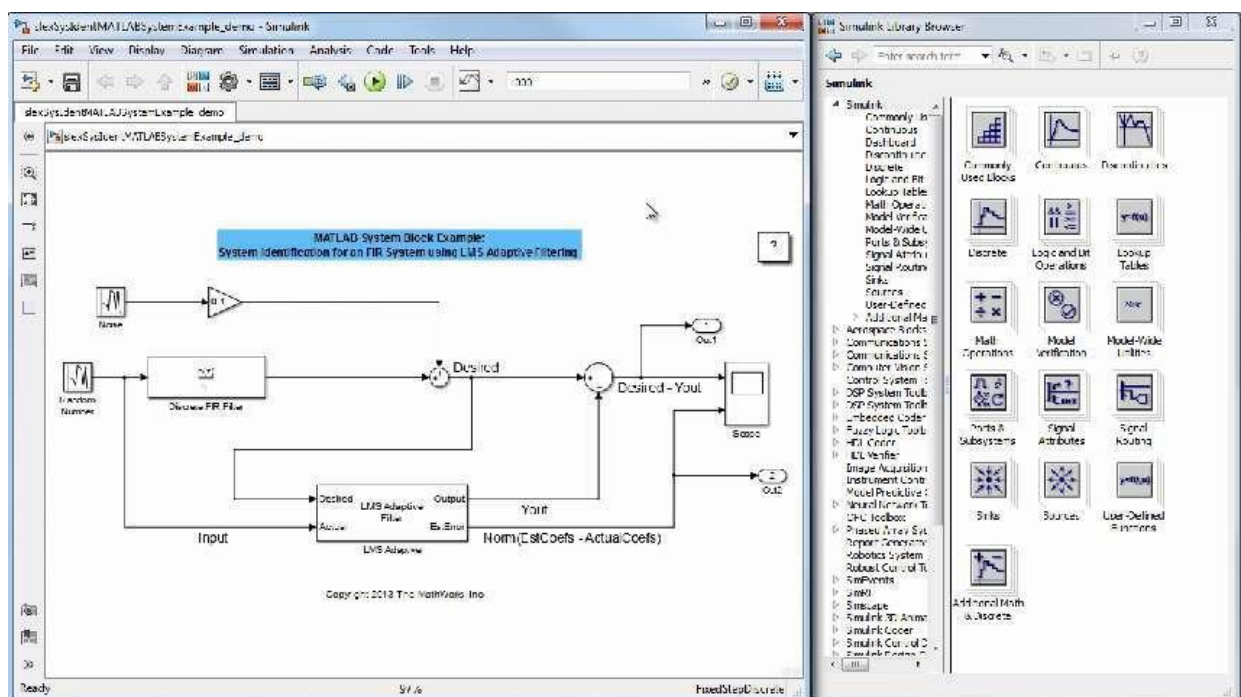
Tento software je vyvíjen firmou SIMUL8 Corporation. Jedná se o software pro modelování, simulování, analýzu a optimalizaci výrobních linek během jejich navrhování. Software podporuje velkou rozmanitost a složitost modelovaných výrobních procesů. Simulace se dá rychle navrhnout ve 2D a poté ji následně upravovat. Simulační modely lze použít pro diskrétní události, ale i spojité a hybridní simulace. SIMUL8 umožňuje vyhodnotit vlivy různých typů plánovacích politik, řízení materiálového toku ve výrobě, systému údržby zařízení. Průběh simulace je vizuálně animovaný a je tedy možné ověřit, zda simulace probíhá správně. K dispozici je tento software také ve webovém prohlížeči, kde je možno sdílet výsledky simulací s programem nainstalovaným na počítači. Tvorba modelů se obvykle nezakládá na programování či statistických datech, nýbrž na kreslení organizačních schémat. V případě potřeby implementování detailnější logiky, která nelze modelovat pouze za pomoci grafického rozhraní, je k dispozici taktéž slastní simulační jazyk Visual Logic. Dále je zde i možnost komunikace se softwarem od firmy Microsoft, a to s Microsoft Excel, Access a Visio. SIMUL8 také podporuje komunikaci s databázemi pomocí SQL. [16,17]



Obr. 4 Ukázka prostředí SIMUL8 [16]

1.4.4 MATLAB SIMULINK

Jedná se o simulační software vyvíjený společností MathWorks a jde o nadstavbu pro software MATLAB. Software je určen pro modelování prostředí a analýzu dynamických systémů. Modely jsou zde vytvářeny pomocí blokových schémat, přičemž jednotlivé bloky jsou obsaženy v komplexní knihovně předdefinovaných bloků. Samotné skládání bloků do modelu funguje na principu drag and drop. Systém umožňuje vložit do modelu algoritmy z MATLABu, ale také exportovat výsledky simulací zpět do MATLABu pro další analýzy. Simulink lze využít pro modelování dynamických systémů, modelování široké škály automobilových systémů, ale také pro tvorbu řídicích algoritmů pro automobilové aplikace. Software je dále možné rozšiřovat různými jeho doplňky jako jsou Powertrain Blockset, který obsahuje kompletní referenční modely automobilových pohonných jednotek, nebo Vehicle Dynamics Blockset pro replikaci jízdních pohybů se 3D. [18,19]



Obr. 5 Ukázka prostředí MATLAB Simulink [19]

1.4.5 ANYLOGIC

Jedná se o jeden z nejvyužívanějších simulačních softwarů používaných pro simulaci průmyslu, zejména pak podnikových procesů. AnyLogic je software využívající více metod simulace vyvíjený společností The AnyLogic Company (dřívější název XJ Technologies). Program je možné spustit na nepoužívanějších operačních systémech (Windows, Linux a MacOS). K dispozici je i množství knihoven určených přímo pro určité odvětví průmyslu. Z hlediska modelování výrobních systémů je k tomu určena knihovna Process Modeling Library. Pomocí této knihovny má uživatel možnost modelovat i složitější systémy a je možné nastavovat sekvence operací fronty zpoždění atd. . Prvky jednotlivých knihoven jsou navzájem kompatibilní s ostatními knihovnami. Roku 2014 byl představen vedlejší produkt AnyLogic Logistics Network Manager, který se o rok později přejmenoval na AnyLogistix. AnyLogistix vychází z AnyLogic a CPLEX a na novém grafické rozhraní orientovaném na průmysl. Zahrnuje také algoritmy a specifické techniky pro modelování a optimalizaci dodavatelského řetězce. AnyLogistix je plně integrován s AnyLogic což umožňuje použití AnyLogic k upravování výrobních stanic, zásob, přepravních podmínek uvnitř AnyLogistix. [20,21]



Obr. 6 Ukázka prostředí AnyLogic[20]

1.4.6 PLANT SIMULATION

Technomatix plant simulation je software vyvíjený firmou Siemens Digital Industries Software sloužící pro modelování, simulaci, analýzu a optimalizaci výrobních systémů a k nim příslušným logistických systémů. V programu je možné vytvořit daný model výrobní linky a testovat její funkčnost a následně optimalizovat její jednotlivé části nebo přímo celou výrobní linku či jí příslušné logistické celky. Pro modelování můžeme využít velkou škálu různých prvků (dopravníky, roboty, sklad prvků ...) které jsou v integrované knihovně. Všechny prvky lze ovládat a programovat pomocí programovacího jazyku SimTalk. Jedny z nejvýznamnějších funkcí Plant Simulation je dědičnost a polymorfismus. Dědičnost umožňuje tvorbu vlastních knihoven s vlastními objekty. Tyto objekty mohou být dále kopírovány, přičemž kopie mají stejné vlastnosti jako objekt, ze kterého pochází. Změna na původním objektu se automaticky zkopíruje na všechna jeho kopie. Polymorfismus dává možnost tvorby jednotlivých tříd a metod. Toho se využívá při tvorbě složitějších systémů, které se díky tomu vytváří rychleji a jednodušeji. Je zde i možnost importovat data z jiných softwarů jako je Microsoft Access nebo Excel. [22].



Obr. 7 Ukázka prostředí Plant Simulation [22]

1.5 VOLBA SIMULAČNÍHO SOFTWARE

Ze softwarů uvedených výše byl pro potřeby této práce vybrán Technomatix Plant Simulation od firmy Siemens. Volba softwaru byla provedena na základě několika kritérií:

- Dostatečně velká knihovna předdefinovaných objektů
- Možnost nastavení parametrů simulace na jednotlivých objektech
- Intuitivní a uživatelský přívětivý
- Možnost dohledání informací při vniklých potížích
- Dostupnost softwaru pro studentské využití

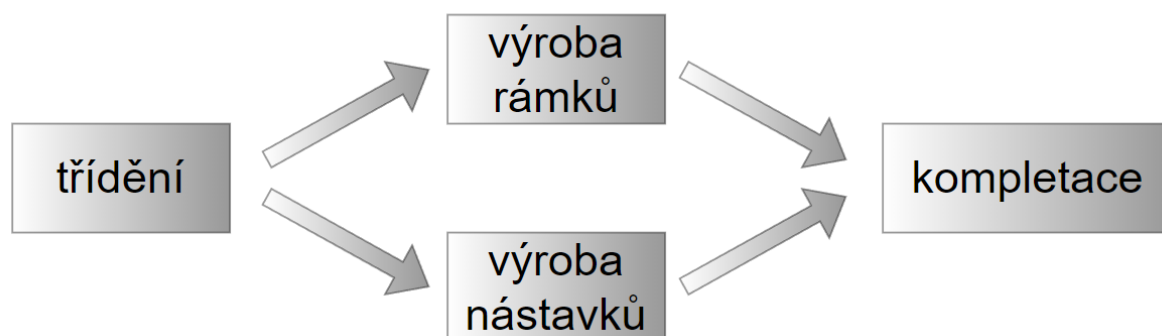
2 SIMULACE VÝROBNÍHO SYSTÉM

Tato kapitola se zabývá tvorbou simulačního modelu smyšleného výrobního systému za pomoci simulačního softwaru Technomatix Plant Simulation 16. model byl vytvořen s cílem analýzy materiálového toku a zkoumání vlivu jednotlivých parametrů výrobního procesu na něj.

2.1 ZÁKLADNÍ PŘEDSTAVENÍ SIMULAČNÍHO MODELU

Tento simulační model znázorňuje celkem čtyři vymyšlené části výrobní linky, na kterých se bude následně provádět analýza materiálového toku, což znamená nalezení vztahů mezi jednotlivými vstupními parametry výrobní linky a charakteristikami materiálového toku.

Na počátku výrobní linky je část, kde objekty vstupují do simulačního modelu a je na nich provedena kontrola kvality. Dále se materiálový tok větví na dvě paralelní části, a to na část na produkci nástavků a na druhé části výrobní linky se produkují rámků. Ke konci výrobního procesu se obě části sbíhají a dochází ke vložení rámků do nástavků. Dále následuje už jenom odvod objektů ze simulačního modelu.



Obr. 8 Zjednodušené schéma výrobního systému

2.2 LAYOUTU VÝROBNÍHO SYSTÉMU

Poté co bylo určeno rozložení jednotlivých výrobních úseků v rámci celého výrobního systému bylo třeba se detailně zabírat jednotlivými úseky výroby a stanovit návaznost jednotlivých stanovišť na každém z výrobních úseků. Návaznosti mezi jednotlivými stanovišti musí respektovat potřebné výrobní a technologické návaznosti potřebné k vyrobění výrobku podle požadavků.

Význam tvorby layoutu výrobního systému spočívá v určení správné technologické návaznosti ještě před samotnou tvorbou modelu výrobního systému, jelikož při tvorbě modelu výrobního systému bez předchozího vytvoření layoutu výrobního systému, by mohlo dojít k opomenutí některé z výrobních operací nebo jejich nesprávné návaznosti. V takové případě by bylo nutné upravit v lepším případě část výrobního systému, v horším celý výrobní systém. Tvorba layoutu výrobního systému má zabránit vytvoření modelu s technologickými chybami a tyto případné chyby odhalit již dříve při tvorbě layoutu výrobního systému, jehož úprava je mnohonásobně jednodušší než úprava modelu výrobního systému.

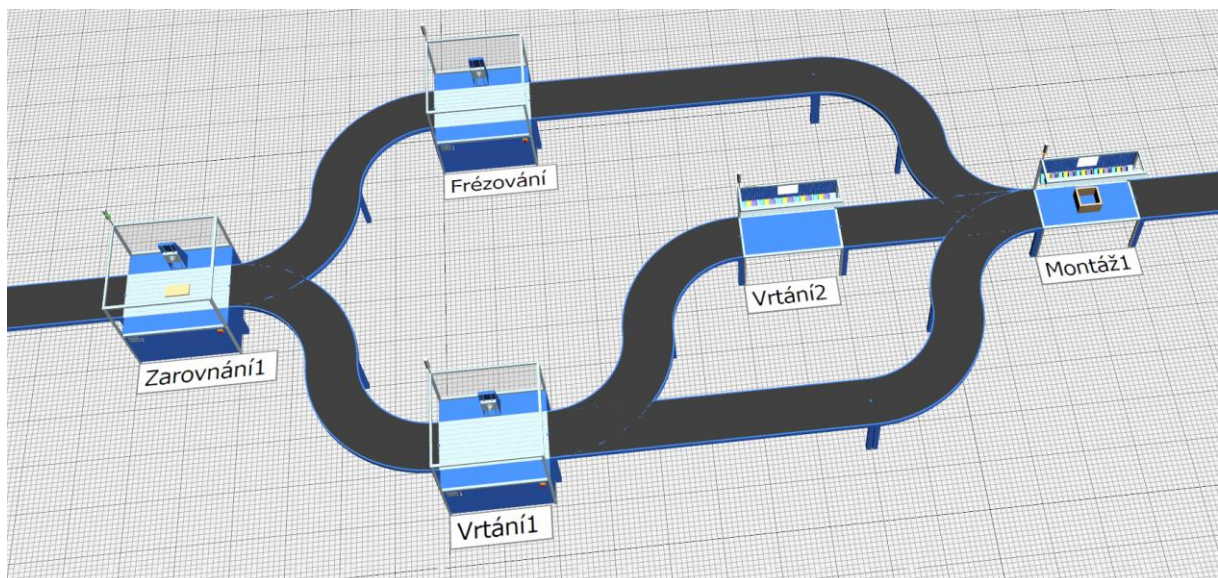
Layout použitý na tvorbu modelu výrobního systému použitého v této práci je možné vidět v příloze 1.

2.3 POPIS VÝROBNÍHO SYSTÉMU

Za účelem této práce byl vytvořen výrobní systém na výrobu dřevěných nástavků pro včelí úly a na výrobu rámků do těchto nástavků. Výrobní systém začíná ve skladu polotovarů, kterým se v této simulaci rozumí dřevěný polotovar o rozměrech 50 x 25 x 3,5 cm, ze kterého je pomocí dopravníku přiveden ke stanovišti na kontrolu jejich kvality. Po roztřídění se materiálový tok rozděluje na dvě paralelní části, na část na výrobu nástavků a část na výrobu rámků. Třídění probíhá podle kvality polotovarů, polotovary bez větších defektů jsou vedeny do části na výrobu nástavků a polotovary, které nejsou pro výrobu nástavků vhodné, jdou do části na výrobu rámků. Pohled na celý výrobní systém se nachází v příloze II.

POPIS ČÁSTI NA VÝROBU NÁSTAVKŮ

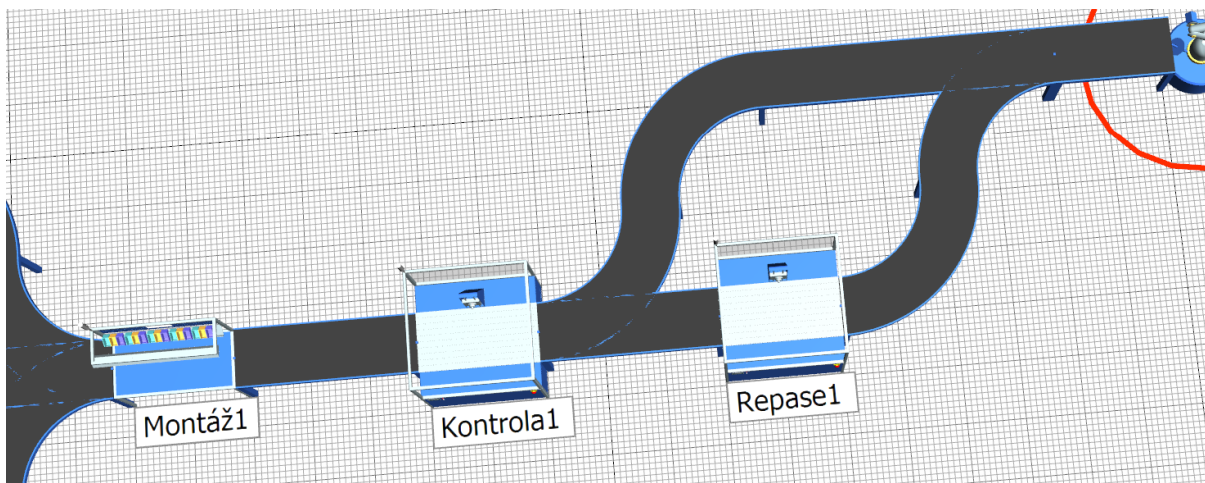
Po roztřídění polotovarů jsou ty, které jsou vhodné na výrobku nástavků, přesunuty pomocí dopravníků do stanice na zarovnání jejich rozměrů na rozměry námi požadované. Poté se materiálový tok rovnoměrně rozděluje na dvě části. Polovina je dopravena do stroje na vyfrézování drážek, do kterých budou na konci výrobního procesu umístěny rámků, a druhá polovina jde na vyvrtání děr, které ulehčí následnou montáž a zabrání praskání dřeva. Do poloviny těchto kusů je vyvrtána díra, která slouží jako větrací otvor.



Obr. 9 Pohled na první úsek části pro výrobu nástavků

Následně jsou tyto součásti dopravovány do stanoviště montáže, kde se z připravených součástí složí celý nástavek. Na jeho složení je potřeba dvou kusů s vyfrézovanými drážkami, jednoho kusu s vyvrtanými dírami pro snazší montáž a jednoho kusu s vyvrtanými dírami pro snazší montáž a dírou pro větrání.

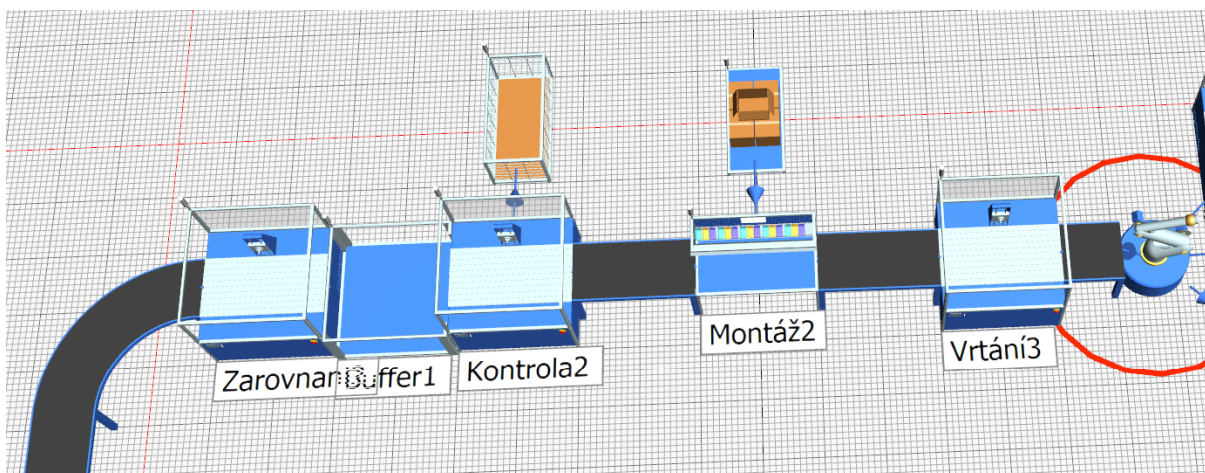
Po montáži je smontovaný nástavek dopraven ke kontrole správnosti smontování. Jelikož žádná ze stanovišť nevyrábí 100 % výrobků podle požadavků musí jít část nástavků na opravu. Následně jsou nástavky dopraveny pomocí dopravníků ke stanovišti kompletace, kde se paralelní části výrobního systému spojují.



Obr. 10 Pohled na druhý úsek části na výrobu nástavků

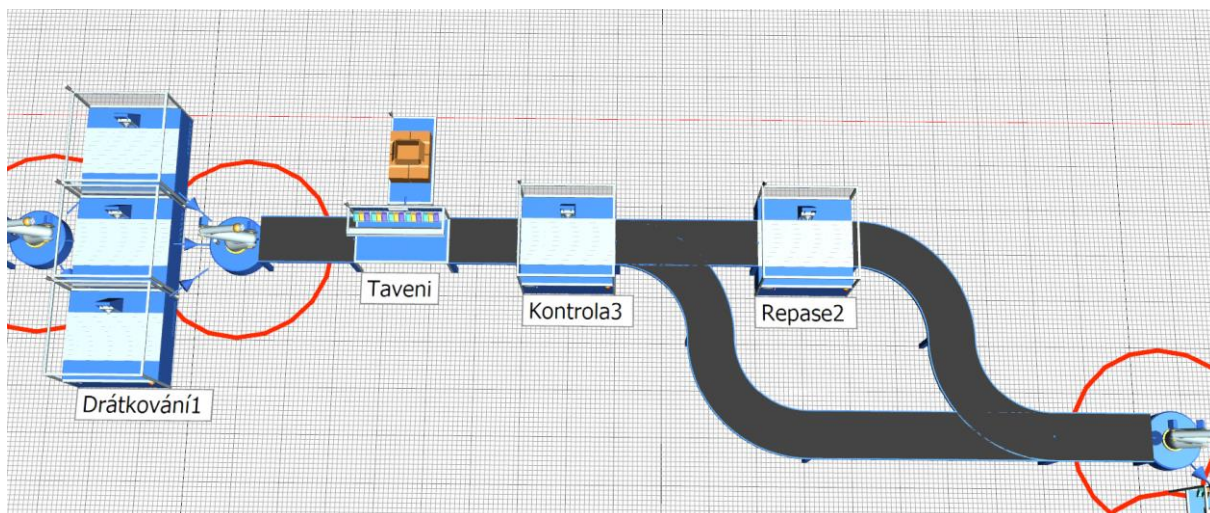
POPIS ČÁSTI NA VÝROBU RÁMKŮ

Vstupní polotovary, které nejsou vhodné na výrobu nástavků, jsou rozřezány na 15 částí, které jsou pomocí dopravníku dopraveny do stroje, které je zakrátí na požadovaný rozměr. Kusy se zakracují celkem na dvě délky, 39 a 24 cm. Následuje jejich kontrola, při které se zjišťuje, zda kus nemá nějakou vadu, která by bránila jeho správné funkci, nebo není nějak mechanicky poškozen. Následuje montáž kusů do rámku za pomoci malých hřebíků. Ke složení je zapotřebí dvou kusů délky 39 cm a dvou kusů délky 24 cm. Do složeného rámku jsou do jeho delších stran vyvrtány 4 díry malého průřezu.



Obr. 11 Pohled na první úsek části na výrobu rámků

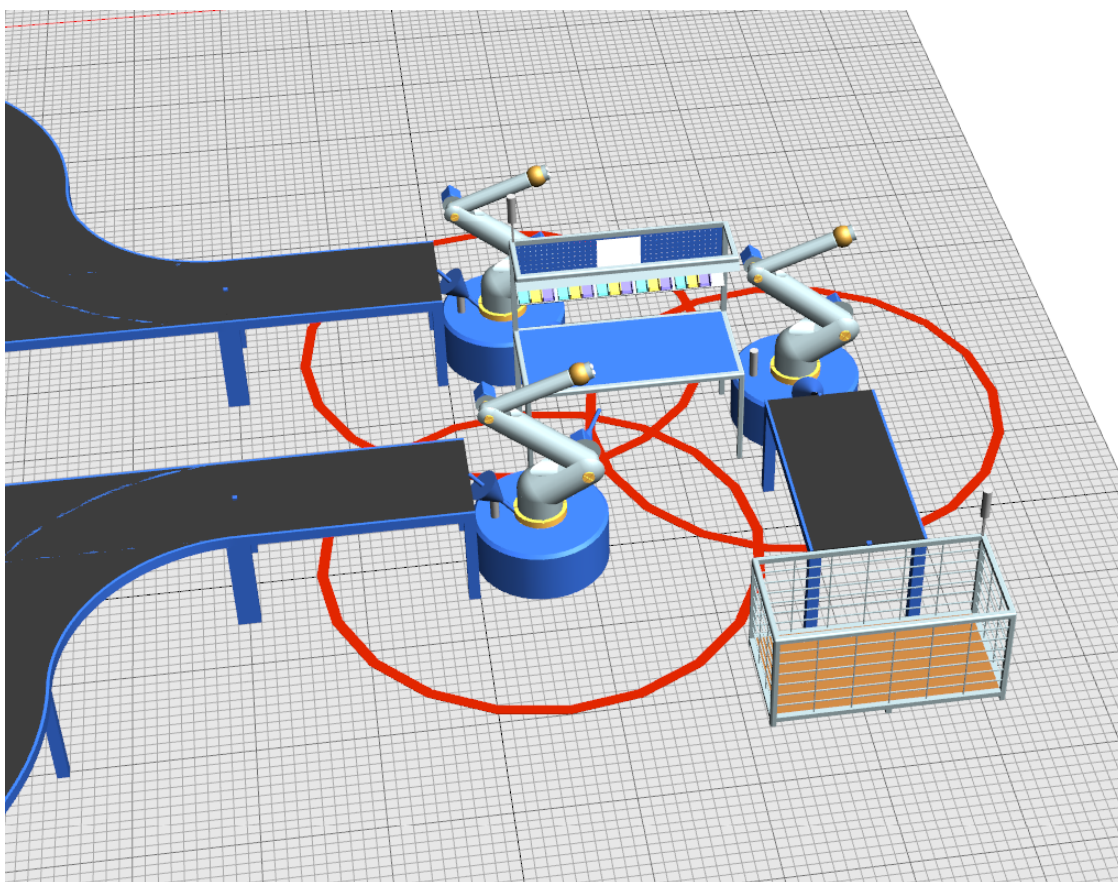
Na další stanovišti je těmito dírami protažen tenký drát, který je napnut a následně k rámku připevněn. Jako další probíhá natavení mezistěny na napnutý drát. Natavování probíhá za pomoci elektrického proudu, kdy je drát zapojen do elektrického obvodu a díky jeho odporu se zahřeje a začne rozpouštět voskovou mezistěnu, která je na něm položena. Po odpojení od zdroje elektrické energie vosk opět ztuhne a mezistěna je tak pevně uchycena k drátu. Z důvodu určité zmetkovitosti výroby je nutné provést kontrolu. Správně vyrobené kusy putují pomocí dopravníku ke kompletaci a zmetky putují na opravu a až poté putují ke kompletaci. Tím je proces výroby rámku ukončen a obě části výrobní linky se opět spojují.



Obr. 12 Pohled na druhou úsek části na výrobu rámků

KOMPLETACE

Obě části se spojují na stanovišti kompletace, kde je do každého z nástavků vloženo za pomoci robotických manipulátorů 11 rámků. Za tímto stanovištěm se již nachází pouze sklad hotových výrobků, který je v modelu řešen za pomoci prvku Drain.



Obr. 13 Pohled na úsek kompletace výrobního systému

2.4 ZKOUMANÉ PARAMETRY MATERIÁLOVÉHO TOKU

Od zákazníků bývají na jednotlivé výrobní úseky či na celé výrobní systémy kladeny konkrétní požadavky, aby výrobní systém odpovídal přesně jejich požadavkům. Mezi tyto požadavky můžeme zařadit množství vyprodukovaných výrobků za určitý časový úsek, obsazenost mezikladů mezi jednotlivými operacemi, snaha o co nejkratší dobu mezi vstupem a výstupem objektu z výrobního systému, kvalitu vyrobených produktů a s tím související množství vyrobených zmetků, a to vše za co nejmenší možné náklady. Jednotlivé požadavky a jejich priorita se může lišit výrobní od výrobní, ale i v rámci jednoho podniku na jednotlivé výrobní úseky.

Přehled nejčastějších požadavků

- Produkce za určitý čas
- Vytíženost pracovišť
- Zmetkovitost výroby
- Náklady na výrobu

2.5 DŮLEŽITÉ PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLOVÉHO TOKU

Charakteristiky materiálového toku zmiňované v kapitole 2.4 jsou charakteristiky které budou zkoumány a výsledky analyzovány. Tyto charakteristiky mohou být přímo nebo i nepřímo ovlivňovány pomocí provozních charakteristik materiálového toku. Mezi tyto charakteristiky můžeme zahrnout směnný režim, velikost zásob mezi jednotlivými operacemi, rychlost pohybu dopravníků a manipulačních robotů, prostoje atd.

2.5.1 SMĚNNÝ REŽIM

Při směnném režimu se dá předpokládat, že v nočních směnách bude častěji docházet ke zvětšení prostojů a snížení kvality výroby v porovnání se směnami denními. Je to způsobeno tím člověk pracuje v době, kdy je tělo přirozeně utlumené a za přirozených okolností by spalo. Práce v nočních hodinách je méně efektivní než práce v době, kdy je člověk přirozeně aktivní. V nočních směnách dochází také podle statistik k většímu množství chyb a úrazů. Obecně lze říct že, práce noci není vhodná pro pracovní výkon.

Dalším vlivem, který je ve směnném režimu nutné vzít v potaz je i nutnost přestávek. Podle zákona má zaměstnavatel poskytnout zaměstnanci nejpozději po šesti hodinách nepřetržitě práce poskytnout zaměstnanci přestávku v minimálním trvání 30 minut. [23]

Pro potřeby této práce byl zvolen jednosměnný pracovní provoz o délce směny 8 hodin s jednou přestávkou o délce 30 minut a jednou přestávkou o délce 15 minut. Výroba probíhá ve všechny pracovní dny od 6:00 do 14:00, v sobotu a neděli výroba neprobíhá. Tohle nastavení pracovního režimu bylo provedeno z důvodu výroby relativně specifického typu výrobku, o který bude mít zájem pouze relativně úzká skupina lidí a nepředpokládá se tak vysoká poptávka po výrobcích, že by pracovní režim nastavený tímto způsobem nestíhal uspokojit požadavky zákazníků. V případě vyšší poptávky je možné pracovní režim upravit např. prodloužením směn na 12 hodin, nebo zavedením dvousměnného provozu.

2.5.2 RYCHLOST DOPRAVNÍKŮ

Předpokladem je závislost mezi rychlostí dopravníků a časem potřebným pro průchod výrobním systémem. Dále může mít dopravní rychlost vliv na vytíženost jednotlivých výrobních pozic, jelikož při příliš nízké rychlosti dopravníků může být problém v dopravení součásti na výrobní pozici včas a může docházet k prostojům. Při příliš velké rychlosti sice bude součást dopravena na výrobní pozici včas a nebude docházet k nárůstu prostojů, ale bude to mít za následek zvýšení energetické náročnosti dopravníků a bude potřeba silnějších a dražších motorů pro jejich pohon. Je tedy potřeba najít určitý kompromis v rychlosti dopravníků, kdy jejich rychlost bude dostatečná pro zásobování výrobních pozic a zároveň nebude zbytečně vysoká kvůli nákladům na provoz dopravníků.

2.5.3 RYCHLOST MANIPULAČNÍCH ROBOTŮ

Jelikož je v simulačním modelu využito manipulačních robotů, a to pro přesun jednak výrobků ze zásobníků do stanice kompletace a také k přesunu rámků ze zásobníků do tří paralelních stanic pro drátkování, a z těchto stanic na další operaci. Z tohoto důvodu je nutné se zabývat také analýzou vlivu na materiálový tok, přičemž největší vliv na něj bude mít rychlost manipulačních robotů. Dá se předpokládat, že příliš nízká rychlost bude mít, stejně jak u dopravníků, vliv na prostoje vzniklé pomalou dodávkou výrobků do následující stanice. Naopak příliš velká rychlost bude mít vliv na energetickou náročnost manipulačního robota, ale i na opotřebení jeho součástí, jelikož při zvýšené rychlosti jsou jeho součásti vystaveny vyšším zrychlením a silám a jejich opotřebení je tedy rychlejší. Dalším problémem vysoké rychlosti manipulačních robotů může být také uchycení přepravovaného materiálu, protože i na něj budou působit větší síly a jeho uchycení musí být tedy silnější.

2.5.4 DOBA PORUCH

Do doby poruch řadíme odstávky výrobních stanovišť způsobené poruchou a následnou opravou dané poruchy. Doba odstávky může být ovlivněna komplikovaností porucha a následné opravy a seřízení výrobního stroje, aby produkoval výrobky podle požadavků. V Plant Simulation se tato doba porucha zadává pomocí středního času do opravy, MTTR. Standardně je nastavena střední doba opravy na jednu minutu. Předpokladem je, že s rostoucí dobou oprav bude klesat celková produkce výrobního systému z důvodu delšího nevýrobního času.

2.5.5 VELIKOST MEZISKLADŮ

Velikost meziskladů hraje důležitou roli na funkci celého systému. Větší množství pojistných zásob před výrobními pracovišti zajišťuje jistotu toho, že požadovaná součást bude vždy k dispozici ovšem za cenu větších skladovacích prostor, což nemusí být z hlediska konceptu výrobního systému vždy možné. Naopak při nedostatečné kapacitě meziskladů se dá předpokládat, že bude pocházet k prostojům na výrobním stanovišti a tím pádem navýšení jeho prostojů a s tím spojenou sníženou celkovou produkcí. Z tohoto důvodu je potřeba nalézt optimální velikost velikosti meziskladů tak, aby nedocházelo k prostojům na následujícím výrobním stanovišti a zároveň aby nebylo kvůli příliš nízké kapacitě docházelo ke špatnému zásobení výrobního stanoviště. Dále také při nízké kapacitě meziskladů může docházet k blokování předchozí pracovního stanoviště a tím k nižší pracovní vytíženosti také na tomto stanovišti.

2.6 PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY VÝROBNÍHO SYSTÉMU

Před započítáním analýzy bylo nutné nastavit některé parametry výrobního systému. Hlavním nastavovaným parametrem byla délka výrobního cyklu na jednotlivých stanovištích. Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů nastavovaných v simulačním modelu, jelikož při jeho změně se bude proměňovat celková produkce i vytíženost stanovišť. Dalším důležitým parametrem bylo správné nastavení stanovišť montáží, aby montáž probíhala z daného množství polovýrobnků případně správných polovýrobnků. Neméně důležitým parametrem je i spolehlivost výrobních stanovišť a také jejich střední čas do opravy. Oba tyto parametry byli podle předvoleného nastavení v programu Plant Simulation. Přehled těchto charakteristik výrobních stanovišť je v tabulce 1.

Stanoviště	Pracovní čas [min]	Poruchovost	MTRR [min]
Třízení	0:30	5%	1
Zarovnání1	0:25	5%	1
Frézování	0:30	5%	1
Vrtání1	0:30	5%	1
Vrtání2	0:20	5%	1
Montáž1	3:45	5%	1
Kontrola1	0:30	5%	1
Repase1	5:00	5%	1
Řezání	0:25	5%	1
Zarovnání2	0:05	5%	1
Kontrola2	0:05	5%	1
Montáž2	0:15	5%	1
Vrtání3	0:15	5%	1
Drátkování	0:50	5%	1
Tavení	0:20	5%	1
Kontrola	0:20	5%	1
Repase2	1:30	5%	1

Tab. 1 Přehled pracovních parametrů výrobních stanovišť

2.6.1 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍHO POMĚRU TŘÍDĚNÍ KVALITY

Na začátku simulací byla nastaveno třídění polotovarů podle jejich vhodnosti/nevhodnosti na výrobu nástavků stanoveno na 50 % je vhodných a 50 % nevhodných. Jenže při prvních spuštěních simulačního modelu bylo patrné, že množství vyrobených rámků je vyšší, než je jejich skutečně potřeba, a dochází k jejich hromadění na dopravníku a následnému blokování značného množství výrobních stanovišť na lince pro jejich výrobu. Z tohoto důvodu bylo nutné se zabývat správným procentuálním nastavením třídícího stanoviště a nastavením kolik procent polotovarů je vhodných na výrobu nástavků. Cílem je se co nejvíce přiblížit potřebného poměru nástavků vůči rámkům na 1:11 a tím dosáhnout co nejvyšší produkce. Aby výsledky simulace

byli použitelné, musí být doba simulace delší než doba potřebná pro zpracování všech polotovarů vstupujících do výrobního systému.

Natavení ostatních parametrů experimentu

- Kapacita zásobníku je nekonečná
- Interval generování polotovarů 20 s
- Celková počet dodaných polotovarů 10 000

Byla provedeno jedno simulační kolo o počtu kombinací 41. U každé další kombinace byl postupně měněn poměr rámků jdoucí do jednotlivých částí výrobního systému. Poměr byl měněn po 0,5%, pro dosažení co nejlepších výsledků. Každá kombinace byla simulována 5 krát a zapisována byla průměrná hodnota. Rozsah restovaných poměrů třízení byl stanoven od 40 do 60% polotovarů vhodných na výrobu nástavků a k nim odpovídající procento nevyhovujících. Zvolen byl poměr 54,5 % vyhovujících a 44,5 % nevyhovujících.

Procento polotovarů na výrobu nástavků	Procento polotovarů na výrobu rámků	Celková produkce
55,5	44,5	1334
55	45	1349
54,5	45,5	1354
54	46	1341
53,5	46,5	1329

Tab. 2 Vybrané experimenty určení vhodného poměru rozdělení polotovarů

2.7 MATICE SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

Pro vytvoření matice simulačních experimentů bylo nejprve nutné určit si vhodné parametry výrobního systému, které mohou být měněny a je tak možnost analyzovat jejich vliv na chování výrobního systému. V rámci této práce byly zvoleny tyto proměnné parametry: zmetkovitost, interval dodání polotovarů, rychlost dopravníků a velikost zásobníku. Přehled rozmezí jejich testovaných hodnot je vypsán v tabulce níže.

	Zmetkovitost [%]	Interval dodání polotovarů	Rychlost dopravníků	Velikost zásobníku
Dolní mez	5	30	0,2	2
Horní mez	15	40	1	10
Inkrement	5	5	0,2	4

Tab. 3 Přehled vstupních parametrů matice simulačních experimentů

Dále bylo potřeba stanovit, které parametry budou brány jako výstupní a jejichž změna v závislosti na vstupních parametrech bude analyzována. Nejdůležitějším z analyzovaných výstupních parametrů je celková produkce systému, jelikož čím je celková produkce vyšší tím vyšší je také zisk. Dalšími sledovanými parametry jsou vytíženosti jednotlivých stanovišť.

Z důvodu, že jedním ze vstupních parametrů je kapacita zásobníku je také sledováno procenta celkového času, kdy je zásobník zcela naplněn.

Po určení všech vstupních a výstupních parametrů byla sestrojena matice simulačních experimentů o celkovém počtu experimentů 135. Doba trvání byla stanovena na 31 dní z důvodu, že do uplynutí této doby by se projeví všechny jevy, které se ve výrobním systému mohou vyskytnout. Jedná se o optimální dobu experimentu, po které je možné prohlásit, že získaná data budou platná i pro dlouhé časové úseky. Každý z experimentů byl simulován celkově pětkrát pro dosažení co nejlepší přesnosti. Matice simulačních experimentů s výsledky se nachází v příloze III.

3 ANALÝZA VLIVU VSTUPNÍCH PARAMETRŮ

Tato kapitola se věnuje představení a následné analýze výsledků získaných ze simulačních experimentů provedených podle matice simulačních experimentů. Jelikož v simulačním modelu je obsažen parametr, který má stochastické chování, konkrétně spolehlivost a střední čas do opravy, bylo rozhodnuto, že pro analýzu výsledků bude použita nejnižších dosažených hodnot. To nám zajistí, že výrobní systém bude schopen dosahovat těchto výsledků a teoreticky i výsledků lepších. Při použití průměrné hodnoty by v reálném provozu mohlo docházet, že by bylo dosaženo spodní hranice intervalu výsledků a systém by nedosahoval analyzovaných hodnot. Všechny výsledky simulačních experimentů je možné vidět v příloze 3.

3.1 ANALÝZA VLIVU ZMETKOVOSTI

Prvním ze sledovaných parametrů materiálového toku byla zmetkovitost výroby a její vliv na materiálový tok.

3.1.1 ANALÝZA VLIVU ZMETKOVOSTI NA CELKOVOU PRODUKCI

Ve výsledcích simulací můžeme pozorovat, že zmetkovitost nemá zásadní vliv na celkovou produkci. Závislost mezi zmetkovitostí a celkovou produkcí je znázorněna na obrázku a konkrétní hodnoty celkové produkce jsou zapsány v tabulce 4. Rozptyl celkové produkce při jednotlivých procentech zmetkovitosti je způsoben vlivem ostatních parametrů obsažených v matici simulačních experimentů.



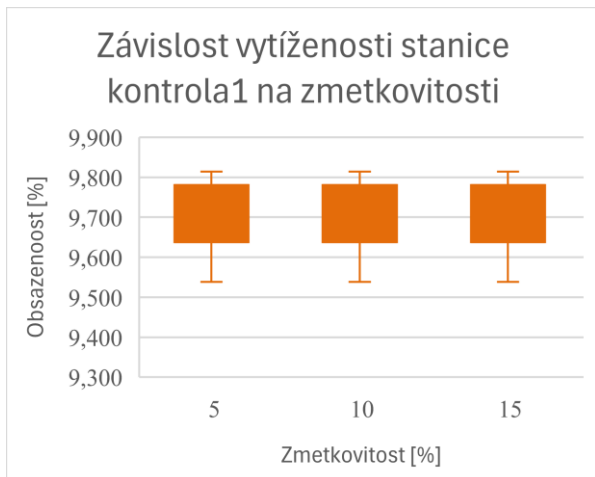
Obr. 14 Závislost celkové produkce na zmetkovitosti

Zmetkovitost [%]	Celková produkce [ks]	
	Min	Max
5	2106	2167
10	2105	2166
15	2106	2107

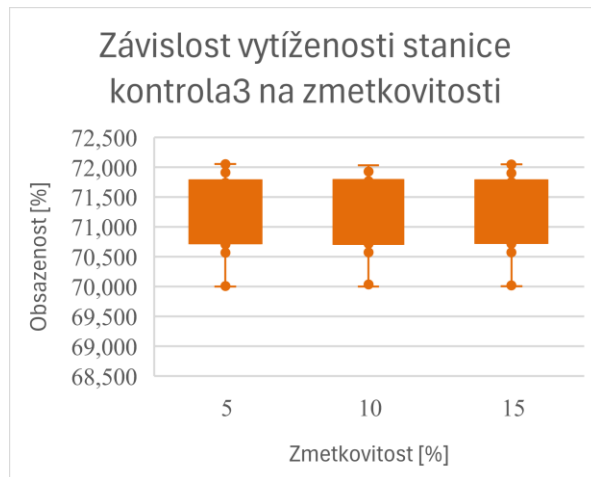
Tab. 4 Hodnoty celkové produkce v závislosti na zmetkovitosti

3.1.2 ANALÝZA VLIVU ZMETKOVITOSTI NA VYTÍŽENOST STANOVIŠŤ

Jelikož parametr zmetkovitosti ovlivňuje stanoviště kontroly, které se nachází až ke konci výrobního systému, je velká pravděpodobnost, že jediné stanoviště, na které bude mít změna parametru zmetkovitosti jsou stanoviště následující, kterými jsou Repase1 a Repase2. Aby bylo možné toto tvrzení brát jako platné, je potřeba analyzovat vliv zmetkovitosti na stanoviště předcházející, kterými jsou Kontrola1 a Kontrola3.



Obr. 15 Závislost vytíženosti stanice kontrola1 na zmetkovitosti

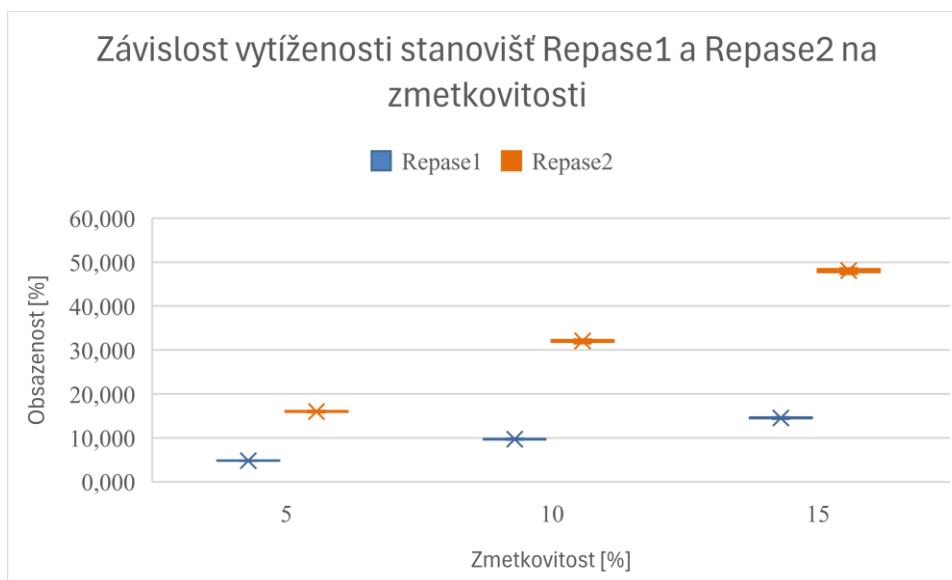


Obr. 16 Závislost vytíženosti stanice kontrola3 na zmetkovitosti

Zmetkovitost [%]	Obsazenost [%]			
	Kontrola1		Kontrola3	
	Min	Max	Min	Max
5	9,54	9,81	69,99	72,05
10	9,54	9,81	69,99	72,05
15	9,54	9,81	69,99	72,05

Tab. 5 Hodnoty vytíženosti stanoviště Kontrola1 a Kontrola3 v závislosti na zmetkovitosti

Z grafů je patrné, že zmetkovitost nemá žádný vliv na vytíženost stanic Kontrola1 a Kontrola3 a tvrzení, že zmetkovitost ovlivňuje pouze vytíženost stanoviště Repase1 a Repase2 je možné považovat za potvrzené.



Obr. 17 Závislost vytíženosti stanovišť Repase1 a Repase2 na zmetkovitosti

Zmetkovitost [%]	Obsazenost [%]				Nárůst [%]			
	Repase1		Repase2		Repase1		Repase2	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
5	4,75	4,89	15,75	16,2	-	-	-	-
10	9,55	9,82	31,49	32,4	50,3	50,2	50,0	50,0
15	14,31	14,72	47,25	48,63	33,3	33,3	33,4	33,4

Tab. 6 Hodnoty vytíženosti stanovišť Repase1 a Repase 2 v závislosti na zmetkovitosti

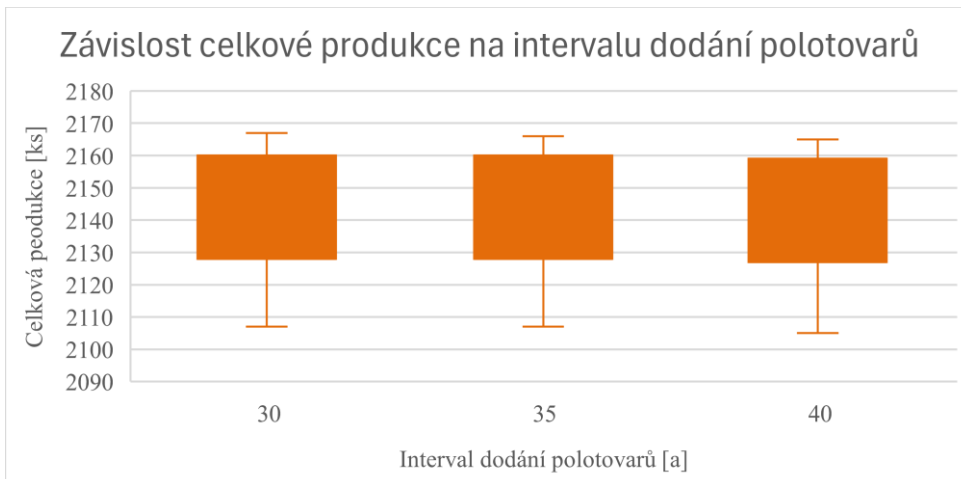
Z grafu je patrná lineární závislost mezi vytížeností stanovišť Repase1 a Repase2 na zmetkovitosti. Tato linearita byla očekávatelná, jelikož při dvojnásobné zmetkovitosti půjde na stanoviště repase dvojnásobné množství výrobků a její vytíženost bude dvojnásobná. Malý rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou vytíženosti pro jednotlivé hladiny zmetkovitosti, v porovnání se změnou vytíženosti při změně zmetkovitosti, ukazuje, že zmetkovitost má na vytíženost stanovišť Repase1 a Repase2 největší vliv ze všech parametrů z matice simulačních experimentů.

3.2 ANALÝZA VLIVU INTERVALU DODÁNÍ POLOTOVARŮ

Dalším vstupním parametrem je interval dodání polotovarů. Při příliš krátkém intervalu může docházet k vyšší obsazenosti dopravníků a k následnému zablokování materiálového u některého ze stanovišť. Naopak příliš dlouhý interval může zapříčinit prostoje a snížit efektivitu výrobního systému.

3.2.1 ANALÝZA VLIVU INTERVALU DODÁNÍ POLOTOVARŮ NA CELKOVOU PRODUKCI

Z grafu závislosti celkové produkce je patrné, že interval dodání má v testovaném rozmezí zcela minimální vliv na celkovou produkci. Dá se předpokládat, že s rostoucím intervalem bude celková produkce postupně klesat. Tento předpoklad se dá odvodit jednoduchou úvahou, s rostoucím intervalem dodání polotovarů bude klesat celkové množství dodaných polotovarů a s tím klesat celková produkce.



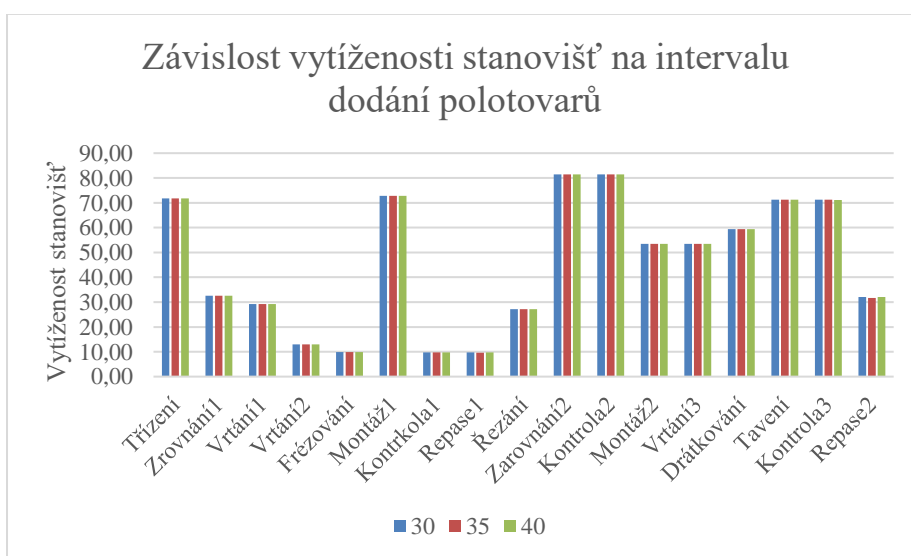
Obr. 18 Závislost celkové produkce na intervalu dodání polotovarů

Interval dodání polotovarů [s]	Celková produkce [ks]	
	Min	Max
30	2107	2167
35	2107	2166
40	2105	2165

Tab. 7 Hodnoty celkové produkce v závislosti na intervalu dodání polotovarů

3.2.2 ANALÝZA VLIVU INTERVALU DODÁNÍ POLOTOVARŮ NA VYTÍŽENOSTI STANOVÍŠŤ

Na grafu vytíženosti stanovišť v závislosti na intervalu dodání je možné vidět, že interval dodání má v rozmezí testovaných hodnot téměř nulový vliv. S rostoucím intervalem dodání polotovarů lze stejně jako u celkové produkce pokles vytíženosti všech stanovišť. V tabulce s konkrétními hodnotami je vidět, že změny vytíženosti pracovišť se pohybují v řádu setin procent. Tabulku je možné vidět v příloze IV.



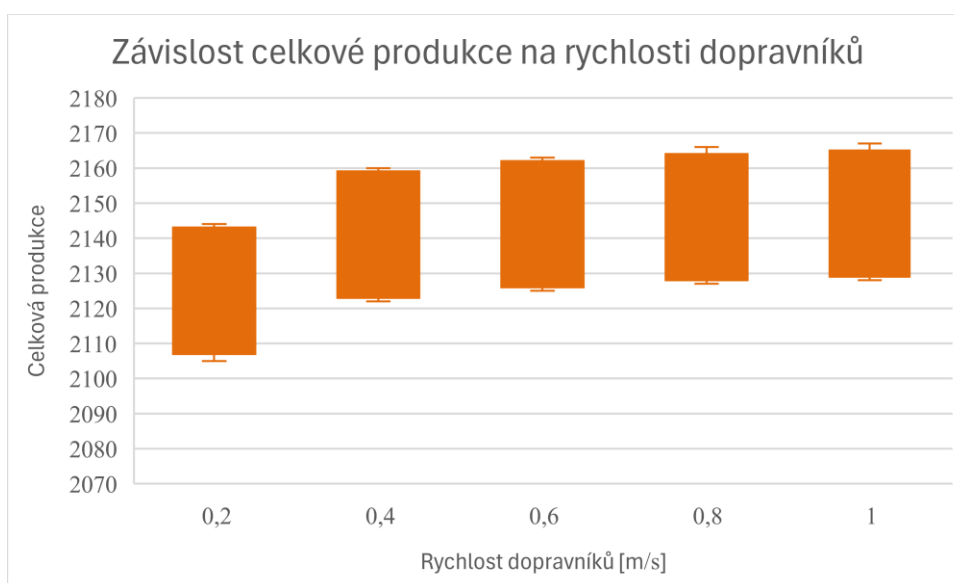
Obr. 19 Závislost vytíženosti stanovišť na intervalu dodání polotovarů

3.3 ANALÝZA VLIVU RYCHLOSTI DOPRAVNÍKŮ

Mezi další důležité parametry výrobního systému patří také rychlost dopravníků. Důvodem analýzy vlivu rychlosti dopravníků je snaha snížit co nejvíce jejich rychlost z důvodu energetických úspor. Zároveň s tím musí být rychlost stále dostatečná pro zásobování jednotlivých stanovišť.

3.3.1 ANALÝZA VLIVU RYCHLOSTI DOPRAVNÍKŮ NA CELKOVOU PRODUKCI

V grafu závislosti celkové produkce na rychlosti dopravníků je možné pozorovat, že pokud poklesne rychlost dopravníků na nízké hodnoty je patrné snížení celkové produkce. Se zvyšující se rychlostí dopravníků je rozdíl v celkové produkci čím dál tím menší a mezi rychlostmi 0,8 a 1 m/s je rozdíl naprosto nepatrný. Z toho vyplývá, že zvyšování rychlosti dopravníků nad 0,8 m/s nemá z hlediska navýšení celkové produkce žádný význam a docházelo by pouze k navyšování energetické náročnosti dopravníků.



Obr. 20 Závislost celkové produkce na rychlosti dopravníků

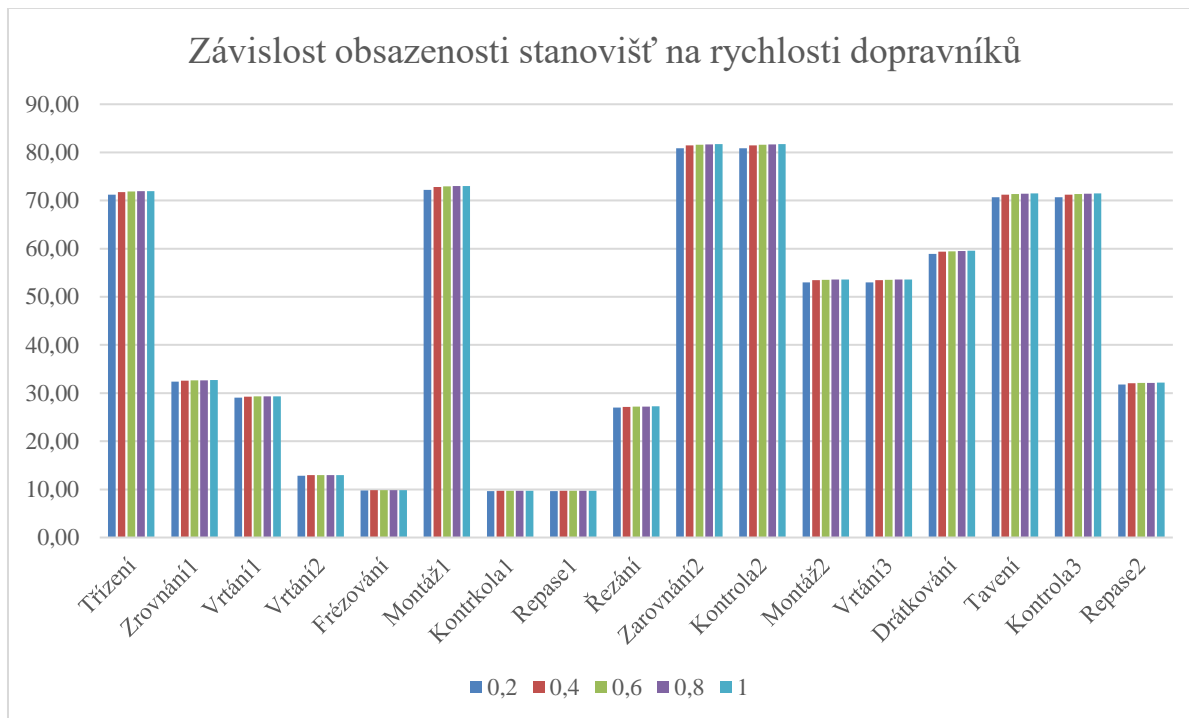
Rychlost dopravníků [m/s]	Celková produkce [ks]		Nárůst			
	Min	Max	Min		Max	
			Počet	%	Počet	%
0,2	2105	2144	-	-	-	-
0,4	2122	2160	17	0,8	16	0,7
0,6	2125	2163	3	0,1	3	0,1
0,8	2127	2166	2	0,1	3	0,1
1	2128	2167	1	0,0	1	0,0

Tab. 8 Hodnoty celkové produkce v závislosti na rychlosti dopravníků

3.3.2 ANALÝZA VLIVU RYCHLOSTI DOPRAVNÍKŮ NA VYTÍŽENOST STANOVIŠŤ

Na grafu závislosti obsazenosti stanovišť na rychlosti dopravníků je vidět u všech stanovišť nárůst vytiženosti při zrychlení dopravníků z 0,2 ba 0,4 m/s. Při dalším zvyšování rychlosti je nárůst stále možné pozorovat, ale je výrazně menší než nárůst předchozí. Z toho vyplývá že zvyšování rychlosti dopravníků nám do určité rychlosti přinese zvýšení vytiženosti stanovišť,

ale další zvyšování nemá téměř žádný vliv na vytíženost. To je způsobeno tím, že je-li výrobní systém plně v provozu dopravník bude přepravovat materiál dopravován na následující stanoviště v takovém intervalu, jakém jej bude produkovat pracoviště předchozí a vliv rychlosti dopravníku bude zcela zanedbatelný. Tabulku s konkrétními hodnotami je možné vidět v příloze V.



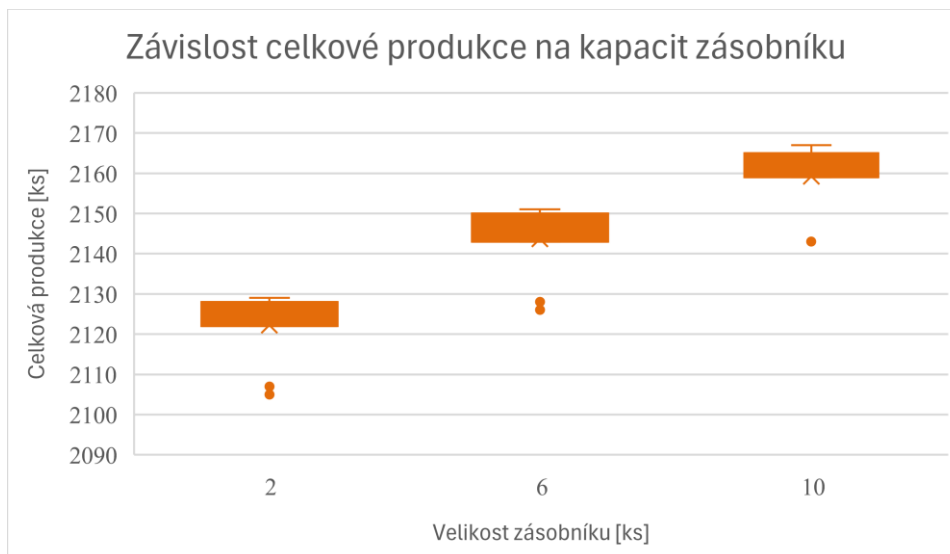
Obr. 21 Závislost obsazenosti stanovišť na rychlosti dopravníků

3.4 ANALÝZA VLIVU VELIKOSTI ZÁSOBNÍKU

Velikost zásobníků ve výrobní lince dává větší jistotu dostupnosti požadované stanovišti za zásobníkem ovšem za cenu vyšší skladovací kapacity a prostorových nároků. S vyšší kapacitou zásobníků mají stanoviště nacházející se za zásobníkem požadovaný materiál k dispozici s větší pravděpodobností. S tím je také předpoklad vyšší vytíženosti a s tím spojené vyšší celkové produkce.

3.4.1 ANALÝZA VLIVU VELIKOSTI ZÁSOBNÍKU NA CELKOVOU PRODUKCI

Na grafu závislosti celkové produkce na kapacitě zásobníku je vidět, že se zvyšující se velikostí zásobníků roste také celková produkce. Z tabulky níže je patrné, že nárůst není lineární, ale s rostoucí kapacitou zásobníku se zmenšuje procentuální nárůst celkové produkce. Dá se tedy předpokládat, že dalším zvětšováním kapacity zásobníku dojde ke zvýšení celkové produkce ovšem rozdíly oproti v celkové produkci se budou čím dál více zmenšovat. Na grafu je dále patrných několik bodů mimo pole nejčastějších hodnot. Jedná se o simulační experimenty, při kterých byla rychlost dopravníků nastavena na 0,2 m/s. Při poklesu rychlosti na tuto úroveň dochází ke zřetelnému snížení celkové produkce viz. kapitola 3.3. Celkově lze říci, že velikost zásobníku hraje důležitou roli a její ovlivnění celkové produkce je největší ze všech parametrů z matice simulačních experimentů.



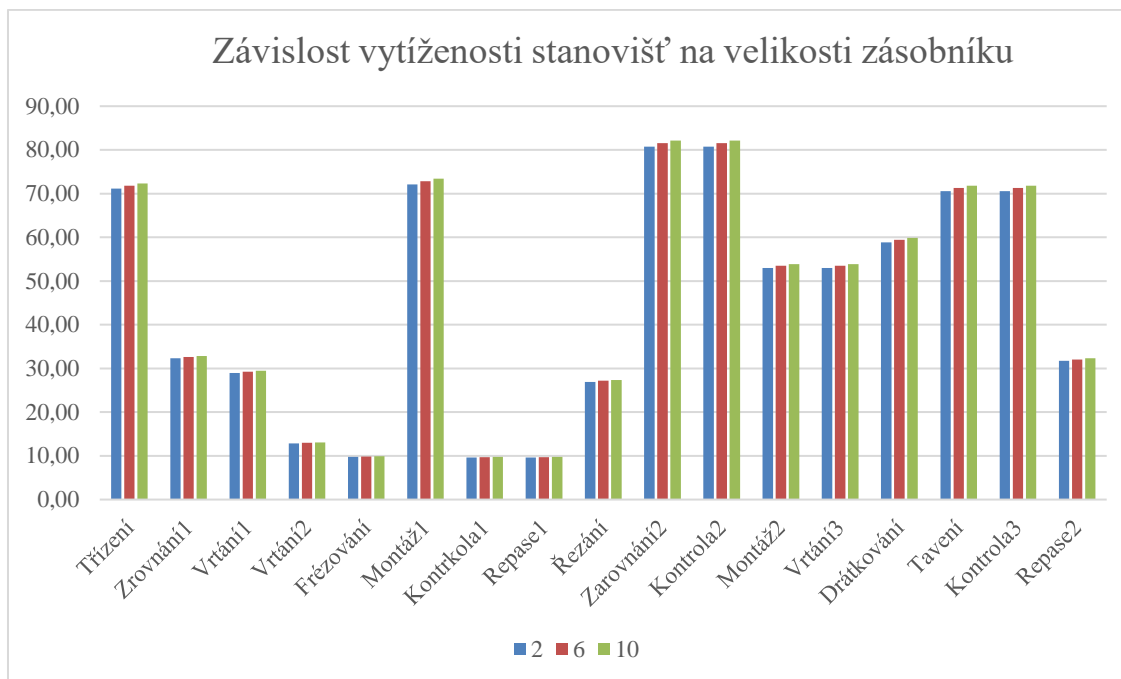
Obr. 22 Závislost celkové produkce na kapacit zásobníku

Velikost zásobníku [ks]	Celková produkce [ks]		Nárůst			
	Min	Max	Min		Max	
			Počet	%	Počet	%
2	2105	2129	-	-	-	-
6	2126	2151	21	1,0	22	1,0
10	2143	2167	17	0,8	16	0,7

Tab. 9 Hodnoty celkové produkce v závislosti na velikosti zásobníku

3.4.2 ANALÝZA VLIVU VELIKOSTI ZÁSOBNÍKU NA VYTÍŽENOST STANOVIŠŤ

Na grafu závislosti vytíženosti jednotlivých stanovišť výrobního systému je možné pozorovat, jak s rostoucí kapacitou stoupá u většiny výrobních stanic jejich využitelnost. Z toho je možné odvodit, že malá kapacita zásobníku způsobí že bude docházet k blokování stanovišť z důvodu nedostatku místa na odvedení obráběného polotovaru nebo polovýrobku. K blokaci bude docházet na stanovištích nacházejících se ve výrobním systému před zásobníkem, jedná se tedy o stanice Zarovnání2, Řezání a Třídění. Nárůst vytíženosti je možné pozorovat na všech stanovištích výrobního úseku na výrobu rámků ve kterém se zásobník nachází. To je způsobeno tím, že větší kapacita zásobníku dává větší jistotu dostupnosti potřebného polotovaru. Za všimnutí stojí také proměnlivá vytíženost stanovišť v úseku na výrobu nástavků. Z toho jde odvodit, že velikost zásobníku vliv nejen na výrobní úsek, ve kterém se nachází, ale také na výrobní úsek, ve kterém není. Je tedy zřejmé, že velikost zásobníku bude velmi důležitý parametr materiálového toku a nastavení jeho optimální velikosti je potřeba věnovat více pozornosti než jiným vstupním parametrům.



Obr. 23 Závislost vytíženosti stanovišť na velikosti zásobníku

Stanoviště	Vytíženost při dané kapacitě zásobníku [%]					
	2		6		10	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Třízení	70,58	71,34	71,27	72,05	71,81	72,59
Zarovnění1	32,00	32,40	32,36	32,72	32,61	32,97
Vrtání1	28,76	29,08	29,04	29,37	29,27	29,59
Vrtání2	12,70	12,87	12,85	13,00	12,95	13,10
Frézování	9,67	9,78	9,76	9,87	9,84	9,95
Montáž1	71,55	72,37	72,28	73,09	72,83	73,63
Kontrola1	9,54	9,65	9,63	9,74	9,71	9,81
Repase1	4,76	14,50	4,80	14,61	4,85	14,72
Řezání	26,71	27,00	26,97	27,27	27,18	27,47
Zarovnění2	80,12	80,97	80,90	81,78	81,53	82,39
Kontrola2	80,12	80,97	80,90	81,78	81,53	82,39
Montáž2	52,00	53,15	53,03	53,69	53,41	54,06
Vrtání3	52,51	53,15	53,02	53,68	53,41	54,06
Drátkování	58,34	59,05	58,91	59,63	59,34	60,05
Tavení	70,00	70,84	70,68	71,55	71,20	72,06
Kontrola	70,00	70,83	70,68	71,53	71,19	72,05
Repase2	15,75	47,80	15,90	48,27	16,02	48,63

Tab. 10 Hodnoty obsazenosti stanovišť v závislosti na velikosti zásobníku

ZÁVĚR

Na začátku práce byly popsány základní pojmy logistiky, které slouží pro lepší uvedení čtenáře do rozebírané problematiky. Následovala řešerše simulačních softwarů materiálového toku a popis jejich nejdůležitějších charakteristik, výhod a nevýhod oproti konkurenci. Na konci první části byl proveden výběr simulačního softwaru a zdůvodnění výběru

Druhá část práce byla zaměřena na tvorbu simulačního modelu výrobního systému. Nejdříve byla nastíněna zamýšlená koncepce výrobního systému, poté byl vytvořen layout výrobního systému, následoval popis jednotlivých úseků výroby a popis úkonů prováděných na jednotlivých stanovištích. Dále byly uvedeny zkoumané charakteristiky materiálového toku, což v případě této práce jsou celková produkce a vytíženost pracovišť. Poté byly popsány charakteristiky, které mohou ovlivňovat chování výrobního systému. Z těchto vnějších parametrů byla sestavena matice simulačních experimentů pro zjištění vlivu těchto parametrů na výrobní systém. Vstupními proměnnými parametry byly zmetkovitost, interval dodání polotovarů, rychlost dopravníků a velikost zásobníku.

Dále se práce věnovala analýze výsledků získaných provedením simulačních experimentů se vstupními parametry nastavených podle matice simulačních experimentů. Z výsledků simulačních experimentů byly vyjádřeny závislosti sledovaných parametrů na parametrech vstupních.

Analýza vlivu zmetkovitosti výroby ukázala, že rostoucí zmetkovitost má naprosto nepatrný vliv na celkovou produkci a na vytíženost většiny stanovišť. Jediné stanoviště, u kterých došlo k nárůstu vytíženosti byla stanoviště repasí.

Analýza vlivu intervalu dodání polotovarů poukázala, že vliv intervalu dodání polotovarů nemá v testovaném rozmezí vliv na celkovou produkci ani vytíženost stanovišť.

Analýza vlivu rychlosti dopravníků ukázala možnost snížení rychlosti dopravníků oprati předem nastavené na méně než polovinu, přičemž dochází k minimálnímu poklesu celkové produkce a vytíženosti stanovišť.

Analýza vlivu velikosti zásobníku ukazuje na velký vliv na celkovou produkci. Experimentům s nižší kapacitou zásobníku se nepodařilo dosáhnout srovnatelné produkce ani pomocí změny ostatních vstupních parametrů, což např. u rychlosti dopravníků bylo možné. Kapacita zásobníku se ukázala jako parametr s největším vlivem na celkovou produkci a vytíženost stanovišť.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

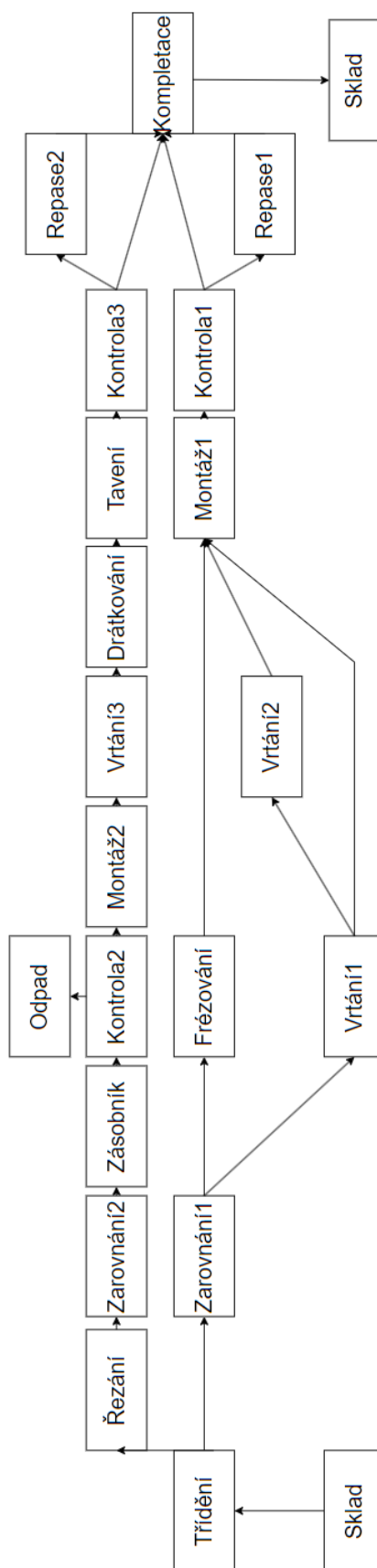
- [1] BESTA, Petr a Stanislav PTÁČEK. *Průmyslová logistika*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-248-1993-8.
- [2] MACUROVÁ, Pavla, Naděžda KLABUSAYOVÁ a Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. *Logistika I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Ekonomická fakulta, 2007. ISBN 978-80-248-1419-3
- [3] *Logistický management* [online]. Olomouc: Chytilová, 2018 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <http://www.edulam.cz/wp-content/uploads/2018/11/Logistick%C3%BDmanagement.pdf>
- [4] PERNICA, Petr. *Logistika pro 21. století: (Supply chain management)*. Praha: Radix, 2005. ISBN 80-860-3159-4.
- [5] PERNICA, Petr. *Logistický management. Teorie a podniková praxe*. 1. vyd. Praha: RADIX, 1998, 660 s. ISBN 80-86031-13-6
- [6] ŠTOČEK, Jiří. *Optimalizace materiálového toku ve vybraném průmyslovém závodě*. Brno: Vysoké učení technické. ISBN 80-214-2885-6. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav dopravní techniky, 2004. 114 s. Vedoucí práce doc. Ing. Břetislav Mynář, CSc
- [7] DANĚK, Jan a Miroslav PLEVNÝ. *Výrobní a logistické systémy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 212 s. ISBN 80-7043-416-3
- [8] *Sankey Diagram* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.sankey-diagrams.com/tag/production/>
- [9] VARJAN, Matuš. *Simulační verifikace komplexního technologického projektu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 187 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Rumíšek, CSc.
- [10] HLOSKA, Jiří. *Optimalizace materiálového toku v hromadné výrobě simulačními metodami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 144 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
- [11] SHARMA, P. *Discrete-event simulation*. International journal of scientific & technology research. 2015
- [12] *VRapps blog* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z:] <https://www.vrapps.cz/blog/flexsim-simulace-analytika-optimalizace-ve-3d>``
- [13] *FlexSim* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.flexsim.com/hu/factory-simulation/>
- [14] *Arena Simulaton*. Rockwell Automation [online]. 2020 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.arenasimulation.com/>

- [15] Future Learn [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.futurelearn.com/info/courses/simulation-for-logistics-an-introduction/0/steps/66025>
- [16] SIMUL8 [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.simul8.com/about/>
- [17] *Enginsoft* [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.enginsoft.com/solutions/simul8.html>
- [18] *SimpliLearn* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.simplilearn.com/tutorials/matlab-tutorial/what-is-matlab-simulink>
- [19] *MathWorks* [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/simulink/gs/product-description.html>
- [20] *AnyLogic* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/>
- [21] *Eng* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.indx.com/en/product/anylogic-simulation-software>
- [22] *Siemens Digital Industries Software* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/plant-simulation-software/>
- [23] ČESKO. § 88 odst. 1 zákona č. 262/2006 Sb., zákoník práce. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 24. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-262#p88-1>.

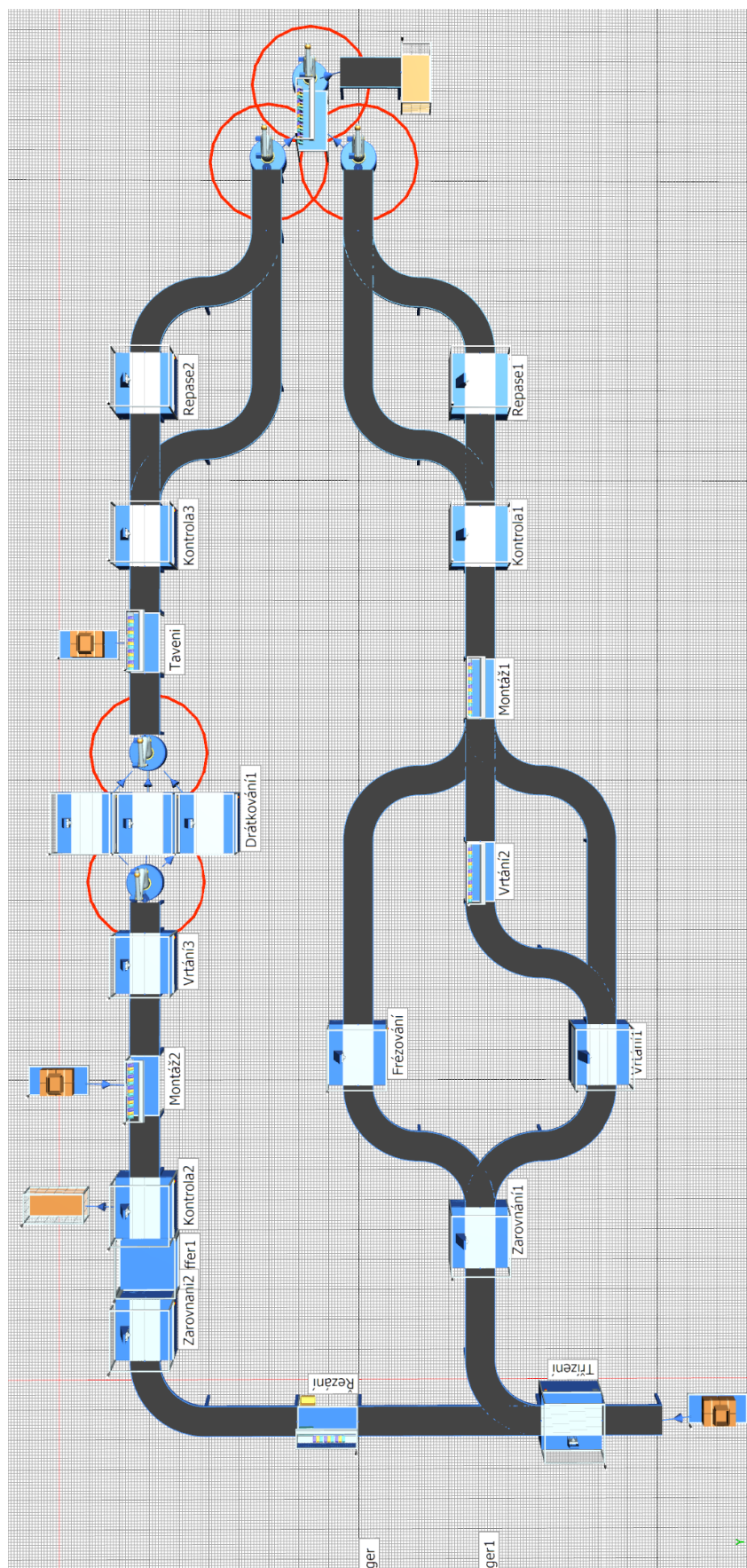
SEZNAM PŘÍLOH

- I. Layout výrobního systému
- II. Výrobní systém v Plant Simulation
- III. Matice simulačních experimentů s výsledky
- IV. Vytíženost stanovišť v závislosti na intervalu dodání polotovarů
- V. Vytíženost stanovišť v závislosti na rychlosti dopravníků

PŘÍLOHA I. - LAYOUT VÝROBNÍHO SYSTÉMU



PŘÍLOHA II. - VÝROBNÍ SYSTÉM V PLANT SIMULATION



PŘÍLOHA III. - MATICE SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ S VÝSLEDKŮ

Číslo experimentu	Znetkovenost	Interval dodání polotovaru	Rychlost dopravníku	Velikost zásobníku	Celková produkce	Trženi	Zvornání1	Vitání1	Vitání2	Frézování	Montáž1	Kontrola1	Repasáž1	Režání	Zarování2	Kontrola2	Montáž2	Vitání3	Drátování	Tavení	Kontrola3	Repasáž2	Obsazený zásobník
Exp1	5	30	0,2	2	2107	70,608	32,062	28,774	12,734	9,674	71,586	9,543	4,755	26,721	80,150	80,149	52,518	58,348	70,012	70,008	15,747	43,672	
Exp2	5	30	0,2	6	2128	71,306	32,380	29,060	12,861	9,769	72,301	9,638	4,801	26,989	80,949	80,948	53,044	58,930	70,710	70,706	15,910	39,784	
Exp3	5	30	0,2	10	2144	71,855	32,630	29,283	12,958	9,846	72,860	9,715	4,846	27,197	81,575	81,574	53,467	59,397	71,271	71,267	16,033	34,423	
Exp4	5	30	0,4	2	2123	71,136	32,305	28,995	12,835	9,749	72,149	9,615	4,801	26,917	80,736	80,736	52,986	58,862	70,616	70,601	15,883	46,158	
Exp5	5	30	0,4	6	2144	71,837	32,624	29,277	12,959	9,846	72,867	9,715	4,846	27,185	81,535	81,534	53,479	59,414	71,292	71,289	16,033	41,948	
Exp6	5	30	0,4	10	2160	72,363	32,862	29,495	13,056	9,914	73,401	9,783	4,891	27,385	82,134	82,134	53,881	59,879	71,824	71,820	16,155	38,179	
Exp7	5	30	0,6	2	2126	71,255	32,359	29,040	12,853	9,764	72,275	9,633	4,801	26,963	80,873	80,872	53,069	53,066	70,740	70,725	15,910	47,194	
Exp8	5	30	0,6	6	2148	71,973	32,686	29,334	12,983	9,864	73,004	9,733	4,846	27,234	81,689	81,689	53,588	53,587	71,438	71,435	16,073	43,038	
Exp9	5	30	0,6	10	2163	72,490	32,920	29,547	13,077	9,932	73,514	9,801	4,891	27,431	82,275	82,274	53,972	53,972	71,947	71,944	16,182	38,469	
Exp10	5	30	0,8	2	2128	71,310	32,382	29,062	12,865	9,774	72,332	9,642	4,801	26,985	80,937	80,936	53,097	53,095	70,785	70,782	15,924	47,321	
Exp11	5	30	0,8	6	2150	72,016	32,707	29,352	12,992	9,869	73,058	9,737	4,846	27,252	81,738	81,738	53,630	53,630	71,493	71,490	16,087	43,373	
Exp12	5	30	0,8	10	2166	72,549	32,947	29,570	13,089	9,941	73,597	9,810	4,891	27,453	82,344	82,342	54,027	54,026	72,021	72,018	16,199	36,985	
Exp13	5	30	1,0	2	2129	71,341	32,397	29,076	12,868	9,778	72,373	9,647	4,801	26,997	80,971	80,970	53,150	53,147	70,841	70,826	15,938	47,550	
Exp14	5	30	1,0	6	2150	72,052	32,722	29,368	12,988	9,873	73,084	9,742	4,871	27,265	81,781	81,781	53,687	53,673	71,522	71,507	16,087	43,529	
Exp15	5	30	1,0	10	2167	72,589	32,965	29,588	13,095	9,946	73,629	9,814	4,891	27,468	82,389	82,388	54,056	54,054	72,058	72,055	16,209	39,035	
Exp16	5	35	0,2	2	2107	70,608	32,062	28,774	12,734	9,674	71,586	9,543	4,755	26,721	80,150	80,149	52,518	58,348	70,012	70,008	15,747	43,689	
Exp17	5	35	0,2	6	2128	71,306	32,380	29,060	12,861	9,769	72,301	9,638	4,801	26,989	80,949	80,948	53,044	58,930	70,710	70,706	15,910	39,781	
Exp18	5	35	0,2	10	2144	71,855	32,630	29,283	12,958	9,846	72,860	9,715	4,846	27,197	81,575	81,574	53,467	53,465	71,271	71,267	16,033	34,423	
Exp19	5	35	0,4	2	2123	71,136	32,305	28,995	12,835	9,749	72,149	9,615	4,801	26,917	80,736	80,736	52,986	52,983	70,616	70,601	15,883	46,158	
Exp20	5	35	0,4	6	2144	71,837	32,624	29,277	12,959	9,846	72,867	9,715	4,846	27,185	81,535	81,534	53,479	53,478	71,292	71,289	16,033	42,057	
Exp21	5	35	0,4	10	2160	72,363	32,862	29,495	13,056	9,914	73,401	9,783	4,891	27,385	82,135	82,134	53,881	53,879	71,824	71,820	16,155	38,176	
Exp22	5	35	0,6	2	2126	71,255	32,359	29,040	12,853	9,764	72,275	9,633	4,801	26,963	80,873	80,873	53,069	53,066	70,740	70,725	15,910	47,196	
Exp23	5	35	0,6	6	2148	71,964	32,682	29,330	12,983	9,863	72,986	9,731	4,846	27,234	81,689	81,689	53,567	53,567	71,411	71,408	16,060	43,264	
Exp24	5	35	0,6	10	2163	72,490	32,920	29,547	13,077	9,932	73,514	9,801	4,891	27,431	82,275	82,274	53,972	53,972	71,947	71,944	16,182	38,404	
Exp25	5	35	0,8	2	2128	71,310	32,382	29,062	12,865	9,774	72,332	9,642	4,801	26,985	80,937	80,936	53,097	53,095	70,785	70,782	15,924	47,318	
Exp26	5	35	0,8	6	2150	72,016	32,707	29,352	12,992	9,869	73,058	9,737	4,846	27,252	81,738	81,738	53,630	53,630	71,493	71,490	16,087	43,375	
Exp27	5	35	0,8	10	2166	72,549	32,947	29,570	13,089	9,941	73,597	9,810	4,891	27,453	82,344	82,342	54,027	54,026	72,021	72,018	16,199	36,991	
Exp28	5	35	1,0	2	2129	71,341	32,397	29,076	12,868	9,778	72,373	9,647	4,801	26,997	80,971	80,970	53,150	53,147	70,841	70,826	15,938	47,445	
Exp29	5	35	1,0	6	2150	72,052	32,722	29,368	12,988	9,873	73,084	9,742	4,871	27,265	81,781	81,781	53,687	53,673	71,522	71,507	16,087	43,579	
Exp30	5	35	1,0	10	2166	72,579	32,961	29,583	13,095	9,946	73,627	9,814	4,891	27,465	82,378	82,377	54,066	54,054	72,058	72,049	16,209	39,093	
Exp31	5	40	0,2	2	2106	70,576	32,050	28,764	12,728	9,669	71,549	9,538	4,755	26,710	80,116	80,116	52,511	52,511	70,003	69,999	15,747	43,769	
Exp32	5	40	0,2	6	2127	71,266	32,362	29,043	12,853	9,764	72,279	9,633	4,801	26,974	80,903	80,902	53,032	53,030	70,682	70,688	15,887	39,772	
Exp33	5	40	0,2	10	2143	71,814	32,611	29,266	12,953	9,841	72,827	9,710	4,846	27,181	81,529	81,529	53,433	53,431	71,225	71,221	16,019	34,410	
Exp34	5	40	0,4	2	2122	71,104	32,289	28,981	12,829	9,744	72,115	9,611	4,801	26,906	80,702	80,702	52,963	52,960	70,582	70,567	15,871	46,157	
Exp35	5	40	0,4	6	2143	71,805	32,609	29,266	12,953	9,841	72,831	9,710	4,846	27,173	81,501	81,500	53,458	53,458	71,265	71,262	16,033	41,947	
Exp36	5	40	0,4	10	2159	72,320	32,843	29,475	13,043	9,909	73,339	9,778	4,891	27,374	82,101	82,100	53,820	53,818	71,739	71,739	16,141	37,995	
Exp37	5	40	0,6	2	2126	71,225	32,345	29,031	12,847	9,760	72,245	9,629	4,801	26,951	80,839	80,838	53,054	53,052	70,710	70,695	15,906	47,273	
Exp38	5	40	0,6	6	2147	71,923	32,663	29,316	12,974	9,855	72,940	9,724	4,846	27,223	81,651	81,650	53,547	53,546	71,384	71,381	16,060	43,008	
Exp39	5	40	0,6	10	2162	72,445	32,889	29,526	13,068	9,928	73,476	9,796	4,891	27,415	82,230	82,229	53,945	53,944	71,911	71,908	16,182	36,464	
Exp40	5	40	0,8	2	2127	71,282	32,371	29,053	12,859	9,769	72,306	9,638	4,801	26,974	80,903	80,902	53,078	53,075	70,761	70,756	15,920	47,422	
Exp41	5	40	0,8	6	2149	71,987	32,692	29,339	12,986	9,864	73,014	9,733	4,846	27,241	81,704	81,704	53,610	53,610	71,466	71,463	16,073	43,346	
Exp42	5	40	0,8	10	2164	72,508	32,928	29,552	13,080	9,937	73,546	9,805	4,891	27,438	82,299	82,297	53,966	53,966	71,967	71,964	16,192	38,944	
Exp43	5	40	1,0	2	2128	71,310	32,382	29,062	12,865	9,774	72,333	9,642	4,801	26,985	80,937	80,936	53,098	53,095	70,785	70,784	15,924	47,546	
Exp44	5	40	1,0	6	2150	72,014	32,705	29,350	12,989	9,869	73,058	9,737	4,846	27,250	81,736	81,735	53,648	53,648	71,509	71,494	16,087	43,561	
Exp45	5	40	1,0	10	2165	72,539	32,943	29,565	13,086	9,941	73,584	9,810	4,891	27,453	82,344	82,343	54,015	54,013	72,004	72,000	16,196	39,013	



Číslo experimentu	Změřitelnost	Interval dodání polotovaru	Rychlost dopravníku	Velikost zásobníku	Celková produkce	Třídění	Zrovňání1	Vřtání1	Vřtání2	Fřezování	Montáž1	Kontrola1	Řepase1	Režim	Zrovňání2	Kontrola2	Montáž2	Vřtání3	Drátkování	Tavení	Kontrola3	Řepase2	Obsazený zásobník
Exp91	15	30	0,2	2	2107	70,600	32,062	26,774	12,734	9,674	71,586	9,543	14,312	26,721	80,150	80,149	52,525	58,356	70,021	70,017	47,255	43,672	
Exp92	15	30	0,2	6	2128	71,306	32,380	29,060	12,861	9,789	72,301	9,638	14,447	26,989	80,949	80,948	53,053	53,051	58,937	70,719	70,715	47,727	39,784
Exp93	15	30	0,2	10	2143	71,855	32,630	29,283	12,958	9,846	72,860	9,715	14,583	27,197	81,575	81,574	53,458	59,390	71,262	71,258	48,093	34,423	
Exp94	15	30	0,4	2	2123	71,136	32,305	28,995	12,835	9,749	72,149	9,615	14,402	26,917	80,736	80,736	52,980	52,978	58,856	70,618	70,603	47,649	46,158
Exp95	15	30	0,4	6	2143	71,837	32,624	29,277	12,959	9,846	72,867	9,715	14,402	27,185	81,535	81,534	53,492	53,492	59,429	71,297	71,282	48,111	41,948
Exp96	15	30	0,4	10	2160	72,363	32,862	29,495	13,056	9,914	73,401	9,783	14,674	27,385	82,135	82,134	53,875	53,872	59,851	71,815	71,811	48,465	38,179
Exp97	15	30	0,6	2	2126	71,255	32,359	29,040	12,853	9,764	72,275	9,633	14,447	26,963	80,873	80,872	53,074	53,072	58,960	70,745	70,730	47,736	47,194
Exp98	15	30	0,6	6	2148	71,973	32,886	29,334	12,983	9,864	73,004	9,733	14,583	27,234	81,689	81,689	53,588	53,587	59,536	71,438	71,435	48,212	43,038
Exp99	15	30	0,6	10	2163	72,490	32,920	29,547	13,077	9,932	73,514	9,801	14,696	27,431	82,275	82,274	53,952	53,951	59,938	71,920	71,917	48,537	38,469
Exp100	15	30	0,8	2	2128	71,310	32,382	29,062	12,865	9,774	72,332	9,642	14,447	26,985	80,937	80,936	53,100	53,098	58,980	70,791	70,784	47,772	47,321
Exp101	15	30	0,8	6	2150	72,016	32,707	29,352	12,992	9,869	73,058	9,737	14,583	27,252	81,738	81,738	53,637	53,637	59,589	71,502	71,495	48,253	43,373
Exp102	15	30	0,8	10	2165	72,549	32,947	29,570	13,089	9,941	73,597	9,810	14,719	27,453	82,344	82,344	54,027	54,026	60,022	72,011	71,996	48,590	38,965
Exp103	15	30	1,0	2	2129	71,341	32,397	29,076	12,868	9,778	72,373	9,647	14,447	26,997	80,971	80,970	53,148	53,146	59,043	70,843	70,828	47,802	47,550
Exp104	15	30	1,0	6	2150	72,052	32,722	29,368	12,998	9,873	73,094	9,742	14,608	27,265	81,761	81,761	53,682	53,678	59,624	71,528	71,513	48,274	43,529
Exp105	15	30	1,0	10	2167	72,589	32,965	29,588	13,095	9,946	73,629	9,814	14,719	27,468	82,386	82,386	54,056	54,054	60,053	72,058	72,046	48,228	39,035
Exp106	15	35	0,2	2	2107	70,608	32,062	28,774	12,734	9,674	71,586	9,543	14,312	26,721	80,150	80,149	52,525	58,356	70,021	70,017	47,255	43,689	
Exp107	15	35	0,2	6	2128	71,306	32,380	29,060	12,861	9,789	72,301	9,638	14,447	26,989	80,949	80,948	53,053	53,051	58,937	70,719	70,715	47,727	39,781
Exp108	15	35	0,2	10	2143	71,855	32,630	29,283	12,958	9,846	72,860	9,715	14,583	27,197	81,575	81,574	53,458	59,390	71,262	71,258	48,093	34,423	
Exp109	15	35	0,4	2	2123	71,136	32,305	28,995	12,835	9,749	72,149	9,615	14,402	26,917	80,736	80,736	52,980	52,978	58,856	70,618	70,603	47,649	46,158
Exp110	15	35	0,4	6	2143	71,837	32,624	29,277	12,959	9,846	72,867	9,715	14,583	27,185	81,535	81,534	53,492	53,492	59,429	71,297	71,282	48,111	42,057
Exp111	15	35	0,4	10	2160	72,363	32,862	29,495	13,056	9,914	73,401	9,783	14,674	27,385	82,135	82,134	53,875	53,872	59,851	71,815	71,811	48,465	38,176
Exp112	15	35	0,6	2	2126	71,255	32,359	29,040	12,853	9,764	72,275	9,633	14,447	26,963	80,873	80,872	53,074	53,072	58,960	70,745	70,730	47,736	47,196
Exp113	15	35	0,6	6	2148	71,964	32,882	29,330	12,983	9,863	73,096	9,731	14,583	27,234	81,689	81,689	53,567	53,567	59,513	71,411	71,408	48,193	43,264
Exp114	15	35	0,6	10	2163	72,490	32,920	29,547	13,077	9,932	73,514	9,801	14,696	27,431	82,275	82,274	53,952	53,951	59,938	71,920	71,917	48,537	38,404
Exp115	15	35	0,8	2	2128	71,310	32,382	29,062	12,865	9,774	72,332	9,642	14,447	26,985	80,937	80,936	53,100	53,098	58,980	70,791	70,784	47,772	47,318
Exp116	15	35	0,8	6	2150	72,016	32,707	29,352	12,992	9,869	73,058	9,737	14,583	27,252	81,738	81,738	53,637	53,637	59,589	71,502	71,495	48,253	43,375
Exp117	15	35	0,8	10	2165	72,549	32,947	29,570	13,089	9,941	73,597	9,810	14,719	27,453	82,344	82,344	54,027	54,026	60,022	72,011	71,996	48,590	38,991
Exp118	15	35	1,0	2	2129	71,341	32,397	29,076	12,868	9,778	72,373	9,647	14,447	26,997	80,971	80,970	53,148	53,146	59,043	70,843	70,828	47,802	47,445
Exp119	15	35	1,0	6	2150	72,052	32,722	29,368	12,998	9,873	73,094	9,742	14,608	27,265	81,761	81,761	53,682	53,678	59,624	71,528	71,513	48,274	43,579
Exp120	15	35	1,0	10	2166	72,579	32,961	29,583	13,095	9,946	73,627	9,814	14,719	27,465	82,378	82,377	54,056	54,054	60,053	72,058	72,046	48,228	39,083
Exp121	15	40	0,2	2	2106	70,576	32,050	28,764	12,728	9,669	71,549	9,538	14,312	26,710	80,116	80,116	52,518	52,518	58,348	70,012	70,008	47,248	43,769
Exp122	15	40	0,2	6	2127	71,266	32,362	29,043	12,853	9,764	72,279	9,633	14,447	26,974	80,903	80,902	53,025	53,024	58,907	70,683	70,679	47,704	39,772
Exp123	15	40	0,2	10	2143	71,814	32,611	29,266	12,953	9,841	72,827	9,710	14,540	27,181	81,530	81,529	53,440	53,437	59,367	71,234	71,230	48,071	34,410
Exp124	15	40	0,4	2	2122	71,104	32,289	28,981	12,829	9,744	72,115	9,611	14,402	26,906	80,702	80,702	52,962	52,959	58,839	70,588	70,573	47,629	46,157
Exp125	15	40	0,4	6	2143	71,805	32,609	29,266	12,953	9,841	72,831	9,710	14,540	27,173	81,501	81,500	53,451	53,451	59,384	71,256	71,253	48,089	41,947
Exp126	15	40	0,4	10	2159	72,320	32,843	29,475	13,043	9,909	73,339	9,778	14,674	27,374	82,101	82,100	53,827	53,825	59,798	71,752	71,748	48,424	37,995
Exp127	15	40	0,6	2	2126	71,225	32,345	29,031	12,847	9,760	72,245	9,629	14,447	26,951	80,839	80,838	53,058	53,056	58,945	70,713	70,698	47,716	47,273
Exp128	15	40	0,6	6	2147	71,923	32,663	29,316	12,974	9,855	72,940	9,724	14,583	27,223	81,651	81,650	53,547	53,546	59,490	71,384	71,381	48,178	43,008
Exp129	15	40	0,6	10	2162	72,445	32,899	29,526	13,068	9,928	73,476	9,796	14,674	27,415	82,230	82,229	53,945	53,944	59,930	71,911	71,901	48,526	38,464
Exp130	15	40	0,8	2	2127	71,104	32,371	29,063	12,859	9,769	72,306	9,638	14,447	26,974	80,903	80,903	53,084	53,081	58,970	70,767	70,762	47,758	47,422
Exp131	15	40	0,8	6	2149	71,987	32,892	29,339	12,986	9,864	73,014	9,733	14,583	27,241	81,704	81,704	53,610	53,610	59,559	71,466	71,463	48,233	43,344
Exp132	15	40	0,8	10	2163	72,508	32,928	29,552	13,080	9,937	73,546	9,805	14,719	27,438	82,299	82,299	53,973	53,973	59,969	71,949	71,946	48,539	38,944
Exp133	15	40	1,0	2	2128	71,310	32,382	29,062	12,865	9,774	72,333	9,642	14,447	26,985	80,937	80,936	53,102	53,100	58,991	70,791	70,786	47,772	47,546
Exp134	15	40	1,0	6	2150	72,014	32,705	29,350	12,989	9,869	73,058	9,737	14,583	27,250	81,736	81,736	53,641	53,641	59,594	71,509	71,496	48,255	43,561
Exp135	15	40	1,0	10	2165	72,539	32,943	29,565	13,086	9,941	73,584	9,810	14,719	27,453	82,344	82,344	54,001	54,000	59,992	71,982	71,982	48,583	39,013

PŘÍLOHA IV. - VYTÍŽENOST STANOVIŠŤ V ZÁVISLOSTI NA INTERVALU DODÁNÍ POLOTOVARŮ

Stanoviště	Vytíženost při daném intervalu dodání polotovarů [%]					
	30 [s]		35 [s]		40 [s]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Třízení	70,61	72,59	70,61	72,58	70,58	72,54
Zarovnání1	32,06	32,97	32,06	32,96	32,05	32,94
Vrtání1	28,77	29,59	28,77	29,58	28,76	29,57
Vrtání2	12,73	13,10	12,73	13,09	12,73	13,09
Frézování	9,67	9,95	9,67	9,95	9,67	9,94
Montáž1	71,59	73,63	71,59	73,63	71,55	73,58
Kontrola1	9,54	9,81	9,54	9,81	9,54	9,81
Repase1	4,76	14,72	4,76	14,72	4,76	14,72
Řezání	26,72	27,47	26,72	27,46	26,71	27,45
Zarovnání2	80,15	82,69	80,15	82,38	80,12	82,34
Kontrola2	80,15	82,69	80,15	82,38	80,12	82,34
Montáž2	52,52	54,06	52,52	54,06	52,51	54,01
Vrtání3	52,52	54,05	52,52	54,05	52,51	54,01
Drátkování	58,35	60,05	58,35	60,05	58,34	60,01
Tavení	70,01	72,06	70,01	72,06	70,00	72,00
Kontrola	70,01	72,05	70,01	72,05	70,00	72,00
Repase2	15,75	48,63	15,75	48,63	15,75	48,58

PŘÍLOHA V. VYTÍŽENOST STANOVIŠŤ V ZÁVISLOSTI NA RYCHLOSTI DOPRAVNÍKŮ

Stanoviště	Vytíženost při dané rychlosti dopravníků [%]									
	0,2 [m/s]		0,4 [m/s]		0,6 [m/s]		0,8 [m/s]		1 [m/s]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Třízení	70,58	71,85	71,10	72,36	71,23	72,49	71,28	72,55	71,31	72,59
Zarovnání1	32,05	32,63	32,29	32,86	32,35	32,92	32,37	32,95	32,38	32,97
Vrtání1	28,76	29,28	28,98	29,49	29,03	29,55	29,05	29,57	29,06	29,59
Vrtání2	12,73	12,96	12,83	13,06	12,85	13,08	12,86	13,09	12,87	13,10
Frézování	9,67	9,85	9,74	9,91	9,76	9,93	9,77	9,94	9,77	9,95
Montáž1	71,55	72,86	72,12	73,40	72,24	73,51	72,31	73,60	72,33	73,63
Kontrola1	9,54	9,71	9,61	9,78	9,63	9,80	9,64	9,81	9,64	9,81
Repase1	4,76	14,58	4,80	14,67	4,80	14,70	4,80	14,72	4,80	14,72
Řezání	26,71	27,20	26,91	27,39	26,95	27,43	26,97	27,45	26,99	27,47
Zarovnání2	80,12	81,58	80,70	82,14	80,84	82,28	80,90	82,34	80,94	82,39
Kontrola2	80,12	81,57	80,70	82,13	80,84	82,27	80,90	82,34	80,94	82,39
Montáž2	52,51	53,47	52,95	53,88	53,05	53,97	53,08	54,03	53,10	54,06
Vrtání3	52,51	53,46	52,94	53,88	53,05	53,97	53,08	54,03	53,10	54,05
Drátkování	58,34	59,40	58,82	59,86	58,93	59,96	58,97	60,03	58,99	60,05
Tavení	70,00	71,27	70,58	71,82	70,69	71,95	70,74	72,02	70,29	72,06
Kontrola	70,00	71,27	70,57	71,82	70,68	71,94	70,73	72,02	70,78	72,05
Repase2	15,75	48,09	15,87	48,46	15,91	48,54	15,92	48,59	15,92	48,63