



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Niklas Välisuo

Tuotannon materiaalivirran optimointi

Sähkötekniikka

2023

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikka

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Niklas Välisuo
Opinnäytetyön nimi	Tuotannon materiaalivirran optimointi
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	55
Ohjaaja	Mikko Västi

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia ja rakentaa optimaalinen materiaalivirtaus kohdeyrityksen tuotantolinjalle käyttäen mobiilirobotteja. Tutkimista varten on työssä rakennettu digitaalinen kaksonen tehtaasta, johon on rakennettu erilaisia materiaalivirtausskenaarioita. Näistä skenaarioista kerätään dataa, jonka avulla kohdeyritys pystyy valitsemaan optimaalisen materiaalivirtauksen uutta tuotantolinjaa varten.

Materiaalivirtaukset on rakennettu erilaisten mobiilirobottien vahvuuksien pohjalta. Kohdeyrityksessä on käytössä kahden tyyppisiä mobiilirobotteja, joiden vahvuuksia ja heikkouksia on vertailtu keskenään. Vertailusta saadun datan avulla niille on luotu optimaaliset materiaalivirtaukset. Materiaalivirtauksille on laskettu alustavat tehokkuudet ja selvitetty niiden ominaisuudet. Tämän jälkeen ne on rakennettu tehtaan digitaaliseen kaksoseen, joka on tehty Visual Components ohjelmistolla. Simulaatiosta saatua dataa on vertailtu laskettuihin tehokkuuksiin, jonka avulla on varmennettu aiemmat materiaalivirtalaskelmat.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin dataa siitä, miten optimaalinen materiaalivirtaus rakennetaan uudelle tuotantolinjalle. Digitaalisen kaksosen avulla materiaalivirtauksia pystyttiin varmentamaan ja esittelemään visuaalisesti. Tämän avulla saatiin selville myös uutta dataa mobiilirobottien vahvuuksista. Opinnäytetyöstä saadulla datalla kohdeyritys tietää tuotantoerän suuruuden vaikutuksen materiaalivirtauksen tehokkuuteen, mobiilirobotin vaikutuksen materiaalivirtausstrategiaan ja kuljetusvälineen vaikutuksen välivarastointiin.

Avainsanat optimointi, tehokkuus, materiaalivirta, automaatio

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikka

ABSTRACT

Author	Niklas Välisuo
Title	The optimization of material flow in production
Year	2023
Language	Finnish
Pages	55
Name of Supervisor	Mikko Västi

The subject for the thesis was to study and build optimal material flow for the target company's new production line utilizing mobile robots. To study material flows, a digital twin of the factory was made. Material flow scenarios were built into the digital twin, to gather the data from these scenarios. This data was used by the target company to decide the optimal material flow.

Material flows are built so that they support the different strengths of different mobile robots. The target company has two different types of mobile robots. These mobile robots have been compared with each other. Data from this comparison helped build optimal materials flow for mobile robots. These material flows were built to the digital twin of the factory which was made with Visual Components software. Data gathered from the simulation was compared to calculated efficiency which, was used to find optimal material flow.

As a result of the thesis, data was obtained on how to build the optimal material flow for the new production line. With the help of a digital twin, material flows could be presented visually. With this, new data on the strengths of mobile robots was also discovered. With the data obtained from the thesis, the target company knows the effect of the size of the production batch on the efficiency of the material flow, the effect of the mobile robot on the material flow strategy, and the effect of the means of transport on intermediate storage.

Keywords optimizing, efficiency, material flow, automation

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Työn tausta	7
1.2	Työn rajaus.....	7
1.3	Kohdeyritys	8
2	MATERIAALIVIRTA	9
2.1	Tuotannon materiaalivirtaus	9
2.2	Tehokkaan materiaalivirran periaatteet.....	10
2.3	Lean-valmistus	10
2.4	FIFO-valmistus.....	11
2.5	Materiaalivirtasuunnitelma	11
3	TAUSTATIETOJEN KERÄYS.....	13
3.1	Materiaalikirjasto.....	13
3.2	Mobiilirobotti	14
3.2.1	Agilox ONE.....	16
3.2.2	Agilox Box Carrier	17
3.2.3	Omron LD250	18
3.2.4	Omron kuljetushylly	19
3.3	Kuljetusvälineet	19
3.4	Materiaalin kuljettaminen	22
3.5	Tehtaan layout	27
3.6	Varastointipaikat.....	28
4	SIMULOINTI	31
4.1	Digitaalisen kaksosen rakentaminen	31
4.2	Visual Components	32
4.2.1	Komponenttien mallintaminen.....	33

4.2.2	Ympäristön luominen.....	37
4.2.3	Mobiilirobottien integrointi.....	38
4.2.4	Layoutin mallintaminen.....	39
4.3	Skenaario 1.....	41
4.4	Skenaario 2.....	43
4.5	Skenaario 3.....	45
5	TULOKSET.....	46
5.1	Skenaarioiden tulokset.....	46
5.2	Materiaalivirtauksien vertailu.....	47
6	POHDINTA.....	50
6.1	Optimaalisin materiaalivirtaus.....	50
6.2	Projekti.....	51
6.3	Jatkokehitys.....	53
	LÄHTEET.....	54

KÄSITTEET JA LYHENTEET

AMR	Automated Mobile Robot
AGV	Automated Guided Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
BOM	Bill Of Materials
DT	Digital Twin
FIFO	First In First Out
JIT	Just in Time
IOT	Internet Of Things
LiDAR	Light Detection and Ranging
GPS	Global Positioning System
SQL	Structured Query Language

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Projektin tarkoituksena on tutkia ja luoda materiaalivirtaus uutta tuotantolinjaa varten. Tämä materiaalivirtaussuunnitelma pitää sisällään ratkaisut materiaalin kuljettamista, varastointia ja käsittelyä varten. Tarkoituksena on löytää optimaalinen ratkaisu varastointipaikan ja tuotantolinjan väliselle materiaalivirtaukselle. Projektissa hyödynnetään automaatiota ja digitaalisena kaksosena simulointia. Tarkoituksena on hyödyntää mobiilirobotteja materiaalivirtauksen toteuttamiseksi ja vähentää ihmisen osuutta tässä prosessissa. Projektissa rakennetaan erilaisia skenaarioita, joissa materiaalivirtaus on toteutettu hyödyntäen erilaisia lähestymisnäkökulmia. Skenaarioiden tarkoituksena on luoda dataa, jonka avulla voidaan valita parhaiten soveltuva materiaalivirtaus.

Materiaalivirran simuloinnissa käytetään Visual Components-simulointiohjelmaa. Tämän simulointiohjelman avulla rakennetaan tehtaan tuotannosta digitaalinen kaksonen, jonka avulla voidaan optimoida materiaalivirtaus tavoiteltujen kriteerien mukaisesti. Tämän projektin avulla voidaan myös arvioida Visual Componentsin ja digitaalisen kaksosen hyödyllisyyttä tulevilla projekteilla.

1.2 Työn rajaus

Työn tarkoituksena on löytää optimaalinen materiaalivirtaus simulaation avulla. Siten se rajautuu materiaalivirran tutkimiseen ja suunnitteluun. Työssä kerätään ja käsitellään dataa, jonka avulla voidaan rakentaa digitaalinen kaksonen. Työ aloitetaan keräämällä dataa materiaaleista, ympäristöstä, menetelmistä sekä välineistä. Näistä luodaan datakirjasto Exceeliin, jonka avulla voidaan rakentaa simulointiohjelmaan digitaalinen kaksonen.

Kun digitaalinen kaksonen on rakennettu, voidaan aloittaa skenaarioiden rakentaminen. Nämä skenaariot ovat erilaisia ratkaisuja materiaalivirran toteuttamiseksi. Materiaalivirtauksen valinta on vaikeaa, koska se koostuu monista erilaisista osista, tämän takia skenaariot ovat tukena materiaalivirtauksen valitsemisessa. Skenaariot on rakennettu siten, että niiden avulla voidaan vertailla erilaisia toteutuksia. Esimerkiksi skenaariossa 1 voidaan kuljettaminen toteuttaa eri menetelmillä ja työkaluilla kuin skenaariossa 2. Kun eri menetelmiä voidaan verrata rinnakkain, tulevat niiden vahvuudet ja heikkoudet selvästi näkyviin.

1.3 Kohdeyritys

ABB on vuonna 1988 perustettu sveitsiläinen teollisuuskonserni. ABB:llä on tehtaita ympäri Suomea. Kohdeyrityksen tehdas sijaitsee Vaasassa ja se valmistaa kuormakytкимиä, turvakytкимиä, koteloituja kytкимиä, kytkinvarokkeita ja nokkakytкимиä. Tehdas työllistää noin 300 ihmistä, ja hyödyntää paljon automaatiota tuotannossa. ABB aikoo kasvattaa automaation osuutta tuotannossa lähitulevaisuudessa. [1]



Kuva 1. ABB tehdasrakennus.

2 MATERIAALIVIRTA

Tämä luku käsittelee materiaalivirtauksen taustoja, käsitteitä ja periaatteita. Materiaalivirta on käsite, jolla kuvataan materiaalien, komponenttien ja tuotteiden liikumista tuotantoprosessissa ja toimitusketjussa. Se kuvaa, miten materiaalit siirtyvät prosessissa eri vaiheiden läpi aina raaka-aineiden saapumisesta lopputuotteiden lähettämiseen asti.

2.1 Tuotannon materiaalivirtaus

Tuotannon materiaalivirtauksella tarkoitetaan tehtaan sisäisen prosessin materiaalin virtaamista. Tämä materiaalivirtaus pitää sisällään monta erilaista kokonaisuutta. Tähän kuuluu materiaalinhallintajärjestelmä, varastointipaikat, kuljetuskalusto ja työntekijät. Materiaalivirtauksella on erittäin tärkeä rooli tehtaan toimivuudessa, koska siinä aiheutuvat ongelmat ovat erittäin lamauttavia. Tästä syystä materiaalivirtauksen pitää olla luotettava. Sen pitää olla myös erittäin tehokas, jolloin tuotantolinjaa voidaan ajaa täydellä kapasiteetillä.

Tuotantoprosessit kehittyvät jatkuvasti ja tästä syystä myös materiaalivirtaukset muuttuvat monimutkaisemmiksi. Tämä johtuu siitä, että teollisuus haluaa parantaa tehokkuuttaan, ja tehokkuuden arvoa painotetaan yhä enemmän. Tämän takia materiaalivirtausta suunniteltaessa on tärkeää keskittyä mahdollisiin pullonkauloihin ja integroinnin haasteisiin. Materiaalivirtauksen pitää pystyä kehittymään tuotannon rinnalla, sillä näin voidaan varmistaa sen tulevaisuudenkestävyys. Tämä voidaan varmistaa käyttämällä helposti skaalautuvia menetelmiä, jotka ovat nykyaikaisia.

Tekoälyn osuus tulee varmasti nousemaan tulevaisuuden suunnittelutehtävissä. Tästä hyvä esimerkki on Czinger Vehicles. Se on hyödyntänyt materiaalinvirtansa, tuotteidensa ja valmistusprosessinsa suunnittelussa tekoälyä. Tekoäly pystyy rakentamaan evoluutiomaisesti ratkaisuja, jotka varmistavat sen maksimaalisen te-

hokkuuden. Czinger Vehicles on myös toteuttanut uudentyyppisen materiaalivirtauksen, jossa liukuhihnat on vaihdettu valmistussoluihin. Se käyttää tuotannossaan mobiilirobotteja ja uusimpia tekniikoita, jotka tulevat yleistymään muissakin yrityksissä. [2]

2.2 Tehokkaan materiaalivirran periaatteet

Tehokkaalla toiminnalla pystytään tuottamaan paljon positiivisia tuloksia. Tehokas materiaalivirtaus vähentää toimitusaikoja, mikä parantaa asiakastytyväisyyttä. Se myös parantaa yrityksen tulosta, koska materiaalin tehokas tuottaminen ei tuhlaa resursseja. Materiavirtaa kehitettäessä tehokkaammaksi on tärkeää olla näkemys koko prosessista, johon sitä ollaan tekemässä. Tehokkuus syntyy optimoinnista, joka on datan ymmärtämistä ja käsittelyä. Tämän takia datan laadukkuus on erittäin tärkeää suunnittelussa. [3]

Teoriaa tehokkaalle materiaalivirtaukselle kehitti Taiichi Ohno. Hän oli pääinsinööri ja manageri Toyota Motor-yhtiössä. Häntä pidetään isänä Toyota Production Systemsille (TPS), josta muodostui pohja Lean-valmistukselle Yhdysvalloissa. Hän kehitti teorian seitsemästä haaskauksesta (tai Muda Japaniksi), jota hän käytti hänen järjestelmässään. Hän on myös kehittänyt JIT, Kanban, Jidoka ja Supermarket menetelmät. Hänellä on ollut hyviä ideoita, joiden avulla materiaalivirtauksesta ja tuotantotoiminnasta saadaan tehtyä tehokasta. Näitä menetelmiä soveltamalla voidaan rakentaa tehokas materiaalivirtaus. [4]

2.3 Lean-valmistus

Lean-valmistus on valmistusprosessi, jossa tarkoituksena on maksimoida tuottavuus ja minimoida haaskaus. Tässä valmistusperiaatteessa kaikki mikä ei nosta lopputuotteen arvoa pidetään haaskauksena. Se on rakennettu Taiichin seitsemän haaskauksen filosofian pohjalle. Ne kuvaavat yleisimpiä ongelmia, jotka heikentävät tehokkuutta tuotantoprosessissa. Nämä seitsemän haaskausta ovat turha kuljettaminen, liian suuri varastointi, ylimääräinen liike, joutokäyminen, ylikuormitus,

ylimääräinen käsittely ja virheet. Näiden seitsemän hukan tunnistaminen ja minimoiminen auttaa tehostamaan tuotantoa ja parantamaan tuotteiden toimitusajkoja. [5]

2.4 FIFO-valmistus

FIFO (First In First Out) on valmistus- ja varastonhallintaperiaate, joka tarkoittaa vanhimman materiaalin käyttämistä ensimmäisenä. Tämä on valmistusmenetelmä, jossa panostetaan siihen, että materiaalit käytetään siinä järjestyksessä, kun ne saapuvat käytettäväksi. Tämän avulla voidaan varmistaa se, että tuotteissa tapahtuvat päivitykset tulevat oikein markkinoille. Näin estetään se, että tuoteversion 2 tuotteessa käytettäisiin tuoteversion 1 materiaaleja. FIFO-menetelmää käytettäessä varmistetaan, että tuotteiden evoluutioiden välillä ei käytetä osia sekaisin eikä varastoon jää pitkäksi aikaa materiaaleja. [6]

2.5 Materiaalivirtasuunnitelma

Suunniteltaessa materiaalivirtausta uudelle tuotantolinjalle työ aloitetaan määrittämällä tuotantolinjan käyttötyyli, koska se määrittää, millä menetelmillä materiaalia tuodaan ja minkä kokoiset välivarastot se tarvitsee. Käyttötyylillä tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, valmistetaanko tuotteet suoraan tilauksien mukaan vai myydäänkö ne varaston kautta. Tuotantolinja toimii tehokkaimmillaan, kun eräkoot ovat suuria, koska tuotteiden vaihtaminen aiheuttaa joutokäyntiä. Tämän vuoksi tehokkain käyttötyyli on valmistaa tuotteita varastoon, josta niitä myydään eteenpäin. Varaston koko pitää määrittää siten, että se ei sido ylimääräistä rahaa, mutta on sen verran iso, että tuotantolinjan ajaminen on tehokasta.

Kun tuotantolinjan käyttötyyli on selvä, pitää seuraavaksi pohtia itse materiaalivirtausta. Materiaalivirtaus koostuu siinä kulkevista materiaaleista, niitä kuljettavista laitteista ja varastointipaikoista. Näitä osa-alueita optimoimalla saadaan luotua optimaalinen materiaalivirtaus. Näitä osa-alueita voidaan optimoida vertailemalla

erilaisia ratkaisuja keskenään sekä tutkimalla uusia menetelmiä näiden osa-alueiden totuttamiseksi. Näitä ratkaisuja voidaan vertailla rakentamalla niistä skenaarioita, joita vertaillaan. Näiden skenaarioiden tueksi voidaan myös luoda taulukoita, joiden avulla voidaan verrata materiaalivirran eri komponentteja ja valita niistä parhaat.

3 TAUSTATIETOJEN KERÄYS

Tässä luvussa käsitellään dataa, jota käytetään simulaatiossa. Simulaation laadukkuus riippuu siinä käytetystä datasta, laadukas data mahdollistaa laadukkaan simulaation. Simulaatiossa tarvittavaan tuotantoympäristön dataan kuuluu tuotannossa käytettävät materiaalit, laitteet ja tuotantotila. Jotta simulaatiolla saadut tulokset ovat paikkansapitäviä, pitää lähtötietojen olla oikein.

3.1 Materiaalikirjasto

Materiaalikirjaston tarkoituksena on kerätä materiavirtauksen simuloinnissa tarvittava data yhteen kirjastoon. Datan kerääminen on tärkeää, koska sen avulla voidaan ennustaa tiettyjä ominaisuuksia ja selvittää ongelmia. Datan keräystä ja hallintaa käyttää moni suuryritys, joka haluaa tehostaa toimintaansa. Datan keräystä voidaan tehdä verkon välityksellä hyödyntäen IoT:ta ja tallentamalla tämä data SQL-tietokantaan (Structured query language). [7] Tämän työn materiaalikirjasto on luotu MS Exceliin, koska livedataa ei voida vielä kerätä tuotannosta. Dataa kerätään materiaaleista, joita siirretään varaston ja tuotannon välillä. Näitä ovat tuotteiden komponentit, itse tuotteet ja muut tuotantoa tukevat materiaalit.

Kirjasto on rakennettu siten, että siinä on listattu tuotteiden BOM (Bill Of Materials). Se kertoo, mistä osista tuote koostuu. Kyseisen tiedon avulla voidaan ratkaista materiaalien tärkeys, koska materiaaleja tarvitaan erilaisia määriä. Kun materiaalien kulumismäärät ovat selvät, voidaan saatua tietoa jatkojalostaa. Kun materiaalin kuluminen ja kuljetuksien eräkoot ovat tiedossa, saadaan selville kuljetuskertojen määrä. Se riippuu materiaalin kriittisyydestä ja materiaalin fyysisestä koosta. Tuotteen muoviset rakenneosat ovat suuria ja vievät paljon tilaa, joten niitä joudutaan kuljettamaan useammin, kuin pienempiä komponentteja. Kuvassa 2 on esimerkki BOMista.

Single pane Window 500mm x 500mm						
BoM level	Part #	Description	Qty	Units	Unit Cost	Cost
1	756	Window framing	1	4	\$3.00	\$12.00
1	95	Brackets	1	4	\$0.75	\$3.00
1	PR5045	Rubber seal	2	metre	\$0.50	\$1.00
2	342	Glass pane	1	1	\$9.50	\$9.50
2	LB8579	Safety label	1	1	\$0.10	\$0.10
3	GH098	Hinges	2	1	\$2.25	\$4.50
3	G5664	Screws	8	10	\$4.95	\$3.96
3	587	Latch	1	1	\$2.20	\$2.20
3	588	Latch hook	1	1	\$0.88	\$0.88
4	G5660	Screws for latch and hook	6	10	\$4.95	\$2.97
5	812	Protective wrap	1.5	metre	\$0.65	\$0.98
6	XYZ123	Cardboard box 600mm x 600mm	1	1	\$1.00	\$1.00
6	LB7487	Box label barcode	1	1	\$0.10	\$0.10
Total number parts			27.5		Total costs	\$42.19

Kuva 2. BOM, joka on rakennettu Excelissä. Tämä BOM on haettu verkosta ja se on esimerkki BOM-rakenteesta. [8]

Kirjastossa on myös listattuna, miten komponentit saapuvat tehtaalle. Osat voivat saapua pahvi- tai muovilaatikoissa, mikä vaikuttaa materiaalin kuljetusmenetelmään. Kun tämä tieto on kirjastossa, nähdään kuljetusmenetelmien käyttöaste. Jos kaikki materiaalit tulisivat pahvilaatikoissa, suurin rasitusaste tulee kuormalavojen kuljettamiseen.

3.2 Mobiilirobotti

Mobiilirobotti on laite, joka on rakennettu toimimaan itsenäisesti. Mobiilirobotit on tehty auttamaan tai jopa suorittamaan tehtäviä ihmisten puolesta. Ne voivat myös suorittaa tehtäviä, jotka olisivat ihmisille hengenvaarallisia tai muuten mahdollomia toteuttaa. Ne toimivat etäisyysensoreiden, paikannustekniikan ja tekoälyn avulla. Mobiilirobottien käyttö on kasvanut todella paljon viime vuosina.

Mobiilirobotteja on käytössä monenlaisissa tehtävissä. Ne voidaan jakaa ympäristönsä mukaan eri kategorioihin. Esimerkkejä erilaisista mobiilirobottityypeistä on:

- Ilmassa olevat robotit, eli miehittämättömät ilmakulkuneuvot (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*) tai toiselta nimeltä Dronet. Eräs UAV on esitelty kuvassa 3.

- Maa tai kotirobotit, eli miehittämättömät maakulkuneuvot (*Unmanned Guided Vehicle*, UGV), jotka navigoivat maalla tai talon sisällä.
- Vedessä kulkevat robotit eli itsenäiset vedenalaiset kulkuneuvot (*Automated Underwater Vehicle* AUV), jotka liikkuvat itsenäisesti vedessä.
- Kuljetusmobiilirobotit, joiden tehtävä on kuljettaa materiaalia työympäristössä.



Kuva 3. Yhdysvaltojen tiedustelu robotti, UAV

Mobiilirobotit voidaan jakaa kahteen osaan itsenäiset ja ohjatut robotit. Itsenäinen mobiilirobotti eli AMR (*Autonomous Mobile Robot*) on robotti, joka pystyy itsenäisesti suorittamaan tehtävän. Se ei tarvitse ulkopuolisia signaaleja toimiakseen, kun taas ohjattu mobiilirobotti eli AGV (*Autonomous Guided Vehicle*) tarvitsee ympäristöstään signaaleja toimiakseen. Näitä signaaleja voi olla esimerkiksi merkityt ajoradat. [9]

Jokaisella mobiilirobotilla on tiettytyyppiset ominaisuudet. Nämä ominaisuudet on tehty siten, että ne voivat toteuttaa niiltä pyydettyt tehtävät. Tuotannossa käytettäville mobiiliroboteille on muodostunut ydinominaisuusperhe, joka löytyy melkein jokaisesta tuotantoon valmistetusta AMR:stä. Näitä ominaisuuksia ovat

- Langaton kommunikaatio
- Integroitu turvallisuus
- Kuljetuskaluston seuranta
- Yrityksen hallintajärjestelmään integrointi

Projektissa on käytössä kahdentyyppisiä AMR:iä, jotka soveltuvat erilaisiin tehtäviin. Näiden tehtävät valitaan niiden soveltuvuuden mukaan. Tehtävän valintaan vaikuttaa kuljetusmenetelmä, tehokkuus sekä varastointimenetelmä. Sopivan AMR:n valitseminen tehdään vertailemalla niiden vahvuusalueita sekä niiden teknillisiä määrittelyitä.

3.2.1 Agilox ONE

Agilox ONE on autonominen mobiilirobotti, joka on rakennettu erityisesti kuormalavojen kuljettamiseen. Tämän AMR:n kilpailuetu on se, että se pystyy nostamaan raskaita kuormalavoja. ABB:llä Agilox ONE on varustettu tuplasaksinostimella. Sen ansiosta se pystyy kuljettamaan samoja kuormalavoja, jotka ovat jo käytössä tehtaalla. Tämä tarkoittaa säästöä ajassa, koska Agilox ONE varten ei tarvitse luoda uusia kuljetusratkaisuja. [10] Taulukossa 1 on kerrottu AMR:n tarkemmat spesifikaatiot.

Mitat (PxLxK)	1,511x810x1,862 mm
Omamassa	400 kg
Maksimi nostopaino	1000 kg
Maksimi nostokorkeus	620 mm
Nopeus	1,4 m/s
Käyttöaika	12 h

Taulukko 1. ONE tupla saksinostin mallin spesifikaatiot. [11]

Agilox Onessa on tehokkaat sensorit, joiden avulla se pystyy kulkemaan ihmisten joukossa. Siinä on pohjarakenteessa laser-sensorit, joiden avulla se tarkkailee etäisyyttä kuljetettavaan kuormaan sekä ympäristöön. Todellisessa kokeilussa on huomattu, että laser-järjestelmä on turhan herkkä. Pöly ja muut roskat voivat laskeutua sensorin pinnalle ja Agilox One jää jumiin. Agilox Oneen on kohdeyrityksessä ostettu lisävarusteena kolmeulotteinen LiDAR-sensori (Light Detection and Ranging), jonka avulla se pystyy havaitsemaan trukkeja ja muita nopeammin liikkuvia kohteita, joita kaksiulotteinen laserjärjestelmä ei pysty havaitsemaan. Kuvassa 4 on esitelty Agilox One.



Kuva 4. Agilox One mobiilirobotti.

3.2.2 Agilox Box Carrier

Agilox Box Carrier-työkalu mahdollistaa laatikoiden helponkuljettamisen Agilox ONE avulla. Box Carrier eli lyhyesti BCO on lisävaruste, jonka pohja muistuttaa trukkilavaa. Tämän ansiosta Agilox ONE voi nostaa työkalun ilman rakenteellisia muutoksia. BCO:ssa on neljä paikkaa laatikoille ja laatikot voidaan ladata BCO:hon läpivirtaushyllyn avulla. BCO:ssa on moottorisoidut rullaradat, joiden avulla laatikot voidaan työntää läpivirtaushyllyyn tai kuljetinhihnalle.

3.2.3 Omron LD250

Omron LD250 on AMR, joka on erityisesti luotu korvaamaan kuljetushihnoja. Omronin kilpailuetuna on pitkä kokemus mobiilirobottien valmistuksesta, minkä ansiosta he takaavat helpon käyttöönottamisen sekä laadukkaan joukko-ohjauksen. LD250-mallin AMR kuljettaa materiaalia ajamalla kuljetus komponentin, esimerkiksi hyllyn alapuolella. Tässä etuna on se, että hyllykkö voidaan räätälöidä tapauskohtaiseksi ja LD250 pystyy kuljettamaan kantokykyään raskaampia yhdistelmiä, jos yhdistelmässä on omat renkaat. [12] Tarkemmat spesifikaatiot löytyvät taulukosta 2.

Mitat (PxLxK)	969x720x380 mm
Omamassa	148 kg
Maksimi nostopaino	250 kg
Maksimi nostokorkeus	380 mm
Nopeus	1,2 mm/s
Käyttöaika	13 h
IP-luokitus	IP20

Taulukko 2. Omron LD250 spesifikaatiot. [12]

Omronissa on sivulaserit, joiden avulla se pystyy hahmottamaan ympäristöä. Siinä on näiden lisäksi edessä lasersensorit, jotka tulevat vakiovarusteena. Omron suunnistaa näiden lasersensoreiden ja GPS-signaalin avulla. LD250:n ympäristön hahmottamiskyky jää huonommaksi kuin Agilox Onessa, mutta se ei välttämättä vaikuta tehdasolosuhteissa huomattavasti sen suorituskykyyn. Kuvassa 5 on esitelty Omron LD 250.



Kuva 5. Omron LD 250 mobiilirobotti.

3.2.4 Omron kuljetushylly

Omronin kuljetushylly on rakennettu tapauskohtaisesti ABB:tä varten. Kuljetushyllyssä on kolme kerrosta, joista jokaiseen voi laittaa kolme keskisuuruista muovilaatikkoa, eli sen täysikuljetuskapasiteetti on yhdeksän muovilaatikkoa. Kuljetushyllyssä on jalat, joiden alla on renkaat. Tämä mahdollistaa sen, että LD250 voi ajaa hyllykön alle ja kuljettaa sitä. Kuljetushyllyn jalat mahdollistavat hyllykön käyttämisen välivarastona.

3.3 Kuljetusvälineet

Materiaalin kuljettaminen on jokaisessa prosessissa yksi pääkohdista. Optimoimalla kuljettamista voidaan säästää ajassa ja työnäärässä. Tehotonkuljettaminen voi nostaa kuluja, koska pahimmassa tapauksessa siitä voi tulla tuotannon pulonkaula. Kuljettamisessa on tärkeää löytää tehtävään soveltuva kuljetusväline, kuljetuskerrat ja kuljetusmuoto.

Kuljetusvälineen tehokkuus saadaan selville laskemalla täyttöaste. Kuljetusvälineitä tässä työssä on neljä: FIN-lava, EUR-lava, kuljetushylly ja BCO. FIN- ja EUR-Lavat ovat puurakenteisia ja niitä voi kuljettaa kaikilla piikkivarusteisilla trukeilla. Nyrkkisääntönä on pakata vain kolme laatikkoa päällekkäin, jolloin niiden kuljetuskapasiteetti on kolme kertaa ensimmäisen kerroksen kapasiteetti. Omron Kuljetushylly pystyy kuljettamaan myös kolmessa kerroksessa. Kerrosten välinen etäisyys on 100-500mm, mikä tarkoittaa, että kuljetuskapasiteetti on ensimmäisen

kerroksen kapasiteetti kertaan kolme, kunhan korkeus jää alle tämän 100-500mm. BCO:n kuljetuskapasiteetti on neljä kertaa (600x400x400) mm², koska se muodostuu neljästä laatikkopaikasta. BCO on näistä selvästi rajatuin, koska siinä kuljetuskorkeus rajoittaa todella paljon käytettävää kuljetuskapasiteettiä.

Täyttöaste saadaan laskemalla käytössä oleva pinta-ala ja jakamalla se muovilaatikoiden viemällä pinta-alalla. Näin pystymme selvittämään jokaiselle kuljetusvälineelle tehokkuuden. Kuljettamiseen on käytössä kolme eri standardisoitua muovilaatikko tyyppiä. Laatikot on jaoteltu niiden tilavuuden mukaan, 52 L, 32 L ja 13 L. Näiden mitat ovat 600x400x300, 600x400x180, ja 400x300x170. Laatikot vaihtelevat sen mukaan mikä materiaali niissä on. Pienemmät komponentit menevät pienempiin muovilaatikoihin. kun taas suuremmat komponentit menevät isompiin muovilaatikoihin. Kuljetustehokkuuden selvittämiseksi lasketaan kuinka paljon nämä laatikot vievät tilaa kuljetusvälineessä ja kuinka paljon tilaa jää käyttämättä. Käyttämättömän tilan suhteellinen osuus voidaan laskea Kaavan 1 avulla.

$$(1) \quad \frac{((P_l \bmod P_m) \times L_l + (L_l \bmod L_m) \times P_l) - ((P_l \bmod P_m) \times (L_l \bmod L_m))}{P_l \times L_l} = K$$

Käyttämätön tila K saadaan selville, kun lasketaan kuinka paljon tilaa jää käyttämättä Y- ja X-akseleilla, joka jaetaan käytettävällä pinta-alalla. Kaavassa 1 P kuvastaa pituutta ja L leveyttä. x_L kuvastaa lavaa ja x_M muovilaatikkoa. Tässä yhtälössä voidaan hyödyntää lattiafunktiota, jonka avulla saadaan selville pinta-alan, johon ei mahdu enää täysinäistä lavaa. Lattiafunktio on esitelty Kaavassa 2.

$$(2) \quad (Y \bmod X) = y - \left\lfloor \frac{y}{x} \right\rfloor \times x$$

Seuraavaksi ratkaistaan pituussuunnassa, kuinka paljon lavalle jää tyhjää tilaa, kun laatikot on aseteltu siihen. Näissä laskuissa on käytetty 52 L muovilaatikon mittoja,

koska sillä saadaan suurin kuljetustilavuus. Käyttämätön tila pituussuunnassa on selvitetty Kaavassa 3.

$$(3) \quad (P_l \bmod P_m) \times L_l = \left(1200 - \left\lfloor \frac{1200}{600} \right\rfloor \times 600\right) \times 1000 = 0$$

Samalla yhtälöllä voidaan myös ratkaista käyttämätöntä tilaa leveysuunnassa, joka on esitetty Kaavassa 4.

$$(4) \quad (L_l \bmod L_m) \times P_l = \left(1000 - \left\lfloor \frac{1000}{400} \right\rfloor \times 400\right) \times 1200 = 240000$$

Lopuksi voidaan ratkaista, kuinka paljon lavan pinta-alasta jää käyttämättä ja kun tämä jaetaan kokonaispinta-alalla, saadaan lavan täytön tehokkuus selville. Tämä on esitetty Kaavassa 5. Kaavassa 6 on laskettu, montako prosenttia lavan käytettävästä pinta-alasta saadaan täytettyä.

$$(5) \quad \frac{(0+240000)-(0 \times 200)}{1200 \times 1000} = 0.2$$

$$(6) \quad 1 - 0.2 = 80\%$$

Tehokkuus oli tässä tilanteessa 80 %. Laskentamenetelmää voidaan hyödyntää jokaisen kuljetusvälineen kohdalla, jolloin saadaan kaikille tehokkuusarvon, jonka avulla voidaan valita tehokkain kuljetusväline. Taulukossa 3 on lajiteltu kaikkien kuljetusvälineiden tehokkuus. Taulukossa on lueteltu kuljetusvälineen kuljetuspinta-ala, kuinka suuri osuus tästä saadaan täytettyä laatikoilla, laatikoiden kpl määrä per kerros, tehokkuus ja yhteensä mahtuvien laatikoiden määrä.

Taulukko 3. Kuljetuskaluston tehokkuuksia.

Kuljetusmenetelmä	Pinta-ala m ²	Laatikkoa m ²	laatikko kpl	Tehokkuus	kpl laatikkoa
FIN-Lava	1,20	1,20 tai 0,96	5 tai 4	100 % tai 80 %	15
EUR-Lava	0,96	0,96 tai 0,77	4 tai 3	100 % tai 80 %	12
Omron kuljetushylly	3,06	2,16	9	71 %	9
AGILOX BCO	0,96	0,96	4	100 %	4

Taulukosta 3 näkee, että FIN-lavalla pystyy kuljettamaan suurimman määrän laatikoita kerralla. Tämä johtuu siitä, että pohjakerrokseen mahtuu viisi laatikkoa ja tämän päälle kaksi lisäkerrosta. Joustavin kuljetusväline on Omron kuljetushylly, koska sen käyttö mahdollistaa eri materiaalien kuljettamisen samanaikaisesti. Sen sijaan kuormalavoilta materiaali pitää tyhjätä ylhäältä alaspäin, jolloin on vaikea rakentaa monen erilaisen materiaalin yhdistelmiä. Omron kuljetushylly vie myös vähemmän tilaa leveyssuunnassa verrattuna FIN-Lavaan, mutta pinta-alan tehokkuudessa Omron kuljetushylly on viimeisenä. AGILOX BCO on selvästi näistä huonoin kuljetusmenetelmä, koska se kuljettaa muita menetelmiä vähemmän laatikoita.

3.4 Materiaalin kuljettaminen

Prosessissa on työvaiheita, jotka voidaan suunnata logistiikkaan tai tuotantoon suoritettavaksi. Tärkeintä on löytää oikea suoristushetki sekä paikka. Ongelmana on esimerkiksi materiaalin käsittely. Kannattaako se tehdä logistiikassa ja lähettää tuotantoon valmis paketti vai viedä materiaalit sellaisenaan kuin ne saapuvat ja tehdä materiaalinhallinta tuotannossa. Tämä on erityisesti tässä työssä ongelmana, koska tuotannossa ei ole tarpeeksi säilytystilaa materiaaleille. Materiaaleja on enemmän kuin säilytystilaa tuotantopisteen luona. Tämä tarkoittaa joko suurempia kuljetusmääriä tuotannon ja logistiikan välillä tai tarkempaa materiaalin hallintaa logistiikan puolelta.

Materiaalia voidaan kuljettaa tuotantoon keräilymenetelmällä tai tuomalla kokonainen kuormalava yhtä materiaalia. Ensimmäinen ongelma on se, että materiaaleja yhtä kytkintyyppiä varten on enemmän kuin tilaa asetella trukkilavoja. Tämä tarkoittaa sitä, että tuotantotilaan pitää tuoda kuormalavallinen materiaalia ja trukkilava palauttaa takaisin varastoon, että saadaan seuraavalle lavalle tilaa. Jos erien suuruudet ovat pieniä, se aiheuttaa todella paljon edestakaista kuljettamista. Keräilymenetelmällä voidaan tehdä tarkempia materiaalityypityksiä. Yhdelle keräilykärylle voidaan asettaa yhdeksän erilaista materiaalia, mikä säästää tilaa, koska kaikki materiaalit kytkintä varten saadaan mahdutettua samanaikaisesti

tuotantoon. Keräilyn negatiivisetpuolet syntyvät isoissa tuotantoerissä, koska silloin on tehokkaampaa tuoda yhtä materiaalia suurempi määrä kerralla.

Seuraavaksi verrataan kuljetusstrategiaa tuotantoerän kokoon nähden. Tässä työssä tehokkuuden mittarina on kuljetuksien määrä, kuljettu etäisyys, ihmisen tekemä työ ja AMR:n tekemä työ. Ihmiselle on arvioitu laatikon keräilyajaksi 40 s/laatikko; tällä voidaan määrittää, kauanko ihmisellä kuluisi aikaa keräilyyn. AMR:n tekemä työ on laskettu jakamalla kuljettuetäisyys AMR:n keskinopeudella, jolloin saadaan selville, kuinka kauan AMR:llä menisi kuljettaa materiaalit. Tuotantokoot on jaettu 500–6000 kappaleen eriin. Tässä lasketaan, kuinka monta kertaa materiaalia pitää kuljettaa tuotantoon ja sieltä takaisin varastoon. Tuote koostuu 14:ta eri materiaalista, joten tämä tarkoittaa sitä, että tuotantoon pitää tuoda 14 eri materiaalia. Nämä 14 materiaalia tulevat erikokoisissa erissä, joten erän suuruus vaikuttaa myös kuljetuskertoihin. Esimerkiksi isommissa tuotantoerissä materiaali voi loppua, joten sitä tuodaan lisää, mikä lisää kuljetuskertoja. Kuljetuskertoihin vaikuttaa myös tuotteen vaihtokerrat. Eli jos tuotteita ajetaan kahdeksan tuntia, voidaan tietyllä tahtiajalla ja eräkoolla ajaa tietty määrä erilaisia tuotteita. Kun tuotetta vaihdetaan, aiheuttaa se kuljettamista. Kuljetuskerrat saadaan selville Kaavalla 7.

$$(7) \quad N = 2 \times M_k \times T_v$$

Kaavassa 7 N on kuljetuskertojen määrä tuotantoerän aikana, M_k on kytkemisessä käytetyn komponentin lukumäärä ja T_v on tuotteen vaihtamisen kerrat

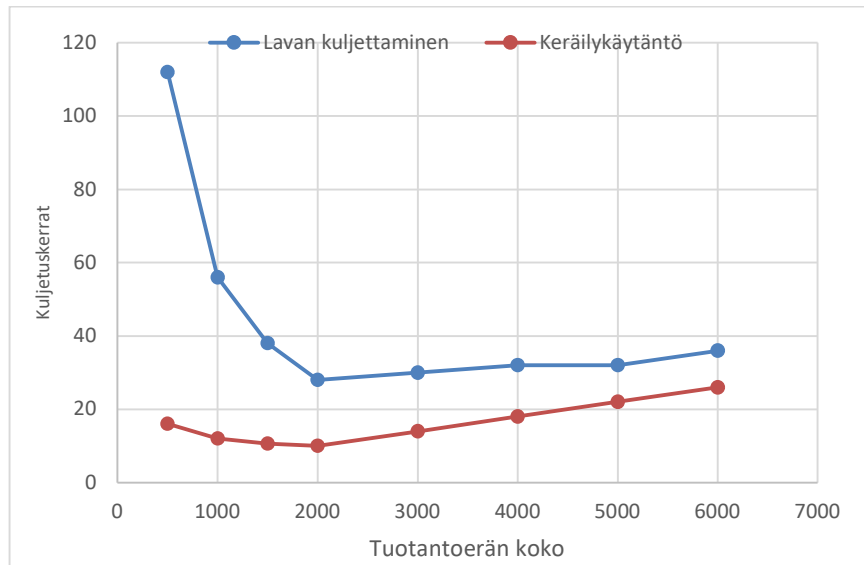
Kuljetun etäisyyden saa selville siten, että kertoo kuljetuskerrat AMR:n kulkemalla etäisyydellä. Kun käytetään keräilymenetelmää, ei voida hyödyntää samaa yhtälöä kuin kuormalavojen kuljetuserroille, koska Omron-kuljetushyllyllä voidaan kuljettaa yhdeksää eri materiaalia kerralla. Tässä tilanteessa se tarkoittaa sitä, että kuljetushyllyjä tarvitaan yhdeksän kertaa vähemmän, koska yhdellä kuljetushyllyllä voidaan viedä yhdeksän erilaista materiaalia ja kuormalavan tilanteessa tarvittaisiin yhdeksän kuormalavaa. Tämä ei toisaalta tarkoita sitä, että ne riittäisivät

esimerkiksi 500 kpl erään. Joten kuljetuskerrat kuljetushyllyllä pitää laskea siten, että kuinka monta laatikkoa tarvitaan koko tuote-erän valmistamiseen. Kun laatikoiden määrä on tiedossa, voidaan laskea, kuinka monta yhdeksän paikan kuljetushyllyä tarvitaan kuljettamaan ne tuotantoon. Näitä tietoja hyödyntämällä voidaan selvittää kuljetusmenetelmien soveltuvuus tuotantoerään nähden. Taulukossa 4 on vertailtu kuljetusmenetelmien tehokkuuden mittareita linjalla yksi. Kuljetuskertojen lukumäärä tuotantoerän koon funktiona eri kuljetustavoilla on esitetty Kuvaajassa 1. Taulukossa on vertailtu tuotantolinjan yksi tuotantoerän suuruuden vaikutusta kuljetuskertoihin, matkaan, ihmisen ja AMR työaikoihin ja siihen, kuinka monta tuotevaihtoa on mahdollista tehdä kahdeksan tunnin aikana.

Taulukko 4. Linjan 1 simuloitut ajot

Lavan kuljettaminen					
Tuotantoerän koko	kuljetuskerrat x	Matka m	ihmisen työ	AMR työ h	8hTuote vaihto
500	112	13664	0	5,4	4
1000	56	6832	0	2,7	2
1500	38	4636	0	1,8	1,33
2000	28	3416	0	1,4	1
3000	30	3660	0	1,5	1
4000	32	3904	0	1,5	1
5000	32	3904	0	1,5	1
6000	36	4392	0	1,7	1

Keräilykäytäntö					
Tuotantoerän koko	kuljetuskerrat x	Matka m	ihmisen työ h	AMR työ h	8h Tuote vaihto
500	16	1952	0,8	0,9	4
1000	12	1464	0,6	0,7	2
1500	11	1298	0,5	0,6	1,33
2000	10	1220	0,5	0,6	1
3000	14	1708	0,7	0,8	1
4000	18	2196	0,9	1,0	1
5000	22	2684	1,1	1,2	1
6000	26	3172	1,3	1,5	1



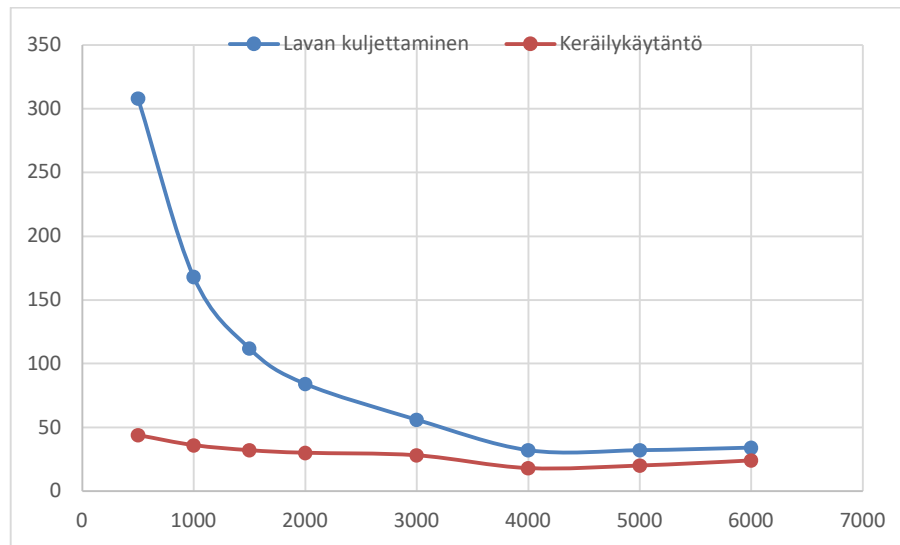
Kuvaaja 1. Kuljetuskertojen vertailu tuotantoerän kokoon.

Kuvaajassa on verrattu kuormalavan ja kuljetushyllyn toimintaa tuotantolinjalla yksi. Kuormalava on sinen käyrä ja kuljetushylly on punainen käyrä. Y-akselilla on kuljetuskerrat tuotantopisteen ja päävaraston välillä. X-akselilla on tuotantoerän suuruus. Taulukossa on vertailtu kuljetusmenetelmien tehokkuuden mittareita linjalla kaksi. Se eroaa linjasta yksi siten, että sillä on huomattavasti nopeampi tahtiaika. Kuljetuskertojen lukumäärä tuotantoerän koon funktiona eri kuljetustavoilla on esitetty Kuvaajassa 2.

Taulukko 5. Linjan 2 simuloitut ajot

Lavan kuljettaminen					
Tuotantoerän koko	kuljetuskerrat x	Matka m	ihmisen työ	AMR työ h	8h Tuote vaihto
500	308	49896	0	19,8	11
1000	168	27216	0	10,8	6
1500	112	18144	0	7,2	4,00
2000	84	13608	0	5,4	3
3000	56	9072	0	3,6	2
4000	32	5184	0	2,1	1
5000	32	5184	0	2,1	1
6000	34	5508	0	2,2	1

Keräilykäytäntö						
Tuotantoerän koko	kuljetuskerrat x	Matka m	ihmisen työ h	AMR työ h	8h Tuote vaihto	
500	44	7128	2,2	3,3	11	
1000	36	5832	1,8	2,7	6	
1500	32	5184	1,6	2,4	4,00	
2000	30	4860	1,5	2,3	3	
3000	28	4536	1,4	2,1	2	
4000	18	2916	0,9	1,4	1	
5000	20	3240	1,0	1,5	1	
6000	24	3888	1,2	1,8	1	



Kuvaaja 2. Kuljetuskertojen vertailu tuotantoerän kokoon.

Kuvaajassa on verrattu kuormalavan ja kuljetushyllyn toimintaa tuotantolinjalla kaksi. Kuormalava on sinen käyrä ja kuljetushylly on punainen käyrä. Y-akselilla on kuljetuskerrat tuotantopisteen ja päävaraston välillä. X-akselilla on tuotantoerän suuruus.

Taulukosta 5 pystyy havaitsemaan, että kokonaisten kuormalavojen kuljettaminen on tehotonta, kun tuotantoerien koko on pieni. Kun tuotantoerien koot kasvavat, lähestyy kuormalavojen tehokkuus keräilyn tehokkuutta. Keräily on pienemmällä

tuotantoerillä tehokkaampi, koska kaikkia materiaaleja ei tarvitse kuljettaa yksitellen, vaan niistä voidaan luoda kokonaisuuksia, jotka kuljetetaan yhdessä. Esimerkiksi 500 kpl tuotetta varten tarvitaan vain 16 laatikkoa, jotka mahtuvat kahdelle karrylle. Tämä on silloin vain neljä kuljetusta per tuotemalli. Kuormalavoilla se tarkoittaisi kaikkien tuotteeseen vaadittavien materiaalien kuljettamista, mikä tuo huomattavan määrän edestakaista ajoa. Suurin pullonkaula tuotantopaikalla on tilan puute. Jos tilaa olisi tuotannossa säilyttää kaikkia materiaaleja samanaikaisesti, olisi kuormalavojen käyttö tehokkainta.

3.5 Tehtaan layout

Layout on tehtaassa sijaitsevien laitteiden, varastojen, tuotantotilojen, kulkureitien ja muiden tuotannossa käytettävien komponenttien fyysisen sijoittelun kokonaisuus. Tehtaan layoutilla on suuri vaikutus tehokkuuteen ja viansietokykyyn. Kun asetelma tehdään tehottomasti, voi se tuhlaata tilaa, aikaa ja resursseja. Tehtaan asetelman suunnittelu on vaikeutunut, koska tuotantomenetelmät kehittyvät monimutkaisemmiksi. Tästä syystä tehtaan asetelmaa ei voida luoda perinteisesti yhdellä kerralla valmiiksi. Nykypäivänä se tarvitsee jatkuvaa kehitystä ja uudelleenmuotoilua. [13]

Hyvä layout on tärkeä tuotannon toimivuuden kannalta. Tämän vuoksi on tärkeää määritellä, mikä on hyvä layout. Hyvällä tuotannon layoutilla on seuraavia piirteitä:

- se on turvallinen työntekijöille
- materiaalivirtojen pitää olla tehokkaita ja selvästi rakennettuja
- minimoi tuotteen läpäisyajan
- minimoi työntekijöiden turhan liikkumisen
- yksinkertainen kommunikaatio tehtaan sisällä
- keskitetty valmistus

Nämä hyvän layoutin piirteet ovat käytössä yleisesti tuotantoalalla. Haastavinta on suunnitella layout, jossa kaikki nämä toteutuisivat, ja usein joudutaan tekemään kompromisseja. [14]

Tässä työssä tuotteet valmistetaan tuotantolinjoilla. Näitä tuotantolinjoja on kaksi, joissa rakennetaan kahden tuoteperheen tuotteita. Tuotantolinjojen tahtiajat voidaan määrittää Kaavalla 8.

$$(8) \quad \textit{Tahtiaika} = \frac{\textit{Aika}}{\textit{Haluttu tuotanto}}$$

Linjalla kaksi on kolme kertaa nopeampi tahtiaika kuin linjalla yksi. Tämä luo ongelmia materiaalivirtausta suunniteltaessa, koska tuotantolinjat on sijoitettu kahden käytävän rinnalle, mutta linjalle, jolla on nopeampitahtiaika, on pidempi etäisyys varastosta kuin hitaammalle. Nopeamman linjan käytävä on myös kapeampi, joten mobiilirobottien liikenoisuus on rajoitetumpaa siellä. Tämä pitää ottaa huomioon materiaalivirtausta suunniteltaessa.

3.6 Varastointipaikat

Varastointipaikan tehtävä on säilyttää materiaalia, kunnes sitä tarvitaan. Varastointipaikan pitää olla selkeä ja hyvin määritelty. Varastopaikkoja on usein tuotannossa yksi isompi päävarasto ja tuotantopisteiden ympäristössä välivarastoja. Näin voidaan varmistaa tuotannossa tarvittavan materiaalmäärän jatkuva säilyminen ja vähentää kuljetuskertoja päävarastosta tuotantoon. Tärkeintä on löytää kuljetuskerroille ja tuotannon välivarastolle sopiva suhde, että tuotanto toimii tehokkaasti.

Kohdeyrityksessä on käytössä materiaalin säilyttämistä varten kaksi kerrosta. Kerrokset on yhdistetty kuormalavahissillä, joka toimii automaattisesti. Kuljettaja voi ajaa kuormalavan kuljetushihnalle, joka siirtää kuormalavan hissiin, ja kun hissi on valmis, se siirtää lavan toiseen kerrokseen. Kuormalavat varastoidaan päävarastossa kuormalavahyllyjen avulla. Tuotannon puolella kuormalavojen säilytykseen hyödynnetään hyllyjä tai lattipaikkoja. Yrityksessä on myös läpivirtaushyllyjä.

Nämä hyllyt voidaan täyttää takaapäin ja materiaali ottaa ulos edestä, mikä on muovilaatikoita siirreltäessä erittäin hyödyllinen. Mutta Agilox Onen BCO:ta ei voida hyödyntää näiden läpivirtaushyllyjen kanssa, koska niistä puuttuu mootto-roitu rullarata.

Uutta varastointipaikkaa luodessa pitää tietää, että se soveltuu käytettäväksi jo käytössä olevien varastointimenetelmien kanssa. Muuten käytössä olevaa varastointimenetelmää pitää muokata siten, että se soveltuu käytettäväksi uuden kanssa. Tässä työssä on kolme mahdollista varastointimenetelmää tuotantopisteen varastopaikan rakentamiseksi. Varastopaikan säilytysmenetelmä voi olla läpivirtaushylly, keräilyhylly, kuormalava tai näiden yhdistelmä. Läpivirtaushyllyn käyttäminen ei ole tässä työssä mahdollista, koska Agilox One BCO ei ole yhteensopiva nykyisten hyllyjen kanssa. Tästä syystä käytettäväksi varastointimenetelmiksi jää keräilyhylly ja kuormalava. Varastointimenetelmäksi pitää löytää näiden yhdistelmäratkaisu, koska sillä tavalla pystytään hyödyntämään varastointimenetelmien positiiviset ominaisuudet ja minimoimaan negatiiviset. Kuten kuvaajasta (1) huomataan, kuormalavan tehokkuus on parhaimmillaan, kun tuotantoerät ovat suuria. Eli niitä kannattaa käyttää materiaalien kanssa, joita käytetään kaikkien tuotteiden kesken. Tällä strategialla hyödynnetään kuormalavan vahvuutta kuljettaa yhtä materiaalia suuri määrä. Kun käytössä on materiaaleja, joita käytetään vain tietyn tuotteen kanssa, voimme siinä kohtaa käyttää keräilymenetelmää, koska silloin ylimääräistä materiaalia ei tuoda tuotantotilaan.

Yksi välivarastointipaikan kriteereistä on sen työergonomia. Työntekijät joutuvat hakemaan välivarastopaikasta materiaalia tuotantolinjalle. Raskaille materiaaleille on nostotyökalu, jonka avulla työntekijä voi kuljettaa raskaita materiaaleja. Tämä vähentää selän rasitusta ja parantaa työergonomiaa. Tämä toimii erityisen hyvin kuljetushyllyjen kanssa, koska ne on korotettu maanpinnasta, joten henkilön ei tarvitse nostaa kuljetusalustalle lattiatasolta asti materiaalia. Kuormalavoissa on ongelmia ergonomian kanssa, koska kuormalavat ovat lattiatasolla. Kuormalavan

alle voisi laittaa korokkeen, mutta Agilox One ei pysty nostamaan hyllylle materiaalia sen saksinostinrakenteen takia. Tällaisen ongelman voi korjata asentamalla nostinlaitteen, mutta tässä tuotantotilassa sen asentaminen olisi vaikeaa.

Valmiit tuotteet lastataan kuormalavoille tuotantolinjan päässä. Agilox One hakee nämä kuormalavat ja kuljettaa ne varastoon asiakkaalle lähettämistä varten. Nämä kuormalavat tarvitsevat varastointipaikan tuotantolinjan päässä. Kuormalavoja varastoidaan kohdeyrityksessä päävarastossa ja tuodaan tuotantopisteisiin tarvittaessa, mutta tässä tuotantopisteessä on erittäin nopea tahti aika, joten kuormalavoja pitäisi säilyttää lähellä tuotantolinjan loppupäätä. Pakkaamisessa käytettävää pahvia varten on tuotantopisteen molemmilla puolilla kuormalavahyllyt, jossa on jokaiselle tuotteelle pakkausmateriaalia. Tämä helpottaa pakkausmateriaalin hallintaa, koska etäisyydet eivät ole isoja.

4 SIMULOINTI

Tässä luvussa syvennytään digitaaliseen kaksoseen ja Visual Components-simulointiohjelmaan. Idea digitaalisesta kaksosesta sai alkunsa vuonna 1970, kun Apollo 13:sta räjähti happisäiliö 321868 kilometrin päässä Maasta. Nasan Insinöörit saivat pelastettua tilanteen, koska heillä oli digitaalinen kaksonen Apollo 13-avaruusalukselta, jonka avulla he saivat mallinnettua erilaisia ratkaisuja tilanteen korjaamiseksi. Vaikka menetelmä on ollut tiedossa monia vuosikymmeniä, on sen strategiset vahvuudet tulleet ilmi vasta vuonna 2017. Tämä johtuu siitä, että IoT on mahdollistanut digitaalisen kaksosen kustannustehokkaan käytön ja kasvattanut sen käyttökohteita. [15]

4.1 Digitaalisen kaksosen rakentaminen

Digitaalinen kaksonen on digitaalinen malli fyysisestä komponentista. Sen tarkoitus on tarkasti kuvastaa fyysistä kohdetta. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan kerätä dataa fyysisestä kohteesta tai kehittää sitä simuloimalla. Nämä kohteet voivat olla yksittäisiä komponentteja tai kokonaisia prosesseja. Digitaalista kaksosta hyödynnetään paljon suunnittelussa, koska se tietyissä tapauksissa säästää aikaa ja rahaa. Esimerkiksi lentokoneen suunnittelussa on helpompi rakentaa lentokone digitaaliseen muotoon ja tehdä siihen muutoksia simulaatiossa kuin fyysiseen malliin. Varsinkin kun materiaalit ovat kalliita, ei ole kustannustehokasta rakentaa montaa eri versiota fyysisesti, kun versiot voidaan rakentaa digitaalisesti. Digitaalinen kaksonen voi myös toimia fyysisen laitteen rinnalla reaaliajassa, jolloin digitaalinen kaksonen kerää dataa fyysisestä kohteesta ja sen tilaa on helpompi tarkastella digitaalisesta mallista kuin sen fyysisestä vastinparista.

Digitaalista kaksosta rakentaessa on hyvä aloittaa määrittelemällä, mihin sitä hyödynnetään. Jos tavoitteena on tehdä prosessin optimointia, on tärkeää kerätä mahdollisimman paljon dataa prosessista. Tässä työssä tärkeimpänä datana on materiaalinhallintaan liittyvä data, koska sillä on suurin vaikutus materiaalivirtauk-

sen tehokkuuteen. Siihen on myös helpompi vaikuttaa kuin tuotantolinjan tehokkuuteen, koska sitä ei ole kustannustehokasta lähteä muokkaamaan. Digitaalista kaksosta varten tarvitaan myös dataa prosessin ympäristöstä eli siitä, missä prosessi sijaitsee. Tämä tarkoittaa esimerkiksi tehdasrakennuksen muotoa, sähkökaappien sijaintia, valaistusta ja ilmanvaihtoa. Tämä data saadaan mittaamalla itse tai hyödyntämällä mahdollisia cad-piirustuksia rakennuksesta.

Kun tarvittava data on kerätty digitaalista kaksosta varten, voidaan aloittaa sen rakentaminen. Digitaalinen kaksoinen voidaan rakentaa simulointiohjelman sisälle. Rakennusympäristön tärkein ominaisuus on se, että siellä voidaan toteuttaa toivottu datan hallinta. Tässä työssä tärkeintä on vertailla erilaisia materiaalivirtausvaihtoehtoja, joten tässä tapauksessa simulaation pitää tuoda esille paras materiaalivirtaus. Tämä voidaan esittää esimerkiksi visualisoimalla materiaalivirtaus.

4.2 Visual Components

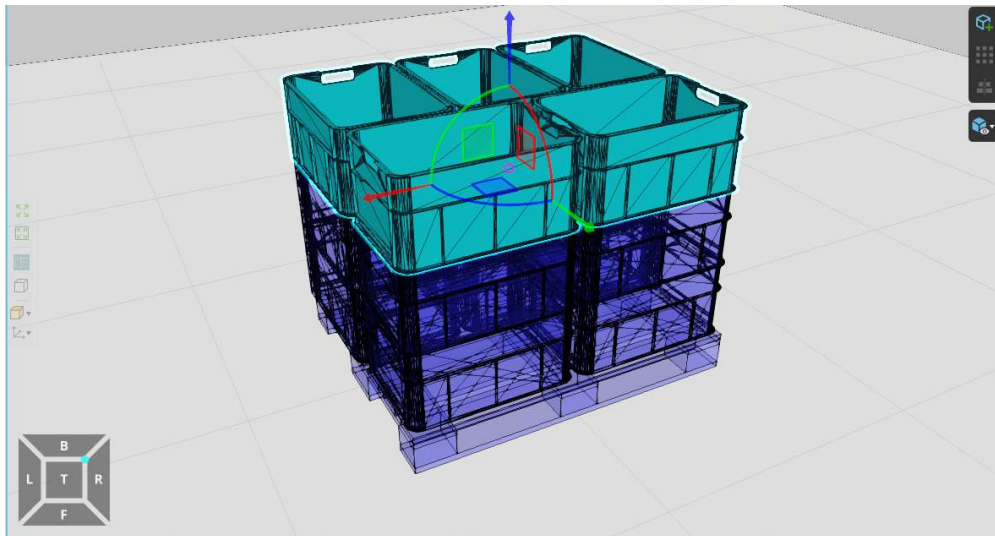
Visual Components on yritys, joka valmistaa ja kehittää 3D simulaatiosovelluksia. Yritys perustettiin vuonna 1990 Helsingissä, Suomessa. Yrityksellä on yli kahdenkymmenen vuoden kokemus tässä segmentissä. Yrityksen simulointiohjelman nimi on myös Visual Components, jolla voidaan luoda ja rakentaa simuloitavia kohteita. Simulaatiota voi ajaa animaationa ja se voi myös kerätä dataa pdf-muotoon. Yrityksellä on suuri valikoima komponentteja, joita voi käyttää simulaatiossa. Komponentteja voi myös luoda itse sovelluksessa tai tuoda ulkopuolelta. Visual Components on valittu tässä työssä työkaluksi, koska kohdeyritys haluaa arvioida sen käytettävyyttä myös tulevilla projekteilla.

Simuloinnin tärkeys kasvaa, koska suunnittelutehtävät vaikeutuvat monimutkaisten toteutuksien ansiosta. Simuloinnilla varmistetaan resurssien tehokaskäyttö ja taataan kilpailuetu markkinoilla. Tuotanto siirtyy myös järjestelmäksi, joka kehittyy nopeammin kuin aikaisemmin, joten simuloinnilla voidaan taata jatkuvan kehityksen toteutuminen.

4.2.1 Komponenttien mallintaminen

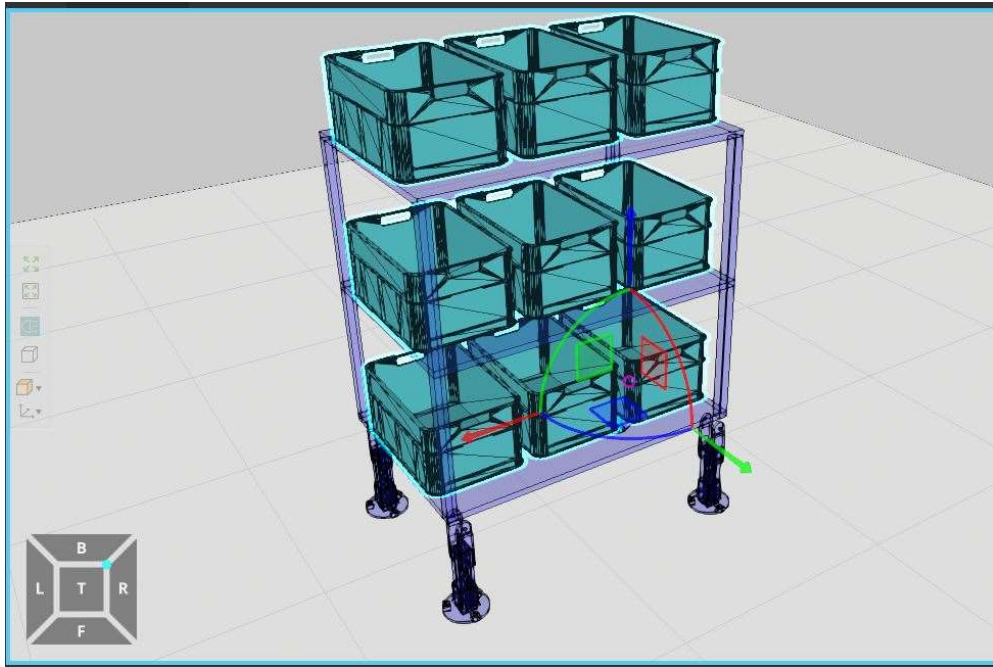
Simulaatiota varten fyysiset komponentit pitää mallintaa digitaalisessa muodossa. Mallintaminen auttaa henkilöä ymmärtämään prosessia ja sen ominaisuuksia. Komponenttia mallintaessa pitää fyysinen data rakentaa digitaalseksi-olemuksi. Tämänlaiseen rakentamiseen on monia työkaluja, esimerkiksi SolidWorks 3D cad ohjelma. Sillä voidaan luoda fyysisistä komponenteista digitaalisia malleja. Visual Components-simulointiohjelmalla voi myös luoda komponentteja, mutta ne eivät ole välttämättä yhtä tarkkoja. Hyvin rakennettu malli vastaa fyysisistä olemusta mahdollisimman tarkasti. Näin vähennetään arvioinnin tarvetta ja tulokset ovat mahdollisimman tarkkoja.

Kuormalavan mallintamisessa käytin Visual Componentsin kuormalavamalli pohjaa ja muovilaatikoita. Laatikoille valitsin työssä käytettävien laatikoiden mitat ja värin. Kuormalavamalleja on kaksi. Toinen näistä vastaa mitoiltaan FIN-lavaa ja toinen EUR-lavaa. Kuormalavalle pitää sijoittaa muovilaatikot samalla tavalla, kuin tehtaassa niitä tullaan käyttämään. Yhtälön (1) avulla voidaan määrittää, kuinka monta muovilaatikkoa mahtuu yhdelle kuormalavalle. Lavalle mahtuu viisi laatikkoa per kerros ja kerroksia on kolme, joten niitä saadaan mahtumaan 15 muovilaatikkoa per FIN-lava. Yhden muovilaatikon tilavuus on 52 l, joten kokonaistilavuus on 780 l kuormalavalla. Kun tämä toteutetaan ohjelmassa, niin se pitää rakentaa tietyissä askelissa, jotta ohjelma osaa myös purkaa tämän halutulla tavalla. Kuvassa 6 näkyy FIN-lavan ja 15 muovilaatikon digitaalinen malli.



Kuva 6. FIN-lava, jonka päällä on 15 kappaletta 600x400x300 52 L laatikkoa.

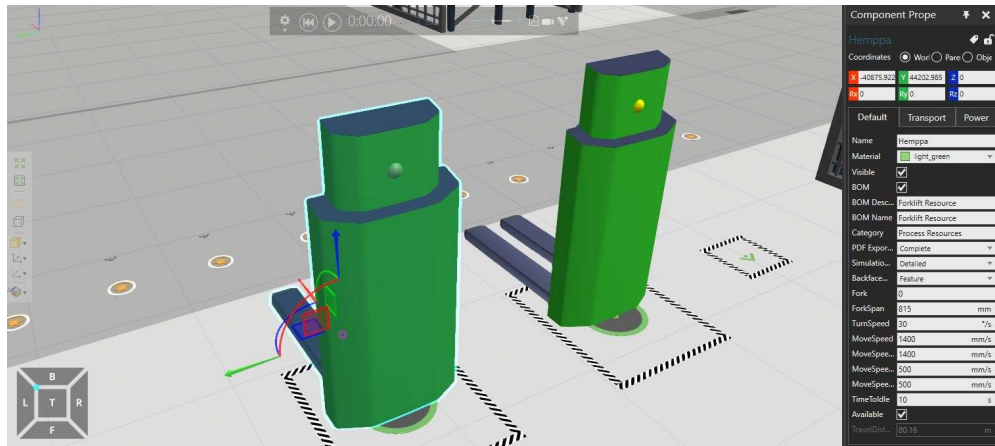
Omronin kuljetushyllyä mallintaessa ei ollut valmista hyllymallia, koska hylly on toteutettu tilaustyönä. Kuljetushylly on rakennettu hyödyntäen erilaisia komponentteja, jotka löytyvät Visual Componentin kirjastoista. Kuljetushylly olisi vastannut tarkemmin todellista hyllyä, jos sen olisi mallintanut CAD-sovelluksessa. Hyllyssä on kolme kerrosta, joihin tulee muovilaatikoita. Muovilaatikoiden määrä saadaan selville hyödyntämällä yhtälöä (1). Muovilaatikoita mahtuu kuljetushyllyyn yhdeksän kappaletta, kun muovilaatikat ovat kooltaan 600x400x300. Vaikka kuljetushylly ei vastaa täydellisesti ulkonäöltään fyysistä mallia, sen kuljetuskapasiteetti ja muut arvot vastaavat, joten se tuottaa oikeita tuloksia simulaatiossa. Kuvassa 7 on esitetty kuljetushyllyn digitaalinen malli.



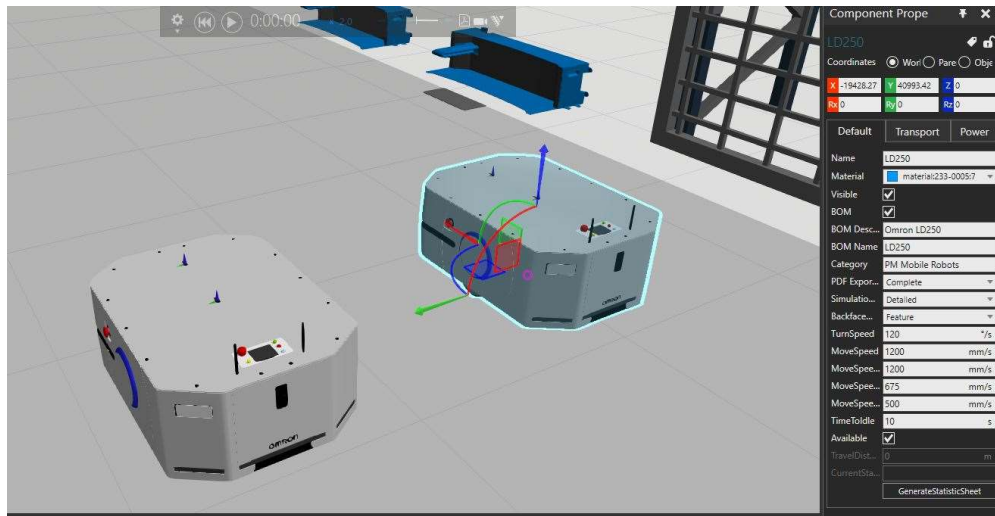
Kuva 7. Omron LD 250 AMR:ää varten rakennetun kuljetushyllyn malli.

Mobiilirobotteja mallintaessa aloitetaan mobiilirobottien ominaisuuksien määrittelystä. Nämä ominaisuudet määritellään siten, että ne vastaavat fyysistä mobiilirobottia. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi kulkemisnopeus, kääntymisnopeus trukkipiikkien pituus ja materiaalin kuljettamisen vaikutus mobiilirobottiin. Näillä määrittelyillä voidaan varmistaa, että mobiilirobottien käyttäytyminen on mahdollisimman lähellä todellisuutta. Visual Components sovelluksessa mobiilirobotille voi myös ohjelmoida oman käyttäytymisen käyttäen Python-ohjelmointikieltä. Käyttäytymisestä voi rakentaa niin monipuolisen ja tarkan kuin pystyy ohjelmoimaan. Visual Componentin kirjastosta löytyy Omron LD 250 AMR, joka on sama AMR kuin kohdeyrityksessä. Voimme tarkistaa simulointiohjelmassa olevat määrittelyt robotille ja verrata niitä LD 250 datalehteen. Vertailusta käy ilmi, että datalehdessä olevat määrittelyt ovat samat kuin simulointiohjelmassa, joten muutoksia määrittelyihin ei tarvitse tehdä. Agilox One-mobiilirobottia ei löydy simulointiohjelman 4.5 versiossa, joten mobiilirobotin ulkoasu on rakennettu simulo-

tiohjelman ulkopuolella. Määrittelyt sille voidaan tehdä simulointiohjelmassa. Agilox Onen ja Omron LD 250 ulkoasu ja määrittelyt on esitetty kuvassa 8 ja kuvassa 9.



Kuva 8. Agilox One AMR:n ulkoasu ja määrittelyt ominaisuudet.



Kuva 9. Omron LD 250 AMR:n ulkoasu ja määrittelyt ominaisuudet.

Mobiiliroboteille luodaan simulaatioon latauspaikat. Nämä latauspaikat mallinnetaan siksi, että saadaan simulaatiossa akuston latausdataa. Simulaatiossa voidaan tarkastella mobiilirobottien varauksen tasoa. Tämä on hyödyllinen tieto, koska varauksentaso vaikuttaa mobiilirobottien käyttöaikaan. Nämä latauspaikat näkyvät

myös kuvassa 8 ja kuvassa 9. Agilox Onen latauspaikka näkyy kuvassa 8 suorakulmiona AMR:n alla. Omronin latauspaikka näkyy kuvassa 9. Se on sininen telakointiasema.

4.2.2 Ympäristön luominen

Ympäristöllä on tärkeä osuus simulaatiossa. Vaikka se ei aina vaikuttaisi suoraan simulaation tulokseen, voi sen olemassaolo vähentää ongelmakohtien muodostumista. Ympäristön osa voi olla esimerkiksi jokin rakennelma, joka ei ole suoraan kytköksissä prosessiin. Mutta tällaisen rakennelman varjo voi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi robottien käyttäytymisessä. Valaistuksella voi olla yllättävänkin suuri vaikutus automaatiassa. Esimerkiksi jos jokin rakennelma aiheuttaa varjon maahan, voi mobiilirobotti luulla sitä esteeksi ja tämän takia se voi pysähtyä. Ympäristö antaa myös ulkonäöllisen kuvan prosessista, millä voi olla vaikutusta siihen, miten asiakkaat voivat arvioida prosessia ja sen laadukkuutta.

Tuotantotilassa seinien tarkoituksena on vähentää roboteista syntyvää meteliä. Ne myös rauhoittavat tuotantotilaa. Seinien paikat vaihtuivat noin kaksi kertaa työn aikana, koska niihin tehtiin viime hetken muutoksia. Seinät on sijoitettu siten, että ne tuovat tuotantotilan sisäpuolelle mahdollisimman paljon tilaa ja jättävät käytävän ja ulkoseinän välille noin 1,2 m. Näin seinän ulkopuolelle mahtuu kuormalava. Tarkoituksena oli alun perin tuoda materiaalit tuotantotilan sisäpuolelle, mutta tuotantotilan sisälle jäävätila on sen verran pieni, että se voi aiheuttaa ongelmia AMR:n kanssa.

Päävarastoon on sijoitettu automaattinen varastointijärjestelmä. Tämä varastointijärjestelmä on luotu käyttäen kuormalavahyllyjä, koska sille ei ole valmista mallia kirjastossa. Automaattinen varastointijärjestelmä ei ole suoraan yhteydessä prosessiin, mutta sen olemassaolo simulaatiossa on silti tärkeää. Sen olemassaolo simulaatiossa helpottaa simulaation katsojaa luomaan paremman kokonaiskuvan

tehtaasta. Sen olemassaolo vaikuttaa myös mobiilirobottien reittivalintoihin simulaatioissa. Automaattista varastointijärjestelmää voidaan mahdollisesti hyödyntää keräilyskenaariossa.

4.2.3 Mobiilirobottien integrointi

Mobiilirobotit eivät voi kuljettaa materiaalia ilman, että ne ovat jollain tavalla yhteydessä materiaalinhallintajärjestelmään. Jos materiaalia liikutetaan informoimatta materiaalinhallintajärjestelmää, materiaalisaldot eivät päivity siellä oikein. Näin ei saa käydä, koska ne aiheuttavat ongelmia varastoinnissa ja tuotannossa. Pahimmillaan yritys menettää rahaa, koska materiaalia menee hukkaan ja sitä joudutaan ostamaan tämän takia lisää. Ettei näitä saldoheittoja syntyisi, pitää mobiilirobotit integroida osaksi materiaalinhallintajärjestelmää.

Mobiilirobotit voidaan integroida materiaalinhallintajärjestelmään siten, että ne ilmoittavat järjestelmälle jokaisen materiaalin erikseen. Näin ei synny tilannetta, jossa materiaalia vietäisiin vahingossa väärää määrää. Mutta tämänlainen järjestelmä on vaikea toteuttaa, koska jonkun pitäisi kerätä jokaisessa muovilaatikossa olevasta materiaalista saldotiedot ja ilmoittaa ne materiaalinhallintajärjestelmälle, kun niitä ollaan siirtämässä. Tämän voisi toteuttaa esimerkiksi siten, että työntekijä lukee QR-skannerilla jokaisen muovilaatikon sisällön ja kirjaa ne siirretyksi. Tämä on erittäin työlästä ja sitoo henkilöitä varsinkin materiaalia keräilyssä.

Toinen vaihtoehto on luoda jokaiselle materiaalille oma yhdistelmätuote. Tämä tarkoittaa sitä, että kun materiaalia siirretään, ilmoitetaan materiaalinhallintajärjestelmälle, että yhdistelmä yksi siirretään a paikasta paikkaan b. Näin järjestelmälle pitää ilmoittaa vain yhden tuotteen siirtäminen, vaikka se sisältäisi kymmenen eri materiaalia. Tämä tarkoittaa sitä, että yhdistelmän pitäisi olla aina saman-

lainen, mutta integroiminen helpottuu. Hallintajärjestelmään luotaisiin yhdistelmätuote, jonka sisälle lisättäisiin muut komponentit. Mobiilirobotti voisi tätä yhdistelmää hakiessaan lukea yhden QR-koodin, jonka avulla se voi ilmaista järjestelmälle siirtävänsä materiaalit.

Kuormalavoilla integrointi on helpompaa, koska Agilox Onet ovat jo käytössä kohdeyrityksessä. Materiaalinhallintajärjestelmä ilmoittaa mobiilirobotille, että materiaalia tarvitaan lisää tuotantopaikalla. Tämän jälkeen Agilox One hakee kuormalavan päävarastosta ja kuljettaa sen tuotantopaikalle. Kun lava on tyhjä työntekijä ilmoittaa sovelluksen avulla mobiilirobotille, että tyhjän kuormalavan voi hakea pois ja viedä sen kuormalavojen säilytyspaikalle. Työntekijän roolin voisi automatisoida käyttämällä konenäköä, joka voisi tarkastella lavaa tuotantopaikan edessä. Kun se huomaa kuormalavan olevan tyhjä, voi se ilmoittaa materiaalinhallintajärjestelmälle, että materiaalit on käytetty. Järjestelmä ohjaa mobiilirobotin hakemaan tyhjän kuormalavan pois. Tätä voisi myös soveltaa keräilykärriksen käytössä.

4.2.4 Layoutin mallintaminen

Layoutin mallintaminen on aloitettu rakentamalla tuotannosta ja päävarastosta pohjapiirustus simulointiohjelmaan. Pohjapiirustukseen lisätään simulaatiossa käytetyt komponentit. Tuotannon simulaatiossa on käytetty vain sitä osuutta pohjapiirustuksessa, jolle luodaan materiaalivirtaus. Tämän alueen mitat on otettu kaksiulotteisesta CAD-layoutpiirustuksesta. Joitakin mittoja on myös otettu käsin, koska ne eivät olleet CAD-piirustuksessa.

Päävarastoa mallintaessa on sinne lisättävä kuormalavojen säilytyspaikat. Kuormalavahyllyt sijaitsevat päävaraston keskiosassa. Päävaraston reunoilla on materiaalin vastaanotto ja lähetys. Tavarantoimitus vastaanotto pitää myös mallintaa, koska sitä käytetään materiaalin läpikulkua simuloimassa. Tavara vastaanotetaan kuormalavasta, joka tyhjennetään käyttäen pinontavaunua. Pinontavaunulla kuormalava-

vat siirretään liukuhihnoille, joilta tehtaan sisäinen logistiikka siirtää ne kuormalavahyllyille. Nämä liukuhihnat toimivat simulaation aloituskohtana, koska se on tehtaan sisäisen materiaalivirran alkamispiste.

Materiaalia kuljetetaan päävarastosta tuotantoon käytävien avulla. Näitä käytäviä mallintaessa ne on mitattava tarkasti, koska niiden avulla simulaatiossa voidaan laskea mobiilirobottien kulkema matka. Käytävät kulkevat tehtaan katon tukitukipylväiden lähellä, joten tukipylväät pitää myös lisätä simulaatioon, jotta mobiilirobottien liikkuminen on reaaliolosuhteiden mukaista. Nämä katon tukipylväät vievät myös tilaa tuotantopisteen luota. Pylväät sijaitsevat linjalla yksi suoraan materiaalin säilytyspaikan kohdalla, joten ne syövät siitä säilytystilaa.

Tuotantotilaa mallintaessa pitää mallintaa tuotantolinjat, välivarastot, työntekijät ja robotit. Tuotantolinjan valmistaja on tehnyt tuotantolinjoista simuloitavan mallin Visual Componentsiin. Malli kuvastaa tuotantolinjojen ulkoasua ja sen toimintaa. Mallia on käytetty tässä simulaatiossa. Tuotantotilan ulkopuolelle mallinetaan välivarastot. Tässä työssä välivarastot eivät ole kiinteitä, joten niitä ei mallineta vielä tässä vaiheessa. Näitä välivarastoja käyttävät työntekijät on mallinettu kahdella henkilöllä, jotka tuovat välivarastosta materiaalia tuotantolinjalle. Kuvassa 10 on esitelty simuloitava layout.



Kuva 10. varaston ja tuotantotilan layout.

4.3 Skenaario 1

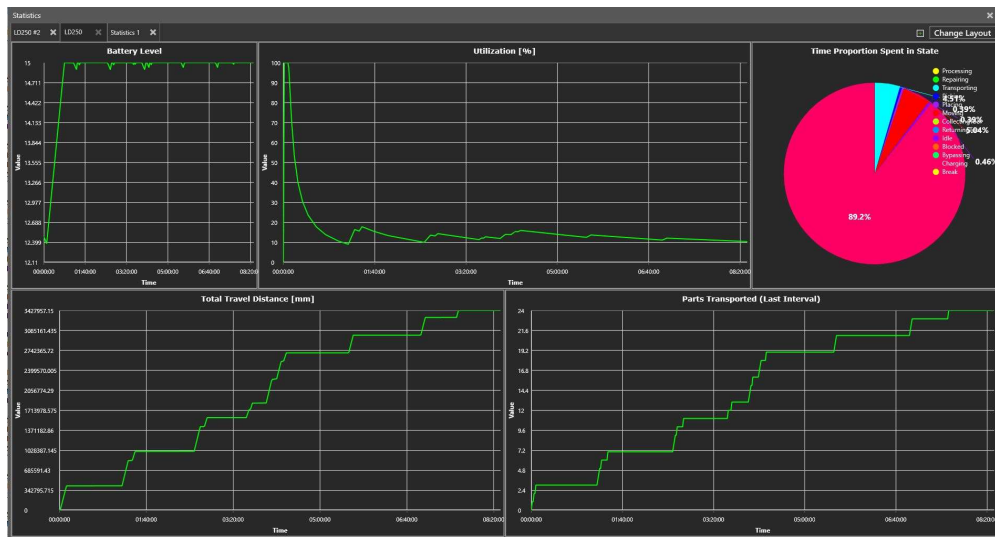
Skenaariossa 1 materiaalivirtaus on toteutettu käyttäen Omron kuljetushyllyä. Tässä skenaariossa tuotantolinjalla saapuvat materiaalit tuodaan vain kuljetushyllyllä. Kuljetushyllyt täytetään päävarastossa keräilymenetelmällä. Ne täytetään siten, että jokaiselle hyllylle tulee tietyt materiaalit, jotka vastaavat tuotannossa paikkaa 1–5. Näin hyllyllä yksi on eri materiaalit kuin hyllyllä kaksi. Tämä on tehokain käyttömuoto hyllyille ja mobiilirobotit on helppo integroida käyttäen tätä menetelmää. Hyllyjen materiaali tilavuus vaihtelee 1620–72000 kappaleeseen riippuen materiaalin koosta, joten isoja eriä ajaessa, joitakin varastopaikkoja joudutaan uudelleen täyttämään.

Tässä skenaariossa tuotantoerän koko on 1000 kpl. Tämä tarkoittaa sitä, että valmistettava tuote vaihdetaan 1000 kpl välein, jolloin rasiasta tuodaan tarkoituksella materiaalivirtaukseen. Linjalla yksi tuote vaihdetaan neljän tunnin välein ja linjalla kaksi 83 minuutin välein. Tuotteen BOM-rakenne koostuu 14:stä eri materiaalista, mikä tarkoittaa tässä tilanteessa 23 kpl muovi- tai pahvilaatikoita, että saadaan valmistettua 1000 kpl. Materiaalivirtauksessa käytetään kahta Omron LD 250-mobiilirobotia. Ne kuljettavat materiaalit tuotantotilan välivarastoon, josta

ihminen kerää laatikot tuotantolinjalle. Kun kuljetushyllyt ovat tyhjästä mobiilirobotit käyvät viemässä ne takaisin päävarastoon. Uudet kuljetushyllyt tuodaan tuotantoon, kun tuote vaihdetaan tai materiaalia tarvitaan lisää.

Skenaariossa yksi on myös kokeiltu, mahtuisivatko mobiilirobotit tuotantotilan sisälle. Normaalisti mobiilirobotit tuovat materiaalin tuotantotilan eteen, mutta tässä lisäskenaariossa ne ajavat tuotantotilan ovesta sisälle ja jättävät materiaalit sinne. Tämä menetelmä parantaisi tuotantotilan ulkoasua ja vähentäisi työntekijöiden kulkemia matkoja.

Skenaariosta yksi on kerätty dataa Omron LD 250:stä, joka näkyy kuvassa 11.



Kuva 11. Mobiilirobotin käyttäytyminen simulaation aikana.

Kuvassa 11 näkyy Omron LD 250:n akuston varaus, käyttötaso, kuljettu etäisyys ja kuljetuskerrat. Dataa on kerätty aika välillä 0–8,5 h. Simuloituna kuormana on ollut kaksi tuotantolinjaa, jotka on suorittanut 1000kpl valmistuseriä.

Datankeräys on aloitettu simulaation alussa ja lopetettu, kun simulaatiota on ajettu kahdeksan ja puolituntia. Simulaatiossa tuotantoerien koot olivat 1000kpl ja molemmat tuotantolinjat olivat käytössä. Molemmista Omroneista on kerätty dataa ja niiden työnjako on jakautunut melkein tasan. Omron 1 ajoi 3,42 km ja

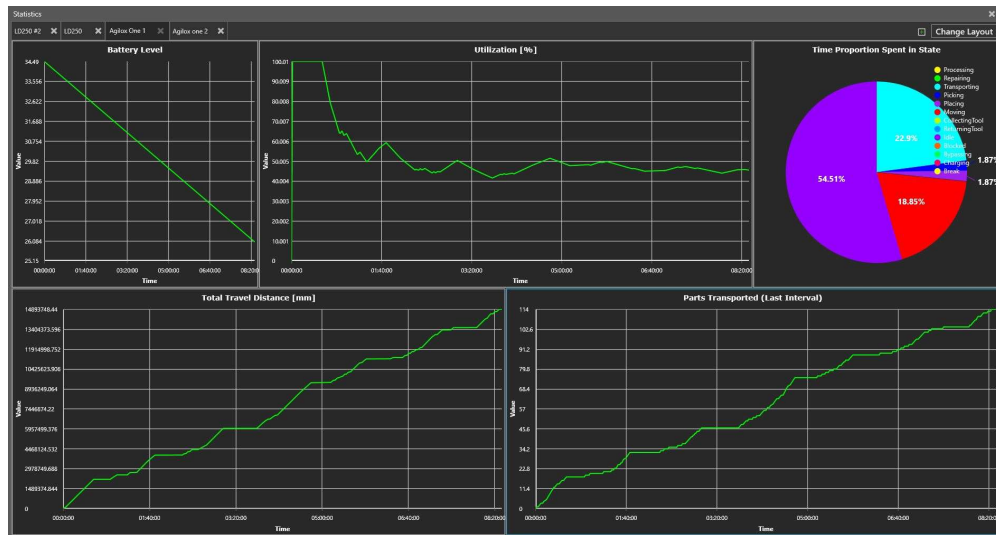
suoritti 24 kuljetusta. Omron 2 ajoi 3,39 km ja suoritti 24 kuljetusta. Omronit ajoivat yhteensä 6,81 km ja suorittivat 48 kuljetusta.

4.4 Skenaario 2

Skenaariossa kaksi materiaalivirtaus on toteutettu käyttäen perinteisempää kuormalavamenetelmää. Kuormalavoja käytettäessä jokaisella kuormalavalla on yhtä materiaalia. Tämä tarkoittaa, että jokainen materiaali pitää tuoda omalla kuormalavalla tuotantopisteelle. Tässä skenaariossa ei käytetä keräilymenetelmää, koska kuormalavat haetaan suoraan niiden varastointipaikalta käyttäen kahta Agilox One-mobiilirobotia. Kuormalavoilla säilytetään noin 2700–120000 kappaletta materiaalia riippuen sen koosta.

Tässäkin skenaariossa tuotantoerän koko on sama 1000 kpl kuin skenaariossa yksi. Näin kuljetusmenetelmien dataa on helppo verrata keskenään. Tässäkin skenaariossa valmistettava tuote vaihdetaan linjalla yksi neljän tunnin välein ja linjalla kaksi 83 minuutin välein. Tuotteen BOM-rakenne muodostuu 14:sta eri materiaalista, joten tässä skenaariossa se tarkoittaa 14:sta kuormalavan kuljettamista välivarastosta tuotantoon ja takaisin. Kuljettamisessa pitää ottaa huomioon, että linjan yksi välivarastoon mahtuu vain yhdeksän kuormalavaa kerralla. Tämä on huomioitu siten, että Agilox One on ohjeistettu priorisoimaan siten, että se tuo neljä kuormalavaa pois tuotannosta, kun yhdeksän on tuotu tuotantolinjan välivarastoon.

Skenaariosta kaksi on kerätty dataa Agilox Onesta, joka näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Mobiilirobotin käyttäytyminen simulaation aikana.

Kuvassa 12 näkyy Agilox Onen akuston varaus, käyttötaso, kuljettu etäisyys ja kuljetuskerrat. Dataa on kerätty aika välillä 0–8,5 h. Simuloituna kuormana on ollut kaksi tuotantolinjaa, jotka on suorittanut 1000kpl valmistuseriä.

Simulaation datankeräys on suoritettu samalla tavalla kuin skenaariossa yksi. Datankeräys on aloitettu simulaation alussa ja lopetettu 8,5 tunnin jälkeen. Tässä skenaariossa oli paljon ongelmia. Skenaarion ajoajaksi olisi tullut yli yhdeksän tuntia, koska mobiilirobotin akkukapasiteetin hallinta oli huonoa. Agilox One ei menynyt lataamaan akustoa tyhjäkäynnillä, vaan odotti siihen asti, että akun varaus oli laskenut alle 20 %. Tämä tarkoitti sitä, että se joutui menemään lataamaan akustoa noin 7 h kohdalla ja tuhlassi siihen noin tunnin aikaa. Omron osasi ladata akustoaan, kun se huomasi, että se on tyhjäkäynnillä. Tämän ansiosta sen akustonvaraus ei ikinä laskenut työn aikana alle turvarajan. Agilox One joutui lykkäämään työn suorittamishetkeä, koska se oli latauksessa. Tämä johtuu mobiilirobotin ohjelmoinnista simulaatiossa, se oli ohjelmoitu lataamaan itseään vasta turvarajan alapuolella. Tätä ominaisuutta on kompensoitu kasvattamalla sen akuston kapasiteettiä, joten sen ei tarvinnut suorittaa akuston latausta simulaation aikana. Tämän huomaa kuvasta 12, akustonkapasiteetti laskee suoraviivaisesti alaspäin.

Agilox One 1 suoritti yhteensä 114 kuljetusta ja ajoi 14,9 km. Agilox One 2 suoritti yhteensä 110 kuljetusta ja ajoi 14,8 km. Yhteensä ne suorittivat 224 kuljetusta ja ajoivat 29,7 km.

4.5 Skenaario 3

Skenaariossa kolme on yhdistetty ominaisuuksia skenaariosta yksi ja kaksi. Tässä skenaariossa kaikki pienemmät materiaalit, joita saadaan mahtumaan suuria määriä kuljetushyllyyn, tuodaan sen avulla tuotantoon. Materiaalit, jotka ovat fyysisesti isoja, tuodaan kuormalavoilla, joten niitä pystytään tuomaan suurempi määrä. Näin molempien kuljetusmenetelmien vahvuuksia saadaan hyödynnettyä tehokkaasti. Tarkoitus on katsoa, missä kohtaa tämä on tehokkaampi kuin skenaario yksi tai kaksi. Tässä skenaariossa on käytössä kaikki neljä mobiilirobottia.

Tässäkin skenaariossa on käytössä molemmat tuotantolinjat. Tuotantolinjoilla rakennetaan tuotetta, jonka BOM-rakenne koostuu 14:sta materiaalista. Tämä tarkoittaa 14:sta materiaalin kuljettamista tuotantolinjoille. Näistä kolme materiaalia tuodaan kuormalavoilla ja 11 tuodaan kuljetushyllyillä. Skenaario kolme tehdään kahdella tuotantoerällä. Ensimmäinen simulaatio tehdään 1000 kpl tuotantoerillä ja toinen 4000 kpl tuotantoerällä, koska tällä kappalemäärällä saadaan paras tehokerroin kuljetuksien ja tuotantoerän välillä. Tämä johtuu materiaalin määrästä per laatikko.

1000 kpl tuotantoerä hyödyntäen skenaarion yksi ja kaksi vahvuuksia. Tässä skenaariossa Omronit tekivät 48 kuljetusta ja ajoivat 7,97 km. Agilox Onet tekivät 48 kuljetusta ja ajoivat 7,74 km. Tämä on yhteensä 96 kuljetusta ja 14,6 km.

5 TULOKSET

5.1 Skenaarioiden tulokset

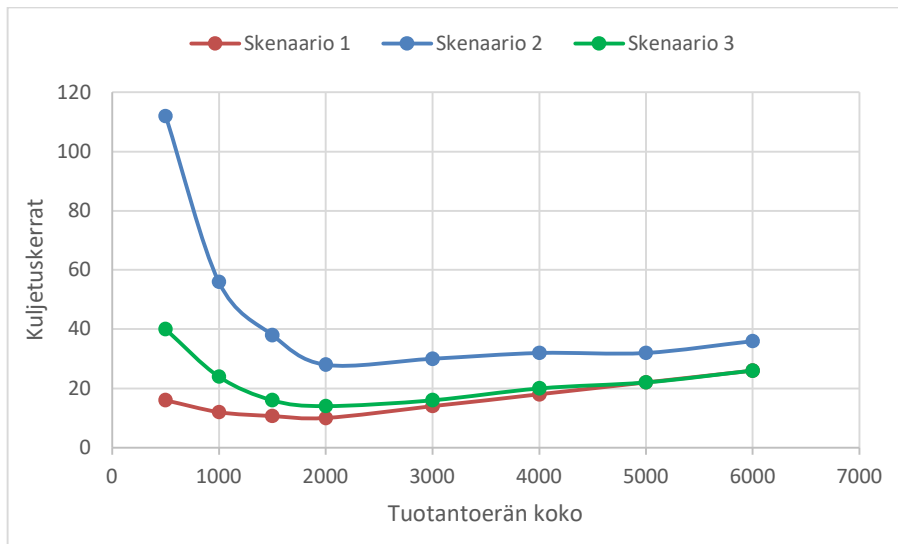
Skenaariota vertailemalla voimme selvittää, mikä materiaalivirtausmenetelmistä on tehokkain. Tehokkaan materiaalivirtauksen tavoitteet on minimoida kuljetuksessa kuluva aika ja kustannukset. Skenaarioista saadun datan avulla voidaan vertailla eri materiaalivirtauksia sekä verrata näitä tuloksia laskettuihin arvioihin, jotka löytyvät taulukoista 4 ja 5. Skenaarioista saadaan myös käyttäytymiseen liittyvää dataa, esimerkiksi miten AMR käyttäytyy ja millaisella strategialla se lataa akustoja. Tästä on hyötyä niitä integroidessa osaksi materiaalivirtausta.

Skenaariosta yksi saatua dataa laskettuihin tehokkuuksiin materiaalivirralla yksi. Skenaarion yksi simulaatiossa Omronit ajoivat yhteensä 48 kuljetusta ja kulkivat 6,81 km, kun tuotantoerän suuruus on 1000 kpl. Seuraavaksi lasketaan taulukoiden avulla linjan yksi ja linjan kaksi yhdistetty materiaalivirran tehokkuus. Kokonainen tehokkuus kahdeksan tunnin tuotantoajalle saadaan lisäämällä taulukosta 4 1000:n kappaleen tuotantoerällä kuljetuskerrat ja kuljettumatka taulukon 5 1000:n kappaleen tuotantoerällä tehtyihin kuljetuskertoihin ja matkaan. Eli linjan yksi käyttämistä varten tehdyt kuljetukset ovat 12 kuljetusta ja kuljettuetäisyys 1,46 km. Linjan kaksi kuljetuskerrat ovat 36 kuljetusta ja kuljettuetäisyys 5,83 km. Yhteensä siis 48 kuljetusta ja kuljettu etäisyys on 7,30 km.

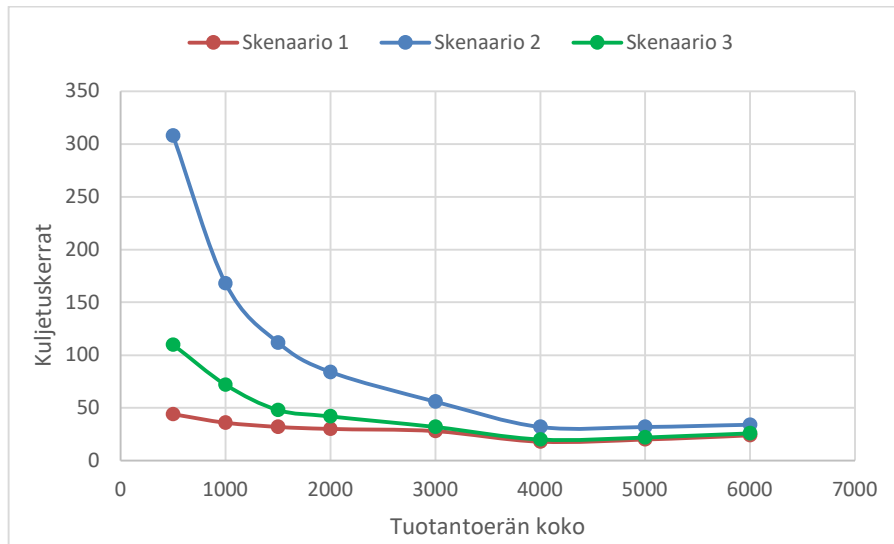
Kun näitä laskettuja tietoja verrataan simulaatiosta saatuihin tietoihin, voidaan todeta simulaation tuloksien tukevan laskettuja tehokkuuksia. Kuljetuissa etäisyyksissä syntyy hieman eroa, mutta tämä johtuu siitä, että on erittäin hankala ennustaa Omronin kulkemia reittejä etukäteen, koska siihen vaikuttavat myös ulkoiset tekijät simulaatiossa. Tämä eroavaisuus on noin 6 %, joten ne voidaan silti todeta tukevan laskettuja arvioita. Kun tämä vertailu tehdään jokaisen skenaarion kohdalla voidaan todeta, että simulaatioista saatu data tukee laskettuja tehokkuuksia.

5.2 Materiaalivirtauksien vertailu

Kolmesta materiaalivirtauksesta pitää määrittää paras, joka määritellään tämän työn alussa määriteltyjen tavoitteiden ja tuotannossa hyväksi todettuja käytäntöjen perusteella. Tärkein valintakriteeri näistä on tehokkuus. Kuljetustehokkuus voidaan määrittää laskettujen tehokkuuksien avulla luomalla tuotantolinjoille kuvaajat, joiden avulla voidaan vertailla eri materiaalivirtausskenaarioiden kuljetuskertoja tuotantoerän kokoon nähden. Näin saadaan selville millä, kuljetusmenetelmällä voidaan kuljettaa materiaalia pienimmällä määrällä kuljetuskertoja. Tuotantolinjan yksi skenaarioiden vertailu näkyy kuvaajassa 3 ja tuotantolinjan kaksi skenaarioiden vertailu näkyy kuvaajassa 4.



Kuvaaja 3. Tuotantolinjan yksi materiaalivirtauksien vertailu. Y-akselilla on kuljetuskerrat ja X-akselilla on tuotantoerän suuruus.



Kuvaaja 4. Tuotantolinjan kaksi materiaalivirtauksien vertailu. Y-akselilla on kuljetuskerrat ja X-akselilla on tuotantoerän suuruus.

Tuloksia vertailemalla voidaan päätellä, että skenaarion yksi materiaalivirtauksella voidaan kuljettaa materiaalia kaikkein pienimmällä määrällä kuljetuskertoja. Tämä tarkoittaa myös pienintä kuljettua etäisyyttä. Skenaario kolme eli hybridimenetelmä lähestyy skenaariota yksi suurimmilla tuotantoerillä, mutta ei kuitenkaan aivan päihitä sitä. Tämä johtuu siitä, että skenaarion yksi keräilymenetelmällä ei kuljeteta turhaa materiaalia. Kun kuormalavaa käytetään, on kuljetettavien erien kokojen välillä suuri kappalemääräero, joten maksimaalinen tehokkuus saavutetaan, kun erän koko vastaa täydellisesti BOM-rakenteen, tuotantoerän ja kuljetettavan erän luomaa suhdetta. Esimerkiksi jos tuotannossa tarvitaan 16000 kpl materiaalia, mutta kuormalavalla voidaan tuoda vain 15000 kpl, on tuotantolinjalle pakko tuoda kaksi kuormalavaa, mikä tarkoittaa 30000 kpl materiaalia. Tällä menetelmällä on kulutettu 14000 kpl turhaan tuotantoon ja ne pitää kuljettaa takaisin päävarastoon, jos tuotettava kytkinmalli vaihdettaisiin. Tämän vuoksi keräilymenetelmä on tässä tilanteessa tehokkaampi kuljetusratkaisu, koska kuljetuserien suuruuksien ero on paljon pienempi. Esimerkiksi keräilymenetelmällä voidaan päästää alle tuhannen kappaleen kuljetuskokojen eroihin. Tämän vuoksi se on myös

paljon joustavampi ja pienillä tuotantoerillä vaatii paljon vähemmän kuljetuskertoja kuin skenaariot yksi tai kaksi. Kuormalavat voisivat toimia hyvin, jos tuotantoympäristössä olisi niin paljon tilaa, että kaikki kytkintä varten tarvittavat materiaalit voitaisiin välivarastoida samanaikaisesti. Silloin materiaalia ei palautettaisi varastoon, kun tuotetyyppiä vaihdetaan. Tällöin kuormalava olisi tehokkain materiaalin kuljetusmenetelmä. Tässä työssä Omron mobiilirobotilla ja keräilymenetelmällä saavutettiin paras kuljetuskertojen määrä tuotantoerään kohden.

Keräilymenetelmää käyttäessä syntyy keräilevästä työntekijästä kuluja, jotka pitää ottaa huomioon materiaalivirtausta valittaessa. Näitä kuluja ei synny, kun käytetään kuormalavamateriaalivirtausta. Keräilymenetelmää käyttäessä laatikoiden määrä vaikuttaa siihen, kuinka monta tuntia keräilijää tarvitaan. Pahimmissa tapauksessa 6000 kpl tuotantoeräkoolla tarvitaan keräilijää noin 1,3 h. Kulun suuruus määräytyy henkilön palkan mukaan. Tämä työntekijästä aiheutuva kulu on tässä mittakaavassa pieni.

6 POHDINTA

6.1 Optimaalisin materiaalivirtaus

Materiaalivirtauksen kriteereinä oli sen tehokkuus, luotettavuus, kustannukset ja se pitää olla automatisoitavissa. Näiden kriteerien perusteella valitaan optimaalisin materiaalivirtaus, joka soveltuu parhaiten kriteereihin.

Tehokkain materiaalivirtaus on selvästi Skenaario yksi, koska se on joustavin ja vaatii vähiten kuljetuskertoja. Skenaario kolme on myös toimiva ratkaisu, kun tuotantoerien suuruudet kasvavat, mutta se ei ole yhtä joustava, kuin skenaario yksi.

Luotettavin materiaalivirtaus on vaikea määrittää, koska se vaatii paljon testausta ja dataa. Mutta Lean-valmistuksessa sovittujen määreiden mukaisesti mitä yksinkertaisempi materiaalivirtaus on, sitä luotettavampi se on. Myös käyttöaika vaikuttaa tähän, koska käyttöaika lisää virheiden mahdollisuutta. Agilox One on käytössä kohdeyrityksessä, ja sen tiedetään kärsivän suurimmaksi osaksi pölyn ja roskien aiheuttamista sensori ongelmista. Eli Agiloxen kohdalla käyttöajalla on suuri vaikutus luotettavuuteen. Näillä perusteluilla voisi määritellä luotettavuuden riippuvan tuotantoerän koosta. Koska pienemillä tuotantoerillä skenaariossa yksi AMR:n käyttöaika on huomattavasti pienempi kuin skenaariossa kaksi, joten skenaariossa yksi on vähemmän tilaisuuksia syntyä virheitä kuin skenaariossa kaksi. Skenaario yksi on kuitentkin monimutkaisempi, joten AMR:n käyttöaikojen lähes työssä toisiaan tuotantoerän kasvaessa, voidaan todeta skenaarion kaksi olevan luotettavampi, vaikka käyttöaika olisi silti hieman isompi.

Näistä materiaalivirroista olisi helpoin automatisoida skenaario kaksi, koska se on näistä yksinkertaisin eikä vaadi ihmisiä. Skenaariot yksi ja kolme olisi mahdollista täysin automatisoida, jos keräilyprosessi automatisoitaisiin. Se vaatisi uusia sijoituksia ja päivityksiä varastointiin.

Kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi myös tuotantoerän koko, koska pienemmillä tuotantoerillä, skenaario kaksi sitoo todella paljon AMR:iä, joten niitä ei voitaisi käyttää muissa tehtävissä. Jos automatisaatiota haluttaisiin laajentaa, tarkoittaisi tämä uusien mobiilirobottien hankkimista, jotta käytettävää kapasiteettiä voidaan kasvattaa. Skenaarioissa yksi ja kolme keräilymenetelmä tuottaa lisäkustannuksia ja sen muuttaminen automaattiseksi tarkoittaisi uusia investointeja. Näillä perusteluilla voi päätellä, että pienillä tuotantoerillä skenaario yksi on kustannustehokkain käyttää, koska sen tehokkuus päihittää keräilystä aiheutuvat lisäkulut. Isommilla tuotantoerillä skenaarion kaksi käyttö olisi kustannustehokkainta, koska silloin AMR:iä ei sidota pitkäksi aikaa yhteen materiaalivirtaukseen.

Tämän pohdinnan perusteella skenaario yksi nousee optimaalisimmaksi materiaalivirtaukseksi, koska tuotantoerien suuruuksien vaihtelu aiheuttaa sen, että materiaalivirtaukselta vaaditaan joustoa ja tehokkuutta. Se on skenaarion yksi suurimmista vahvuuksista. Sen negatiivinen ominaisuus on se, että se ei ole täysin automatisoitu, mutta tästä aiheutuvat työntekijäkulut ovat sen verran pienet, että niiden takia ei kannata käyttää tehottomampaa kuljetusmenetelmää. Keräilykäyttöä käytetään myös muissa tuotantolinjoissa, joten se ei sido uusia työntekijöitä. Skenaario yksi on myös luotettava, vaikka se onkin monimutkaisempi kuin skenaario kaksi, koska AMR:in käyttöaika on skenaariossa yksi pienempi.

6.2 Projekti

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Visual Components ohjelmalla digitaalinen kaksonen, jonka avulla voi rakentaa erilaisia materiaalivirtauksia tehtaan sisällä. Nämä materiaalivirtaukset piti rakentaa siten, että niiden avulla voidaan kuljettaa materiaalia uudelle tuotantolinjalle. Materiaalivirtaukselle oli annettu tarkat kriteerit, joiden piti täytyä. Yksi tärkeimmistä kriteereistä oli käyttää mobiilirobottia, joten mobiilirobottien vertailu ja datan keräys on ollut myös isona osana tätä työtä. Kun materiaalivirtaukset on saatu luotua ja niiden vahvuudet vertailtua, pitää näistä saadut tulokset raportoida projektin johtoryhmälle. Tämän datan avulla se valitsee, minkälainen lopullisesta materiaalivirtauksesta rakennetaan.

Työssä valmistunut data on auttanut kohdeyritystä suunnittelemaan ja valitsemaan materiaalivirtauksen. Erityisesti digitaalista kaksosta on käytetty materiaalivirtojen esittelyissä ja datan keräyksessä. Tämän avulla johtoryhmä on pystynyt helposti vertailemaan erilaisia materiaalivirtausratkaisuja. Myös robottien vahvuuksista kerättyä dataa on käytetty materiaalivirtausta suunniteltaessa. Digitaalista kaksosta voidaan käyttää tulevaisuudessa muissa tehtaan osissa ja kerätty data mobiiliroboteista auttaa tulevaisuudessa tapahtuvissa automaatioprojekteissa. Yksi työn tarkoituksista oli myös tutkia Visual Componentsin hyödyllisyyttä tuotantoprosessin kehityksessä. Visual Componentsin hyödyllisyys on tullut hyvin ilmi työssä. Sen selvä vahvuus on se, että data voidaan tuoda visuaaliseen muotoon. Kun projektissa on paljon ihmisiä, on vaikea keskustella datasta, koska jokaisella on projektissa oma osuutensa. Tämän ohjelman avulla nämä osuudet voidaan yhdistää kokonaisuudeksi, joka on helposti esiteltävissä. Se parantaa keskusteluiden tehokkuutta, koska ihmiset pääsevät nopeasti kiinni käsiteltävään dataan visuaalisessa muodossa. Virheitä on myös helpompi välttää, koska data on ymmärrettävämmässä muodossa, sen avulla ulkopuolinen voi tarttua mahdollisiin virheisiin, jotka olisi voinut jäädä huomaavatta.

Työ on ollut todella ajallisesti kriittinen, koska tuotantolinjan valmistus oli jo pitkällä, kun tämä työ on aloitettu, joten työn kanssa on pitänyt olla todella tarkka ajankäytön suhteen. Työssä oli myös kohtia, joista minulla ei ollut aikaisempaa kokemusta. Visual Components oli minulle täysin uusi ohjelma, jonka käytön opettelinkin tämän työn ohella. Ohjelman opettelu ei ollut kovin vaikeaa, koska Visual Componentsin sivuilla oli hyviä itseopiskelukursseja. Visuaalisista osuuksista olisi tullut varmasti vielä parempia, jos olisi ollut enemmän aikaa syventyä ohjelmaan. Tulokset ovat mielestäni tarkkoja, koska olen saanut laadukasta pohjadataa. Muutamasta BOM-rakenteesta puuttui materiaalin kuljetuskokoja, mutta ne on arvioitui muiden tuotteiden avulla. Tämän vaikutus materiaalivirtauksien tehokkuuksissa ei ole merkittävä.

6.3 Jatkokehitys

ABB on ehdottanut jatkokehitysideana tutkia keräilyn automatisointia. Tarkoituksena olisi käyttää ABB:n valmistamaa automaattista keräilyrobottia, jonka avulla skenaariosta yksi ja skenaariosta kolme saataisiin täysin automaattisia. Tämän jatkokehitysidean tarkoitus olisi tutkia miten tuotantoprosessia voisi kehittää, sekä parantaa tuotannon automatisointia. Tässä jatkokehitysideassa voisi soveltaa samoja menetelmiä kuin tässä opinnäytetyössä.

Jatkokehitysidean voisi toteuttaa rakentamalla automaattisen keräilyjärjestelmän tässä opinnäytetyössä tehtyyn digitaaliseen kaksoseen. Sen avulla olisi helppo vertailla automaattisen keräilyjärjestelmän vaikutusta nykyiseen materiaalivirtaukseen. Siitä saisi arvokasta dataa, jonka avulla tuotantoa voisi kehittää yhä automaattisemmaksi, sekä vertailla sen vaikutusta kustannuksiin.

LÄHTEET

Lähdeluettelo

1. **ABB. ABB.** [Online] [Viitattu: 14. 10 2023.] <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/smart-power>.
2. **Golson, Daniel.** CNET. [Online] 16. 8 2022. [Viitattu: 19. 11 2023.] <https://www.cnet.com/roadshow/news/czinger-21c-hypercar-first-ride-review-3d-printed-divergent-manufacturing/>.
3. **Weiß, Karsten.** Beewatec. [Online] 04. 6 2023. [Viitattu: 19. 11 2023.] <https://www.beewatec.com/blog/material-flow-in-production-and-logistics-how-to-optimize-your-internal-processes>.
4. **OpEx Learning Team.** Opexlearning.com. [Online] 27. 1 2019. [Viitattu: 2. 11 2023.] <https://opexlearning.com/resources/taichii-ohno-contributions-to-process-improvement/27877/>.
5. **Girish Deshmukh, Chandrakant Ramesh Patil ja Mona G Deshmukh.** *Manufacturing industry performance based on lean production principles.* Vashi, India : IEEE, 2017.
6. **Ramdasi, Shubhankar.** Researchgate. [Online] 8 2021. [Viitattu: 14. 11 2023.] https://www.researchgate.net/publication/354047396_Effect_of_FIFO_Strategy_Implementation_on_Warehouse_Inventory_Management_in_The_Furniture_Manufacturing_Industry.
7. *Research on Big Data Analysis Data Acquisition .* **Li, Hong.** Guangzhou, China : IEEE, 2021.
8. **Melanie.** Unleashed. [Online] 18. 5 2021. [Viitattu: 2. 11 2023.] <https://www.unleashedsoftware.com/blog/everything-you-need-to-know-about-bill-of-materials>.

9. **Brush, Kate.** TechTarget. [Online] 7 2019. [Viitattu: 15. 11 2023.] <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/mobile-robot-mobile-robotics>.
10. **Agilox.** Agilox.net. [Online] 2023. [Viitattu: 17. 10 2023.] Agilox <https://www.agilox.net/en/product/agilox-one/>.
11. —. *data_sheet_one_a4_en*. s.l. : Agilox, 2023.
12. **Omron Corporation.** *I828-E12_AMR_LD_Sereis_Datasheet_RevL*. Kyoto : Omron Corporation, 2023.
13. **U. Dombrowski, C. Riechel.** *Factory Layout Benchmark with Extended Failure Mode and Effect Analysis*. Braunschweig, Germany : IEEE, 2012.
14. **Logistiikan Maailma Reijo Rautauoman säätiö sr 2023.** Logistiikan Maailma. [Online] ogistiikan Maailma Reijo Rautauoman säätiö sr 2023, 2023. [Viitattu: 21. 11 2023.] <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tuotantostrategia/tuotannon-layout/>.
15. **Miskinis, Carlos.** Challenge Advisory. [Online] Maaliskuu 2019. [Viitattu: 2. 10 2023.] <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>.
16. **IBM.** IBM Think. [Online] 2020. <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>.