

Matias Riihinen

**KIERRÄTYSMUOVIJÄTTEEN SYÖTTÖLAITTEISTON
SUUNNITTELU**

KIERRÄTYSMUOVIJÄTTEEN SYÖTTÖLAITTEISTON SUUNNITTELU

Matias Riihinen
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Matias Riihinen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Kierrätysmuovijätteen syöttölaitteiston suunnittelu

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Design of a feeding machine for recycled plastic waste

Työn ohjaaja: Kimmo Rantapirkola

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021

Sivumäärä: 73 + 2 liitettä

Opinnäytetyö tehtiin Head Recycle Systems Oy:lle syksyn 2020 aikana. Työssä suunniteltiin syöttölaitteisto osaksi materiaalinkäsittelylinjastoa. Työssä selvitetiin toimivin tapa käsiteltävän materiaalin esilajitteluun ja syöttämiseen. Selvityksen tueksi analysoitiin käsiteltävää materiaalia ja rakennettiin proof-of-concept-laitte. Tärkeimmät laitteelle asetetut vaatimukset olivat kyky erotella jatkokäsittelyyn kelpaava 2D-materiaali ja ei-toivottu 3D-materiaali toisistaan sekä syöttää suurena määränä saapuva materiaali eteenpäin hallitusti. Laitteelle asetettujen reunaehtojen ja käytännön testien perusteella suunniteltiin laitteesta 3D-malli sekä mitoitettiin ja esivalittiin tärkeimmät komponentit.

Tärkeimmät suunnittelun työkalut olivat Solidworks- ja Microsoft Office -ohjelmistot. Suunnittelutyön alussa kerättiin tietoa muovimateriaalin käsittelytavoista ja muovien ominaisuuksista. Käytännön testit osoittivat proof-of-concept-laitteen toimivaksi, joten se määrittäi tuotekehitysprosessin suuntaa jo varhaisessa vaiheessa. Suunnittelutyön edetessä havaittiin valitussa ratkaisuvaihtoehdossa kuitenkin mekaanisia haasteita osien liikeradoissa ja laitteen kokoonpanossa. Mekaniikkaan liittyvät haasteet ratkaistiin integroimalla useita osia suuriksi kokonaisuuksiksi sekä vähentämällä liikkuvien osien määrää. Tämä yksinkertaisti geometriaa säilyttäen silti aiemmin toimiviksi todetut ratkaisut.

Laitte suunniteltiin toimimaan siten, että se poimii jatkokäsittelyyn kelpaavaa 2D-materiaalia pyörivien piikkien avulla. Piikkien ympärillä on tiettyssä kohtaa suulakkeet, joista puhalletaan ilmaa suurella nopeudella. Tämä ilmapvirtaus irrottaa 2D-materiaalin ja lennättää sen käsittelylinjastolla eteenpäin seuraavalle kuljettimelle. Ilmavirta myös erottelee 2D-materiaalin seasta pois painavat materiaalit, sillä ne eivät lennä ilmapvirran vaikutuksesta yhtä kauas. Ei-toivottu materiaali, joka ei lähde piikkien matkaan, jää laitteen taakse hihnakuljettimelle, josta se poistetaan erillisellä tyhjennystoiminnolla hylätyn materiaalin kuljettimelle.

Asiasanat: muovi, kierrätys, lajittelukone, syöttölaite, tuotekehitys, koneensuunnittelu, mekaniikkasuunnittelu, 3D-mallinnus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme of Mechanical Engineering, Machine Automation

Author: Matias Riihinen

Title of thesis: Design of a feeding machine for recycled plastic waste

Supervisor: Kimmo Rantapirkola

Term and year when the thesis was submitted: spring 2021

Pages: 73 + 2 appendices

This Thesis was made for Head Recycle Systems Oy, during the spring of 2020. Main goal was to design a machine that presorts the material and then feeds it to the processing line. Before the 3D-modelling, most efficient way to pre-sort and feed the material was investigated. To support the study, material was analyzed, and a proof-of-concept device was built. Most important guidelines for the machine were ability to presort the wanted 2D- and not wanted 3D-material from each other and then feed this 2D-material to the next machine. Based on these guidelines and practical tests, 3D-model of the machine was made, and most critical components were preselected.

Most important tools for this design work were Solidworks- and Microsoft Office -softwares. Collecting information about plastic material properties, how plastic material acts, and how it can be treated were the first big steps for this product development process. Proof-of-concept device ended up working just as planned during practical tests, so this led the way for the whole product development process. However, during the 3D-modelling few major challenges were noticed, regarding designed mechanisms, for example motion tracks of the parts and the way machine can be assembled. Mechanical challenges were solved by integrating multiple parts to bigger parts and by reducing the number of moving parts. This simplified the geometry, while retaining solutions which were proven to work previously.

Basic working principle of the machine is that 2D-material is picked from the arriving conveyor using rotating spikes. To make sure this material comes off from the spikes, there are air nozzles beside those spikes, blowing air in high speeds. Nozzles are placed so that material is blown away toward the next conveyor and next machine of the processing line. This air flow also separates heavy objects from the 2D-material because heavy objects are not flying as far as lightweight 2D-material. Non-wanted material, which is not lifted by spikes, is removed by with a specific emptying function to the separate conveyor.

Keywords: plastic, recycling, sorter, feeder, product development, machine designing, mechanical designing, 3D-modeling

ALKULAUSE

Opinnäytetyö tehtiin oululaiselle Head Recycle Systems Oy:lle. Opinnäytetyö aloitettiin kesän 2020 aikana ja jatkettiin syksyn 2020 aikana. Opinnäytetyönä suunnitellun laitteen toimintaperiaatteen valintaan ja projektin toteutustapaan annettiin melko vapaat kädet ja tilaa luovalle ajattelulle. Näin ollen erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen ideointi yhdessä yrityksen työntekijöiden kanssa olikin todella tuottoisaa ja mielenkiintoista.

Haluan kiittää lehtori Kimmo Rantapirkolaa opinnäytetyön ohjaamisesta sekä toimeksiantajaa, Head Recycle Systems Oy:n toimitusjohtaja Johnny Pehkosta ja tuotekehityspäällikkö Jari Viitalaa mahdollisuudesta opinnäytetyön tekemiseen.

Kiitän myös opiskelu- ja työkaveria Hiski Heinosta, jonka kanssa yhteistyössä saatiin rakennettua proof-of-concept-linjasto ja molempien opinnäytetyöt tehtyä.

9.3.2021 Matias Riihinen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
MERKKIEN SELITYKSET JA SANASTO	8
1 JOHDANTO	11
2 LAITTEEN SUUNNITTELUN TAUSTAT JA TAVOITTEET	12
3 REFERENSSIMATERIAALIN ANALYSOINTI	13
3.1 Analysointiprosessi	13
3.2 Analysoinnin tulokset ja niiden hyödyntäminen	17
4 ESISUUNNITTELU	19
4.1 Osatoimintoihin jako	19
4.2 Proof-of-concept	20
4.3 Testaaminen osana linjastoa	26
5 VALITUN RATKAISUVAIHTOEHDON KEHITTÄMINEN	27
5.1 Laitteen toiminnankuvaus	29
5.2 Suunnittelun rajoitukset ja haasteet	31
6 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU	32
6.1 Ilmapuhallin ja suulake	32
6.1.1 Puhallusnopeuden selvittäminen	32
6.1.2 Puhaltimen mitoitus	35
6.1.3 Puhaltimien valinta	37
6.1.4 Suulakkeen suunnittelu	38
6.2 Rumpurakenteen mekaniikka	39
6.2.1 Rummun kotelorakenne	42
6.2.2 Piikkimekanismi	45
6.3 Laitteen runko	47
6.4 Kuljettimet ja oheisrakenteet	49
7 RUMPURAKENTEEN KOMPONENTTIEN MITOITUS	52
7.1 Vaihdemoottorin mitoitus	52
7.2 Piikkimekanismin akselin mitoitus	56

7.2.1 Akselin tarkastelu taivutusjännityksen osalta	58
7.2.2 Akselin tarkastelu vääntöjännityksen osalta	62
7.2.3 Akselin ominaisvärähtelyn tarkastaminen FEM-analyysillä	64
8 LAITTEEN YLEISKUVAT JA PÄÄMITAT	66
9 JATKOKEHITYS	67
10 YHTEENVETO	69
LÄHTEET	71
LIITTEET	
Liite 1 laitteen komponenttien tarkka määrittely	
Liite 2 Laitteen layout-kuva	

MERKKIEN SELITYKSET JA SANASTO

SI-yksiköt

$\frac{1}{s}$	pyörimisnopeuden ja kierrostaajuuden yksikkö, kierros sekunnissa
$\frac{1}{s^2}$	kulmakiihtyvyyden yksikkö, kulmanopeuden muutos sekunnin neliöön
cm	pituuden yksikkö, metrin sadasosa, perusyksikkö metri, m
dB	äänenvoimakkuuden yksikkö, desibeli
Hz	taajuuden perusyksikkö, 1 Hz = 1/s
kg	massan perusyksikkö, kilogramma
kg·m ²	hitausmomentin yksikkö, kilogramma kertaa metri toiseen
kN	voiman yksikön tuhannen kerrannainen, perusyksikkö Newton, N
kW	tehon yksikön tuhannen kerrannainen, perusyksikkö watti, W
m	pituuden perusyksikkö, metri
mm	pituuden yksikkö, metrin tuhannesosa, perusyksikkö metri, m
mm ³	tilavuuden yksikkö, sekä vääntö/taivutusvastuksen yksikkö, kuutiomillimetri
$\frac{m}{s}$	nopeuden yksikkö, metriä sekunnissa

$\frac{m}{min}$	nopeuden yksikkö, metriä minuutissa
m ²	pinta-alan yksikkö, neliometri
$\frac{m^3}{s}$	tilavuusvirran yksikkö, kuutiometriä sekunnissa
MPa	paineen yksikön 10 ⁶ -kerrannainen, kuvaa voiman määrää tietyllä pinta-alalla, perusyksikkö Pa, pascal
N	voiman perusyksikkö, newton
Nm	momentin yksikkö, newtonmetri
rpm	pyörimisnopeuden yksikkö, rounds per minute eli kierrosta minuutissa
s	ajan perusyksikkö, sekunti
W	tehon perusyksikkö, watti

Käsitteet ja lyhenteet

2D-materiaali	ohut, paperimainen tai kalvomainen materiaali
3D-materiaali	kolmiulotteinen materiaali
anemometri	mittalaite ilmavirtauksen nopeuden mittaamiseen
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
HDPE	korkeatiheksinen polyeteeni, muovilaatu
LDPE	matalatiheksinen polyeteeni, muovilaatu
NIR	near-infrared spectroscopy, lähi-infrapunaspektroskopia
PET	polyeteenitereftalaatti, muovilaatu
PP	polypropeeni, muovilaatu
PS	polystyreenimuovi, muovilaatu

proof-of-concept	prototyyppimalli, jonka avulla voidaan todistaa idean tai konseptin toimivuus
ominaisvärähtely- taajuus	taajuus, jolla kappale resonoi, eli värähtelee ulkoisen voiman vaikutuksesta
referenssimateriaali	asiakasyritykseltä hankittu näyte-erä käsiteltävästä materiaalista

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan syöttölaitteisto osaksi materiaalinkäsittelylinjastoa. Laitteen tehtävä on syöttää käsiteltävä materiaali hallitusti, tasaisena virtana eteenpäin linjaston seuraavalle laitteelle. Lisäksi syöttölaitteen tulee erotella materiaalin seasta erilleen 3D-materiaali sekä kaikki painavat materiaalit, jolloin linjastolle syötetään jatkokäsittelyyn ainoastaan kevyt, kalvomainen 2D-muovimateriaali.

Opinnäytetyön päätavoitteena on löytää toimivin ratkaisu käsiteltävän materiaalin hallittuun syöttämiseen. Työn aikana suunnitellaan laite, joka suorittaa materiaalin syöttämisen lisäksi myös esilajittelun. Opinnäytetyö sisältää myös käsiteltävän materiaalin analysoinnin, sillä materiaalin analysoinnin toivotaan lisäävän tietämystä käsiteltävästä materiaalista ja tätä kautta parantavan suunnitteluprosessia ja valmiin linjaston testaamista.

Suurimpina haasteina laitteen suunnittelussa on saada kaikki toimeksiantajan määrittelemät toiminnot toteutettua yhdellä laitteella, jonka tuotantoversion tulisi olla samaan aikaan yksinkertainen ja toimintavarma. Lisäksi toimeksiantaja Head Recycle Systems Oy on sopinut asiakasyrityksen kanssa tavoitteen linjaston kapasiteetille.

Työn toimeksiantaja Head Recycle Systems Oy on toimitusjohtaja Johnny Pehkosen ja teollisuusneuvos Veikko Lesosen Vuonna 2018 perustama yritys. Head Invest -konserniin kuuluva oululainen yritys kehittää laitteistoja, palveluja ja muita ratkaisuja jätemuovin lajitteluun ja kierrättämiseen. (1; 2.)

2 LAITTEEN SUUNNITTELUN TAUSTAT JA TAVOITTEET

Suunniteltava laite on osa toimeksiantajan kehittämää linjastoa. Linjaston tehtävänä on käsitellä ja lajitella kierrätettävää muovijätettä. Linjasto muodostuu kuudesta moduulista: syöttöasemasta, syöttölaitteesta, leikkauslaitteesta ja kolmesta tunnistusmoduulista. Linjaston ensimmäisen laitteen eli syöttöaseman on tarkoitus toimia pienikokoisena välivarastona materiaalille, jotta laitetta operoivan työntekijän ei tarvitse olla jatkuvasti syöttämässä materiaalia linjastolle. Operaattorin tehtävä on täyttää syöttöaseman siiloa. Siilosta materiaali siirtyy siilon alapuolelle sijoitetulla hihnakuuljettimella syöttölaitteelle. Syöttölaite jaksottaa materiaalin kulkua linjastolla ja poistaa materiaalivirrasta sinne kuulumattomat materiaalit. Syöttölaitteelta materiaali kuljetetaan seuraavalla hihnakuuljettimella leikkauslaitteistolle, jossa pitkät muovikalvot leikataan pienempiin paloihin. Tämän jälkeen kolme seuraavaa moduulia tunnistaa ja lajittelee materiaalin eri värien ja muovilaatujen perusteella.

Tämän opinnäytetyön aiheena on suunnitella linjaston toinen laite eli syöttölaitteisto, jolla kierrätysmuovijäte nimensä mukaisesti syötetään hallitusti linjastolle. Laitteen toinen tärkeä tehtävä on esilajittelu, jossa materiaalivirrasta poistetaan sinne kuulumattomat materiaalit kuten pahvi, paperi, lasi ja metalli. Nämä muut materiaalit voisivat aiheuttaa tukoksen tai vikatilanteen linjaston muissa laitteissa, joten kokonaisuuden kannalta on tärkeää, että syöttölaitteisto pystyy poistamaan ei-toivotut materiaalit jo linjaston alkupäässä.

Linjasto, jonka osana laite on, toimii kolmella pääohjelmalla: kirkkaat kalvot, värikkäät kalvot ja hylättyjen uudelleen käsittely. Kaikissa ohjelmissa linjastolle syötetään materiaalia, jonka seassa voi olla myös ei-toivottuja materiaaleja. Tästä kaikesta tulee siirtää eteenpäin ainoastaan muovikalvot.

Laitteen suunnitteluun ei ollut aluksi kovin tarkkoja reunaehtoja, sillä opinnäytetyön alussa mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja ei ollut tiedossa. Jo markkinoilla olevia sovellettavia toteutustapoja oli vain vähän, joten laitteen suunnittelu alkoi jaloitumaan oikeaan suuntaan suhteellisen varhaisessa vaiheessa.

3 REFERENSSIMATERIAALIN ANALYSOINTI

Jotta syöttölaite ja muut linjaston laitteet voitiin suunnitella vastaamaan tarkasti asiakasyrityksen tarpeita, käsiteltävästä materiaalista haluttiin kerätä tietoa ennen kuin vaatimuslista ja tekninen spesifikaatio määriteltiin tarkasti. Linjaston jokaisen laitteen suunnittelussa tarvitaan useita tietoja käsiteltävästä materiaalista, esimerkiksi kuinka monta erilaista muovilaatua käsiteltävä materiaali voi sisältää tai paljonko eri värejä ja muovilaatuja on prosentuaalisesti. Tämän tyyppiset seikat vaikuttavat muun muassa siihen, kuinka lajittelu on järkevintä toteuttaa tai millaisilla laitteilla materiaalin tunnistus kannattaa toteuttaa.

Analysointia varten asiakasyritykseltä hankittiin yli 100 kg materiaalia, jollaista asiakasyrityksessä syntyvä kierrätysmuovijäte tavallisesti on. Tällä materiaalmäärällä saatiin tarpeeksi laaja otanta käsiteltävästä materiaalista. Analysoitu materiaali määriteltiin referenssimateriaaliksi ja säilöttiin koskemattomana linjaston testiajoon asti. Analyysin tuloksia voitaisiin näin ollen hyödyntää suunnittelu- vaiheen lisäksi myös myöhemmin linjaston testiajossa. Ajamalla analysoitu materiaali linjaston läpi olisi linjaston suorittamaa lajittelua mahdollista verrata analysoinnin tuloksiin. Mikäli tulokset ovat liki samanlaiset, voidaan todeta, että linjasto lajittelee materiaalit oikealla tavalla.

3.1 Analysointiprosessi

Referenssimateriaali on asiakasyrityksen toimesta jaettu neljään laatukategoriaan: ”Kirkas 1”, ”Kirkas 2”, ”Värillinen 1” ja ”Värillinen 2”. Kirkkaat laadut ovat pääasiassa pakkausmuoveja, kun taas värilliset laadut ovat suurimmaksi osaksi käytettyjä ostoskasseja sekä erilaisia muovipakkauksia. Luokittelussa nimen jälkeä käytetyt numerot ilmaisevat asiakasyrityksessä tapahtuvan esilajittelun tarkkuutta. Laatuluokituksen numero 1 tarkoittaa heikommin esilajiteltua, eli se sisältää enemmän poikkeamia kuin laatuluokitus 2, jossa materiaali on suhteellisen tasalaatuista ja puhdasta.

Referenssimateriaalin läpikäyminen tapahtui täysin manuaalisesti. 5–10 kilogramman säkkeihin pakattu materiaali levitettiin hallin lattialle yksi säkki kerrallaan, minkä jälkeen materiaalista muodostettiin 1 metrin levyinen ilmava jono.

Tällä tavoin materiaalista saatiin mitattua pinta-ala, siten kuin se olisi linjaston hihnakuuljettimella. Tässä yhteydessä materiaali myös kuvattiin. (Kuva 1.)



KUVA 1. Referenssimateriaali kuvattiin pinta-alan mittauksen yhteydessä

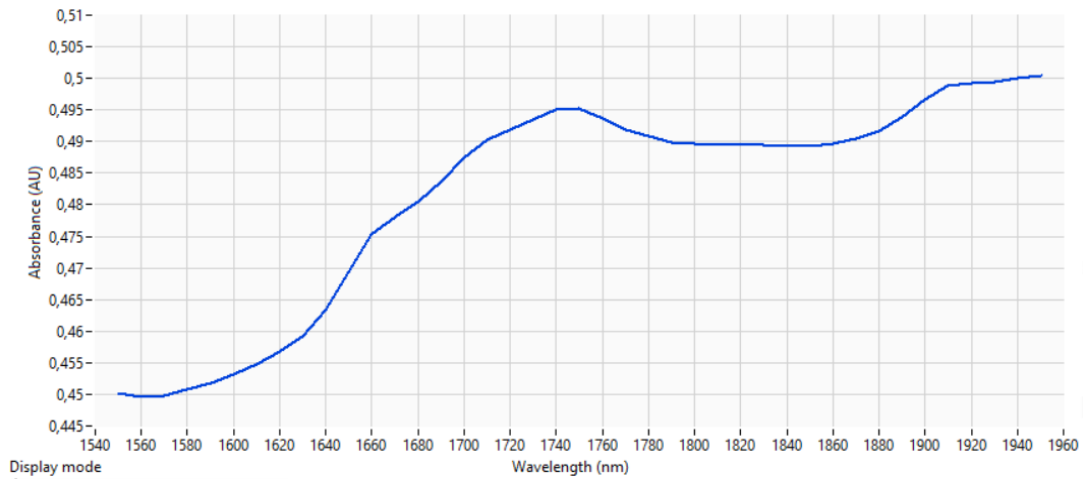
Materiaali lajiteltiin kasoihin värien ja muovilaatujen mukaan. Jokainen muovilaatu ja sen eri värit punnittiin. Tässä yhteydessä myös kaikki materiaalista löytyneet poikkeamat punnittiin ja kuvattiin (kuva 2).



KUVA 2. Kalvomateriaalin seasta löytynyttä 3D-materiaalia

Usein poikkeamat olivat helposti tunnistettavia esineitä, kuten lasipulloja tai alumiinitölkkejä. Sen sijaan eri muovilaatujen erottaminen toisistaan ei onnistu aina pelkän ulkonäön perusteella. Sen vuoksi analyysissä käytettiin apuna Spectral Engines -yrityksen valmistamaa NIR-spektrometriä, jolla voidaan tunnistaa eri muovilaadut. Laite toimii siten, että se osoittaa infrapunavaloa kohteeseen ja piirtää käyrän takaisin heijastuvan valon spektristä (3). Vertaamalla spektrikäyriä tiedossa oleviin käyriin voidaan päätellä, mikä muovimateriaali on kyseessä.

Kaikista NIR-spektrometrillä tutkituista materiaaleista otettiin kuva ja tallennettiin spektrometrin kuvaama spektrikäyrä (kuva 3). Kuvat ja spektrikäyrät kerättiin erilliseen tiedostoon muiden materiaalitietojen kanssa, jotta näihin erikoisuuksiin osataan varautua linjaston suunnittelussa ja käyttötilanteissa.



KUVA 3. NIR-spektrometrin kuvaama spektrikäyrä biohajoavasta muovipussista

Materiaalien erittelyn ja punnituksen jälkeen materiaalit kerättiin takaisin samaan säkkiin, josta ne oli otettu. Jokainen säkki nimettiin yksilöllisesti (kuva 4), jotta niitä ei sekoiteta keskenään. Näin varmistettiin, etteivät eri laatuluokitukset mene keskenään sekaisin eikä analysoituja materiaaleja käytetä vahingossa epävirallisiin testeihin.



KUVA 4. Referenssimateriaalisäkit nimettiin myöhempää käyttöä varten

3.2 Analysoinnin tulokset ja niiden hyödyntäminen

Analyysin tuloksien kirjaamiseen käytettiin Excel-ohjelmistoa. Jokaiselle laatu-
luokitukselle tehtiin oma tiedosto, johon kerättiin tiedot jokaisesta käsitellystä sä-
kistä omille välilehdille (kuva 5). Säkkikohtainen analysointi mahdollistaa tietyn
materiaalin tai tietyn poikkeaman löytämisen helposti, jos halutaan esimerkiksi
testata vikatilanteita ennen virallisia testejä tai jos jokin materiaali tarvitsee myö-
hemmässä vaiheessa tarkempaa tutkimista. Jokaisesta laatuluokituksesta tehtiin
myös oma yhteenveto (kuva 5).

Referenssimateriaalin analysointi			Pinta-ala mitattu olettaen, että materiaali levitetään 1 metrin levyiselle kuljettimelle:									
Laatikko: Kirkas 1			pinta-ala:	42,3 m ²								
Säkit: 1-15												
Materiaali	Massa (kg)	massan %-osuus kokonaisuudesta										
LDPE/ HDPE	kirkas, suuret palat	26,70	70,26 %									
	kirkas, pienet palat	0,70	1,84 %									
	moniväriset	2,90	7,63 %									
	musta	0,10	0,26 %									
	sininen	0,85	2,24 %									
	punainen	0,05	0,13 %	*yksittäisiä pusseja muutamassa säkissä								
PET	kirkas (kennopakkaus)	1,45	3,82 %									
		0,00	0,00 %									
		0,00	0,00 %									
PS (kennopakkaus)	0,45	1,18 %										
PP	musta/tumma*	0,65	1,71 %	*paalinaru, pakkaus, kulmasuojus								
	valkoinen*	0,40	1,05 %	*kalvoja ja kennopakkauksia								
	kirkas*	3,60	9,47 %	*kalvoja								
PVC	0,00	0,00 %										
Muu jäte	Pahvi*	0,00	0,00 %	*yksittäisiä paloja								
	biohajoava pussi	0,15	0,39 %									
		0,00	0,00 %									
		0,00	0,00 %									
YHT:	38,00 kg		massa / pinta-ala -suhde:	0,8983 kg/m ²								
Yhteenveto Kirkas, laatu 1	K1.1	K1.2	K1.3	K1.4	K1.5	K1.6	K1.7	K1.8	K1.9	K1.10	K1.11	K1.12 ...

KUVA 5. Kuvakaappaus "Kirkas 1" -laatuluokituksen Excel-tiedostosta

Lopuksi erilliseen Excel-tiedostoon tehtiin yhteenveto kaikista neljästä materiaa-
lityypistä, jotta käsiteltävän materiaalin yleiskuva on nopeasti ymmärrettävissä.
Koska eri materiaaliluokitusten yhteenlasketut painot poikkesivat toisistaan, tu-
loket skaalattiin siten, että jokaisen materiaalityypin massaksi saatiin 25 kg.
Tällä tavoin tulokset olivat keskenään vertailukelpoisia. Skaalaus tehtiin myös
siksi, että saatiin kaikki tiedot yhdistämällä yleiskuva, mitä 100 kg materiaalia pi-
tää sisällään (taulukko 1). Määränä 100 kg koettiin loogiseksi, sillä se oli asiakas-
yrityksen määrittelemä minimitaloite linjaston kapasiteetille yhden tunnin aikana.

TAULUKKO 1. Referenssimateriaalin yhteenveto

Referenssimateriaalin analysointi			Pinta-ala mitattu olettaen, että materiaali levitetään 1 metrin lewiselle kuljettimelle:	
skaalattu yhteenveto			pinta-ala:	119,16 m ²
Kaikki laadut, kaikki säkit				
Materiaali	Massa (kg)	massan %-osuus kokonaismäärästä		
LDPE/HDPE	kirkas, suuret palat	43,044	43,04 %	
	kirkas, pienet palat	1,422	1,42 %	
	moniväriset	1,908	1,91 %	
	valkoinen	19,085	19,08 %	
	harmaa	7,269	7,27 %	
	musta	8,630	8,63 %	
	violetti	0,120	0,12 %	
	sininen	1,315	1,31 %	
	vihreä	0,264	0,26 %	
	punainen/pinkki	0,621	0,62 %	
	keltainen/oranssi	1,271	1,27 %	
PET	kirkas	1,938	1,94 %	
	värillinen*	0,000	0,00 %	*yksittäisiä
		0,000	0,00 %	
joku muu muovi* (seos?)			0,072	0,07 %
PS*			0,296	0,30 %
PP	kirkas	2,368	2,37 %	
	musta / tumma	0,428	0,43 %	
	valkoinen / vaalea	0,263	0,26 %	
	moniväriset	1,188	1,19 %	
Muu jäte	pahvi	4,166	4,17 %	
	paperi	1,992	1,99 %	
	biohajoava muovipussi	0,411	0,41 %	
	alumiini	0,324	0,32 %	
	työhanskat (pari)	0,036	0,04 %	
	led-lamppu	0,036	0,04 %	
	folio-muovisekoitus	0,024	0,02 %	
	kangas	0,072	0,07 %	
	pelti	0,072	0,07 %	
	lasi	0,744	0,74 %	
	sekalainen 3D-muovijäte*	0,623	0,62 %	*kiinni muussa materiaalissa, siksi kategoriassa "muu jäte"
YHT:	100,00 kg		massa / pinta-ala -suhde:	0,83918 kg/m²

Referenssimateriaalista löytyi kaikkiaan viisi eri muovilaatua: HDPE, LDPE, PET, PS, PP. Näistä HDPE ja LDPE lajiteltiin saman nimikkeen alle, sillä ne ovat molemmat polyeteenimuoveja. Referenssimateriaaleista löytyi myös yksi muovikapale, jonka materiaalia ei tunnistettu. Muovien lisäksi referenssimateriaalin sisältämät ei-toivotut materiaalit voitiin lajitella useiden eri nimikkeiden alle.

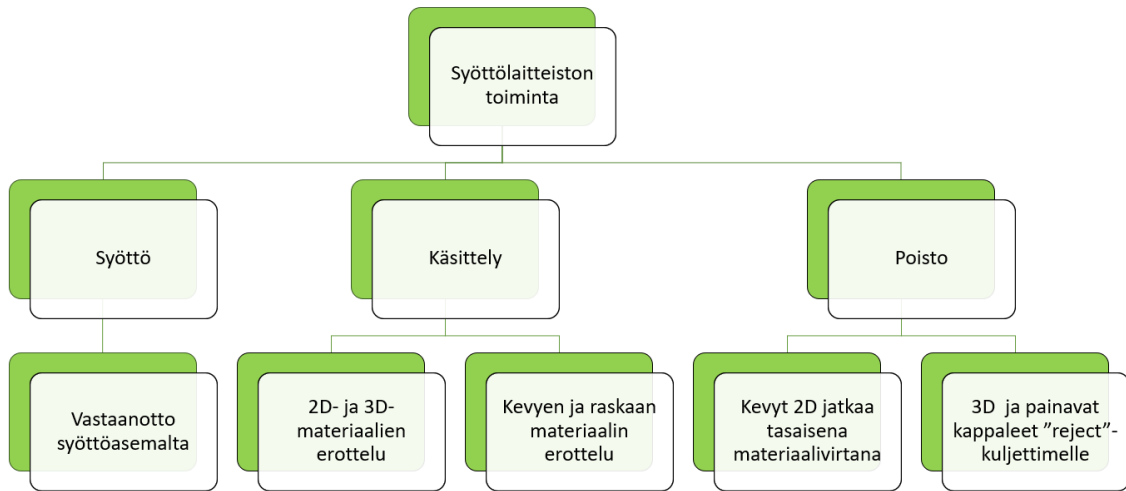
4 ESISUUNNITTELU

Käsiteltävänä materiaalina muovi on todella haastava. Toimeksiantajan aiemmissa projekteissa on havaittu, että muovin käyttäytyminen puristaessa, venyttäessä tai leikatessa on ennalta arvaamatonta. Näin ollen myös syöttölaitteiston suunnittelu on haastavaa, sillä muovin käyttäytymistä eri ratkaisuvaihtoehdoilla on vaikea ennustaa. Tästä syystä suunnittelun suuntaa ei voitu määrittää opiskelun aikana tutuksi tulleen VDI 2221 -standardin mukaisen tuotekehitysprosessin mukaan, erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen vertailulla ja pisteyttämisellä. Tämän tyyppinen ”waterfall-prosessiksi” kutsuttu toimintatapa on perinteinen ja muodollinen prosessi, jossa edetään systemaattisesti vaihe vaiheelta eteenpäin kohti lopputulosta (4, s. 27). Eri ratkaisuvaihtoehtojen arviointi olisi epätarkkaa pelkäämään teoretiedon ja oletuksien pohjalta, joten tästä yleisesti käytetystä tuotekehitysprosessista päätettiin hieman poiketa.

Tuotekehitysprosessi päätettiin aloittaa ensin käytännön testeillä, jotta materiaalin käyttäytymisestä opittaisiin enemmän. Tätä kautta tiedon ja ymmärryksen lisääntyessä voitaisiin löytää enemmän ratkaisuvaihtoehtoja sekä vertailtavia ominaisuuksia niiden välillä. Tämän tyyppisessä nykyaikaistetussa ”waterfall-prosessissa” sisällytetään perinteiseen prosessiin nykyaikaisia virtuaali-, simulointi- ja pikamallinnusmenetelmiä. Lopputuloksena on niin kutsuttu ”rakenna, testaa, kerää palaute, uudista” -silmukka, jossa perinteisen tuotekehitysprosessin vaiheet tapahtuvat limittäin. (4, s. 28–29.)

4.1 Osatoimintoihin jako

Laitteen suunnittelu oli järkevää aloittaa pilkkomalla kokonaisuus pienempiin osiin. Osatoimintoihin jako on nopea tapa parantaa ymmärrystä laitteen toiminnasta ja helpottaa muun muassa vaatimuslistan tietojen keräämistä. Tätä kautta myös sopivien ratkaisuvaihtoehtojen löytäminen helpottuu. Laitteelle asetettuja tavoitteita pohtiessa päädyttiin toiminta jakamaan kolmeen pääkohtaan, jotka voitiin edelleen jakaa pienempiin osiin (kuva 6).



KUVA 6. Osatoimintojen hierarkiakuva

Materiaali saapuu syöttölaitteelle syöttöasemalta. Syöttöasemalla oleva materiaali kuljetetaan siilon alle sijoitetun hihnakuljettimen avulla syöttölaitteelle. Syöttöaseman suunnittelu kuului toimeksiantajan työntekijän työtehtäviin, joten materiaalin saapuminen syöttölaitteelle ei näin ollen vaadi tämän opinnäytetyön osalta lähempää tarkastelua. Sen sijaan käsittely- ja poistovaihe sisältävät kaiken sen, mitä syöttölaitteen on tarkoitus materiaalille tehdä.

Materiaali saapuu syöttölaitteelle suurina määrinä, joten ensisijaisen tärkeää on saada materiaali jatkamaan seuraavalle kuljettimelle tasaisena materiaalivirtana. Tämän ohella on tärkeää saada muovikalvot erilleen kaikesta muusta käsiteltävästä materiaalista. Samanaikaisesti tulisi kalvojen seassa olevat painavammat kappaleet saada erilleen. Lopuksi pelkät muovikalvot siirretään toiselle hihnakuljettimelle, joka kuljettaa materiaalin eteenpäin linjaston seuraavalle laitteelle.

4.2 Proof-of-concept

Koska toimivin ratkaisu todettiin löytyvän käytännön testien kautta, päätettiin valmistaa yleismallinen proof-of-concept-laite. Tämä laite päätettiin rakentaa ikään kuin testialustaksi siten, että se olisi helposti muokattavissa erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen kokeilua varten.

Olemassa oleviin ratkaisuihin perehtyessä kävi nopeasti ilmi, että jätteiden ja kierrätysmateriaalien käsittelylaitoksissa syöttölaitteiston rakenteessa on yksi

selvä yhteinen tekijä, pyörivä rumpu, jolla materiaalia syötetään ja lajitellaan. Vaikka syöttölaitteelle syötettäisiin materiaalia suuria määriä kerralla, materiaalia siirtyy pyörivän rummun yli tasaisesti hallittu määrä kerrallaan. Se, mitä oheismekaniikkaa rummussa oli, vaihteli suuresti valmistajan ja käyttökohteen mukaan. Näin ollen oli melko selvää, että proof-of-concept-laite tulee olemaan jonkinlainen rumpu, jonka pintaan voidaan kiinnittää erilaisia rakenteita. (5; 6; 7.)

Ottaen myös huomioon, ettei laitteella ole testien jälkeen muuta käyttöä eikä rumpurakenteen toimivuudesta tässä käyttökohteessa ollut varmuutta, päätettiin laitteen valmistamisessa käyttää mahdollisimman paljon kierrätysmateriaaleja. Esimerkiksi rummun ahioksi valittiin tässä tapauksessa tyhjä 200 litran kokoinen peltitynnyri ja laitteessa käytetyt laakerit, moottori ja hihnakuljetin lainattiin toimeksiantajan aiemmista testilaitteista. Kierrätettyjä osia hyödyntämällä testilaitte saatiin valmistettua erittäin kustannustehokkaasti.

Ensimmäisessä testiversiossa rummun pintaan kiinnitettiin pitkiä kierretankoja (kuva 7), joiden ajateltiin poimivan materiaalin seasta muovikalvoja, muun materiaalin jäädessä rummun taakse. Ratkaisun ajateltiin toimivan siten, että materiaali tarttuisi piikkeihin, nousisi rummun yli ja rummun toiselta puolelta materiaali voitaisiin siirtää hihnakuljettimella eteenpäin linjaston seuraavalle laitteelle. Mikäli tämä ei toimisi, seuraava testattava tapa olisi ollut vaihtaa piikkien tilalle leveät lamellit, jotka olisivat lapion lailla kauhoneet materiaalia rummun yli.



KUVA 7. Proof-of-concept-laite kiinteillä kierretangoilla

Laitteen toimintaa testattiin täyttämällä kuvassa 7 rummun takana näkyvä hihnakuljetin niin täyteen, että materiaalia oli koko laitojen korkeudella. Rumpu laitettiin pyörimään ja alla oleva hihnakuljetin käynnistettiin. Materiaalin painautuessa pyörivää rumpua vasten, piikit alkoivat poimia materiaalia rummun takaa ja nostivat sen rummun etupuolelle. Laitteen toiminta vaikutti muutamien testien valossa erittäin lupaavalta, sillä esimerkiksi pahvipakkaukset tai muovipullot eivät tarttuneet kierretangoista tehtyihin piikkeihin. Ainoastaan muovikalvot tarttuivat piikkeihin, mutta eivät kuitenkaan irronneet piikeistä kovin helposti. Tämä johti nopeasti vikatilanteisiin, joissa materiaali kiertyi rummun ympäri ja kiilautui rummun ja hihnakuljettimen väliin (kuva 8).

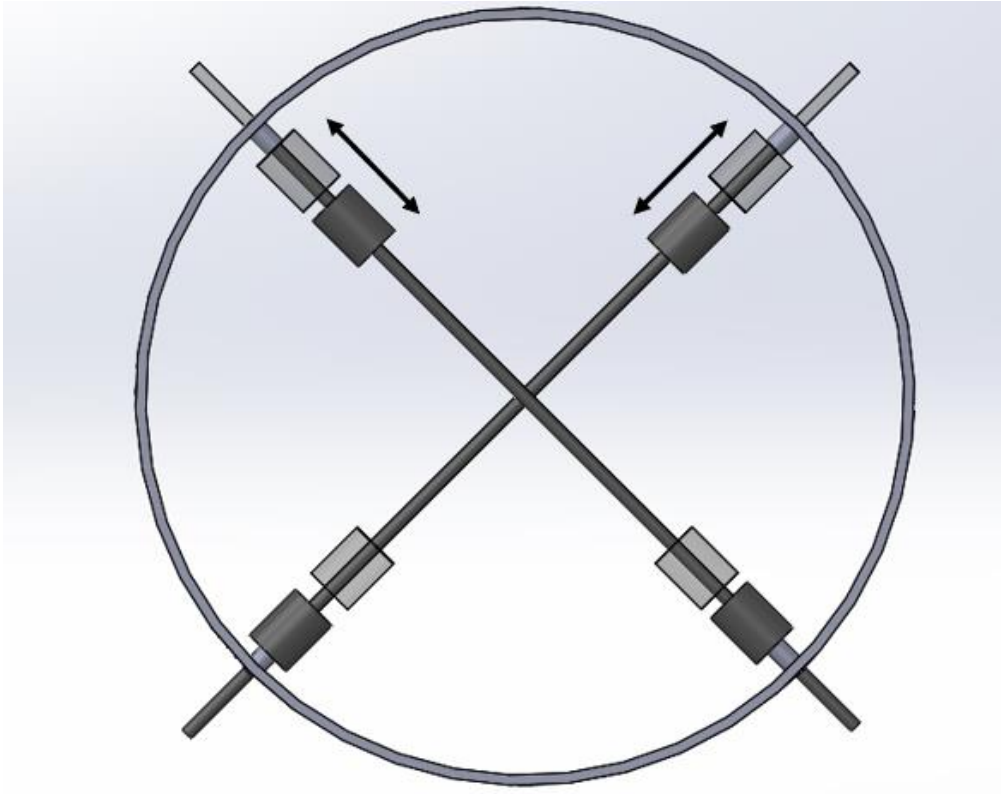


KUVA 8. Kuvakaappaus testivideosta; muovikalvot kiertyivät rummun ympärille

Piikit kuitenkin nostivat muovikalvot helposti muusta materiaalista erilleen, joten tätä ideaa päätettiin jatkokehittää. Muut ratkaisuvaihtoehdot päätettiin testata myöhemmin, mikäli piikkirakenne osoittautuu myöhemmässä vaiheessa toimimattomaksi.

Kiinteiden piikkien aiheuttama jumiutumiseriski päätettiin poistaa tekemällä piikeistä liikkuvat. Ajatus oli, että muovikalvot saataisiin irtoamaan rummun pinnasta vetämällä piikit sisään rummun yläpuolella, jolloin muovikalvot eivät enää lähtisi pyörimään rummun mukana uudelle kierrokselle. Liikkeen mekaniikka osoittautui hieman haastavaksi toteuttaa helpolla tavalla, sillä piikkejä oli suuri määrä ja tila rummun sisässä rajallinen. Rakenteen haastavuus kuitenkin puolittui, kun piikeistä keksittiin tehdä koko rummun läpi kulkevat. Rummun pintaan kiinnitettiin liukuhokit, joiden avulla piikki liukui toiselta puolelta esiin, vetäytyen samalla toiselta puolelta piiloon rummun sisään. Tämä rakenne puolitti osien määrän ja

mahdollisesti painovoiman hyödyntämisen piikkien liikuttamisessa, sillä sopivaan kohtaan piikkiä asennetuilla teräspainoilla piikki pääsi liukumaan vain rajatun matkan liukuholkkien välissä. Tällä tavoin rummun pyöriessä piikki katoaa näkyvistä aina rummun yläpuolella ja tulee esiin toiselta puolelta, rummun alapuolelta. (Kuva 9.)



KUVA 9. Painovoimatoimisten piikkien toimintaperiaatekuva

Toimintaperiaate vaikutti kokeilun arvoiselta, joten proof-of-concept-laitteeseen vaihdettiin kiinteiden piikkien tilalle painovoimatoimiset piikit (kuva 10). Tällä versiolla materiaali käyttäytyi huomattavasti paremmin, sillä muovikalvot eivät enää lähteneet pyörimään rummun ympäri yhtä helposti kuin piikkien ollessa kiinteät.



KUVA 10. Painovoimatoimisten piikkien proof-of-concept-laite

Muunlaisia tarttumis- ja jumiutumistilanteita kuitenkin ilmeni testien aikana. Useissa jumiutumistilanteissa syynä oli, että piikkiin tarttunut muovikalvo esti piikin liikkeen kiilautumalla piikin ja liukuholkin väliin. Tästä voitiin päätellä, ettei pelkkä painovoima riitä vetämään piikkejä rummun sisään. Piikkien liikkeen tulisi olla jollain tapaa mekaanisesti pakotettu, jotta materiaalin mahdolliset kiilautumis- ja jumiutumistilanteet eivät häiritse laitteen toimintaa.

Yhteenvetona voitiin todeta, että proof-of-concept-laite saavutti sille asetetut tavoitteet. Käytännöntestien ansiosta löydettiin potentiaalinen toteutustapa sekä todettiin liikkuvien piikkien toimintaperiaate ja rummun ja piikkien väliset mittasuhteet toimivaksi. Lisäksi löydettiin valitun ratkaisuvaihtoehdon suurimmat haasteet ja opittiin uutta käsiteltävän materiaalin käyttäytymisestä

4.3 Testaaminen osana linjastoa

Laitteen toiminnan suunnittelu itsessään on vain osa suunnittelutyötä, sillä laite tuli saada toimimaan myös osana linjastoa. Jotta voitiin selvittää laitteen soveltuvuutta tähän, päätettiin laite yhdistää toisen opiskelijan samaan aikaan tekemään proof-of-concept-laitteeseen (8). Tämä toinen laite tulee olemaan linjastossa syöttölaitteiston jälkeen. Yhdistämällä laitteet, päästiin testaamaan materiaalin siirtämistä laitteelta toiselle, rummun yli seuraavalle hihnakuljettimelle.

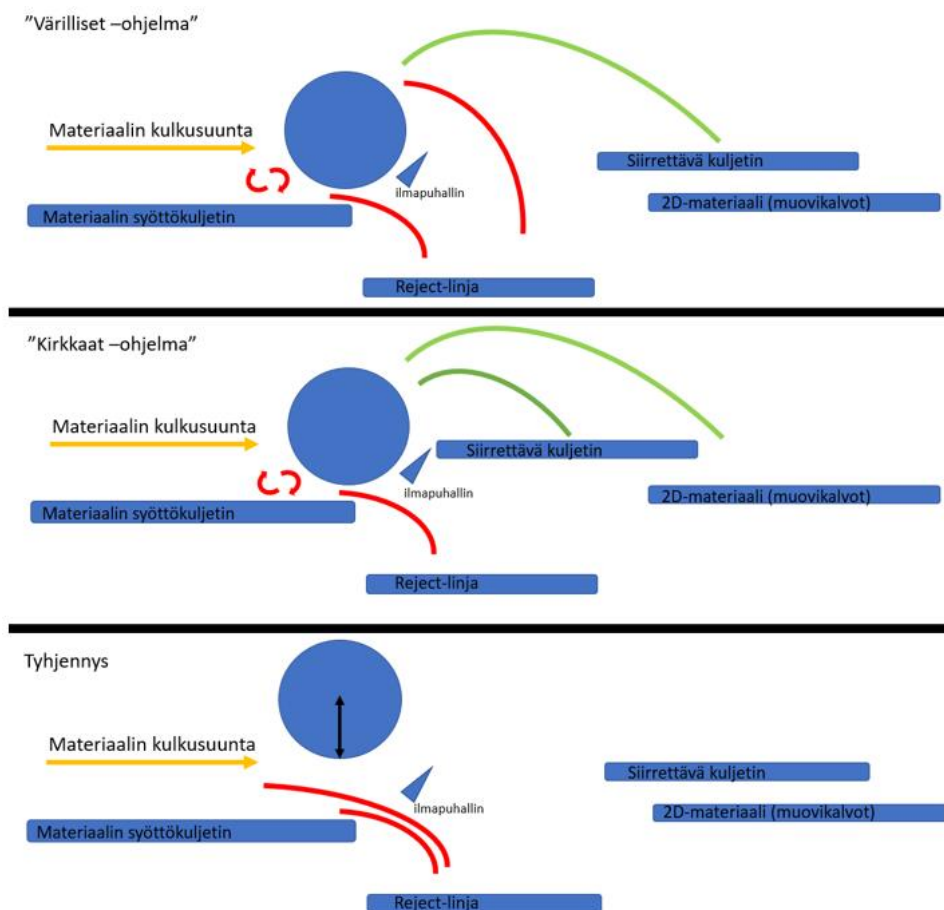
Pian huomattiin, ettei materiaali lennä suunnitellusti rummun yli eteenpäin, vaan materiaali tippui lähes suoraan rummun eteen. Ratkaisuna tähän kokeiltiin asentaa rummun etupuolelle ilmaveitsi (kuva 11), jolla materiaalia pyrittiin puhaltamaan kauemmaksi rummusta. Ilmavirran avulla materiaali saatiin lentämään hieman kauemmaksi rummusta ja laskeutumaan seuraavalle kuljettimelle. Ilmaveitsi myös vähensi jumiutumistilanteita, kun ilmavirta puhalsi materiaalia pois päin pöykistä ja rummun pinnasta. Samalla havaittiin, että ilmapuhallusta voidaan käyttää painavan ja kevyen materiaalin erotteluun, sillä raskaan materiaalin havaittiin putoavan ilmavirran läpi, mutta kevyt muovikalvo lensi ilmavirran mukana pidemmälle. Nämä havainnot edesauttoivat vaatimuslistan laatimista ja yksityiskohtaisen suunnittelun suuntaviivojen määrittelyä.



KUVA 11. Ilmaveitsi asennettuna rummun etupuolelle

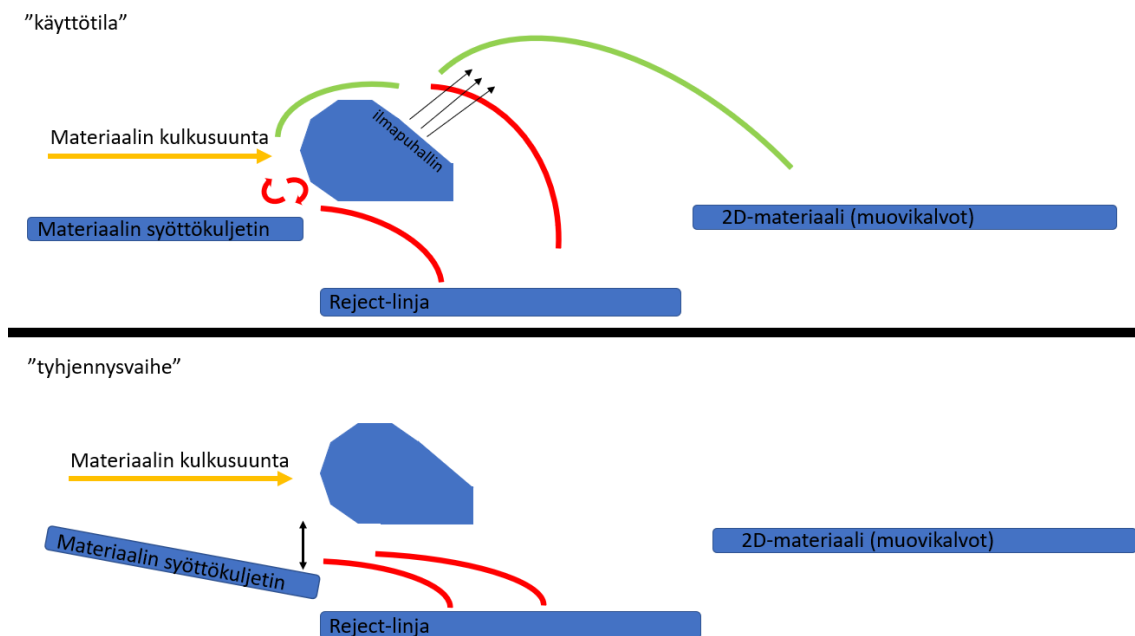
5 VALITUN RATKAISUVAIHTOEHDON KEHITTÄMINEN

Proof-of-concept-laitteella suoritettujen testien perusteella valittiin laitteen toimintatavaksi pyörivä rumpu, jonka pinnassa on sisään ja ulos liikkuvia piikkejä. Tämän lisäksi rummun etupuolelle suunniteltiin erillinen ilmapuhallinsuulake. Koska ilmapuhallus ei välttämättä riitä lennättämään painavia tiiviiksi puristettuja pakkausmuovikalvoja, kehitettiin laitteen etupuolelle lisäkuljetin, joka siirretään rummun eteen ”Kirkkaat muovit” -ohjelman aikana. Tällä tavoin pyrittiin estämään painavampien tiiviiksi puristettujen pakkausmuovikalvojen tippuminen hylkylinjalle. Rummun taakse jäävä 3D-materiaali tyhjenetään nostamalla koko rumpurakenne ylöspäin, jotta materiaali mahtuu kulkemaan rummun alta hylkylinjalle. (Kuva 12.)



KUVA 12. Ratkaisuvaihtoehdon peruskäyttötilanteiden toimintaperiaatekuva: keltainen väri esittää käsittelemätöntä materiaalia, vihreä väri 2D-kalvomateriaalia, ja punainen väri hylättävää materiaalia

Suunnittelun edetessä huomattiin useita haasteita alkuperäisessä suunnitelmassa. Erilaisten korjausliikkeiden ja lisäselvitysten jälkeen päädyttiin ratkaisuun, jossa rumpua ei enää nosteta, vaan sitä edeltävää kuljetinta lasketaan. Toinen radikaali suunnitelmanmuutos oli yhdistää rumpurakenne ja ilmapuhallus yhdeksi kokonaisuudeksi. Näiden muutosten ansiosta mahdolliset jumiutumistilanteet vähenivät merkittävästi, kun osien määrä, ja sitä kautta osien väliset saumakohtat vähenivät. Myös liikkuvien osien määrä väheni huomattavasti. Uudessa rakenteessa ilmapuhallukseen käytetty paineilma korvattiin sähkötoimisella puhaltimella ja puhallukseen liittyvä geometria saatiin samalla suunniteltua paremmaksi. Tämän muutoksen ansiosta myös siirrettävä kuljetin voitiin jättää pois kokonaan. (Kuva 13.)



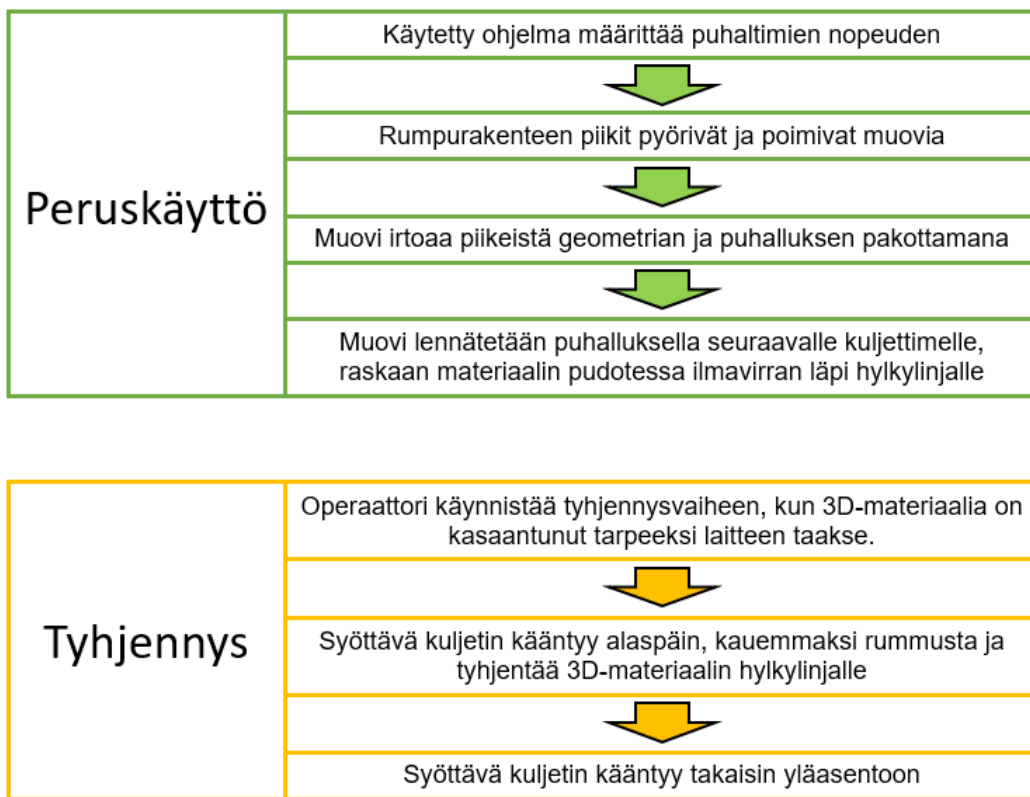
KUVA 13. Rummun ja puhaltimen yhdistävän version toimintaperiaatekuva: keltainen väri esittää käsittelemätöntä materiaalia, vihreä väri 2D-kalvomateriaalia, ja punainen väri hylättävää materiaalia

Vaikka linjasto tulee toimimaan kolmella eri ohjelmalla käytetyn materiaalityypin mukaan, syöttölaitteiston toiminta saatiin muutosten myötä sellaiseksi, että se toimii samalla tavalla joka tilanteessa. Ainoa tarvittava säätö linjaston ohjelman

vaihtuessa on sähköpuhaltimien pyörimisnopeus, sillä puhallusnopeuden oletettiin vaikuttavan suoraan siihen, minkäkokoinen materiaali lentää ilmavirran vaikutuksesta eteenpäin ja mikä päättyy hylkylinjalle.

5.1 Laitteen toiminnankuvaus

Linjasto, jonka osana laite on, toimii kolmella pääohjelmalla: kirkkaat kalvot, värikkäät kalvot ja hylättyjen uudelleen käsittely. Syöttölaitteen toiminta on lähes samanlainen jokaisella ohjelmalla. Ainoa ero löytyy puhaltimien nopeudensäädöstä. (Kuva 14.)



KUVA 14. Laitteen toimintaperiaate

Kaikissa kolmessa käyttöohjelmassa muovikalvot poimitaan kasasta piikeillä ja nostetaan rummun yli. Kiinteän rummun geometrian ansiosta piikit poistuvat näkyvistä rumpuelementtien väliin rummun laella, jotta muovikalvot irtoavat piikeistä. Rummun geometria on rummun alapuolella jälleen sellainen, että piikit tulevat esiin rumpuelementtien välistä, jolloin piikit ovat valmiina nappaamaan

uutta muovikalvoa rummun takapuolelta. Piikkien pyöriessä ne saavuttavat jälleen rummun laen, jonka jälkeen piikit poistuvat näkyvistä.

Rummun laen jälkeisellä alueella sijaitsee myös rumpuelementteihin sisäänrakennetut puhallusaukot, joista puhalletaan sähkötoimisella puhaltimella tuotettua ilmaa suuri määrä. Tämä ilmavirta puhaltaa muovikalvot irti rummun pinnasta ja piikeistä, eteenpäin seuraavalle hihnakuljettimelle. Mikäli piikit nappaavat mukaan jotain muuta kuin muovikalvoja, esimerkiksi kalvoja painavamman pahvilaatikon, kevyen materiaalin lentäessä kauemmas, painavampi pahvilaatikko putoaa suoraan alaspäin ilmavirran läpi. Painava tavara päätyy rummun alle hylkylinjalle, josta materiaali kuljetetaan hihnakuljetinta pitkin hylättyjen materiaalien keräysastiaan.

Ajettaessa kirkkaita muovikalvoja, materiaalin seassa on ohuiden kalvojen lisäksi suuria ja painavia, tiiviiksi kasaksi puristettuja pakkausmuovikalvoja, jotka eivät lennä ilmavirran vaikutuksesta samaan tapaan kuin kevyet muovikalvon palaset. Nämä ovat kuitenkin samaa materiaalia kuin ohuet kalvot, joten niitä ei saa päätyä hylkylinjalle. Painavat pakkausmuovikalvot saadaan lennätettyä eteenpäin linjastolla kasvattamalla taajuusmuuttajilla ohjattujen sähköpuhaltimien kierrosnopeutta ja tätä kautta ilman virtausnopeutta. Koska kirkkaan muovin seassa on referenssimateriaalin perusteella vain vähän sinne kuulumatonta materiaalia, voidaan käyttää tällaista ratkaisua, jossa käytännössä kaikki materiaali puhalletaan eteenpäin seuraavalle kuljettimelle.

Rummun ja piikkien rakenne ja mittasuhteet on suunniteltu siten, että kaikki suurimmat kappaleet, kuten lasipullot, muovipullot ja muut 3D-materiaalit jäävät rummun taakse pyörimään, sillä ne eivät tartu rummun piikkeihin kiinni. Osa pienemmistä 3D-materiaaleista mahtuu myös siirtymään syöttävää kuljetinta pitkin rummun piikkien välistä rummun alapuolelle hylkylinjalle. Kun suurikokoista 3D-materiaalia on kerääntynyt tarpeeksi, se estää uuden materiaalin päätyä piikeille asti. Tämä on linjaston operaattorille merkki siitä, että on aika käynnistää laitteen tyhjennysvaihe.

Tyhjennysvaiheessa syöttöaseman puoleinen kuljetin lasketaan paineilmasylinterillä alas. 3D-materiaali saadaan siirrettyä hylkylinjalle ajamalla syöttölaitteen

kuljetinta eteenpäin sen ollessa ala-asennossa. Kuljetin saadaan tyhjäksi 3D-materiaalista ja syöttölaitteisto voi jatkaa toimintaa normaalisti tyhjennyksen jälkeen. Tyhjennyksen aikana on huomioitava, että syöttöaseman siilossa oleva luukku suljetaan, jotta kuljettimelle ei päädy uutta käsittelemätöntä materiaalia. Ilman syöttöaseman luukun sulkemista hyödynnettävissä olevaa 2D-muovikalvomateriaalia päätyisi turhaan hylkylinjalle.

5.2 Suunnittelun rajoitukset ja haasteet

Käytännöntestien jälkeen laadittiin yhdessä toimeksiantajan kanssa laitteelle vaatimuslista, josta ilmenee suunnittelun kannalta olennaisia toiveita ja vaatimuksia. Vaatimuslista toimii hyvänä ohjenuorana suunnittelulle, mutta se ei kuitenkaan ota kantaa siihen, kuinka vaatimukset ja toiveet täytetään. Tätä varten laadittiin erillinen dokumentti, jossa on käyty yksityiskohtaisesti läpi kaikki laitteen osakokonaisuudet ja niiden toiminta yksi kerrallaan (liite 1).

Dokumenttiin on kerätty toimeksiantajan kanssa täytetystä vaatimuslistasta oleelliset tiedot, joita on laajennettu ja tarkennettu muun muassa proof-of-concept-laitteen testituloksien sekä referenssimateriaalin analysoinnin tulosten avulla. Tarkka komponenttikohtainen selostus auttoi havainnollistamaan laitteen toimintaa vaihe vaiheelta, jolloin myös mahdolliset ongelmakohdat ja muut tekniset haasteet nousivat esille. Dokumenttia päivitettiin suunnittelun edetessä, jolloin se toimi samalla myös muistilistana esimerkiksi esivalittujen komponenttivalintojen osalta. Dokumentista oli myös helposti nähtävissä tiettyjen komponenttien mittasuhteita, materiaalivalintoja tai liikenopeuksia koskevia rajoituksia ja raja-arvoja.

6 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU

Sopivan ratkaisuvaihtoehdon löydyttyä ryhdyttiin esisuunnittelussa ja käytännön testeissä esiin tulleita haasteita. Suurimpana yksittäisenä haasteena koettiin ilmapuhalluksen toteutus. Asennuksen yhteydessä laite olisi mahdollista liittää asiakasyrityksen tiloista löytyvään ulkoiseen paineilmajärjestelmään, joten paineilman käyttö vaikutti aluksi helpolta tavalta. Laitteen vaatima tilavuusvirta ja virtausnopeus ovat kuitenkin niin suuria, ettei paineilma ole järkevä vaihtoehto joutuessa suurista käyttökustannuksista (9; 10). Siksi puhallus päätettiin toteuttaa paikallisesti laitteeseen asennettavilla sähkökäyttöisillä puhaltimilla.

6.1 Ilmapuhallin ja suulake

Puhalluksen suunnittelu lähti liikkeelle siitä ajatuksesta, että paineilma korvataan sähkökäyttöisellä puhallinjärjestelmällä, joka tuottaisi saman ilmamäärän kuin aluksi ajateltu paineilmatoiminen ilmaveitsi. Siirtyminen paineilmapuhalluksesta sähköpuhaltimeen avasi myös aihetta pohdinnalle, riittäisikö suuritehoinen puhallus yksistään siirtämään materiaalin seuraavalle kuljettimelle, ilman välissä olevaa, siirrettävää kuljetinta. Tämä yksinkertaistaisi rakennetta huomattavasti ja poistaisi samalla monta mahdollista paikkaa, jonne käsiteltävä materiaali voisi päätyä jumiin. Paperilla tämä ratkaisu vaikutti lupaavalta, joten ideaa selvitettiin tarkemmin.

Jotta sopivaa puhallinta ja suulaketta voitiin ryhtyä suunnittelemaan, täytyi ensin selvittää tarvittava ilmanvirtausnopeus, suulakkeen aukon poikkipinta-ala ja tarvittava tilavuusvirta (11). Suulakkeen kokoa selvitettiin aluksi siten kuin se olisi yksi suuri suulake, sillä se oli helpommin testattavissa ja tätä kautta saatiin varmin selvitettyä koko laitteen tarvitsema ilmamäärä. Tätä yhden suuren suulakkeen poikkipinta-alaa voitaisiin myöhemmin tarvittaessa pilkkoa useisiin pienempiin suulakkeisiin.

6.1.1 Puhallusnopeuden selvittäminen

Toimeksiantajalta löytyi testikäyttöön vanha, suurikokoinen teollisuushallin kanavapuhallin. Rakenteeltaan kanavapuhallin on usein aksiaalipuhallin eli siipi pyörii

ilmavirran suuntaisesti. Tämä puhaltimen rakenne mahdollistaa suuren ilmamäärän siirtämisen, mutta paineentuottokyky ja suurin mahdollinen virtausnopeus on tämän tyyppisellä puhaltimella suhteellisen heikko verrattuna esimerkiksi keskipakopuhaltimeen. (11.)

Vaikka puhaltimen rakenne on lopullista käyttökohdetta ajatellen väärä, voitiin tällä kanavapuhaltimella testata, mikä on riittävä ilmavirran nopeus, jolla isotkin muovikappaleet lentävät suunnitellusti. Eri nopeuksien testaamiseksi puhaltimen moottoria käytettiin taajuusmuuttajalla. Testeissä käytetty suulake valmistettiin paksusta pakkausmuovista, jotta sitä olisi helppo muokata eri kokoiseksi ja muotoiseksi testien aikana. Suulakkeen mitat valittiin alkuun vain silmämääräisen arvon perusteella ja kanavapuhallin asennettiin puhaltamaan yläviistoon, jotta testitilanne vastaisi mahdollisimman hyvin lopullista käyttötilannetta.

Muutaman testin jälkeen suulakkeelle löytyi sopiva koko ja tätä kokoa käytettiin koko testin ajan. Suulakkeen etupuolelle rakennettiin myös niin sanottu ilmakouru, johon ilmavirta puhalletaan. Kourun tehtävä on estää ilman ja ilmavirran mukana lentävän materiaalin leviäminen sivusuunnassa. Valmiissa laitteessa ilmakourun muodostaisi käytännössä laitteen ympärille rakennettavat peltilaidat sekä erillinen kattoelementti, joka rajoittaa ilmavirran ja materiaalin liikettä korkeussuunnassa. (Kuva 15.)



KUVA 15. Muovikalvojen lennättämisen testaaminen kanavapuhaltimella

Kanavapuhaltimen todettiin riittävän suurikokoisten muovikalvojen lennättämiseen puhaltimen ollessa täydellä teholla. Pyörintänopeuden vähentyessä noin puolella, ilmavirran nopeus oli sopiva myös kevyempien ja pienikokoisten kalvomateriaalien hallittuun lennättämiseen.

Seuraavaksi selvitettiin anemometrillä, kuinka suuri tämä hyväksi havaittu nopeus oikeasti on. Mittaus suoritettiin CEM Instrumentsin DT-82-anemometrillä, jolla voidaan mitata jopa 30 m/s liikkuvaa ilmavirtaa (12). Mittauksen ajaksi anemometri kiinnitettiin telineeseen (kuva 16), sillä kädessä pidettäessä huomattiin mittarin lukemassa suurehkoa vaihtelua mittarin asennon tai mittauspaikan muuttuessa. Myös mittausetäisyys suulakkeen päästä vaikutti mittaukseen, joten kaikki tämänkaltaiset epätarkkuustekijät haluttiin karsia pois. Mittausetäisyydeksi valittiin 20 cm suulakkeen päästä.



KUVA 16. Ilmavirran nopeuden mittaaminen anemometrillä

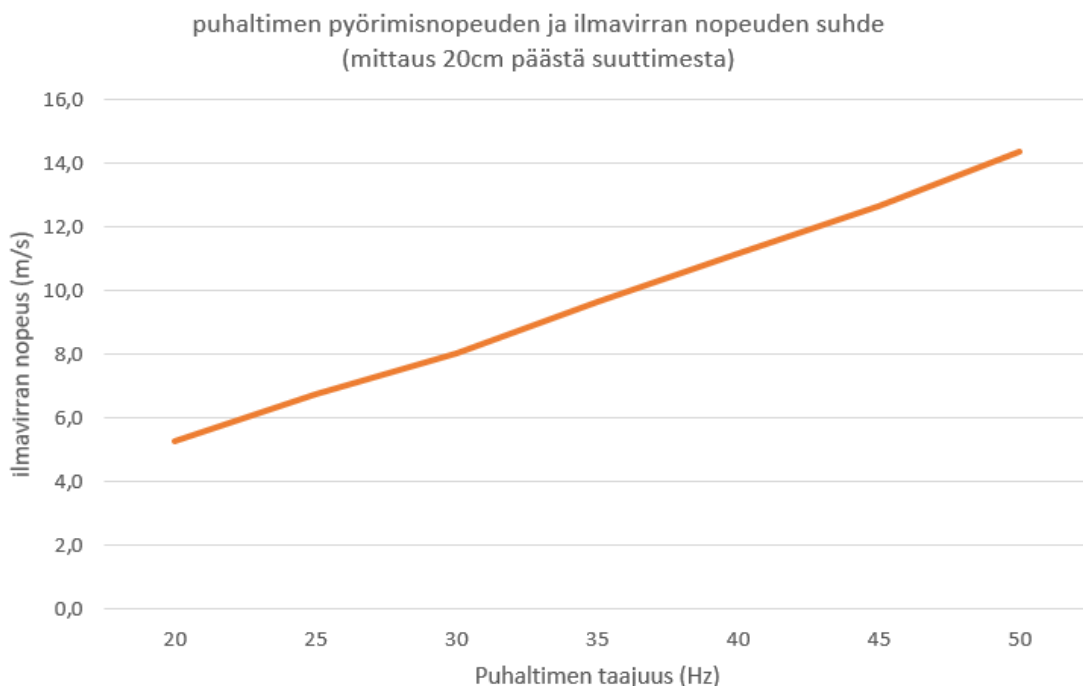
6.1.2 Puhaltimen mitoitus

Puhaltimen pyörintänopeus tiedetään olevan verrannollinen puhaltimen tuottamaan tilavuusvirtaan (13, s. 131), joten taajuusmuuttaja on helppo tapa säätää puhalluksen nopeutta eri materiaaleille sopivaksi. Suulakkeen kanssa tämä ei kuitenkaan välttämättä päde, sillä kaikki puhaltimen jälkeen asennetut komponentit aiheuttavat painehäviötä järjestelmään (14). Suulakkeen vaikutusta selvitettiin tekemällä mittauksia useilla eri kierrosnopeuksilla ja mittaamalla ilman virtausnopeus. Mittaukset suoritettiin samaan tapaan kuin aiemmin, 20 cm päästä suulakkeesta.

Mittauspaikan muuttuminen aiheutti mittaustuloksiin suurehkoa vaihtelua, sillä reunoilta mitatessa virtausnopeuden huomattiin olevan suurempi kuin keskellä.

Tämä johtuu puhaltimen rakenteesta, sillä aksiaalipuhaltimen siipien ollessa il-
mavirtauksen suuntaiset, vain akselista ulkonevat siivet käytännössä liikuttavat
ilmaa, jolloin keskellä akselin kohdalla mikään ei ole liikuttamassa ilmaa (13, s.
121). Tämä ilmanvirtauksen epätasaisuus on havaittavissa, mikäli virtausnopeu-
den mittausta paikka on lähellä puhallinta. Täysin tasaisen virtauksen aikaansaa-
miseksi tulisi puhaltimen jälkeen olla puhaltimen teknisissä tiedoissa määritellyn
mittainen suora osuus ennen suulaketta, mutkia, tai muita komponentteja (13, s.
124). Todella tarkkojen mittausten suorittamiseksi voitaisiin tarvittaessa puhalti-
men jälkeiseen kanavaan asentaa kennorakenteita, jotka tasaavat virtausno-
peutta ja vähentävät ilman pyörteilyä (13, s. 125).

Koska tässä käyttökohteessa suulake tulee olemaan heti puhaltimen jälkeen, vir-
taus suulakkeen päässä voi olla epätasaista. Tästä syystä useiden mittausta paik-
kojen mittaustuloksista otettiin lopuksi keskiarvo. Excel-ohjelmistolla saatiin mit-
taustuloksista tehtyä käyrä, joka osoittautui lineaariseksi (kuva 17).



KUVA 17. Aksiaalipuhaltimen ja suulakkeen mittaustuloksista tehty käyrä

Puhaltimen pyörintänopeuden ja ilmavirran nopeuden suhteen mittauksella varmistettiin, ettei suulake aiheuta suurta painehäviötä järjestelmään, ollessaan suoraa puhaltimen jatkona. Lineaarinen muutos helpottaa haluttujen virtausnopeuksien löytämistä ja tekee taajuusmuuttajan ohjausjärjestelmästä selkeämpää.

Teoriatiedon ja käytännön testien perusteella puhaltimen ja taajuusmuuttajan yhdistelmä on toimiva ratkaisu, kun on tarve siirtää hallitusti erikokoisia materiaaleja samalla laitteistolla eri ohjelmien aikana. Kun suulakkeen koko ja muut tarvittavat lähtötiedot olivat selvillä, voitiin kaavalla 1 (15, s. 186) laskea, kuinka suuri puhaltimen tuottaman tilavuusvirran on oltava. Tilavuusvirta kertoo käytännössä sen, kuinka suuri ilmamäärä suulakkeen läpi puhalletaan tietyssä ajassa. Tilavuusvirran suuruudeksi saatiin noin 0,98 m³/s, eli noin 3525 m³/h.

$$q = A * v$$

KAAVA 1

$$0,048 \text{ m}^2 * 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 0,98 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

q = tilavuusvirta, eli virtaavan ilman määrä (m³/s)

A = suulakkeen aukon poikkipinta-ala (m²)

v = ilmavirtauksen nopeus (m/s)

Käytetty tilavuusvirran kaava on tarkoitettu nesteiden tilavuusvirran laskemiseen. Kaavaa voidaan kuitenkin käyttää suuntaa antavasti myös ilmamäärien laskemiseen virtauksen ollessa kokoon puristumatonta, eli tapauksissa, joissa paine ja virtausnopeus ovat pieniä. (15, s. 186.)

Laskettu tilavuusvirta voi kuulostaa suurelta, mutta on huomioitava, että laitteen vaatima tilavuusvirta tuotetaan kahdella puhaltimella. Yhden puhaltimen tulee siis pystyä tuottamaan noin 1 700 m³/h tilavuusvirta.

6.1.3 Puhaltimien valinta

Kun kaikki tarvittavat lähtöarvot oli selvitetty, voitiin etsiä sopivia komponentteja. Puhaltimeksi valittiin lopulta Ourax VH 2700-O2 -keskipakopuhallin. Suurin ero muihin vastaaviin puhaltimiin oli keskimääräistä alhaisempi melutaso, 71 dB, kun se useissa saman tehoisissa puhaltimissa oli yli 80 dB. Tätä pidettiin tärkeänä

ominaisuutena, sillä laitteen läheisyydessä tulee työskentelemään ihmisiä. Lisäksi valitun puhaltimen paineentuotto ja suurin tilavuusvirta ovat selvästi suurempia kuin toisessa vahvassa ehdokkaassa Coral DF/S2 -keskipakopuhaltimessa. Molemmilla puhaltimilla olisi päästy tavoitenopeuteen, mutta VH 2700-O2 -puhaltimen kanssa voidaan saavuttaa tavoitenopeus pienemmillä kierrosnopeuksilla. Valitulla puhaltimella ei siis käytetä täyttä kapasiteettiä peruskäyttötilanteessa. Näin ollen virtausnopeutta on mahdollista nostaa suunnitellusta, mikäli myöhemmin huomataan tälle tarvetta. (16; 17.)

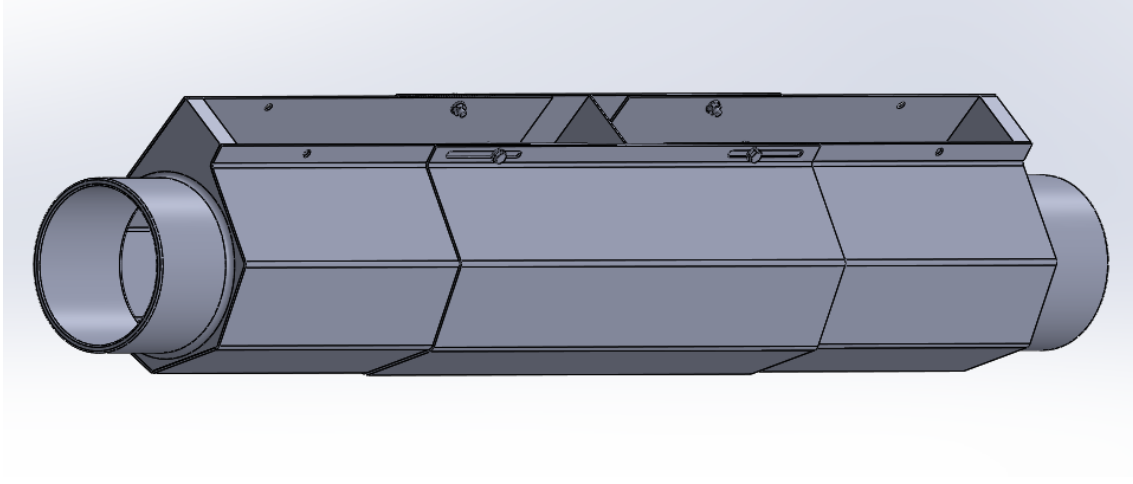
6.1.4 Suulakkeen suunnittelu

Suulakkeen valinta lähti liikkeelle tutustumalla olemassa oleviin ratkaisuihin. Valmiit ratkaisut osoittautuivat kuitenkin melko kalliiksi, joten paremmaksi vaihtoehdoksi koettiin itse suunniteltu ja valmistettu suulake. Suunnittelussa pyrittiin hyödyntämään olemassa olevien ratkaisujen geometriaa ja mittasuhteita (18). Yksi tärkeimmistä huomioon otettavista asioista oli säilyttää poikkileikkauspinta-ala samankokoisena puhaltimelta suulakkeeseen asti, jotta suulakkeen aiheuttama painehäviö olisi mahdollisimman pieni. Kuitenkin suulakkeen puhallusaukon tulisi olla tätä poikkileikkauspinta-alaa pienempi, jotta suulakkeen sisälle syntyy pieni paine, jonka ansiosta ulos purkautuva ilma liikkuu laminaarisesti, eli tasaisesti koko suulakkeen matkalta. (19.)

Suulakkeen geometriaa määritteli suuresti vieressä pyörivä rumpumeکانismi. Suulake tulisi saada mahdollisimman lähelle rumpua, joten tästä syystä suulakkeen liitos keskipakopuhaltimeen ei voi olla halkaisijaltaan kovin suuri, vaan tässä kohtaa jouduttiin suunnittelussa tekemään kompromisseja optimaalisen sijainnin ja optimaalisen liitännäkoon suhteen. Geometrian parantamisen varjopuolena painehäviön määrä nousi. Tilannetta kuitenkin parantaa se, että puhallin voidaan asentaa suoraan kiinni suulakkeeseen. Tilanne on näin ollen parempi verrattuna siihen, että puhallin olisi asennettu kauemmaksi ja ilma tuotaisiin suulakkeelle letkua pitkin, sillä letkut ja liitokset kasvattavat järjestelmän painehäviötä (14).

Toimeksiantaja toivoi suulakkeesta myös säädettävän, jotta sitä voisi soveltaa mahdollisesti muissakin käyttökohteissa. Suulakkeen rakenteessa ei silti saisi olla epäjatkuvuuskohtia, sillä ne vaikuttavat heikentävästi ilman virtaamiseen

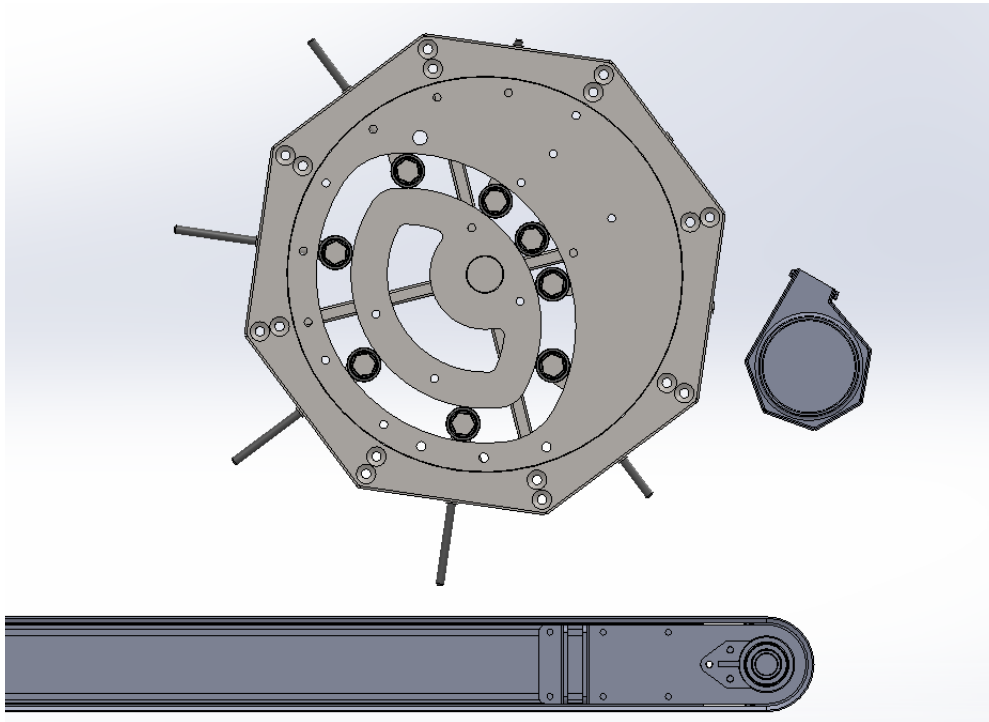
suulakkeen sisässä. Näillä reunaehdoilla ja olemassa olevilla tiedoilla syntyi yksinkertainen, sisäkkäin asetetuista särmätyistä peltiosista koostuva suulake, jonka molempiin päihin tehdään liitännät keskipakopuhaltimille (kuva 18).



KUVA 18. Särmätyistä peltiosista valmistettava pituus säädettävä suulake

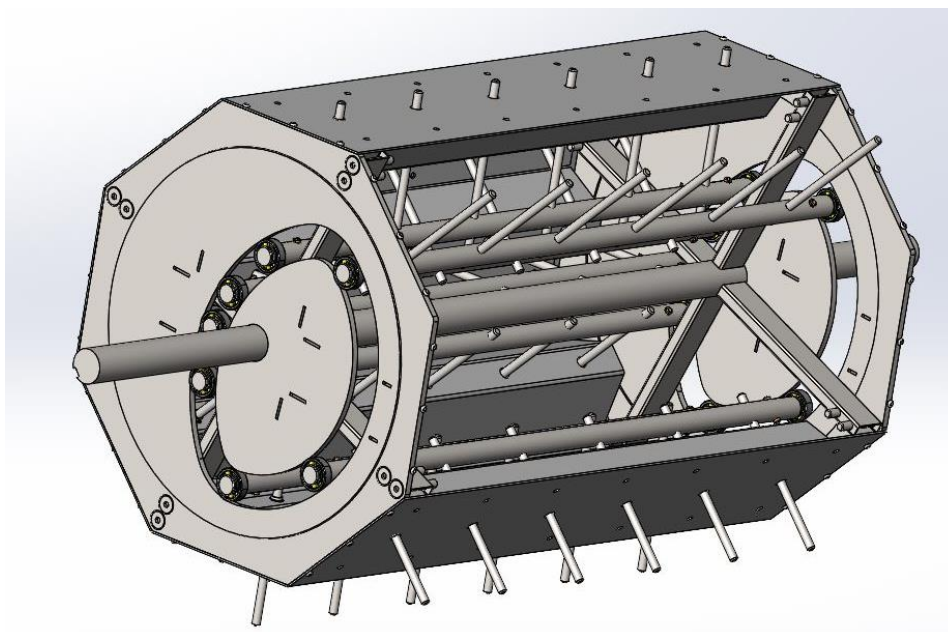
6.2 Rumpurakenteen mekaniikka

Yksityiskohtaisen suunnittelun alkupuolella rumpumekanismi ajateltiin kokonaan pyöriväksi. Piikkien mekaanisesti pakotettu liike toteutettiin siten, että rummun päätyihin suunniteltiin paksut paikallaan pysyvät levyt, joiden urissa kulkee ohjaavat laakerit. Laakerit ovat kiinni koko rummun läpi kulkevissa akseleissa ja näihin akseleihin on kiinnitetty kierretangoista tehdyt piikit. Päätylevyjen uran muotoilu on suunniteltu siten, että rummun pyöriessä akselit ohjautuvat kauemmaksi rummun keskiakselista siltä puolelta mistä materiaalia poimitaan ja ohjautuvat lähemmäksi rummun ylä- ja etupuolella, jotta materiaali irtoaa piikeistä. (Kuva 19.)



KUVA 19. Rumpurakenteen, suulakkeen ja kuljettimen sijoittelu kokoonpanossa

Suuri pyörivä massa ja useat liikkuvat osat herättivät kuitenkin hieman huolta siitä, tulisiko laite toimimaan siten kuin sen on ajateltu toimivan. Etenkin rummun sisälle sijoitettava mekaniikka koettiin haastavaksi paitsi laitteen toiminnan, myös laitteen valmistuksen kannalta. (Kuva 20.)

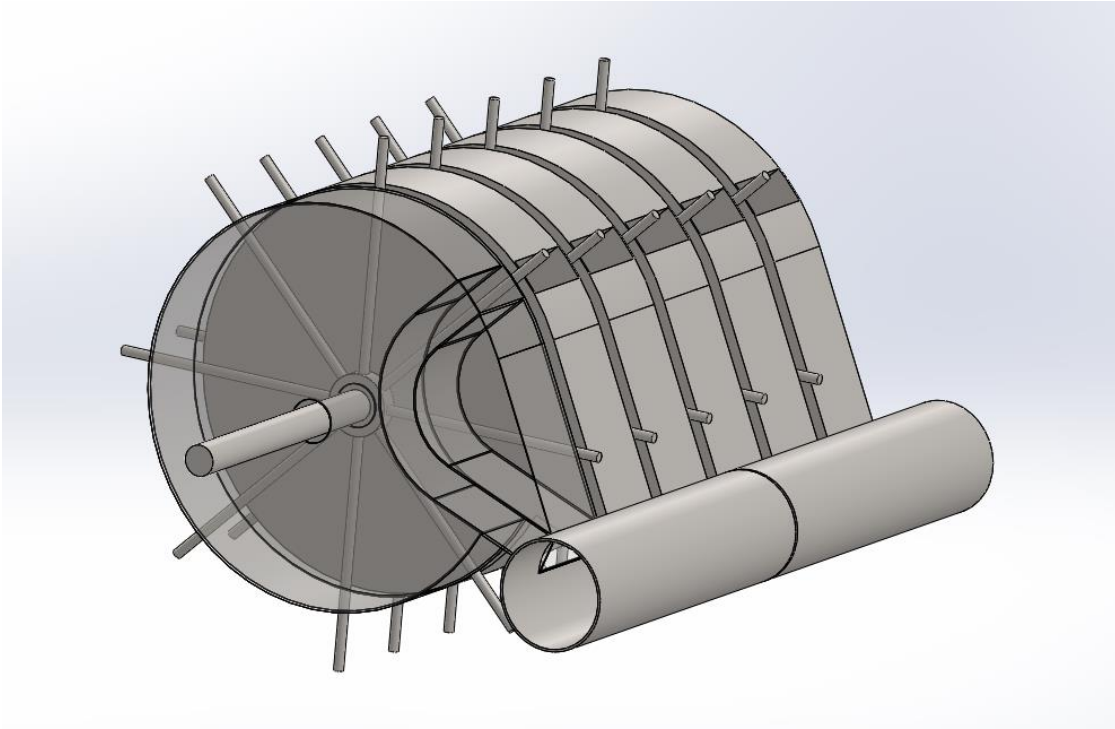


KUVA 20. Pyörivän rumpurakenteen osittainen poikkileikkauskuva

Koska mekaniikka kuitenkin vaikutti periaatetasolla toimivalta, suunnittelua jatkettiin. Samalla suunniteltiin muutostoimia, jotka olisivat toteutettavissa pienellä vaivalla, mikäli laite ei lopulta toimisikaan suunnitellusti. Rakenne yksinkertaistui suunnittelun edetessä muun muassa siten, että rummun sisässä liikkuvan piikki-mekanismin komponentteja saatiin integroitua isommiksi kokonaisuuksiksi, jolloin osien kokonaismäärää saatiin vähemmäksi. Tämän pääteltiin vähentävän laitteen valmistuskustannuksia ja helpottavan laitteen kokoonpanoa.

Haastava mekaniikka ajateltiin kuitenkin olevan myös vikaherkkä käyttötilanteessa, joten ennen kuin monimutkaista rakennetta jatkojalostettaisiin liian pitkälle, rakennetta yritettiin vielä mieltiä täysin eri näkökulmasta. Yksi mekaniikkaa selkeyttävä muutos oli tehdä 3D-materiaalin tyhjennys helpommaksi siten, että rumpu pysyisi paikallaan ja sen sijaan materiaalia syöttävä kuljetin kallistuisi alaspäin. Koska rumpurakennetta ei enää ollut tarkoitus nostaa, voitiin sen rakennetta mieltiä eri näkökulmasta.

Päätös muuttaa jo suunniteltua laitetta radikaalisti oli iso, mutta se kannatti, sillä useiden erilaisten pohdintojen kautta syntyi oivallus siitä, että rummun pintaosat pysyvät paikoillaan, pelkkien piikkien pyöriessä. Koska rummun pintaosat pysyvät paikoillaan, tätä vaihtoehtoa pohtiessa tuli myös idea, olisiko rumpumeکانismi ja ilmasuulake mahdollista yhdistää yhdeksi paketiksi, jolloin ainoaksi liikkuvaksi komponentiksi jäisi piikit ja niihin liittyvät osat. Lopulta löytyi ratkaisu, jota myös toimeksiantaja piti erittäin potentiaalisena ja huomattavasti alkuperäistä suunnitelmaa yksinkertaisempana. (Kuva 21.)



KUVA 21. Rummun ja suulakkeen yhdistetyn rakenteen pikaluonnos

6.2.1 Rummun kotelorakenne

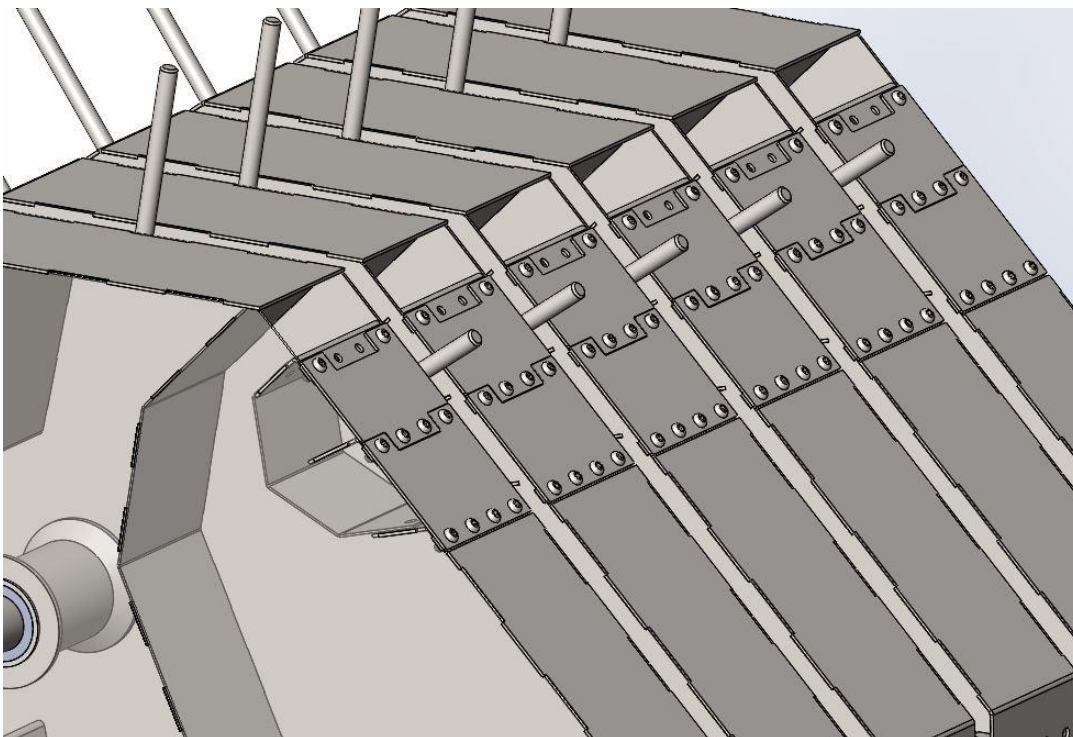
Uusi rumpurakenne muutti merkittävästi myös rummun valmistustapaa, sillä yhden suuren rakenteen sijasta rumpu koostuu nyt kuudesta elementistä. Yksittäiset elementit kiinnitetään toisiinsa jakotukin avulla, joka toimii kantavana rakenteena koko rumpukokoonpanolle. Uuden rumpurakenteen suunnittelussa tärkeimpiä tavoitteina oli saada rakenteesta yksinkertaisempi sekä rumpuelementtien liitos jakotukkiin ilmatiiviiksi.

Suunnittelun lähtökohtana toimi aiemmin tehty luonnos uudesta versiosta. Valmistusteknisesti ja ulkonäöllisesti merkittävin muutos heti alkuvaiheessa oli tehdä pyöreästä rummusta 10-kulmainen, jotta osat voitaisiin valmistaa helposti laserleikatuista peltiaihioista särmäämällä. Rumpuelementistä haettiin ensin kohdalleen kaikki merkitykselliset mittasuhteet ja oheiskomponenttien sijainnit. Tämän jälkeen jäljelle jäävät kaarevat pinnat muutettiin kantikkaiksi.

Koska suulake on integroituna jokaiseen rumpuelementtiin, menetettiin aiempaan versioon verrattuna mahdollisuus suulakkeen kulman säätämiseen opti-

maalisen puhalluskulman löytämiseksi. Tämä koettiin merkitykselliseksi ominaisuudeksi etenkin ensimmäisessä valmistettavassa laitteessa, sillä täyttä varmuutta sopivalle puhalluskulmalle ei ollut. Näin ollen tämän uuden version rumpuelementteihin haluttiin jonkinlainen puhalluskulman säätö. Rummun kotelora-kenteeseen suunniteltiin yhden puhallusaukon sijasta kolme eri aukkoa, josta ilma on mahdollista puhaltaa ulos. Jokainen puhallus aukko on eri kulmassa: 15°, 30° tai 45°, jotta ensitesteissä voidaan etsiä sopivin kulma. Käyttämättä jääneet aukot tullaan peittämään peitelevyillä, jotta ilma pääsee ulos ainoastaan valitusta suulakeaukosta.

Käyttämättömien suulakkeiden kohdalle, rumpuelementin sisäpuolelle suunniteltiin myös ilmanohjainlevy (kuva 22), jotta ilmavirta liikkuisi sulavasti mahdollisimman esteettömästi rumpuelementin sisältä avonaiselle suulakeaukolle. Suulakkeiden poikkileikkauksen pinta-alat määriteltiin jakamalla aiemmin puhaltimen mitoituksen yhteydessä määriteltä poikkileikkauksen kokonaispinta-ala rumpuelementtien lukumäärällä. Näin ollen aiemmat komponenttivalinnat, testitulokset ja mitoituslaskut olivat edelleen käyttökelpoisia.



KUVA 22. Suulakeaukot, niiden peitelevyt ja sisäpuolen ilmanohjainlevy

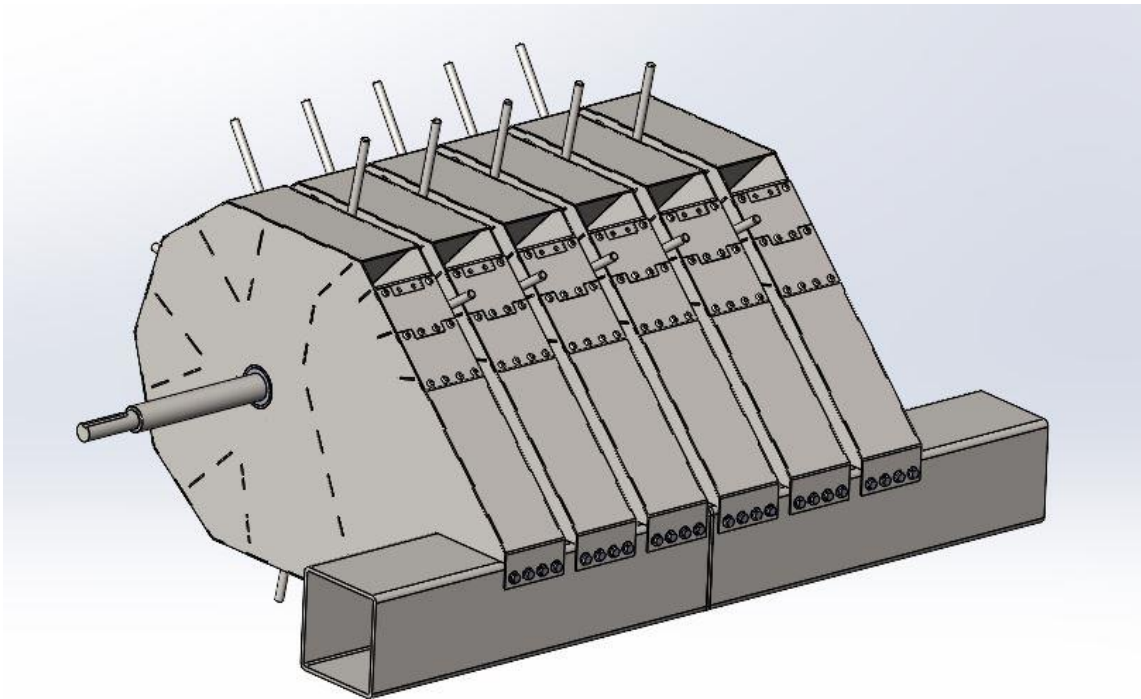
Piikit pyörivät rumpurakenteen keskellä, keskiakseliin kiinnitettynä, joten kalvomateriaalin irrottamiseksi piikistä rumpuelementtien tulee olla toiselta puolelta epäsymmetrisiä, jotta piikit poistuvat elementtien väliin. Toimintaperiaate on edelleen sama kuin alkuperäisessä suunnitelmassa, joka oli myös proof-of-concept tasolla toimivaksi todettu, mutta toteutustapa muuttui.

Kun rumpuelementin ulkopinta on rummun toisella puolen kauempana keskiakselista, piikit vetäytyvät rummun pinnasta katsottuna sisäänpäin tällä alueella. Tässä ratkaisussa rumpuelementin epäsymmetrisyys mahdollistaa piikin vetäytymisen sisään ilman monimutkaisia mekanismeja. Kuten kuvasta 22 on nähtävissä, rumpuelementtien geometria on suunniteltu siten, että piikit ovat lähes kokonaan poissa näkyvistä samaan aikaan, kun kalvomateriaali siirtyy puhallusaukkojen kohdalle. Tämä tarkoittaa, että kalvomateriaali irrotetaan piikeistä sekä geometrian muutoksen, että ilmavirran avulla. Kaksi irrotustapaa yhdessä pienentää todennäköisyyttä jumitilanteen syntymiseen ja kalvomateriaali pääsee lentämään ilmavirran vaikutuksesta vapaasti ja helposti eteenpäin.

Kokonaisuudessa aiheutti hieman valmistusteknisiä haasteita vielä jakotukki. Uuden rakenteen luonnoksessa jakotukki suunniteltiin pyöreäksi sillä perusteella, että se on ilmavirtauksen kannalta järkevin muoto sekä helposti yhdistettävissä keskipakopuhaltimeen. Pyöreä muoto tuotti kuitenkin haasteita rumpuelementtien helpolle ja kestäväälle kiinnitystavalle, kun samaan aikaan liitoskohdasta tulisi saada myös ilmatiivis. Myös jakotukin kiinnittäminen koko laitteen runkorakenteeseen olisi hieman haastavaa pyöreän muodon vuoksi. Näistä syistä jakotukista päätettiin tehdä kantikas, jotta kaikki edellä mainitut ongelmakohdat saataisiin korjattua.

Jakotukiksi valittiin 200x200 mm kokoinen neliöputkipalkki, jonka sisäosan poikkileikkauksen pinta-ala on tarpeeksi suuri, ettei se aiheuta painehäviötä puhallusjärjestelmässä, kun ilmaa puhalletaan sen lävitse. Neliön muotoiseen jakotukkiin oli nyt myös mahdollista kiinnittää rumpuelementit yksinkertaisesti pulttiliitoksella (kuva 23). Neliöputkipalkin kahdelle sivulle tulevat rumpuelementtien liitospinnat voidaan asennuksen yhteydessä tiivistää siihen tarkoitettulla tiivisteliimamassalla. Ilma tuotetaan kahdella keskipakopuhaltimella, joten jakotukki tuli jakaa kahteen osaan. Jakotukin keskiliinjan, kahden osan väliin tehtiin väliseinä (kuva 23), joka

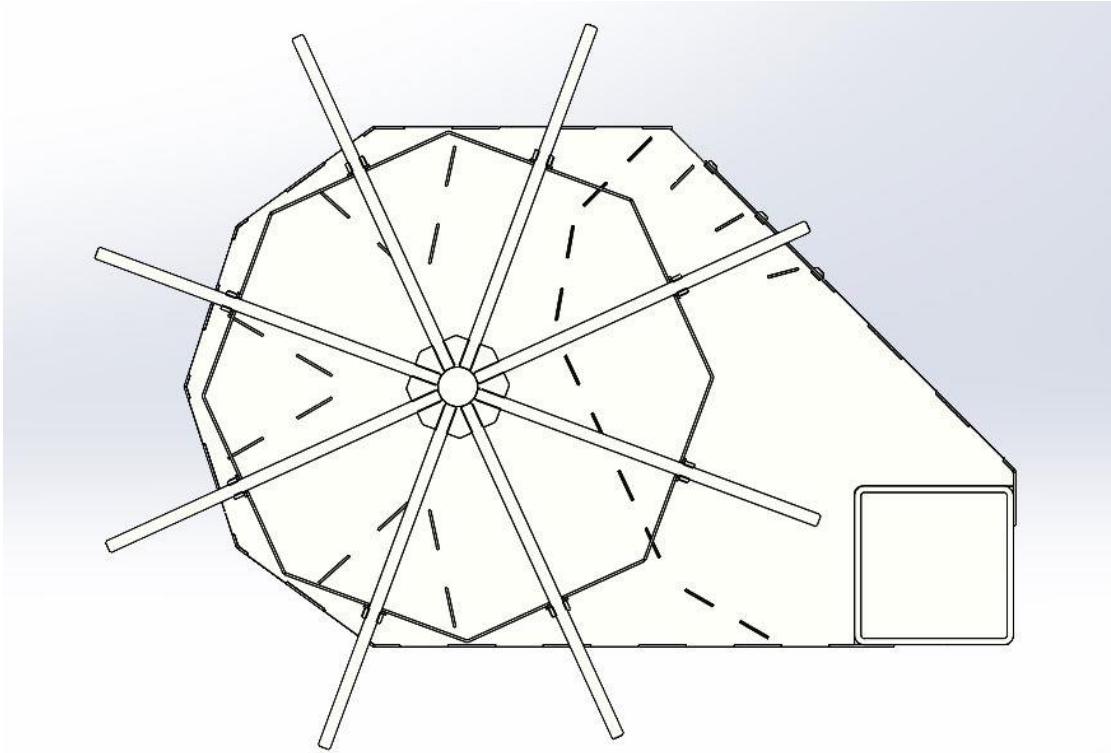
jakaa jakotukin ja rumpuelementit kahteen lohkoon. Näin ollen yksi puhallin syötää ilmaa kolmeen rumpuelementtiin.



KUVA 23. Rumpurakenteen yleiskuva

6.2.2 Piikkimekanismi

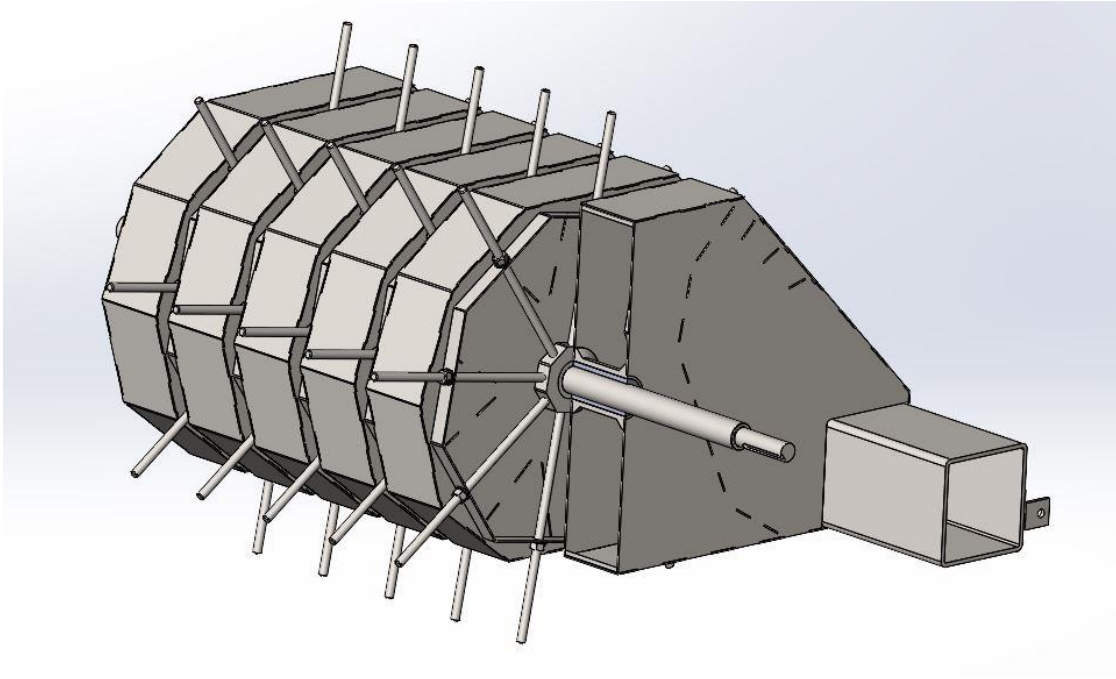
Koko laitteen toiminnan kannalta mahdollisesti yksi tärkeimmistä toiminnoista on piikkien pyörivä liike, jolla käsiteltävän materiaalin seasta poimitaan 2D-materiaalit. Uuden rumpurakenteen kanssa piikit ovat nyt kiinteitä, mutta rumpuelementtien geometrian avulla toimintaperiaate on pysynyt samana. Piikit on kiinnitetty keskiakseliin, joka kulkee kaikkien rumpuelementtien läpi. Piikit on lisäksi vahvistettu tukemalla ne toisiinsa erillisellä metallikehällä (kuva 24). Tukikehän ansiosta jokaisella piikillä on kaksi kiinnityspistettä kokoonpanossa, jolloin piikki taipuu huomattavasti vähemmän käyttötilanteessa. Tukikehä on saman levyinen kuin rumpuelementtien väli, joten tukikehän avulla saadaan rumpurakenteen ulkopinta kokonaan suljettua. Käsiteltävä materiaali ei siis voi päätyä rumpuelementtien väliin, joten tukikehä vähentää mahdollisten jumitilanteiden syntyä.



KUVA 24. Piikkimekanismin ja rumpuelementtien poikkileikkauskuva

Rumpuelementtien massan ajateltiin aluksi lepäävän keskiakselin päällä. Tämä toi tarpeen asentaa jokaiseen rumpuelementtiin laakerit, jotta keskiakselin olisi mahdollista pyöriä rumpuelementtien keskellä. Jakotukki päätettiin tässä kohtaa suunnitella rumpuelementtejä kannattelevaksi rakenteeksi, sillä kiinteän rumpurakenteen ja pyörivän keskiakselin laakerointi vaikutti haastavalta kokoonpanon kannalta.

Koska jakotukki on kantava rakenne, rumpuelementit eivät lepää enää keskiakselin päällä. Näin ollen riitti, että rumpuelementtien keskelle suunniteltiin paikat nylonholkeille (kuva 25), jotka toimivat vain ohjaavina komponentteina keskiakselille. Jakotukiksi valitun neliöputkipalkin ajateltiin soveltuvan kantavaksi rakenteeksi hyvin, kunhan palkin seinämävahvuus on riittävä. Jakotukin kannatellessa rumpuelementtien painon, oli mahdollista suunnitella keskiakselistakin hieman ohuempi, sillä sen ei enää tarvinnut kannatella suuria massoja. Tämä helpotti akselin päätylaakeroinnin suunnittelua ja vaihdemoottorin asentamista.



KUVA 25. Osittainen läpileikkaus rumpurakenteesta

6.3 Laitteen runko

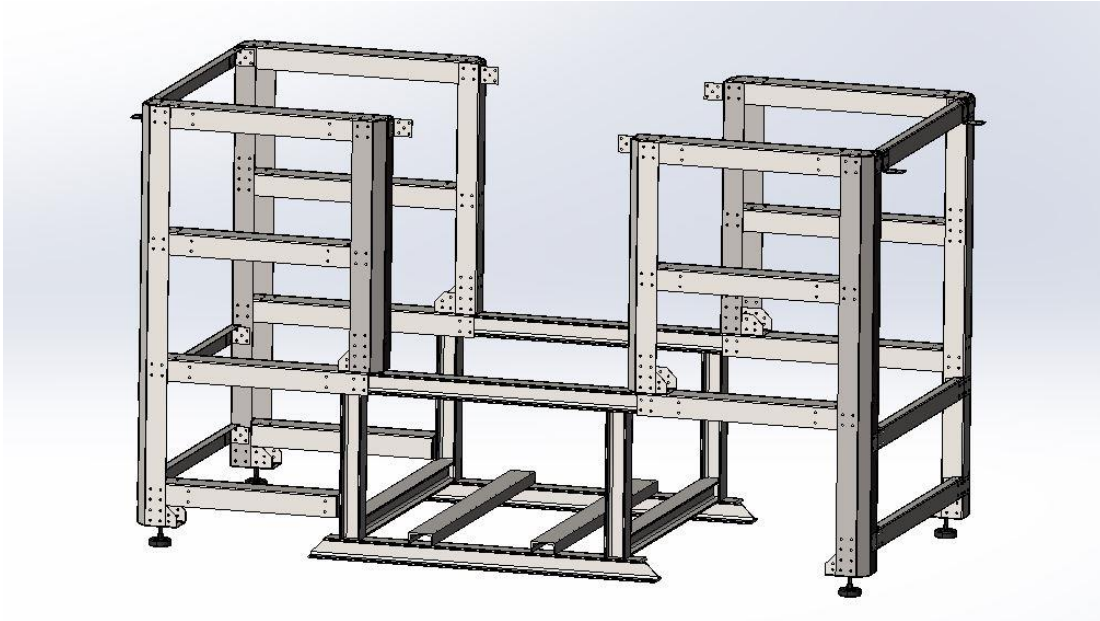
Vaikka linjastolla tulee olemaan useita erilaisia laitteita, kaikki laitteet pyritään asentamaan samanlaisiin, särmätyistä peltiosista koottaviin modulaarisiin runkorakenteisiin. Toimeksiantaja suunnitteli modulaarisen runkorakenteen käytettäväksi jokaisessa linjaston laitteessa paitsi ulkonäkösyistä, myös valmistusteknisistä syistä. Modulaarinen peltirunkorakenne koostuu useista särmätyistä peltiosista, jotka liitetään toisiinsa pulttiliitoksella. Perusmallin runkorakenne koostuu neljästä pystytolpasta, jotka on tuettu vaakasuuntaisilla särmätyillä peltiosilla (kuva 26). Modulaariseksi rakenteen tekee se, että pulttiliitokset mahdollistavat yksittäisten osien vaihtamisen eri kokoiisiin, jolloin runkorakenteen pituus, korkeus tai leveys saadaan muutettua helposti muutaman osan vaihdolla.



KUVA 26. Modulaarisen peltirunkorakenteen yleiskuva

Syöttölaitteiston suuri massa osoittautui kuitenkin hieman haastavaksi, sillä rumpurakenteen massa keskipakopuhaltimien ja vaihdemoottorin kanssa lähenee jo 450 kg:aa. On siis selvää, ettei peltirunko kestäisi laitteen aiheuttamaa kuormitusta. Syöttölaitteistoon tulisi suuren massan vuoksi tehdä teräspalkkirunko, tai muu selvästi peltirunkoa kestävämpi rakenne. Palkkirunko ei sopisi ulkonäöllisesti muihin linjaston laitteisiin, eikä tässä ratkaisussa pystyisi hyödyntämään peltirunkoihin suunniteltuja laitoja tai kiinnityselementtejä.

Ratkaisuna molempien rakenteiden parhaiden puolien hyödyntämiseen oli luonnollisesti yhdistää molemmat runkorakenteet. Syöttölaitteen rumpurakenteen alle suunniteltiin yksinkertainen I-palkkirunko, jonka molempiin päihin kiinnitetään modulaarisen peltirunkorakenteen puolikkaat. (Kuva 27.)



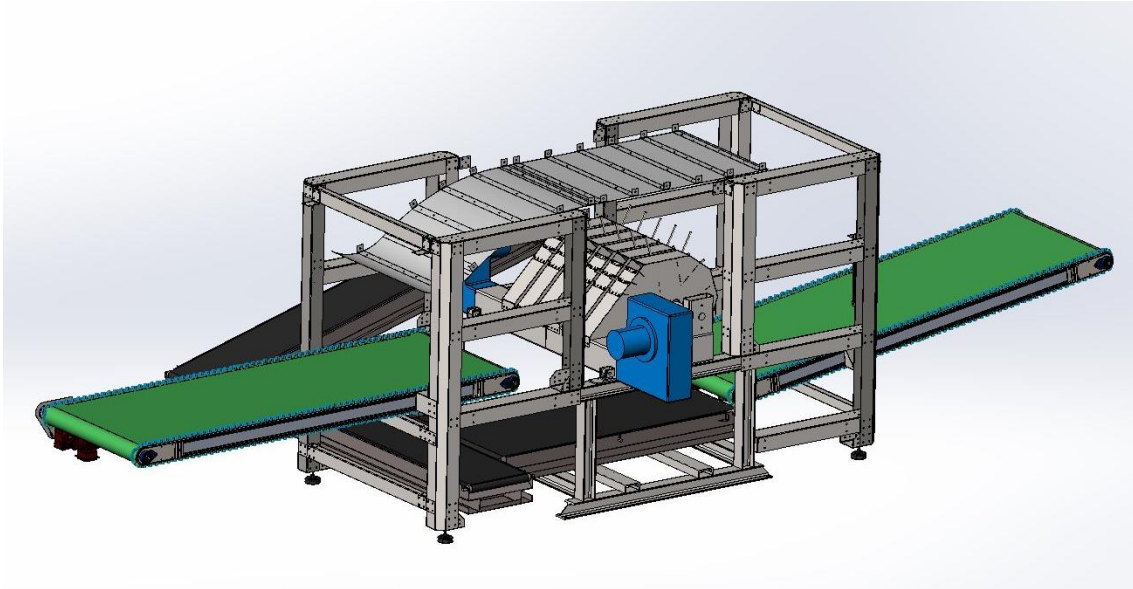
KUVA 27. Palkkirunko ja modulaarinen peltirunko yhdistettynä

Yhdistetty runkorakenne vastaa ulkonäöllisesti linjaston muita laitteita, kun palkkirunko on saatu piilotettua peltirunkojen sisään. Palkkirunko suunniteltiin koottavaksi hitsaamalla ja peltirungot pulttiliitoksilla. Palkkirunkoon lisättiin samalla myös leveät U-profiilipalkit, jotta palkkirunko ja sen päällä oleva rumpurakenne olisi helposti siirrettävissä trukilla. Laitteen siirtämisen ja asentamisen ajateltiin helpottuvan myös siten, että kokonaisuus on helposti purettavissa kolmeen osaan. Palkkirungon sekä sen päällä olevan syöttölaitteen voi siirtää erikseen trukin avulla asennuspaikalle ja lopuksi kiinnittää peltirungot palkkirunkoon pulttiliitoksella.

6.4 Kuljettimet ja oheisrakenteet

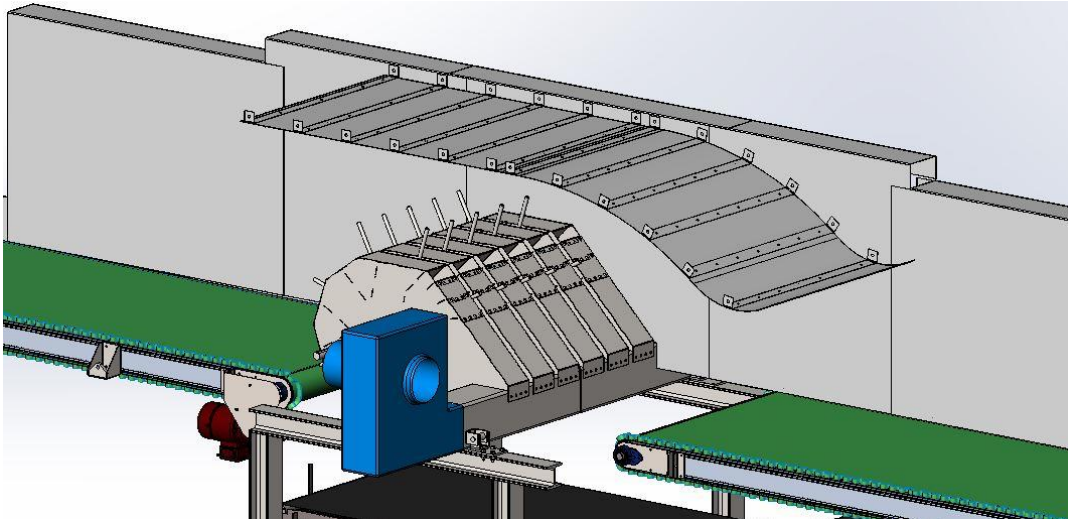
Lopuksi laitteen 3D-malliin sijoitettiin hihnakuljettimet ja laitarakenteet. Koko linjastolle päätettiin hankkia samanlaiset kuljettimet linjaston modulaarisuuden säilyttämiseksi. Kuljetintyyppiä valittiin MA-Tech PLATTA 20 -hihnakuljetin 1000 mm hyötyleveydellä. Tämä kuljetinmalli todettiin linjastolle sopivaksi muun muassa sen kevyen alumiinirungon ja useiden eri hihnamateriaalivaihtoehtojen vuoksi (20). Kuljettimet varustettiin myös vesipesun mahdollistavilla lisäreunoilla.

Koska kuljettimet oli jo esivalittu, tehtäväksi jäi vain suunnitella kyseisten kuljettimien tarkka sijainti kokoonpanossa sekä kiinnitys laitteen runkoon. Samalla myös hylkylinjan kuljettimet löysivät paikkansa kokoonpanossa. (Kuva 28.)



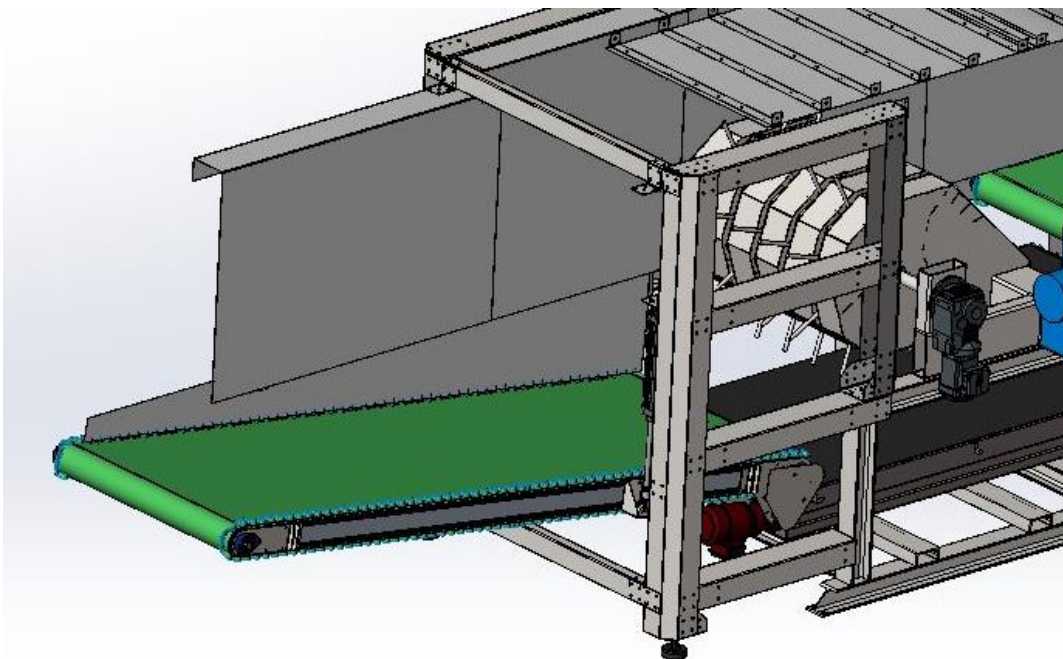
KUVA 28. Laitteen 3D-mallin yleiskuva kuljettimien kanssa ilman laitoja

Myöskään laitojen kohdalla ei ollut juuri soveltamisen tarvetta, sillä tärkein kriteeri laidoille oli olla yksinkertainen ja muun linjaston muotokieleeseen sopiva. Laitojen päätehtävä on vain muodostaa suljettu tunneli, jossa materiaali kulkee hihnakuljettimilla eteenpäin. Laitojen suunnittelun yhteydessä suunniteltiin myös kattoelementti. Huomioitavaa kattoelementissä on loppupäästä ylöspäin nouseva kaarre, joka pyrkii ohjaamaan ilmaa ylöspäin, kun ilmavirta kulkeutuu pois kourusta. Kun kattoelementti loppuu, ilmalle on huomattavasti enemmän tilaa poistua. Tämä aiheuttaa sen, että ilman virtausnopeus romahtaa ja materiaali ei enää pysty lentämään pidemmälle. Tällä tavoin saadaan materiaali putoamaan seuraavalle hihnakuljettimelle ja poistettua ilmavirtaus tunnelista. Ilmavirtauksen ei haluttu päätyvän linjaston seuraavalle laitteelle asti, sillä se voisi vaikuttaa heikentävästi materiaalin käsittelyyn. (Kuva 29.)



KUVA 29. Osittainen läpileikkaus laitteesta laitojen ja kattoelementin kanssa

Koska syöttöasemalta syöttölaitteelle saapuvan kuljettimen täytyy laskeutua alaspäin 3D-materiaalin tyhjentämiseksi, laitojen rakenne jouduttiin suunnittelemaan saapuvan kuljettimen ympärille hieman erilaiseksi. Laidoista tehtiin kaksiosaiset, jossa toinen puolisko laidasta on kiinni kuljettimessa ja toinen puolisko on kiinnitetty laitteen runkorakenteeseen. Kuljettimen laskeutuessa ala-asentoon limittäin olevat laitakappaleet pitävät tunnelin laidat suljettuna, jotta materiaalia ei pääse tippumaan kuljettimen sivulle. (Kuva 30.)



KUVA 30. Laskeutuvan kuljettimen laitarakenne tyhjennysvaiheessa

7 RUMPURAKENTEEN KOMPONENTTIEN MITOITUS

Rumpurakenteen 3D-mallien saadessa lopullisen muotonsa, päästiin mitoittamaan komponentteja. Kaikki toiminnan kannalta merkittävimmät komponentit mitoitettiin asianmukaisten laskukaavojen avulla. Lisäksi hyödynnettiin muun muassa Solidworks-suunnitteluohjelmiston simulointityökaluja. Ensiksi mitoitettiin vaihdemoottori, joka pyörittää keskiakselia ja sitä kautta piikkejä. Tämä mitoitus tehtiin limittäin keskiakselin mitoituksen kanssa, sillä näiden komponenttien välinen asennustapa vaikutti komponenttien ja lopullisten mittojen valintaan.

7.1 Vaihdemoottorin mitoitus

Vaihdemoottorin tehon ja vääntömomentin tarvetta selvitettiin päättelämällä ensin ”pahin mahdollinen käyttötilanne”, josta laitteen tulee suoriutua ja tästä käyttötilanteesta voitaisiin laskea komponentteihin vaikuttavia voimia. Tällaiseksi tilanteeksi pääteltiin käyttötilanteen hetki, jossa yhteen tai useampaan piikkiin on tarttunut painava massa ja jota pyörimisliike pyrkii vetämään rummun yli. Massaksi arvioitiin 10 kilogrammaa. Arvio perustui referenssimateriaalien keskimääräisiin massoihin sekä arvioitiin siitä, kuinka paljon materiaalia voisi yhtäaikaisesti saapua syöttölaitteelle.

Koska realistinen arvio käyttötilanteesta on vaikea tehdä, laskemiseen valittu massa on selvästi yläkanttiin arvioitu, jotta mitoitukseen saatiin varmuutta. Jotta massa saadaan siirrettyä rummun yli tietyllä nopeudella, tarvitsee vaihdemoottorin tuottaa suurempi vääntömomentti kuin massan siirtämiseen tarvittava vääntömomentti on (15, s. 168). Kaavalla 2 laskettiin ensin teho, jolla massa nousee piikkien pyörimisliikkeellä rummun yli. (15, s. 168).

$$P = F * v$$

KAAVA 2

$$98,067 \text{ N} * 0.417 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 40,8 \text{ W}$$

$$P = \text{teho (W)}$$

$$F = \text{massa (N)}$$

$$v = \text{massan liikenopeus (m/s)}$$

Seuraavaksi laskettiin massan siirtämiseen vaadittava momentti kaavalla 3 (15, s. 168).

$$M = F * r$$

KAAVA 3

$$98,067 \text{ N} * 0,465 \text{ m} \approx 45,6 \text{ Nm}$$

M = vääntömomentti (Nm)

F = massa (N)

r = vääntövarren pituus / pituus piikin kärjestä keskiakseliin (m)

Tehon tarpeeksi saatiin noin 40,8 W ja momentin tarpeeksi noin 45,6 Nm. Tehon ja momentin tarve on varsin maltillinen. Näiden tulosten perusteella voitiin jo tehdä vaihdemoottorin esivalinta, jotta vaihdemoottorin teknisten tietojen avulla voitiin mitoittaa muita komponentteja. Moottoriksi valittiin SEW Eurodrive KA 37 DRN 63MS4. Vaihdemoottorin teho on 0,12kW ja vääntömomentti 81 Nm (21, s. 553). Vaihdemoottori on ylimitoitettu jopa "worst case" -mitoitukseen nähden, mutta pääsyy valintaan oli hyvin saatavilla olevat tiedot ja tuotekatalogit sekä so-piva koko ja kiinnitystapa syöttölaitteiston kokoonpanoa ajatellen.

Ylimitoituksesta ei ole kyseisessä käyttökohteessa varsinaisesti haittaa. Lisäksi ylimitoittamalla jätetään pelivaraa mahdollisiin muutoksiin, joita laitteen tuotekehityksen aikana ensitestien jälkeen tullaan mahdollisesti tekemään. Vaihdemoottori on suhteellisen kallis hankinta, joten ylimitoitettuna sen pääteltiin soveltuvan käyttökohteeseen, vaikka jatkokehityksen yhteydessä päädyttäisiin tekemään suuriakin muutoksia.

Etenkin käynnistyksessä, vielä toistaiseksi liikkumaton massa vastustaa liikettä, joten vaihdemoottorin mitoitus vaikuttaa siirrettävän materiaalin massan lisäksi keskiakselin, piikkien ja tukikehän aiheuttama hitausmomentti (22, s. 15). Hitausmomentit selvitettiin erikseen keskiakselille, piikeille ja tukikehälle. Hitausmomentti tuli selvittää, jotta nähdään, riittääkö vaihdemoottorin suorituskyky kiihdyttämään pyörivät massat tavoitenopeuteen riittävän ripeästi.

Keskiakselia tarkasteltiin kiinteänä sylinterinä, joka pyörii oman keskilinjansa ympäri. Keskiakselin hitausmomentti laskettiin kaavalla 4 (15, s. 166), arvioiden akselin halkaisijaksi tässä vaiheessa 40 mm. Sijoittamalla arvot kaavaan 4 saadaan keskiakselin hitausmomentiksi noin 0,003 kg·m².

$$J = \frac{1}{2} * m * r^2 \quad \text{KAAVA 4}$$

$$J = \frac{1}{2} * 15,8kg * (0,02m)^2 \approx 0,003kg * m^2$$

J = hitausmomentti (kg·m²)

m = akselin massa (N)

r = akselin säde (m)

Piikkejä tarkasteltiin ohuina sauvoina, jotka ovat toisesta päästään kiinnitettynä keskiakseliin ja pyörivät näin ollen keskiakselin mukana. Yksittäisen piikin hitausmomentti laskettiin kaavalla 5 (15, s. 166). Sijoittamalla arvot kaavaan 5 saadaan yhden piikin hitausmomentiksi noin 2,02 kg·m².

$$J = \frac{1}{3} * m * l^2 \quad \text{KAAVA 5}$$

$$J = \frac{1}{3} * 0,7kg * (0,465m)^2 \approx 2,02kg * m^2$$

J = hitausmomentti (kg·m²)

m = sauvan massa (N)

l = ohuen sauvan pituus (m)

Tukikehää tarkasteltiin ohuena vanteena. Yksittäisen tukikehän hitausmomentti laskettiin kaavalla 6 (15, s. 166). Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saadaan yhden tukikehän hitausmomentiksi noin 0,11 kg·m².

$$J = m * r^2 \quad \text{KAAVA 6}$$

$$J = 1,3kg * (0,290m)^2 \approx 0,11 kg * m^2$$

J = hitausmomentti (kg·m²)

m = akselin massa (N)

r = kehän säde (m)

Yksittäisten hitausmomenttien laskemisen jälkeen piikkien hitausmomentti kerrottiin piikkien lukumäärällä ja tukikehän hitausmomentti tukikehien lukumäärällä. Lopuksi kaikki hitausmomentit laskettiin yhteen, jotta saatiin pyörivien osien kokonaishitausmomentti. Kokonaishitausmomentiksi saatiin noin 2,57 kg·m², joka redusoidaan vielä moottorin akselille kaavalla 7 (24, s. 514).

$$J_{red} = J_{kok.} * \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \text{KAAVA 7}$$

$$\left(\frac{14 \text{ rpm}}{1380 \text{ rpm}}\right)^2 * 2,57 \text{ kg} * \text{m}^2 \approx 2,65 * 10^{-4} \text{ kg} * \text{m}^2$$

J_{red} = moottorin akselille redusoitu hitausmomentti (kg·m²)

$J_{kok.}$ = yhteenlasketut hitausmomentit (kg·m²)

n_1 = toisioakselin pyörintänopeus (rpm)

n_2 = moottorin pyörintänopeus (rpm)

Redusoitu hitausmomentti sekä moottorin ja vaihteiston omat hitausmomentit sijoitetaan kaavaan 8 (14, s. 168), jolla saadaan laskettua kulmakiihtyvyys. Kaavassa käytetään moottorin käyttötilanteen momenttia, vaikka moottorin käynnistysmomentti on huomattavasti käyttömomenttia suurempi. Syy tähän on pääteltävissä, sillä käynnistysmomentti vaikuttaa vain käynnistyshetkellä. Kiihtyessään tavoitenopeuteen, todellinen momentti kiihdytyksen aikana on lähempänä käyttötilanteen momenttia. (21, s. 866–867.)

$$M = J * \alpha \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{M}{J_{moot.} + J_{vaih.} + J_{red.}} \quad \text{KAAVA 8}$$

$$\frac{0,83 \text{ Nm}}{2,95 * 10^{-4} \text{ kg} * \text{m}^2 + 1,05 * 10^{-4} \text{ kg} * \text{m}^2 + 2,65 * 10^{-4} \text{ kg} * \text{m}^2} \approx 1,25 * 10^3 \frac{1}{\text{s}^2}$$

M = moottorin tuottama vääntömomentti (Nm)

$J_{moot.}$ = redusoitu hitausmomentti (kg·m²)

$J_{vaih.}$ = redusoitu hitausmomentti (kg·m²)

$J_{red.}$ = redusoitu hitausmomentti (kg·m²)

α = kulmakiihtyvyys $\left(\frac{1}{\text{s}^2}\right)$

Kulmakiihtyvyyden avulla voitiin nyt tarkistaa esivalitun vaihdemoottorin sopivuus selvittämällä, pystyykö moottori kiihdyttämään piikkimekanismin tavoitenopeuteen kohtuullisessa ajassa. Kiihdytysaika tavoitenopeuteen lasketaan kaavalla 9 (15, s. 167).

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t} \rightarrow t = \frac{\omega - \omega_0}{\alpha}$$

KAAVA 9

$$\frac{2,41 \frac{1}{s} - 0}{1,25 \cdot 10^3 \frac{1}{s^2}} \approx 0,002 \text{ s}$$

$$\alpha = \text{kulmakiihtyvyys} \left(\frac{1}{s^2} \right)$$

$$\omega = \text{kulmanopeus lopussa} \left(\frac{1}{s} \right)$$

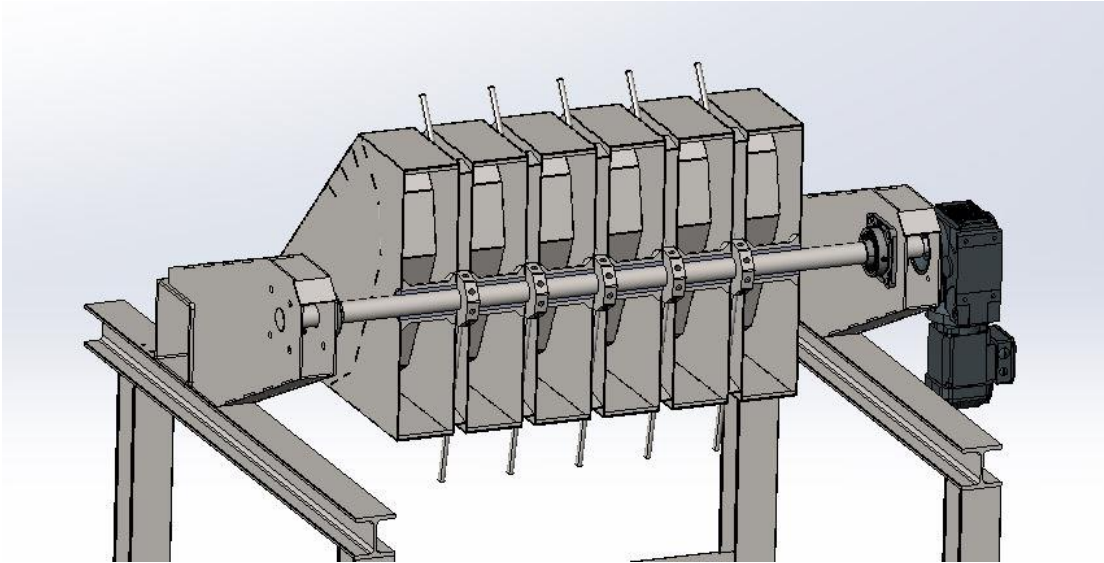
$$\omega_0 = \text{kulmanopeus alussa} \left(\frac{1}{s} \right)$$

$$t = \text{kiihdytykseen kuluva aika (s)}$$

Redusoidun hitausmomentin ollessa todella pieni, voitiin jo päätellä se, mitä laskemalla juuri varmistettiin: vaihdemoottori kykenee kiihdyttämään pyörivät massat tavoitenopeuteen todella ripeästi.

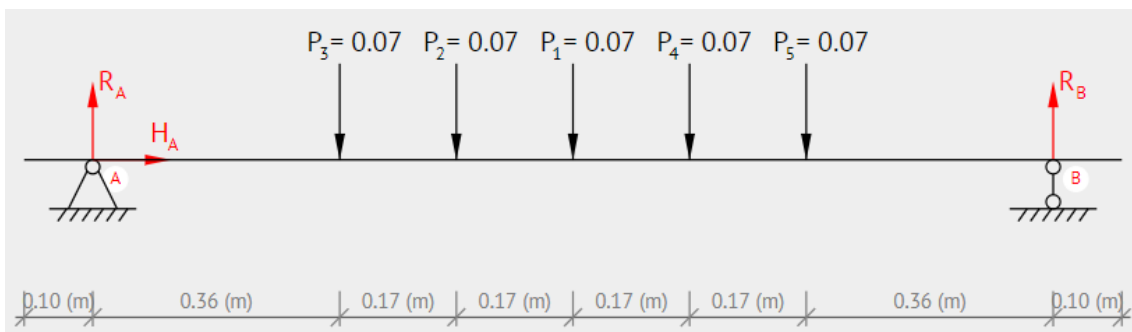
7.2 Piikkimekanismin akselin mitoitus

Alustavasti akselin halkaisijaksi oli arvioitu 40 mm. Tämä arvio perustui sopuuh-taiseen kokoon ympäröiviin komponentteihin nähden (kuva 31). Lisäksi tämä koko olisi helposti sovitettavissa vaihdemoottorin toisioakseliin. Akselin mitoitusta lähdettiin ratkaisemaan näin ollen siitä näkökulmasta, riittääkö tämä hyväksi to-dettu 40 mm akselin halkaisijaksi.



KUVA 31. Osittainen läpileikkaus, josta ilmenee akselin sijainti kokoonpanossa

Akselin mitoitukseen vaikuttaa siihen kohdistuvat kuormitukset. Tässä tapauksessa akseliin kohdistuu vaihdemoottorin tuottaman vääntömomentin lisäksi piikkien ja tukikehien massojen aiheuttama taivutusjännitys (kuva 32). Kuvaan 32 ei ole merkitty akselin omamassaa selkeämmän kuvan vuoksi, mutta omamassa on otettu kuitenkin laskennassa huomioon. Akselin taivutusjännityksen tarkastelussa hyödynnettiin Excelin lisäksi selainpohjaista Beamguru-ohjelmaa (23). Ohjelmassa käytetty voiman yksikkö on kN.



KUVA 32. Akselin tukipisteet ja massojen aiheuttama kuormitus akseliin (23)

Akselin kestävyyttä tarkasteltiin ensin taivutusjännityksen osalta. Taivutusjännitys on koneen käynnissä ollessa jatkuvaa ja väsyttävää, sillä voiman suunta akselilla muuttuu jatkuvasti akselin pyöriessä. Koska taivutusjännitys on väsyttävää kuormitusta, se vaikutti kriittisemmältä kestävyteen vaikuttavalta tekijältä kuin

harvoin vaikuttava vääntömomentti käynnistyksessä. Käynnistysmomentti vaikuttaa vain käynnistystilanteissa, joita tapahtuu määrällisesti todella harvoin, sillä laitteen on tarkoitus toimia pitkiä aikoja tauotta.

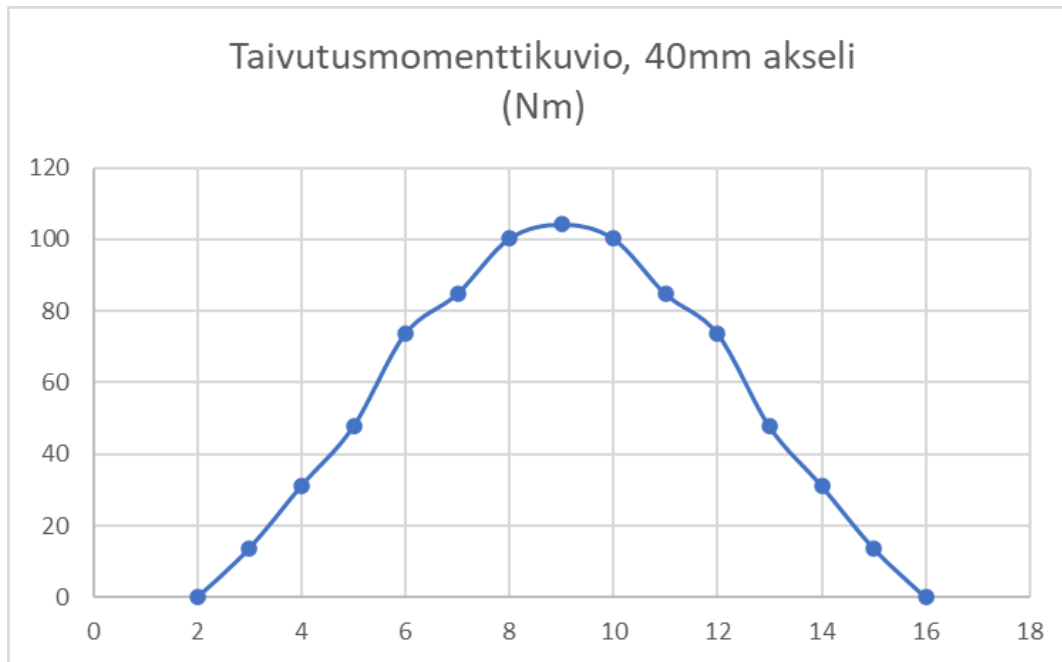
7.2.1 Akselin tarkastelu taivutusjännityksen osalta

Akseliin kiinnitetyt massat pyrkivät taivuttamaan akselia, joten akseliin muodostuu taivutusmomenttia. Akselin omamassan ja akseliin kiinnitettyjen massojen aiheuttamat taivutusmomentit laskettiin kaksitukisen palkin taivutusmomentin laskukaavoilla. Kun taivutusmomenttia tarkasteltiin useista eri kohdista akselia, havaittiin, että suurin taivutusmomentti kohdistuu keskelle akselia. Kaikki laskut suoritettiin Excelillä ja tulokset kerättiin taulukkoon 2. (15, s. 316–317.)

TAULUKKO 2. Akselin taivutusmomentit eri kohdissa akselia, akselin keskellä suurin taivutusmomentti tummennettuna

x (m)	piikit ja tukikehät					omamassa (Nm)	Mtkok. (Nm)
	Mt1 (Nm)	Mt2 (Nm)	Mt3 (Nm)	Mt4 (Nm)	Mt5 (Nm)		
0,075	1,30	1,96	2,63	1,96	1,30	4,59	13,75
0,175	3,04	4,58	6,13	4,58	3,04	9,87	31,24
0,275	4,78	7,20	9,63	7,20	4,78	14,19	47,77
0,375	16,94	9,82	13,13	9,82	6,51	17,55	73,76
0,475	15,20	12,44	16,63	12,44	8,25	19,95	84,90
0,575	13,46	20,29	20,13	15,06	9,99	21,39	100,32
0,675	11,73	17,68	23,63	17,68	11,73	21,87	104,30
0,775	9,99	15,06	20,13	20,29	13,46	21,39	100,32
0,875	8,25	12,44	16,63	12,44	15,20	19,95	84,90
0,975	6,51	9,82	13,13	9,82	16,94	17,55	73,76
1,075	4,78	7,20	9,63	7,20	4,78	14,19	47,77
1,175	3,04	4,58	6,13	4,58	3,04	9,87	31,24
1,275	1,30	1,96	2,63	1,96	1,30	4,59	13,75
a (m)	0,335	0,505	0,675	0,845	1,015		
b (m)	1,015	0,845	0,675	0,505	0,335		

Taivutusmomentit laskettiin Excel-tilaukkuun, jotta saatiin piirrettyä taivutusmomenttikuvio (kuva 33). Excel-tilaukkuista ja taivutusmomenttikuviosta havaitaan, että suurin taivutusmomentti on akselin keskellä.



KUVA 33. 40 mm akselin taivutusmomenttikuvio

Akselin suurimmaksi taivutusmomentiksi saatiin noin 104,3 Nm. Tämän avulla voidaan selvittää jännitysamplitudin suuruus kaavalla 10 (15, s. 273), jossa jännitys lasketaan taivutuksen aiheuttaman vääntömomentin ja akselin taivutusvastuksen mukaan. Akselin taivutusvastus voidaan laskea erikseen tai katsoa taulukosta (15, s. 825).

$$\sigma_t = \frac{M_{\text{taivutus}}}{W_{\text{taivutus}}}$$

KAAVA 10

$$\frac{104,3 \text{ Nm}}{6,28 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} \approx 16,61 \text{ MPa}$$

σ_t = akseliin vaikuttava jännitysamplitudi (MPa)

M_{taivutus} = taivutusmomentti (Nm)

W_{taivutus} = taivutusvastus (mm^3)

Koska taivutusjännitys vaikuttaa todella pieneltä, voitaisiin olla jo melko varmoja akselin kestävydestä staattisella kuormituksella. Jännitys on väsyttävää, joten akselia tarkasteltiin kuitenkin vielä väsymismitoitusmenetelmän avulla. Väsymismitoitusmenetelmässä jännityksiä verrataan raja-arvoihin, jotka on määritelty ma-

tereaaleille koesauvojen väsytykskokeiden perusteella (24, s. 26). Akselin materiaaliksi on valittu S355-rakenneteräs, joten taivutusjännityksen arvo katsotaan Smithin piirroksesta S355-teräksen kohdalta (15, s. 281).

Suurin sallittu jännitys on Smithin piirroksen mukaan noin 280 MPa. Suurin sallittu jännitys voi kuitenkin pienentyä kappaleen koon, pinnanlaadun, muodon, epäjatkuvuuskohdan tai lämpötilan vaikutuksesta (24, s. 32). Pienentyessään suurin sallittu jännitys alkaa lähestyä akseliin kohdistuvaa jännitystä, joten akselin kestävyyttä on aiheellista vielä selvittää.

Ensin selvitetään koon vaikutus. Koko otetaan huomioon vaikutuskertoimella, jonka suuruus riippuu kappaleen poikkipinta-alasta ja kuormituslajista. Tässä tapauksessa on kyse taivutuksesta, jonka piikkien ja tukikehien massat sekä akselin omamassa akseliin aiheuttaa. Vaikutuskertoimen arvo katsotaan koon vaikutuskertoimen taulukosta, taivutuskuormituksen käyrästä. Koon vaikutuskerroin on tässä tapauksessa 0,75 (15, s. 286).

Pinnan epätasaisuus otetaan huomioon vaikutuskertoimella, jonka suuruuteen vaikuttaa pinnan työstötapa ja materiaalin vetomurtolujuus. Pinnanlaadun vaikutuskerroin katsotaan taulukosta, jossa eri työstötavoilla saavutetuille pinnanlaaduille on omat käyränsä. Kun kyseessä on sorvattu akseli, saadaan arvoksi 0,9 (15, s. 285).

Akselin muoto vaikuttaa sen kestävyYTEEN, sillä kaikki urat, lovet ja ulokkeet aiheuttavat jännityshuippuja kappaleeseen ja väsymismurtumat syntyvät yleensä juuri jännityshuippujen kohdalle (25, s. 13). Akseliin sorvataan kapeampi kohta vaihdemoottorin kiinnittämistä varten, joten tämä uloke tulee olemaan epäjatkuvuuskohta, johon kohdistuu akselin jännityshuippu. Tämä lovi ei kuitenkaan ole alueella, jossa taivutusjännitystä esiintyy, joten sitä ei tässä väsymistarkastelussa tarvitse ottaa huomioon.

Myös lämpötila vaikuttaa materiaalin väsymiskestävyYTEEN, mutta vasta lämpötilan ylittäessä 350°C, joten lämpötilan vaikutusta ei tässä tapauksessa tarvitse huomioida (25, s. 16). Kun kaikki akselin väsymislujuuteen vaikuttavat tekijät on selvitetty, koon ja pinnanlaadun vaikutuskertoimet sijoitetaan kaavaan 11, josta saadaan selvitettyä redusoitu suurin sallittu jännitys. (24, s. 32).

$$\sigma_{maxred} = g * \kappa_{\sigma} * \sigma_{max}$$

KAAVA 11

$$0,75 * 0,9 * 280 \text{ MPa} = 189 \text{ MPa}$$

σ_{maxred} = redusoitu suurin sallittu jännitys (MPa)

g = koon vaikutuskerroin

κ_{σ} = pinnanlaadun vaikutuskerroin

σ_{max} = suurin sallittu jännitys (MPa)

Redusoitu suurin sallittu jännitys on selvästi vähemmän kuin lähtötilanteessa määritelty suurin sallittu jännitys ja nyt lähempänä akseliin kohdistuvaa jännitystä. Redusoidun suurimman sallitun jännityksen avulla voidaan seuraavaksi selvittää varmuusluku akselin kestävyydelle.

Kun tiedetään, että akseliin kohdistuvan taivutusjännityksen suunta vaihtelee akselin pyöriessä, eli jännitys vaihtelee 16,61 MPa ja -16,61 MPa välillä, keskijännitykseksi saadaan tässä tapauksessa nolla. Keskijännityksen ollessa nolla, varmuusluvun voi määrittää suoraan arvoon, joka on otettu Smithin piirroksesta. Varmuusluku on laskettu siten, että ylikuormitustilanteessa keskijännityksen oletetaan pysyvän nollana ja vain jännitysamplitudi kasvaa. Varmuusluku kuvaa toisinsanoen akseliin kohdistuvan jännityksen ja redusoidun suurimman sallitun jännityksen suhdetta. (24, s. 43.)

Varmuusluku lasketaan kaavalla 12. Mikäli akselissa olisi tarkasteltava lovi, loven vaikutuslukua käytettäisiin tässä kohtaa taivutusjännitystä kasvattavana tekijänä, eli se sijoitettaisiin varmuusluvun laskemisen yhteydessä kaavaan nimittäjäksi. (15, s. 285.)

$$n = \frac{\sigma_{maxred}}{\sigma_t}$$

KAAVA 12

$$n = \frac{189 \text{ MPa}}{16,61 \text{ MPa}} \approx 11,38$$

n = varmuusluku

σ_{maxred} = redusoitu suurin sallittu jännitys (MPa)

σ_t = akseliin vaikuttava jännitysamplitudi (MPa)

Suurin akseliin vaikuttava jännitys on todella paljon pienempi kuin redusoitu suurin sallittu jännitys, joten varmuusluvusta tulee suuri. Tästä voidaan päätellä se, mitä jo ennen laskemista taivutusjännityksen osalta arvioitiin: valittu akselikoko on riittävän kestävä.

7.2.2 Akselin tarkastelu vääntöjännityksen osalta

Akselia tarkasteltiin myös vääntömomentin osalta, sillä akseliin kohdistuu sekä käytönaikaista että käynnistyksenaikaista vääntömomenttia. Vääntöjännityksen tarkastelu aloitetaan laskemalla käytönaikainen maksimivääntöjännitys. Vääntöjännityksen laskemista varten selvitetään ensin akselin vääntövastus kaavalla 13 (15, s. 359). Koska akselissa on uloke kohdassa, johon vääntömomentti vaikuttaa, käytetään laskuissa ulokkeen halkaisijaa akselin halkaisijan sijaan.

$$W_{\text{vääntö}} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad \text{KAAVA 13}$$

$$\frac{\pi \cdot (30 \text{ mm})^3}{16} \approx 5,3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$W_{\text{vääntö}}$ = akselin vääntövastus (mm³)

d = akselin halkaisija (mm)

Vääntövastus sijoitetaan kaavaan 14, jolla saadaan laskettua käytönaikainen maksimivääntöjännitys (15, s. 273).

$$\tau = \frac{M_{\text{vääntö}}}{W_{\text{akseli}}} \quad \text{KAAVA 14}$$

$$\frac{45,6 \text{ Nm}}{5,3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} \approx 8,6 \text{ MPa}$$

τ = akseliin vaikuttava vääntöjännitys (MPa)

$M_{\text{vääntö}}$ = Vääntömomentti (Nm)

$W_{\text{vääntö}}$ = vääntövastus (mm³)

Käytönaikainen vääntöjännitys on niin pientä, ettei se vaadi tarkempaa tarkastelua. Seuraavaksi selvitetään akseliin käynnistyksen aikana vaikuttava vääntöjännitys, jotta voidaan tarkistaa, aiheuttaako käynnistyksessä esiintyvä suuri vääntömomentti akselille myötöväsymistä. Käynnistystapahtuma ei ole väsyttävää

kuormitusta, sillä se tapahtuu harvoin eikä näin ollen täytä väsyttävän kuormituksen kriteereitä (24, s. 20).

Akselin kestävyyttä tarkasteltiin vertaamalla akselin suurinta jännitystä materiaalin myötörajan. Näiden kahden arvon välisen varmuusluvun ollessa vähintään 2, voidaan todeta akselin olevan riittävän kestävä myötöväsymisen suhteen (24, s. 43). Jännityksen suuruus saadaan selville kaavalla 15 (24, s. 493), jossa jännitys lasketaan vaikuttavan vääntömomentin ja akselin vääntövastuksen mukaan. Suurinta jännitystä selvittäessä käytetään vaihdemoottorin käynnistysmomenttia, sillä suurin vääntö ja sitä kautta suurin jännitys kohdistuu akseliin juuri käynnistyksessä. Aiemmin laskettu vääntövastus sijoitetaan kaavaan 15 samaan tapaan kuin käytönaikaista vääntöjännitystä laskettaessa. (15, s. 273.)

$$\tau = \frac{M_{\text{käynnistys}}}{W_{\text{vääntö}}} \quad \text{KAAVA 15}$$

$$\frac{218 \text{ Nm}}{5,3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} \approx 40,76 \text{ MPa}$$

τ = akseliin vaikuttava vääntöjännitys (MPa)

$M_{\text{käynnistys}}$ = Vääntömomentti käynnistyksessä (Nm)

$W_{\text{vääntö}}$ = vääntövastus (mm³)

Vääntöjännityksen lisäksi tarvitaan enää akselin materiaalille määritelty myötöraja. Myötöraja on vääntötapauksessa vähemmän kuin puristuksessa tai vedossa, joten S355-rakenneteräksellä vääntötapauksen myötöraja on 150 MPa (15, s. 292). Selvitetyt arvot sijoitetaan kaavaan 16 varmuusluvun laskemiseksi (24, s. 43).

$$n = \frac{R_e}{\tau_{\text{max}}} \quad \text{KAAVA 16}$$

$$\frac{150 \text{ MPa}}{40,76 \text{ MPa}} \approx 3,7$$

n = varmuusluku

R_e = materiaalin myötöraja (MPa)

τ_{max} = suurin akseliin vaikuttava vääntöjännitys (MPa)

Koska varmuusluku on reilusti yli 2, voidaan päätellä, että akseli kestää siihen kohdistuvat jännitykset.

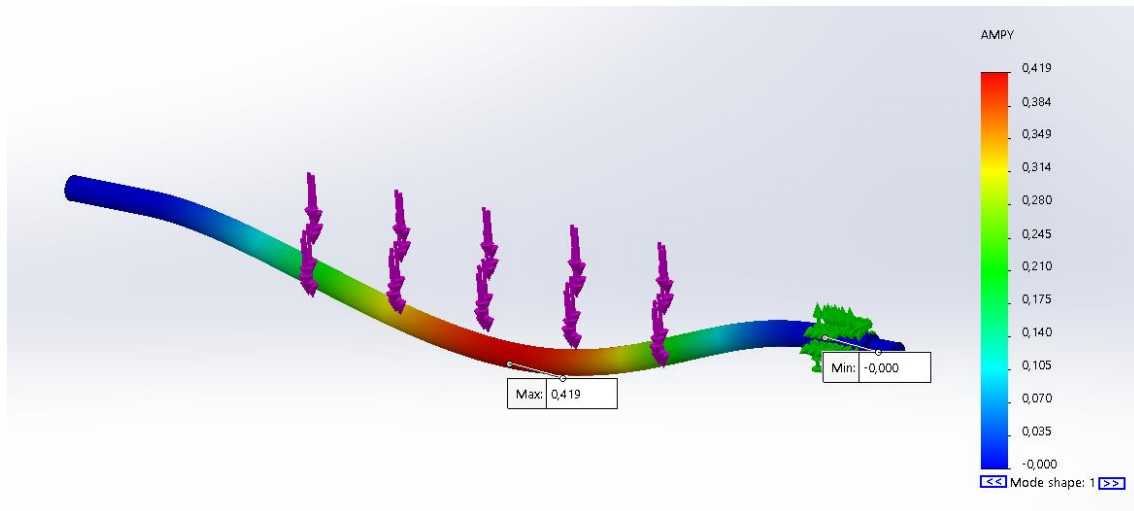
7.2.3 Akselin ominaisvärähtelyn tarkastaminen FEM-analyysillä

Solidworks-suunnitteluohjelmiston simulointityökalun avulla tarkasteltiin vielä varmuuden vuoksi akselin värähtelyominaisuuksia FEM-analyysin avulla. Kaikenlainen värähtely voi olla laitteen toiminnan kannalta tuhoisaa, sillä ei-toivottu värähtely kuluttaa osia nopeammin ja voi jopa rikkoa niitä. Laite alkaa värähtelemään, jos esimerkiksi jokin ulkoinen objekti värähtelee lähes samalla taajuudella, kuin laitteen ominaistajuus. Jotta laite ei alkaisi värähtelemään, tulisi ominaisvärähtelytaajuus olla eri kuin ulkoisista objekteista syntyvät värähtelyt. (26.)

Mikäli laitteessa ilmenee haitallista värähtelyä, laitteen ominaisvärähtelytaajuutta voidaan muuttaa, jotta se ei enää värähtele. Ominaisvärähtelytaajuutta kasvattavia tekijöitä ovat esimerkiksi värähtelevän kappaleen jäykistäminen ja liikkuvan massan keventäminen. Vastaavasti ominaistajuutta madaltavia tekijöitä ovat kappaleen jäykkyyden heikentäminen ja liikkuvan massan lisääminen. Mikäli ominaisvärähtelytaajuutta ei ole mahdollista muuttaa, resonoinnin estämiseksi ulkoisia herätteitä voidaan pyrkiä muuttamaan esimerkiksi värähtelevän akselin pyörintänopeutta muuttamalla. (26; 27.)

Simulointi alkoi merkitsemällä akselin 3D-malliin massojen tarkat paikat. Merkintä tapahtuu tekemällä akselin pintaan rajaviivat, jotta kiinnityspaikoista muodostuu omat rajatut pinta-alueet 3D-malliin. Tukipisteiden alueet määriteltiin akselin kiinnityspaikoiksi ja piikkien kiinnityspaikkoihin kohdistettiin piikkien ja tukikehien massojen aiheuttamat kuormitukset.

Simulointi antaa useita erilaisia vaihtoehtoja, kuinka kyseinen akseli pystyy värähtelemään. Simuloinnin tuloksista tarkasteltiin vain tapausta, jossa värähtely on vertikaalista. Vertikaalinen liike kiinnostaa tässä tapauksessa eniten, sillä akseliin kiinnitettyjen piikkien massa ja painovoima aiheuttaa akseliin kuormitusta vain vertikaalisesti. (Kuva 34.)



KUVA 34. Ylikorostettu 3D-malli akselista sen värähdellessä ominaistaajuudella

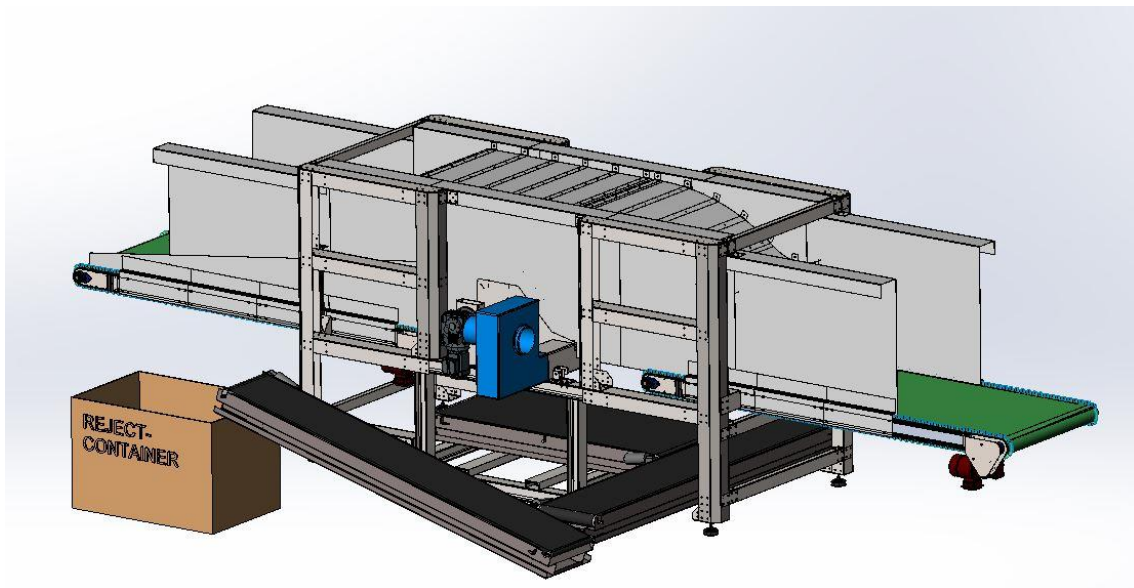
Simulointi suoritettiin kolmelle erikokoiselle akselille, jotta voitiin havainnollistaa akselin halkaisijan muutoksen vaikutusta ominaisvärähtelytaajuuteen. Akselin halkaisijan muuttuessa myös sen jäykkyys, ja tätä kautta ominaisvärähtelytaajuus muuttuu (27). Akselin ominaisvärähtelytaajuudet kerättiin taulukkoon 3. Akselin pyörintänopeudella 14 rpm, saadaan taajuudeksi noin 0,23 Hz, joka jää kauas akselin ominaisvärähtelytaajuudesta. Voidaan siis todeta, ettei haitallista värähtelyä pääse syntymään.

TAULUKKO 3. Ominaisvärähtelytaajuuksia eri akselin halkaisijoilla

Akselin ominaisvärähtelytaajuus		
50 mm	40 mm	30 mm
89,5 Hz	71,8 Hz	54,1 Hz

8 LAITTEEN YLEISKUVAT JA PÄÄMITAT

Laitteesta tuli kaikki kuljettimet mukaan luettuna suurikokoinen (kuva 35), mutta tämä oli odotettavissa jo suunnittelun alkuvaiheessa. Laitteen päämittoja kasvattivat sivusuunnassa selvästi eniten hylkylinjan kuljettimet sekä pituussuunnassa puhalluksen jälkeinen kuljetin. Tämä seuraavalle laitteelle jatkava kuljetin on kolme metriä pitkä, jotta puhalletut muovikalvot ehtivät laskeutua kuljettimelle ennen seuraavaa laitetta. Laitteen päämitat ilmenevät liitteestä 2.



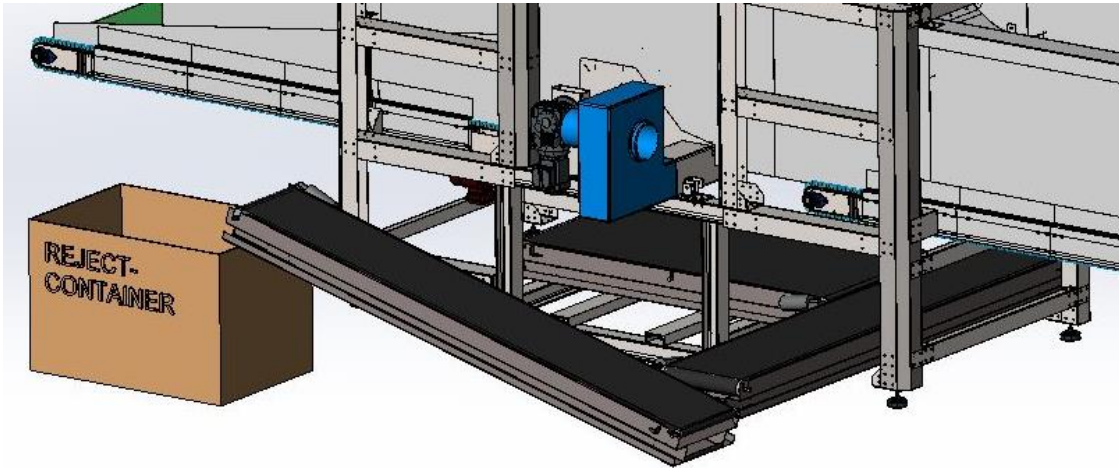
KUVA 35. Laitteen 3D-mallin yleiskuva kuljettimien ja laitojen kanssa

9 JATKOKEHITYS

Vaikkei opinnäytetyön aiheena ollutta esilajittelu- ja syöttölaitteistoa näiltä näkymin olla vielä rakentamassa, mahdollistaa pitkälle viety suunnittelu laitteen kriittisen tarkastelun ja jatkokehityskohteiden pohtimisen. Selvää on, että laitetta tulisi tavalla tai toisella saada kevyemmäksi, sillä noin 450 kg:n kokonaismassa tekee valmiin laitteen siirtämisestä ja kokoonpanosta haastavaa. Kevennyskohteita voisi olla esimerkiksi rumpuelementit, jotka muodostavat suurimman osan rumpurakenteen kokonaismassasta.

Esimerkiksi rumpuelementtien alapuolelta alueelta, jossa piikit ovat näkyvillä, mutta eivät vielä tartu materiaaliin, voisi rumpuelementtien muotoilua kaventaa tai materiaalivahvuutta ohentaa massan vähentämiseksi. Rumpuelementin keventäminen olisi mahdollisesti yksi merkittävimmistä kevennyskohteista, sillä sen keventyessä tarpeeksi, voitaisiin ohentaa myös jakotukin seinämävahvuutta. Tällöin ei välttämättä olisi enää tarvetta niin ikään todella painavalle teräspalkkirungolle. Mikäli olisi mahdollista hyödyntää pelkästään linjaston modulaarista runkorakennetta, selkeyttäisi se paitsi laitteen kokoonpanoa, vähentäisi se suuresti myös materiaali- ja valmistuskustannuksia.

Kevennyksen lisäksi myös muunlainen yksinkertaistaminen on aina tervetullutta tuotekehityksessä. Esimerkiksi kuljettimien määrää olisi hyvä saada vähemmäksi. Nykyisessä ratkaisussa hylkymateriaali tiputetaan linjastolta alaspäin. Hylkymateriaalin siirtämiseksi keräysastiaan materiaali täytyy nostaa alhaalta takaisin ylös. Nosto tapahtuu loivassa kulmassa olevalla kuljettimella. Muiden linjaston laitteiden kautta määritelty linjaston korkeus kuitenkin rajoittaa rumpurakenteen alla olevaa tilaa, joten loivassa kulmassa oleva kuljetin ei mahdu rumpurakenteen alle. Hylkymateriaalia joudutaan kuljettamaan ensin vaakasuuntaisella kuljettimella, jotta se saadaan rumpurakenteen alta pois ja toisella kuljettimella siirtämään hylkymateriaali laitteen sivulle, jotta materiaali saadaan loivassa kulmassa olevalle kuljettimelle. (Kuva 36.)



KUVA 36. Hylkylinja koostuu kolmesta kuljettimesta

Nykyisessä ratkaisussa käytetään siis kolmea eri kuljetinta ainoastaan hylätyn materiaalin siirtämiseen. Vaihtoehtoisia tapoja voisi olla poistaa materiaali linjastolta tavalla, jolla poistettu materiaali pysyisi sopivalla korkeudella keräysastiaan siirtämistä ajatellen. Tämä tarkoittaisi isoja muutoksia laitoihin ja mahdollisesti laitteen tyhjennystoiminnon uudelleenpohdintaa. Muutokset voisivat kuitenkin tulla kannattavaksi, mikäli sillä saataisiin vähennettyä kuljettimien määrää.

10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön päätavoitteena oli suunnitella esilajittelu- ja syöttölaitteisto osaksi toimeksiantajan materiaalinkäsittelylinjastoa. Suunnittelutyön lähtötietojen keräämiseksi selvitettiin erilaisia tapoja materiaalin esilajitteluun ja hallittuun syöttämiseen. Potentiaalisia ratkaisuvaihtoehtoja testattiin proof-of-concept-laitteilla. Lisäksi lähtötietojen keräämiseen tueksi analysoitiin asiakasyritykseltä saatua kierrätysmuovimateriaalia.

Jo suunnittelun alkuvaiheessa huomattiin, että materiaalin esilajitteluun ja syöttämiseen on vain muutamia potentiaalisia ratkaisuja. Proof-of-concept-laitteesta saatiin näin ollen nopeasti toivotunlaisia testituloksia, joiden pohjalta myös suunnittelu lähti jouhevasti oikeaan suuntaan. Rakenteen mekaniikka muodostui kuitenkin suhteellisen monimutkaiseksi, joten suunnittelun ollessa jo verrattain pitkällä, päätettiin tehdä radikaalimpi suunnanmuutos. Vaihtoehtoinen toteutustapa osoittautui lopulta selkeästi alkuperäistä paremmaksi, sisältäen kaikki vaaditut ja toivotut ominaisuudet. Suunnanmuutos toi aikataulullisia haasteita, mutta suunnitellussa aikataulussa pysyttiin ja lopputulos palkitsi.

Opinnäytetyö sisälsi monipuolisesti erilaisia työvaiheita. Ajallisesti suurin yksittäinen työvaihe heti 3D-mallintamisen jälkeen oli referenssimateriaalin analysointi, johon meni noin kaksi viikkoa. Kierrätysmuovimateriaalia oli yli 100 kg ja sen tarkka läpikäyminen oli hidasta ja tarkkuutta vaativaa työtä. Tämän työvaiheen olisi mahdollisesti voinut suorittaa nopeammin esimerkiksi luokittelemalla tiettyjä materiaaleja ja tiettyjä värejä saman nimikkeen alle. Sopivia lajitteluperusteita ei kuitenkaan vielä opinnäytetyön alussa ollut tiedossa, joten työ jouduttiin tekemään todella tarkasti ja yksityiskohtaisesti.

Opinnäytetyössä pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman monipuolisesti useita erilaisia toimintatapoja ja erilaisia tietolähteitä. Proof-of-concept-laite valmistettiin hieman tavallisesta tuotekehitysprosessista poiketen jo varhaisessa vaiheessa. Käytännön testien koettiin antavan enemmän hyödyllistä tietoa suunnittelun alussa, verrattuna siihen, että proof-of-concept-laitteen tarkoitus olisi ollut aino-

astaan todistaa esisuunnittelussa tehtyjen oletusten olevan oikeita. Tämä toimintamalli osoittautui erittäin toimivaksi, sillä esimerkiksi materiaalin puhaltaminen ilmavirralla keksittiin käytännöntestien pohjalta muiden kokeilujen ohessa. Käytännön testeissä löydettiin myös useita pieniä, mutta tärkeitä suunnittelussa huomioitavia yksityiskohtia, kuten jumitilanteiden syntyyn vaikuttavia tekijöitä.

Myös teorian tietoa pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman monipuolisesti parhaimman lopputuloksen saavuttamiseksi. Vaikka esimerkiksi akselin mitoituksen olisi voinut riittää silmämääräinen arviointi ja yleiskäyttöiset karkean mitoituksen laskukaavat, hyödynnettiin mitoituksessa useita erilaisia laskukaavoja sekä Solidworks-suunnitteluohjelmiston simulaatiotyökaluja.

Olemassa olevaa teorian tietoa pyrittiin hyödyntämään monipuolisesti, jotta jo keran rakennetut ja suoritettut laskukaavat olisivat helposti sovellettavissa muihin suunnittelun edetessä eteen tuleviin mitoituskohteisiin. Lisäksi komponenttien tarkalla mitoituksella ja perusteellisilla käytännön testeillä pyrittiin vähentämään ensimmäisen valmiin laitteen parantelun tarvetta. Harvoin ensimmäinen versio laitteesta on täysin valmis, mutta selkeiden parannuskohteiden löytäminen ja korjaaminen jo suunnitteluvaiheessa on huomattavasti helpompaa ja edullisempää kuin asiakkaan reklamoidessa asiasta. Varsinkin, kun laitteesta tulee suurehko ja useita osakokonaisuuksia sisältävä, on tärkeää poimia selvät ongelmakohdat pois 3D-mallista jo suunnittelun aikana.

Ei sovi myöskään unohtaa sitä, kuinka suuri hyöty perusteellisella teorian tiedon hyödyntämisellä ja käytännön testeillä oli henkilökohtaiseen oppimiseen ja insinöörinä kehittymiseen. Opinnäytetyön aihe oli suhteellisen laaja ja se myös laajeni työn edetessä, osin tietoisesti, osin tiedostamatta. Vaikka suunnitellun työmäärän yli mentiin varsin lennokkaasti, on opinnäytetyö ollut jokaisen käytetyn tunnin arvoinen oppimiskokemus.

LÄHTEET

1. Rintala, Mirja 2018. Oululaismiljonääri kehittää muovista miljardibisnestä: Ensin laitteistoja, sitten kokonaisia tehtaita. Oulu: Ilta-Sanomat 31.8.2018. Saatavissa: <https://www.is.fi/oulun-seutu/art-2000005811009.html> Hakupäivä 26.10.2020.
2. Head Team. 2020. Head Invest. Saatavissa: <https://headinvest.fi/head-team/> Hakupäivä 31.10.2020.
3. NIR Technology and the Plastic Pollution Crisis. 2019. Spectral Engines. Saatavissa: <https://www.spectralengines.com/blog/nir-technology-and-the-plastic-pollution-crisis?fbclid=IwAR3nb60HZAz0WAG3HiSpFEETXammvixEk-MmBhXFzvef9us5ebg6S7lyilvY> Hakupäivä 25.10.2020.
4. Rantapirkola, Kimmo 2020. Tuotekehitysprosessit ja Voice of Customer. Tekniikan ja luonnonvara-alan yksikkö, Oulun Ammattikorkeakoulun verkkolehti OAMK_KONE, tuotekehityksen erikoisnumero, vol. 2, nro 3. s. 27–29. Saatavissa: https://issuu.com/oamk_kone/docs/tuke-tuotekehityksen_erikoisnumero Hakupäivä 27.1.2021.
5. Bollegraaf Drumfeeder. 2020. Bollegraaf recycling solutions. Saatavissa: <https://www.bollegraaf.com/technologies/shredders/bollegraaf-drumfeeder-2> Hakupäivä 25.06.2020.
6. Bollegraaf Filmgrabber. 2020. Bollegraaf recycling solutions. Saatavissa: <https://www.bollegraaf.com/technologies/shredders/bollegraaf-filmgrabber-2> Hakupäivä 25.06.2020.
7. Qunfeng Metering Bin Feeder. 2020. Peaks-Eco, Waste Feeder Machine. Saatavissa: <https://www.peaks-eco.com/waste-feeder-machine/qunfeng-metering-bin-feeder-7.html> Hakupäivä 25.06.2020.
8. Heinonen, Hiski 2021. Kierrätysmuovikalvon leikkauslaitteiston suunnittelu. Valmisteilla oleva opinnäytetyö. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, konetekniikan koulutusohjelma.

9. Energiatehokas paineilmajärjestelmä osa 1/2. 2020. Koulutusmateriaali, verkkojulkaisu. Motiva. Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/1568/Energiatehokas_paineilmajarjestelma_OSA1.pdf Hakupäivä 5.11.2020.
10. Energiatehokas paineilmajärjestelmä osa 2/2. 2020. Koulutusmateriaali, verkkojulkaisu. Motiva. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/1569/Energiatehokas_paineilmajarjestelma_OSA2.pdf Hakupäivä 5.11.2020.
11. Axial fans and Centrifugal fan comparison. 2015. Laitevalmistajan ohjesivu. SAVIO. Saatavissa: <https://www.savioclima.com/en/axial-fans-and-centrifugal-fans-comparison/> Hakupäivä 15.11.2020.
12. DT-82 Mini Anemometer. 2020. Tuote-esite. CEM. Saatavissa: <https://www.cem-instruments.in/pdf/DT-82.pdf> Hakupäivä 5.11.2020.
13. Seppänen, Olli 2008. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Anjalankoski: SOLVER palvelut Oy.
14. Understanding the Difference Between Flow, Velocity, and Pressure. 2019. Laitevalmistajan ohjesivu. Stanmech Technologies Inc. Saatavissa: <https://www.stanmech.com/articles/flow-velocity-and-pressure> Hakupäivä 7.9.2020.
15. Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. painos. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy.
16. Ourex VH-O Puhaltimet. 2020. Ourex VH-O keskipakopuhaltimien tuotekatalogi. Ourex. Saatavissa: <https://ourex.fi/wp-content/uploads/2017/10/VH-O.pdf> Hakupäivä 4.10.2020.
17. Coral DF-S Ventilatori. 2020. Coral DF-S keskipakopuhaltimien tuotekatalogi. Coral. Saatavissa: <https://www.coral.eu/catalogo/ventilatori-df.pdf> Hakupäivä 4.10.2020.
18. JETX Series Air Knives. 2019. Laitevalmistajan tuotetietosivu. JETAIR Technologies LLC. Saatavissa: <https://www.jetairtech.com/jetxairknives> Hakupäivä 7.9.2020.

19. Air Knife systems. 2020. Laitevalmistajan ohjesivu. Republic manufacturing. Saatavissa: <https://www.republic-mfg.com/air-knives/systems.asp> Hakupäivä 7.9.2020.
20. PLATTA-hihnakuuljetin. 2020. Valmistajan tuote-esittely. MA-Tech Oy. Saatavissa: <https://www.ma-tech.fi/tuotteemme/platta-hihnakuuljetin> Hakupäivä 9.10.2020.
21. DRN... Gearmotors (IE3). 2018. Valmistajan tuotekatalogi. SEW Eurodrive. Saatavissa: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/24832936.pdf> Hakupäivä 10.8.2020.
22. Sähkökäytön mitoitus. 2001. Tekninen opas nro 7. ABB. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf Hakupäivä 8.9.2020.
23. Beam Calculator. 2020. Selainpohjainen laskentaohjelma. Beamguru. Saatavissa: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/> Hakupäivä 12.11.2020.
24. Björk, Timo – Hautala, Pekka – Huhtala, Kalevi – Kivioja, Seppo – Kleimola, Matti – Lavi, Markku – Martikka, Heikki – Miettinen, Juha – Aarno, Ranta – Rinkinen, Jari – Salonen, Pekka 2014. Koneenosien suunnittelu. 6., uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
25. Kontio, Esa 2019. Väsymislujuusmitoitus. TK00BP64 Mekaniikkasuunnittelu. Opintojakson luentomoniste lukukausi 2019–2020. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikka ja luonnonvara-ala.
26. Erbesd, Thierry. 2020. Resonance and Natural Frequency. Laitevalmistajan blogikirjoitus. Erbesd Instruments. Saatavissa: <https://www.erbessd-instruments.com/articles/resonance-natural-frequency/> Hakupäivä 29.1.2021.
27. Fundamentals of Vibration. 2021. Laitevalmistajan ohjesivu. Newport Corporation. Saatavissa: <https://www.newport.com/t/fundamentals-of-vibration> Hakupäivä 29.1.2021.

Laite on jaettu osakokonaisuuksiin seuraavalla tavalla:

1. Piikit
2. Rumpu
3. Rummun kiinnitys
4. Rumpua pyörittävä vaihdemoottori
5. Syöttävä hihnakuuljetin
6. Jatkava hihnakuuljetin
7. Ilmavirtauspuhallin
8. Ilmavirtausta ohjaava kouru
9. Hylkylinjan kuljettimet

1. Piikkien tiedot:

-Piikkien pituus rummun ulkopinnasta 140 mm ± 20 mm.

Peruste: Muovipullojen tulee mahtua liukumaan itsekseen rummun ali, piikkien ohi hylkylinjalle. Ison virvoitusjuomapullon halkaisija (100 mm) määrittelee minimipituuden piikeille.

-Piikkien halkaisija 16 mm.

Peruste: 8 mm ja 10 mm testattu ja todettu toimiviksi. Alle 10 mm on kuitenkin liian ohut nykyisessä versiossa, voisi mahdollisesti taipua. 16 mm on varman päälle pelaamista, sillä paksu piikki kestää jossain määrin myös jumitilanteita rikkoutumatta.

-Piikkien pinnanlaatu oltava mahdollisesti karhennettu tms.

Peruste: Piikkien pinnanlaatu ei voi olla sileä, sillä sen todettiin tarttuvan huonosti kalvoihin. Koska piikit ovat suorina, kalvot liukuvat pois piikin päältä. Kierretangosta tehdyt piikit toimivat hyvin, sillä pinta on tällöin karkea. Kalvot tarttuivat hyvin kierteen harjaan, mutta irtosivat melko vaivattomasti, kun piikki vedettiin sisään. Mikäli karheasta pinnasta ongelmaa, pitää hioa sileämmiksi tai vaihtaa tilalle muulla tavalla karhennettu tanko.

2. Rummun tiedot:

-Rummun halkaisija 650 mm.

Peruste: Prototyypilaitte tehtiin öljytynnyristä, jonka halkaisija 580 mm todettiin sopivaksi kapasiteettia ja runkorakenteen mitoitusta ajatellen.

-Rummun profiili muutettu pyöreästä 10-kulmaiseksi (suulakkeiden alue poikkeaa muodosta).

Peruste: Valmistusteknisesti järkevämpi, ominaisuuksien säilyessä ennallaan.

-Rummun leveys 1000 mm + 20–100 mm, laitojen rakenteesta ja rummun kiinnitystavasta riippuen.

Peruste: Käytettävien hihnakuuljettimien hyötyleveys 1000 mm.

-Rummun materiaalivahvuus 3 mm.

Peruste: 3 mm vielä helposti särmättävissä, mutta tarpeeksi paksu itsekantavaksi rakenteeksi.

-Piikkien pyöritys rumpuelementtien läpi menevällä keskiakselilta.

Peruste: Ainoa mahdollinen tapa saada piikit pyörimään, rumpuelementtien pyöryessä paikallaan.

3. Rummun kiinnityksen tiedot:

-Rummulle tehdään jyrävä palkkirunko. Tämän päätyihin tulee särmätyistä peliosista koostuvat "apurungot".

Peruste: Laitte noudattaa linjaston yleistä muotokieltä. Apurunkoihin saa modulaarisesti kiinni mm. kuljettimet ja muut oheislaitteet. Näin ollen kaikki laitteet saadaan näyttämään yhtenäisiltä moduuleilta, mutta silti rumpu makaa tukevasti erillisen rungon päällä.

-Rumpu asennetaan runkoon jakotukista. Jakotukin kiinnitykseen suunnitellaan mahdollisesti sarana, jotta rummun asennon hienosäätö on mahdollista.

Peruste: Akselin paksuus voidaan säilyttää maltillisena, kun rumpuelementtien massa ei makaa läpi menevän akselin päällä. Laitteen kokoonpano myös selkeämpää, kun rumpuelementeissä ei tarvita laakerointeja akselin läpiviennissä.

4. Rumpua pyörittävän vaihdemoottorin tiedot:

-Rummun pyörintänopeus sellainen, että rummun kehänopeus on 1,5-kertainen materiaalia syöttävään hihnakuljettimeen verrattuna. Pyörimisnopeus 13–14 rpm, jolloin kehänopeus noin 25 m/min.

Peruste: Nopeudet testattu ja todettu toimiviksi proof-of-concept-laitteella.

-Vaihdemoottorin pienin riittävä vääntömomentin tarve noin 50 Nm.

Peruste: piikkimekanismin massan, ja käsiteltävän materiaalin siirtämiseen tarvittavan tehon kautta laskettu.

5. Syöttävän hihnakuljettimen tiedot:

-Ensimmäinen hihnakuljetin on kuljetin, jolle materiaali tulee syöttöaseman siilosta. Kuljetin siirtää materiaalin rummulle, joka poimii kalvot. Tämän kuljettimen nopeus 12,5 m/min. (taajuusmuuttajalla voidaan laskea alemmas tarvittaessa)

Peruste: Nopeus päätetty yhdessä toimeksiantajan kanssa, kapasiteettitavoitteisiin liittyen.

-Ensimmäisen hihnakuljettimen laitojen oltava korkeat, jotta materiaalia voidaan syöttää siilosta kerralla suuria määriä.

Peruste: Kapasiteettitavoitteisiin yltäminen ja syöttöaseman välivaraston toiminta.

-Ensimmäisen kuljettimen laitojen oltava kaksiosaiset, jotta kuljettimen toisen päään laskeminen ei tee aukkoa laitoihin. Laitojen muotoilussa tulee välttää reikiä, kulmia ja ylimääräisiä reunoja.

Peruste: Materiaali tarttuu herkästi kaikenlaisiin rakoihin, reunoihin ja saumakohtiin.

-Ensimmäisen kuljettimen päätä lasketaan paineilmasylintereillä käyttöasennosta noin 6–8° kulmaan. Näin ollen saadaan kuljettimen ja rummun väliin noin 300 mm tilaa tyhjennysvaiheeseen.

Peruste: Tilantarve määritellään referenssimateriaaleissa esiin tulleen suurimman 3D-kappaleen mukaan (ämpäri, jonka korkeus 24 cm ja halkaisija 20 cm) +pelivara odottamattomille esineille.

6. Jatkavan hihnakujiettimen tiedot:

-Toisen kuljettimen nopeus on 25 m/min. (taajuusmuuttajalla voidaan laskea alemmas)

Peruste: Nopeus päätetty yhdessä toimeksiantajan kanssa, kapasiteettitavoitteisiin liittyen.

-Kuljettimeksi esivalittu Ma-Tech PLATTA20 -hihnakujietin. Pituus 3000 mm, leveys 1000 mm

Peruste: Kuljettimen oltava tarpeeksi pitkä, jotta ilmavirran lennättämät kalvot asettuvat kuljettimelle ennen linjaston seuraavaa laitetta. Linjaston hyötyleveydeksi sovittu 1000 mm.

7. ilmavirtauspuhaltimen tiedot:

-Muovikalvoja eteenpäin siirtävä ilmavirtaus tuotetaan keskipakopuhaltimella.

Peruste: Paineilmatoiminen ilmaveitsi hylättiin kalliiden käyttökustannusten vuoksi. Puhallin tuottaa tasaisen ilmavirran, joka kantaa kevyet kalvot seuraavalle kuljettimelle, mutta sen läpi pääsee tippumaan raskaammat materiaalit.

-Puhaltimen suulakkeet integroitu rumpuelementteihin, keskilinjan tuntumaan, ja puhaltamaan yläviistoon.

Peruste: Sijainti mahdollistaa sen, ettei potentiaalisia jumiutumiskohteita ole niin paljoa kuin aiemmissa versioissa. Puhalluksen suunta piikkiin nähden on optimaalinen.

-Esivalittu keskipakopuhallin Ourex VH2700-O2 (2kpl)

Peruste: Käytännön testien ja mitoituslaskujen perusteella käyttökohteeseen so-piva.

8. Ilmavirtausta ohjaavan kourun tiedot:

-Toisen kuljettimen laidat ovat käytännössä ilmakourun reunat. Nämä suunniteltava siten, että ilmavirran lennättämät muovikalvot eivät pääse takertumaan mihinkään, laskeutuessaan kuljettimelle. Laidat eivät myöskään saa heittää materiaalia tiettyyn kohtaan kuljettimesta, vaan materiaalin tulee laskeutua tasaisesti koko kuljettimen leveydelle.

Peruste: Materiaali oltava kuljettimella tasaisesti ja koko leveydellä, jotta sitä voidaan käsitellä linjaston seuraavilla laitteilla.

-Kourun leveys tulee olla sama kuin kuljettimella ja rummulla, eli 1000 mm

Peruste: Linjaston hyötyleveydeksi sovittu 1000 mm.

-Kourun "katon" muotoilu tulee olla sellainen, että se ohjaa ilmavirran eteenpäin, eikä aiheuta pyörteilyä rummun ja seuraavan kuljettimen välissä.

Peruste: Kourun katon loppupäähän ylöspäin nouseva kaarre, jonka ansiosta ilmavirran jatkaa pois kourusta. Samalla virtausnopeuden romahtaessa materiaali ei enää lennä pidemmälle.

-Kourun alaosa tulee olla täysin avoin rummun ja jatkavan kuljettimen välistä.

Peruste: Aukko mahdollistaa painavien materiaalien tippumisen suoraa hylkylinjalle.

9. Hylkylinjan kuljettimien tiedot:

-todennäköisesti 1000 mm leveä ja 1500 mm pitkä kuljetin rummun alle. Sen päähän, jatkavan kuljettimen eteen/alle 600 mm leveä ja 1500 mm pitkä kuljetin. Tämän jatkoksi 15° kulmaan 600 mm leveä ja 3000 mm pitkä kuljetin, joka nostaa materiaalin hylkymateriaalin keräysastiaan.

Peruste: Loivassa kulmassa oleva kuljetin testattu toimivaksi tavaksi siirtää materiaalia ylöspäin. Toistaiseksi toimivin tapa siirtää hylkymateriaali liki lattian rajasta korkeareunaiseen keräysastiaan.

Rev	Muutos / Change	Pvm / Date	Suunnittelija / Designed
	Massa / Mass 0.00 kg	Tehdään kpl / Quantity manufactured	Suunnittelija / Designed Matias Riihinen
	Mittakaava / Scale A4 1:50	Yleistoleranssi / General tolerances ISO 2768-	Tarkastaja / Checked
	Nimitys / Description FilmFeeder_paakokoonpano		Rev
	Piirustusnumero / Drawing number L10342		
3D-model filename: L10342		3D-model revision:	