

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Kartongin muovipäälllystyskoneen maakaasun käytön
tehostaminen

Optimizing the natural gas usage of the paperboard's
plastic coating machine

Työn tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: DI Tuomo Veteläinen

Lappeenranta 1.1.2020

Teemu Tiittanen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Teemu Tiittanen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: DI Tuomo Veteläinen

Kandidaatintyö 2020

29 sivua, 6 kuvaa ja 3 taulukkoa

Hakusanat: muovipäälylystyskoneet, maakaasu, energiansäästö, kartonki

Tämä kandidaatintyö käsittelee nestepakkauskartongin valmistusta ja erästä energiansäästämahdollisuutta kartongin muovipäälylystyskoneessa. Kandidaatintyö on tehty Stora Enso Oyj:n tarjoamasta aiheesta, jossa tarkoituksena on tutkia, kuinka paljon voidaan vähentää maakaasun kulutusta uusimalla PE3-muovipäälylystyskoneeseen kartongin esikäsittelylaitteisto, joka hyödyntää polttoaineenaan maakaasua. Lisäksi saman koneen osalta tarkastellaan raakakartonkilaadun muutoksen vaikutusta lopputuotteen hintaan, kun uusi raaka-aine vaatii kaksinkertaisen määrän tätä esikäsittelyä. Lisäksi tutkitaan PE5-päälylystyskoneeseen aiemmin tehdyn esikäsittelylaitteiston uusinnan todellista vaikutusta kaasunkulutukseen, ja verrataan tätä lukua investointilaskennoissa saatuun lukuun.

Työn kirjallisuusosassa käydään läpi nestekartongin valmistus esittelemällä sekä raakakartongin valmistus että muovipäälylystys yksikköprosesseineen. Lisäksi esitellään nestepakkauskartongilta vaadittavia ominaisuuksia sekä käytettäviä päälylystemateriaaleja.

Soveltamisosiossa lasketaan PE5:n kartongin esikäsittelylaitteiston kaasunkulutus kolmen kuukauden ajalta, ja verrataan tätä aikaisemman laitteiston kulutukseen, jolloin saadaan energiansäästö laskettua. Säästöksi muodostuu lopulta vain noin 63 % aiemmin esitetystä säästöstä, mikä johtuu investointilaskelmissa tehdyistä liiallisista yksinkertaistuksista. PE3-koneelle lasketaan uuden esikäsittelylaitteiston teknisten ominaisuuksien avulla kaasunkulutus, ja verrataan tätä nykyiseen kulutukseen, jolloin saadaan potentiaalinen energiansäästö uudelle laitteistolle. Energiaa säästetään laskelman mukaan 30% vuodessa, mikä perustuu uuden laitteiston parempaan hyötysuhteeseen. Lisäksi lasketaan PE3:n raaka-aineen (kartongin) muutoksen kustannusvaikutus per neliometri valmistatua tuotetta, mutta tätä lukua ei ole julkaistu tässä kandidaatintyössä.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Kartongin valmistus	6
2.1 Rainanmuodostus	6
2.2 Puristinosa	7
2.3 Kuivatusosa	7
2.4 Kalanteri	8
2.5 Päälystysosa	8
2.6 Kiinnirullain ja pituusleikkuri	8
3 Nestepakkauskartongin valmistus	10
3.1 Päälystettävät materiaalit.....	10
3.2 PE-linjan yksikköprosessit	11
3.2.1 Aukirullaus	11
3.2.2 Esikäsitteily	11
3.2.3 Ekstruuderit	14
3.2.4 Jälkikäsitteily.....	16
3.2.5 Kiinnirullain ja pituusleikkuri	17
4 Liekkikäsitteilyinvestoinnit	19
4.1 PE5-Liekkikäsitteilyinvestoinnin todellinen kannattavuus	19
4.2 PE3-Liekkikäsitteilylaitteiston uusiminen – energialaskelmat	23
4.2.1 Raaka-aineen muutoksen vaikutus kuppikartongin neliöhintaan	25
4.3 Tulosten tarkastelu ja huomiot laskelmista	26
5 Yhteenveto	28
Lähdeluettelo	30

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	m^2
E	energia	J
h_{CO_2}	hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta	€/tCO ₂
h_{NG}	maakaasun hinta	€/MWh
$m_{neliö}$	neliöpaino	g/m ²
p_{NG}	maakaasun päästökerroin	kg/MWh
q_v	tilavuusvirta	m ³ /s
t	aika	s
x	suhde	%

Kreikkalaiset aakkoset

Φ	lämpöteho	W
σ	pinta-energia	J/m ²

Lyhenteet

EVOH	etyylivinyylialkoholi (ethylene vinyl alcohol)
HDPE	korkeatiheksinen polyeteeni (high-density polyethylene)
LDPE	matalatiheksinen polyeteeni (low-density polyethylene)
MDPE	keskitiheksinen polyeteeni (medium-density polyethylene)
NG	maakaasu (natural gas)
PE	polyeteeni (polyethylene)
PET	polyetyleenitereftalaatti (polyethylene terephthalate)

1 JOHDANTO

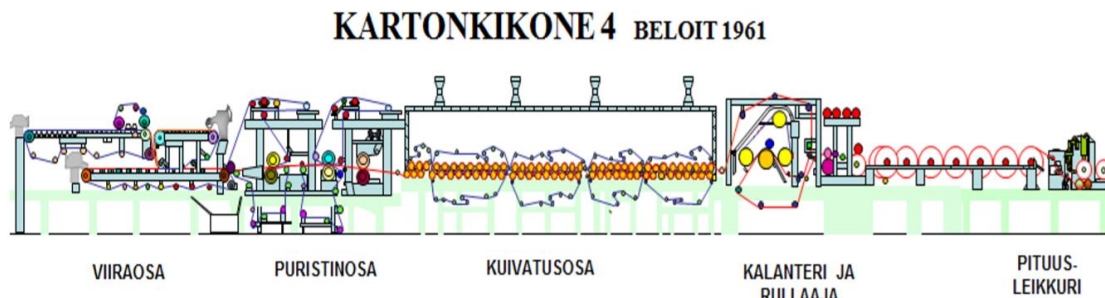
Tämä kandidaatintyö tehtiin Stora Enso Oyj Imatran tehtaille heidän tarjoamastaan hyvin ajankohtaisesta aiheesta, joka käsittelee kartongin muovipäälystyskoneiden energiansäästöä. Stora Enson Imatran tehtaat ovat Stora Enson suurin tehdas ja Suomen suurin kartongin tuottaja. Energiatehokkuus ja vähäpäästöisyys ovat Stora Ensolle tärkeitä arvoja, jonka takia he haluavatkin optimoida nykyistä energiankulutustaan, ja uusia vanhanaikaisia ja huonon hyötysuhteen omaavia laitteita. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon Päälystystehtaan energiankulutusta saadaan pienennettyä uusimmalla PE3-muovipäälystyskoneeseen kartongin esikäsittelylaitteisto, joka hyödyntää polttoaineenaan maakaasua.

Työn päätavoite on siis laskea riittävällä tarkkuudella maakaasun kulutuksen vähenemisestä aiheutuva energiansäästö PE3-päälystyskoneelle. Sivutavoitteita työssä on lisäksi kaksi, joista ensimmäisessä on tarkoitus selvittää PE5-muovipäälystyskoneen vastaavan energiansäästölaskelman onnistuminen, kun vertaillaan investointiesityksessä esiteltyjä maakaasun kulutuslukuja ja nykyisiä virtausmittaukseen perustuvia lukuja. Toisessa sivutavoitteessa taas tarkastellaan PE3-päälystyskoneen raakakartonkilajin muutoksen vaikutusta lopputuotteen hintaan, kun uusi raaka-aine vaatii kaksinkertaisen määrän liekkikäsittelyä. Tämä jälkimmäinen tarkastelu tehdään siten, että liekkikäsittelylaitteisto olisi jo vaihdettu uuteen.

Työn teoriaosassa käydään läpi nestekartongin valmistus siten, että toisessa luvussa kerrotaan raakakartongin valmistus yksikköprosesseineen ja kolmannessa luvussa keskitytään muovipäälystysprosesseihin. Lisäksi kolmannessa luvussa on esitelty nestepakkaus-kartongilta vaadittavia ominaisuuksia sekä siinä käytettäviä päälystemateriaaleja. Teoriaosio perustuu kokonaisuudessaan kirjallisuuslähteisiin sekä osittain Stora Enson sisäisiin lähteisiin. Neljännessä luvussa vastataan työn tavoitteisiin sekä pohditaan tulosten järkevyyttä. Viidennessä luvussa tehdään yhteenveto tästä kandidaatintyöstä kokonaisuudessaan.

2 KARTONGIN VALMISTUS

Tässä luvussa esitellään lyhyesti kartonkikoneen rakenne ja toiminta. Kartonkikoneen toiminta on hyvin lähellä paperikoneen toimintaa, mutta kartonki on usein monikerroksista ja sen neliömassa on yleensä suurempi kuin paperilla. Tekstissä käsitellään yleisesti kartonkikonetta, koska kartonkikoneet voivat olla keskenään hyvinkin erilaisia riippuen tuotettavasta kartonkilaadusta. Esimerkiksi Stora Enson Imatran tehtailla valmistettavaa nestepakkauskartonkiakin tehdään yksi- ja monikerroksisena sellukartonkina, mutta myös monikerroskartonkina, missä keskimäinen runkokerros on valmistettu kemimekaanisesta massasta (Stora Enson sisäinen lähde). Tekstissä ei käsitellä sellun valmistusta eikä kemimekaanisen tai mekaanisen massan valmistusta. Kuvassa 1 on esitelty esimerkkinä Stora Enson Imatran tehtaiden kartonkikone 4 (KA4). Kartonkikoneen tärkeimmät prosessin osat ovat rainanmuodostus, puristinosa ja kuivatusosa. Ensimmäinen osa, rainanmuodostus, voidaan jakaa perälaatikkoon, perälaatikon syöttöputkiin ja viiraosaan. Perälaatikoita voi siis olla useita, riippuen kartongin kerroksien määrästä. Toinen osa on puristinosa ja kolmantena on kuivatusosa. Kuvassa näkyvät myös kalanteri, rullaaaja sekä pituusleikkuri. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 131-137; Knowpap 2011.)



Kuva 1. Kartonkikone 4:n rakenne (Stora Enson sisäinen lähde).

2.1 Rainanmuodostus

Kartonkikoneen rainanmuodostusosa voidaan jakaa perälaatikkoon, perälaatikon syöttöputkistoon sekä viiraosaan. Ennen perälaatikolle syöttöä kartonkimassaa jauhetaan jauhimissa ja sekoitetaan sekoittimissa kartonkitehtaan jauhatusosastolla. Jos kartonki on monikerroksista, on kartonkikoneessa jokaisella kerrokselle oma rainanmuodostusosansa.

Kartonkiraina muodostuu massan, veden ja lisä- sekä täyteaineiden massasuspensiosta eli kuitusulpusta. Sulppu pumpataan perälaatikosta sopivan sakeuksisena ja levyisenä suihkuna viiran päälle, jossa massa on vielä melkein kokonaan vettä. Viiraosalla tästä sulpusta aloitetaan poistamaan vettä suotauttamalla, jonka jälkeen erikseen muodostetut rainat yhdistetään päällekkäin yhdeksi rainaksi.

Viiraosia on olemassa monenlaisia, mutta vedenpoisto voidaan jakaa pääasiassa kahteen tapaukseen, joista ensimmäinen on niin sanottu tasoviirakone, jossa vedenpoisto tapahtuu imun ja painovoiman avulla vaakasuoran viiran alapuolelta Fourdrinier-menetelmällä. Toinen tapaus on kaksiviiramenetelmä, jossa paperiraina kulkee kahden viiran välissä, jolloin siitä voidaan poistaa vettä sekä ylä- että alapinnalta samanaikaisesti. Tämän ansiosta vedenpoisto on nelinkertainen tasoviirakoneeseen verrattuna ja koska massa ei pääse sekoittumaan ilman kanssa suotautuksen aikana, kartongin laatu paranee. Suotautus on siis vedenpoistoa massasta sihtinä toimivan viiran läpi imemällä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 131-137; Knowpap 2011; Paulapuro et al. 2007, 248-277.)

2.2 Puristinosa

Viiraosalta kartonkiraina ohjataan puristinosalalle, jossa kartongin kuivaaminen jatkuu. Rainaa puristetaan joko telan ja puristinhuovan muodostamassa tai kahden puristinhuovan muodostamassa nipissä. Nipissä raina tiivistyy ja osa vedestä poistuu huopaan, josta se imetään viiraosan tavoin alipainetta käyttävillä vedenpoistoelementeillä. Puristinhuovan tarkoituksena on lisäksi tukea rainaa, kuljettaa se ilman katkoa kuivatusosalle ja suojata sitä painevaihteluiden aiheuttamilta puristusvaurioilta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 155-156; Knowpap 2011.)

2.3 Kuivatusosa

Kuivatusosa on kartonkikoneen viimeinen osa, jonka tarkoituksena on kuivata rainaa. Kuivatukseseen käytettävät menetelmät ovat yleisesti sylinterikuivatus, puhalluskuivatus ja säteilykuivatus. Raina kulkee kuivatusviiran päällä, jonka tarkoitus on tukea rainaa ja kuljettaa se läpi kuivatusosan. Sylinterikuivatuksessa raina kulkee kuumien sylintereiden pinnalla, jolloin lämpö haihduttaa vettä pois kartonkiradasta. Sylinterit lämmitetään yleensä sellutehtaan soodakattilalaitoksella tuotetulla prosessihöyryllä. Rainasta poistuva vesi viedään ilman ja kuivatusviiran avulla pois radasta.

Kuivatusosa on yleensä jaettu kahteen osaan, jotka ovat etu- ja jälkikuivatusosa ja joiden välissä on yleisesti pintaliimauspuristin. Puristintyyppisiä on paljon erilaisia, mutta kaikissa liimalla on tarkoituksena parantaa kartongin jäykkyyttä, pölyämättömyyttä, absorptio-ominaisuuksia ja etenkin pintalujuutta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 163-180; Knowpap 2011; Karlsson et al. 2010, 19.)

2.4 Kalanteri

Kuivatusosan jälkeen kartonkikoneessa voi olla kalanteri, jossa muokataan kartongin paksuutta, karheutta ja kiiltoa. Kalanterointi tapahtuu puristamalla rataa kahden tai useamman telan välissä, ja saatu lopputulos riippuu nippipaineesta, kosteudesta, lämpötilasta ja telojen kovuudesta. Kalanterointi heikentää kartongin lujuusominaisuuksia, joten haluttujen pinnan ominaisuuksien ja lujuuden välillä on tehtävä kompromisseja. Kalanteri voi olla joko osana kartonkikonetta tai kokonaan erillinen off-machine kalanteri. (Knowpap 2011; Rautiainen et al. 2009, 35-42.)

2.5 Päällystysosa

Päällystysosasta puhuttaessa tarkoitetaan kartonkikoneen yhteydessä olevaa pigmenttipäällystysasemaa, jossa kartongin toinen tai molemmat puolet päällystetään päällystyspastalla. Loppukäytöstä riippuen päällystys voidaan tehdä kartongille yhdestä kolmeen kertaan. Päällystys voidaan toteuttaa myös erillisenä päällystyskoneena (off-machine) tai kokonaan erillisessä päällystystehtaassa, jolloin päällystysten laatu ja tehokkuus ovat yleensä korkeampia tehtaan erikoistuessa vain päällystykseen. Tärkeimmät päällystysmenetelmät ovat teräpäällystys, filmipäällystys ja kosketuksettomat päällystysmenetelmät. Kaikilla pigmenttipäällystysmenetelmillä on tarkoitus tasata kartongin pinnanmuotoja ja saada tuotteesta painojäljeltään ja ulkonäöltään laadukkaampi. Jos kartonkikone sisältää päällystysosan, on se kuivatusosan ja kalanterin välissä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 184-203; Knowpap 2011.)

2.6 Kiinnirullain ja pituusleikkuri

Kiinnirullain rullaa valmiin kartongin tampuuriraudan ympärille, ja kun rullan halkaisija on halutun kokoinen, ohjataan kartonkirata toiselle raudalle. Valmista konerullaa kutsutaan tampuuriksi ja se voi painaa jopa 160 000 kg, sen halkaisija voi olla 5 metriä ja leveys

jopa 11 metriä. Rullainta kutsutaan usein myös popeksi, joka on yleisin käytössä oleva rullaintyyppi. Rullaimella syntyy paljon materiaalihäviöitä, perinteisellä pope-rullaimella hylkymäärä voi olla jopa 18%. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 220-228; Rautiainen et. al 2009, 192, 208-209.)

Pituusleikkurilla tampuuri rullataan tampuuriraudalta halkaisijaltaan pienemmille hyllyille, ja rulla leikataan samalla leveys suunnassa moneen osaan. Yhdestä konerullasta voi tulla useampia muuttoja eli rullasarjoja, jolloin rullan pituus muuttuu, josta tulee nimi pituusleikkuri. Pituusleikkurilta lähteviä rullia kutsutaan asiakasrulliksi ja ne pakataan pituusleikkurin jälkeen pakkaamossa kääreeseen ennen asiakkaalle lähetystä. Rullia voidaan myös jatkojalostaa kartonkitehtaan ulkopuolella ennen asiakkaalle toimitusta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 230-236, 242; Rautiainen et. al 2009, 230.)

3 NESTEPAKKAUSKARTONGIN VALMISTUS

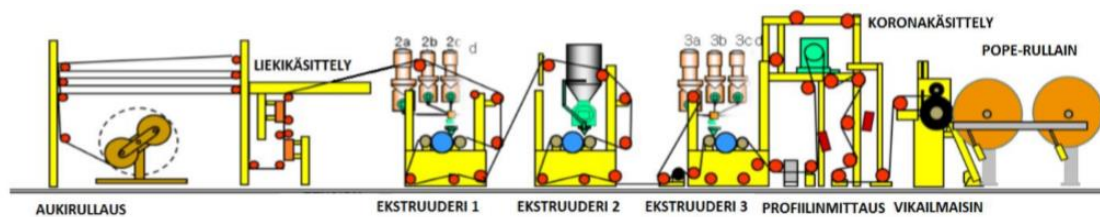
Kartonki ei itsessään sovellu nestepakkauksiin, vaan sitä tulee jalostaa erilaisilla barriäreillä eli estokerroksilla jotta kartonki kykenee täyttämään käyttötarkoituksensa asettamat laatuvaatimukset. Yleisin käytetty jalostusmenetelmä nestepakkaukskartongille on matalatiheyksisen polyeteenimuovin (LDPE) ekstruusiopäällystys raakakartongin pintaan. Tällä muovipäällystyksellä saadaan aikaan pakkaus, jolla on hyvät kosteus- ja rasvabarriäärit sekä hyvä kaasutiiveys. Lisäksi pakkaukselta vaaditaan hyvät kuumasauhausominaisuudet ja mikrobien, hajujen ja makujen hyvää eristyskykyä. Jotta tähän voidaan päätyä, on muovin oltava kemiallisesti erittäin puhdasta. Myös pohjakartongin sekä tuotantolinjojen on täytettävä tarkat elintarvikekriteerit puhtauden osalta. Yleisimpiä nestepakkauksia ovat tuoremehu ja viinipakkaukset sekä maitotölkit. Nämä nestepakkaukset jakautuvatkin kahteen osaan, jotka ovat pitkän hyllyiän tuotteet ja pastöroidut maitotuotteet. (Karhuketo et. al 2004, 23-24, 67-73; Kuusipalo et. al 2008, 159-160.)

3.1 Päällystettävät materiaalit

LDPE:n lisäksi päällystykseen käytetään myös muun muassa keskitiheyksistä polyeteeniä (MDPE), korkeatiheyksistä polyeteeniä (HDPE), polyetyleenitereftalaattia (PET) ja etyyliivinyylialkoholia (EVOH). Polyeteeni (PE) on ylivoimaisesti yleisin käytettävä muovi yli 80%:n osuudella, josta suurin osa on LDPE:tä. LDPE:n barriääri on polyeteeneistä heikoin (tiheyden kasvaessa barriääri paranee), mutta sen käyttö on suosituinta sen helpon ajettavuuden takia. Polyeteenin verrattain heikon aromi- ja kaasutiiveyden takia pitkän hyllyiän tuotteissa (esim. tuoremehut) on jouduttu käyttämään ohutta alumiinikalvoa muovin alla. Kun alumiinista on haluttu eroon sen ympäristövaikutusten vuoksi, on se korvattu hyvän barriäärin omaavalla EVOH-muovilla. EVOH-muovin heikkouksina voidaan pitää kaasutiiveyden menettämistä nestekosketuksessa sekä sen heikkoa tarttuvuutta polyeteeniin. EVOH-muovi tulee siis päällystää PE-muovilla, mutta heikon tarttuvuuden takia näiden väliin tulee lisätä liimapolymeeriä. PET-muovia käytetään, kun pakkaukselta odotetaan normaalia parempaa lämmönkestoa. PET-muovilla päällystetystä kartongista tehdään mm. uuninkestäviä valmisruokavuokia. Nykyään päällystettävät muovit voivat olla myös biopohjaisia. (Karhuketo et. al 2004, 67-73; Kuusipalo et. al 2008, 138-157.)

3.2 PE-linjan yksikköprosessit

Kuvassa 2 on esitelty muovipäälylystyskonelinja yksikköprosesseineen, ja esimerkkinä toimii Stora Enson PE3-kone. Konelinja koostuu rullan raaka-ainevirran tulo-suunnasta lähtien aukirullauspukista, esikäsitteystä (liekkikäsitteily), ekstruudereista, profiilinmittauslaitteistosta, jälkkikäsitteilyästä (koronakäsittely), profiilinmittauksesta, vianilmaisimista ja kiinnirullaimesta.



Kuva 2. PE-linjan yksikköprosessit (PE3) (Stora Enson sisäinen lähde).

3.2.1 Aukirullaus

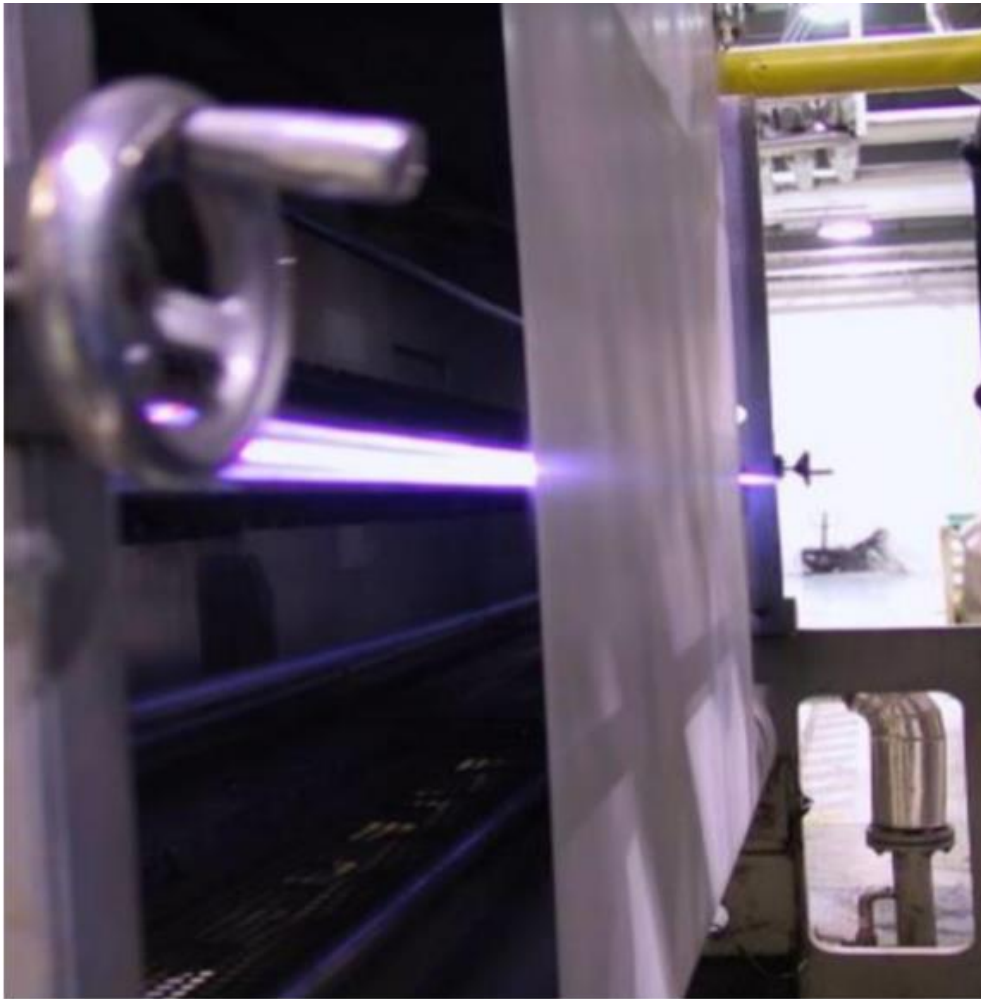
Muovipäälylystykoneelle raaka-ainekartonkirullat syötetään aukirullauspukin kautta. Aukirullauspukki on rakenteeltaan monimutkainen laite, jonka vastuulla on suuri osa päälylystyskoneen tasaisesta käynnistä. Aukirullauspukin tehtäviin kuuluu muun muassa radan keskittäminen ja rullan purkaminen hallitusti, radan jännityksen ylläpitäminen (vaikka radan nopeus tai rullan halkaisija, leveys tai pituus muuttuisi) sekä rullan vaihdon mahdollistaminen konetta pysäyttämättä tai vauhtia hiljentämättä. Rullan vaihto vauhdissa edellyttää aukirullauspukilta nk. 'lentäväliitos' -laitetta, jolla saadaan uusi ja vanha rulla liitettyä toisiinsa kiinni sekä katkaistua vanha rata. Toinen yleinen tapa rullien liittämiseen on päittäisliitos, jolloin aukirullauspukki eroaa teknisesti 'lentäväliitos' -mallista. Liitos tapahtuu yleensä nipissä kaksipuoleisen teipin avulla. (Karhuketo et. al 2004, 30-31.)

3.2.2 Esikäsitteily

Raakakartongin pinta tulee esikäsitellä, jotta muovi saadaan tarttumaan riittävän hyvin kartongin pintaan. Ilman esikäsitteilyä kartongin ja muovin välinen adheesio eli pintojen keskinäinen tarrautuminen ei ole riittävä. Jotta adheesiosta saataisiin riittävä, nostetaan

kartongin pintaenergiaa esikäsitteilyllä. Yleisin esikäsitteilymuoto on liekkikäsitteily. Liekkikäsitteilyssä kartonkirata kulkee neste- tai maakaasuliekin läpi, joka ei kuitenkaan sytytä rataa suuren ratanopeuden ansiosta. Liekki polttaa pölyä ja roskaa kartongin pinnasta, polttaa pinnan epätasaisuuksia (mm. kuitupiikit), hapettaa radan pintaa, höyrystää pintaan absorboituneen kosteuden ja lisäksi myös lämmittää rataa. Hapettaminen nostaa radan pintaenergiaa, jolloin adheesio paranee. (Karhuketo et. al 2004, 36-38; Kuusipalo et. al 2008, 42-45.)

Liekkikäsitteilylaitteisto koostuu ilman ja neste- tai maakaasun sekoituslaitteistosta ja koko radan levyisestä suuttimesta, josta liekki syötetään rataan. Olennaista on, että sekoituslaitteistoon syötetään ylimääräistä ilmaa, jotta liekistä saadaan hapettava. Liekki hapettaa kartongin pintaa, kun kuitujen ulkopinta reagoi korkeassa lämpötilassa hapen kanssa ja täten kartongin pintaenergia nousee. Pintaenergiaa voidaan käyttää kuvaamaan päällystettävän pinnan kastuvuutta, ja kun pintaenergia on riittävän suuri, päällyste kastelee kartongin pinnan. Kastelun jälkeen adheesio määrää pintojen kemialliset ja fyysiset ominaisuudet, joiden myötä pintojen välille voi syntyä erilaisia ja eri vahvuisia sidoksia. Laitteisto sisältää paljon automatiikkaa tehokkaan ja turvallisen prosessin ylläpitämiseksi. Automaatio sytyttää ja katkaisee liekin riittävällä ratanopeudella, jottei liekki aiheuta palovaaraa. Sen on myös kyettävä katkaisemaan kaasunsyöttö äkillisissä häiriötilanteissa. Nykyaikaisissa liekkikäsitteilylaitteistoissa liekin teho säätyy ratanopeuden mukaan ja myös liekki kapenee radan kaventuessa, jolloin laitteiston hyötysuhde paranee. Kuvassa 3 on esitelty kartongin liekkikäsitteily. Käsitteilytehoon vaikuttavat ilman ja kaasun suhde, seoksen massavirta, liekin etäisyys radasta sekä radan nopeus. (Karhuketo et. al 2004, 36-38; Kuusipalo et. al 2008, 42-45.)



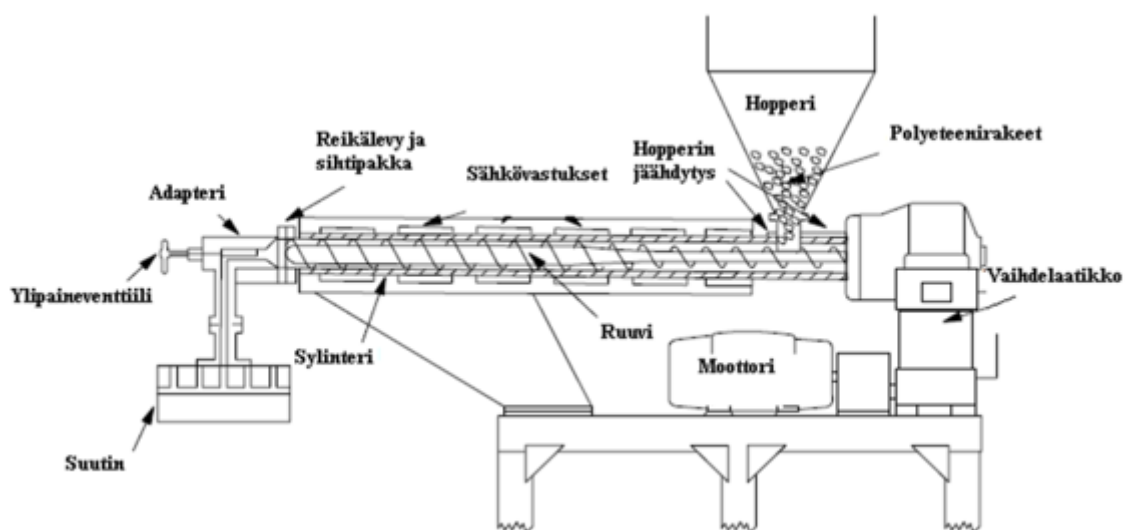
Kuva 3. Kartongin liekkikäsitteilylaitteisto (Stora Enson sisäinen lähde)

Muita ekstruusiopäällystyksessä käytettäviä esikäsitteilytapoja ovat mm. otsonointi, primerointi ja plasmakäsittely. Ne ovat kuitenkin korkean hintansa takia harvinaisempia, ja niitä käytetään yleisesti vain, kun liekkikäsitteilymenetelmällä ei päästä riittävään adheesioon. Plasmakäsittely on lisäksi vasta tutkinta-asteella. Näiden lisäksi sähkökoronaa voidaan myös käyttää esikäsitteilymenetelmänä, mutta se on tässä kandidaatintyössä esitelty tarkemmin vain jälkikäsitteilymenetelmänä, sillä se aiheuttaa haju- ja makuhaittoja käytettäessä sitä esikäsitteilyyn, jonka takia se ei sovellu elintarvikepakkauksiin. (Karhuketo et. al 2004, 36-38; Kuusipalo et. al 2008, 42-49.)

3.2.3 Ekstruuderi

Ekstruusiopäällystyksessä tarkoitus on pursottaa sulatettua muovia tasaiseksi kerrokseksi kartongin pinnalle. Tämä pursotus toteutetaan ekstruuderilla, joka on yksinkertaistettuna pitkä putki, jonka sisällä on pyörivä ruuvi. Ekstruusiopäällystyksessä käytettävät päällystemuovit ovat huoneenlämmössä kiinteitä rakeita, granulaatteja. Granulaatit annostellaan ekstruuderiin, jossa ne sulavat homogeeniseksi massaksi, josta massa ohjataan rakosuuttimeen. Suuttimesta paineen vaikutuksesta pursuava massa muodostaa filmin, joka venytetään nopeasti 10-50 kertaa ohuemmaksi, jonka jälkeen se kastelee radan pinnan. Rata ohjataan kumisen puristustelan ja suuren metallisen jäähdytystelan muodostamaan nippiin, jossa sula filmi jähmettyy kartongin pintaan kiinteäksi kalvoksi. (Karhuketo et. al 2004, 47-52; Kuusipalo et. al 2008, 108-110.)

Ekstruuderin rakenne on esitetty kuvassa 4 ja se koostuu ruuvista ja putkesta, hopperista, moottorista ja vaihteesta, reikälevystä ja sihtipakasta, jäähdytysyksiköistä, lämmitysvastuksista, adapterista, vastapaineventtiilistä sekä suuttimesta. Samaan adapteriin voi kiinnittää useampikin ekstruuderi, jolloin puhutaan koekstruusiosta. Koekstruusiolla on lukemattomia hyötyjä mm. voidaan päällystää monia eri muovilaatuja päällekkäin (esim. EVOH, PE ja liimapolymeeri), voidaan käyttää osassa ruuveista kierrätettyä muovia kustannusten pienentämiseksi sekä voidaan käyttää osassa ruuveissa värillistä muovia lopputuotteen värjäämiseksi. (Karhuketo et. al 2004, 47-52; Kuusipalo et. al 2008, 108-110, 114-116.)



Kuva 4. Ekstruuderin rakenne (Kuusipalo et. al 2008, 109)

Muovirakeet eli granulaatit syötetään ekstruuderiin hopperin kautta. Hopperin eli granulaattisuppilon tehtävänä on syöttää rakeita tasaiseen tahtiin ekstruuderin syöttövyöhykkeelle. Rakeita voidaan syöttää ruuviin joko volymetrisesti tai gravimetrisesti eli joko tilavuuteen perustuvalla tai punnitukseen perustuvalla annostelulla. Molemmissa tapauksissa muovin määrä riippuu syöttölaitteen nopeudesta. (Karhuketo et. al 2004, 49; Kuusipalo et. al 2008, 108-110.)

Ekstruuderissa granulaatit saadaan sulamaan pääasiassa ruuvin hitaan pyörimisen aiheuttaman kitkan ja paineen avulla, mutta sulamisen tehostukseksi koko ekstruuderiputki ja suutinelementti on ympäröity sähkövastuksilla. Ekstruuderin lämpötila pyritään pitämään 250-330 celciusasteessa, jossa tavallisimmat käytettävät muovilaadut sulavat. Ekstruuderin ruuvi sisältää yleensä kolme eri vyöhykettä, jotka ovat syöttövyöhyke, puristusvyöhyke ja homogenisointivyöhyke. Syöttövyöhyke on ruuvin ensimmäinen osa, johon kiinteät granulaatit ohjataan ja jossa niiden sulaminen alkaa. Syöttövyöhykkeen kohdalla ruuvin kierreosa on kapeimmillaan, joka mahdollistaa kiinteiden rakeiden kuljettamiseen tarvittavan tilan. Ruuvin kierre paksuneee ruuvin loppupäähän päin mentäessä, joka vähentää vapaata tilaa. Tämä aiheuttaa sen, että ruuvin ja granulaattien sekä granulaattien toisiinsa aiheuttamat kitkavoimat sulattavat granulaatit. Puristusvyöhykkeessä rakeita erityisesti puristetaan, mutta myös sulatetaan ja sekoitetaan. Kun rakeita puristetaan ja tila vähenee, karkaa rakeiden seassa oleva ilma pois syöttöpään kautta ja muovimassan paine kasvaa. Puristusvyöhykkeestä rakeet ja massa jatkavat homogenisointivyöhykkeeseen, jossa kiinteät ja sulat granulaatit pyritään homogenoimaan yhtenäiseksi ja tasalämpöiseksi massaksi sekoittamalla ja sulattamalla seosta edelleen. Homogenisointivyöhyke voi olla tiettyissä ruuveissa jaettu kahteen osaan, joiden välissä on erillinen sekoitusvyöhyke. Viimeistään toisessa homogenisointivyöhykkeessä massan tulee olla täysin sulaa ja homogeenistä. Homogenisointivyöhykkeellä ruuvin kierteen paksuus ei enää kasva vaan säilyy vakiona, joten myös paine pysyy melko vakiona. Homogenisointivyöhykkeeltä sula etenee sihtipakkaan, jossa on kahdesta viiteen eri tiheyksisiä sihtiverkkoja, joilla suodatetaan muovin sekaan joutuneet epäpuhtaudet, kuten metallinsirut pois muovisulasta. Lisäksi sihtipakka toimii yhdessä vastapaineventtiilin kanssa ruuvin tarvitseman vastapaineen aiheuttajana. Vastapaineventtiilistä voidaan lisätä painetta entisestään, jolloin homogenisointi paranee kitkalämmön suuretessa. (Karhuketo et. al 2004, 47-50; Kuusipalo et. al 2008, 108-110.)

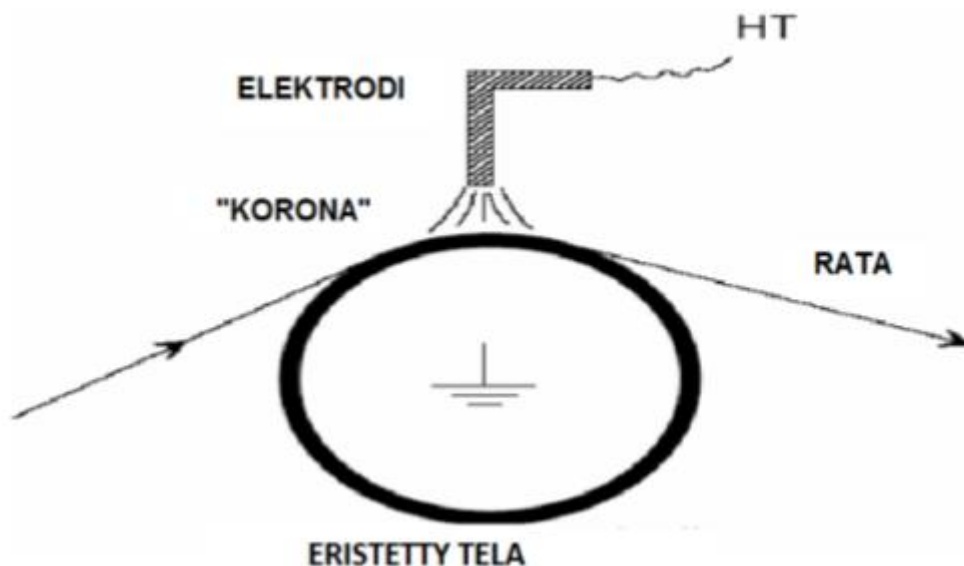
Sihtipakalta sula jatkaa matkaansa adapterille, josta mahdollisimman lyhyttä syöttöputkea pitkin rakosuuttimeen, joka levittää sulan muovin koko radan levyiseksi ohueksi filmiksi. Suuttimen on oltava tasalämpöinen ja virtauskanavien oltava kunnossa sekä huu-liraon oltava säädetty oikein, jotta filmistä voidaan saada täysin homogeeninen ja päällystystapahtuman laadusta täten hyvä. Suuttimen ja radan välillä on oltava riittävän suuri ilmarako, jotta muovi ehtii hapettua riittävästi hyvän adheesio- syntymiseksi. Ilmaraon lisäksi kriittisiä tekijöitä ovat filmin hapettumisaika ja muovin lämpötila, mitkä kaikki riippuvat toisistaan. (Karhuketo et. al 2004, 47-51; Kuusipalo et. al 2008, 108-110.)

Suuttimesta valuva muovifilmi putoaa kumisen puristintelan ja jäähdystystelan muodosta- maan nippiin eli laminaattoriin. Jäähdystystela on suuri metallinen tela, joka on jäähdystetty eräänlaisella spiraalirakenteella. Jäähdystystelan lämpötila on tavallista polyeteeniä päällystessä lähellä ilman kastepistettä, kuitenkin turvallisesti sen yli. Jäähdystystelan tärkein tehtävä on kiinteyttää ja jäähdystää sula muovi. Jäähdystystelan pinnalla voidaan myös määrittää lopputuotteen ulkonäköä, kiiltävällä pinnalla saadaan kiiltävä muovi ja niin edelleen. Myös puristintela on jäähdystetty, jottei kumi pääsisi pehmenemään liikaa. Pu- ristintela voi olla myös esimerkiksi teflonpäällystetty. (Karhuketo et. al 2004, 50-52; Kuusipalo et. al 2008, 111-113.)

3.2.4 Jälkikäsitely

Muovipäällystetty kartonki tulee usein jälkikäsitellä mahdollisten painatusten, liimausten tai lakkausten mahdollistamiseksi. Jälkikäsitely toteutetaan yleensä sähkökoronakäsittelyllä, jota voidaan käyttää myös esikäsitelyyn vastaavasti kuin liekkikäsitelyä. Näillä kahdella käsittelyllä saadaankin varsin samankaltaiset vaikutukset, huolimatta prosessien erilaisuudesta. Jälkikäsitelyssä on myös tarkoitus nostaa käsiteltävän pinnan pintaener- giaa, jotta esim. maitotölkkiin painatettavat tekstit tarttuisivat muoviin. Sähkökorona koostuu korkeajännitemuuntajasta, suurtaajuusgeneraattorista, käsittelyasemasta ja ot- soni-imurista ja sen rakenne on esitelty kuvassa 5. Laitteiston tarkoituksena on synnyttää suuritaajuinen (10-30 kHz) ja suurjännitteinen (10-30 kV) sähkövirta mahdollisimman ly- hyttä syöttökaapelia pitkin käsittelyasemalle, jossa tapahtuu koronapurkaus kartonkira- dan läpi. Rata johdetaan koronatelan ympäri, jonka yläpuolella on kahdesta neljään ko- ronapurkauksia aiheuttavia elektrodeja noin 1-3 mm etäisyydellä radasta. Joko telan tai elektrodien on oltava eristettyjä tasaisen purkauksen synnyttämiseksi. Koronapurkaus

syntyy elektrodien ja radan välissä olevaan ilmarakoon, ja sen voimakkuus on suoraan verrannollinen sähkövirran suuruuteen. Myös ilmaraon koolla, elektrodien muodolla ja lukumäärällä on vaikutusta käsittelyn tehoon. Koronakäsittelyn voimakkuutta testataan konelinjoilla ja laboratorioissa koronaliuksella tai visking-tusseilla, joilla voidaan määrittää päällystetyn kartongin pintajännitys. Koronakäsittelyn pinnan pintaenergia laskee ajan kuluessa, joten se tulee huomioida käsittelyä tehtäessä. Tämän takia koronataso nostetaan tuotannossa yleensä tasolle 42-48 dyn/cm, vaikka jatkojalostuksessa tarvittava alaraja on noin 36 dyn/cm. Jos koronataso on liian alhainen, testiliuos ei kykeneen kastelemaan pintaa, vaan kuroutuu pisaroiksi näytekappaleen pinnalle. (Karhuketo et. al 2004, 36-38; Kuusipalo et. al 2008, 42-47.)



Kuva 5. Sähkökoronakäsittelyn rakenne (Stora Enson sisäinen lähde)

3.2.5 Kiinnirullain ja pituusleikkuri

Myös muovipäällystyslinja sisältää kiinnirullaimen, ja sen periaate on sama kuin kartonkikoneella. Päällystyskoneella on mahdollista poistaa syntyvä reunahylky eli reunanauha jo ennen rullainta tai tehdä se vaihtoehtoisesti pituusleikkurilla. Rullainyksikkö rullaa valmiin muovipäällystetyn kartongin sopivalla kireydellä niin, että löysiä kohtia ja muita virheitä syntyisi mahdollisimman vähän. Rullaus tapahtuu myös päällystyskoneissa useimmiten pope-rullaimella, mutta uusissa koneissa on käytetty myös keskiövetoisia rul-

laimia. Osa pienistä päällystyskoneista rullaa valmiin päällystetyn kartongin suoraan hylsyn päälle, jolloin tampuurirautaa ei käytetä. Pope-rullaajassa rata tulee suuren pope-telanteli, jota vasten tampuurirautaa/hylsyä painetaan kuormitusvarsilla samalla, kun rata kelaautuu raudan/hylsyn ympärille. Rautaan/hylsyyn ei synny lainkaan vetoa, vaan kelaava voima välittyy pope-telasta. Kuormitusvarsien puristusvoimaa säätämällä voidaan vaikuttaa rullan kireyteen ja kovuuteen. Tyhjä rauta tai hylsy voidaan nostaa pope-telanteli odottamaan vuoroaan. Kun rullan halkaisija on halutun kokoinen, painetaan uusi rauta/hylsy pope-telaa vasten ja katkaistaan rata keinokuitunaruun avulla. Keinokuitunaru alkaa pyörimään uuden raudan/hylsyn ympäri ja vetää radan mukanaan tälle. Täysi rulla päästetään vapaaksi ja se siirretään automaattisia kiskoja myöten tai nosturilla pituusleikkurille. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 220-228; Karhuketo et. al 2004, 31-32; Rautiainen et. al 2009, 192, 208-209.)

Myös pituusleikkuri toimii kuten kartonkitehtaalla, mutta sillä on muutamia lisätehtäviä muovipäällystyksessä. Rullat leikataan vastaavasti pituus ja leveys suunnassa kuin kartonkikoneellakin, mutta näiden lisäksi vikojen merkkauksella ja poistolla on suuri rooli jalostuskoneen pituusleikkurilla. Jos vikoja on paljon ja niiden poistaminen tai merkkauksella vie kohtuuttomasti aikaa vaarantaen päällystyskoneen tuotantonopeutta, voidaan rullat myydä sekundalaatuna tai tehdä vikojen poistot erillisellä tohtorikoneella tai uudelleenrullaimella. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 230-236, 242; Karhuketo et. al 2004, 56; Rautiainen et. al 2009, 230.)

4 LIEKKIKÄSITTELYINVESTOINNIT

Tässä työssä tutkitaan Stora Enson Imatran tehtaille PE5-päällystyskoneelle tehtyä liekkikäsitteilylaitteiston uusintainvestointia sekä tehdään energiansäästölaskelmat PE3-koneelle vastaavan laitteiston uusinnasta. Työssä keskitytään investointien osalta maakaasun kulutuksen pienenemisestä johtuvaan energiansäästöön ja sitä kautta tapahtuvaan hiilidioksidipäästöjen pienenemiseen. Näiden kulutusmuutoksien ansiosta kertyy vuosittain suuria säästöjä liekkikäsitteilylaitteiston hyödyntämän polttoaineen ollessa verrattain kallista (23,67 €/MWh keskiarvohinta vuonna 2019 (Energiavirasto 2019a)) ja myös, koska hiilidioksidipäästöistä tulee maksaa päästökaupan myötä (24,71 €/tCO₂ keskiarvohinta vuonna 2019 (Energiavirasto 2019b)). Työn tarkoituksena on tarkastella aiemmin tehdyn energiainvestoinnin todellista kannattavuutta, tehdä uudet energiansäästölaskelmat vastaavan laitteiston uusinnasta PE3-päällystyskoneeseen ja lisäksi tarkastella päällystyskoneen raakakartonkilajin muutoksen vaikutusta lopputuotteen hintaan, kun uusi raaka-aine vaatii kaksinkertaisen määrän liekkikäsitteilyä.

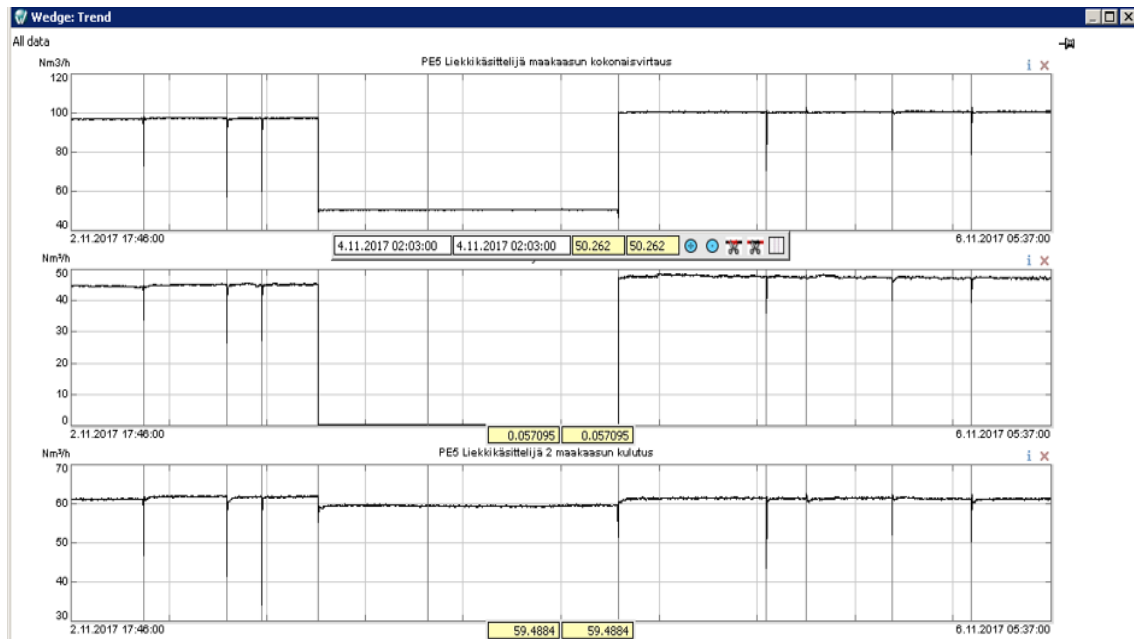
4.1 PE5-Liekkikäsitteilyinvestoinnin todellinen kannattavuus

Investoinnin onnistumista on tässä työssä tarkasteltu pelkästään maakaasun kulutuksen osalta, eli esimerkiksi kunnossapito- ja rakennusvaiheen kuluja ei ole huomioitu. Uuden liekkikäsitteilylaitteiston pienempi maakaasunkulutus perustuu ratanopeuden mukaan säätyvään käsittelytehoon ja rataleveyden mukaan leveysuunnassa säätyvään suuttimen, jolloin maakaasulla ei turhaan lämmitetä pelkkää radan alla pyörivää telaa. Käsittelyteho on optimoitu siten, että pinta-alaa kohden saadaan aina sama määrä energiaa, jolloin puhutaan vakioista pintaenergiasta (J/m²). Kun pintaenergia pidetään vakiona, saadaan energiansäästöä jatkuvasti, kun päällystyskone ei ole täydessä tuotantonopeudessaan.

Lasketaan maakaasun kokonaisvirtaus ennen ja jälkeen investoinnin ja verrataan tätä erotusta investointilaskelmissa arvioituun säästöön. Otetaan käsittelyyn kolmen kuukauden ajanjakso, ja rajataan siitä selkeät mittausdatan virheet pois. Koneen nopeuden ollessa alle 150 m/min jätetään kulutus huomioitta, koska hallittuja ja hallitsemattomia tuotannon pysäytyksiä voi olla eriävä määrä näin lyhyellä aikavälillä. Kuitenkaan pidempää aikaväliä ei olla voitu ottaa käsittelyyn, koska laitemuutoksista on vielä niin vähän aikaa. Tämä

150 m/min on myös vanhan liekkikäsitteilylaitteiston käynnistysnopeus, koska tätä pienemmillä nopeuksilla on syttymän vaara suuri, etenkin kun teho ei säädy ratanopeuden mukaan. Uudessa laitteistossa teho säätyy sekä nopeuden että leveyden mukaan, ja täten sen käynnistymisnopeutta on voitu pudottaa 50 m/min ratanopeuteen. Tämä nostaa hiukan maakaasun kulutusta, mutta sitä ei ole huomioitu laskuissa, koska se helpottaa niin kutsutun ajon aloitus -hylyn käsittelyä, kun muovi ei ole kokonaan irti raakakartongista. Eli tämä kulutuksen lisääminen on siis tarkoituksenmukaista, ja hyvin pientä verrattuna kokonaiskulutukseen, joten se voidaan jättää huomioitta.

1- ja 2-puoleisesti päällystettyjen kartonkien maakaasun kulutusta on käsitelty erikseen tarkasteluvälin lyhykäisyyden takia, sillä näiden tuotantomäärät voivat vaihdella paljon kyseessä olevalla aikavälillä tuotannon ollessa pääasiassa asiakastilauksien mukaisesti räätälöityä. 2-puoleisesti päällystetty laji vaatii liekkikäsitteilyn molemmin puolin, joten sen kaasunkulutus on kaksinkertainen 1-puoleiseen verrattuna. 1-puoleisia lajeja, jotka vaativat 2-puoleisen liekkikäsitteilyn ei ole huomioitu niiden pienen määrän takia. Rataleveyksiä ei ole myöskään huomioitu erikseen laskennan yksinkertaistamiseksi, koska on huomattu rataleveyden keskiarvon pysyvän melko vakiona valitulla tarkastelujaksolla. Maakaasun tilavuusvirrat, tuotantonopeudet (eli koneen ratanopeus), ajettavat lajit ynnä muut vastaavat datat on kerätty Wedge-ohjelmistolla, joka antaa mittausdatat kolmen kuukauden ajalta minuutin keskiarvoina. Ohjelmalla on siis rajattu alle 150 m/min nopeudet pois (kuva 6).



Kuva 6. Wedge-ohjelmistosta otettu kuvakaappaus, jossa esitetty ylimpänä maakaasun kokonaisvirtaus [m^3/h], toisena liekkikäsitelijä 1:n kaasuvirtaus [m^3/h] ja kolmantena liekkikäsitelijä 2:n kaasuvirtaus [m^3/h].

1-puoleisesti päällystetyn kartongin osuus kaikesta päällystetystä kartongista on laskettu 1-puoleisesti päällystetyn tuotannon ja kokonaistuotannon osamääränä. 2-puoleisen lajin osuus on saatu vastaavalla tavalla. Kaasuvirtaukset 1- ja 2-puoleisille lajeille on saatu Wedge-ohjelmistosta ja tehot sekä energiat kaasulle on laskettu yhtälöillä 1 ja 2. Nämä tulokset ennen ja jälkeen investoinnin on taulukoitu taulukkoon 1, kun laskennan aikaväli t_{tot} on 2208 h ja maakaasun tehollinen lämpöarvo $q_{i,\text{ng}}$ on $36 \text{ MJ}/\text{m}^3$ (Alakangas et al. 2016). Maakaasun lämpöarvon voidaan olettaa säilyvän vakiona ko. aikavälillä sen sisältäessä yli 98 % metaania sekä myös laskennan yksinkertaistamiseksi (Alakangas et al. 2016).

$$\Phi_i = q_{v,i} \cdot q_{i,\text{ng}} \quad (1)$$

Jossa	Φ_i	teho	W
	$q_{v,i}$	tilavuusvirta	m^3/s

$$E_i = \Phi_i \cdot t_i \quad (2)$$

Jossa	E_i	energia	J
	t_i	päälystysaika	s

Päälystysaika saadaan laskettua koko laskentaan käytetyn aikavälin t_{tot} ja 1- tai 2-puoleisen lajin osuuden (1PE-osuus tai 2PE-osuus) tulona. Kokonaisenergia saadaan laskettua yksinkertaisesti energioiden summana.

Taulukko 1. Energialaskennan tuloksia ennen ja jälkeen liekkikäsitteilylaitteiston investoinnin.

	Ennen	Jälkeen
1PE-osuus [%]	2,56	21,87
2PE-osuus [%]	97,4	78,1
$q_{v,1PE}$ [m ³ /h]	50,3	31,7
$q_{v,2PE}$ [m ³ /h]	92,4	63,5
Φ_{1PE} [MW]	0,5	0,3
Φ_{2PE} [MW]	0,9	0,6
E_{1PE} [MWh]	28,5	153,0
E_{2PE} [MWh]	1988,3	1096,0
E_{tot} [MWh]	2016,8	1249,1

Energiansäästö 1- ja 2-puoleisille lajeille saadaan laskettua yhtälöllä 3:

$$E_{\text{säästö},i} = x_i \cdot E_i \quad (3)$$

Jossa	x_i	tuotannon ennen/jälkeen suhde
-------	-------	-------------------------------

Kun energiansäästöt 1- ja 2-puoleisille lajeille on laskettu, voidaan laskea kokonaisenergiansäästö, joka saadaan taas yksinkertaisesti näiden kahden säästön summana. Energiansäästöprosentti saadaan, kun jaetaan energiansäästö aiemmalla energiankulutuksella. Huomioimalla maakaasun hinta ja hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta sekä maakaasun päästökerroin saadaan laskettua kokonaissäästö euroina. Tämä on esitetty yhtälöllä 4:

$$\text{Säästö} = E_{\text{säästö,tot}} (p_{\text{NG}} \cdot h_{\text{CO}_2} + h_{\text{NG}}) \quad (4)$$

Jossa	p_{NG}	maakaasun päästökerroin	kg/MWh
	h_{CO_2}	hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta	€/tCO ₂
	h_{NG}	maakaasun hinta	€/MWh

Tämä luku skaalataan koko vuodelle eli se kerrotaan neljällä. Tätä summaa taas verrataan investointiesityksessä laskettuun säästöön, jolloin saadaan investointiesityksen säästön onnistumista kuvaava luku. Nämä tulokset on esitetty taulukossa 2. Maakaasun ja päästöoikeuksien hintana sekä maakaasun päästökertoimenä käytetään samoja lukuja kuin aiemmassa laskelmassa vuonna 2017 oli käytetty (päästöoikeudet 12 €/tCO₂ ja maakaasun hinta 30,96 €/MWh sekä maakaasun päästökerroin 198 kg/MWh).

Taulukko 2. Investointiesityksen onnistuminen ja energiansäästö.

$E_{\text{säästö, 1PE}}$ [MWh/3kk]	10,70
$E_{\text{säästö, 2PE}}$ [MWh/3kk]	634,69
$E_{\text{säästö, tot}}$ [MWh/3kk]	645,39
$E_{\text{säästö, tot}}$ [%]	32,00
Säästöt vrt. Investointiesitys [%]	62,73

4.2 PE3-Liekkikäsitteilylaitteiston uusiminen – energialaskelmat

Stora Enso Imatran PE3-muovipäälystyskoneelle suunnitellaan uutta esikäsitteilylaitteistoa energian säästämiseksi ja päästöjen pienentämiseksi. Vastaavan laitteiston uusiminen on vastikään toteutettu kyseisen yhtiön toiselle päälystyskoneelle (PE5) ja tässäkin tapauksessa on päädytty esikäsitteilymenetelmänä liekkikäsitteilyyn, pääosin loppukäyttökohteen takia (sähkökorona ei mahdollinen). Tarkoituksena on tehdä energiansäästölaskelmat, jotta yhtiö voi sitten päättää, saadaanko takaisinmaksuaika riittävän lyhyeksi kyseisellä vuosisäästöllä. Laitteisto on täysin vastaava kuin aiemmassa tapauksessa eli sen pienempi kaasunkulutus perustuu ratanopeuden mukaan säätyvään käsitteilytehoon ja rataleveyden mukaan leveyssuunnassa säätyvään kaasusuuttimeen. Ominaiskulutus eli pintaenergia pidetään vakiona ratanopeudesta riippumatta.

Laskenta aloitettiin keräämällä kaasun kokonaisenergia, keskimääräiset rataleveydet ja neliöpainot sekä päällystetyn raakakartongin pinta-ala Wedge-ohjelmistosta sekä Seitti-tuotannonohjausjärjestelmästä. Kaasunkulutukset on laskettu erikseen 1- ja 2-puoleisesti päällystetyille lajeille, mutta nyt 2-puoleisiin lajeihin on sisällytetty 1-puoleiset lajit, jotka vaativat 2-puoleisen liekkikäsittelyn. Tässä tapauksessa osa 1-puoleisista lajeista vaatii 2-puoleisen esikäsittelyn raakakartongin pintaliimauksen takia, joka on tässä raakakartongin kilajissa poikkeuksellisesti ph-luvultaan emäksisen puolella. Jos 2-puoleista esikäsittelyä ei tehdä, voidaan kokemuksen perusteella sanoa, että se aiheuttaa vaikeuksia jatkojalostusprosesseissa, kuten kupin kuumasaumautuvuudessa ja erinäisissä taitoksissa. Nykyinen kaasun ominaiskulutus eli rataan syötettävä pintaenergia $\sigma_{ng,old}$ on saatu laskettua kaasun kokonaisenergian ja päällystetyn pinta-alan osamääränä (yhtälö 5).

$$\sigma_{NG,old} = \frac{E_{tot}}{A_{tot}} \quad (5)$$

Uudelle liekkikäsittelylaitteistolle tämä pintaenergia pidetään vakiona, jolloin kaasunenergia saadaan laskettua, kun tiedetään päällystettävän pinta-alan määrä (yhtälö 6). Uuden käsittelylaitteiston ominaiskulutus on 19 kJ/m².

$$E_i = \sigma_{NG,new} \cdot A_i \quad (6)$$

Pinta-ala saadaan päällystettävän kokonaispinta-alan ja 1- tai 2-puoleisesti käsitellyn lajin osuuden (1xNG-osuus tai 2xNG-osuus) tulona. Kokonaisenergia uudelle laitteistolle saadaan yksinkertaisesti 1- ja 2-puoleisesti käsiteltyjen lajien kaasunenergioiden summana. Kun tämä summa vähennetään alkuperäisestä kokonaisenergiasta, saadaan laskettua vuosittainen energiansäästö. Energiansäästöprosentti saadaan jälleen jakamalla säästö aiemalla kulutuksella. Huomioimalla maakaasun hinta ja hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta sekä maakaasun päästökerroin saadaan laskettua kokonaissäästö euroina (kaava 4). Laskennassa käytetään vuoden 2019 hiilidioksidin päästökaupan keskihintaa 24,71 €/tCO₂ (Energiavirasto 2019b) sekä vuoden 2019 maakaasun keskihintaa 23,67 €/MWh (Energiavirasto 2019a). Maakaasun päästökerroin on 199,1 kg/MWh (Tilastokeskus 2020). Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Energialaskelmien tulokset.

1xNG-osuus [%]	70,5 %
2xNG-osuus [%]	29,5 %
A_{tot} [km ²]	291,6987
$E_{tot,old}$ [MWh]	2867
$\sigma_{NG, old}$ [kJ/m ²]	35,38309
$\sigma_{NG, new}$ [kJ/m ²]	19
E_{1xNG} [MWh]	1084,727
E_{2xNG} [MWh]	909,5883
$E_{tot,new}$ [MWh]	1994,315
$E_{säästö}$ [MWh]	872,6851
$E_{säästö}$ [%]	30,43897

Kuten taulukosta nähdään, saataisiin uudella laitteistolla noin 30 % vuosittainen energiansäästö, ja todennäköisesti lisää käyttö- ja huoltovarmuutta verrattuna vanhaan laitteeseen.

4.2.1 Raaka-aineen muutoksen vaikutus kuppikartongin neliöhintaan

Työssä oli lisäksi tarkoitus tutkia, mikä tulisi kustannusvaikutukseksi, kun kuppikartongin raaka-aine vaihdettaisiin toisen kartonkikoneen valmistamaan tuotteeseen, jolla on erilainen pintaliimaus kuin nykyisellä toimittajalla. Vanhassa raaka-aineessa pH-luku oli happaman puolella, kun uudessa se olisi emäksisen puolella. Tämä aiheuttaa sen, että raaka-aine tulee esikäsitellä molemmiin puolin, vaikka muovi tuleeekin vain toiselle puolelle, sillä on tutkittu, että ilman käsittelyä aiheutuu ongelmia jatkojalostusprosessin myöhemmissä vaiheissa, kuten kupin kuumasaumautuvuudessa ja kupin kaulalle tulevassa taitoksessa. Puolelle, jolle ei tule muovia ei välttämättä ole tarvetta täydelle käsittelyteholle, mutta koska tätä ei ole testattu, on laskuissa käytetty samaa kaasun ominaiskulutusta kuin toisellekin puolelle. Tämä tietenkin lisää kaasunkulutusta, ja sen vaikutus olikin tarkoitus selvittää. Kun tarkoitus oli selvittää kustannusvaikutus per neliometri, tuli kaikki yksiköt saada per neliö -muotoon. Ensimmäisenä laskettiin yhden neliömetrin

päälylystämiseen tarvittava kaasumäärä, josta siis puolet oli ylimääräistä verrattuna aiem-
paan raakakartonkiin. Tämä ylimääräinen kaasumäärä saatiin liekkikäsitteijän ominais-
kulutuksen ja päälylystettävän pinta-alan (yksi neliömetri) tulona yhtälöllä 6.

$$E_{neliö} = 19 \frac{kJ}{m^2} \cdot 1 m^2 = 19 kJ = 0,00001 MWh$$

Huomioimalla maakaasun hinta ja hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta sekä maakaasun
päästökerroin saadaan laskettua kustannusvaikutus euroina. Laskennassa käytetään sa-
moja vuoden 2019 arvoja kuin taulukossa 3. Kustannusvaikutusten laskenta on esitetty
yhtälöllä 7:

$$Kustannusvaikutus = E_{neliö} (p_{NG} \cdot h_{CO_2} + h_{NG}) \quad (7)$$

Jossa	p_{NG}	maakaasun päästökerroin	kg/MWh
	h_{CO_2}	hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta	€/tCO ₂
	h_{NG}	maakaasun hinta	€/MWh

Raaka-aineen muutoksen kustannusvaikutus per neliömetri valmista tuotetta saatiin las-
kettua edeltävällä kaavalla, mutta tulosta ei ole esitelty tässä kandidaatintyössä sen arka-
luontoisuuden takia.

4.3 Tulosten tarkastelu ja huomiot laskelmista

Saadut tulokset vaikuttavat järkeviltä ja ne on saatu laskettua riittäväällä tarkkuudella siten,
että niiden avulla saadaan tehtyä päätöksiä jatkon suhteen, eli onko esimerkiksi PE3-ko-
neen liekkikäsitteilyä järkevää uusia pelkästään maakaasun kulutuksen pienenemisestä
johtuvan energiansäästön perusteella. Kuitenkaan täysin tarkkoja lukemia energiansääs-
töstä ei voida saada, mikä johtuu muun muassa mittalaitteiden epävarmuudesta.

Energiankulutukset PE5-koneelle laskettiin maakaasun niin sanotun runkoputken virtaus-
mittauksen perusteella, eli ennen kaasulinjojen jakaantumista kahdella eri liekkikäsitteili-
jälle. Mitta-arvoja ennen ja jälkeen liekkikäsitteilylaitteiston investoinnin tarkastellessa
huomattiin, että erilliset virtausmittaukset liekkikäsitteilyillä (jakaantumisen jälkeen)
näyttivät virhettä eri suuntiin. Ennen investointia runkoputken kokonaisvirtaus näytti pie-
nempää arvoa kuin yksittäisten liekkikäsitteilyiden virtausmittausten summa, mutta in-

vestoinnin jälkeen runkoputken kokonaisvirtauksen arvo oli suurempi kuin osavirtausmittausten summa. Liekkikäsitteilylaitteiston uusinnan yhteydessä nämä osavirtausmitaukset vaihdettiin eli mittaukset olisi hyvä nyt kalibroida, jolloin voitaisiin varmistua siitä, mikä mittaus näyttää oikein. Laskennassa käytettiin kuitenkin kokonaisvirtauksen arvoa, ja voidaan olettaa kokonaisvirtauksen virheen pysyneen samana, koska sitä ei uusittu tai kalibroitu, jolloin mittauksen arvo on riittävän luotettava energiansäästölaskelmaan.

Lisäksi pientä epätarkkuutta energiansäästölaskelmiin aiheutti muutamat laskennan yksinkertaistukset, kuten se ettei ratalevyden muutoksia ollut huomioitu eri aikavälejä tarkastellessa. Keskimääräisesti rataleveys oli kuitenkin lähes sama tarkasteluvälillä, jolloin virhe jää pieneksi. Myös esimerkiksi maakaasun lämpöarvon oletaminen vakioksi voi aiheuttaa pientä virhettä.

Kaiken kaikkiaan laskenta sujui melko suoraviivaisesti, ja tulokset ovat järkevää suuruusluokkaa, ja täten hyödyllisiä Stora Ensolle jatkotoimenpiteiden suhteen. Esimerkiksi laskennan ensimmäinen vaihe, jossa verrattiin todellista kulutusta investointiesityksessä esitettyyn arvoon, oli selkeästi kannattava tehdä, koska investointiesityksen säästöksi oli lopulta saatu aivan liian suuri luku. Tämä johtui pääosin siitä, että investointiesityksen laskuissa oli tehty liikaa suoraviivaisia oletuksia, kuten että kaikki päällystettävä kartonki vaatisi kaksinkertaisen liekkikäsitteilyn. Nyt tällaiset seikat otettiin huomioon, jolloin säästö jäi huomattavasti odotettua pienemmäksi, vaikka toki säästö oli silti erittäin huomattava verrattuna tilanteeseen ennen investointia. Tässä työssä esitettyä laskentaa voidaan mahdollisesti myös hyödyntää tulevia investointeja varten.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia kahta eri investointia kartongin muovipäälystystehtaaseen, joista toinen oli jo tehty aiemmin ja toista oltiin vasta suunnittelemassa. Molemmissa investoinneissa uusittiin esikäsitteilylaitteisto, ja molempiin valittiin esikäsitteilylaitteistoksi liekkikäsitteily, joka onkin yleisin valinta kyseiseen kohteeseen. Tutkimus oli kolmiosainen, joista ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin aiemmin tehdyn liekkikäsitteilyinvestoinnin onnistumista energiansäästön näkökulmasta. Energiansäästö aiheutuu maakaasun kulutuksen pienenemisestä, jonka ansiosta saadaan kustannussäästöjä, kun maakaasua kuluu vähemmän. Tämä taas aiheuttaa sen, että hiilidioksidipäästöjä aiheutuu vähemmän, jolloin päästökaupasta ei tarvitse ostaa niin paljon päästöoikeuksia. Toisessa vaiheessa tutkittiin, kuinka paljon liekkikäsitteilylaitteiston uusinnan avulla saataisiin erääseen toiseen päälystyskoneeseen energiansäästöä, ja sitä kautta tietysti kustannussäästöjä. Kolmas vaihe taas oli tutkia edellisen vaiheen päälystyskoneen raaka-aineen muutoksen vaikutusta liekkikäsitteilylaitteiston energiankulutuksen suurenemisen kautta tuleviin kustannuksiin, kun uusi raaka-aine vaati kaksinkertaisen määrän käsitteilyä.

Työn teoriaosiossa esiteltiin nestepakkauskartongin valmistus kartonkikoneelta muovipäälystyslinjan pakkaamoon asti. Teoriaosan alussa esiteltiin kartongin valmistus ja kartonkikoneen toiminta osaprosesseineen, ja nestepakkauskartonki oli käsitelty omana kapaleenaan. Nestepakkauskartongin valmistuksesta kerrottiin muovipäälystyskonelinjan osaprosessit, muovipäälystyksessä käytettävät päälystemateriaalit sekä yleistä nestepakkauskartongille asetetuista vaatimuksista. Kandidaatintyön suppeuden takia tässä työssä keskityttiin enemmän päälystyskonelinjan toimintaan, johon myös investoinnit oli tehty tai suunniteltu.

Laskentaosiossa päästiin järkeviin tuloksiin, ja vaikka mittaustuloksiin perustuvissa laskelmissa esiintyykin aina virhettä, voidaan näitä laskennan tuloksia pitää melko luotettavina niiden suuruusluokan perusteella. Ensimmäisessä vaiheessa oli tarkoitus verrata mittausten perusteella laskettua energiansäästöä investointiesityksen energiansäästöön. Tulokseksi saatiin, että todellinen energiansäästö on vain 63 % siitä, mitä investointiesityksessä oli esitetty, minkä perusteella voidaan todeta, että tutkinta tuli tältä osin ainakin tarpeeseen. Toisessa vaiheessa tutkittiin uuden liekkikäsitteilylaitteiston uusinnan vaikutusta toisen päälystyskoneen energiankulutukseen, jossa päästiin noin 30 % vuosittaiseen

säästöön. Tämä luku ei ole erityisen suuri, mutta investoinnin mahdollinen kannattavuus riippuukin lisäksi myös muun muassa investointikustannuksista sekä takaisinmaksuajan pituudesta. Lisäksi kannattavuuteen vaikuttaa myös nykyisen laitteen teknisestä iästä johtuvat häiriöt, joita voitaisiin uudella laitteistolla vähentää. Kolmannessa vaiheessa tuli tutkia tämän päällystyskoneen raaka-aineen muutoksen kustannusvaikutusta per neliömetri päällystettyä kartonkia, jonka tulos on salattu tästä kandidaatintyöstä.

Kaiken kaikkiaan työ täytti kandidaatintyössä vaaditun laajuuden kuitenkin menemättä sen yli ja toimii lisäksi erinomaisena opinnäytteenä jo opituista tiedoista ja taidoista yliopistossa. Työ tehtiin Stora Enson aloitteesta heidän valitsemastaan aiheesta, ja työssä saatiin vastaukset esitettyihin kysymyksiin.

LÄHDELUETTELO

Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Jyväskylä: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 263s. ISBN 978-951-38-8419-2

Energiavirasto 2019a. Maakaasun hintatilastot. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.3.2020]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/maakaasun-hintatilastot>

Energiavirasto 2019b. Päästöoikeuksien huutokauppa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.3.2020]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/huutokauppa>

Hägglom-Ahnger U., Komulainen P. 2003. S. 5. painos. Helsinki: Opetushallitus. 280s. ISBN 952-13-1746-9.

Karhuketo H., Seppälä M., Törn T. & Viluksela P. 2004. Paperin ja kartongin jalostus, Kemiallinen metsäteollisuus 3. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus. 219s. ISBN 952-13-1999-2.

Karlsson M. et al. 2010. Papermaking Part 2, Drying, Papermaking Science and Technology. 2. painos. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. 634s. ISBN 952-5216-37-0.

Knowpap. 2011. Paperitekniiikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö, versio 14.0 VTT Tuotteet ja tuotanto. Prowledge Oy. [Viitattu 16.3.2020]. Saatavissa: http://www.knowpap.com/www_demo/suomi/paper_technology/general/5_papermaking/frame.htm

Kuusipalo J. et al. 2008. Paper and Paperboard Converting, Papermaking Science and Technology. 2. painos. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. 346s. ISBN 952-5216-28-8.

Paulapuro H. et al. 2008. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Papermaking Science and Technology. 2. painos. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. 516s. ISBN 978-952-5216-25-7.

Rautiainen P. et al. 2009. Papermaking Part 3, Finishing, Papermaking Science and Technology. 2. painos. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. 404s. ISBN 978-952-5216-36-3.

Tilastokeskus 2020. Polttoaineluokitus 2020. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.3.2020]. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html