

Hiski Heinonen

**KIERRÄTYSMUOVIKALVON
LEIKKAUSLAITTEISTON SUUNNITTELU**

**KIERRÄTYSMUOVIKALVON
LEIKKAUSLAITTEISTON SUUNNITTELU**

Hiski Heinonen
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikka tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Hiski Heinonen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Kierrätysmuovikalvon leikkauslaitteiston suunnittelu

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Design of Cutting Machine for Recycled Plastic Film

Työn ohjaaja: Kimmo Rantapirkola

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021

Sivumäärä: 50 + 1 liite

Opinnäytetyö tehtiin Head Recycle Systems Oy:lle syksyn 2020 aikana. Työssä suunniteltiin leikkauslaitteisto osaksi toimeksiantajalla valmisteilla olevaan jätemuovin käsittelylinjastoa. Työn päätavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla voidaan leikata pitkiä jätemuovikalvoja. Leikkaus koettiin tärkeäksi, sillä pienikokoisia kappaleita on helpompi tunnistaa ja erotella ilman, että käsittelylinjaston muita toimintoja tarvitsisi hidastaa.

Tuotekehitystyössä edettiin perinteisestä systemaattisesta tuotekehitysprosessista poiketen suorittamalla käytännön testejä heti potentiaalisten toteutusmenetelmien löydyttyä. Ennen yksityiskohtaista suunnittelua suoritettujen käytännön testit auttoivat leikkausmenetelmän valinnassa ja antoivat raameja suunnittelutyölle. Valikoituneen leikkausmenetelmän liikkeen toteutuksien vertailua varten määriteltiin työn edetessä arvot, jotka vaikuttivat menetelmien valintaan. Arvot mitoitettiin teorian tietoa käyttämällä, simuloimalla Solidworks-ohjelmalla laadittua 3D-mallia sekä laskennallisesti. Linjaston tarkassa aikataulussa pysymisen sekä opinnäytetyön laajuuden vuoksi työssä mitoitetaan vain laitteiston tärkeimmät toiminnot vaikuttavat komponentit. Laitteiston suunnittelussa huomioitiin lisäksi valmistettavuus, kokoonpantavuus sekä huollettavuus.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi 3D-malli ja dokumentit valmistettavasta prototyyppi laitteistosta. Kehitystyön aikana innovoitiin uusi menetelmä kalvomuovin esikiristämiseen leikkaustapahtumaa ja materiaalivirran jaksottamista varten prosessissa. Innovaation toimintaperiaate perustuu eri nopeudella kulkeviin rulliin ja kuljettimiin. Kalvomuovin esikiristämisen innovaatiota pystytään hyödyntämään vielä paljon kehittyvällä kierrätysalalla.

Asiasanat: muovi, kierrätys, leikkaus, leikkauslaitteisto, tuotekehitys, koneensuunnittelu, mekaniikkasuunnittelu, 3D-mallinnus

ABSTRACT

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

Author: Hiski Heinonen

Title of thesis: Design of Cutting Machine for Recycled Plastic Film

Supervisor: Kimmo Rantapirkola

Term and year when the thesis was submitted: spring 2021

Pages: 50 + 1 appendice

This Thesis was commissioned by Head Recycle Systems Oy, during the spring of 2020. The main goal of the work was to develop a method that would cut long recycled plastic films on a processing line to facilitate their identification and separation without slowing down the process.

The process in this work was unlike the traditional systematic product development process. When a potential cutting method was discovered, it was tested in practice. The practical tests helped in the selection of the cutting method and formed the frame for the design work. As the work progressed, the values that influenced the choice of methods were determined to the selected implementations of the cutting movements. The values were dimensioned using theoretical data, simulating a 3D model created with SolidWorks software, and computationally. Only the main equipment was dimensioned because of the scope of work and adherence to a precise schedule according to the processing line project. The design of the devices also considers manufacturability, configurability, and maintainability.

As a result of the thesis, a 3D model, and documents of the prototype device to be manufactured were created. During the development work, a new method was developed for prestressing the film plastic for the cutting event. The innovations in the prestressing of plastic films can be used a great deal in the evolving recycling industry.

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

ALKULAUSE

Opinnäytetyö tehtiin Head Recycle Systems Oy:lle Oulussa. Opinnäytetyö aloitettiin kesän 2020 alussa ja jatkettiin syksyn 2020 aikana. Työn yhteyshenkilönä toimi yrityksen puolelta tuotekehityspäällikkö Jari Viitala. Oulun ammattikorkeakoulun puolelta ohjaajana toimi lehtori Kimmo Rantapirkola.

Haluan kiittää kaikkia projektin parissa toimineita henkilöitä. Haluan kiittää erityisesti Head Recycle Systems Oy:n toimitusjohtaja Johnny Pehkosta sekä opiskelu- ja työkaveriani Matias Riihistä, joka aloitti samaan aikaan kanssani opinnäytetyönsä.

Oulussa 21.5.2021

Hiski Heinonen

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| ALKULAUSE | 5 |
| SISÄLLYS | 6 |
| SANASTO | 8 |
| 1 JOHDANTO | 9 |
| 2 MUOVINKÄSITTELYLINJASTO | 10 |
| 2.1 Käsiteltävä materiaali | 10 |
| 2.2 Leikkauslaitteiston rooli linjastossa | 11 |
| 3 ESISUUNNITTELU | 12 |
| 3.1 Leikkauslaitteiston vaatimukset | 12 |
| 3.2 Leikkausmenetelmät ja leikattavan materiaalin esikiristys | 13 |
| 3.2.1 Kuumalankaleikkaus | 16 |
| 3.2.2 Leikkaus terällä | 19 |
| 3.3 Esisuunnitteluvaiheen tulokset | 21 |
| 4 LEIKKAUSLIIKKEEN TOIMINTAPERIAATTEEN VALINTA | 22 |
| 4.1 Leikkauslaitteiston terä | 22 |
| 4.2 Leikkauskokeet | 22 |
| 4.3 Terällä toteutettavan leikkauksen vaatimukset | 23 |
| 4.4 Terällä toteutettavan leikkauksen menetelmät | 25 |
| 4.4.1 Liikkeen toteutus moottorilla | 26 |
| 4.4.2 Liikkeen toteutus pneumaattisesti | 31 |
| 4.4.3 Menetelmien vertailun tulokset | 34 |
| 5 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU | 35 |
| 5.1 Lineaarijohteiden mitoitus | 35 |
| 5.2 Materiaalin esikiristysrullat | 37 |
| 5.2.1 Voimien mitoitus | 38 |
| 5.2.2 Vaihdemoottoreiden valinta | 40 |
| 5.2.3 Esikiristysrullien kokoonpanon rakenne | 40 |
| 5.3 Laitteiston suunnittelu | 41 |
| 5.3.1 Leikkauslaitteiston runkolevyn kokoonpano | 42 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 5.3.2 Modulaarinen runkorakenne | 43 |
| 5.3.3 Huollettavuus | 44 |
| 6 JATKOKEHITYS | 47 |
| 7 YHTEENVETO | 48 |
| LÄHTEET | 49 |
| LIITTEET | |
| Liite 1 Laitteiston layout-kuva | |

SANASTO

heterogeeninen

sekakoosteinen, epäyhtenäinen

homogeeninen

tasakoosteinen, -laatuinen

HSS-teräs

High Speed Steel, kova teräslaatu

LDPE

matalatiheyksinen polyeteeni, muovilaatu

proof-of-concept

prototyypimalli, jonka avulla voidaan todistaa idean tai konseptin toimivuus

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan leikkauslaitteisto osaksi toimeksiantajalla valmis-teilla olevaan muovijätteenkäsittelylinjastoon. Leikkauslaitteiston tehtävä on lei-kata pitkiä jätemuovikalvoja ja jaksottaa materiaalivirtaa helpottaakseen linjas-tolla tapahtuvaa materiaalin tunnistusta ja erottelua. Leikkauslaitteisto suunnitel-laan valmistettavaksi 3D-malliksi, jotta se voitaisiin mahdollisen tarpeen mukaan toteuttaa linjastokokonaisuuteen.

Opinnäytetyön päätavoitteena on kehittää toimintavarma ratkaisumenetelmä kal-vomateriaalin leikkaukselle. Työn aikana suunnitellaan asiakasyrityksen määrit-tämän kapasiteetin saavuttava laite, joka ei hidasta linjastolla tapahtuvaa materi-aalinkäsittelyprosessia. Työ sisältää tuotekehitystä ja mekaniikkasuunnittelua.

Työn toimeksiantajana toimiva Head Recycle Systems Oy on Oulussa vuonna 2018 perustettu yritys, joka kuuluu Head Invest -konserniin. Yrityksen perustivat toimitusjohtaja Johnny Pehkonen ja teollisuusneuvos Veikko Lesonen. Yritys ke-hittää laitteistoja, palveluita ja ratkaisuja jätteiden lajitteluun ja kierrättämiseen.
(1.)

2 MUOVINKÄSITTELYLINJASTO

Muovinkäsittelylinjasto valmistetaan Head Recycle Systems Oy:n asiakkaalle, joka on kansainvälisesti vaikuttavalle päivittäistavarakauppaketju. Käsittelylinjasto tullaan sijoittamaan asiakkaan jakelukeskukseen. Jakelukeskuksessa käsitellään ketjun myymälöissä syntyvää erilaista jätemuovia. Linjastokokonaisuuden tehtävä on erotella muovimateriaali tyyppin ja värin perusteella, jotta asiakas saisi paremman kierrätysprosentin kierrätysmuovilleen.

2.1 Käsiteltävä materiaali

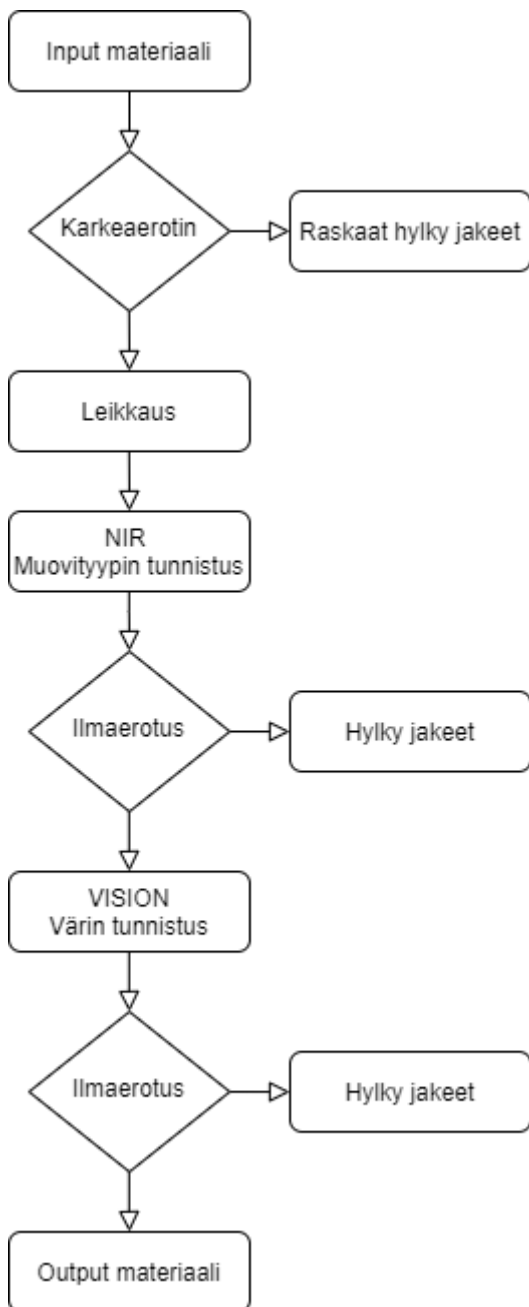
Muovijäte on asiakkaan toimesta jaettu laatukategorioihin ”Kirkas 1”, ”Kirkas 2”, ”Värillinen 1” ja ”Värillinen 2”. Kirkkaat kategoriat ovat pääsääntöisesti pakkausmuoveja. Värilliset kategoriat ovat pääsääntöisesti myymälöiden pullonpalautuspisteellä syntyneitä muoveja. Asiakkaan yli 100 kg toimittamaa materiaalia on analysoitu toisessa opinnäytetyössä (2) käsittelykapasiteetin hahmottamiseksi (kuva 1). Analysoinnilla kartoitettiin millaisia muovityyppejä, värejä ja poikkeamia linjaston tulisi käsitellä. (2, s. 13–18.)



KUVA 1. Asiakkaan materiaaleja analysoitavana (2, s. 14)

2.2 Leikkauslaitteiston rooli linjastossa

Linjastolla käsiteltävän materiaalin analysoinnin tulokset huomioitiin prosessin hahmotelmassa (kuva 2). Konseptitason prosessissa tapahtuva leikkaus toteutetaan leikkauslaitteistolla, joka suunnitellaan tässä työssä. Leikkauslaitteiston tehtävä on leikata pitkät muovikalvot kirkkaita muovilaatuja käsitellessä sekä jaksottaa materiaalivirtaa helpottaakseen linjastolla tapahtuvaa materiaalin tunnistusta ja erottelua.



KUVA 2. Konseptitason prosessin vuokaavio

3 ESISUUNNITTELU

Muovikalvot käyttäytyvät haasteellisesti erilaisissa automatisoiduissa prosesseissa muotonsa ja materiaalin ominaisuuksien takia (3, s. 16). Tämän vuoksi työn tuotekehitysprosessissa on käytetty joustavia menetelmiä tukemaan vanhanaikaista VDI 2221 -standardin mukaista "waterfall-prosessia". Adaptiivisempi malli tarjoaa "rakenna, testaa, kerää palaute, uudista" -silmukkarakenne menetelmän, jonka aikana perinteisen tuotekehitysprosessin vaiheet tapahtuvat limittein. (4, s. 28–29.) Tämän menetelmän hyödyntäminen työssä tarkoitti, että tuotekehityksen aikana potentiaalisen ratkaisuvaihtoehdon löydyttyä toimivuus haluttiin ensin varmistaa kokeilla, jottei ideatasolla toimivaan mutta käytännössä toimimattomaan menetelmään käytettäisi liikaa resursseja erilaisilla vertailutaulukoilla ja pisteytyksillä.

3.1 Leikkauslaitteiston vaatimukset

Leikkauslaitteiston esisuunnittelu aloitettiin laatimalla vaatimuslista laitteistolle.

Listan merkittävimmät vaatimukset olivat seuraavat:

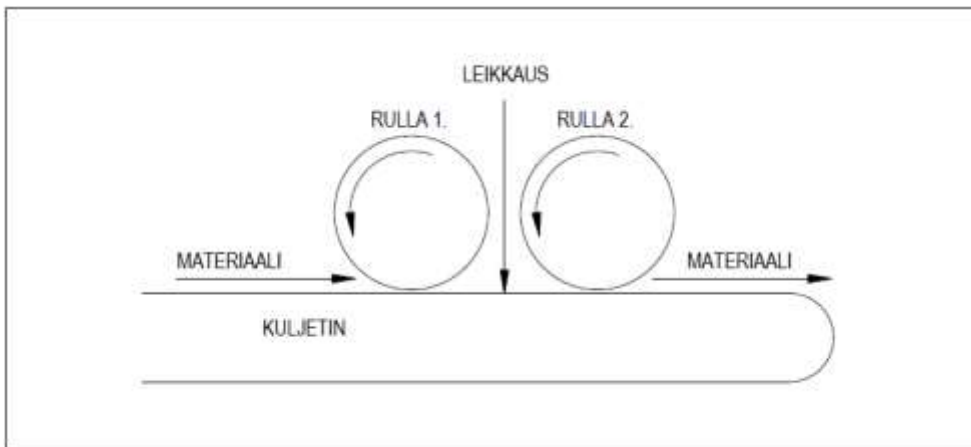
- Laitteiston tehtävä on leikata muovikalvomateriaali noin 500 mm pituisiksi kappaleiksi helpottamaan käsittelylinjastolla myöhemmin tapahtuvaa materiaalin tunnistusta ja materiaalin jatkokäsittelyä varten.
- Linjastokapasiteetin saavuttamiseksi materiaalivirran on saavutettava leikkauslaitteiston jälkeen 50 m/min nopeuden.
- Leikkaustoiminto ei saa hidastaa tai pysäyttää materiaalin käsittelylinjastolla tapahtuvaa prosessia.
- Laitteiston on oltava toimintavarma, joten se ei saa sisältää paljon huoltoa vaativia komponentteja.
- Laitteiston leikkausmenetelmä ei saa aiheuttaa materiaalin tunnistukselle haittoja. Haittoja ovat esimerkiksi värähtely merkittävässä määrässä sekä materiaalin kastuminen nesteestä tai höyrystä.
- Laitteistosta ei saa aiheutua merkittäviä määriä haittoja laitteiston käyttäjille sekä muille laitteiston lähiympäristössä sijaitseville ihmisille. Haittoja ovat esimerkiksi äänihaitat ja savukaasuhaitat.

3.2 Leikkausmenetelmät ja leikattavan materiaalin esikiristys

Leikkausmenetelmälle valikoitui kaksi laadittujen vaatimusten mukaista toteutusvaihtoehtoa. Niitä olivat materiaalin leikkaus kuumalangalla sekä terällä toteutettava leikkaus. Molempia leikkausmenetelmiä suunnitellessa suurimmaksi haasteeksi osoittautui muovikalvojen esikiristysmenetelmän kehittäminen. Esikiristysmenetelmän tarkoitus on helpottaa leikkaustapahtumaa kiristämällä leikattava materiaali hidastamatta linjastolla tapahtuvaa prosessia.

Materiaalin esikiristykselle löytyi laadittujen vaatimusten mukainen menetelmä. Menetelmässä materiaalia kiristetään kumipintaisilla rullilla kuljetinhihnaa vasten. Rullat lepäävät omalla massallaan kuljettimen päällä ja ovat asemassaan johteiden varassa, joten rullat pääsevät nousemaan lineaarisesti materiaalin paksuuden mukaisesti. Menetelmästä syntyi kaksi erilaista versiota.

Esikiristysrullien versiossa 1 on yksi kuljetin, kaksi hinnan levyistä rullaa ja materiaalin leikkaus kuljettimen päällä (kuva 3). Rullan 1 ratanopeus on sama kuin kuljettimen nopeus. Rullan 2 ratanopeus on kaksinkertainen kuin rullan 1.

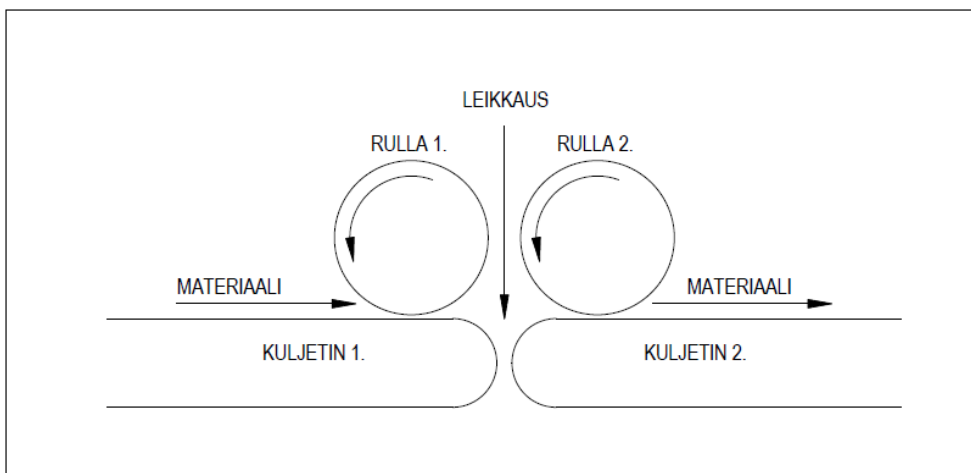


KUVA 3. Materiaalin esikiristysrullien version 1 havainnekuva

Version 1 oletettuna etuna laitteisto pystyttäisiin asentamaan modulaarisesti mihin kohtaan vain linjastoa. Koska laitteisto ei saisi vaurioittaa kuljetinhihnaa, leikkausmenetelmä rajautuisi kuumalankaan, jota käytettäisiin niin kuumana, ettei lankaa tarvitsisi laskea kokonaan materiaalin läpi hihnaa vasten. Version oletettuina haasteina arvioitiin rullan 2 kuluttavan hihnakuljettimen pintaa nopeamman

pyörimisnopeuden takia. Toisena oletettuna haasteena rullan 2 nopeampi pyörimisnopeus aiheuttaisi luistamista kuljettimen tai rullan pinnalla, joten materiaalin kiristyminen ei olisi välttämättä riittävä leikkaukselle.

Esikiristysrullien versiossa 2 on kaksi kuljetinta, kaksi hihnan levyistä rullaa ja materiaalin leikkaus kuljettimien välistä (kuva 4). Rullan 1 ratanopeus on sama kuin kuljettimen 1 nopeus. Rullan 2 ratanopeus on sama kuin kuljettimen 2 nopeus. Rullan 2 ja kuljettimen 2 nopeudet kaksinkertaiset kuin rullan 1 ja kuljettimen 1.



KUVA 4. Materiaalin esikiristysrullien version 2 havainnekuva

Version 2 oletettuna etuna materiaali kiristyisi paremmin kuin versiossa 1, koska rulla 2 tai sen alla olevan kuljettimen 2 pinta ei luistaisi materiaalia kiristäessä. Versio 2. on vähemmän modulaarinen kuin versio 1, koska laitteisto tulisi asentaa aina kahden kuljettimen väliin. Leikkauslaitteiston suunnittelemisen kahden kuljettimen väliin siten, että kuljettimien välinen etäisyys ei kasvaisi merkittävästi ja haittaisi materiaalivirtausta voi tuottaa haasteita. (Kuva 4.)

Menetelmän testauslaitteisto

Leikattavan materiaalin esikiristysrullista rakennettiin proof-of-consept-laitteisto, jolla pystyttiin kokeilemaan käytännössä toimintaperiaatetta. Laitteisto rakennet-

tiin Oulunsalossa yrityksen tiloissa sieltä löytyvistä materiaaleista ja komponenteista. Laitteisto rakennettiin modulaariseksi, jotta laitteiston pienillä muutoksilla pystyttäisiin testaamaan erilaisia menetelmiä.

Konseptitason laitteistoilla testattiin ensin materiaalin esikirstysrullien toimintaa ensimmäisen version mukaan, yhdellä kuljettimella kaksi erinopeuksista esikirstysrullaa (kuva 5). Laitteisto kiristi materiaalia ja paininrullat nousivat lineaarisesti johteita pitkin materiaalin paksuutta myötäillen. Laitteisto toimi suunnitellusti, joten menetelmä todettiin toimivaksi.



KUVA 5. Esikirstysrullien proof-of-consept laitteiston ensimmäinen versio

Versioiden välistä vertailua varten seuraavaksi rakennettiin esikirstysrullien versio 2 mukainen proof-of-consept-laitteisto. Version 2 (kuva 6) Laitteiston testiajoissa materiaalit kiristyivät rullien avulla selvästi tiukemmalle, kuin ensimmäisessä versiossa. Toisena merkittävänä havaintona laitteiston testiajoissa huomattiin, että tuleva leikkaustapahtuma tulisi jaksottamaan leikattua materiaalia ihanteellisesti materiaalin tunnistusta ja erottelua varten.



KUVA 6. Esikiristysrullien proof-of-consept-laitteiston toinen versio

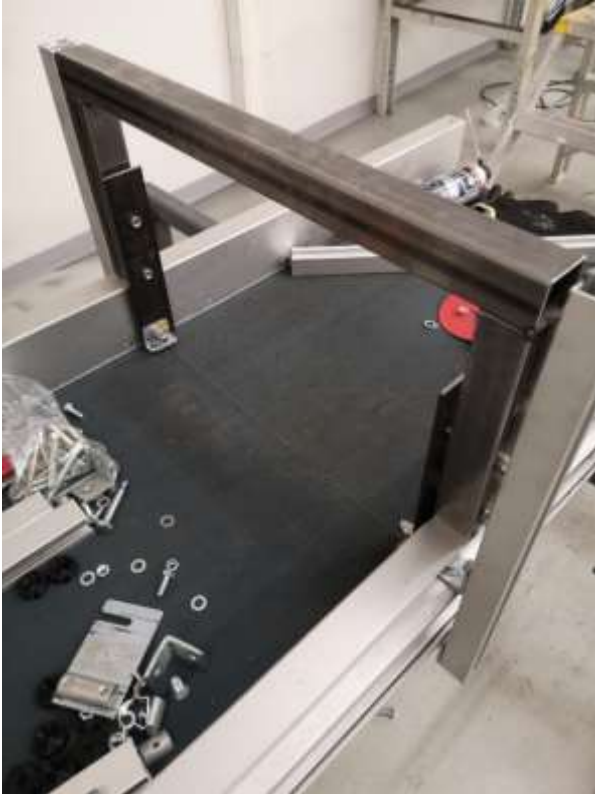
3.2.1 Kuumalankaleikkaus

Leikattavat muovikalvot ovat tyypiltään pääsääntöisesti LDPE-muovia, jonka sulamispiste on maltilliset 108 °C (5, s. 27). Matalan sulamislämpötilan takia yhdeksi potentiaalisimmista leikkausmenetelmistä valikoitui kuumalankaleikkaus. Menetelmän oletettuina etuina olisi yksinkertainen rakenne, joka toisi toimintavarmuutta laitteistolle.

Kuumalankaleikkauksesta rakennettiin proof-of-consept-laitteisto. Konseptitason laitteistolla tulisi suorittaa koe kuumalangan optimaalisen leikkauslämpötilan löytämiseksi prosessissa. Oletuksena oli, että materiaalin sulamislämpötilan mukainen langan lämpötila ei riittäisi leikkaamaan liikkeessä olevia paksuja kokoon puristuneita kalvomuovikappaleita. Kuumalangan lämpötilan merkittävä nostaminen toisi haasteita menetelmään, koska silloin laitteisto pystyisi sytyttämään tai aiheuttamaan kytemistä muussa mahdollisessa materiaalissa, jota voisi päätyä leikkauslaitteistolla prosessin aikana.

Kuumalankaleikkauksen testauslaitteisto

Kuumalankaleikkauksen testejä varten rakennetussa testauslaitteistossa käytettiin kuumalankana vastuslankaa (kuva 7). Kuumalangan kuumentamiseen käytettiin säädettävää virtalähdettä. Kuumalankaleikkurille rakennettiin runko ja johdet. Laitteiston testeissä käytettiin eri paksuisia vastuslankoja. Eripaksuisilla vastuslangoilla haluttiin vertailla lämmitysaikoja ja lämpötilan säilymisen eroja.



KUVA 7. Kuumalankaleikkauksen proof-of-concept-laitteisto

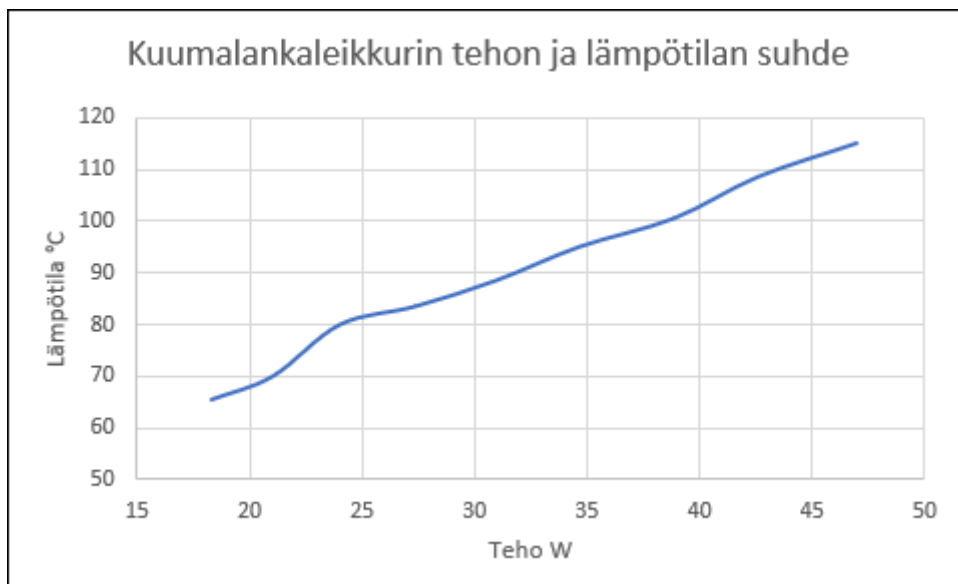
Kuumalankaleikkurin leikkauskokeet suoritettiin ensin esikiristysrullien versio 1. mukaisella yhdellä kuljettimella leikkaus hihnakuljettimen päällä. Seuraavaksi kuumalankaleikkuri asennettiin esikiristysrullien version 2. mukaisesti kahden hihnakuljettimen väliin. Havaintona näiden versioiden välillä oli, että leikkaus tapahtui optimaalisemmin kahden kuljettimen välistä. Version 2. mukaisessa asettelussa myös materiaalin esikiristysrullat jaksottivat materiaalivirtaa paremmin, joten loppu kokeet valittiin suoritettavaksi tätä menetelmää käyttäen.

Kuumalankaleikkurilla suoritettujen kokeiden aikana mitattiin vastuslangan lämpötiloja lämpökameralla sekä digitaalisella lämpömittarilla. Lämpötiloista laskettiin keskiarvot ja säädettävästä virtalähteestä teho. (Taulukko 1.)

TAULUKKO 1. Kuumalankaleikkurin kokeiden aikana kerättyjä vastuslangan lämpötiloja sekä käytettyjä tehoja

| Kamera °C | Mittari °C | Lämpötila keskiarvo °C | Teho W |
|-----------|------------|------------------------|--------|
| 60 | 71 | 65,5 | 18,27 |
| 65 | 75 | 70 | 21 |
| 75 | 85 | 80 | 24 |
| 79 | 88 | 83,5 | 27,35 |
| 84 | 93 | 88,5 | 30,95 |
| 90 | 100 | 95 | 34,65 |
| 95 | 106 | 100,5 | 38,87 |
| 102 | 115 | 108,5 | 42,6 |
| 110 | 120 | 115 | 47 |

Koska mittatuloksista laadittu käyrä on lineaarinen, voidaan päätellä, että langan vastusarvosta riippumatta langan lämpötila on helppo säätää tehoa muuttamalla. (Kuva 8.) Lämpötilan helppo säätöisyys auttoi testien suorituksessa.



KUVA 8. Kuumalankaleikkauksen kokeiden mittatuloksista laadittu käyrä

Kuumalankaleikkauksen tulokset

Kuumalankaleikkauksella suoritettujen kokeiden tulokset osoittivat, että kuumalankaleikkurin vastuslangan lämpötilan ollessa jopa LDPE-muovin sulamispistettä matalampi riitti tämä jo ohuen kalvon katkaisuun. Paksumpien kappaleiden leikkaustapahtuman aikana vastuslanka jäähdyi huomattavasti ja vaati aikaa, että lanka läpäisisi kappaleen. Testin seuraavassa vaiheessa vastuslangan lämpötilaa nostettiin asteittain. Vastuslangan saavutettua noin 200 °C lämpötilan leikkaustapahtuman haluttu nopeus saavutettiin. Kokeiden aikana käytetyillä eri paksuisilla vastuslangoilla ei saavutettu merkittäviä eroja leikkaustapahtuman kannalta. Merkittävimäksi haasteeksi LDPE-muovijätteen kuumalankaleikkauksessa pääteltiin prosessissa ilmaantuvan muun ennalta-arvaamattoman materiaalin syttymisvaara korkean kuumalangan lämpötilan seurauksena. Toinen haavattu haaste kuumalankaleikkauksessa oli merkittävät savukaasuhaitat.

3.2.2 Leikkaus terällä

Toiseksi valikoitunut leikkausmenetelmä oli terällä toteutettava leikkaus. Koska leikattavan materiaalin kokoa, muotoa ja asemaa ei voida määritellä tarkasti leikkaustapahtuman aikana, on todella haastavaa mitoittaa laskennallisesti kappaleen leikkaantumiseen vaadittavat voimat. Menetelmästä laadittiin proof-of-concept-laitteisto. Konseptitason laitteistolla suoritettiin kokeita, kuinka materiaalin paksuus sekä sen asema vaikuttavat leikkaustapahtumalta vaadittaviin voimiin sekä terän tylsymisen vaikutus materiaalin leikkaantumiseen.

Leikkaus terällä testauslaitteisto

Terällä toteutettavan leikkauksen kokeita varten rakennetussa testauslaitteistossa leikkausmenetelmä on verrattavissa saksien toimintaan (kuva 9). Laitteistossa käytettiin teräksestä valmistettua mekaanisesti viistettyä ja käsin teroitettua terää, jonka teräkulma on 24°. Teräslevy, jonka kylkeä pitkin terä leikkaa, on tasoitettu hiomalla. Terä ja teräslevy nivelöitiin lopulta toisiinsa. Laitteistoa käytettiin käsin, jotta leikkaustapahtuma olisi turvallinen ja täysin hallittavissa.



KUVA 9. Terällä toteutettu leikkauslaitteisto

Terällä leikkauksen tulokset

Terällä toteutettava leikkaus toimi. Kappaleet leikkoutuivat asiallisesti ilman merkittävää voiman käyttöä, vaikka testauslaitteisto rakennettiin käsivaraisesti eivätkä terän teroitukseen käytetyt työstövarat mahdollistaneet optimaalista tarkkuutta. Leikkauskokeen havainto oli, että leikatessa terää piti väännättää kuljettimen tasolla olevaa teräslevyä vasten niin että leikkaustapahtumasta saatiin välyksetön.

Terällä toteutettavan leikkauksen suurimpana haasteena pääteltiin terän tylsymisen mahdollisten prosessissa ilmaantuvien epäpuhtauksien seurauksena. Terän

tylsymiseen normaalissa käytössä pystytään vaikuttamaan oikeilla terämateriaalien valinnoilla. Toinen merkittävä haaste olisi tarkan ja välyksettömän leikkaustapahtuman saavuttaminen.

3.3 Esisuunnitteluvaiheen tulokset

Menetelmien vertailun suorittaminen konseptitason kokeista kerättyjen havaintojen pohjalta osoittautui hyvin toimivaksi verrattuna perinteiseen menetelmien vertailuun pisteytyksien avulla. Pelkän pisteytyksen avulla jatkokehitettäväksi menetelmäksi olisi voinut valikoitua kuumalankaleikkaus materiaalin matalan sulamislämpötilan ja yksinkertaisen rakenteen perusteella. Käytännön kokeet osoittivat, että kuumalangan lämpötilan nostaminen riittävään leikkauskapasiteetin saavuttamiseksi olisi aiheuttanut mahdollisen palovaaran prosessissa.

Laitteiston leikkausmenetelmäksi valittiin terällä toteutettava leikkaus. Materiaalin esikiristys päätettiin toteuttaa esikiristysrullien versio 2. mukaisella menetelmällä, jossa leikkaus suoritetaan kahden kuljettimen välistä. Esisuunnitteluvaiheen aikana suoritetuista konseptitason testeistä kerätyt havainnot edesauttoivat terällä toteutettavan leikkauksen vaatimuslistan laatimista ja yksityiskohtaista suunnittelua.

4 LEIKKAUSLIIKKEEN TOIMINTAPERIAATTEEN VALINTA

Leikkauslaitteiston leikkausmenetelmän valikoiduttua terällä toteutettavaksi tulisi suunnittelutyön seuraavassa vaiheessa valikoida leikkausliikkeen toteutus. Leikkausliikkeen toteutusvaihtoehtojen hahmottamiseksi menetelmissä toistuvat komponentit otettiin tarkasteluun seuraavaksi.

4.1 Leikkauslaitteiston terä

Leikkauslaitteiston teräksi valikoitui graafisella alalla yleisesti käytössä olevan Wohlenberg 115 -paperileikkurin HSS-teräksinen terä. HSS-teräksellä saavutetaan hyvä kestävyys muovien leikkauksessa (6, s. 9). Leikkauslaitteistoon valikoitunut paperileikkurin terän alkuperäinen käyttötarkoitus on leikata paksuja paperiarkinippuja. Paperileikkuri leikkaa terällä nylonista valmistettua helposti vaihdettavaa cutting stick -nauhaa vasten. Kyseinen menetelmä valikoitui myös leikkauslaitteistoon, koska se vastaa terän alkuperäistä käyttötarkoitusta. Näin ollen valmistajan laatimat terän ohjearvoja voidaan käyttää suuntaa antavina tässä käyttökohteessa.

4.2 Leikkauskokeet

Materiaalin leikkaantumiseen vaadittavia voimia olisi haastavaa määrittellä pelkästään laskennallisesti materiaalivirran heterogeenisyyden takia. Vaadittavien voimien määrittämiseksi ja suunnittelutyön tueksi hankittiin Wohlenberg 115 -paperileikkurin terän sekä cutting stick -nauhoja.

Terällä suoritettavaa leikkausvoimien määrittämisen koetta varten terä asennettiin särmäyspuristimeen (kuva 10). Asentamisen yhteydessä havaittiin terän olevan todella terävä ja sen käsittely vaatisi huolellisuutta. Voimien määrittämisen kokeessa leikattiin kutistemuovikalvoa koko terän leikkausalueen mittaisesti puukappaletta vasten. Leikattava kutistemuovikalvo asetettiin terän ja puukappaleen väliin tiiviisti. Leikkaus tapahtui särmäyspuristimen liikkeellä siten, ettei särmäyspuristimen painemittarissa havaittu minkäänlaista kuormaa missään leikkaustapahtuman vaiheessa. Koe osoitti, että leikkauslaitteisto ei tarvitse merkittäviä voimia leikkaamiseen. Terän terävyys on suuremmissa asemassa onnistuneessa

leikkauksessa. Myös leikkauksen voimaa tärkeämpi ominaisuus leikkaustapahtumassa tulisi olemaan leikkauksen nopeus, jotta leikkaustapahtuma ei hidastaisi materiaalivirtaa prosessissa.



KUVA 10. Terä asennettuna särmäyspuristimeen leikkauksoikeita varten

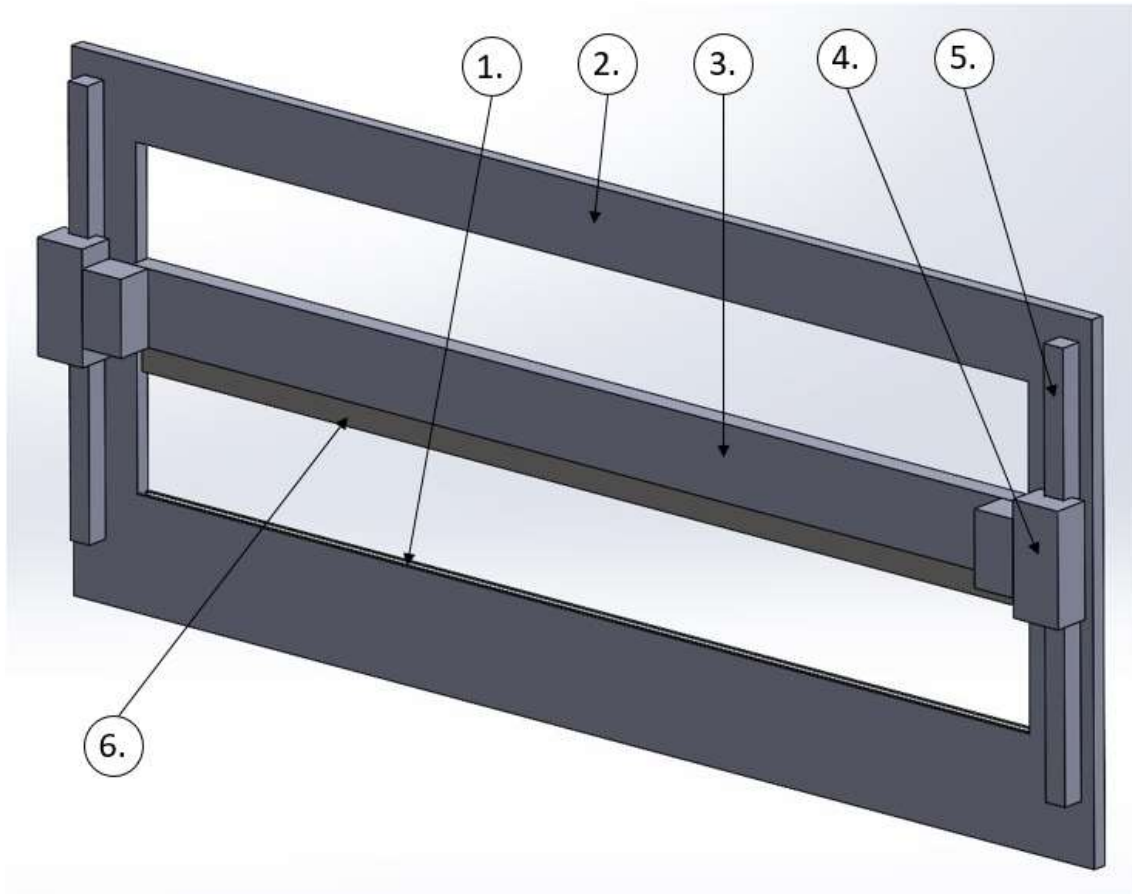
4.3 Terällä toteutettavan leikkauksen vaatimukset

Leikkausliikkeen toteutukselle luotiin vaatimuslista eri toteutusvaihtoehtojen hahmottamiseksi. Vaatimuksissa otettiin huomioon projektin aikaisempien vaiheiden aikana suoritetuista kokeista kerätyt huomiot. Merkittävimmät vaatimukset olivat seuraavia:

- Terän on nouseva yläasennossaan kuljettimen pinnasta yli 300 mm korkeuteen. Jotta materiaali, jota ei leikata voi kulkea kuljettimella ilman että se osuu leikkauslaitteiston terään.
- Muovikalvomateriaali on leikattava noin 500 mm pituisiksi kappaleiksi.

- Leikkauksen on tapahduttava koko 1 000 mm leveän hihnakuljettimen leveydellä.
- Leikkaustapahtuman aikana terän on osuttava tarkasti samaan pisteeseen jokaisella leikkauksella.
- Laitteiston on vietävä mahdollisimman vähän tilaa kuljettimien välistä, jotta materiaali pääsisi kulkeutumaan kuljettimelta toiselle mahdollisimman sujuvasti.
- Lineaariliikkeen komponentit tulee olla suhteellisen helposti asennettavia ja säädettäviä.
- Linjaston prosessin tavoitetun kapasiteetin sekä optimaalisen materiaalin jaksottamisen saavuttamiseksi tulisi materiaalin saapua laitteistolle 25 m/min vauhdilla ja jatkaa 50 m/min vauhdilla.

Menetelmäkohtaisten vaatimusten, tilavarausten, terän, cutting stickin ja lineaariliikkeen komponenttien hahmotelmien avulla luotiin karkea 3D-malli Solidworks-ohjelmistolla (kuva 11). Mallin avulla pystytään arvioimaan paremmin lineaarisesti liikkuvia massoja. Lineaarisesti liikkuvat massat määrittelevät laitteiston voimantarpeen, jonka avulla pystytään hahmottamaan liikkeen toteutuksen vaihtoehtoja. Laitteiston runko suunniteltiin levymäiseksi, jotta lineaarijohteet olisi helppo asentaa samalle tasolle toleranssien mukaisesti.



*KUVA 11. Leikkauslaitteiston toimintaa esittävä malli, jossa terä kulkee teränpiti-
men ja kelkkojen kanssa johdekiskoja pitkin, 1) cutting stick, 2) runko, 3) teränpiti-
din, 4) lineaarijohteen kelkka, 5) lineaarijohteen kisko, 6) terä*

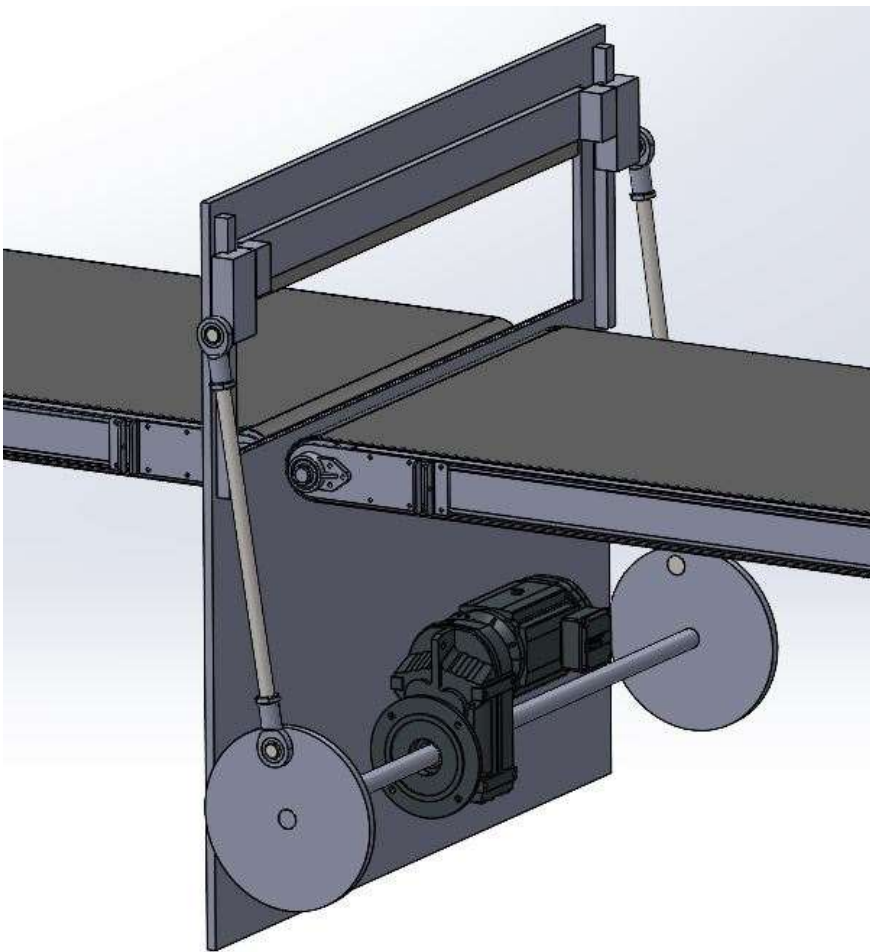
4.4 Terällä toteutettavan leikkauksen menetelmät

Terällä toteutettavan leikkausmenetelmän liikkeen toteutukselle valikoitui kaksi toteutusvaihtoehtoa. Sähkömoottorilla tuotetusta pyörivästä liikkeestä lineaarisiksi liikkeeksi muuttaminen kampimekanismilla sekä pneumaattisella sylinterillä toteutettava leikkausliike. Moottorilla toteutettavan liikkeen eduksi arvioitiin suurien leikkauskapasiteettien saavuttaminen. Menetelmän haasteeksi arvioitiin monimutkaisempi rakenne. Pneumaattisessa leikkausmenetelmässä arvioitiin eduksi yksinkertaisuuden ja sitä kautta toimintavarmuuden, turvallisuuden sekä säädettävyyden. Menetelmän haasteena arvioimme sylinterin ilmakehän määrää.

Menetelmät eroavat huomattavasti toisistaan. Menetelmien välisessä vertailussa huomioitiin mahdollinen laitteiston leikkauskapasiteetti, käytössä olevat energia- resurssit sekä laitteiston toimintavarmuus.

4.4.1 Liikkeen toteutus moottorilla

Menetelmästä luotiin karkea 3D-malli, jossa huomioitiin vaatimukset ja tilavaraukset (kuva 12). Mallin tarkoitus on auttaa hahmottamaan liikutettavia massoja ja sen avulla moottorin tehontarvetta ja kuormitusta.



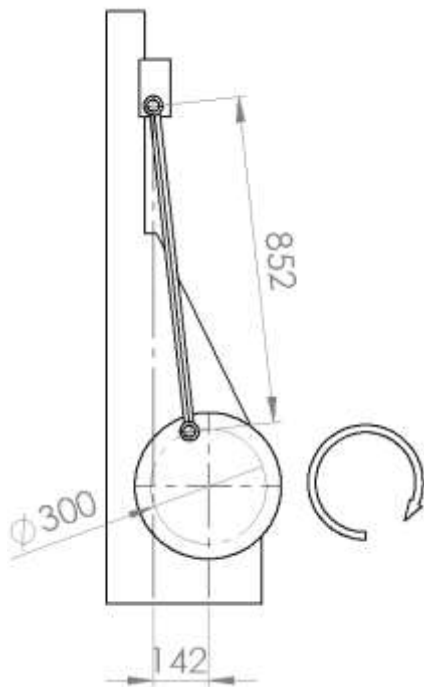
KUVA 12. Menetelmästä luotu 3D-malli

Leikkausmenetelmässä sähkömoottori pyörittää akselia, jonka kummassakin päässä on rattaat. Rattaisiin on liitetty kammet, jotka muuttavat sähkömoottorin pyörivän liikkeen lineaariseksi leikkausliikkeeksi. Menetelmän leikkaustapahtuma eroaa merkittävästi toisesta vaihtoehdosta sillä, että menetelmä on tarkoitettu jatkuvaan leikkaukseen.

Mallin suunnittelussa käytettyjä mittojen sekä laitteiston toimintaan vaikuttavien arvojen laadinta suoritettiin seuraavien havaintojen pohjalta:

- Terä kulkee sähkömoottorin pyörähtäessä yhden kierroksen eli kokonaisen leikkaustapahtuman ja palaa takaisin lähtöasemaansa.
- Leikattava materiaali kulkeutuu 25 m/min leikkauspisteeseen ja materiaali on leikattava noin 0,5 m pituisiksi kappaleiksi. Joten moottorin on pyörittävä noin 50 1/min.
- Terä on oltava yläasennossa 300 mm korkeudessa kuljettimen tasosta, joten moottorilla pyöritettävän rattaan halkaisija on 300 mm.

Lopulta toteutusvaihtoehdosta laadittiin vielä yksinkertaisempi 3D-kokoonpano-malli leikkauksen simulointia varten (kuva 13). Mallin geometria ja liikkuvat osat määriteltiin aikaisemman mallin perusteella.



KUVA 13. Moottorilla toteutettava leikkausmenetelmä

Asetelman maksimimomentin ja terän nopeuden määrittämiseen käytettiin Solidworks ohjelmiston Motion Study -simulointia. Mallin yksinkertaisuus on apuna simuloinnin paikkaansa pitävyyttä silmällä pitäen. Simuloinnin tukena tehtiin käsinlaskentaa, jotta simuloinnin tulosta voidaan pitää luotettavana.

4.4.1.1 Laskennan lähtötiedot

Voimien määrittämisessä käytettiin seuraavia lähtötietoja:

- liikkuvat massat 127,2 kg
- moottorin pyörimisnopeus 50 1/min
- rattaan halkaisija 300 mm.

Nopeuden määrittäminen

Geometrian johdosta lineaariset massat aiheuttavat kiihtyvyyttä asetelman nopeuteen. Geometrian epäsymmetrisyyden seurauksena kiihtyvyyksien käsinlaskenta on työlästä. Käsin laskettu rattaan kehänopeus ilman massojen aiheuttamia kiihtyvyyksiä kertoo suuntaa antavasti terän nopeuden. Vertaamalla tulosta simuloituun dataan voimme arvioida onko simulointi paikkaansapitävä. Rattaan kehänopeus selvitettiin laskemalla ensin kulmanopeus kaavalla 1 (7, s. 167).

$$\omega = 2 * \pi * n$$

KAAVA 1

$$\omega = 2 * \pi * 50 \text{ 1/min} = 5,236 \text{ rad/s}$$

ω = kulmanopeus (rad/s)

n = pyörimisnopeus (1/min)

Rattaan kehänopeus laskettiin selvitetyn kulmanopeuden avulla kaavalla 2 (7, s. 167).

$$v = r * \omega$$

KAAVA 2

$$v = 0,15\text{m} * 5,236 \text{ rad/s} = 0,785 \text{ m/s}$$

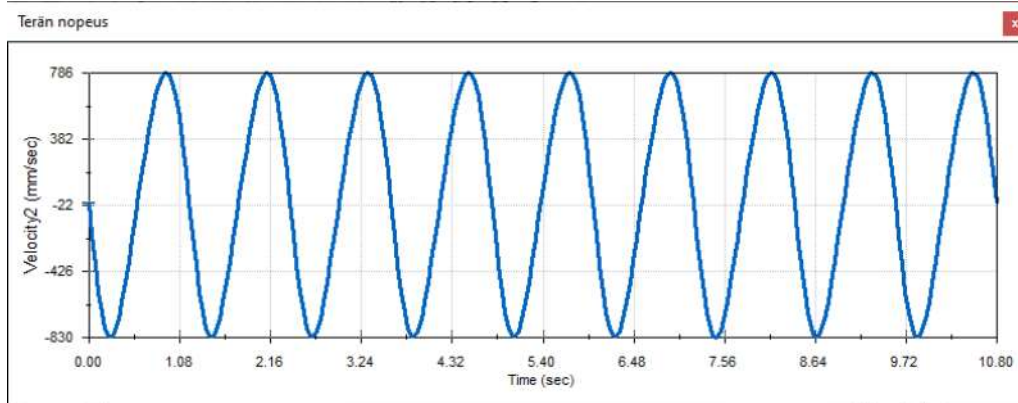
v = kehänopeus (m/s)

r = pyörivän rattaan säde (m)

ω = kulmanopeus (rad/s)

Kuvassa 14 simuloitun leikkauksen terän nopeuden aalto. Simuloidusta aallosta voimme huomata, että terän nopeus on joka ajan hetkellä erilainen. Laskennalli-

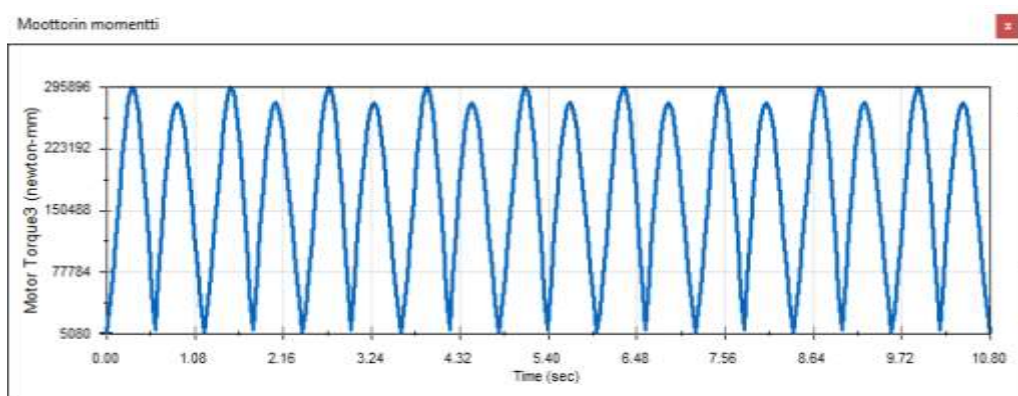
nen rataan kehänopeus 0,785 m/s saavutetaan terälle hetkenä, jolloin lineaarisesti liikkuvat massat vaikuttavat vähiten asetelmassa. Simulointia voidaan pitää näin luotettava.



KUVA 14. Terän nopeus simuloituna.

Tehontarpeen mitoittaminen

Tehontarpeen mitoitus aloitettiin simuloimalla moottoriin vaikuttava maksimimomentti (kuva 15). Simuloinnin tuloksista näemme kuinka vaihtelevaa kuormitus on joka ajanhetkellä koska moottori sijaitsee epäsymmetrisestä terään nähden.



KUVA 15. Moottoriin vaikuttava momentti simuloituna

Simuloinnin tuloksena asetelma aiheuttaa moottorille 300 Nm maksimimomentin. Seuraavaksi laskettiin asetelman kulmanopeus simuloidusta nopeudesta soveltamalla kaavaa 2 (7, s. 167).

$$v = r * \omega \rightarrow \omega = \frac{v}{r}$$

KAAVA 2

$$\omega = \frac{0,83 \text{ m/s}}{0,15 \text{ m}} = 5,33 \text{ rad/s}$$

ω = kulmanopeus (rad/s)

v = kehänopeus (m/s)

r = säde (m)

Seuraavaksi määrittelimme kuorman tehontarpeen simuloidusta maksimimomentista ja lasketusta kulmanopeudesta kaavalla 3 (7, s. 168).

$$P = M * \omega$$

KAAVA 3

$$P = 300 \text{ Nm} * 5,33 \text{ rad/s} = 1599 \text{ W} \approx 1,6 \text{ kW}$$

P = teho (W)

M = momentti (Nm)

ω = kulmanopeus (rad/s)

Lopulta laskimme asetelmaan vaikuttavan liikehäviökertoimen simuloiduista arvoista. Liikehäviökerroin saadaan johdattelemalla kaavaa 4 (7, s. 168).

$$P = F * v \rightarrow P = n * m * g * v$$

KAAVA 4

P = teho (w)

n = liikevastuskerroin

m = massa (kg)

g = maan vetovoima eli kiihtyvyys (m/s^2)

v = nopeus (m/s)

Soveltamalla kaavaa 4 saadaan laskettua asetelmaan vaikuttava liikevastuskerroin n .

$$n = \frac{P}{m * g * v}$$

$$n = \frac{1599 \text{ W}}{127,2 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,83 \text{ m/s}} = 1,544$$

Lasketun liikevastuskertoimen perusteella asetelman moottori tarvitsee yli 1,5 kertaisen tehon liikevastuksettomaan asetelmaan verrattuna. Menetelmän mitoituksien tulokset osoittivat, että pienemmän kuormituksen ja tehon tarpeen saavuttamiseksi kyseisen menetelmän toimintaperiaatetta ja geometriaa tulisi muuttaa.

4.4.2 Liikkeen toteutus pneumaattisesti

Pneumaattisessa leikkausliikkeen toteutuksessa terän liike toteutetaan sylinteritoimilaitteella. Kriittisenä tässä menetelmässä pidettiin haluttua nopeutta, jottei terä hidastaisi materiaalivirtaa tai aiheuttaisi jumitilannetta prosessissa. Leikkaustapahtuman kannalta eroa tässä menetelmässä aikaisempaan on se, että sylinterin ilmankulutuksen seurauksena menetelmä on enemmän yksittäisten leikkaustapahtumien toteutukseen kuin jatkuviin sarjoihin. Menetelmien välistä vertailua varten sylinterin koko ja ilmankulutus mitoitettiin.

4.4.2.1 Sylinterin mitoitus ja ilmankulutus

Terällä toteutettavan leikkauksen vaatimuksien mukaan terä on noustava yli 300 mm kuljettimen pinnasta, joten sylinteriksi esivalittiin ISO 15552 -standardin mukainen 320 mm iskunpituudella varustettu sylinteri.

Sylinterin mitoitus aloitettiin hahmottamalla haluttua iskun nopeutta. Lähtötietojen perusteella materiaalia kulkeutuu leikkauspisteeseen 25 m/min eli 0,417 m/s. Tämä tarkoittaa, että terän ollessa ala-asennossa sekunnin, on terää vasten kennyntä painua 417 mm verran materiaalia, tämä määrä arvioitiin vaikuttavan heikentävästi leikkausprosessiin. Terää vasten painuvan materiaalin halutuksi maksimimääräksi arvioitiin 250 mm verran. Aika jona terä tulisi nousta leikkauspisteestä laskettiin yksinkertaisella etenemisliikkeen kaavalla 5 (7, s. 161).

$$t = \frac{s}{v}$$

KAAVA 5

$$t = \frac{0,25m}{0,417m/s} = 0,599 \text{ s} \approx 0,6 \text{ s}$$

t = aika (s)

s = kuljettu matka (m)

v = vakionopeus (m/s)

Laskettu aika sijoitetaan kaavaan 6 (7, s.161), jolla saadaan laskettua sylinterin haluttu iskunopeus.

$$v = \frac{s}{t}$$

KAAVA 6

$$v = \frac{0,32m}{0,6s} = 5,33 \text{ m/s}$$

v = vakionopeus (m/s)

s = kuljettu matka (m)

t = aika (s)

Sylinterin laskettu iskunopeus sijoitetaan kaavaan 7 (8), jolla lasketaan sylinterin iskun kiihtyvyys.

$$a = \frac{v^2}{2*s_1}$$

KAAVA 7

$$a = \frac{(5,33m/s)^2}{2*0,032m} = 4,444 \text{ m/s}^2$$

a = kiihtyvyys (m/s²)

v = nopeus (m/s)

s_1 = sylinterin kiihtyvyyssmatka 10% iskunpituudesta (m)

Sylinterin tuottama voima laskettiin kaavalla 8 (8). Laskussa käytetty massa on peräisin 3D-mallin lineaarisesti liikkuvista komponenteista, joihin on lisätty varmuutta. Sylinterin kitkakertoimena on käytetty 0.12 (8).

$$F = \frac{m*g+m*a}{1-\mu}$$

KAAVA 8

$$F = \frac{70kg * 9,81m/s^2 + 70kg * 4,444m/s^2}{1-\mu} = 1133,61 \text{ N}$$

F = voima (N)

m = massa (kg)

g = maan vetovoima (m/s²)

a = kiihtyvyys, sylinterin (m/s²)

μ = kitkakerroin, sylinterin

Sylinterin laskennallinen halkaisija 0,8 hyötysuhteella lasketaan kaavalla 9 (8). Laskussa käytetty paineilmaverkon käyttöpaineeksi on arvioitu 5 bar.

$$D = \frac{(2 \cdot \sqrt{F})}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\eta} \cdot \sqrt{p}}$$

KAAVA 9

$$D = \frac{(2 \cdot \sqrt{1133,61 \text{ N}})}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{0,8} \cdot \sqrt{5 \text{ bar}}} = 0,0601 \text{ m}$$

D = sylinterin halkaisija (m)

F = voima (N)

η = hyötysuhde

p = käyttöpaine (bar)

Sylinteri valikoitiin SMC katalogista laskennallisen halkaisijan perusteella 63 sylinteri CP96SDB63-320 (9, s.122). Vaikka liikutettavat massat kasvaisivat jonkun verran lopulliseen malliin, olisi sylinterin voimantuotto ja nopeus silti riittävät tähän sovellukseen.

Sylinterin ilmankulutus

Laskennallista sylinterin ilmankulutusta alettiin ratkaista määrittelemällä leikkaustapahtumien määrät yhden minuutin aikana. Kuljetin kulkee nopeutta 25 m/min ja materiaali halutaan leikata 0,5 m pituiseksi, joten materiaalia leikataan enimmillään 50 kertaa minuutissa. Ilmankulutuksen laskentaan käytettiin SMC -katalogin määrittelemiä sylinterin männän ja tilavuuden mittoja (9, s.492). Laskennallinen maksimi ilmankulutus ilman painehäviötä lasketaan kaavalla 10 (8). Kaava ottaa huomioon sylinterin kummankin suuntaisen liikkeen yhden leikkaustapahtuman aikana.

$$q_n = ((A_1 + A_2) \cdot s) \cdot (p / p_1) \cdot N$$

KAAVA 10

$$q_n = ((0,003 \text{ m}^2 + 0,0028 \text{ m}^2) \cdot 0,32 \text{ m}) \cdot (5 \text{ bar} / 1,01 \text{ bar}) \cdot 50 \text{ 1/min}$$

$$\rightarrow q_n = 0,46 \text{ m}^3/\text{min}$$

q_n = ilmankulutus (m^3/s)

A_1 = männän pinta-ala, plus liike (m^2)

A_2 = männän pinta-ala, miinus liike (m^2)

s = matka, iskunpituus (m)

p = käyttöpaine (bar)

p_1 = ilmakehän paine (bar)

N = iskujen määrä minuutissa (1/min)

Laskennallisesti sylinterin ilmankulutus on maltillinen minuutin jaksossa. Pitkäaikaisen yhtä jaksoisen leikkauksen ilmankulutus olisi merkittävän suuri siksi leikkaustarpeen havaitseminen korostuu tässä menetelmässä.

4.4.3 Menetelmien vertailun tulokset

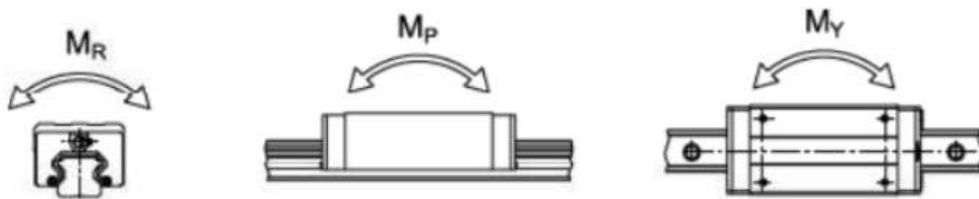
Leikkausliikkeen toteutuksien välisessä vertailussa annoimme suuremman painoarvon yksinkertaiselle toimintavarmalla rakenteelle mitä suurille leikkauskapasiteeteille. Jatkokehitettäväksi toteutusmenetelmäksi valikoitui pneumaattisella sylinterillä toteutettava leikkausmenetelmä. Päätöstä puolsi myös se, ettei sylinterin ilmankulutus ollut liian suuri käytettävissä olevan paineilmajärjestelmän koon suhteutettuna. Menetelmä on myös turvallisempi eikä niin arvaamaton viikatilanteissa. Moottorilla toteutettava leikkausliike ei olisi ollut soveltuva menetelmä tähän sovellukseen ilman toimintaperiaatteen ja geometrian muutosta. Suuret leikkausmäärät toisivat haasteita terän tylsymisen suhteen tässä prosessissa leikattavan materiaalien mahdollisesti sisältämien epäpuhtauksien takia. Moottorilla toteutettava leikkausliike soveltuisi parhaiten puhtaan homogeenisen materiaalin leikkausprosessiin, jossa suurien leikkauskapasiteettien saavuttaminen olisi tärkeässä asemassa.

5 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU

Leikkauslaitteiston terän liikkeentoteutuksen valikoiduttua pneumaattisella sylinterillä toteutettavaksi aloitettiin laitteiston yksityiskohtainen suunnittelu mitoittamalla muut leikkaustoimintaan tärkeintä vaikuttavat komponentit.

5.1 Linearijohteiden mitoitus

Linearijohteiden mitoitus lähdettiin suorittamaan kysymällä linearijohteiden jälleenmyyjältä Movetec Oy:ltä tarjousta ja suositusta, millaisia johteita he suositelisivat tällaiseen käyttötarkoitukseen. Jälleenmyyjän suosituksesta laitteistoon esivalittiin Hiwin RG-sarjan rullajohteet. Koska rullajohteiden välys on vähäinen, ne kestävät hyvin kuormaa ja toistoja (10). Jälleenmyyjän arvioi, että jos leikkaustapahtuma on epäkeskeinen, ratkaisevaksi muodostuu kelkan momentti M_Y , joka on syytä arvioida (kuva 16). Varminta olisi käyttää kahta kelkkaa per johde, jotta mahdollisesta kiertomomentista päästäisiin eroon (10). Varmistamalla tarkemmin suunnitteluvaiheessa, että sylinterin asema on mahdollisimman lähellä laitteiston keskilinjaa ja käyttämällä kahta kelkkaa per johde. Varmistaisimme ettei johteisiin pääsisi vaikuttamaan kiertomomenteja. Mitoituksessa määriteltiin, että sylinteri voisi poiketa laitteiston keskilinjasta maksimissaan 100 mm.



KUVA 16. RGW-CC / RGW-HC Kelkkojen momentit (11, s. 164)

Johteiden mitoitus aloitettiin selvittämällä teoreettinen pneumaattisen sylinterin tuottama maksimivoima kaavalla 11 (9). Laskussa käytettiin 5 bar käyttöpainetta. Sylinterin pinta-ala on peräisin CP96SDB63-320 -sylinterin männän ja tilavuuden mitoista (10, s. 492).

$$F = p * A$$

KAAVA 11

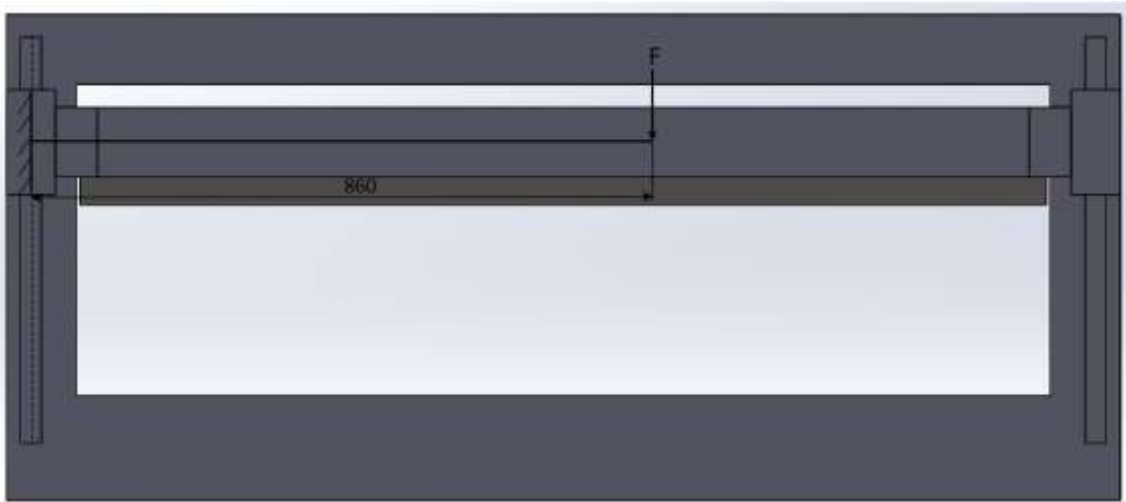
$$F = 500\,000 \text{ Pa} * 0,003117 \text{ m}^2 = 1558,5 \text{ N}$$

F = voima (N)

p = järjestelmän käyttöpaine (Pa)

A = sylinterin pinta-ala, plus liike (m^2)

Johteeseen vaikuttavan momentin M_y määrittämiseen käytettävän momentin vipuvarren mitta on laskettu 3D-mallista (kuva 17). Johteeseen vaikuttavaa vääntömomenttia arvioitiin tapahtuvan, jos jostain syystä toisen puolen johde ei pääse liikkumaan vapaasti sekä käytössä on vain yhdet kelkat per johde.



KUVA 17. Voima F on määritelty 100mm leikkauslaitteiston keskiviivasta oikealle.

Johdekelkkaan vaikuttava momentti laskettiin kaavalla 12 (7, s. 175).

$$M = F * r$$

KAAVA 12

$$M = 1559 \text{ N} * 0,86 \text{ m} = 1340,7 \text{ Nm}$$

M = momentti ($\text{N} * \text{m}$)

F = voima (N)

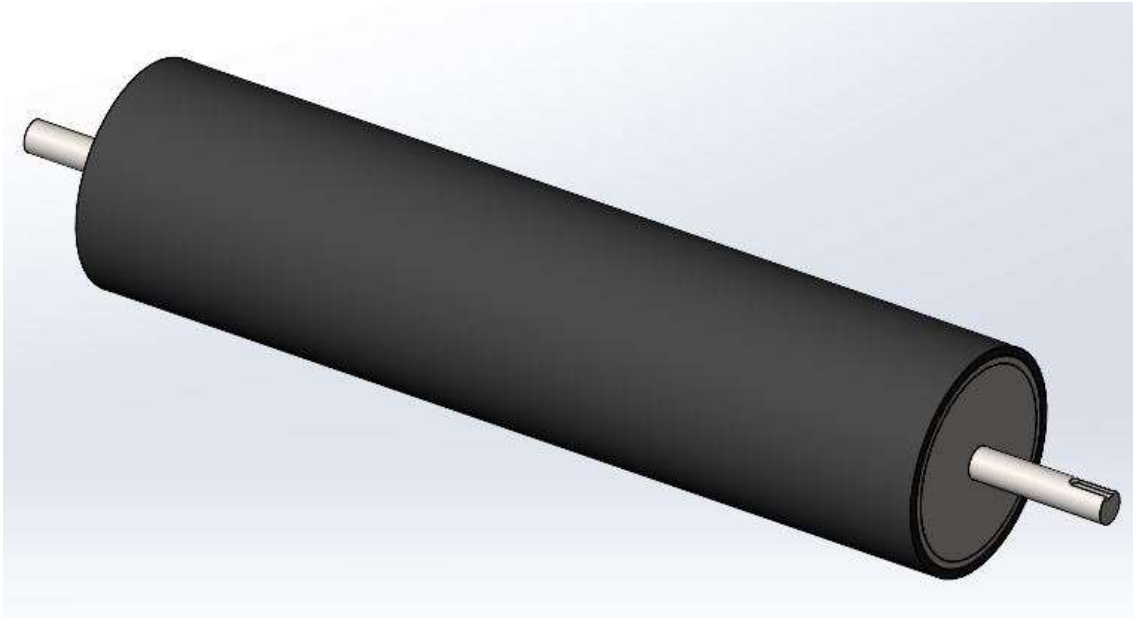
r = voiman vaikutuspisteen välinen vektori (m)

Lasketun momentin perusteella laitteistoon valittiin neljä kappaletta Hiwin RGW35CC-johdekelkkoja. Valmistajan ilmoittama MY kiertomomentin kestävyys yhdelle kelkalle on 1440 Nm (11, s. 164).

5.2 Materiaalin esikiristysrullat

Esisuunnittelun seuraavassa vaiheessa leikkauslaitteiston materiaalin esikiristysrullat mitoitettiin. Mitoittaminen aloitettiin lähtötietojen tarkastelulla. Materiaalin esikiristysrullien tehtävä on kiristää materiaalia helpottaakseen leikkausprosessia sekä jaksottaa materiaalivirtaa. Toiminta perustuu kahteen eri nopeudella kulkevaan kuljettimeen. Ensimmäisen kuljettimen nopeudeksi on määritelty 25 m/min ja jälkimmäisen kuljettimen 50 m/min. Kuljettimien päällä lepäävät rullat pyörivät samaa nopeutta kuljettimien kanssa.

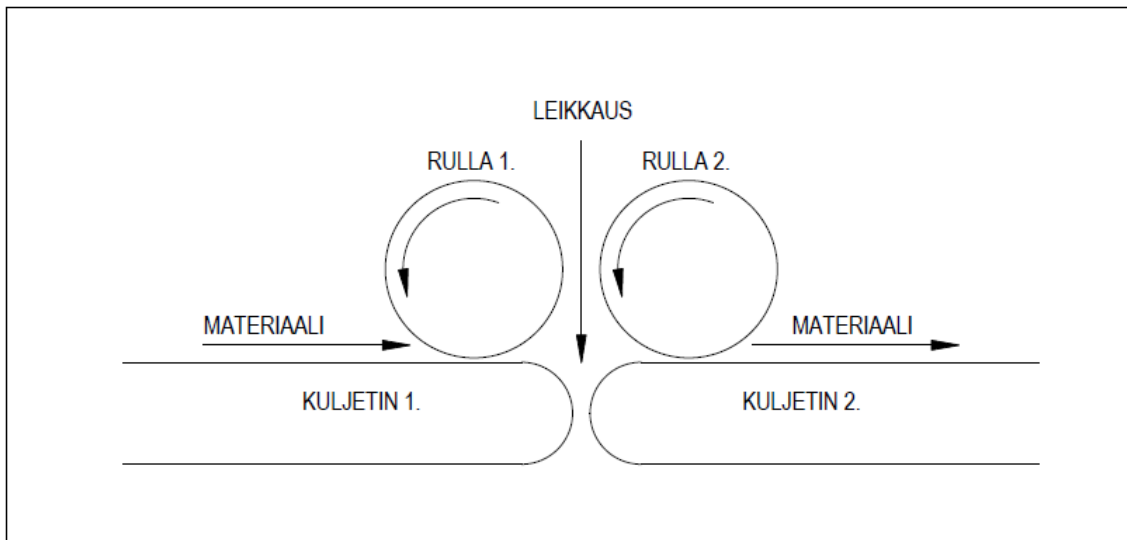
Esikiristysrullista laadittiin 3D-mallit Solidworks-ohjelmistolla massojen määrittämiseksi (kuva 18). Rullan ulkohalkaisijaksi määriteltiin 200 mm ja pituudeksi 1 000 mm. Rullan akseli on yhtenäinen koko matkalta. Rullan ulkokehän päällä on 10 mm paksu kumipinta. Rullan pyörivä massa on 30 kg. Koska rulla lepää omalla massallaan kuljetinta vasten rullan massaan lisättiin arvio sähkömoottorin ja rungon painosta. Rullan, runkorakenteen ja moottorin yhteismassaksi laskettiin 60 kg jota käytettiin kuljetinta vasten kohdistuvan voiman mitoituksessa.



KUVA 18. Materiaalin esikiristysrullan 3D-malli

5.2.1 Voimien mitoitus

Materiaalinesikiristysrullien voimien mitoittaminen aloitettiin tarkastelemalla tarkemmin rullilla saavutettavaa kiristysilmiötä ja sen toimintaperiaatetta. Kuvan 19 mukaisessa asetelmassa leikattava muovimateriaali kiristyy rullien välissä. Rulla 2 aiheuttaa materiaalia kiristäessä vääntöä nopeamman pyörimisnopeutensa ansiosta rullalle 1.



KUVA 19. Esikiristysrullien toimintaperiaatekuva

Koska rullat lepäävät omalla massallaan asemassaan ne kohdistavat voiman N kuljetinta vasten. Voima N lasketaan kaavalla 13 (7, s.163).

$$N = m * g$$

KAAVA 13

$$N = 60kg * 9,81m/s^2 = 588,4 \text{ N}$$

N = voima (N)

m = massa (kg)

g = maan vetovoima (m/s^2)

Suurin vetovoima, jonka rulla 2 kykenee aiheuttamaan ensimmäiselle rullalle, lasketaan kaavalla 14 (8, s. 163). Laskennassa käytetään HDPE-muovin ja kumin välistä lepokitkakerrointa $\mu_k = 1,04$ (12, s. 2). Merkittävän suuri kitkakertoimen arvo saavutetaan pehmeillä kumiaineilla.

$$F = \mu_k * N$$

KAAVA 14

$$F = 1.04 * 588,4N \approx 612 N$$

F = tarvittava voima (N)

μk = lepokitkakerroin

N = voima, jolla pinnat puristavat toisiaan kohtisuorasti (N)

Laskettu maksimivetovoima kohdistuu rullan ulkokehälle. Akselin keskipisteseen vaikuttava momentti M lasketaan kaavalla 12 (7, s.175).

$$M = F * r$$

KAAVA 12

$$M = 612 N * 0,1 m = 61,2 Nm$$

M = momentti (Nm)

F = voima (N)

r = voiman vaikutuspisteen välinen vektori (m)

Laskettu momentti tarkoittaa tässä asetelmassa millaisella väännöllä rullan 1 moottorin tulisi jarruttaa, jottei se lähtisi pyörimään samaa nopeutta rullan 2 kanssa.

Esikiristysrullien pyörimisnopeudet

Voimien mitoituksen jälkeen laskettiin esikiristysrullien pyörimisnopeudet kuljettimien nopeuden ja rullien halkaisijan perusteella kaavalla 15 (7, s.167). Rullan pyörimisnopeus on sama kuin vaihdemoottorin toisioakselilta vaadittu pyörimisnopeus.

$$n = \frac{v}{(\pi * d)}$$

KAAVA 15

n = pyörimisnopeus (1/min)

v = kuljettimen nopeus (m/min)

d = rullan halkaisija (m)

Esikiristysrulla 1 pyörimisnopeus n_1 :

$$n_1 = \frac{25 m/min}{(\pi * 0,2m)} = 39,8 1/min$$

Esikiristysrulla 2 pyörimisnopeus n_2 :

$$n_2 = \frac{50 \text{ m/min}}{(\pi * 0,2\text{m})} = 79,6 \text{ 1/min}$$

5.2.2 Vaihdemoottoreiden valinta

Ennen vaihdemoottoreiden valintaa aikaisemmin laskettujen rullan 1 akseliin kohdistuvan momentin ja toisioakseleiden pyörimisnopeuksien perusteella, havaittiin että kummankin esikiristysrullan moottoreiden teho tulisi olla sama. Jos rullan 1 vaihdemoottori on tehokkaampi, lähtee materiaali luistamaan rullan 2 alla. Jos taas rullan 2 vaihdemoottori on tehokkaampi, rulla 2 pakottaa rullan 1 pyörimään samaa nopeutta.

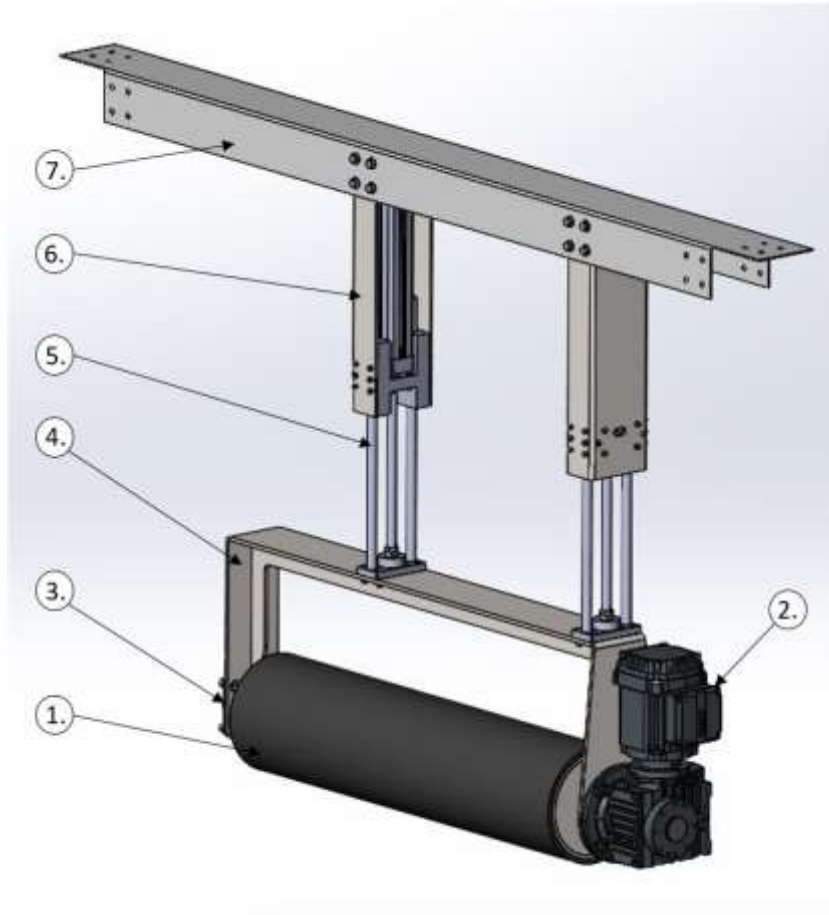
Rullalle 1 valittiin ensin halutun toisioakselin pyörimisnopeuden ja mitoitetun momentin perusteella 38 1/min minimi nopeudella ja 74 Nm momentilla varustettu 0.37kW tehoinen SEW Eurodrive S 37 DRN 71M4 kierukkavaihdemoottori (13, s. 734). Rullalle 2 valittiin samanlainen vaihdemoottori toisioakselin minimi pyörimisnopeudella 78 1/min ja momentilla 40 Nm.

Materiaalin esikiristysrullat suunniteltiin nostettavaksi pois kuljettimen pinnasta, tilanteissa kun leikkauslaitteistoa ei käytetä. Ominaisuuden myötä rullat voidaan myös käynnistää ja antaa kiihtyä nopeuteensa, sellaisessa asennossa etteivät ne kosketa kuljettimen pintaa ennen leikkaustoiminnon aloitusta. Tällaisen toiminnallisuuden sekä rullien yksinkertaisen rakenteen myötä voimme luottaa, että vaihdemoottoreihin ei kohdistu sellaisia massahitauksia, joita tulisi ennakoida ja selvittää.

5.2.3 Esikiristysrullien kokoonpanon rakenne

Esikiristysrullien liikuttaminen korkeussuunnassa kaavailtiin toteutettavaksi johdesylintereillä. Johdesylinterit mahdollistavat kompaktin kokoonpanon. Koska liikkeen toteutuksen nopeus ja voima eivät ole tärkeässä asemassa, toimilaitteet valittiin vertailemalla niitä muihin sovelluksiin, joissa liikutetaan samansuuruisia massoja. Johdesylinteriyksiköiksi valikoitui Feston FENG-63-620-GF (14, s. 19).

Johteiden sekä sylinterin varren halkaisijat ovat 20 mm. Sekä sylinterin iskunpituus on ISO 1552 -standardin mukainen 320 mm. Johdesylinterien kiinnityskohdat kokoonpanossa määriteltiin painopisteen perusteella (kuva 20).



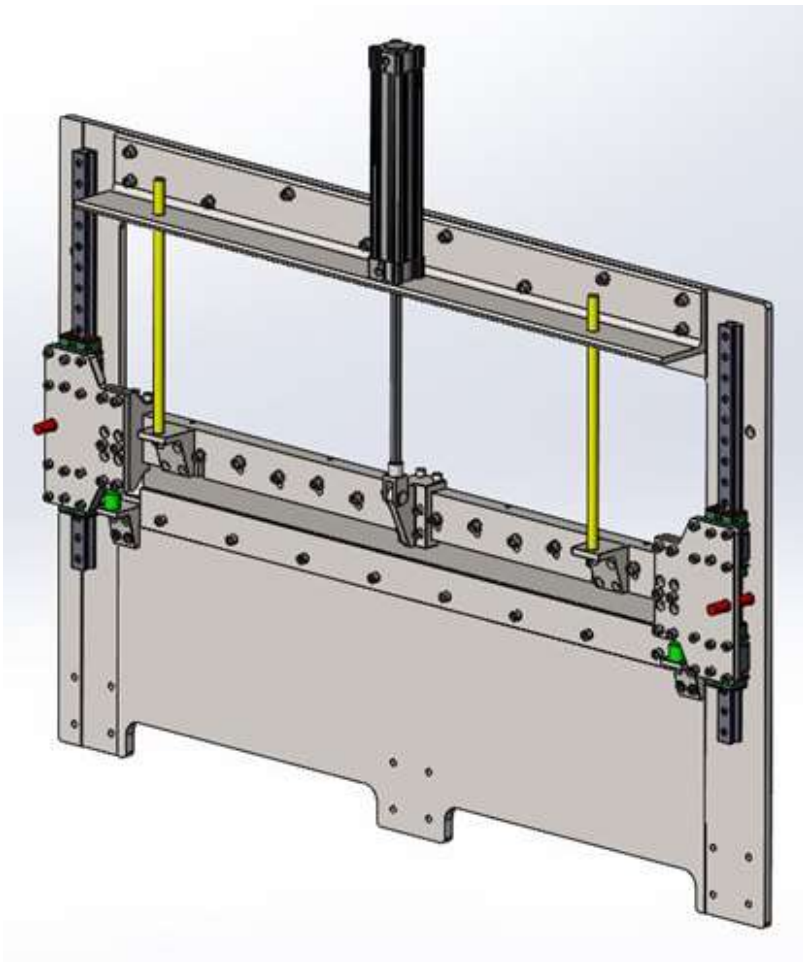
KUVA 20. Esikiristysrullan kokoonpano, 1) esikiristysrulla, 2) SEW Eurodrive S 37 DRN 71M4 -kierukkavaihdemoottori, 3) laakeriyksikkö, 4) esikiristysrullan runko, 5) Festo FENG-63-320-GF -johdesylinteri, 6) johdesylinterin runko, 7) modulaarisen runkorakenteen poikittainen ylätuki

5.3 Laitteiston suunnittelu

Leikkauslaitteiston lopullinen 3D-mallintaminen lähdettiin toteuttamaan, kun laitteiston toimintaan kriittisimmin vaikuttavat komponentit olivat mitoitettu. Tässä vaiheessa suunnittelutyötä otettiin huomioon myös laitteiston valmistettavuus, kokoonpantavuus ja huollettavuus.

5.3.1 Leikkauslaitteiston runkolevyn kokoonpano

Leikkauslaitteisto runkolevy suunniteltiin aikaisemmin mitoitettujen komponenttien ja vaatimusten mukaisesti (kuva 21). Leikkauslaitteiston runkolevy on suunniteltu siten että se voidaan valmistaa yhdestä levyaihiosta. Valmistus sekä kokoonpantavuus toteutetaan yhdeltä puolelta. Kokoonpantavuus ja säädettävyys on huomioitu myös käyttämällä paljon samoja kierre- ja pulttikokoja siellä missä se on perusteltua ja mahdollista toteuttaa.



KUVA 21. Leikkauslaitteiston runkolevy

Koska leikkauslaitteisto lineaarisesti liikkuva massa on liki 70 kg ja terä on todella terävä, laitteiston turvallinen huolto ja säätötoimenpiteet suunniteltiin toteutettavaksi ilman pneumaattisen sylinterin toteuttamaa liikettä. Kuvan 21 keltaiset akselit esittävät trapetsi-kierretankoja, joilla voidaan ajaa teräpakettia manuaalisilla

käsityökaluilla. Teräpaketti voidaan lukita ylä- tai ala-asentoon kuvassa esiintyvillä punaisilla akseleilla, jotka esittävät lukitustappeja. Kuvan vihreät akselit esittävät pohjaanlyöntikumeja, joiden tehtävä on suojata sylinterin päätyvaimennusta.

5.3.2 Modulaarinen runkorakenne

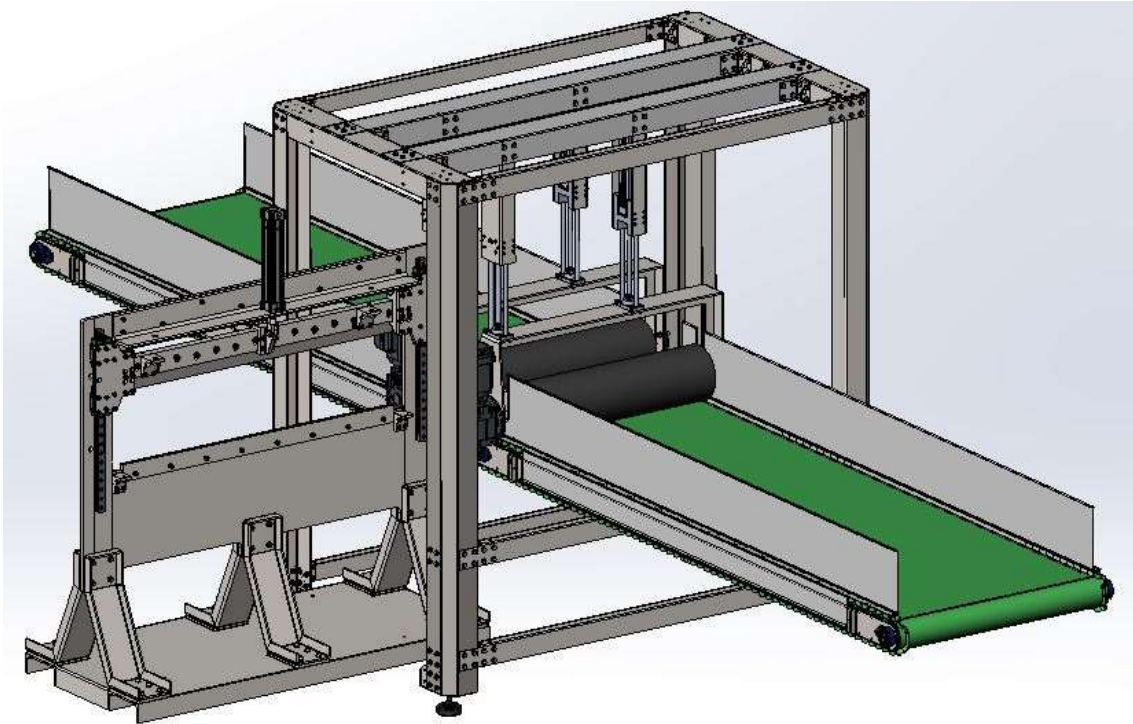
Leikkauslaitteisto suunniteltiin asennettavaksi modulaarisen runkorakenteen sisään. Kyseinen runkorakenne on toimeksiantajayrityksen suunnittelema ja sitä pyritään käyttämään linjastokokonaisuuden muissakin laitteistoissa visuaalisesti yhdenmukaisen kokonaisuuden saavuttamiseksi (kuva 22). Profiili on valmistettu särmämällä sinkittyä levyateriaalia ja sen kokoonpano suoritetaan pulttiliitoksilla. Rakenteeseen on helposti asennettavissa suojaellityksiä ja toimilaitteiden koteloiteja. Suojaellitykset ja koteloinnit suojaavat laitteistoja epäpuhtauksilta mutta ne ovat myös tärkeässä asemassa laitteen käyttöturvallisuuden kannalta.



KUVA 22. Necto All-IN Material sorting assistant -solu (15)

5.3.3 Huollettavuus

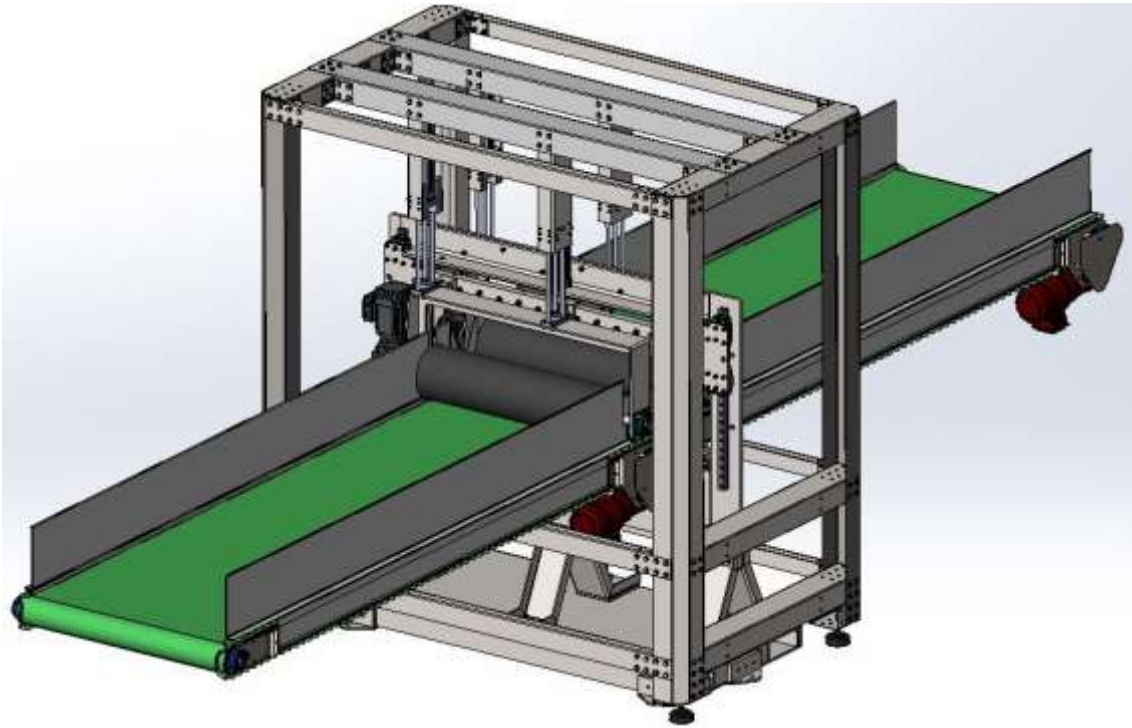
Laitteiston runkolevyn kokoonpano suunniteltiin liikuteltavaksi helpottamaan laitteiston teränvaihtoa ja huoltotöitä (kuva 23). Huoltotöiden suorittaminen huomioitiin suunnittelutyössä koska terän tylsyminen ja leikkauksen säätämisen tarvetta on haastava arvioida ilman koekäyttöjä.



KUVA 23. Leikkauslaitteiston runko suunniteltiin liikuteltavaksi huoltoa ajatellen

Leikkauslaitteiston pääkoonpano

Leikkauslaitteiston pääkoonpano suunniteltiin siten, että laitteiston runkolevyn koonpano on itsenäinen kokonaisuus, jota ei sidota modulaariseen runkorakenteeseen (kuva 24). Esikiristysrullien vähäisen säätö sekä huoltotarpeen vuoksi, rullat on suunniteltu asennettavaksi modulaarisen runkorakenteen koonpanoon. Tämä on järkevää tilansäästön sekä olemassa olevan rakenteen hyödyntämisen kannalta. Laitteiston päämitat ilmenevät liitteestä 1.



KUVA 24. Leikkauslaitteisto osana linjastoa ilman laitteiston suojaellityksiä

6 JATKOKEHITYS

Vaikka laitteistoa ei toteuteta nykyiseen valmisteilla olevaan linjastokokonaisuuteen, on tämän opinnäytetyön selvitystyö tärkeää, koska pitkät kalvomateriaalit tulevat todennäköisesti olemaan vielä haaste pienemmän mittakaavan muovinkäsittely linjastokokonaisuuksissa. Leikkauslaitteiston jatkokehitystyönä tulisi suunnitella laitteisto halvemmaksi keventämällä rakennetta siten, ettei huollettavuus ja terän vaihdon helppous kuitenkaan kärsisi.

Laitteiston pääkokoonpanon rakenteen keventäminen voitaisiin toteuttaa vähentämällä visuaalisesti yhdenmukaisen linjastokokonaisuuden saavuttaminen suunnittelun vaatimuksista. Mikäli visuaalisesti yhdenmukainen linjastokokonaisuus jätettäisiin pois suunnittelun vaatimuksista, laitteiston pääkokoonpanon keventämiseen saataisiin uusia toteutustapoja. Modulaarisen runkorakenteen tärkeimpänä tehtävänä tässä sovelluksessa on kannatella kuljettimia ja esikiristysrullien kokoonpanoa. Kuljettimet voitaisiin toteuttaa omilla jaloillaan sekä esikiristysrullien rakenne voitaisiin sulauttaa runkolevyn kokoonpanoon. Teränvaihto ja huoltotyöt voitaisiin myös suunnitella toteutettavaksi laitteiston ollessa asemassaan hyödyntämällä graafisenalan leikkureiden teränvaihdoin toteutuksen toimintaperiaatetta (16) suunnittelutyön aikana.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön päätavoitteena oli suunnitella kierrätysmuovikalvon leikkauslaitteisto osaksi muovijätteenkäsittelylinjastoa. Työ aloitettiin selvittämällä erilaisia muovinleikkausmenetelmiä. Tavallisesta tuotekehitysprosessista poiketen potentiaalisia ratkaisuvaihtoehtoja testattiin käytännössä jo projektin varhaisessa vaiheessa. Käytännön testit auttoivat menetelmien valinnoissa ja antoivat raameja suunnittelulle kerättyjen havaintojen pohjalta.

Leikkausliikkeen toteutuksien välistä vertailua varten määriteltiin menetelmäkohtaisesti arvot, jotka vaikuttaisivat menetelmän valintaan. Arvot mitoitettiin teoriatietoja hyväksikäyttäen simuloinnilla ja laskennallisesti. Tuloksien perusteella valittiin terän liikkeen toteutusmenetelmä.

Linjaston tarkassa aikataulussa pysymisen sekä opinnäytetyön laajuuden vuoksi työssä mitoitettiin vain laitteiston tärkeimmät toimintaan vaikuttavat komponentit. Leikkauslaitteiston koko projekti saatiin suoritettua laaditun aikataulun mukaisesti. Suoritettuani opinnäytetyön pääsin jatkamaan jouhevasti seuraavissa työtehtävissä ja haasteissa valmisteilla olevan linjaston parissa.

Suunnitellun leikkauslaitteiston tarvetta osaksi valmisteilla olevaan linjastoon arvioitiin, kun materiaalin tunnistusta ja erottelua päästiin kokeilemaan käytännön kokeilla. Käytännön kokeet johtivat löytämään innovaatiot, joilla materiaalivirta saatiin jaksottumaan optimaalisesti. Optimaalisen materiaalivirran seurauksena leikkauslaitteiston tarve valmisteilla olevaan linjastoon mitätöitiin.

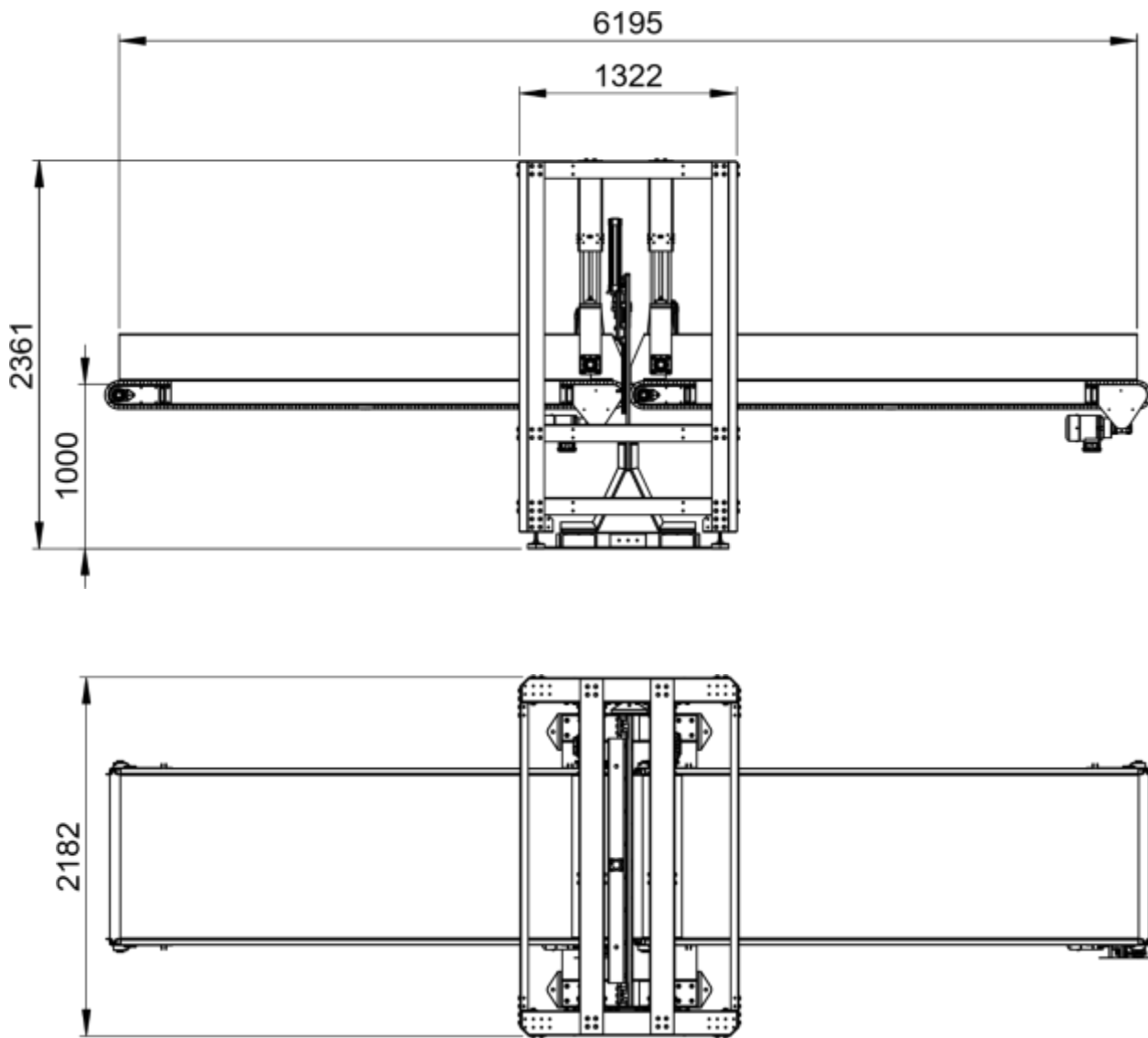
Vaikka leikkauslaitteistoa ei tulla toteuttamaan valmisteilla olevaan linjastokokonaisuuteen, on tämä opinnäytetyön selvitystyö tärkeää. Työn aikana kehitettyjen ja käytännön kokeilla toimiviksi osoitetut muovikalvon kiristämiseen suunnattujen esikiristysrullien toimintaperiaatetta voidaan käyttää vielä paljon kehittyvällä jäte-muovikalvojen kierrätysprosessissa.

LÄHTEET

1. Tiedote 2.12.2019. Head Recycle Systems Oy. Saatavissa: https://headrecyclesystems.com/wp-content/uploads/2020/02/TIEDOTE_2.12.19_Nettiin.pdf. Hakupäivä 13.11.2020.
2. Riihinen, Matias 2021. Kierrätysmuovijätteen syöttölaitteiston suunnittelu. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, konetekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/493343> Hakupäivä 24.3.2021.
3. Opas kierrätyskelpoisen muovipakkauksen suunnitteluun. 2018. Suomen Uusiomuovi Oy. Saatavilla: https://www.uusiomuovi.fi/document.php/1/128/kierratyskelpoinen_muovipakkaus/f78cb0b35cf55535fe79ddd35e04b57e. Hakupäivä 13.11.2020 Hakupäivä 4.11.2020.
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 27.2.2021.
5. Johansson, Laura 2011. Polymeeriraaka-aineen kehitys ekstruusiolla valmistettavaan sovellukseen. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaalitekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/20649> Hakupäivä 2.11.2020.
6. Cutting Primer 76 / 92 / 115 / 132 / 168 / 225. Operating Manual for operating and maintenance personnel. 2009. Perfecta Cutting Systems.
7. Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. painos. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy.
8. Viitala, Jari 2018 – 2019, TK00BP48 Pneumatiikka ja Hydraulikka - Koneautomaation perusteet. Opintojakson luennot keväällä 2018. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikka ja luonnonvara-ala.

9. Tuoteluettelo F3. Kaikki automaattioratkaisut samalta toimijalta. 2020. Valmistajan tuotekatalogi. SMC Pneumatics Finland Oy.
10. Lineaarijohde tarjouspyyntö. 2.11.2020. Laatija Movetec Oy. Tilaaja Head Recycle Systems Oy.
11. Linear Guideways Technical Information. 2019. Valmistajan tuotekatalogi. Hiwin Corporation. Saatavissa: https://www.hiwin.com/pdf/linear_guideways.pdf Hakupäivä 10.11.2020.
12. Results of Friction Coefficient Test 2000. Russ Engineering Group, Inc. Saatavissa: <http://www.aspbase.com/assets/files/testing/Coefficient-Test-of-Static-Friction.pdf> Hakupäivä 28.12.2020.
13. DRN.. Gearmotors (IE3) 2018. Valmistajan tuotekatalogi. SEW Eurodrive. Saatavissa: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/24832936.pdf> Hakupäivä 13.02.2021.
14. Guide units FEN/FENG for ISO cylinders. 2019. Valmistajan tuotekatalogi. Festo. Saatavissa: https://www.festo.com/cat/fi_fi/data/doc_engb/PDF/EN/FEN-FENG_EN.PDF%20 Hakupäivä 14.2.2021.
15. Necto All-In Material Sorting Assistant. 2021. Valmistajan tuote-esite. Head Recycle Systems Oy.
16. Knife Change Instruction 2017. Perfecta Cutting Systems. Saatavissa: <https://www.perfecta.de/userfiles/files/service/en/pMesserWechsel.pdf> Hakupäivä 24.4.2021.

| | | | |
|-----|-----------------|------------|-------------------------------|
| Rev | Muutos / Change | Pvm / Date | Suunnittelija / De- signed |
|-----|-----------------|------------|-------------------------------|



| | | | | |
|--|---------------------------------------|---|---|------------|
| | Massa / Mass 0.00 kg | Tehdään kpl / Quantity manufactured | Suunnittelija / Designed Hiski Heinonen | Pvm / Date |
| | Mittakaava / Scale A4 1:100 | Yleistoleranssi / General tolerances ISO 2768- | Tarkastaja / Checked | Pvm / Date |

| | | |
|--|--|-----|
| | Nimitys / Description Leikkuri_paakoonpano | Rev |
| | Piirustusnumero / Drawing number L10415 | |