



Akkukokoonpanon automaati- sointi yhteistyörobotilla

Joona Ahola

OPINNÄYTETYÖ
Elokuu 2020

Konetekniikka
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutusohjelma
Koneautomaatio

AHOLA, JOONA:

Akkukokoonpanon automatisointi yhteistyörobotilla

Opinnäytetyö 59 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Elokuu 2020

Opinnäytetyössä suunniteltiin akkumoduulien puoliautomoitoitu kokoonpanosolu. Kokoonpanosolussa yhteistyörobotti ja ihminen valmistavat akkumoduuleja yhteistyössä. Puoliautomoitoidun kokoonpanosolun tavoitteena oli minimoida akkukennojen käsittelytarve, varmistaa tasalaatuisuus ja tarjota skaalattavuutta kokoonpanossa. Opinnäytetyön tilaajana on Celltech Solutions Oy, joka suunnittelee ja valmistaa pääasiassa akkuja ja energiavarastoja. Työssä tarkastellaan suunniteltavan kokoonpanosolun mekaanista suunnittelua, budjettia, turvallisuutta ja ohjelmointia.

Opinnäytetyön tuloksena ovat kaksi layout-vaihtoehtoa esikokoonpanolle. Layoutit tehtiin CAD-ohjelmistolla. Yhteistyörobotia testattiin testiympäristössä, sekä sille tehtiin ohjelmakoodi suunniteltuun kokoonpanosoluun. Kokoonpanojigit suunniteltiin myös CAD-ohjelmistolla ja niiden ohjausjärjestelmä suunniteltiin ohjelmoitavalla logiikalla. Ensimmäiselle layout-vaihtoehdolle tehtiin kustannuslaskelma sekä takaisinmaksuajan laskelmat. Lisäksi kokoonpanosolulle tehtiin riskin pienentämisprosessi vaarojen selvittämiseksi. Näillä tuloksilla toimeksiantajalla on mahdollista tehdä sijoituspäätös kokoonpanosolusta.

Työssä huomattiin, että ehdotetun ratkaisun automaatioaste jäi kohtalaisen alhaiseksi, vaikka sen takaisinmaksuaika on kohtalaisen hyvä. Kokoonpanosolun kehittämiseksi useampia kokoonpanon vaiheita tulee automatisoida, mikä vaatii lisäinvestointeja ja monimutkaisten komponenttien tuomisen kokoonpanoon. Tämän takia työ rajattiin vain esikokoonpanon automatisoimiseen.

Yhteistyörobotin ohjelmakoodi kokoonpanosolussa päätettiin pitää luottamuksellisena tietona ja on poistettu julkisesta raportista.

Asiasanat: suunnittelu, yhteistyörobotti, kokoonpano, akkumoduuli

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

AHOLA JOONA:
Automation of a Battery Module Assembly with a Collaborative Robot

Bachelor's thesis 59 pages, appendices 6 pages
August 2020

The purpose of this thesis was to plan a half-automated battery module assembly cell. The assembly cell was designed to be operated in co-operation between a collaborative robot and a human worker. The goal was to minimize handling of the battery cells, ensure homogenous production, and provide scalability. This thesis was done for Celltech Solutions Ltd., which designs and produces mainly battery modules and energy storages. In this thesis, the assembly cell is discussed from the viewpoints of mechanical design, budget, safety and programming.

As a result of this thesis, two layout options were created with CAD software. The collaborative robot was tested in a testing environment and a robot program was programmed for the assembly cell. Assembly jigs were designed with CAD software as well, and their control system was designed with a programmable logic controller. Cost estimate and return on investment were calculated for the first layout option. In addition, the assembly cell was subjected to an adequate risk reduction process. With these results the client can decide on whether to invest in the cell or not.

It was noticed that the suggested solution's level of automation was moderately low, although its payback time was quite good. To develop the assembly cell further, the more complicated phases of the assembly should be automated.

Robot program of the assembly cell was considered as confidential information and was omitted from this public version of the thesis.

Key words: design, collaborative robot, assembly, battery module

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	CELLTECH SOLUTIONS OY	8
	2.1 Historia	8
	2.2 Tuotteet	8
	2.3 Nykyhetki	9
	2.4 Kokoonpanosolun tavoitteet	9
3	TEORIA	10
	3.1 Yhteistyörobotti	10
	3.2 Tuotannon layout	11
	3.2.1 Funktionaalinen layout	11
	3.2.2 Solulayout	12
	3.2.3 Tuotantolinja	13
4	PROSESSIN KUVAUS	14
	4.1 Robottisolun käyttöönottosyklin pääpiirteet	14
	4.2 Kokoonpantava tuote	15
	4.3 Kokoonpanon vaiheet ja järjestys	16
	4.4 Automatisoitava prosessi	17
	4.5 Testiympäristö	17
	4.6 Testiympäristössä havaitut haasteet ja ongelmat	18
	4.7 Konenäköjärjestelmän testaaminen	21
5	LAYOUTIN SUUNNITTELU	24
	5.1 Tavoiteltu suorituskyky	24
	5.2 Robotin paikka kokoonpanossa	24
	5.3 Komponenttien tuonti robotille	25
	5.4 Jigien suunnittelu	25
	5.4.1 Akkukennot	26
	5.4.2 Välikappaleet	27
	5.4.3 Päätykappaleet	27
	5.4.4 Kokoonpano	28
	5.5 Tarttuja	29
	5.6 Robotin valitseminen	30
6	RATKAISU	31
	6.1 Layout 1	31
	6.2 Layout 2	34
	6.3 Kokoonpanosolun tuotantokapasiteetti	36
	6.4 Investoinnin kustannuslaskelma	37

6.5 Kuukausittaiset säästöt	38
6.6 Takaisinmaksuaika.....	38
6.7 Sijoitetun pääoman tuottoaste.....	39
7 RISKIN PIENENTÄMISPROSESSI	40
7.1 Riskin arviointi.....	42
7.1.1 Robottisolun raja-arvojen määrittäminen.....	42
7.1.2 Vaaran tunnistaminen.....	43
7.1.3 Riskin suuruuden arviointi	43
7.2 Riskin pienentäminen.....	44
8 KOKOONPANOSOLUN LOGIIKKA.....	46
8.1 Robotin ohjelmakoodi.....	46
8.2 Lamellikuljettimen kokoonpanojigin logiikka.....	46
9 POHDINTA	49
LÄHTEET.....	52
LIITTEET	54
Liite 1. UR10e yhteistyörobotin tekniset tiedot.....	54
Liite 2. Robotiq tarttujien tekniset tiedot.....	55
Liite 3. Pickit esimerkkiohjelma Universal Robots:lle	56
Liite 4. Pickit M ja M-HD tekniset tiedot.....	57
Liite 5. Kokoonpanoprosessin sekvenssikaavio.....	58
Liite 6. Lamellikuljettimen kokoonpanojigin logiikka	59

LYHENTEET JA TERMIT

Akkumoduuli	akkukennoista koostuva kokonaisuus
CAD	Computer Aided Design
Cobot	yhteistyörobotti
Kokoonpanojigi	apukehikko tai -teline, jossa kokoonpano tehdään
KPI	Key Performance Indicator
Lamellikuljetin	levyistä koostuva kuljetin
Layout	pohjapiirros
PLC	Programmable Logic Controller
Robotin hyötykuorma	robotin nostokyky ilman työkalua
ROI	Return on Investment
Sekvenssikaavio	vuorovaikutusta kuvaava kaavio
TCP	Tool Center Point
Tilakaavio	tilakäyttämistä esittävä kaavio
UR	Universal Robots

1 JOHDANTO

Kokoonpanotyö voi olla sekä henkisesti, että fyysisesti raskasta ihmiselle. Tu-
hansien samanlaisten työvaiheiden suorittaminen peräjälkeen ja päivästä toi-
seen on uuvuttavaa, ja eikä välttämättä kovin ergonomista. Lisäksi ihmisen te-
kemien virheiden määrä kasvaa suurissa toistomäärissä. Automaation avulla
voidaan vähentää tätä ihmisen kuormaa ja vastuuta toistuvissa työvaiheissa.

Tämän opinnäytetyön tilaajana on Tampereella sijaitseva Celltech Solutions Oy,
joka käynnistelee akkutuotantoaan. Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella
yhden mallisen akkumoduulin puoliautomaticoitu kokoonpanosolu. Kokoonpa-
nosolussa ihminen sekä yhteistyörobotti valmistaisivat yhdessä akkumoduuleja.
Osan työvaiheista tekisi ihminen ja osan yhteistyörobotti.

Opinnäytetyön on tarkoituksena saada valmis suunnitelma kokoonpanosolun to-
teuttamisesta ja kustannuslaskelma siitä. Näiden suunnitelmien on tarkoitus an-
taa Celltech:lle valmius tehdä sijoituspäätös kokoonpanosolun kannattavuus-
desta ja ylipäätään toimivuudesta. Tavoitteena on saada kokoonpanosolu käyt-
töön vielä vuoden 2020 aikana.

Opinnäytetyö rajataan yhden akkumoduulin kokoonpanosolun suunnittelemi-
seen, kustannuslaskelman ja testiohjelman tekemiseen, sekä kokoonpanon
haasteiden ja ongelmien ratkaisemiseen.

2 CELLTECH SOLUTIONS OY

2.1 Historia

Celltech:n historia Suomessa alkaa vuodesta 1989, jolloin Insmat Oy perustettiin. Tällöin huomattiin, että markkinoilla oli tarvetta erilaisille akkuratkaisuille. 1990-luvulla matkapuhelimet yleistyivät ja näin ollen valikoimiin otettiin myös matkapuhelinakut ja tarvikkeet. Vuonna 1998 Insmat Oy:n osti Bergman&Beving Ab. Addtech Ab eriytyi Bergman&Beving -konsernista vuonna 2001. (Celltech 2015.)

Insmat Oy osti Akkuvoima Oy:n liiketoiminnan vuonna 2006 ja seuraavana vuonna Insmat Oy:stä eriytettiin teollisuusosasto, ja syntyi Insmat Akkuvoima Oy. Nimi lyhennettiin vuonna 2009 Akkuvoima Oy:ksi. Addtech Ab osti Hansabattery Oy:n seuraavana vuonna ja vuonna 2013 Hansabattery tuli osaksi Akkuvoimaa. Vuonna 2014 nimi yhtenäistettiin Pohjoismaisten sisaryritysten kanssa ja nimeksi tuli Celltech. (Celltech 2015.)

Tänä päivänä Celltech on Addtech Ab:n omistuksessa, joka on listattu Tukholman pörssiin. Celltech:illä on Suomessa myyntikonttori Espoossa ja tuotantoa ollaan rakentamassa Tampereen toimipisteeseen. Tampereen toimipiste on oma yrityksensä nimeltä Celltech Solutions Oy. (Celltech 2015.)

2.2 Tuotteet

Celltech:n tuotteita ovat pääasiassa akut, energiavarastot, paristot ja virransyöttöratkaisut. Tampereen toimipisteessä tullaan kokoonpanemaan akkuja. Celltech valmistaa tuotteitaan moniin erilaisiin ratkaisuihin. Tuotteita menee muun muassa laitevalmistajille, terveydenhuoltoon, sähkö- ja televerkkoihin, turvallisuus ja hälytinalitteisiin, ajoneuvoihin ja työkoneisiin, valmistavaan teollisuuteen sekä asiakaskohtaisiin ratkaisuihin. (Celltech 2016.)

2.3 Nykyhetki

Tampereen toimipisteessä on erillinen toimisto- ja tuotantotila. Tuotantotilassa on noin tuhat neliometriä tilaa. Tuotantotilaan on tehty paineilmajärjestelmä siten, että useasta paikasta saa tarvittaessa käyttäjän yläpuolelta paineilmaa. Samoin sähköt on tehty siten, että käyttäjän yläpuolella menee kisko, josta voi haaroittaa jakorasian eri sähkölaitteille.

2.4 Kokoonpanosolun tavoitteet

Celltech:n tavoitteena on saada yhteistyörobotti osaksi heidän tulevaa tuotantoa. Yhteistyörobotilla voitaisiin minimoida tarve akkukennojen käsittelyyn, varmistaa tuotannon tasalaatuisuus ja tarjota skaalattavuutta kokoonpanossa. Yhteistyörobotin tulisi pystyä suorittamaan vähintään yksinkertaiset kokoonpanon vaiheet. Robottisolun tulisi rakentaa siten, että komponenttipuskuriin voitaisiin laittaa vähintään kahdeksan akkumoduulin osat. Yhteistyörobotti kokoonpanisi tuotteen mahdollisimman pitkälle, ja loput vaiheet jäisivät ihmisen viimeisteltäviksi. Akkumoduulin osille ja kokoonpanolle tulisi suunnitella jiggit, joista yhteistyörobotti voisi noukkia komponentit vakiopaikoilta.

3 TEORIA

3.1 Yhteistyörobotti

Yhteistyörobotti on robotti, joka on tarkoitettu työskentelemään fyysisessä vuorovaikutuksessa ihmisten kanssa jaetussa työtilassa. Yhteistyörobotit ovat viime vuosina nousseet suureen suosioon niiden jatkuvasti putoavan hinnan ansiosta. Yhteistyörobottien lisääntyvä joustavuus ja helppokäyttöisyys ovat avanneet uusia mahdollisuuksia erilaisille tehtäville ja sovelluksille, jotka voidaan automatisoida tehokkaasti yhteistyöroboteilla. (Robotic Industries Association 2019)

Yhteistyörobottien yhteistoimintaa koskevat vaatimukset määritellään standardin ISO 10218 osissa 1 ja 2. Yhteistyörobotti on joko turvaluokitellusti ja valvotusti pysäytettävä, käsin ohjattu, nopeus ja vähimmäisetäisyys valvottu tai teho ja voima rajoitettu. Turvaluokiteltu valvottu pysäytys tarkoittaa sitä, että robotin on pysähdyttävä, kun ihminen on yhteisessä työtilassa. Yleensä tällaiset yhteistyörobotit on tarkoitettu sellaiseen sovellukseen, jossa ihmisen ja robotin vuorovaikutus on vähäistä. (Robotic Industries Association 2019)

Käsin ohjattu yhteistyörobotti on varustettu laitteella, jolla käyttäjä ohjaa suoraan robotin liikettä. Tämä sallii esimerkiksi sen, että robotti tukee raskaan työkappaleen painoa, kun käyttäjä asettaa sitä paikoilleen, ehkäisten muun muassa rasitusvammoja. (Robotic Industries Association 2019)

Nopeus ja vähimmäisetäisyys valvottu yhteistyörobotti muistuttaa turvaluokitellusti ja valvotusti pysäytettävää robottia. Kuitenkin nopeus ja vähimmäisetäisyys valvottu yhteistyörobotit käyttävät parempia konenäköjärjestelmiä hidastamaan liikettä, kun ihminen lähestyy robottia, sekä lopulta pysäyttävät sen, kun ihminen on liian lähellä. (Robotic Industries Association 2019)

Yleensä ihmisille yhteistyörobotti sanasta mieleen tulevat robotit ovat käsivarsi-robotteja, jotka ovat teho ja voima rajoitettuja. Nämä yhteistyörobotit ovat rakennettu pyöreillä kulmilla ja älykkäillä törmäyssensoreilla. Sensorit havaitsevat no-

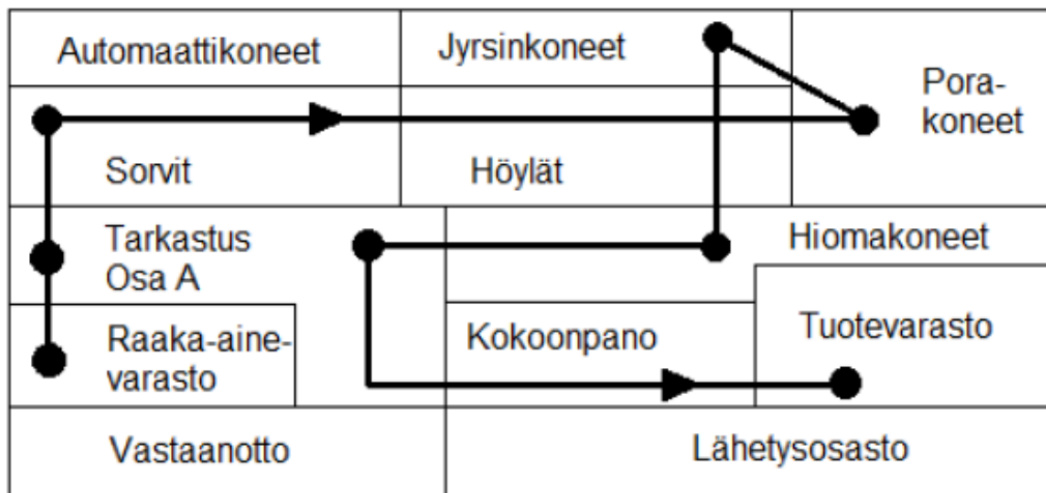
peasti kontaktin ihmisen kanssa ja pysäyttävät robotin. Tämän kaltaisissa yhteistyöroboteissa on mukana voimarajoitukset, jolloin törmäykset aiheuttavat harvoin vammaa. Usein näitä yhteistyörobotteja kutsutaan nimellä cobotti. (Robotic Industries Association 2019)

3.2 Tuotannon layout

Tuotannon layoutilla tarkoitetaan pohjapiirrosta tuotantotilasta, jossa on määritelty laitteiden, työpisteiden, kulkureittien, varastojen ja muiden tarvittavien asioiden sijoittelu tuotantotilaan. Hyvä tuotannon layout on turvallinen, materiaalivirta on tehokas, läpäisy aika on lyhyt, työntekijöiden turha liike on minimaalinen, se auttaa tuottamaan hyvää laatua sekä hyödyntää käytettävän tilan tehokkaasti. (Logistiikan Maailma 2015).

3.2.1 Funktionaalinen layout

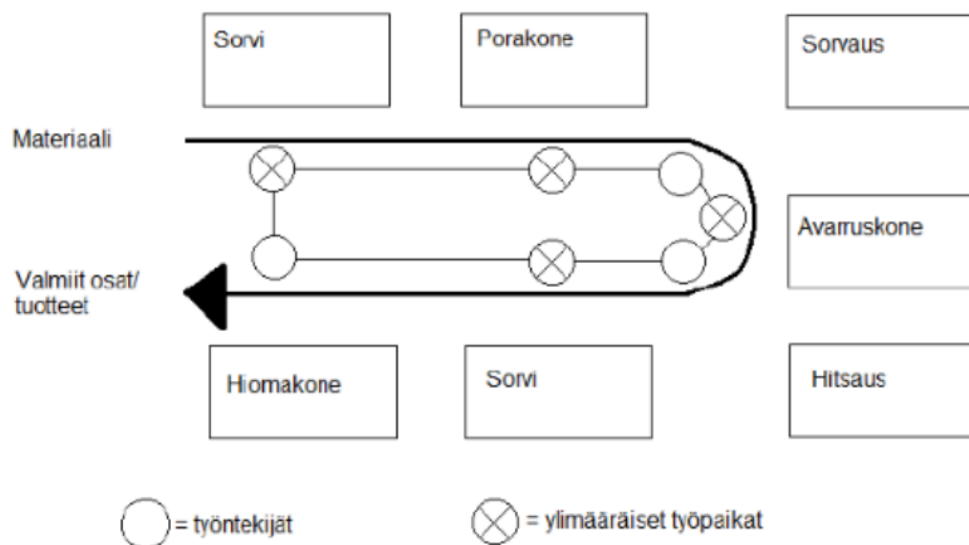
Tuotannon layoutit ovat joko prosessi- tai tuotelähtöisiä layouteja. Prosessilähtöinen layout eli funktionaalinen layout tarkoittaa sitä, että samat toiminnot on ryhmitelty yhteen. Esimerkiksi kokoonpano, hitsaus ja pakkaus ovat omia osastojaan. Useasti funktionaalisessa layoutissa materiaalivirrat ovat monimutkaisia, jolloin läpäisyajoista tulee pitkiä. Funktionaalisessa layoutissa saadaan tehty laajalti erilaisia tuotteita. (Logistiikan Maailma 2015).



KUVIO 1. Funktionaalinen layout (Haverila, Uusi-Rauva, Kouri & Miettinen 2009, 477)

3.2.2 Solulayout

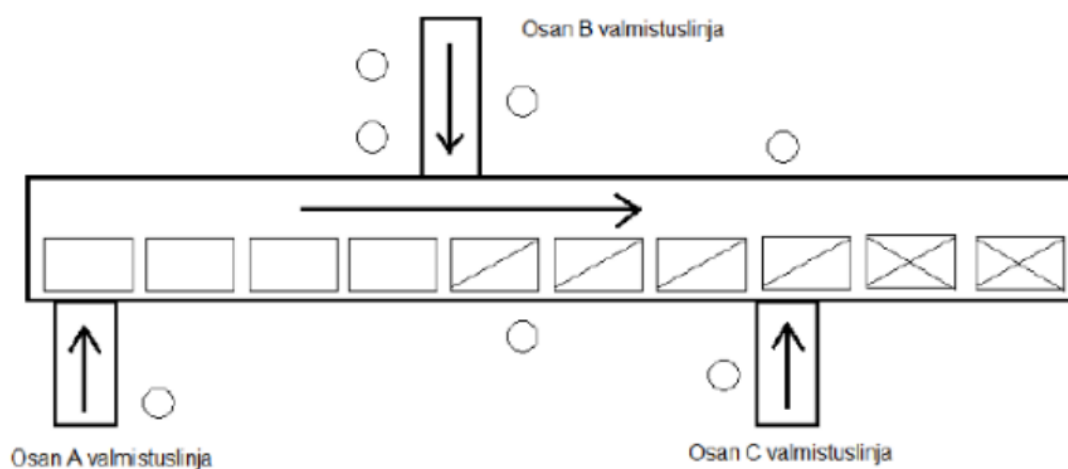
Solulayout on tuotelähtöinen layout, jossa yhdessä solussa voidaan tehdä tuote tai puolivalmiste alusta loppuun. Solussa on kaikki tarvittavat toiminnot tämän toteuttamiseen. (Logistiikan Maailma 2015).



KUVIO 2. Solulayout (Haverila ym. 2009, 478)

3.2.3 Tuotantolinja

Tuotantolinja on myös tuotelähtöinen, ja se voi olla joko pakkotahtinen tai vapaa-
tahtinen. Pakkotahtisessa linjassa osat liikkuvat pakotetusti seuraavan osan val-
mistuessa. Vapaa-
tahtisessa linjassa tuotanto on järjestetty linjamaisesti, mutta
osien liikkuminen linjastossa ei ole pakkotahtista. Pakkotahtisella linjalla pääs-
tään suuriin tuotantomääriin, mutta vain yhdenkaltaiselle tuotteelle. Vapaa-
tahti-
sessa linjassa pystytään tuottamaan useampiakin tuotteita. (Logistiikan Maailma
2015).



KUVIO 3. Tuotantolinja (Haverila ym. 2009, 476)

4 PROSESSIN KUVAUS

4.1 Robottisolun käyttöönottosyklin pääpiirteet

Robotin käyttöönottosykliin kuuluvat seuraavat vaiheet. Valmisteluvaihe, jossa ensimmäiseksi tutkitaan, kuinka manuaalinen kokoonpanosolu toimii. Selvitetään mitä vaiheita kokoonpanossa on, kuinka kauan kokoonpanoon menee aikaa, kuka kokoonpanon tekee ja mitä työkaluja siinä tarvitaan. Lisäksi mitä robottisolulla halutaan parantaa. (Bouchard 2017)

Suunnitteluvaihe, jossa määritetään robottisolulle tarvittavat suunnitelmat ja materiaalit. Suunnitteluvaiheessa tunnistetaan ensimmäiseksi, kuka on robottisolun ”asiakas”. Eli mihinkä robottisolun tuotos menee seuraavaksi. Määritetään mitä robottisolusta lähtee ja miten, sekä mitä soluun tuodaan ja miten. Lisäksi kuvataan, miten kokonaisprosessi etenee. Tärkeää on myös tiedostaa, miten tiedonkulku toimii robottisoluun ja siitä pois. (Bouchard 2017)

Robottisolusta tulee määrittää tavoiteltavat suorituskyvyn mittarit (KPI). Esimerkiksi sen tuottavuus, kapasiteetti, laatu ja ergonomia (taulukko 1). Mittarien avulla voidaan valikoida tarvittava robotti, työkalut, sensorit ja turvajärjestelyt. Valikoitujen laitteiden perusteella voidaan tehdä lopullinen layout. Suunnittelusta robottisolusta kannattaa tehdä kustannuslaskelma ja laskea mikä on solun takaisinmaksuaika. Suunnitteluvaiheen lopussa tilataan tarvittavat komponentit. (Bouchard 2017)

TAULUKKO 1. Esimerkkejä tavoiteltavista suorituskyvyn mittareista (Bouchard 2017,82)

What you want to improve	KPI to measure
Productivity	<ul style="list-style-type: none"> • Cost to produce parts
Capacity	<ul style="list-style-type: none"> • Cycle time • Cell capacity
Quality	<ul style="list-style-type: none"> • First pass yield (% of output done correctly the first time) • Defect rate (as % of output passed on to the next station)⁽²⁾
Ergonomy	<ul style="list-style-type: none"> • Occurrence and severity of injuries or repetitive strain incidents
Inventory	<ul style="list-style-type: none"> • Inventory at cell (\$ value of input parts, in-process parts, and output parts at the cell)
Human potential utilization	<ul style="list-style-type: none"> • Human wait time • Human non-value-added operations

Valmiiden suunnitelmien perusteella voidaan aloittaa käyttöönottovaihe. Käyttöönottovaiheessa robottisolun osien saavuttua asennetaan ne paikalleen ja ohjelmoidaan robotti. Testataan kokoonpanosolun toimivuus ja verrataan sitä tavoiteltaviin suorituskyvyn mittareihin. Lisäksi koulutetaan robottisolun työryhmä käyttämään robottisolua. Tämän jälkeen käyttöönotto on valmis ja tuotanto voidaan aloittaa. (Bouchard 2017)

4.2 Kokoonpantava tuote

Kokoonpantavana tuotteena on akkumoduuli, joka koostuu pääasiassa akkukennoista ja muoviosista. Akkumoduulin käyttökohteena ovat pääasiassa työkooneet. Akkukennoja moduulissa on yhteensä 12 kappaletta, jotka ovat, joka toinen eripäin kennon navoista katsottuna. Jokaisen kennon välissä on muovinen

välikappale, joka erottaa kennoja koskemasta toisiinsa, sekä pitävät ne paikallaan. Akkumoduulin päissä ovat muoviset päätypalat, jotka ovat melkein samantyyppiset toisiinsa nähden.

Akkumoduulin alle tulee metallinen pohjalevy, joka uppoutuu muoviosiin tehtyihin uriin, pohjalevy ruuvataan usealla ruuvilla muoviosiin kiinni. Pohjalevyn tarkoituksena on jäykistää akkumoduulin rakennetta. Lisäksi akkumoduulin muoviosien yläosassa menee molemmilla puolilla ura, joihin laitetaan akkumoduulin pituinen metallilaippa. Akkukennojen päälle laitetaan metallisia kiinnikkeitä, sekä johtosarja. Akkumoduulin ylimmäiseksi osaksi jää sen kansi. Akkumoduulin kokonaismassa on noin 10 kg.

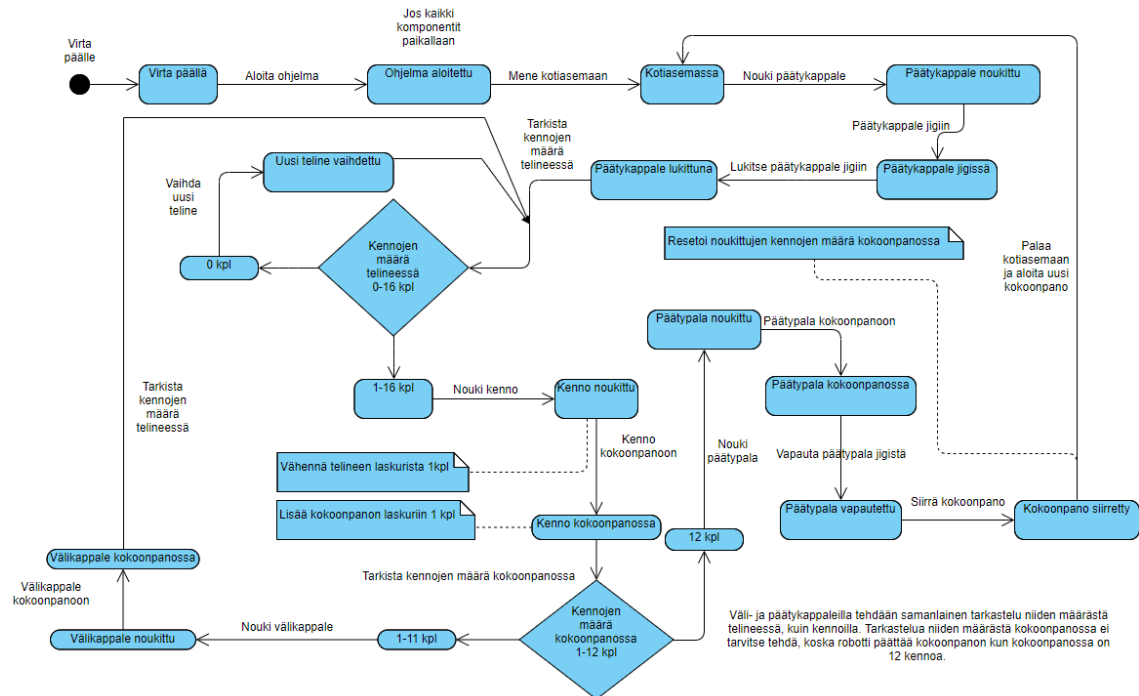
4.3 Kokoonpanon vaiheet ja järjestys

Automatisoidun kokoonpanon tarkoituksena ei ole saada kaikkia kokoonpanon vaiheita suoritettua yhteistyörobotin toimesta, vaan osa kokoonpanosta jää väkisin ihmisen tehtäväksi. Yhteistyörobotilla voidaan suorittaa yksinkertaiset vaiheet, kuten muoviosien ja akkukennojen asettelu päällekkäin. Myös pohjalevyn asettaminen paikalleen ja sen ruuvaaminen ovat mahdollisia. Tosin tätä varten täytyy hankkia yhteistyörobotille erikseen ruuvaustyökalu sekä ruuvien pidike.

Kokoonpanon ensimmäinen vaihe on ottaa päätypala ja asettaa sen uriin akkukkenno kiinni. Seuraavaksi laitetaan kennon päälle välikappale, jonka päälle uudelleen akkukkenno. Akkukennojen ja välikappaleiden tuominen kokoonpanoon toistetaan niin kauan, että akkumoduulissa on yhteensä 12 akkukennoa ja 11 välikapaletta. Viimeisen akkukennon päälle tulee päätypala. Tämän jälkeen laitetaan pohjalevy ruuveilla kiinni muoviosien uriin. Lisätään metallilaipat, laitetaan metalliset kiinnikkeet, kytketään johtosarja ja asetetaan kansi päälle.

4.4 Automatisoitava prosessi

Celltech:n tavoitteena on saada vähintään päätypalojen, akkukennojen ja välikappaleiden asettaminen kokoonpanoon automatisoitua. Kuviossa 4 on prosessin tilakaavio näiden vaiheiden osalta. Tässä tilakaaviossa ei ole vielä otettu huomioon, kuinka kokoonpanon osat tuodaan yhteistyörobotille.

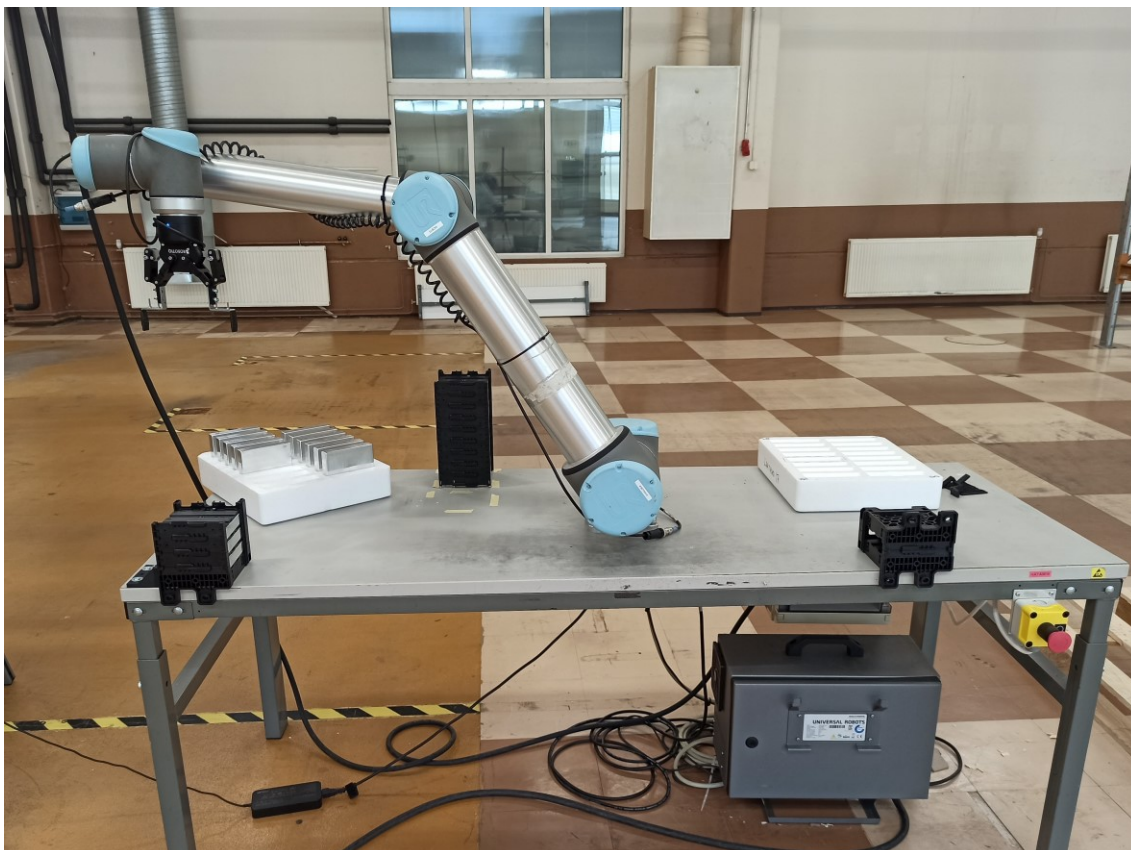


KUVIO 4. Automatisoitavan prosessin tilakaavio

4.5 Testiympäristö

Alun perin testiympäristö oli tarkoituksena tehdä Tampereen ammattikorkeakoulun robottilaboratorioon, mutta vallitsevan koronavirustilanteen takia laboratorioon ei ollut pääsyä. Kuitenkin koululta saatiin poikkeuksellisesti lainaan Universal Robots:n cobotti UR10 (kuva 1), jolloin testiympäristö pystyttiin järjestämään Celltech Solutions:n tuotantotilaan. Testiympäristön tarkoituksena oli selvittää, onko yhteistyörobotilla mahdollista suorittaa kyseistä kokoonpanoa, ja havaita mitä ongelmia kokoonpanossa saattaa tulla vastaan.

Lainatun UR10:n hyötykuorma on nimensä mukaan 10 kg ja sen ulottuma on 1300 mm. Hyötykuorma ilmoitetaan ilman robotin päässä olevaa työkalua, eli todellinen nostokyky on hieman alle 10 kg työkalun liittämisen jälkeen. Yhteistyörobottiin on liitetty Robotiq 2F-85 sähkötoiminen tarttuja. Tarttujan nostokyky on 5 kg ja avautuma 85 mm.



KUVA 1. UR10 testiympäristössä

4.6 Testiympäristössä havaitut haasteet ja ongelmat

Ensimmäiseksi yhteistyörobotti pultattiin tukevasti pöytään kiinni. Kokoonpanon osille tehtiin väliaikaiset jigat, joista ne voitaisiin ottaa aina vakiopaikoilta. Myös kokoonpanolle tehtiin oma jigi. Yhteistyörobotilla testattiin missä asennoissa, ja mistä kohdista osista pystyttiin ottamaan kiinni. Nopeasti huomattiin, että todennäköisesti ilman lisälaitteistoa ainoastaan muoviosien ja akkukennojen laittaminen kokoonpanoon olisi mahdollista.

Pääty- ja välikappaleiden sekä akkukennojen kohdalla huomattiin, että sen hetkellä tarttujalla ei pystytty ottamaan osista kiinni muuten, kuin niiden lyhyiltä sivuilta. Pitkiltä sivuilta komponentit olivat liian suuria kyseiselle tarttujalle. Akku-moduulin kokoonpano päätettiin tehdä testiympäristössä pystyasennossa, sillä vaaka-asennossa akkumoduulin osat eivät välttämättä pysyisi toisissaan kiinni. Pystyasennossa osat pysyvät päällekkäin painovoiman avulla. Tosin testiympäristössä käytetyt kokoonpanon osat eivät kaikki olleet täysin toleranssissa. Osa komponenteista oli tiukkoja ja osa väljiä toisiinsa nähden.

Pääty- ja välikappaleiden vienti kokoonpanoon onnistui hyvin. Akkukennojen asettaminen sen sijaan tuotti hieman hankaluuksia. Akkukennoa ei pysty asettamaan tarkasti kokoonpanoon, kun siitä on tartuttu lyhyemmältä sivulta. Tämän takia päätettiin, että teetetään tarttujaan 3D-tulostuspalvelun kautta lisäosa, jolla saadaan suurempi avautuma. Tarttujan lisäosa aiheutti sen, että kapein mahdollinen komponentti, josta voitiin ottaa kiinni, oli 42 mm. Tällöin pääty- ja välikappaleistakin täytyy ottaa kiinni niiden pitkiltä sivuilta. 3D-tulostettu tarttuja ei kuitenkaan ollut tarpeeksi vahva, ja sen tilalle laitettiin neljästä kulmaraudasta tehty tarttuja, joka sekin aiheutti hieman virhettä kulmarautojen taipuessa. (kuva 2).



KUVA 2. Robotiq 2F-85 tarttuja ja siihen rakennettu lisäosa

Testiympäristössä havaittiin lisäksi, että päällekkäin asetettujen välikappaleiden noukkiminen jigistä ei onnistunut joka kerta. Välikappaleet tarttuivat toisiinsa kiinni, joten pinon toiseksi ylimmästä kappaleesta piti välillä pitää kiinni robotin noukkiessa päällimmäisen. Tämä ongelma saatiin ratkaistua siten, että välikappaleita kallistettiin toiseen pätyyn ja nostettiin samaan aikaan, jolloin se ei tarttunut alempaan kappaleeseen. Havaittiin myös, että osia vietäessä kokoonpanoon piti ne painaa toisiinsa kiinni kohtuullisella voimalla. Varsinkin akkukenoja täytyi monesti painaa päältä useaan kertaan, että ne asettuivat kokoonpanoon oikein.

Yhden akkumoduulin esikokoonpanoon testiympäristössä meni aikaa noin 9 minuuttia. Tosin robotin ohjelmakoodi ei ollut optimaalinen, se sisälsi turhia välivaiheita ja komponenttien paikat eivät olleet myöskään optimaalisia. Kokoonpanoa testattiin tehdä myös manuaalisesti käsin, jolloin aikaa meni keskimäärin ripeällä tahdilla noin 1 minuutti ja 20 sekuntia. Tähän aikaan täytyy tosin lisätä lopuksi komponenttien haku ja valmiiden esikokoonpanojen siirtely, jolloin ajaksi arvioitiin kokonaisuudessaan 3 minuuttia. Eli käsin tehdessä kokoonpano on huomattavasti nopeampaa.

4.7 Konenäköjärjestelmän testaaminen

Koululta saatiin myös lainaan konenäköjärjestelmä Pickit M. Konenäköjärjestelmän avulla voidaan cobotilla noukkia kokoonpanon komponentteja sekalaisilta paikoilta eri orientaatioissa. Konenäköjärjestelmällä voidaan poistaa tilaa vievät sekä kalliit komponenttien syöttölinjat. Konenäköjärjestelmälle tulee opettaa mikä on sen noukkimisalue, noukittava kappale ja kappaleesta kohta, josta se noukitaan. Noukittava kappale voidaan opettaa konenäköille kahdella eri tapaa. Joko CAD-tiedostona, jolloin konenäkö saa täydellisen kuvan minkälainen kappale on. Tai ottamalla konenäköllä kuvia kappaleesta eri orientaatioissa. Jälkimmäinen tapa on heikompi, sillä useasti varsinkin syvyys suunnassa kappaleesta jää jotain näkemättä. Tosin konenäkössä on paljon säätöominaisuuksia, että monimutkaisetkin pinnat saadaan usein näkymään.

Konenäköjärjestelmässä on myös käytettävissä niin sanottuja noukkimisstrategioita eli missä järjestyksessä komponentit noukitaan. Voidaan noukkia esimerkiksi eniten opetettua mallia muistuttava kappale, päällimmäinen kappale tai suurimassa koordinaattiakselin arvossa oleva kappale (reunimmainen kappale). Kappaleen noukkimismahdollisuutta voidaan kasvattaa muun muassa noukkimiskulman lisäämisellä, noukkimispisteiden lisäämisellä tai sillä kuinka paljon kuvattu kappale muistuttaa prosentuaalisesti opetettua kappaletta. Konenäköjärjestelmässä on lisäksi sisäänrakennettuna noukkimisalueen ja työkalun välinen törmäyksen esto, noukittavan kappaleen ja noukkimisalueen välinen törmäyksen esto, sekä noukittavan kappaleen ja muiden kappaleiden välinen törmäyksen esto.

Testausvaiheessa havaittiin, että koulun konenäköjärjestelmä oli kuitenkin vanhempaa versiota, jossa kappaleen CAD-opetustapaa ei vielä ollut. Ohjelmistopäivityksellä pystyttäisiin tämä ominaisuus lisäämään, mutta vanhemman järjestelmän prosessori ei sitä tukenut. Kokoonpanon kaikki kappaleet saatiin kuitenkin kohtalaisesti tunnistettua opettamalla niiden geometria järjestelmälle kameran avulla. Ongelmaksi aluksi syntyi kuitenkin kappaleiden noukkiminen, sillä jostakin syystä konenäköjärjestelmä antoi väärän noukkimispisteen tunnistettuaan kappaleen. Robotti lähti noukkimaan kappaletta väärästä pisteestä sekä väärässä orientaatioissa. Robotin ohjelmakoodin pohjana käytettiin Pickit:n tarjoamaa yksinkertaista esimerkkiohjelmia (liite 3.).

Ongelma saatiin kuitenkin ratkaistua määrittämällä robotille kokonaan uusi TCP ja kääntämällä koordinaattiakselisto eripäin Pickit-ohjelmistossa. Koulun konenäköjärjestelmän säätöparametrejä tarkastellessa havaittiin myös, että uudemman version (varsinkin Pickit M-HD) säätöparametrit olivat paljon monipuolisempia kuin koulun versiossa. Esimerkiksi uudessa versiossa pystytään määrittelemään yhdelle mallille useita eri pisteitä mistä se voidaan noukkia. Vanhemmassa versiossa voidaan määrittää yhdelle mallille vain yksi piste mistä se yrittää ottaa kappaleesta kiinni.

Välikappaleiden kohdalla ongelmaksi syntyi se, että kameralle välikappaleen geometria näytti monesti 180° :n peilikuvalta, jolloin se otti välillä välikappaleesta väärältä puolelta kiinni. Tällöin välikappale tuotiin laskupaikalle väärinpäin. Todennäköisesti mallin CAD-opetuksella tätä ongelmaa ei olisi, koska silloin järjestelmä tietää täsmälleen minkälainen poimittava kappale on. Lisäksi virhettä aiheutti se, että kamera ei ollut täysin noukkimisalueen yläpuolella. Kiinnittämällä kameran robottiin saataisiin aina täydellinen kuva suoraan noukkimisalueen yläpuolelta. Kamera ei myöskään heiluisi, jos se olisi robotissa kiinni.

Akkukennojen poimimista testattiin, siten että ne otettiin styroksista Pickit:n avulla ja asetettiin toiseen styrokseen Universal Robots:n pallet-ominaisuuden avulla. Tämä rutiini onnistui lähes virheettömästi, mutta muutamia kertoja robotin asettaessa kennoa uuteen styrokseen, osui kennon reuna styroksin kolon reunaan, ja

kennon asettaminen epäonnistui. Tämä johtui todennäköisesti Pickit:n määrittämisen noukkimispisteen epätarkkuudesta. Kokoonpanoon voidaan lisätä painovoimalla toimiva komponenttien keskitin. Komponentit otettaisiin ensiksi Pickit:n avulla ja pudotettaisiin keskittäjään, josta ne voitaisiin ottaa robotin tarkkuudella.

5 LAYOUTIN SUUNNITTELU

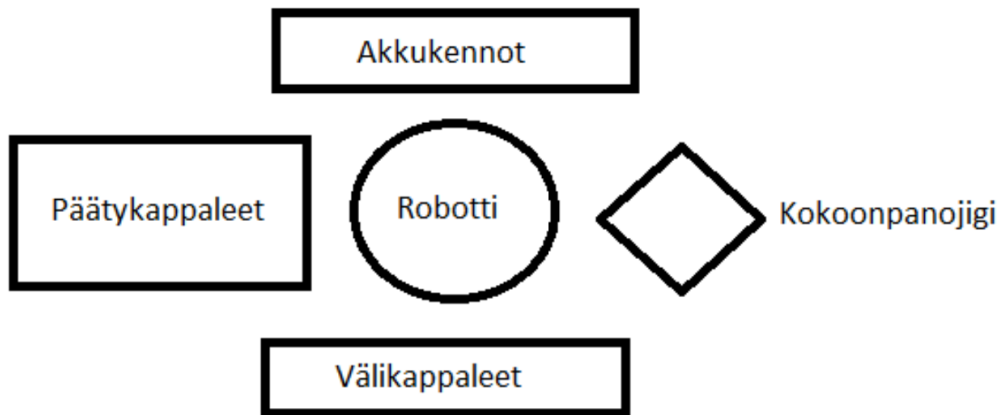
5.1 Tavoiteltu suorituskyky

Manuaalisen kokoonpanosolun tuotantokapasiteetiksi Celltech arvioi noin 10000 akkumoduulia vuodessa kolmella kokoonpanijalla. Tämä on noin 40 kappaletta päivässä, jos vuodessa on 253 työpäivää. Yhteistyörobotin tehdessä esikokoonpanoja jatkuvalla syötöllä, menee sillä testiympäristössä havaitulla 9 minuutin kokoonpanojalla, yhteensä 6 tuntia 40:n esikokoonpanon tekemiseen. Huomioon on otettava, kuitenkin robotin mahdollinen käyntiaika, joka riippuu osien puskurissa olevasta määrästä. Eli kuinka monta akkumoduulin esikokoonpanoa robotti pystyy kokoonpanemaan kerrallaan ilman ihmisen väliintuloa.

Tavoitteena puskuriin on saada vähintään 8 akkumoduulin osat. Tällöin robotin puskuri tulee täyttää 72 minuutin välein ja yhteensä 5 kertaa vuoron aikana. Puskurin täyttämiseen menee arviolta maksimissaan 10 minuuttia. Yhteensä 40 akkumoduulin kokoonpanoon menee aikaa tällöin 410 minuuttia eli noin 6,8 tuntia. Puskuria kasvattamalla saataisiin tuotantokapasiteettiäkin kasvatettua, koska silloin sitä ei tarvitse täyttää niin usein. Lisäksi tavoitteena on, että työvuoron lopussa ihminen täyttää puskurin ja yhteistyörobotti jää illaksi valvomatta tekemään esikokoonpanoja. Mitä suurempi puskuri on, sitä enemmän seuraavana aamuna on esikokoonpanoja viimeisteltäviksi.

5.2 Robotin paikka kokoonpanossa

Robotin paikka kokoonpanossa tulisi olla sellainen, että sillä on lyhyin matka paikoille, joissa se käy eniten. Eli robotin tulisi olla lähimpänä akkukennoja ja välikappaleita, joita kokoonpanossa on eniten. Lisäksi kokoonpanojigin tulisi olla hyvin lähellä näitä. Esimerkiksi kokoonpanojigi voisi olla akkukennojen ja välikappaleiden puskurin välissä (kuvio 5). Robotti voitaisiin kiinnittää lattialle tai pöytään, kuten testiympäristössä. Vaihtoehtoisesti robotti voidaan asentaa seinään tai telineestä ylösalaisin.



KUVIO 5. Hahmotelma robottikeskeisestä kokoonpanosolusta

5.3 Komponenttien tuonti robotille

Komponenttien tuominen robotille on tärkeä osa kokoonpanon onnistumista. Komponenttien tulee olla lähellä robottia ja niiden noukkimapaikan pitää olla tarkasti toistettavissa, että robotti ottaa niistä oikein kiinni. Lisäksi komponentit pitää saada tuotua robotille siten, että robotin ohjelmakoodiin tulee mahdollisimman vähän paikkapisteitä. Mitä vähemmän paikkapisteitä komponenttien noukkimiselle on, sitä yksinkertaisempi robotin ohjelmakoodista tulee, sekä tarkkuus paranee. Konenäköjärjestelmällä pystytään poistamaan monimutkaiset komponenttien syöttöjärjestelmät ja yksinkertaistamaan koko prosessia.

5.4 Jigien suunnittelu

Jigit tulee suunnitella kaikille komponenteille siten, että ne pysyvät paikallaan robotin noukkiessa niitä, ja että niiden puskurista saadaan mahdollisimman suuri. Kokoonpanon jigien tulee olla sellainen, että kokoonpano pysyy paikallaan, kun komponentteja asetetaan siihen ja valmis kokoonpano on mahdollista helposti siirtää eteenpäin.

5.4.1 Akkukennot

Akkukennot saapuvat Celltech:lle styroksilaatikoissa, joissa yhdessä on paikat yhteensä 16 kennolle. Kahdeksalle akkumoduulille tarvitaan 96 akkukennoa eli 6 styroksilaatikollista. Styroksilaatikon pituus on 37 cm ja leveys 31 cm. Yksi vaihtoehto kennojen tuomisesta robotille on rullarata. Rullaradalle voitaisiin laittaa styroksilaatikoita peräkkäin siten, että rullaradassa on pieni kallistuskulma, jolloin robotti voisi nostaa kennot styroksista rullaradan toisessa päässä. Styroksin tullessa tyhjäksi nostaisi robotti tyhjän styroksin pois rullaradalta, ja uusi liukuisi paikalleen.

Kuvassa 3 oleva rullarata on 3 metriä pitkä, jolloin siihen mahtuisi 9 styroksilaatikkoa, joissa on 12 akkumoduuliin tarvittavat kennot. Lisäksi rullarata on korkeussäädettävä. Rullaradalle on rakennettava kaiteet, sekä päätyvaste että styroksilaatit pysyvät keskitettynä ja eivät putoa rullaradalta.



KUVA 3. AJ Tuotteet Rullarata Route

5.4.2 Välikappaleet

Välikappaleita pystytään pinoamaan ainakin 11 kappaletta päällekkäin. Vaihtoehtona välikappaleiden tuomiseen robotille on myös rullarata, mutta 11 välikappaleen pino ei ole järin tukeva, jolloin sille pitäisi rakentaa erikseen tuet ja jokin alusta, jolla se liikkuisi. Vaihtoehtona oli myös pyörivä pöytä, jossa olisi välikappaleiden pinoja. Robotti hakisi kokoonpanoon tarvittavat välikappaleet ja pöytä pyörisi seuraavaan asentoon, jossa olisi uusi pino välikappaleita.

Parempi ratkaisu on kuitenkin konenäköjärjestelmän lisääminen robottiin. Välikappaleet tulevat Celltech:lle kuormalavalla, jossa ne ovat ”pötköissä” kiinni toisissaan. Konenäön avulla robotti voitaisiin opettaa ottamaan välikappale kuormalavalta tietyssä orientaatioissa ja asettamaan se kokoonpanoon. Kuormalavalle mahtuu satoja välikappaleita, jolloin puskurista saataisiin suuri. Konenäköjärjestelmää pystyttäisiin hyödyntämään myös akkukennojen ja päätykappaleiden otamisessa.

Konenäköjärjestelmä voisi olla esimerkiksi testiympäristössäkin kokeiltu Pickit M, joka voidaan liittää robottiin kiinni. Pickit M:llä pystytään havaitsemaan pienimmillään kappaleita, joiden koko on 50 x 50 x 10 mm. Pickit M:n tarkkuus on alle 3 mm ja toistettavuus alle 1 mm. Konenäön tarkkuus saattaa olla ongelma, sillä komponenttien asettaminen kokoonpanoon on hyvin tarkkaa, joten komponenteista on tartuttava juuri oikeasta kohdasta. Ratkaisu voi olla välipiste, jossa komponentti keskitettäisiin ja otettaisiin robotin tarkkuudella tarttujaan. Pickit:llä on myös olemassa tarkempi konenäkökamera PickIt M-HD.

5.4.3 Päätykappaleet

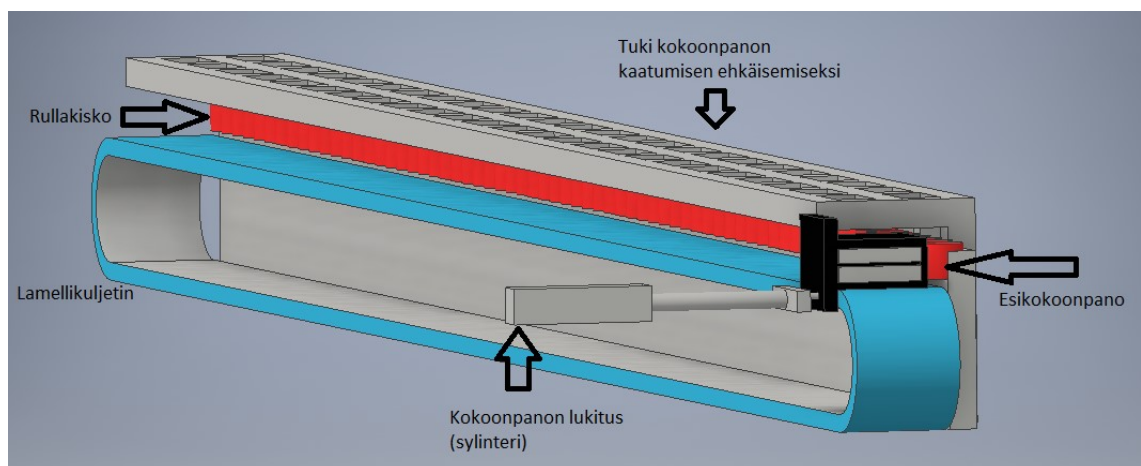
Päätypaloja ei pystytä pinoamaan kovin montaa kerrosta päällekkäin niiden epäsymmetrisyyden takia. Päätypalat toimitetaan kuormalavalla, jossa ne ovat pahlavilaatikoissa. Päätypalat laitetaan kuormalavalle tasaisin välein, josta konenäön avulla ne voidaan poimia. Kuormalavalle täytyy vain merkitä lattiaan paikka, johon se tulee asettaa.

5.4.4 Kokoonpano

Kokoonpanojigissä olisi hyvä olla jonkinlainen puristin, että komponentit asettuvat kunnolla kiinni toisiinsa. Robotin tarttujalla painaminen on yksi vaihtoehto, mutta erillisellä puristimella saataisiin nopeutettua prosessia, kun robotin ei tarvitse tehdä näitä työvaiheita. Lisäksi tarttujalla kokoonpanon painaminen havaittiin testiympäristössä olevan hieman epätarkkaa.

Kokoonpanon jiginä voisi olla esimerkiksi pyörivä pöytä, jossa on 8 eri kokoonpanopaikkaa. Yhteistyörobotti kokoonpanee yhden akkumoduulin, jonka jälkeen pöytä pyörii servomoottorin avulla seuraavaan kokoonpanopisteeseen. Ongelmana on kuitenkin, että tämän jigin skaalaaminen suuremmaksi ei ole kuitenkaan mahdollista, sillä robotin ulottuma ei siihen riitä.

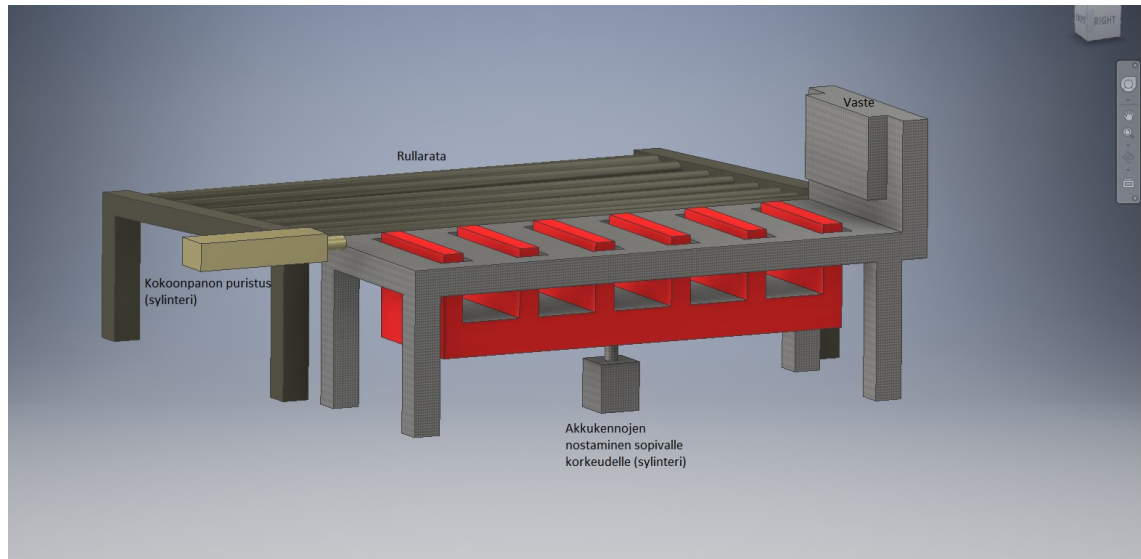
Yksi vaihtoehto on lamellikuljetin, jossa kokoonpano on tuettu rullakiskovasteeseen esimerkiksi paineilmasylinterillä. Yhden akkumoduulin valmistuessa paineilmasylinteri vapauttaisi kokoonpanon ja liikkuisi se sopivan matkan eteenpäin lamellikuljettimella, että tilaa on rakentaa seuraava kokoonpano. Akkumoduulin liikkuessa lamellikuljettimella sitä tukisi sen yläpuolella oleva kisko, että akkumoduuli ei pääse kaatumaan.



KUVA 4. Hahmotelma kokoonpanojigistä lamellikuljettimella

Edellisissä vaihtoehdoissa kokoonpano tehtäisiin pystyasennossa, jossa ongelmana saattaa olla kokoonpanon kaatuminen. Vaaka-asennossa ongelmana on se, että akkukennot ja muut komponentit eivät kohdistu toisiinsa nähden oikein.

Ratkaisu voisi olla pöytä, jossa on reiät akkukennoille. Sylinteri nostaisi akkukennot rei'istä oikealle korkeudelle ja paineilmasylinteri puristaisi sivusta kokoonpanon komponentit kiinni toisiinsa seinämää vasten. Tämän jälkeen kokoonpano työnnettäisiin rullaradalle ja uusi kokoonpano voitaisiin aloittaa.



KUVA 5. Hahmotelma kokoonpanojigipöydästä

5.5 Tarttuja

Alipainetarttuja on yksi vaihtoehto, mutta perinteisellä leukamaisella tarttujalla saadaan komponenteista otettua kiinni useammalla eri tavalla. Lisäksi päätykappaleiden ja välikappaleiden tasaiset pinnat ovat sen verran pieniä, että alipainetarttujaan tarvittaisiin useita pieniä imukuppeja, että komponentit pysyvät varmuudella kiinni tarttujassa. Leukamaisella tarttujalla saadaan paremmin painettua komponentteja toisiinsa kiinni, alipainetarttujalla tämä ei ole käytännössä mahdollista. Leukamaisen tarttujan on kuitenkin avauduttava vähintään komponenttien leveiden sivujen pituiseksi, jos kokoonpano tehdään pystyasennossa. Esimerkiksi Robotiq 2F-140 -tarttujassa on tarpeeksi suuri avautuma.

5.6 Robotin valitseminen

Yhteistyörobotin valitsemisen pääkriteerinä tähän prosessiin on sen ulottuma ja turvallisuus. Ulottuman täytyy olla kohtuullisen suuri, että robotti ylettää noukkimaan komponentit kuormalavojen joka pisteestä. Lisäksi sen hyötykuorma, tarkkuus, nopeus, hinta, helppokäyttöisyys ja lisävarusteet vaikuttavat valintaan. Cobottien hinnat ovat yksittäiselle yksikölle saatuja listahintoja. Näiden kriteerien pohjalta vaihtoehdot rajautuivat viiteen eri malliin (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Yhteistyörobottien vaihtoehdot ja niiden ominaisuudet

Yhteistyörobotti	UR10 CB 3.1	UR10e	Techman TM12	Omron TM12	Motoman Yaskawa HC10
Hyötykuorma (kg)	10	10	12	12	10
Ulottuma (mm)	1300	1300	1300	1300	1200
Toistettavuus (mm)	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1
Suurin nopeus (m/s)	1	1	1,3	1,3	1
Hinta (€) Alv 0%	30000	35600	32900	33000	44000
Turvallisuus	Joint Sensing	Joint Sensing	Joint Sensing	Joint Sensing	Joint Sensing
Sisäänrakennettu konenäkö	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei

Valittujen mallien ominaisuudet ovat hyvin samanlaisia keskenään. Yhteistyörobotit Techman TM12 ja Omron TM12 ovat käytännössä sama robotti, sillä Techman ja Omron tekevät yhteistyörobotteja strategisessa yhteistyössä. Techmanin ja Omronin yhteistyörobotissa etuna muihin malleihin on sisäänrakennettu konenäköjärjestelmä. Tosin tämä konenäkö ei ole todennäköisesti yhtä kehittynyt kuin esimerkiksi Pickit konenäköjärjestelmät. Kaikki valitut mallit ovat teho ja voima rajoitettuja, niiden nivelissä olevat voimasensorit pysäyttävät robotin, jos ne huomaavat liikaa vastusta.

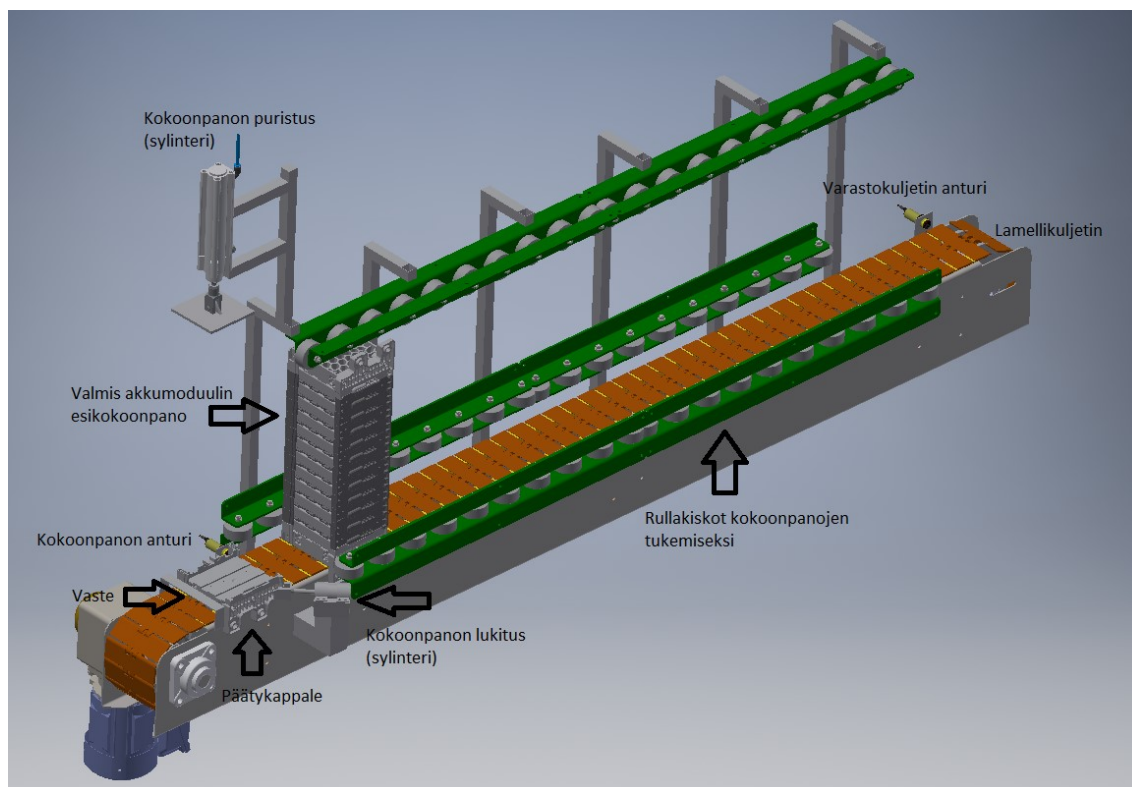
Tarkkuuksissa, nopeuksissa, hyötykuormissa ja ulottumissa coboteilla on vain pieniä eroja. Lisäksi kaikki cobotit ovat samaa hintaluokkaa paitsi Motoman, jolle saatiin arvioiduksi hinnaksi muita hieman korkeampi. Universal Robots:n coboteilla on yksi suuri valtti muihin merkkeihin nähden. Sillä sen kaikki nivelet kiertyvät $\pm 360^\circ$, muilla merkeillä ne ovat luokkaa $\pm 180^\circ$ - $\pm 270^\circ$. Myös muita merkittäviä yhteistyörobotteja suurin piirtein samoilla ominaisuuksilla olisi saatavilla, mutta näihin viiteen malliin päädyttiin siitä syystä, että ne ovat jollain tapaa entuudestaan jo tuttuja sekä niitä on hyvin saatavilla.

6 RATKAISU

Layout ratkaisuksi valittiin solulayout, josta saatiin kaksi eri versiota. Solulayoutiin päädyttiin siltä pohjalta, että se on helpoin toteuttaa ja lisäksi se on skaalautuva. Solulayout voidaan helposti monistaa tuotantotilaan useaan kertaan. Solulayoutin versiot ovat periaatteessa muuten samanlaisia, paitsi valmiiden esikokoonpanojen solusta pois vieminen ja kokoonpanojigit ovat erilaiset. Molemmat versiot ovat robottikeskeisiä kokoonpanosoluja. Lisäksi robottisolujen ulostulosta voidaan jatkaa seuraavan työvaiheeseen eli pohjalevyn kiinnittämiseen.

6.1 Layout 1

Ensimmäisessä layout-vaihtoehdossa (kuva 7) kokoonpano tehdään pystyasennossa lamellikuljettimen kokoonpanojigissä. Lamellikuljetin liikkuu aina kokoonpanon valmistuessa eteenpäin, jolloin tilaa on tehdä uusi kokoonpano. Tämänlaisia kokoonpanojigejä mahtuu soluun kolme kappaletta. Lamellikuljettimien ollessa kahden metrin pituisia, mahtuu niille valmiita esikokoonpanoja yhteensä 39 kappaletta. Lamellikuljettimen toisessa päässä on anturi, joka havaitsee, kun kuljetin on täynnä, eikä pudota kokoonpanoja lattialle.

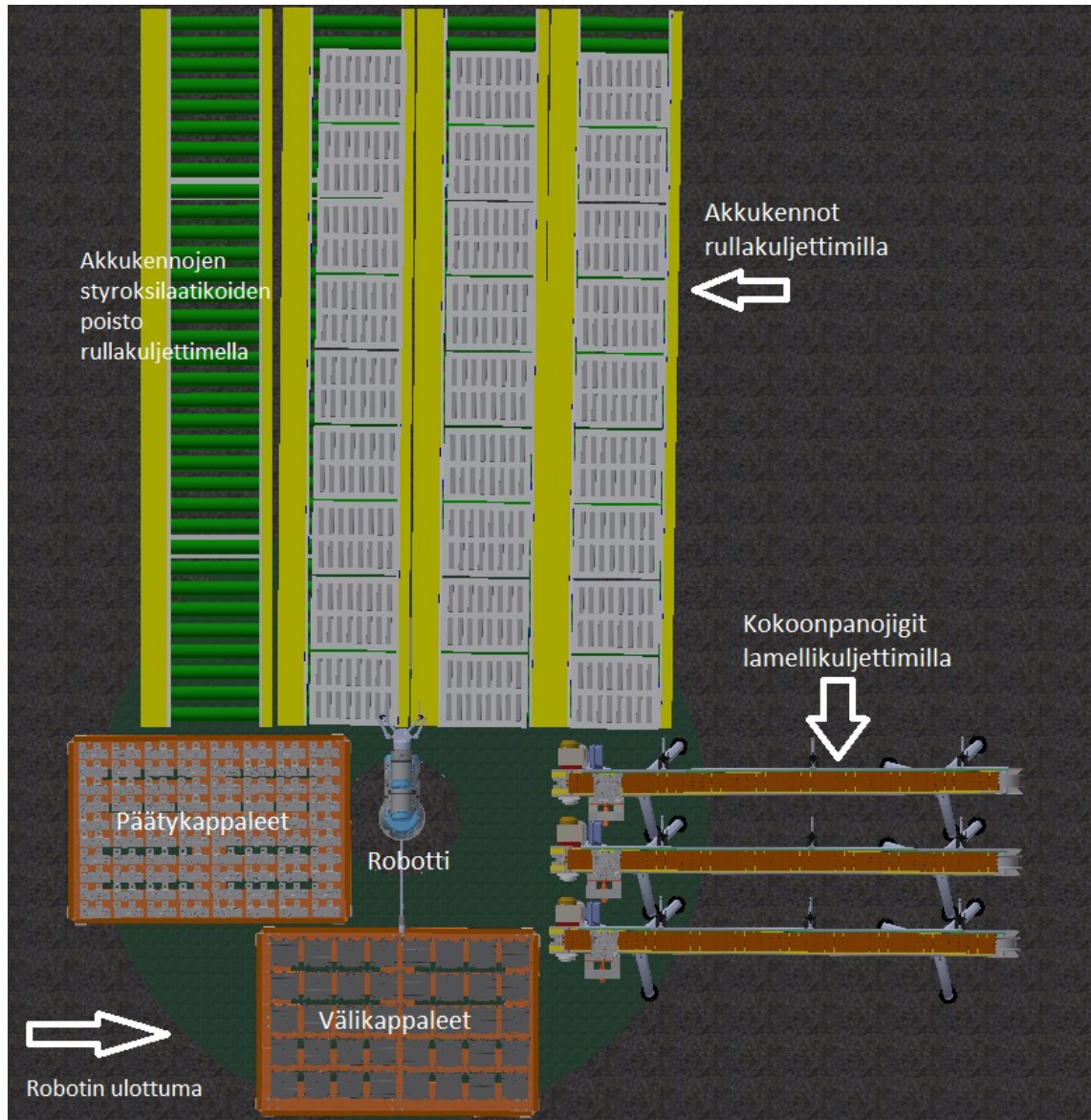


KUVA 6. Kokoonpanojigi lamellikuljettimella

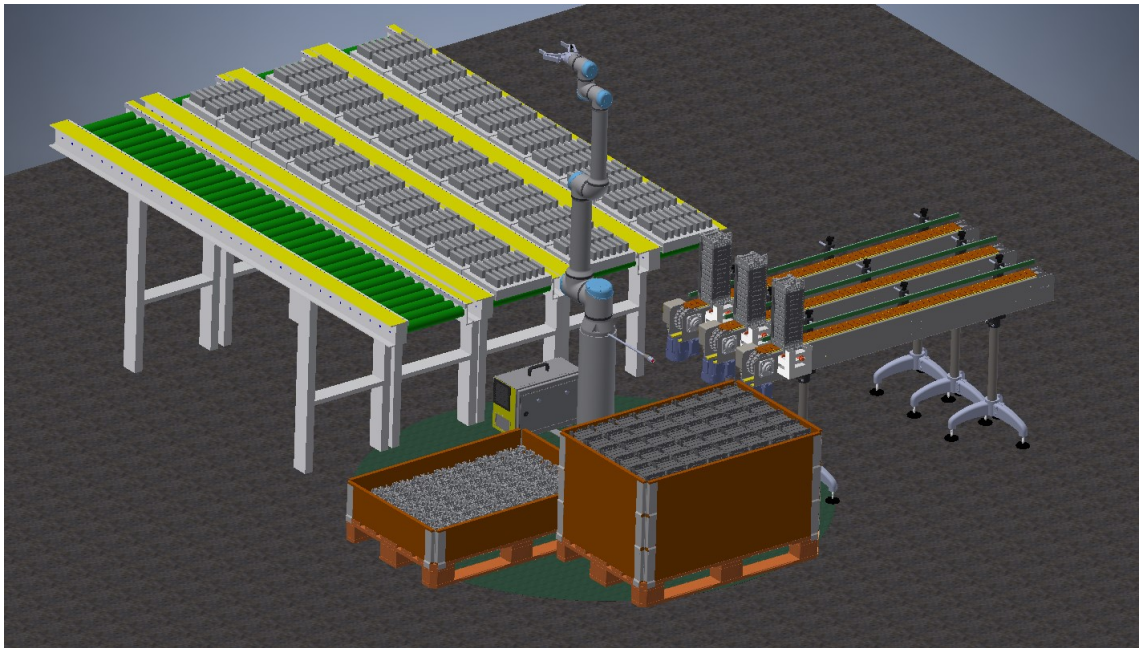
Akkukennot tuodaan kokoonpanosoluun kolmella rullakuljettimella, joihin mahtuu 27 styroksilaatikollista kennoja, mikä vastaa 36 kokoonpanoon tarvittavia akkukennoja. Rullakuljettimissa on pieni kaato, jolloin styroksilaatikot valuvat aina robotin puoleiseen pätyyn vastetta vasten. Robotti ottaa konenäköjärjestelmän avulla kennot styroksista, kunnes se tulee tyhjäksi. Styroksin tyhjentyessä nostaa robotti sen toiselle rullakuljettimelle, jossa on kaato solusta poispäin. Samalla uusi täysi styroksilaatikko rullaa paikalleen. Styroksilaatikoita pystytään lisäämään rullakuljettimen toisesta päädyistä puskuriin robottiohjelman ollessa käynnissä.

Yhteistyörobotin ulottuma on merkittynä kuviin vihreänä ympyränä. Pääty- ja välikappaleiden eurolavat eivät mahdu täysin robotin ulottuman sisälle. Tämä ei kuitenkaan haittaa, sillä näiden komponenttien puskurista saadaan silti suurempi kuin akkukennojen. Ainoa ongelma on päätykappaleiden pinoaminen järkevästi niiden epäsymmetrisyyden takia. Päätykappaleita voidaan kuitenkin pinota ainakin kaksi kerrosta. Eurolavat voidaan asettaa soluun myös eri orientaatioissa. Eurolavoihin lisätään myös kaulukset, että komponentit eivät pääse kaatumaan. Ko-

nenäköjärjestelmä on kiinnitetty robottiin, joka on kiinnitetty paalumaiselle alustalle. Alusta auttaa robottia ylettämään kaikkiin komponentteihin korkeussuunnassa. Ilman alustaa välikappaleiden viimeisiin kerroksiin olisi robotin hankala ylettää eurolavojen kauluksien takia.



KUVA 7. Layout 1

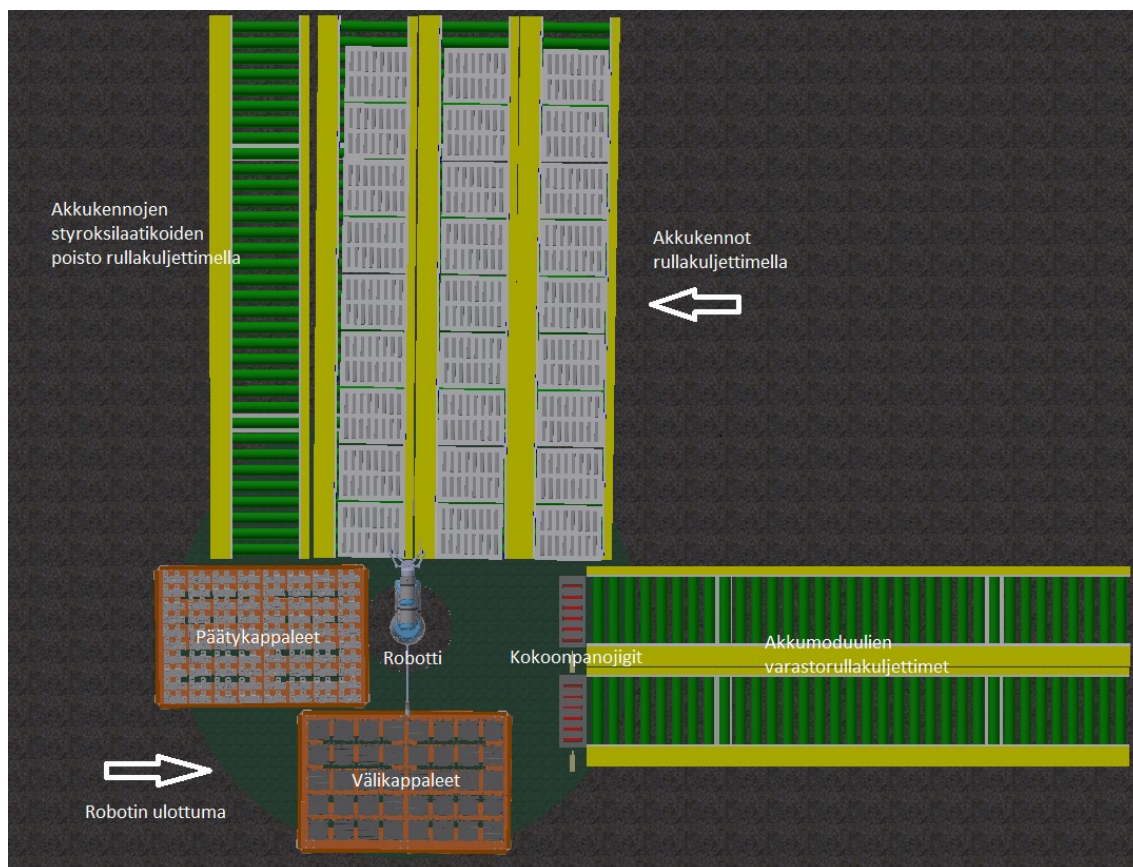


KUVA 8. Layout 1 3D-mallinnos

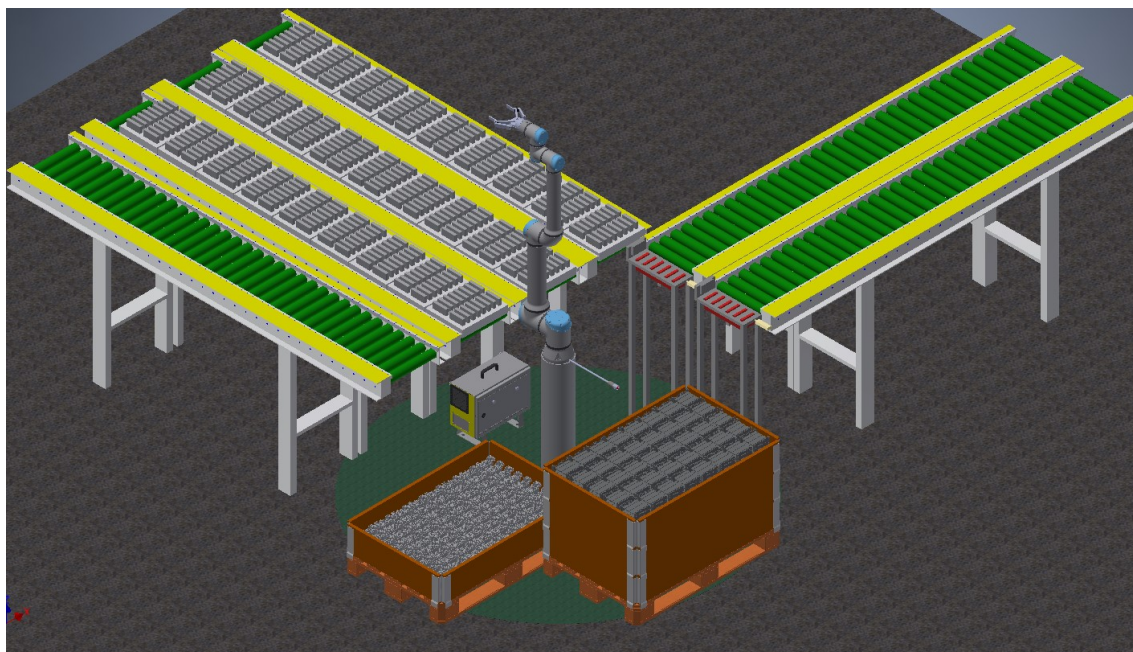
6.2 Layout 2

Toisessa layout-vaihtoehdossa kokoonpano tehtäisiin vaakatasossa, jolloin kokoonpanojigettä mahtuu soluun kaksi kappaletta. Kokoonpanojigistä valmis esikokoonpano työnnetään rullaradoille, joissa on pieni kaato. Etuna toisessa vaihtoehdossa on sen edullisuus, hintavan lamellikuljettimen sijaan käytetään paljon halvempia rullaratoja. Rullaradat ovat samoja kuin akkukennojen styroksilaatikoiden kuljettamiseen käytetyt. Rullaradoille mahtuu 40 valmista esikokoonpanoa. Molemmissa layout-vaihtoehdoissa etuna on se, että esikokoonpanot siirretään kuljettimilla pois robottisolusta, jolloin loppukokoonpanoa voitaisiin jatkaa tuotantolinja tyypillisesti.

Lisäksi kumpaankin vaihtoehtoon täytyy lisätä komponenttien laskualusta robotin ja kokoonpanojigien väliin. Laskualustalla komponentti keskitettäisiin painovoiman avulla, jolloin komponentista voidaan ottaa paremmin kiinni robotin tarkkuudella, jos esimerkiksi välikappale on jäänyt toisiin välikappaleisiin kiinni ja ote tarttujassa on muuttunut. Tällä varmistetaan, että komponentti menee oikeaan kohtaan kokoonpanojigissä. Kummassakin layout-vaihtoehdossa robotiksi on valittu UR10e.



KUVA 9. Layout 2



KUVA 10. Layout 2 3D-mallinnos

6.3 Kokoonpanosolun tuotantokapasiteetti

Molemmissa layout-vaihtoehdoissa tuotantokapasiteetti on samansuuruinen. Komponenttipuskuriksi rajoittuu akkukennojen vuoksi 36 esikokoonpanoa. Eli tällöin 9 minuutin kokoonpanoajalla pystyy solu toimimaan ilman ihmisen väliin tuloa noin 5,4 tunnin ajan. Celltech:n arvion mukaan kahden ihmisen tiimillä kuluu aikaa esikokoonpanoon 3 minuuttia ja loppukokoonpanoon 11 minuuttia. Robotilla aikaa esikokoonpanoon kuluu maksimissaan 9 minuuttia, todennäköisesti vähemmän.

Kokoonpanoajoilla voidaan laskea tuotantokapasiteetit päivässä ja vuodessa. Ihmisellä on arvioitu olevan työpäivässä 6 tuntia tehokasta työaikaa, robotille sama on arvioitu 7,75 tunniksi. Taulukossa 3 on merkittynä robotin ja kahden ihmisen tuotantokapasiteetit päivässä koko kokoonpanolle, esikokoonpanolle ja loppukokoonpanolle erikseen. Robotin kokoonpanoista vain esikokoonpano on tarkastelussa mukana, sillä loppukokoonpanoa ei tässä kohtaa olla vielä automatisoimassa. Robotin iltapuskuri tarkoittaa robotin valmistamaa esikokoonpanojen määrää illalla, kun sitä ei olla valvomassa.

TAULUKKO 3. Tuotantokapasiteetit päivässä

Tuotantokapasiteetti (päivä)	2x ihminen 6h (kpl)	Robotti 7,75h (kpl)	Robotti iltapuskuri (kpl)	Robotti yht. (kpl)
Koko kokoonpano	25,7	x	x	x
Esikokoonpano	120,0	51,7	36,0	87,7
Loppukokoonpano	32,7	x	x	x

Samat tuotantokapasiteetit ovat esitettynä taulukossa 4, mutta ne ovat skaalattuna vuoden ajanjaksolle (253 työpäivää).

TAULUKKO 4. Tuotantokapasiteetit vuodessa

Tuotantokapasiteetti (vuosi)	2x ihminen 6h (kpl)	Robotti 7,75h (kpl)	Robotti ilta puskuri (kpl)	Robotti yht. (kpl)
Koko kokoonpano	6505,7	x	x	x
Esikokoonpano	30360,0	13071,7	9108,0	22179,7
Loppukokoonpano	8280,0	x	x	x

Taulukosta 4 nähdään, että robottisolu valmistaa vuodessa noin 22000 esikokoonpanoa ja kahden ihmisen tehdessä pelkkiä loppukokoonpanoja saavat he valmiiksi vain reilut 8000 kokoonpanoa. Näiden lukujen suhteesta voidaan las-

kea, kuinka monta työntekijää on palkattava, että 22000 esikokoonpanoa saadaan viimeistelyä. Lisäksi taulukon 4 tiedoilla voidaan laskea, kuinka monta työntekijää tarvitaan, jos halutaan valmistaa 22000 akkumoduulia täysin manuaalisesti.

TAULUKKO 5. Tarvittava henkilöstömäärä 22000 akkumoduulin tavoitteeseen

Tarvittava henkilöstömäärä (22k kpl)	Henkilöä	Pyöristetty
Koko kokoonpano ihminen	6,8	7 hlö
Vain loppukokoonpano ihminen	5,4	5 tai 6 hlö

Taulukosta 5 nähdään, että tarvitaan 7 henkilöä, jos halutaan päästä 22000 akkumoduulin tavoitteeseen manuaalisessa kokoonpanosolussa. Jos esikokoonpano tehdään cobotilla, tarvitaan loppukokoonpanojen viimeistelyyn 5-6 henkilöä. Eli cobotti vähentää 1-2 henkilön tarpeen kokoonpanossa.

6.4 Investoinnin kustannuslaskelma

Investoinnin kustannuslaskelmaan sisällytetään kaikki komponenttien hankinnat, integraattorin veloitus kokoonpanojigin lopullisesta suunnittelusta ja käyttöönotosta, kuljetus kulut sekä muut kulut, joita robottisolun käyttöönotossa voi ilmetä. Integraattorin käyttäminen kokoonpanojigin suunnitteluun ja kokoonpanosolun käyttöönottoon on kannattavaa, sillä tällöin ei tarvitse itse murehtia koneenrakennukseen liittyvistä standardeista ja direktiiveistä. Kaikki kulut ovat listattuna taulukkoon 6 layout 1-vaihtoehdon osalta. Osa taulukon hinnoista on arvioituja, ja osa tarjouksen perusteella saatuja.

TAULUKKO 6. Layout 1 kustannuslaskelma

Komponentti/kuluerä	Määrä (kpl)	Hinta (€/kpl)	Yhteensä (€)
UR10e yhteistyörobotti	1	35600	35600
Pick-it MHD konenäköjärjestelmä	1	30000	30000
Robotiq 2F-140 tarttuja	1	3850	3850
Robottijalusta	1	2000	2000
Rullarata Route AJ Tuotteet	4	567	2268
Kokoonpanojigi	3	5000	15000
Suunnittelu/käyttöönotto	1	20000	20000
Kuljetus	1	3000	3000
Kaikki yhteensä			111718

6.5 Kuukausittaiset säästöt

Kuukausittaiset säästöt muodostuvat säästöistä, joita ei tarvitse maksaa palkattavalle henkilöstölle. Manuaalisessa kokoonpanosolussa täytyy laskelmien mukaan arviolta työskennellä 7 työntekijän, että 22000 akkumoduulin tavoite saavutetaan. Robottisolussa sama työntekijämäärä on 5-6 henkilöä. Yhden työntekijän kokonaiskulu arvioidaan olevan 40480€ vuodessa. Tällöin kuukausittaiset säästöt kahdesta työntekijästä ovat

$$\frac{40480\text{€}}{12} \cdot 2 \approx 6747\text{€}.$$

Tässä summassa ei ole kuitenkaan huomioituna kuinka paljon robottisolun kunnossapitoon ja sähkönkulutukseen menee rahaa. Tosin yhteensä näiden kulujen on arvioitu olevan kohtuullisen pieniä, ja lisäksi manuaalisessa kokoonpanosolussa on myös kuluja, joita ei ole huomioitu.

6.6 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuajan laskemisella voidaan helposti arvioida, kuinka kannattavaa robottisolun rakentaminen on. Takaisinmaksuaika pystytään laskemaan kaavalla 1

$$\text{Takaisinmaksuaika (kk)} = \frac{\text{Projektin hinta (€)}}{\text{Kuukausittaiset säästöt (€/kk)}}, \quad (1)$$

jossa projektin hinta on robottisolun investoinnin kustannuslaskelmassa saatu arvio ja kuukausittaiset säästöt ovat edellisessä kappaleessa arvioidut 6747€. Täten takaisinmaksuajaksi saadaan kaavalla (1)

$$\text{Takaisinmaksuaika (kk)} = \frac{111718 \text{ €}}{6747 \text{ €/kk}} \approx 16,56 \text{ kk}.$$

Mikä on noin 1,4 vuotta.

6.7 Sijoitetun pääoman tuottoaste

Sijoitetun pääoman tuottoaste (ROI) saadaan laskettua kaavalla 2

$$\text{ROI (\%)} = \frac{\text{Voitto investoinnista (€)} - \text{Investointi (€)}}{\text{Investointi (€)}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Kaavalla 2 saadaan taulukkoon 7 laskettua sijoitetun pääoman tuottoaste vuosina 1-5 solun käyttöönotosta. Robottisolun vuotuiseksi kunnossapidon hinnaksi on arvioitu 1000€. Taulukossa on mukana myös kumulatiivinen rahasumma, joka merkitsee kuinka paljon on säästetty solun käyttöönoton alusta.

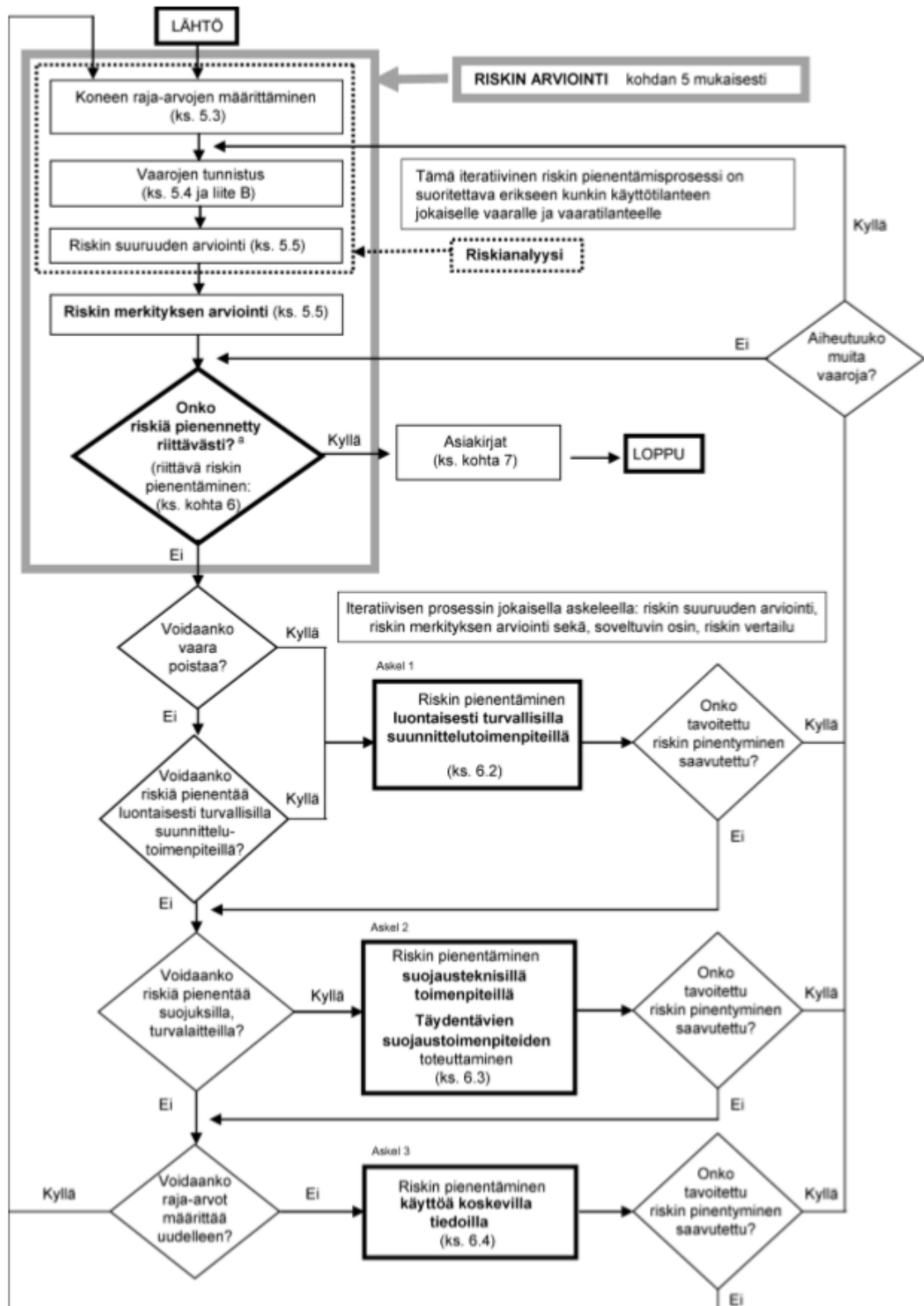
TAULUKKO 7. Robottisolun laskettu tuottoaste

Vuosi	Robottisolun kustannus	Vuotuiset säästöt	Vuotuinen kassavirta	Kumulatiivinen	ROI
	Alkuinvestointi, kunnossapito	Säästöt työvoimassa	(Vuotuiset säästöt - Robottisolun kustannus)		Sijoitetun pääoman tuottoaste
1	111 718 €	80 964 €	-30 754 €	-30 754 €	-27,5 %
2	1 000 €	80 964 €	79 964 €	49 210 €	44,0 %
3	1 000 €	80 964 €	79 964 €	129 174 €	115,6 %
4	1 000 €	80 964 €	79 964 €	209 138 €	187,2 %
5	1 000 €	80 964 €	79 964 €	289 102 €	258,8 %

Taulukosta 7 nähdään, että ensimmäisenä vuotena ROI on miinusmerkinen, koska kokoonpanosolu ei maksa itseään takaisin vielä tuona vuonna. Toisena vuonna ROI kääntyy positiiviseksi, kun solusta kertyvät säästöt ylittävät investoinnin määrän. Viiden vuoden jälkeen on kokoonpanosolu maksanut itsensä jo noin 2,5 kertaa takaisin.

7 RISKIN PIENENTÄMISPROSESSI

Yhteistyörobotit kuuluvat nimensäkin mukaan ihmisten kanssa yhteistyöhön, mutta ne sisältävät silti riskejä, jonka takia riskianalyysi on tehtävä. Varsinkin kun robottisolussa on muitakin liikkuvia komponentteja kuin itse robotti. Yhteistyörobotit ovat teknologiassa kohtuullisen uusia keksintöjä, mutta niistä löytyy jo joitain standardeja. Esimerkiksi teollisuusrobottien ja robottijärjestelmien standardeja ISO 10218 osa 1 ja 2 sovelletaan yhteistyörobottien käytössä. Lisäksi yhteistyöroboteille löytyy oma standardinsa englannin kielellä ISO/TS 15066. Tämän lisäksi robottisolussa täytyy noudattaa konedirektiivin 2006/42/EY mukaisia ohjeita. Riskianalyysi tehdään standardin ISO 12100 menetelmien mukaan. Standardissa ISO 12100 riskin arviointi ja riskin pienentämiseen käytetään kuviossa 6 olevaa strategiaa.



KUVIO 6. Kaaviollinen esitys riskin pienentämisprosessin iteratiivisesta kolmen askeleen menetelmästä (SFS 12100:2010, 30)

7.1 Riskin arviointi

Riskin arviointiin kuuluu ISO 12100 mukaan kolme kohtaa koneen (robottisolun) raja-arvojen määrittäminen, vaaran tunnistaminen ja riskin suuruuden arviointi.

7.1.1 Robottisolun raja-arvojen määrittäminen

Raja-arvoja voivat olla käyttörajat, tilarajat, aikarajat ja muut raja-arvot. Kokoonpanosolu on rajoitettu vain sille tarkoitettuun käyttöön eli akkumoduulien kokoonpanoon. Kokoonpanosolulla ei ole muita toimintatapoja kokoonpanon lisäksi, paitsi toimintahäiriöiden esiintyessä. Kokoonpanosolussa ei ole ihmiselle muita fyysisiä rajoituksia kuin, että on pystyttävä siirtämään maksimissaan 10 kg painoisia esineitä. Kokoonpanosolun käyttäjä on koulutettava kokoonpanon toimintaperiaatteeseen.

Tilaraja robotilla on 1300 mm joka suuntaan sen kiinnityspisteestä katsoen. Lamellikuljettimen liikkuminen tapahtuu sen koko pituudella, samoin rullaradoilla. Robottisolun sisällä kokoonpanon aikana ei ole ihmiselle tilatarvetta, mutta pääty- ja välikappaleiden puskuria täytettäessä tulee olla vapaa pääsy niiden paikoille. Akkukennojen puskuri pystytään täyttämään solun ulkopuolelta. Robottisolun pysäyttäminen on oltava mahdollista solun sisältä ja sen ulkopuolelta. Käynnistäminen ainoastaan solun ulkopuolelta, paitsi käsiajoa voi käyttää solun sisällä.

Kokoonpanosolun elinikä on hankala arvioida, mutta mahdollisesti kuluvia osia tulee olla nopeasti saatavilla. Tällaisia osia ovat muun muassa kokoonpanojigissä akkumoduulia koskevat pinnat. Huollot kokoonpanosolulle tehdään vuosittain, sekä nopeat tarkastukset kuukausittain.

Kokoonpanosolussa käsitellään pääasiassa muoviosia sekä metallisia akkukennoja, jotka voivat rikkoutuessaan kehittää vaarallisia kaasuja. Kokoonpanosolun puhtaana pito on tärkeää laitteiden toimivuuden kannalta. Lattia tulee päivittäin lakaista nopeasti suurimmasta pölystä ja roskista. Lisäksi konenäkökameran

linssi tulee pitää puhtaana ja sen siistimiseen tulee käyttää vain siihen tarkoitettuja välineitä. Kuukausittaisten tarkastuksien aikana tulee laitteiden ilmansuodattimet puhdistaa.

7.1.2 Vaaran tunnistaminen

Vaaroja voidaan tunnistaa robottisolun koko elinkaaren ajalta esimerkiksi kuljetuksesta, käyttöönotosta ja purkamisesta. Tässä työssä keskitytään kuitenkin robottisolun käytössä ilmaantuviin vaaroihin. Kokoonpanosolussa ilmaantuvat vaarat ovat seuraavia.

1. Akkukennojen pudottamisesta tai kolhimisesta aiheutuva kennon rikkoutuminen ja siten vaarallisten kaasujen vapautuminen
2. Robotin tai muun liikkuvan komponentin väliin jääminen (kokoonpanojigi ja valmiit akkumoduulit)
3. Robotin törmäminen ihmiseen (pääalueelle)
4. Viiltohaavat rullaratojen, kokoonpanojigin tai muun toimilaitteen terävistä reunoista
5. Sähköisku viallisesta sähkölaitteesta tai rikkoutuneesta sähköjohdosta
6. Kokoonpanosolun odottamaton käynnistyminen
7. Valmiin akkumoduulin pudottaminen

7.1.3 Riskin suuruuden arviointi

Jokaiselle vaaralle on tehtävä riskin suuruuden arviointi. Arvioidaan kuinka vakavan vahingon vaara voi aiheuttaa ja kuinka todennäköisesti se esiintyy. Taulukossa 8 on esitettyinä vaarojen vakavuus asteikolla erittäin vakava vaikutus, vakava vaikutus, selkeä vaikutus, vähäinen vaikutus ja ei vaikutusta. Esiintymistodennäköisyydet on arvioitu asteikolla hyvin todennäköinen, todennäköinen, mahdollinen, epätodennäköinen ja hyvin epätodennäköinen. Näiden kahden asteikon perusteella päätetään, tuleeko tehdä tietyn riskin eteen toimenpiteitä, että sitä saadaan pienennettyä.

TAULUKKO 8. Vaarojen vakavuus ja todennäköisyys

Vaara	Vakavuus	Todennäköisyys
1	Vakava vaikutus	Mahdollinen
2	Vähäinen vaikutus	Todennäköinen
3	Selkeä vaikutus	Mahdollinen
4	Vähäinen vaikutus	Todennäköinen
5	Vakava vaikutus	Epätodennäköinen
6	Vähäinen vaikutus	Mahdollinen
7	Vähäinen vaikutus	Mahdollinen

7.2 Riskin pienentäminen

Riskin pienentämisessä ensimmäinen askel on miettiä, että pystytäänkö luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä poistamaan vaarat kokonaan. Esimerkiksi rajoittamalla käyttövoimaa tai työaluetta. Kokoonpanosolussa listattuja vaaroja ei todennäköisesti pystytä kokonaan poistamaan, jolloin on turvauduttava riskin pienentämisen toiseen askeleeseen. Toisessa askeleessa pyritään lisäämään sovellukseen suojausteknisiä toimenpiteitä.

Vaara 1 eli akkukennoista vaarallisten kaasujen vapautumisen vakavuutta ei pystytä pienentämään muuten kuin muuttamalla itse tuotetta, mutta todennäköisyyttä pystytään pienentämään helpostikin. Ensinnäkin kokoonpanosolun lattia robotin ulottuvuusalueella on pehmustettava esimerkiksi vaahtomuovilla. Lisäksi kaikkien laitteiden pinnat joihin akkukenno voisi virhetilanteessa osua, on muotoiltava siten, että se ei pysty puhkaisemaan akkukennoa. Yhteistyörobotin asetuksista voidaan myös säätää alueita, joihin robotti ei saa mennä.

Toisen vaaran eli liikkuvien komponenttien väliin jäämisen vakavuus on pieni, sillä käytetyt voimat ovat kokoonpanosolussa pieniä. Kokoonpanosolun väärinkäytössä se saattaa kuitenkin esiintyä useasti. Riskiä pystytään pienentämään tekemällä ohjeet solun oikeaoppiseen käyttämiseen ja kouluttamalla henkilökunta siihen. Robotille voidaan merkitä lattialle sen ulottuvuusalue muistuttamaan siitä, kuinka pitkälle robotti ylettää. Kolmannen vaaran vakavuus on selkeä, sillä

ihmisen pääalueelle ei saa tulla minkäänlaisia iskuja. Edellisillä toimenpiteillä vaaran todennäköisyys saadaan kuitenkin epätodennäköiseksi.

Neljännän vaaran riskin pienentämiseen tarvittavat toimenpiteet ovat osittain samat kuin kolmen ensimmäisen vaaran. Viiltohaavojen todennäköisyyttä voidaan vähentää kokoonpanosolun oikeaoppisella käytöllä ja suunnittelemalla laitteet siten, että ne eivät sisällä teräviä kulmia. Lisäksi käyttämällä viiltosuojahanskoja todennäköisyys pienenee.

Sähköiskun saaminen on vakava, joskin epätodennäköinen vaara. Todennäköisyys laskee, kun tarkastutetaan ja tehdään sähkökytkennät ammattilaisen toimesta, sekä maadoitetaan laitteet oikein. Lisäksi viedään robotin mukana liikkuvat sähköjohdot siten, että ne eivät pääse kulumaan puhki. Sähköjohtojen kuntoa tulee tarkastella säännöllisin väliajoin.

Kokoonpanosolun odottamattomaan käynnistymiseen voidaan vaikuttaa siten, että annetaan esimerkiksi merkkivalo, että robottisolun on käynnistymässä. Robottisolun tulisi käynnistyä pienellä viiveellä käynnistysnapin painamisesta. Lisäksi robottisolun käynnistämiseen käytettävät laitteet tulisi olla robotin ulottuvuuden ulkopuolella.

Valmiin akkumoduulin pudottaminen esimerkiksi varpaille saattaa jopa aiheuttaa työntekijän sairaspöissaolon. Valmiit akkumoduulit tulisi olla helposti otettavissa kokoonpanojigin varastokuljettimelta, että turhilta pudottamisilta vältytään. Turvakenkien käyttö tulisi olla tuotantotilassa pakollista. Kaikilla edellisillä toimenpiteillä saadaan tavoiteltu riskin pienentyminen saavutettua.

8 KOKOONPANOSOLUN LOGIIKKA

8.1 Robotin ohjelmakoodi

Robotin ohjelmakoodi on toteutettu siten, että robotti käyttää hyödykseen kokoonpanojigeiltä tulevia signaaleja. Esimerkiksi anturitietoja käytetään määrittämään, voidaanko kokoonpano aloittaa tietyille kokoonpanojigille. Lisäksi kokoonpanojigiltä täytyy tulla ohjaussignaali robotille, että kyseiselle jigille voidaan kokoonpanoa suorittaa. Ohjaussignaali katkeaa esimerkiksi, jos on painettu Stop-painiketta tai kokoonpanojigin varastokuljetin on täynnä. Häätäseispiiri tehdään siten, että kaikkien kokoonpanojigien ohjaussignaali katkeaa, jos yhdenkin kokoonpanojigin tai robotin hätäseis-painiketta on painettu.

8.2 Lamellikuljettimen kokoonpanojigin logiikka

Lamellikuljettimella olevan kokoonpanojigin ohjausjärjestelmä voidaan toteuttaa PLC:llä, esimerkiksi Siemensin LOGO:lla. Logiikka hyödyntäisi robotilta tulevia käskyjä ja antaisi myös käskyjä robotin suuntaan, kun esimerkiksi robotti voi suorittaa jonkin vaiheen. Logiikka pystyttäisiin tekemään myös täysin robotin ohjelmakoodiin, mutta on todennäköisesti järkevämpää ottaa erillinen logiikka, sillä tällöin robotin ohjelmakoodista saadaan huomattavasti yksinkertaisempi. Yksinkertaisemmalla robotin ohjelmakoodilla on helpompi havaita mahdollisia virheitä, sekä tehdä koodista optimoidumpi eli prosessista nopeampi. Taulukossa 9 on logiikan tulot ja taulukossa 10 lähdöt, sekä selitykset niille. Lisäksi liitteessä 6 on LOGO! Soft Comfort ohjelmistolla tehty logiikka yhdelle kokoonpanojigille.

TAULUKKO 9. Ohjelmoitavan logiikan tulot

Tunnus	Nimi	Selitys
I1	Start	Painonappi, käytetään käynnistämään lähtö Q4
I2	Stop	Painonappi, käytetään pysäyttämään kaikki liike
I3	E-Stop	Hätäseis
I4	Kokoonpanon anturi	Tunnistetaan kokoonpanon kohdassa olevan komponentin paikallaan olo
I5	Varastokuljetin anturi	Käytetään pysäyttämään akkumoduuli kuljettimen päässä, että se ei putoa lattialle
I6	Reset	Painonappi, resetoidaan virhetilanteesta tai pysäytyksestä johtuva häiriö Q5
I7	R_purista kokoonpano	Robotilta tuleva käsky, jolloin sylinteri Q6 menee päälle
I8	R_kokoonpano valmis	Robotilta tuleva käsky, jolloin Q3 voidaan vapauttaa
I9	R_lukitse kokoonpano	Robotilta tuleva käsky, jolloin Q3 lukitaan
I10	Automaattiajo	Kääntökytkimen asento, valitaan kun halutaan kokoonpanosolun toimivan automaattisesti
I11	Käsiajo	Kääntökytkimen asento, valitaan jos halutaan liikuttaa lamellikuljetinta painonapeilla I12 ja I13
I12	Eteenpäin	Painonappi, käsiajossa käytettävä suunta
I13	Taaksepäin	Painonappi, käsiajossa käytettävä suunta
I14	R_Häiriö	Robotilta tuleva käsky, jolloin kokoonpano pysäytetään (esimerkiksi PickIt ei löydä tarvittavaa komponenttia)

TAULUKKO 10. Ohjelmoitavan logiikan lähdöt

Tunnus	Nimi	Selitys
Q1	Lamellikuljetin eteenpäin	Käsky lamellikuljettimen eteenpäin liikkumiseksi
Q2	Lamellikuljetin taaksepäin	Käsky lamellikuljettimen taaksepäin liikkumiseksi
Q3	Kokoonpanon sylinteri (jousipalautteinen)	Käsky sylinterin liikkua ulkoasentoon
Q4	Robottiohjelma päällä	Käsky robotille, jolloin robottiohjelma voidaan aloittaa
Q5	Häiriö	Tila, jossa kokoonpanosolua ei voi käyttää ennen kuin se on resetoitu painonapilla I6
Q6	Kokoonpanon puristus-sylinteri (jousipalautteinen)	Käsky sylinterin liikkua ulkoasentoon

9 POHDINTA

Opinnäytetyön tuloksena saadut layout-pohjapiirrokset ja suunnitellut logiikat ovat peruseriaatteeltaan luotettavia, mutta esimerkiksi käyttöönottovaiheessa voi ilmentyä asioita, joita ei ole suunnitteluvaiheessa osattu ottaa huomioon. Toisin kokoonpanosolun logiikka on suunniteltu siten, että siihen on helpohko tehdä muutoksia tarvittaessa. Tuloksena saadut kustannuslaskelmat ovat osittain luotettavia, sillä lähes kaikista komponenteista on saatu tarjous, mutta esimerkiksi työn osuus on vain arvioitu. Kokonaiskustannus on kuitenkin oikeaa luokkaa.

Suunnitellusta kokoonpanosolusta saatiin helposti toteutettava, yhtä osatekijää lukuun ottamatta. Kokoonpanojigin lopullinen suunnittelu ja toteutus on hyvä jättää automaatioalan integraattorin hoidettavaksi. Lisäksi Celltech:llä on sisaryhtiö, jolla on mahdollisesti kyky tämä toteuttaa. Siirtämällä kyseisen osan toteutus muualle, vältetään itse tekemästä laitteen CE-merkinnän sertifiointi. Integraattorin suunnittelussa ja toteutuksessa pystyttäisiin käyttämään hyvin pitkälle opinnäytetyössä ehdotettua mallia kokoonpanojigistä lamellikuljettimella.

Teoreettisesta takaisinmaksuajasta on saatu kokoonpanosolulle kohtuullisen hyvä, mutta se voisi olla paljon parempikin. Useasti yhteistyöroboteilla voidaan saada jopa reilusti alle vuoden takaisinmaksuaika. Suurimmaksi osaksi kokoonpanosolun takaisinmaksuaikaa pidentää sen heikohko automaatioaste. Automaatioasteeksi tulee ehdotetuilla layout-vaihtoehtoilla vain noin 21 %. Korkeammalla automaatioasteella voitaisiin säästää enemmän pidemmällä ajanjaksoilla.

Vaikka työn alussa jo tiedettiin, että kaikkia kokoonpanon vaiheita ei tulisi ainakaan tässä kohtaa automatisoimaan, voisi sitä nostaa paremmalle tasolle lisäinvestoinneilla, että kokoonpanosolusta saataisiin vielä kannattavampi. Esimerkiksi kokoonpanosolusta lähtevillä kuljettimilla voitaisiin asentaa ja ruuvata pohjalevyt akkumoduuleihin kiinni. Tämä voitaisiin todennäköisesti hoitaa erillisellä yhteistyörobotilla, jossa on kiinni joko työkalunvaihtaja tai kaksilaippainen työkalunpidike. Työkalunpidikkeessä olisivat kiinni alipainetarttuja, jolla pohjalevy asetetaan paikalleen, sekä ruuvaustyökalu.

Lisäksi akkumoduulien testauslaitteen voisi lisätä toimimaan kuljettimille. Esimerkiksi testauslaite voisi olla jonkin toimilaitteen päässä, joka asettaa sen kohdalleen akkumoduulin ollessa jossakin tietyssä kuljettimen kohdassa. Akkukennojen QR-koodin lukeminen voitaisiin lisätä kokoonpanovaiheessa, että pystyttäisiin mahdollisten reklamaatioiden kohdalla jäljittämään mistä erästä kennot ovat tulleet. Valmiin esikokoonpanon tieto voitaisiin myös lähettää tuotannonohjausjärjestelmään, jolloin tuotantomääriä pystyttäisiin seuraamaan paremmin. Lisäksi on olemassa käyntiajan seurantaohjelmistoja UR:lle, joilla voitaisiin havaita missä kohtaa kokoonpanoa on tapahtunut virheitä, jolloin voitaisiin seurata ja parantaa tasalaatuisuutta.

Työturvallisuus kokoonpanosolussa on hyvällä tasolla, sillä yhteistyörobotti itsessään on hyvin turvallinen. Lisäksi UR:n asetuksista voidaan määrittää alueita, joissa cobotti ei saa toimia tai toimii hidastetusti. Esimerkiksi voidaan määrittää näkymättömät seinät kokoonpanojigin reunojen lähelle, joita cobotti ei voi ylittää, että sen ei ole mahdollista kolhia akkukennoa. Suurin riski kokoonpanosolussa on kuitenkin kokoonpanojigin puristussylinteri. Puristussylinteri on säädettävä siten, että sen nopeus ja voima ovat kohtalaisen matalat. Jos puristamiseen tarvittava voima todetaan olevan liian suuri, voidaan sen ympärille lisätä mekaaninen rajakytkimellä toimiva aita. Aita estää pääsyn sylinterin luokse ja rajakytkin katkaisee kokoonpanojigin toiminnan aidan avautuessa.

Kokoonpanosolu vähentää myös akkukennojen suoran käsittelyn kokonaan. Ihmisen ei tarvitse olla suorassa kosketuksessa kennoihin, kun hänen täytyy vain koskea styrokseen, jossa kennot ovat. Esikokoonpanon jälkeisissä vaiheissa ihminen ei ole suorassa kosketuksessa kennoihin. Etuna, että ihmisen ei tarvitse koskea suoraan kennoihin on se, että ihmisen käsistä ei tällöin pääse likaa kennon napoihin tai ei ole vaaraa oikosululle ihmisen virheen takia.

Verint Systems:n vuonna 2019 valmistuneessa tutkimuksessa todettiin, että teknologian tarjoamisessa työntekijöille ja onnellisuuden sekä vähentyneen stressin välillä on korrelaatio. Eli kokoonpanosolun automatisoimisessa hyötynä ovat mahdollisesti vähentyneet sairaslomat, joita stressi voi työntekijöille aiheuttaa.

Tutkimuksessa todettiin myös, että yli kaksi kolmasosaa ihmisistä olivat manuaalisten ja työläiden tehtävien vähentämisen kannalla teknologian avulla, ja pitivät teknologiaa heidän työtään parantavana eikä korvaavana.

Kokonaisuutena opinnäytetyössä on otettu kantaa kokoonpanosolun toimisesta monipuolisesti ja monesta eri näkökulmasta. Kokoonpanosolu tuo tuotantoon skaalautuvuutta ja on hyvin joustava konenäköjärjestelmän ja yhteistyörobotin ansiosta. Joustavuus on hyvä asia, koska Celltech:llä on kiinnostusta tulevaisuudessa automaatiotason nostamiseen. Suunnitelmien avulla voidaan tehdä päätös investoinnin kannattavuudesta.

LÄHTEET

Bouchard, S. 2017. Lean Robotics. A Guide to Making Robots Work in Your Factory. E-kirja. Vaatii tietojen täyttämisen latausta varten. <https://blog.robotiq.com/lean-robotics-book-download>

Celltech. 2015. Yritys. Verkkosivusto. Luettu 5.5.2020. <https://celltech.fi/yritys/>

Celltech. 2016. Tuotteet. Verkkosivusto. Luettu 5.5.2020. <https://celltech.fi/tuotteet/>

Direktiivi 2006/42/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi koneista ja direktiivin 95/16/EY muuttamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti 9.6.2006. Luettu 18.5.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&qid=1591607746243&from=FI>

Haverila, M., Uusi-Rauva, E., Kouri, I., & Miettinen, A. 2009. Teollisuustalous 6. painos. Tampere: Infacs.

ISO/TS 15066. 2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 19.5.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

Logistiikan Maailma. 2015. Tuotannon layout. Verkkosivusto. Luettu 19.5.2020. <http://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tuotantostrategia/tuotannon-layout/>

Pickit. 2020. URCap example picking program. Verkkosivusto. Luettu 1.6.2020. https://docs.pickit3d.com/docs/pickit/en/latest/robot-integrations/universal-robots/urcap_v1/pick_and_place_program.html

Pickit. 2020. Video tutorials. Verkkosivusto. Luettu 1.6.2020. <https://docs.pickit3d.com/docs/pickit/en/2.3/first-steps/video-tutorials.html>

Robotic Industries Association. Robotics Online Marketing Team. 2019. What are the 4 Types of Collaborative Robots? Blogikirjoitus. Julkaistu 12.2.2019. Luettu 27.5.2020. <https://www.robotics.org/blog-article.cfm/What-are-the-4-Types-of-Collaborative-Robots/140>

Robotiq. 2015. Collaborative Robots Buyer's Guide. Vaatii tietojen täyttämisen latausta varten. Luettu 7.5.2020 https://blog.robotiq.com/collaborative-robot-ebook?_ga=2.113622852.2138784046.1586163823-209695821.1586163760

SFS-EN ISO 10218-1. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 18.5.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS-EN ISO 10218-2. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 18.5.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS-EN ISO 12100. 2010. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 18.5.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

Universal Robots. 2020. UR+ application kits and components. Verkkosivusto. Luettu 7.5.2020. <https://www.universal-robots.com/plus/>

Verint Systems. 2019. Engagement in the Always-on Era. How humans and technology work hand-in-hand to meet rising expectations. Research Paper. Luettu 7.7.2020. Vaatii tietojen täyttämisen latausta varten. <https://www.verint.com/gb/research/research-paper/>

LIITTEET

Liite 1. UR10e yhteistyörobotin tekniset tiedot

UR10e

technical details

Specifications

Payload	10 kg (22 lbs)
Reach	1300 mm (51.2 in)
Degrees of freedom	6 rotating joints
Programming	12 inch touchscreen with polyscope graphical user interface

Performance

Power, Consumption, Maximum Average	615 W
Power, Consumption, Typical with moderate operating settings (approximate)	350 W
Safety	17 configurable safety functions
Certifications	EN ISO 13849-1, PLd Category 3, and EN ISO 10218-1
Force Sensing, Tool Flange	Force, x-y-z Torque, x-y-z
Range	100.0 N 10.0 Nm
Precision	5.0 N 0.2 Nm
Accuracy	5.5 N 0.5 Nm

Movement

Pose Repeatability per ISO 9283	± 0.05 mm	
Axis movement	Working range	Maximum speed
Base	± 360°	± 120°/s
Shoulder	± 360°	± 120°/s
Elbow	± 360°	± 180°/s
Wrist 1	± 360°	± 180°/s
Wrist 2	± 360°	± 180°/s
Wrist 3	± 360°	± 180°/s
Typical TCP speed	1 m/s (39.4 in/s)	

Features

IP classification	IP54
ISO 14644-1 Class Cleanroom	5
Noise	Less than 65 dB(A)
Robot mounting	Any Orientation
I/O ports	
Digital in	2
Digital out	2
Analog in	2
Tool I/O Power Supply Voltage	12/24 V
Tool I/O Power Supply	2 A (Dual pin) 1 A (Single pin)

Physical

Footprint	Ø 190 mm
Materials	Aluminium, Plastic, Steel
Tool (end-effector) connector type	M8 M8 8-pin
Cable length robot arm	6 m (236 in)
Weight including cable	33.5 kg (73.9 lbs)
Operating Temperature Range	0-50°C
Humidity	90%RH (non-condensing)



Control box

Features

IP classification	IP44
ISO 14644-1 Class Cleanroom	6
Operating Temperature Range	0-50°C
I/O ports	
Digital in	16
Digital out	16
Analog in	2
Analog out	2
Quadrature Digital Inputs	4
I/O power supply	24V 2A
Communication	500 Hz Control frequency Modbus TCP PROFINET Ethernet/IP USB 2.0, USB 3.0
Power source	100-240VAC, 47-440Hz
Humidity	90%RH (non-condensing)

Physical

Control box size (WxHxD)	475 mm x 423 mm x 268 mm (18,7 in x 16,7 in x 10,6 in)
Weight	12 kg (26.5 lbs)
Materials	Powder Coated Steel

Teach pendant

Features

IP classification	IP54
Humidity	90%RH (non-condensing)
Display resolution	1280 x 800 pixels

Physical

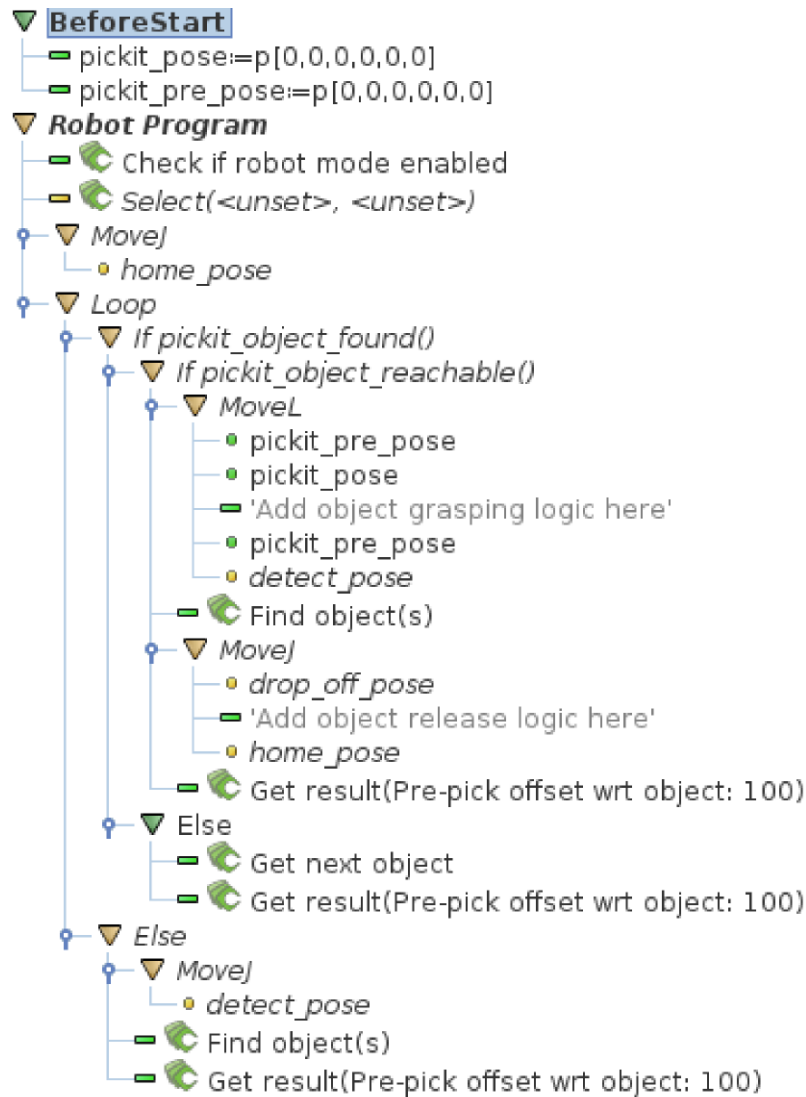
Materials	Plastic, PP
Weight including 1 m of TP cable	1,6 kg (3,5 lbs)
Cable length	4,5 m (17,7 in)

Liite 2. Robotiq tarttujien tekniset tiedot

SPECIFICATIONS

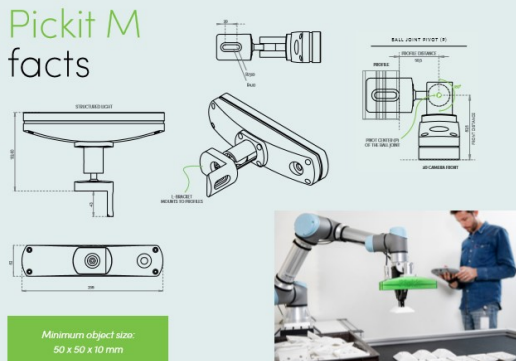
	Hand-E	2F-85	2F-140
Stroke (adjustable)	50 mm	85 mm	140 mm
Grip force (adjustable)	20 to 130 N	20 to 235 N	10 to 125 N
Form-fit grip payload	5 kg	5 kg	2.5 kg
Friction grip payload	3 kg	5 kg	2.5 kg
Gripper mass	1 kg	0.9 kg	1 kg
Position resolution (fingertip)	0.2 mm	0.4 mm	0.6 mm
Closing speed (adjustable)	20 to 150 mm/s	20 to 150 mm/s	30 to 250 mm/s
Communication protocol	Modbus RTU (RS-485), RS-485, RS-232		
Ingress protection (IP) rating	IP67	IP40	IP40
* All specifications provided for reference only. See user manual at support.robotiq.com for official specifications.			

Liite 3. Pickit esimerkkiohjelma Universal Robots:lle



Liite 4. Pickit M ja M-HD tekniset tiedot

Pickit M facts



Minimum object size:
50 x 50 x 10 mm

FIELD OF VIEW (FOV) DIMENSIONS

Side view: 300mm width, 425mm height, 700mm base.

Front view: 300mm width, 425mm height, 900mm base.

FOV: 500 x 400 x 200

17



CAMERA TECHNICAL SPECIFICATIONS

- 3D measurement method: Structured light
- Image processing speed: 30 fps
- 3D Camera accuracy: < 3mm
- 3D Camera repeatability: < 1mm
- 3D camera weight: 8030 g
- 3D camera connection to PC: M12 (USB) - USB3
- PC connection to robot: TCP/IP over Ethernet
- Power supply: M12 5VDC
- Temperature: 5°C to 40°C
- Humidity: < 95% @ 40°C (non-condensing)
- IP rating: IP56
- Vibrations: Operating: 2 Grms, 5-500 Hz, 3 axes
- Conforms to: CE, FCC

CAMERA CABLE TECHNICAL SPECIFICATIONS

10m

Industrial M12 camera connector

High-Flex / Continuous-Flex

- Type-U (R - 62.5mm - 5,000,000 times)
- Type-S (R - 60mm - 1,000,000 times)
- 90° Tack Lock bending (R - 60mm - 1,000,000 times)

Processor

Power consumption

- While turned off: 25W
- Booting: 100W
- Idle: 60W
- Heavy processing: 130W

Technical specifications

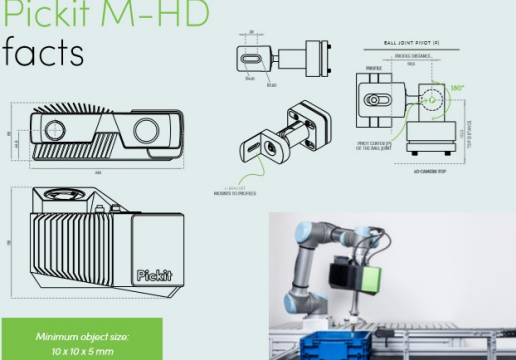
- Processor: 6 cores (12 threads) at 3.7 GHz
- 19 inch server: rack compatible (2U)
- Temperature: -20°C to 70°C
- Vibrations: Operating: 5 Grms, 5-500 Hz, 3 axes
- IP rating: IP54
- Power supply: 9-32V DC 160W
- Humidity: < 95% @ 40°C (non-condensing)
- Weight: 11 kg

USE PICKIT WITH THE ROBOT OF YOUR CHOICE

FANUC, SIEMENS, KUKA, YASKAWA, ABB, UNIVERSAL ROBOTS, FRANKA EMKA, SICK, HANULFA, HYUNDAI, NACHI, OTC

18

Pickit M-HD facts



Minimum object size:
10 x 10 x 5 mm

FIELD OF VIEW (FOV) DIMENSIONS

Side view: 275mm width, 457mm height, 875mm base.

Front view: 457mm width, 457mm height, 1330mm base.

FOV: 500 x 400 x 200

19



CAMERA TECHNICAL SPECIFICATIONS

- 3D measurement method: Structured light
- Image processing speed: 10 Hz (100ms snapshots)
- 3D Camera accuracy: 0.1mm
- 3D Camera repeatability: < 1mm
- 3D camera weight: 2 kg
- 3D camera connection to PC: M12-8 (USB) - USB3
- PC connection to robot: TCP/IP over Ethernet
- Power supply: M12-5 24VDC
- Temperature: 10°C to 40°C
- IP rating: IP65
- Vibrations: 5G Sinus, 25G Shock
- Conforms to: CE, CR, EN60950, FCC class A

CAMERA CABLE TECHNICAL SPECIFICATIONS

10m

Industrial M12 camera connector

High-Flex / Continuous-Flex

- Type-U (R - 62.5mm - 5,000,000 times)
- Type-S (R - 60mm - 1,000,000 times)
- 90° Tack Lock bending (R - 60mm - 1,000,000 times)

Processor

Power consumption

- While turned off: 25W
- Booting: 15W
- Idle: 70W
- Heavy processing: 160W

Technical specifications

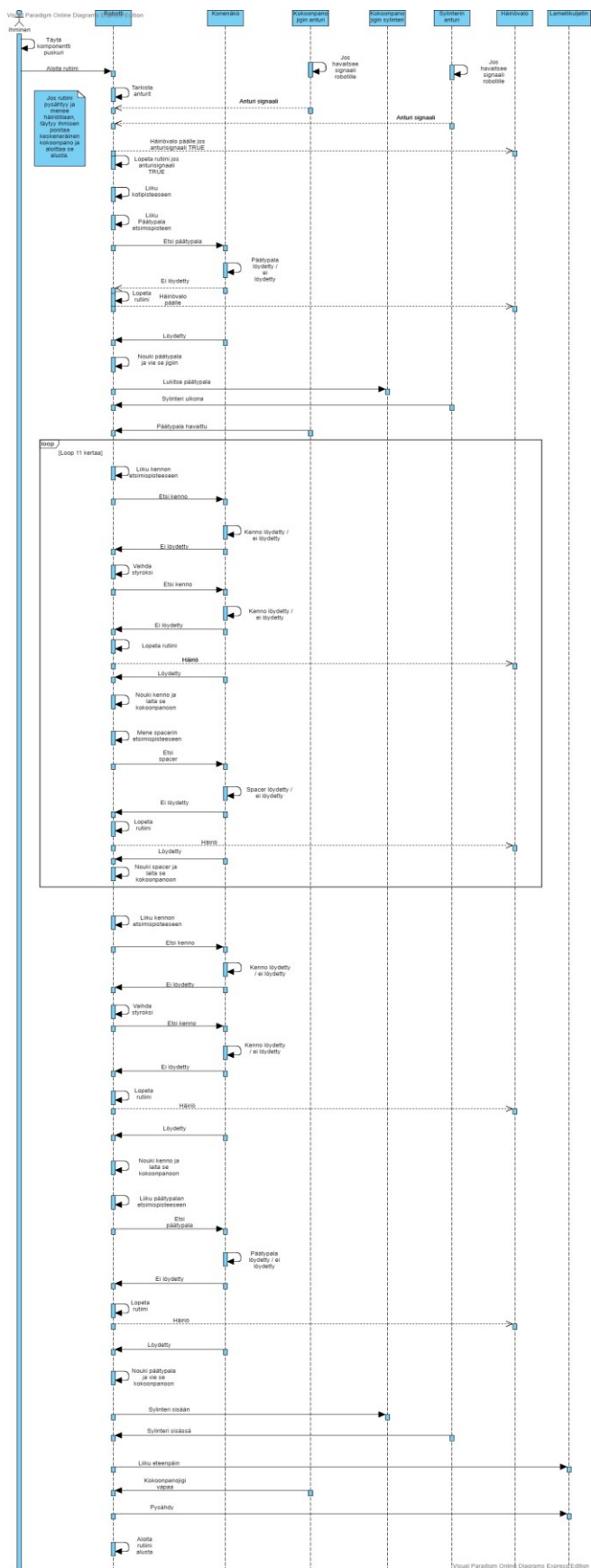
- Processor: 6 cores (12 threads) at 3.7 GHz
- 19 inch server: rack compatible (2U)
- Temperature: -20°C to 70°C
- Vibrations: Operating: 5 Grms, 5-500 Hz, 3 axes
- IP rating: IP54
- Power supply: 9-32V DC 160W
- Humidity: < 95% @ 40°C (non-condensing)
- Weight: 11 kg

USE PICKIT WITH THE ROBOT OF YOUR CHOICE

FANUC, SIEMENS, KUKA, YASKAWA, ABB, UNIVERSAL ROBOTS, FRANKA EMKA, SICK, HANULFA, HYUNDAI, NACHI, OTC

19

Liite 5. Kokoontalon prosessin sekvenssikaavio



Liite 6. Lamellikuljettimen kokoonpanojigin logiikka

