



## **TEHDASINTERGRAATIN OMINAISENERGIANKULUTUKSEN TARKASTELU**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Matti Väärä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori, TkT Katja Kuparinen

Ohjaaja: DI Saira Kontu

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Matti Väärä

### **Tehdasintegraatin ominaisenergiankulutuksen tarkastelu**

Energiatekniikan diplomityö

2023

63 sivua, 27 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori, TkT Katja Kuparinen

Avainsanat: ominaisenergiankulutus, energian käyttökohteet, kartonkikone, kuitulinja

Tässä diplomityössä selvitetään metsäteollisuuden energiankäyttöä ja energiatehokkuustoi-  
miin ohjaavia toimenpiteitä. Työssä kartoitetaan valkaisuamatonta havusulfaattisellua valmis-  
tavan kuitulinjan ja nestepakkauskartonkia valmistavan kartonkikoneen energiankulutusta.  
Tavoitteena löytää ratkaisuja, joilla saadaan pienennettyä tehtaan ominaisenergiankulutusta.

Kartoituksen perusteella keskitytään kuitulinjan osalta hajukaasupolttimon savukaasujen  
lämmöntalteenoton mahdolliseen hyödyntämiseen lämpimän veden valmistuksessa. Osana  
diplomityötä tehtiin Lean Six Sigma Green belt- työ. Kyseisessä työssä prosessikuvauksen  
jälkeen listattiin ja priorisoitiin energiankulutuksen kannalta vaikuttavimmat tekijät höyryn,  
sähkön ja maakaasun osalta. Yhdessä muun projektiryhmän kanssa nämä energialähteet  
priorisoitiin saatavuuden ja hinnan perusteella, jolloin maakaasulle tuli korkein painoarvo.  
Kartonkikoneen osalta potentiaalisemmaksi energiansäästökohteeksi priorisoitui päällysteen  
kuivatuksessa käytetty maakaasu. Monimuuttujakoeajojen perusteella päällysteen kuivatuk-  
seen käytettävän maakaasun kulutuksessa on potentiaalia saada taloudellisia säästöjä ja pie-  
nentää hiilijalanjälkeä prosessin ajotapaa muuttamalla.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Matti Väärä

### **Examination of specific energy consumption of mill integrate**

Master's thesis

2023

63 pages, 27 figures, 3 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post-doctoral Researcher Katja Kuparinen

Keywords: specific energy consumption, energy usage, board machine, pulp mill

This master's thesis examines the energy use of the forest industry and guiding actions to improve energy efficiency. In this master's thesis, there are investigations of the energy consumption of a fiber line that produces unbleached softwood sulfate pulp and a board machine that produces a liquid packaging board. The objective is to find solutions to reduce the mill's integrate specific energy consumption.

Based on the survey, the focus will be on the possible utilization of the heat recovery of the flue gases of the odor gas burner for the production of hot water for the fiber line. Lean Six Sigma Green belt- research was done as a part of this master's thesis to determine the most influential factors in energy consumption regarding the use of steam, electricity, and natural gas. These energy sources were prioritized based on the availability and price of the source. The least abundant and the most expensive source turned out to be natural gas. Regarding the board machine, the natural gas used in drying the coating pigment was prioritized as the most potential energy-saving action. Based on multivariant trial runs of natural gas usage in coating pigment drying there is potential to achieve economical savings and reduce the carbon footprint by optimizing the process parameters.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Lyhenteet

LTO	lämmöntalteenotto
BAT	best available techniques, parhaat saatavilla olevat tekniikat
VOC	volatile organic compound, haihtuvat orgaaniset yhdisteet
TRS	total reduced sulphur, haisevat rikkiyhdisteet

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1.	JOHDANTO .....	8
1.1.	Työn tavoite .....	8
1.2.	Työn rakenne.....	9
2.	STORA ENSO IMATRAN TEHTAAT .....	10
3.	SELLUN JA KARTONGIN VALMISTUS.....	14
3.1.	Tainion sellutehdas.....	14
3.1.1.	Keitto .....	14
3.1.2.	Pesu ja lajittelu.....	16
3.2.	Kartongin valmistus .....	16
3.2.1.	Massankäsittely.....	17
3.2.2.	Lyhytkierto.....	18
3.2.3.	Viiraosa ja rainanmuodostus.....	18
3.2.4.	Puristinosa.....	19
3.2.5.	Kuivatusosa.....	19
3.2.6.	Jälkikuivatusosa .....	21
4.	ENERGIANKÄYTTÖ METSÄTEOLLISUUDESSA .....	22
4.1.	Kuitulinjan energiankulutus .....	25
4.2.	Kartonkikoneen energiankulutus .....	27
5.	TAINION KUITULINJAN ENERGIAN KÄYTTÖKOHTEET .....	29
5.1.	Höyryn käyttö.....	29
5.2.	Sähkön käyttö.....	30
5.3.	Maakaasun käyttö.....	31
6.	KARTONKIKONE 5 ENERGIAN KÄYTTÖKOHTEET .....	32
6.1.	Höyryn käyttö.....	32
6.2.	Sähkön käyttö.....	33
6.3.	Maakaasun käyttö.....	34

7.	ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISEEN OHJAAVAT TEKIJÄT .....	35
8.	POTENTIAALISET ENERGIANSÄÄSTÖKOHTEET KUITULINJALLA .....	36
8.1.	Hajukaasupolttimen savukaasujen lämmöntalteenotto .....	36
8.1.1.	Lämmöntalteenotto savukaasuista .....	37
8.1.2.	Savukaasujen sisältämä lämpöenergia.....	38
8.1.3.	Polttoaineen kattilaan tuoma energia .....	39
8.1.4.	Savukaasujen jäähdytysilman energia .....	40
8.1.5.	Savukaasujen jäähdytysilman korvaaminen vedellä.....	43
8.1.6.	Tulosten tarkastelu.....	44
9.	POTENTIAALISET ENERGIANSÄÄSTÖKOHTEET KARTONKIKONE 5: LLÄ	45
9.1.	Lean Six Sigma .....	45
9.2.	Projektin valinta ja ongelman asetus.....	45
9.2.1.	Projektin tavoitteet.....	47
9.2.2.	Projektin strategia .....	47
9.3.	Prosessin räjäytys .....	48
9.3.1.	Prosessikartta .....	48
9.3.2.	XY- matriisi .....	48
9.4.	Vastemuuttuja .....	51
9.5.	Mittaussysteemin analysointi .....	51
9.5.1.	Mittaussysteemin kuvaus.....	51
9.5.2.	Johtopäätökset.....	51
9.6.	Prosessin kuvaus .....	51
9.6.1.	Hajontojen analysointi .....	52
9.7.	Todennäköisten X:n tunnistaminen.....	52
9.8.	Koesuunnittelu .....	52
9.8.1.	DOE suunnitelma.....	52
9.8.2.	DOE tulokset.....	55
9.8.3.	Koeajojen johtopäätökset.....	58
9.9.	Parannustoimenpiteet .....	58
9.10.	Ohjaussuunnitelma .....	59
9.11.	Projektin johtopäätökset .....	59
10.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	60
	Lähteet .....	62

## Liitteet

Liite 1. Osa prosessikuvauksesta

# 1. JOHDANTO

Metsäteollisuus on erittäin energiantensiivinen teollisuuden ala. Energiankulutuksen säästöpotentiaaleja tarkastellaan jatkuvasti, jotta tehtaiden energiankulutuksia saadaan kestävämmälle tasolle. Energiatehokkuudella tarkoitetaan saman tuotteen tai palvelun tuottamista pienemmällä energiamäärällä. Energiatehokkuuslaki velvoittaa suuryritykset tekemään energiakatselmuksen neljän vuoden välein. Katselmuksessa selvitetään yrityksen tai konsernin kaikkien toimipaikkojen energiankulutusprofiilit ja pyritään tämän jälkeen yksityiskohtaisempaan tarkasteluun mahdollisten energiaterhokkuustoimenpiteiden osalta. (Energiavirasto, 2022)

Suomen teollisuuden energiankäytöstä toimialoittain paperin, paperi- ja kartonkituotteiden valmistus kulutti sähkö- ja lämpöenergiaa yhteensä noin 45 petajoulea, mikä vastaa yhteensä noin 29 prosenttia kaikkien teollisuuden toimialojen sähkö- ja lämpöenergian kulutuksesta. (Tilastokeskus, 2020)

Metsäteollisuuden (sellu ja paperi/kartonki) valmistukseen vaaditaan paljon lämpö- ja sähköenergiaa. Lämpöenergiaa käytetään pääosin materiaalivirtojen lämmittämiseen, veden höyrystämiseen ja sähkön tuotantoon. Sähköenergiaa käytetään sähkömoottoreiden ja käytöjen pyörittämiseen. Metsäteollisuuden ollessa erittäin energiantensiivinen teollisuuden ala, prosentuaalisesti pienillä energiansäästötoimilla voidaan saavuttaa säästöjä koko teollisuutta koskevassa energiankulutuksen tarkastelussa. Metsäteollisuudella on kunnianhimoinen tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tällä hetkellä uusiutuvan energian osuus on noussut 86 prosenttiin. (Finnish Forest Industries, 2020)

## 1.1. Työn tavoite

Tässä diplomityössä perehdytään Stora Enson Imatran Tehtaisiin, tarkemmin ottaen Tainionkosken tehtaaseen, mikä käsittää valkaisu- ja lajittelun osastoja, jossa tapahtuu sellun keitto, pesu ja lajittelu, sekä kartonki- ja paperikoneen,



pulpperiaseman ja kuorimon. Työssä keskitytään pääosin kuitulinjaan ja kartonkikoneeseen. Työn tarkoituksena on kartoittaa ja selvittää taselaskentojen avulla potentiaalisia energiansäästökohteita, joilla saadaan alennettua energiankulutusta. Työn tavoitteena on löytää parannusehdotuksia, joilla ominaisenergiankulutus saadaan laskemaan. Ominaisenergiankulutuksella tarkoitetaan tämän työn yhteydessä energian käyttöä suhteessa tuotettuun kartongin tonnimäärään, käytettyjä yksiköjä GJ/t, kWh/t ja MWh/t. Ominaisenergiankulutuksen vertailu ja laskeminen sellu- ja paperiteollisuudessa ei kuitenkaan ole aina suoraviivaista. Ennen ominaisenergiankulutusten vertailuja on suositeltavaa tarkastaa laskelmien perustana olevat oletukset perusteellisesti vertailujen oikeellisuuden tarkastamiseksi. (Lawrence, et al., 2019)

## 1.2. Työn rakenne

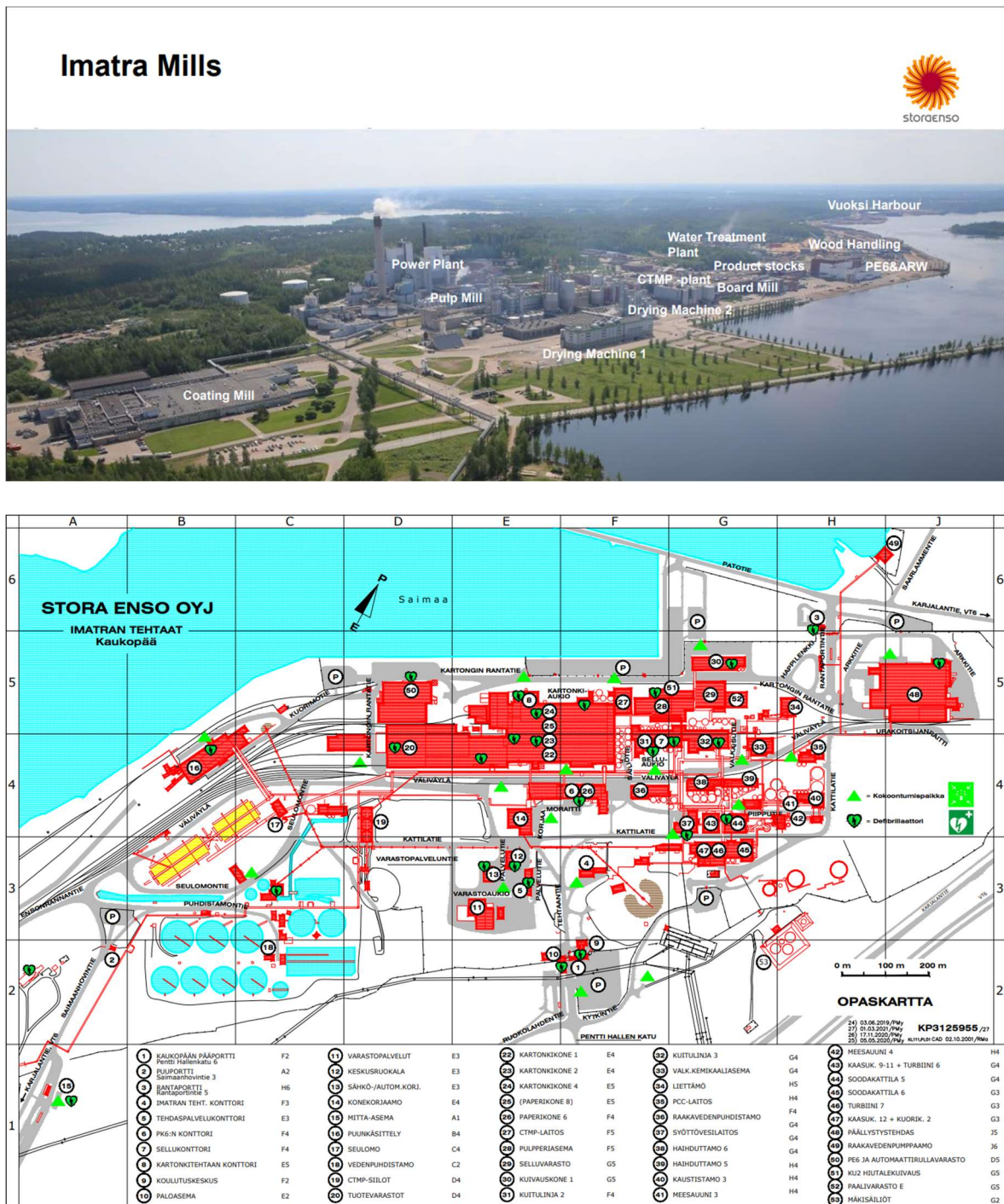
Diplomityö aloitetaan perehtymällä ja kartoittamalla nykytilaa energiankäytön osalta. Diplomityössä keskitytään pääsääntöisesti prosessiin höyryn, sähkön ja maakaasun osalta, jotta saadaan kokonaiskuva energiankäytön kohteista ja tätä kautta potentiaalisista parannuksista ajotapoihin sekä kohteita mahdollisesti tuleviin energiainvestointiprojekteihin. Työssä tehdään vertailua BAT- tekniikoihin, jotta saadaan vertailukuvaa parhaisiin mahdollisiin saatavilla oleviin tekniikoihin, ja kuinka ominaisenergiankulutus voisi muuttua näitä tekniikoita hyödyntämällä.

Diplomityön kanssa samaan aikaan kävin Lean six sigma Green belt- kurssia ja kurssityö liittyi diplomityöhön. Green belt- työssä kartoitettiin sellutehtaan ja kartonkikoneen energiankulutuskohteet prosessikuvauksen avulla ja tämän jälkeen energiankulutuskohteet pisteytettiin ja priorisoitiin XY- matriisiin, jonka perusteella valittiin koeajettavat muuttujat.

## 2. STORA ENSO IMATRAN TEHTAAT

Stora Enso Imatran tehtaat valmistavat kartonkia ja paperia noin 1,2 miljoonan tonnin vuosikapasiteetilla, josta kartongin osuus on 1 175 000 tonnia ja paperin osuus 25 000 tonnia. Kaikki valmistettavat nestepakkaus-, elintarvike- ja graafiset kartongit sekä tekniset ja pakkauspaperit, joita Imatran tehdas valmistaa, voidaan kierrättää, polttaa tai kompostoida. ja tästä tuotannosta vientiin menee noin 90 % ja tärkeimpänä markkina-alueena on Eurooppa sekä merkittävä markkina-alue myös Kaakkois-Aasiassa.

Imatran tehtaat voidaan jakaa kahteen yksikköön, kuvassa 1 esitettyyn Kaukopäähän ja kuvan 2 Tainionkoskeen, jotka molemmat sijaitsevat samalla tehdasalueella ja fyysisesti niitä yhdistää noin 5,5 kilometriä pitkä putkisilta lipeiden, höyryn ja lauteen siirtoa varten. Tainionkoskella toimii sellutehdas (valkaisu- ja pitkäkuitusellu), kartonkikone 5 (ruskearunkoiset nestepakkauskartongit) ja paperikone 7 (sähkötekniset- ja paperipussipaperit).

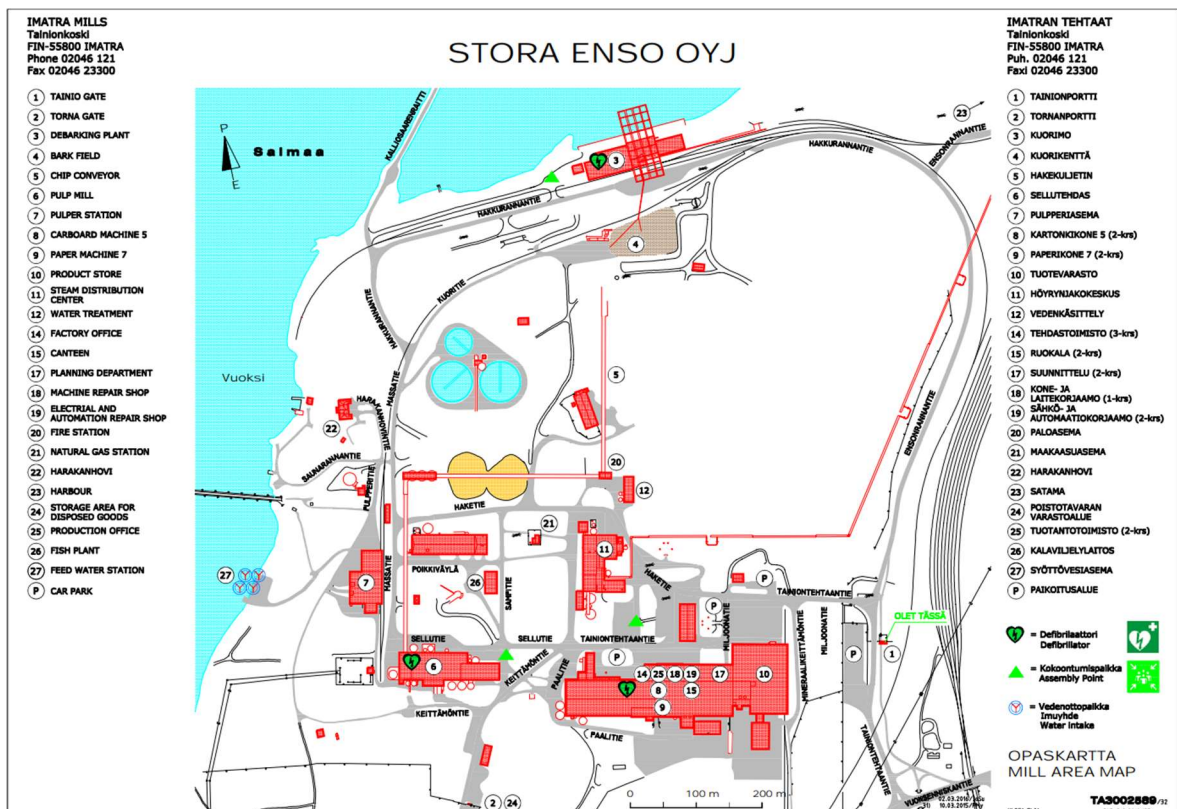


Kuva 1. Stora Enso Imatran tehtaat Kaukopää (Stora Enso 2022).

Kaukopäässä sijaitsee myös kaksi kuitulinjaa, joista kuitulinja 2 tuottaa valkaistua pitkäkuituista sellua 250 000 tonnin vuosikapasiteetilla ja kuitulinja 3, joka tuottaa valkaistua lyhytkuituista sellua 650 000 tonnin vuosikapasiteetilla. Kaukopäässä valmistetaan myös

mekaanista massaa 200 000 tonnin vuosikapasiteetilla. Kaukopäässä sijaitsee päällystystehdas, jonka vuosittainen päällystyskapasiteetti on noin 455 000 tonnia.

Kaukopään sellutehtaan kemikaalikierrosta vastaa kaksilinjainen talteenotto- ja lipeälinja, joka koostuu kahdesta haihduttamosta, kahdesta soodakattilasta, kaustisoinnista, kahdesta meesauunista sekä mäntyöljykeittämöstä. Perus prosessihöyry tuotetaan soodakattiloilla 5 ja 6, joiden lämpötehot ovat 190 MW ja 400 MW. Lisäksi höyryä tuotetaan kuorikattila 2:lla, jonka lämpöteho on 250 MW sekä neljällä kaasukattilalla K9-K12, joista K9-K11 lämpöteho on 50 MW per kattila ja K12 100 MW. Kaikki energiantuotanto tapahtuu Kaukopään tehtailla ja Tainionkoski toimii energian kuluttajana niin sähkö- kuin lämpöenergian osalta.



Kuva 2. Stora Enso Imatran tehtaat Tainionkoski (Stora Enso 2022).

Imatran tehtailla energiantuotannosta biopolttoaineilla tuotetaan 5582 GWh, joista mustaliipeän osuus on 4475 GWh ja kuoren osuus 1106 GWh. Fossiilisista polttoaineista maakaasulla tuotetaan 429 GWh ja öljyllä 12 GWh energiaa. Sähköntuotannosta vastaa kaksi vastapaineturbiinia, jotka tuottavat 654 GWh sähköenergiaa, eli 51 prosenttia Imatran tehtaiden 1277 GWh:n sähkönkulutuksesta. (Stora Enso, 2022)

### 3. SELLUN JA KARTONGIN VALMISTUS

Seuraavassa käydään läpi havusulfaattisellun valmistus eräkeittämis- toimisella sellutehtaalla keittämön, pesun ja lajittelun osalta. Kartongin valmistus lyhykäisyydessään, jotta ymmärretään myöhemmin tarkasteltavia energiansäästöpotentiaalin kohteita ja niiden vaikutusta sellun- tai kartonginvalmistuksen prosesseihin.

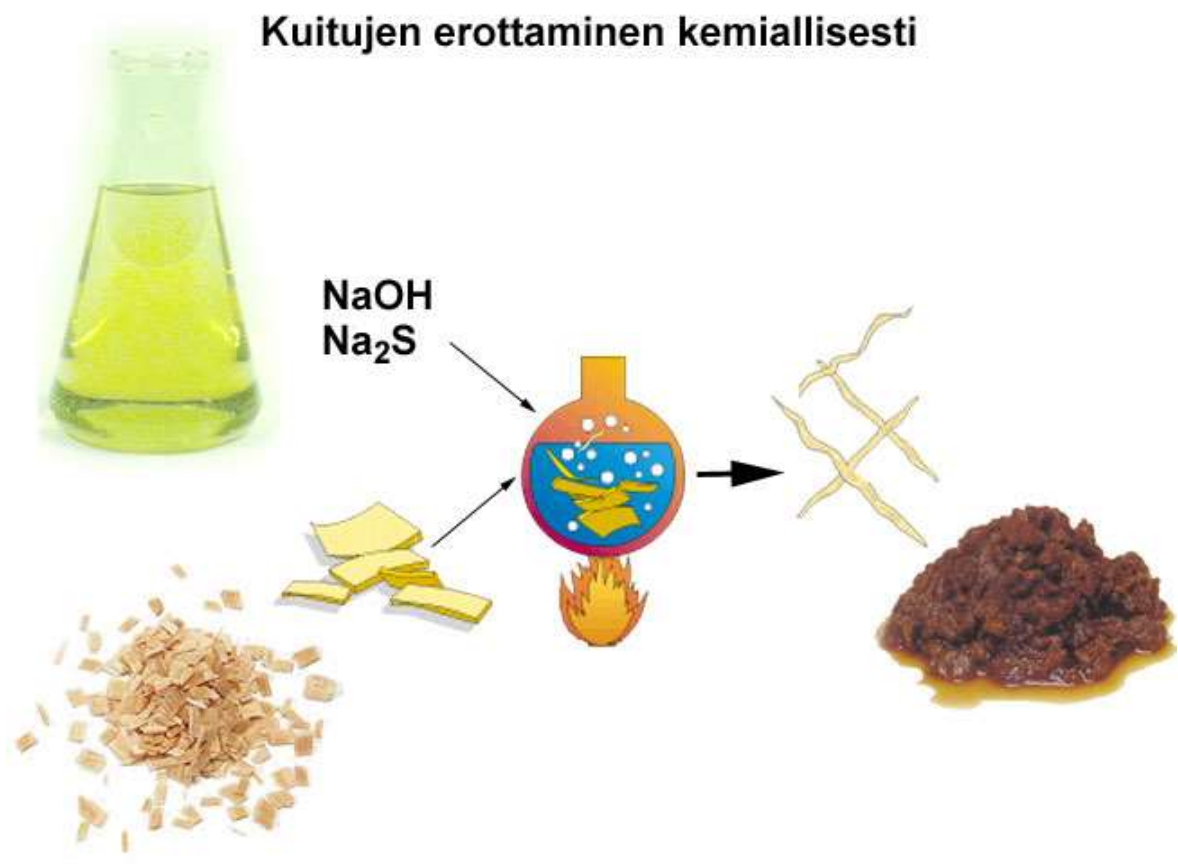
#### 3.1. Tainion sellutehdas

Tainion sellutehdas on yhteydessä Kaukopään voimalaitokseen n. 5,5 kilometriä pitkän putkisillan välityksellä. Putkisillassa Kaukopäästä Tainiolle tulee 10 bar höyryä ja valkolipeää, Tainiolta Kaukopäähän putkisillaa pitkin siirretään sellutehtaan pesulipeä sekä KA5, PK7 ja SAT lauhteet. Sellutehtaan kaikki tuotanto menee omaan käyttöön KA5:lla ja PK7:lla.

##### 3.1.1. Keitto

Eräkeittämöllä havusulfaattisellun valmistus tapahtuu vaihe vaiheelta useissa eräkeittimissä, jotka ovat toiminnan eri vaiheissa. Eräkeittoprosesseista on erilaisia muunnelmia, joilla saadaan muutettua massan laatua reaktio-olosuhteilla. Reaktio-olosuhteita muunnellaan pääosin erilaisilla keiton aikana tehtävillä liemenvaihdolla, joilla pyritään parantamaan massan laatua ja vähentämään prosessin energiankulutusta. Tämän diplomityön tutkimuskohteena olevalla Tainion sellutehtaan perinteisellä eräkeittämöllä ei edellä mainittuja liemenvaihtoja tapahdu, vaan keittonesteen lämmitys tapahtuu kalorisäätörissä välipainehöyryä käyttämällä. Keittovaihe kuluttaa selvästi suurimman osan lämpöenergiasta. (KnowPulp, 2022)

Sellun sulfaattikeittoprosessissa pääkemikaalina on käytössä valkolipeä, joka koostuu natriumhydroksidista (NaOH) ja natriumsulfidista (Na<sub>2</sub>S). Valkolipeän tarkoituksena on liuottaa mahdollisimman paljon puun kuituja sitovaa ligniiniä, kuitenkin liuottamatta selluloosaa. Valkolipeän keittokemikaaleista natriumhydroksidi toimii ligniiniä pilkkovana kemikaalina ja natriumsulfidi nopeuttaa keittoreaktiota, sekä suojaa natriumhydroksidia liuottamasta selluloosaa. Sulfaattikeiton keittolämpötila on normaalisti noin 150–170 °C. (KnowPulp, 2022)



Kuva 3. Kuitujen kemiallinen erotus (KnowPulp, 2022)

Tärkeä keiton mitattava ominaisuus on kappaluku. Kappaluvulla kuvataan jäljellä olevan ligniinin määrää. Kappaluvun määrittäminen suoritetaan mittaamalla tietyin massamäärän kaliumpermanganaatin kulutus happamassa ympäristössä. Keiton tarkoituksena on poistaa kuituja sitovaa ligniiniä, mutta liika ligniinin poisto heikentää massan lujuutta ja saantoa selluloosan liukenemisen takia. Tyypillinen kappaluku valkaisemattomalle massalle keiton jälkeen on tyypillisesti 40–100 ja saanto havupuulle noin 46–69 %. Tarkastelun kohteena olevan



Tainion sellutehtaan keiton jälkeinen kappaluku on noin 60. Saanto kuvaa kuinka monta prosenttia kuivasta puusta saadaan selluksi. (KnowPulp, 2022)

### 3.1.2. Pesu ja lajittelu

Massan pesulla tarkoitetaan vaihetta, jossa keittimeltä tulleesta massasta pyritään erottamaan valkolipeän liuottama ligniini ja muut liuenneet yhdisteet mahdollisimman tehokkaasti. Massan pesu Tainion sellutehtaalla suoritetaan kahdella pesulinjalla, joista molemmilla on kaksi DD (Drum Displacer) pesuria. DD pesurit toimivat vastavirtaperiaatteella, eli kunkin vaiheen suodosta käytetään pesunesteenä edellisessä vaiheessa. Pesuneste siirtyy aina puhtaamman massan puolelta likaisemman massan puolelle. Tainion kahdella pesulinjalla on molemmilla kaksi DD- pesuria ja sähköenergiaa kuluttavat kuumajauhimet pesureiden välissä. Tällä menetelmällä vähennetään pesussa tarvittaman veden määrää, mutta saadaan kuitenkin puhdasta massaa. Pesuvaiheessa erotettu ligniini ja muut yhdisteet pumpataan 5,5 km pitkää putkisiltaa pitkin pesulipeän mukana kaukopään pesulipeäsäiliöihin ja myöhemmin poltetaan soodakattiloissa. Sähköenergiaa kuluu pesuvaiheessa kuumajauhatukseen, joka tapahtuu tarkastelussa olevalla Tainionkosken kuitulinjalla DD- pesureiden välissä. (ForestBioFacts, 2022)

Keittovaiheesta massaan jää aina epäpuhtauksia, jotka voivat olla huonosti toisistaan irronneita kuituja, tiheää sydänpuuta, haketta, kuorta, hiekkaa tai metallia. Lajittelun tehtävänä on poistaa edellä mainittuja epäpuhtauksia, jotta käyttöön saatava massa on mahdollisimman puhdasta ei toivotuista kiinteistä aineista. Lajittelun päätarkoituksena on haitallisten aineiden erottaminen mahdollisimman tarkasti menettämättä priimakuituja. (ForestBioFacts, 2022)

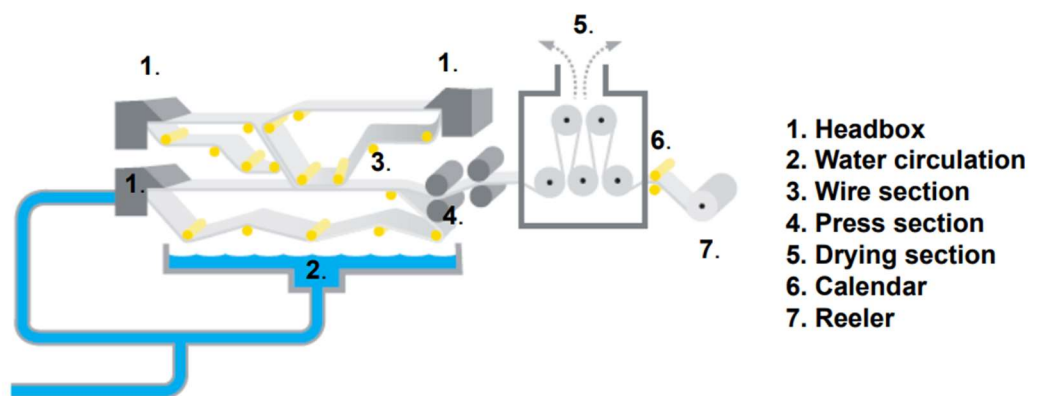
### 3.2. Kartongin valmistus

Valmistusprosessi voidaan jakaa massakiertoihin, lyhytkiertoon, viiraosan rainanmuodostukseen ja puristinosaan, joissa tapahtuu suurin vedenpoisto rainasta. Alle prosentin peräläättikkosakeudesta päädytään puristinosan jälkeiseen noin 40–60 % kuiva-ainepitoisuuteen.



Tämän jälkeen kartonkia kuivataan höyryn avulla kuivausosalla, joka on kaikkein energiaa kuluttavin osa. Kuivausosalla saavutetaan loppukosteus, joka on alle 10 prosenttia. Jälkikäsitteily, joka KA5:llä käsittää pituusleikkauksen ja pakkaamon, on jätetty tarkastelematta tässä työssä tarkoituksella, koska ominaisenergiankulutuksen tarkastelun kannalta jälkikäsitteilyn roolia ei nähdä merkittäväksi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, pp. 15-16)

## Production of multilayer board



Kuva 4. Kartonkikone lyhyesti kuvattuna. (Stora Enso 2022)

### 3.2.1. Massankäsittely

Massankäsittelyn tehtävänä on hajottaa, kuiduttaa, jauhattaa, puhdistaa ja annostella massat. Massankäsittelyvaiheessa annostellaan myös joitakin kemikaaleja ja se toimii puskurina sel-lutehtaan ja kartonkikoneen välillä. (KnowPap, 2022)

Massankäsittelyn tehtävänä on myös sekoittaa ja annostella koneelle menevän sulpun koostumus sellaiseen halutunlaiseksi. Sekoitussäiliössä massat, esimerkiksi kemiallisesti- ja mekaanisesti valmistettu massa runkokerrokseen, sekoitetaan keskenään ennen konesäiliöön ja lyhyeen kiertoon pumppaamista. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, p. 118)

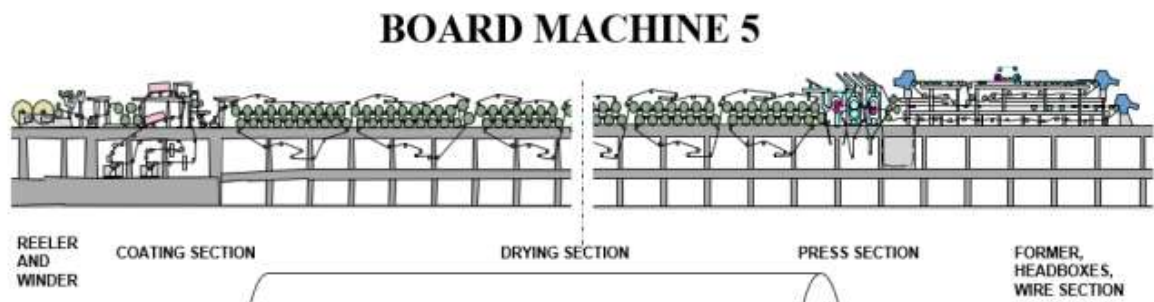
Massan jauhatuksella on suuri rooli kartongin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen. Jauhatus myös kuluttaa paljon energiaa ja optimaalisella massan jauhatuksella voidaan vaikuttaa tehta-  
taan energiankulutukseen. (Valmet, 2022)

### 3.2.2. Lyhytkierto

Paperikoneessa lyhyitä kiertoja on vain yksi, kun taas kolmikerroskartonkia valmistavassa kartonkikoneessa on lyhyt kierto jokaiselle kerrokselle. Massa syötetään perälaatikkoon alle 1 prosentin sakeudessa. Lyhyen kierron tehtävänä on laimentaa konesäiliön massa haluttuun perälaatikkosakeuteen, palauttaa viiraosalta poistunut vesi ja retentoida veden mukana poistunut hienoaines takaisin kartonkirainaan. Tutkittavana kohteena olevan kartonkikone 5:n konesäiliön massan sakeus on noin 3 %. Lyhyen kierron tärkeänä tehtävänä toimii myös puhdistaa massa epäpuhtauksista ja toimia häiriöimpulsseja tasaavana kokonaisuutena ennen perälaatikkoa. Lyhyessä kierrossa lämpöenergiaa kulutetaan höyryn muodossa viirakaivojen vesien lämmitykseen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, p. 125)

### 3.2.3. Viiraosa ja rainanmuodostus

Lyhyen kierron perälaatikkoon halutussa sakeudessa toimitettu massasulppu syötetään perälaatikosta mahdollisimman tasalaatuisena ja flokittoman viiralle. Viiraosan tehtävänä on poistaa mahdollisimman paljon vettä massasulpusta. Viiralle syötettävästä alle prosentin perälaatikkosakeudesta kartonkirainan kuiva-aine nousee viiraosalla enne puristinosaa noin 15–20 prosenttiin. Vesi poistuu suotautumalla viirakudoksen läpi. Viiraosan tehtävänä on myös hajottaa kuituflokkit ja estää uusien kuituflokkien syntymistä aiheuttamalla rainaan tarpeeksi suuria hydrodynaamisia voimia. Tärkeänä tehtävänä viiraosalla on saattaa raina sellaiseen kuiva-ainepitoisuuteen, jotta se siirtyy helposti viiraosalta puristimelle ja puristiosalla ajettavuus on hallittavissa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, p. 131)



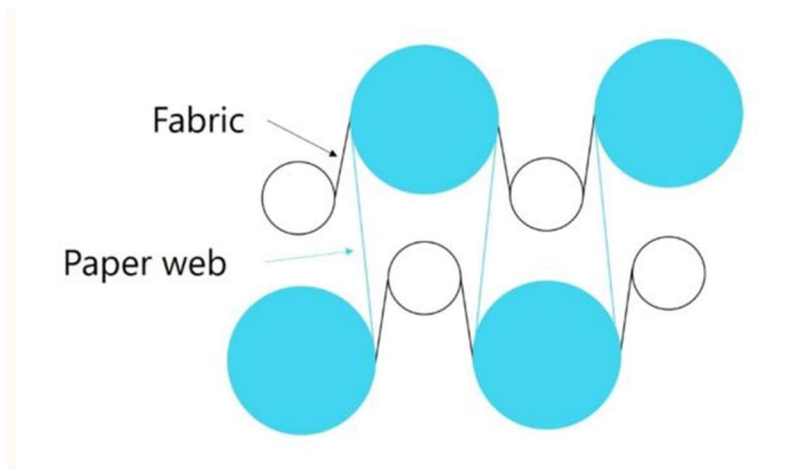
Kuva 5. Kartonkikone 5. (Stora Enso 2022)

### 3.2.4. Puristinosa

Puristinosalla on tärkeä tehtävä rainan kuivatuksessa. Viiraosalta tulevan kartonkirainan kosteus on noin 15–20 % ja puristinosan jälkeen rainan kuiva-aine pitoisuus nousee tasolle 40–55 %. Puristiosan vedenpoisto on huomattavasti vähäisempää, kuin viiraosan vedenpoisto, mutta puristiosalla tapahtuva vedenpoisto on huomattavan tärkeää energiankäytön suhteen. Mitä enemmän vettä poistetaan puristinosalla, sitä vähemmän kuivatusta tarvitaan kuivausosalla, jossa rainan kuivatus tapahtuu höyryn avulla. Vedenpoistoon vaikuttavat useat eri tekijät, joista tärkeimpänä voi mainita viipymääjan nipissä, koneen nopeuden, telojen rakenteet ja lämpötilan. Nykyaikaisissa kartonkikoneissa käytetään yleensä yhtä tai useampaa kenkäpuristinta, joilla suoritetaan suurin vedenpoisto puristinosalla. (Häggblom-Ahnger & Komulainen, 2003, pp. 155, 158-159)

### 3.2.5. Kuivatusosa

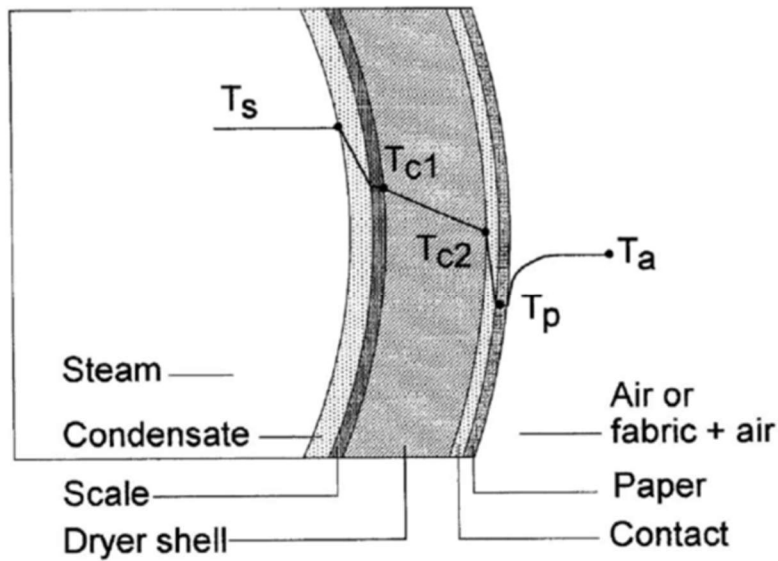
Kuivatusosalla kartonkia kuivataan höyryn avulla. Monisynterikuivatuksessa höyry johdetaan sylintereihin, joita pitkin kartonkiraina kulkee kuivatusviirojen avulla ja näin vesi höyrystyy kartonkirainasta. Raina siirretään kuivatusosalle noin 40–55 % kuiva-aineessa. Alkupäässä märkää rainaa kuivataan pienemillä höyrynpaineilla, kuin kuivatusosan loppupäässä, jotta märkä raina ei palaisi kiinni kuivatussylintereiden pintoihin. Kartonkiraina kutistuu kuivuessaan ja tätä kutsutaan kuivauskutistumaksi, joka tapahtuu lähes kokonaan kuivatusosalla.



Kuva 6. Monisynterikuivatuksen kaksiviiravienti. (ForestBioFacts 2022)

Monisynterikuivatuksessa höyry puhalletaan sylintereihin ja lauhde johdetaan pois sylintereistä sifonien avulla. Sylinteristä poistuu myös höyryä lauhteen mukana ja tätä kutsutaan läpipuhallushöyryksi. Kuivatusosa on jaettu höyryryhmien mukaan, jotka eroavat kuivatusosan käyttöryhmistä. Höyryryhmät jaetaan sen mukaan, miten saadaan optimaalisin kuivatuskapasiteetti kuivatusosalle. Yksi prosentti kuiva-aineessa kasvattaa tai vähentää höyryn kulutusta noin 4 prosenttia kuivausosalla. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, pp. 163-165, 258)

Kuivatussylinderin rakenne on esitetty kuvassa 7. Kuivatuksessa tarvittava lämpöenergia syntyy, kun sylinteriin puhallettu höyry lauhtuu sylinterin sisäpinnalle vapauttaen höyryn sisältämän latenttilämmön. Sylinterin pyöriessä tarpeeksi suurella nopeudella, sylinterissä oleva lauhde kehäytyy ja nousee sylinterin sisäpinnalle koko matkalta. Tämä lauhde toimii eristävänä kerroksena, joka heikentää kuivumista. Kehäytynyttä lauhdetta pyritään hajottamaan lämpölistoilla, jotka sijaitsevat kuivatussylinderin sisäpinnalla. (ForestBioFacts, 2022)



Kuva 7. Lämmön siirtyminen kuivatussylinteristä rainaan. (ForestBioFacts 2022)

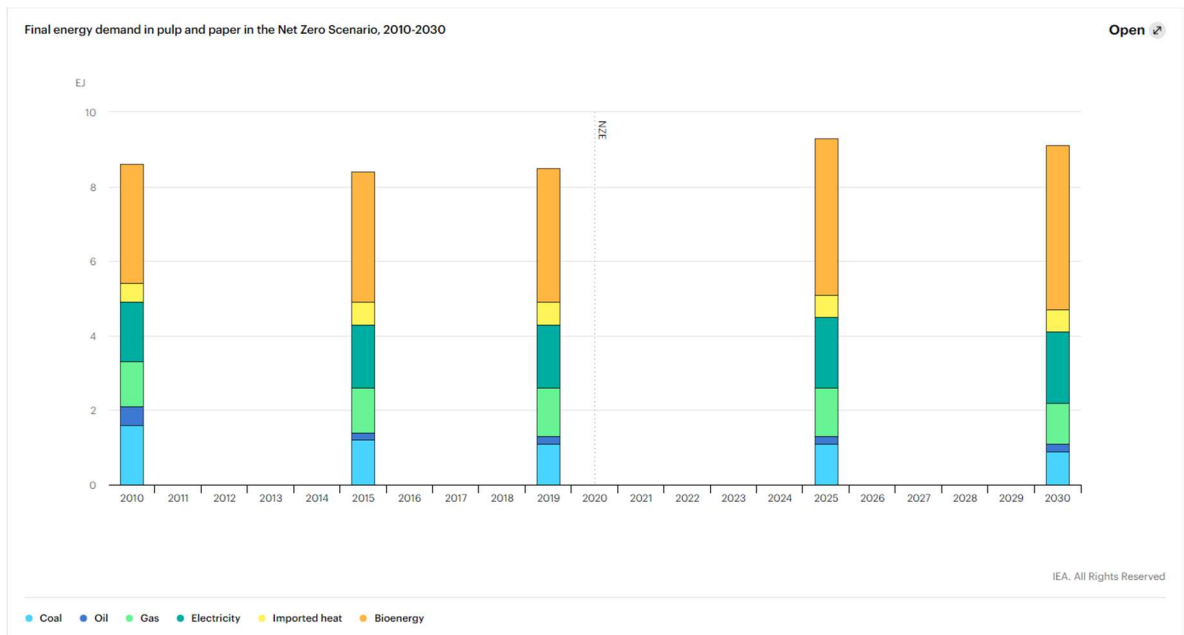
### 3.2.6. Jälkikuivatusosa

Jälkikuivatusosalla kuivataan kartongin tai paperin pigmenttipäällystystä ja pintaliimausta. Päällystykseen ja pintaliimauksen kuivatukseen käytetään joko infrakuivaimia, ilma-kuivaimia tai sylinterikuivausta. Voidaan käyttää myös näiden yhdistelmiä, kuten tutkimuskohteena olevalla kartonkikone 5:llä on jälkikuivaus toteutettu kaas- ja sähköinfoilla, puhalluslaatikoilla ja ilmankääntölaitteella, johon puhalletaan kuumaa ilmaa ja yhdellä höyrylämmitteisellä kuivatussylinterillä. Pigmenttipäällyste alku kuivataan infra-kuivaimilla, jotta estetään päällysteen tarttuminen telojen ja sylinterien pintaan. (Karlsson, 2009, p. 285)

## 4. ENERGIANKÄYTTÖ METSÄTEOLLISUUDESSA

Teollisuus käyttää noin 30 % maailman energiankulutuksesta. Energiaintensiivisenä alana metsäteollisuus kulutti noin 6 % koko maailman teollisuuden energian kulutuksesta ollen viidenneksi suurin ala sementti, kemian ja petrokemian, rauta ja terästeollisuuden jälkeen. (ForestBioFacts, 2022)

Maaailman vuotuinen energian käyttö sellu- ja paperiteollisuudessa kasvoi 0,1 % vuosina 2010–2019. Samalla aikavälillä sellun ja paperin tuotanto kasvoi 0,3 % vuodessa. Tämä osoittaa energian kulutuksen irtaantuneen tuotannon kasvusta. IEA:n nollapäästö (Net Zero Emissions) skenaarion mukaan vuotuinen energiankäytön kasvu on 0,5 % vuoteen 2030 asti, kun taas saman aikavälin sellun ja paperin tuotannon kasvu on 1,5 % vuodessa. Bioenergian yhä suurenevalla käytöllä ja hukkalämmön talteenottotekniikoiden hyödyntäminen on myös tärkeää, jotta nollapäästöt voidaan saavuttaa vuoteen 2050 mennessä. Kuvassa 8 on esitetty sellu- ja paperiteollisuuden energian tarve energialähteittäin kohti 2030 skenaariota. (International Energy Agency, 2022)

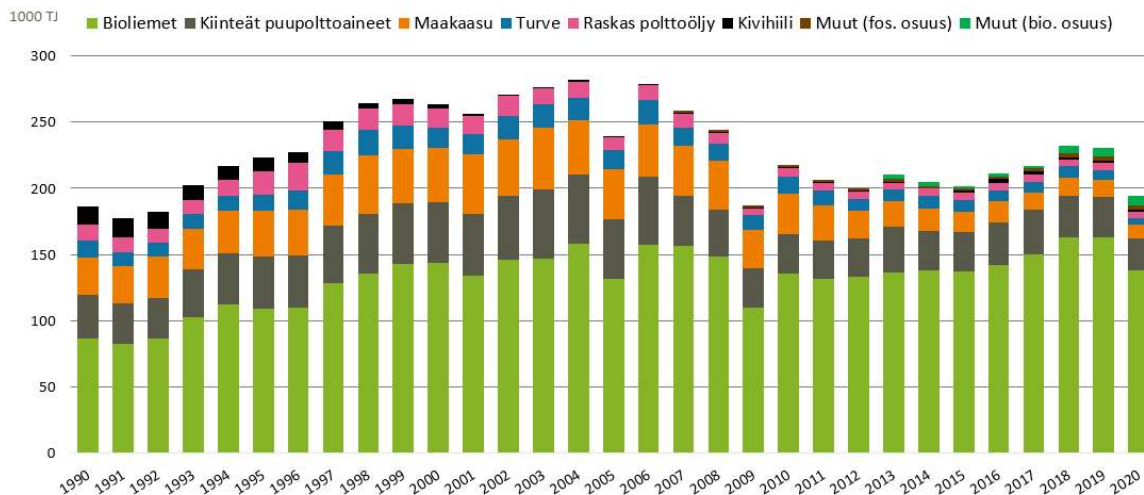


Kuva 8. Sellu- ja paperiteollisuuden energian tarve nollapäästöskenaariossa 2010–2030. (International Energy Agency, 2022)

Sellu- ja kartonkiteollisuus on erittäin omavarainen, johtuen bioenergian käytöstä. Suuri osa bioenergiasta saadaan polttamalla sellun keitossa syntyvä mustalipeä soodakattilassa, jolloin saadaan tuotettua lämpö- ja sähköenergiaa. (ForestBioFacts, 2022)

Suomessa metsäteollisuus on suurin bioenergian tuottaja ja kuluttaja noin 45 % osuudella bioenergian tuotannossa ja kulutuksessa. Kuvassa 19 on esitetty polttoaineiden käyttö suomen metsäteollisuuden tehtaissa vuosina 1990–2020. Kuten kuvasta 9 nähdään, biopolttoaineilla on erittäin suuri osuus verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. (ForestBioFacts, 2022)

## Metsäteollisuuden tehdaspolttoaineet Suomessa 1990-2020



Kuva 9. Metsäteollisuuden tehdaspolttoaineet Suomessa vuosina 1990–2020. (Metsäteollisuus, 2023)

Haasteita tehtaiden energiankulutuksen vertailuun aiheuttaa muuttujat, jotka tuovat epävarmuustekijöitä. Tyypillinen tehdas tuottaa useampaa kuin yhtä paperi- tai kartonkilaatua ja sellutehtaat käyttävät erilaisia puulajeja. Eri tuotteille voidaan tyypillisesti määrittää tietty ominaiskulutus, mutta vuotuinen kokonaiskulutuksen jakautuminen vaihtelee tuotannon mukaan. Kollektiiviset energiankulutuksen mittaukset vaikeuttavat energiankulutuksen kohdistamista eri prosessien kesken, kuten sekundäärilämpöjärjestelmät eri paperikoneiden tai keittimen, pesun ja haihduttamon välillä. Sekundäärilämmön tuotanto voi tapahtua toisessa osastossa ja kulutus toisessa. Tämä aiheuttaa sen, että paikka, jossa sekundäärilämpöä tuotetaan, kuluttaa itse primääri lämpöä ja paikka, jossa sekundäärilämpö käytetään, pystyy vähentämään primäärilämmön käyttöä. Eri osastoja ei ole yleensä rajattu tarkasti ja tämä aiheuttaa oman haasteen raportoinnin suhteen. Tämä koskee etenkin sähkön käyttöä, koska muuntajat eivät ole useimmiten osastokohtaisia, vaan saman muuntajan piirissä voi olla sähköenergiaa kuluttavia laitteita useilta eri osastoilta. Uusissa tehtaissa osastojen rajat ovat yleensä selkeämpiä raportoinnin suhteen energiankulutuksen osalta, mutta vanhojen tehtaiden modernisointi yleensä hämärtää rajoja entisestään.

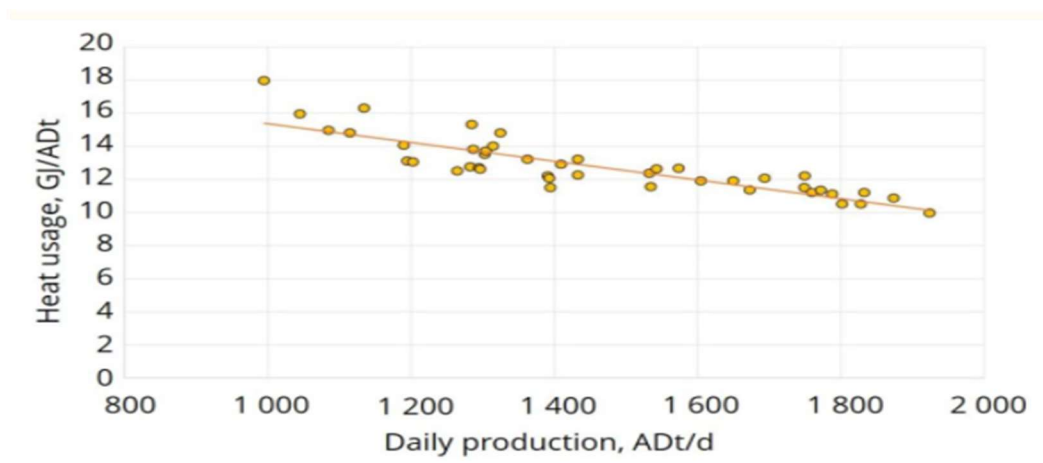


Omat haasteet energiankulutuksen tarkkaan mittaamiseen tuovat tehtaiden erityyppiset mitaus- ja kirjanpitojärjestelmät, joiden tarkkuus ja luotettavuus asettavat omia haasteita. Yleisesti ottaen tehtaan sisällä tuotetun ja itse kulutetun energian mittaamista ei yleensä pidetä yhtä tärkeänä, kuin ulkopuolelta tuodun energian mittaamista. Etenkin vanhemmilla tehtailla motivaatio datan keräämisen energian osalta puuttui usein. Edellä mainitut tekijät voivat johtaa mahdollisesti vääriin tuloksiin energiaraportoinnissa. Annettua dataa tulee tarkastella myös kriittisesti. Energiatehokkuutta on yleensä ollut tapana verrata primäärienergian kokonaiskulutuksen ja tuotannon mukaan. Tämä tapa antaa keskenään vertailukelpoisia tuloksia. Kirjanpitotilastot ja näiden järjestelmien puutteet liittyen energiaraportointiin voidaan vahvistaa esimerkiksi tehdas auditoinnilla. (Vakkilainen & Kivistö, 2017, pp. 87-88)

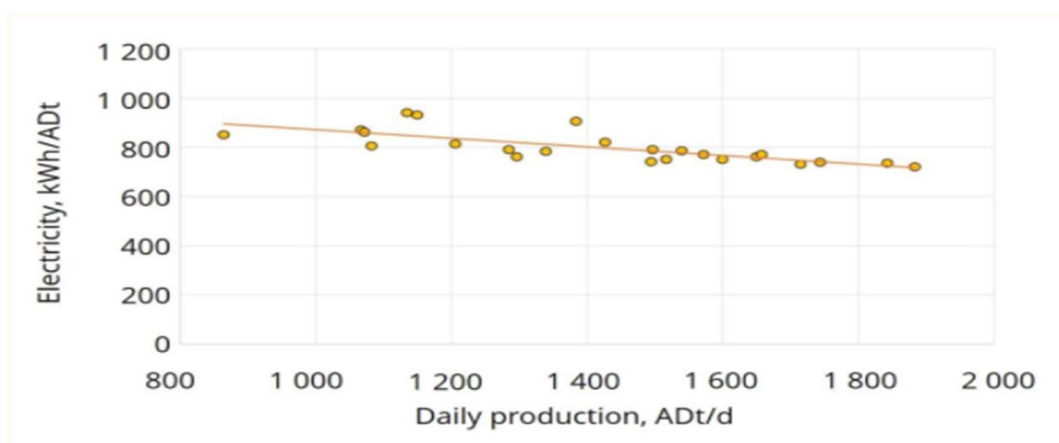
#### 4.1. Kuitulinjan energiankulutus

Yleisesti ottaen selluntuotannon ominaisenergiankulutus koostuu monesta eri tekijästä, kuten mitä sellua tuotetaan ja millä prosesseilla, mikä on laitoksen koko ja sijainti. Lisäksi vaikutusta on myös käytetyllä teknologialla, tehtaan teknisellä iällä, raaka-aineiden laadulla, polttoaineiden hinnalla, laitoksen kapasiteetin käyttöasteella, integraatitasolla, ilmasto-olosuhteilla ja kuinka yrityksen johto kiinnittää huomiota energiatehokkuusasioihin. Sellutehtaan koolla on suuri vaikutus ominaisenergiankulutukseen ja suuren tuotantokapasiteetin tehtaot ovat yleisesti ottaen energiatehokkaampia, kuin pienemmät tehtaot. Myös tehtaot tekninen ikä vaikuttaa energiatehokkuuteen, koska uudemmilla laitteilla päästään pienempään ominaisenergiankulutukseen, kuin vanhemman tekniikan laitteilla.

Tuotantokapasiteetin taso vaikuttaa ominaisenergiankulutukseen, koska energiankulutusta on myös ilman tuotantoa ja matalan tuotannon aikana. Ominaisenergiankulutus laskee tuotannon kasvaessa, tämä on esitetty lämpö- ja sähköenergian osalta kuvissa 10 ja 11. (ForestBioFacts, 2022)



Kuva 10. Lämpöenergian ominaiskulutus päivittäisen tuotannon funktiona. (Vakkilainen & Kivistö, 2010)



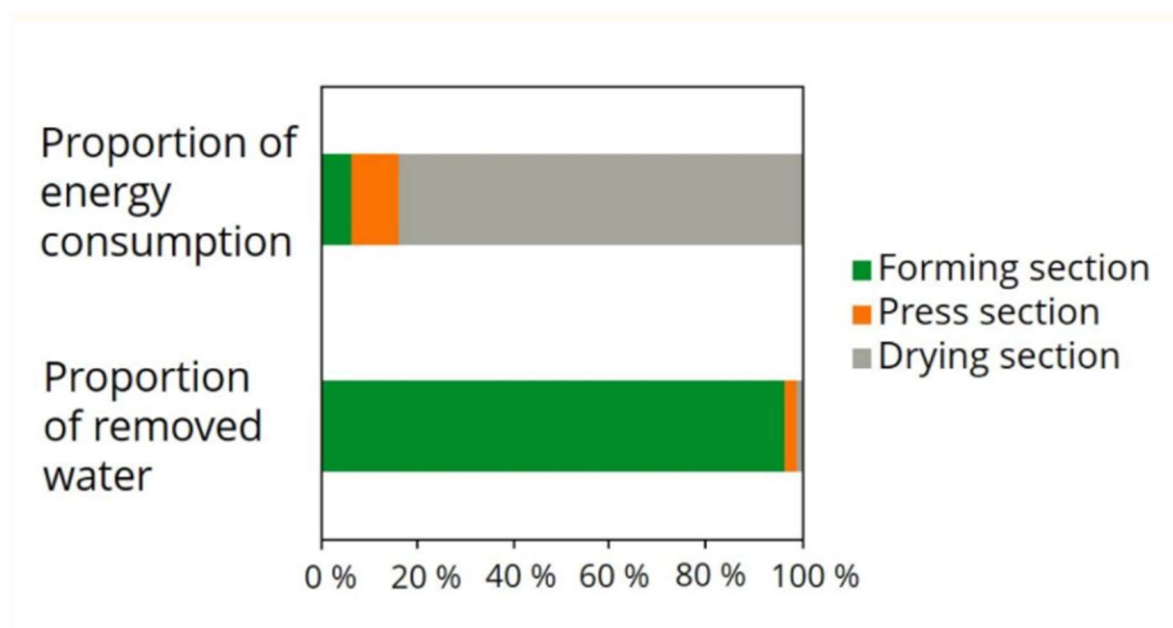
Kuva 11. Sähköenergian ominaiskulutus päivittäisen tuotannon funktiona. (Vakkilainen & Kivistö, 2010)

Sähkö- ja lämpöenergian ominaiskulutukset ovat parhaalla tasolla, kun tuotantonopeus on suunnitellulla optimitasolla. Kemiallisen sellun valmistuksessa lämpöenergiaa käytetään erilaisten nesteiden lämmittämiseen ja höyrystämiseen sekä kiihdyttämään ja kontrolloimaan kemiallisia reaktioita. Sähköenergiaa käytetään pumppaamiseen. (Vakkilainen & Kivistö, 2017, p. 90)

#### 4.2. Kartonkikoneen energiankulutus

Vuonna 2015 nestepakkauskartongin valmistuksen ominaisenergiankulutuksesta lämpöenergian kulutus on ollut 4,4 GJ/t ja sähköenergian kulutus 570 kWh/t. (Pöyry, 2016)

Kartonkikoneen vedenpoistosta suurin osa tapahtuu viiraosalla, kun taas huomattavasti suurin osa energiankulutuksesta tapahtuu lämpöenergiaa kuluttavalla kuivausosalla. Kuvassa 12 nähdään, kuinka paperikoneen vedenpoisto ja energiankulutus jakautuu viiraosan ja kuivausosan suhteen. Samaa voidaan verrata myös kartonkikoneeseen.



Kuva 12. Vedenpoiston ja energiankulutuksen jakautuminen viira-, puristin-, ja kuivausosan välillä. (ForestBioFacts, 2022)

Kartongin- ja paperinvalmistuksen ominaisenergiankulutukseen vaikuttaa suuresti, mikä on tuotettava tuote. Tämä käy ilmi Jobien Laurijssenin tutkimuksesta, jossa tutkittiin kartonki- ja paperikoneiden energiankulutusta. Laurijssenin tutkimuksen mukaan kartonkikoneiden energiankulutus jakautui seuraavasti massankäsittelyn 1,0 GJ/t, viira- ja puristinosan 1,5 GJ/t, kuivausosan 4,8 GJ/t, ja muiden prosessien 0,3 GJ/t kesken. (Laurijssen, 2013)

Massankäsittelyssä pulpperointiin kulutetaan sähköenergiaa jopa 30 kWh/t. Suurin osa sähköenergiasta massankäsittelyssä kulutetaan jauhatukseen. Jauhatuksessa sähköenergiaa kuluttaa jauhimen moottori, joka pyörittää terää. Jauhatuksen energiankulutus riippuu jauhetavasta massasta ja vaaditusta jauhatuksen tasosta. Viira- ja puristinosalla suurimpia

sähköenergian kuluttajia ovat sähkökäytöt sekä alipainejärjestelmän imupumppujen sähkömoottorit. Kuivatusosalla suurin osa energiankulutuksesta on lämpöenergiaa, jota käytetään kartongin kuivatukseen höyryn avulla. (Suhr, et al., 2015, p. 690)

Maakaasua ja sähköenergiaa kulutetaan esimerkiksi pinta- ja taustaliimauksen kuivatukseen, sekä päällystyksen kuivatukseen. Nykyaikaisilla puhalluslaatikoilla voidaan saada aikaan huomattavia energiansäästöjä ja pienennettyä hiilidioksidipäästöjä verrattuna vanhoihin infrakuivaimiin. (Valmet, 2022)

## 5. TAINION KUITULINJAN ENERGIAN KÄYTTÖKOHTEET

Tässä kappaleessa tarkastellaan Tainion kuitulinjan energiankäyttöä kolmessa eri muodossa. Ensin tarkastelussa on höyryn käyttö, mistä keittämön osuus on suurin tarkasteltaessa kuitulinjan kokonaisuutta kolmessa osassa, joita ovat keittäminen, pesemö ja lajittamo. Seuraavaksi sähkönkulutus, josta muun muassa pesuvaiheen kuumajauhatuksella on suuri rooli ja viimeisenä tarkastellaan maakaasun kulutusta, jonka käyttökohde on hajukaasupoltin. Hajukaasupolttimella poltetaan haitalliset sellun valmistuksessa vapautuneet VOC- ja TRS- yhdisteet. VOC- yhdisteillä tarkoitetaan lauhtumattomia hiilivetyjä ja TRS- yhdisteillä rikkiä sisältäviä VOC- yhdisteitä. Tainion hajukaasupolttimella poltetaan stripperikaasut, keittämökaasut ja laimeat hajukaasut, mitkä kerätään talteen prosessin erivaiheista. (KnowPulp, 2022)

### 5.1. Höyryn käyttö

Tainion sellutehtaan kuitulinja on kahdeksan keittimien eräkeittäminen. Keittimien keittonesteen lämmitys tapahtuu kalorisaattorissa. Kalorisaattori toimii lämmönvaihtimena, jossa höyry luovuttaa lämpöenergiaa kierrätettävään keittonesteeseen ja näin ylläpidetään haluttua keittolämpötilaa yllä keittokattilassa. Keittäminen käyttää välipainehöyryä, jonka paine on noin 10 bar. Kun keitossa on saavutettu haluttu taso, keitto pusketaan puskusäiliöön, eli keitin tyhjennetään massasta sekä keittonesteestä. Tässä vaiheessa höyryn sisältämällä lämpöenergialla noin 170 °C lämmitetty massa sekä keittoneste siirtyy puskusäiliöön. Puskun yhteydessä paineen laskiessa keittonestettä höyrystyy ja tästä otetaan lämpöä talteen puskuhöngänlauhduttimella. Puskuhöngänlauhduttimeen johdetaan raakavettä, jonka puskuissa vapautuneet höngät lämmittävät ja näin saadaan lämmintä sekä kuumaa vettä sellutehtaan prosessien tarpeisiin. Matalapainehöyryä Tainion sellutehtaan kuitulinjalla käytetään kuumaveden valmistukseen ja strippauskolonnille. Strippauskolonni rajataan tämän tutkimuksen ulkopuolelle, jotta tutkimuksen laajuus kestää sille asetetuissa tavoitteissa.

## 5.2. Sähkön käyttö

Sähköenergian kulutustietoja saadaan tehtaan omasta SYKE- järjestelmästä. Tainionkosken sellutehdas on jaettu edellä mainitussa sykejärjestelmässä neljään eri kulutuskohteeseen, joita ovat puunkäsittely, keittämö, pesu ja lajittelu sekä paalimassa, jolla tarkoitetaan pulperiasemaa. SYKE- järjestelmästä saataviin sähköenergian kulutuslukemiin tulee suhtautua varauksella, koska sähkönsyöttöä voi tapahtua myös SYKE- järjestelmään tapahtuvan raportoinnin ohi.

Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty kuitulinjan sähköenergian käytön jakautuminen kuukausitasolla vuonna 2020. Kuten taulukosta nähdään, suurin osa kuitulinjan sähköenergian kulutuksesta käytetään massan pesuun ja lajitteluun. Pesussa ja lajittelussa tapahtuu paljon pumppausta, johon kuluu sähköenergiaa sekä pesureiden välissä massa myös kuumajauheetaan ja tämä kuluttaa sähköenergiaa. Kuumajauhinten nykyisellä ajomallilla energian ominaiskulutus on n. 20 kWh/t.

Taulukko 1. Kuitulinjan kuukausitason sähkönkulutus osastoittain vuonna 2020

Kuukausi	Puunkäsittely [MWh]	Keittämö [MWh]	Pesu ja lajittelu [MWh]	Paalimassa [MWh]	Sellutehdas yhteensä [MWh]
Tammikuu 2020	743	594	3132	1154	<b>5623</b>
Helmikuu 2020	568	359	1719	753	<b>3399</b>
Maaliskuu 2020	1281	725	3765	1264	<b>7035</b>
Huhtikuu 2020	754	811	3382	1129	<b>6076</b>
Toukokuu 2020	644	803	3308	1008	<b>5763</b>
Kesäkuu 2020	535	847	3547	1172	<b>6101</b>
Heinäkuu 2020	651	778	3319	1075	<b>5824</b>
Elokuu 2020	654	860	3587	1057	<b>6158</b>
Syysky 2020	397	439	1655	745	<b>3236</b>
Lokakuu 2020	451	564	2164	911	<b>4090</b>
Marraskuu 2020	487	613	2309	982	<b>4392</b>
Joulukuu 2020	611	830	3371	1245	<b>6057</b>

### 5.3. Maakaasun käyttö

Maakaasua Tainion sellutehtaan kuitulinjalla käytetään hajupolttimessa, jossa poltetaan muun muassa haju- ja rikkiyhdisteitä. Nykyisellään hajukaasupolttimessa poltetusta maakaasusta ei oteta lämpöä ollenkaan talteen. Hajukaasupoltin on tärkeässä roolissa, jotta haju- ja rikkiyhdisteet saadaan poltettua, eikä niitä lasketa ympäristöön. Kuitenkin hajukaasupolttimessa poltettavan maakaasun sisältämän lämpöenergian talteenotto olisi mielenkiintoinen ratkaisu.

## 6. KARTONKIKONE 5 ENERGIAN KÄYTTÖKOHTEET

Kartonkikone 5:llä ruskea massa runko- ja taustakerrokseen pumpataan sellutehtaalta massatorneista. Sellutehdas sijaitsee noin 100 metrin päässä kartonkikoneen viiraosasta. Pintamassa, joka on valkaistua lyhytkuituista lehtipuusellua, pulpperoidaan ja pumpataan noin 400 metrin päässä sijaitsevalta pulpperiasemalta kartonkikoneen määräsäpäässä sijaitsevaan koivumassatorniin.

Massatorneista massa pumpataan kunkin kolmen kerroksen osilta omiin jauhatussäiliöihin, jonka jälkeen massa jauhetaan ennen lyhyttä kiertoa. Jauhatuksen jälkeen lyhyestä kierrosta massa syötetään kerroksittain perälaatikoiden kautta viiraosalle. Viiraosalla pinta- runko-, ja taustakerrokset yhdistetään huopautuksessa toisiinsa. Huopautuksen jälkeen kolme kerrosta on yhdessä ja kartonkirata jatkaa kohti puristinosaa, jossa suurin osa vedenpoistosta tapahtuu 2. puristimen kenkäpuristimella. Puristinosalta kartonkirata siirtyy kuivatusosalle, joka koostuu viidestä eri käyttöryhmästä ja 78 kuivatussylinteristä. Kuivatusosan jälkeen rata kulkee 1. kalanterille, kahdelle päällystysasemalle ja 2. kalanterin kautta rullaimelle, jossa koverulla rullataan haluttuun halkaisijaan ennen pituusleikkurille siirtoa.

### 6.1. Höyryn käyttö

Höyryn sisältämää lämpöenergiaa kartonkikoneella käytetään pääasiassa kartongin kuivaamiseen kuivatusosalla. KA 5:n kuivatusosalla on 78 kuivatussylinteriä, joiden höyrynpaineet vaihtelevat esiryhmän 90 kPa:n ja höyryryhmä 2:n 770 kPa:n välillä. Kuivatusosa koostuu viidestä käyttöryhmästä, joissa on kaksiviiravienti, eli omat kuivatusviirat ylä- ja alakuivatussylintereille. ja viidestä höyryryhmästä. Höyry- ja käyttöryhmät eivät ole sama asia vaan käyttöryhmillä tarkoitetaan ryhmiä, joita voidaan ajaa halutulla nopeudella ja höyryryhmät menevät höyrynpaineiden mukaan ja niitä voidaan ajaa halutulla höyrynpaineella, joka vaikuttaa kuivatussylinterin pinnan lämpötilaan. Höyryryhmät on jaoteltu puristinosalta alkaen KA 5:llä esiryhmiin 1 ja 2, hönkäryhmään, höyryryhmiin 2 ja 3. Höyryä käytetään myös kalanterintelojen lämmitykseen. 5 bar matalapainehöyryä käytetään viirakaivojen vesien lämmitykseen. Kuivatusosalla käytettyä lämpöenergiaa otetaan talteen



lämmöntalteenottotorneista, joista kuivatusosan kuuma ja kostea ilma johdetaan ulos. Lämmöntalteenottotorneilla lämmitetään vesiä prosessin eri tarpeisiin.

## 6.2. Sähkön käyttö

Sähköenergiaa kuluttaa sähkökäytöt, joilla saadaan muun muassa viira-, puristin- ja kuivausosa pyörimään, jauhimien sähkömoottorit ja alipainejärjestelmän imupumput. Kartonkikone 5:llä pintakerrokselle on neljä kartiojauhinta, joista kolme on ajossa ja yksi varalla. Runko- ja taustakerroksen massan jauhatusta suoritetaan kahdella kartiojauhimella yhden ollessa varalla. Viira- ja puristososan tyhjöä saadaan aikaan kahdeksalla imupumpulla, joista seitsemän toimii suorilla sähkökäyttöillä ja yhdessä on taajuusmuuttaja- ohjaus.

Taulukossa 2 on esitetty tehtaan SYKE- järjestelmästä saatava kartonkikone 5:n sähkönkulutus massankäsittelyn ja muun koneen osalta. Massankäsittelyn kulutuksesta suurin osa kuuluu jauhinten sähkömoottorien pyörittämiseen. Kuten taulukosta nähdään, sähköenergian kulutus jakautuu melko tasan massankäsittelyn ja muun koneen osalta. SYKE- järjestelmästä saataviin sähköenergian kulutuslukemiin tulee suhtautua varauksella, koska sähkönsyöttöä voi tapahtua myös SYKE- järjestelmään tapahtuvan raportoinnin ohi.

Taulukko 2. Kartonkikone 5:n kuukausitason sähkönkulutus osastoittain vuonna 2020.

Kuukausi	Kartonkikone 5 massankäsittely [MWh]	Kartonkikone 5 [MWh]	Kartonkikone 5 yhteensä [MWh]
Tammikuu 2020	4081	3116	<b>7197</b>
Helmikuu 2020	1994	1823	<b>3817</b>
Maaliskuu 2020	4267	3974	<b>8241</b>
Huhtikuu 2020	3853	4764	<b>8617</b>
Toukokuu 2020	3624	4473	<b>8097</b>
Kesäkuu 2020	4383	4854	<b>9237</b>
Heinäkuu 2020	3925	4368	<b>8293</b>
Elokuu 2020	4194	4535	<b>8728</b>
Syyskyy 2020	2165	2450	<b>4614</b>
Lokakuu 2020	2856	3164	<b>6020</b>
Marraskuu 2020	2886	2991	<b>5877</b>
Joulukuu 2020	4292	4567	<b>8859</b>

### 6.3. Maakaasun käyttö

Maakaasua kartonkikoneella käytetään jälkiryhmällä päällysteen kuivaamiseen kaasuinfra-kuivaimilla, taustaliimauksen kuivattamiseen kaasuinfrakuivaimella, ilmankäntölaitteen puhallusilman lämmittämiseen kaasupolttimella ja puhalluslaatikoiden puhallusilman lämmittämiseen kaasupolttimella.

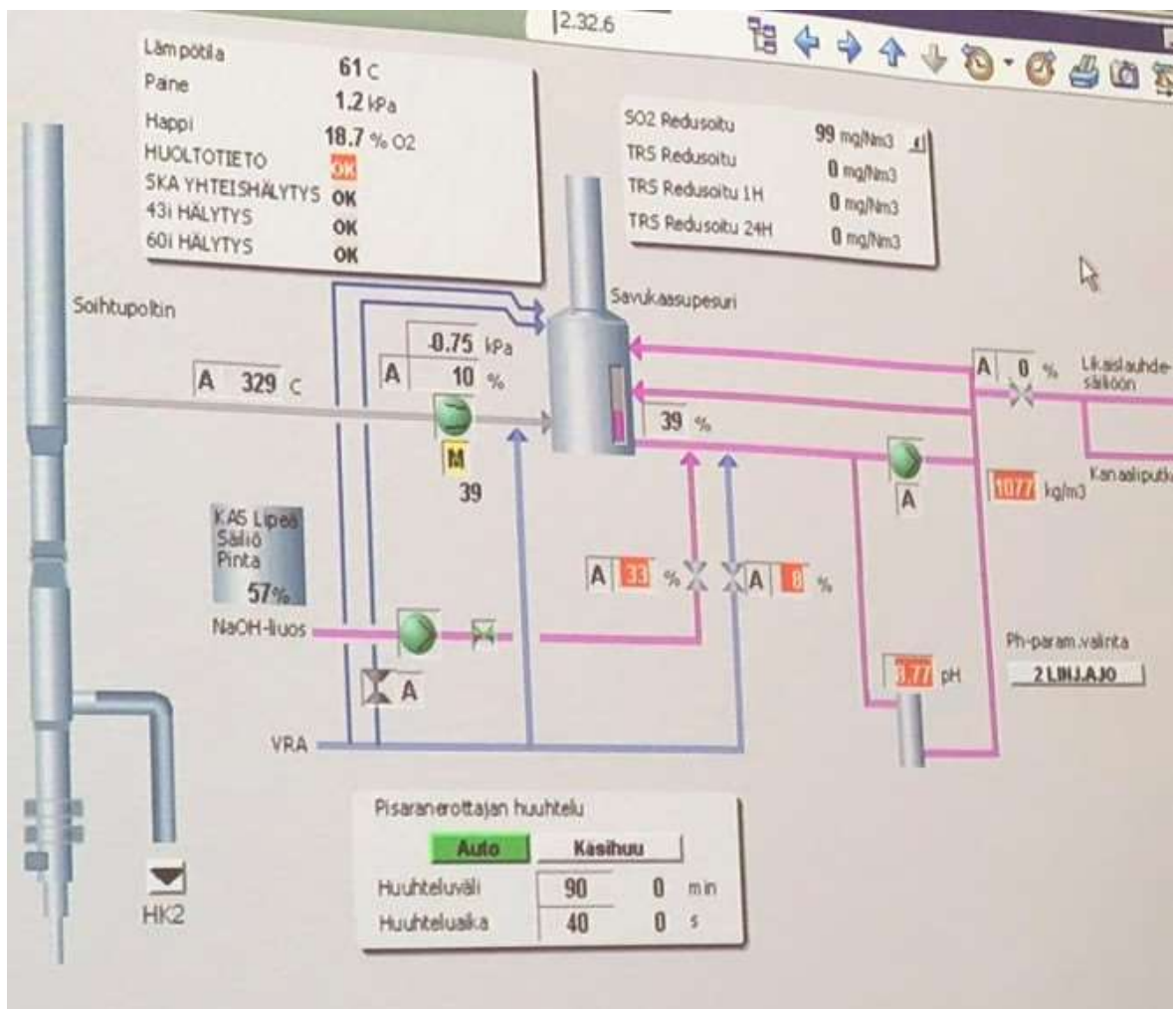
## 7. ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISEEN OHJAA- VAT TEKIJÄT

Energiatehokkuusanalyysit voivat auttaa merkittävästi parantamaan sellu- ja kartonkitehtaan energiatehokkuutta ja sitä kautta vähentämään CO<sub>2</sub>- päästöjä sekä energiakustannuksia. Ominaisenergiankulutuksen tarkasteluun ohjaa niin direktiivit, asetukset kuin sopimukset. Energiatehokkuuslaki velvoittaa suuryritykset tekemään energiakatselmuksen neljän vuoden välein, millä tarkastellaan yrityksen energiankulutusprofiilia ja saadaan tietoa mahdollisista energiatehokkuustoimenpiteistä. Ominaisenergiankulutusta pienentävillä energiatehokkuustoimilla säästetään ennen kaikkea luontoa ja ympäristöä ja se onkin merkittävä tekijä myös ilmastonmuutoksen torjunnassa. Pyrkimyksenä myös tällä tutkimuksella on kertoittaa mahdollisuuksia vähentää fossiilisten polttoaineiden, etenkin maakaasuun käyttöä, jolloin hiilidioiksidipäästöjä saataisiin alemmalle tasolle per tuotettu kartonkitonni. Tulevaisuudessa yhä nousevat polttoaineiden ja sähkön hinnat nostavat myös teollisuuden energiakustannuksia, joka nostaa energiankulutuksen yhä suurempaan rooliin. (Kuisma, et al., 2004)

## 8. POTENTIAALISET ENERGIAN SÄÄSTÖKOHTEET KUITULINJALLA

### 8.1. Hajukaasupolttimen savukaasujen lämmöntalteenotto

Tainionkosken sellutehtaan savukaasupesurissa hajukaasujen pesu tapahtuu savukaasupesurissa syntyvän lauhteen ja natriumhydroksidin (NaOH) eli lipeä liuoksen avulla. Tästä syystä savukaasujen lämmöntalteenottoa ei voida tehdä savukaasupesurin lauhteista. Lauhteista lämpöä talteen otettaessa johdetaan savukaasut pesuvaiheen jälkeen lauhduttimeen, jossa savukaasut luovuttavat lämpöenergiansa vastavirtaan valuvaan kiertoveteen. Kiertovesi eli muodostunut lauhde johdetaan lämmönvaihtimelle ja sitä kautta talteen otettu lämpöenergia saadaan hyödynnettyä haluttuun kohteeseen. (Järvenreuna & Nummila, 2020) Tainionkosken sellutehtaan savukaasupesurin prosessikaavio on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Savukaasupesurin toimintakaavio (Tuotannonohjausjärjestelmä DNA)

### 8.1.1. Lämmöntalteenotto savukaasuista

Nykytilanteessa hajukaasupolttimen savukaasujen lämpötila tulipesän jälkeen on noin 1000 °C. Savukaasut jäädytetään puhaltamalla niihin ilmaa, jolloin savukaasut jäähtyvät noin 400 °C. Savukaasupesurin toiminnan kannalta optimilämpötila savukaasuille on 400 °C. Liian alhaisessa lämpötilassa haitalliset yhdisteet eivät puhdistu savukaasuista ja liian kuumat savukaasut voivat vaurioittaa savukaasupesuria. Yli 400 °C savukaasut ohjataan suoraan ulos, jolloin syntyy hajuhaittoja ympäristöön.

Nykytilanteessa hajukaasupolttimessa poltetun maakaasun energiasisältöä ei hyödynnetä millään tavalla. Maakaasun energiasisältö vapautuu hajukaasujen poltossa ja vapautuvan lämpöenergian talteenotto savukaasuista on nykytilanteessa hyödyntämättä. Nykytilanteessa

savukaasujen jäähtymiseen kuluu sähköenergiaa, koska puhaltimen sähkömoottori vaatii sitä.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka paljon (l/s) ja mihin lämpötilaan vettä voidaan lämmittää hajukaasupolttimen savukaasuista talteen otetulla lämpöenergialla. Tavoitteena veden lämpötilaksi on 75–90 °C. Tällä vedellä olisi tarkoitus lämmittää sellutehtaan lämmin- ja/tai kuumavesisäiliön vettä, joita nykytilanteessa lämmitetään puskusäiliön lauhdelämmöllä ja höyryllä. Säästöä voisi syntyä, jos hajukaasupolttimen savukaasuista talteen otetulla lämmöllä voitaisiin vähentää tai jopa lopettaa höyryn käyttö lämmin- ja kuumavesisäiliöiden veden lämmityksessä.

Savukaasujen lämmönsiirto-ominaisuuksista tärkeimpiä ovat ominaislämpö, lämmönjohtavuus, tiheys ja viskositeetti. Näitä arvoja tarvitaan lämpö- ja virtausteknisiä laskuja varten. Savukaasujen aineominaisuuksien määrittäminen on kyettävä tekemään, jotta saadaan tarkasteltua savukaasujen lämmönsiirto-ominaisuuksia, koska ne ovat eri suuria johtuen toisiinsa sekoittuneista kaasuista, joita savukaasut ovat. (Huhtinen, et al., 2000, p. 96)

Lämmön talteenotto toteutettaisiin todennäköisemmin lämmönvaihtimen avulla, jolloin lämpöenergia siirtyy savukaasuista veteen lämmönvaihtimessa. Tässä työssä ei tarkastella teknisiä ratkaisuja syvällisemmin.

### 8.1.2. Savukaasujen sisältämä lämpöenergia

Hajukaasupolttimessa poltetut määrät saatiin Stora Enson omasta järjestelmästä. Sellutehtaan normaalin ajotilanteen ollessa päällä saatiin taulukon 1 mukaiset arvot. Arvot on saatu Pöyry Oy:n tekemästä päästömittausraportista, mittaukset on tehty 14.01.2019. Taulukossa 3 on esitetty hajukaasupolttimessa poltettavat hajukaasut ja maakaasu sekä niiden tilavuusvirrat.

Taulukko 3. Kaasut ja kaasujen tilavuusvirrat

Kaasu	Tilavuusvirta [Nm <sup>3</sup> /s]
Stripperikaasu	0,074
Keittämökaasu	0,110
Maakaasu	0,018
Laimea hajukaasu	2,020

### 8.1.3. Polttoaineen kattilaan tuoma energia

Maakaasun massavirta saadaan kertomalla tilavuusvirta tiheydellä. Maakaasun tiheys on 0,72 kg/m<sup>3</sup> ja maakaasun tehollinen lämpöarvo 50 MJ/kg. (Alakangas, et al., 2016, p. 188)

Maakaasun massavirta saadaan kaavasta 1.

$$m = \rho \cdot q_v \quad (1)$$

missä

$m$  = massavirta [kg/s]  
 $\rho$  = tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $q_v$  = tilavuusvirta [m<sup>3</sup>/s]

Edellä mainitulla kaavalla 1 maakaasun massavirraksi saadaan

$$m = 0,72 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$m = 0,01296 \text{ kg/s}$$

Maakaasun massavirrasta ja tehollisesta lämpöarvosta saadaan laskettua kattilaan tuotu polttoainemassavirrasta riippuva energia kaavalla 2.

$$Q_{tuotu} = mH \quad (2)$$

missä

$Q_{tuotu}$  = polttoaineen lämpöteho

$m$  = polttoaineen massavirta

$H$  = polttoaineen tehollinen lämpöarvo

Kaavalla 2 laskettu kattilaan tuotu polttoaineen lämpöteho on

$$Q_{tuotu} = 0,01296 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{tuotu} = 0,648 \text{ MW} = 648 \text{ kW}$$

#### 8.1.4. Savukaasujen jäähdytysilman energia

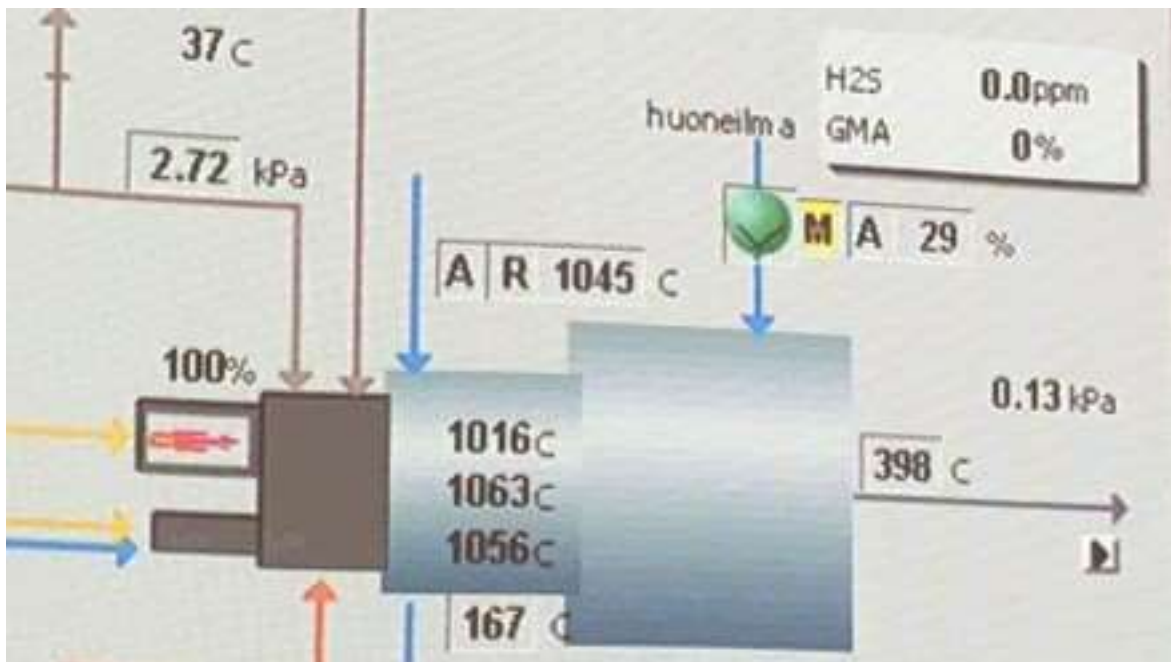


Savukaasujen jäähdytysilmapuhaltimen puhallintiedot käyvät ilmi kuvasta 14. Tiedot on saatu puhaltimen toimittajalta.

KSMB-071-7-LG 330 D1170	18.9.2002
T3227131	
Keskipakoispuhallin	
Tunnus: Pos 2. Työnumero 221	
Moottori	taajuusmuuttajakäyttöön
Moottori	ABB M3 BP 280 SMA
Moottori	vahvennettu eristys
Moottori	75 kW 1500 rpm 400/690V 50 Hz
Vastalaippa, paineaukko	x
Nesteenpoistoyhde	x
Akselitivist	teflonrengas
Tärinävaimentimet	x
Tarkastusluukku	pintaluukku
Imukartio suojaverkolla	x
Käyttö	joustava kytkin
Materiaali	Fe
Pintakäsittely	E180/3
Pintakäsittely	värisävy RAL 5024
Tiheys kg/m <sup>3</sup>	1.182
Kierrosluku 1/min	1602
Tilavuusvirta m <sup>3</sup> /s	9.82
Kok. paineen korotus Pa	5127
Akseliteho kW	59.72

#### Kuva 14. Savukaasujen jäähdytysilmapuhallin

Kuvassa 15 on esitetty prosessikaavion osa, jossa näkyy savukaasujen lämpötilat ja savukaasujen jäähdytysilmapuhaltimen käyntitiedot. Kuvasta nähdään, kuinka savukaasut jäähtyvät noin 1000 °C noin 400 °C jäähdytysilman vaikutuksesta. Puhaltimen tilavuusvirta saadaan laskettua, kun tiedetään puhaltimen maksimi tilavuusvirta 9,82 m<sup>3</sup>/s kuvasta 14 ja käyntitieto 29 % kuvasta 15. Jäähdytysilman tilavuusvirta on näin ollen 0,29 \* 9,82 m<sup>3</sup>/s, joka on 2,85 m<sup>3</sup>/s. Massavirta saadaan kertomalla tilavuusvirta tiheydellä, 2,85 m<sup>3</sup>/s \* 1,2 kg/m<sup>3</sup>, joka on 3,42 kg/s.



Kuva 15. Prosessikaavion osa savukaasuista ja savukaasujen jäähdytysilmapuhaltimesta.

Tarkasteltaessa jäähdytysilmapuhaltimen ilmavirtaa saadaan laskettua savukaasujen ilmavirrasta ottama energia, jolloin ilman lämpötila nousee  $20\text{ °C} \rightarrow 400\text{ °C}$  ja savukaasut jäähtyvät  $1000\text{ °C} \rightarrow 400\text{ °C}$ . Jäähdytysilman energia saadaan laskettua kaavasta 3. (Huhtinen, et al., 2000, p. 102)

$$Q_{j,i} = m_{j,i} \cdot c_{p,j,i} \cdot (t - t_0) \quad (3)$$

missä

$Q_{j,i}$  = Ilman savukaasuihin tuoma energiavirta

$m_{j,i}$  = jäähdytysilman massavirta [kg/s]

$c_{p,j,i}$  = jäähdytysilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

$t$  = savukaasujen lämpötila [°C]

$t_0$  = jäähdytysilman lämpötila [°C]

$$Q_{j,i} = 3,42 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (400 - 20)\text{°C}$$

$$Q_{j,i} = 1300 \text{ kW}$$

### 8.1.5. Savukaasujen jäähdytysilman korvaaminen vedellä

Tarkastellaan savukaasujen jäähdytysilman korvaamista vedellä. Jäähdytysilman energiovirta on 1300 kW. Jos tämä sama tehtäisiin vedellä, saadaan kaavasta 2 johdettua veden massavirta, kun tiedetään veden ominaislämpökapasiteetti  $c_{p,v}$ , lämpötilaero  $\Delta T$  ja lämpöteho  $Q_v$ . Lasketaan massavirta tilanteessa, jossa vesi lämmitetään savukaasuilla  $40^\circ\text{C} \rightarrow 90^\circ\text{C}$ .

$$Q_v = m_v \cdot c_{p,v} \cdot (t - t_0) \quad (3)$$

Tästä saadaan johdettua veden massavirta  $m_v$  kaavalla 4.

$$m_v = \frac{Q_v}{c_{p,v} \cdot (t - t_0)} \quad (4)$$

missä

$m_v$  = veden massavirta [kg/s]

$Q_v$  = lämpöteho [kW]

$C_{p,v}$  = veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

$t$  = meno lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

$t_0$  = paluu lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

$$m_v = \frac{1300 \text{ kW}}{4,2 \text{ kJ/kgK} \cdot (90^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})} \quad (4)$$

$$m_v = 6,19 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Veden tiheyden ollessa noin  $1000 \text{ kg/m}^3$  saadaan tilavuusvirraksi noin  $6,2 \text{ l/s}$ .

#### 8.1.6. Tulosten tarkastelu

Hukkalämpöä saadaan noin  $1300 \text{ kW}$  verran ja tämä olisi hyödynnettävissä veden lämmitykseen. Teknisinä vaihtoehtoina voisi toimia tulitorvi-tuliputkikattila tai lämmönvaihdin. Tulitorvituliputkikattilalla voitaisiin tehdä välipaine- tai matalapainehöyryä. Lämmönvaihtimella voitaisiin tuottaa kuumaa vettä, noin  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , jota voidaan käyttää kuuma- tai lämmin- vesisäiliön veden lämmittämiseen. Energiatohokkuuden kannalta ajateltuna olisi järkevää hyödyntää hajukaasupolttimen savukaasujen hukkalämpö, koska nykytilanteessa maakaasu on ainoastaan kuluerä, saamatta siitä mitään talteen. Mahdollisessa toteutuksessa tulee ottaa huomioon tilaratkaisut ja löytää paras käyttökohde kuumalle vedelle tai mahdolliselle välipaine- tai matalapainehöyrylle. Tutkimus vaatii vielä tarkempia lähtötietoja syvempää selvitystä, jotta päästään eroon epävarmuustekijöistä, jotka vaikuttavat laskentaan, kuten jäähdytysilmapuhaltimen käyntitieto ja sitä kautta sen tilavuusvirta. Tässä työssä ei lähdetty perehtymään savukaasujen koostumuksiin ja niiden sisältämään energiaan. Savukaasujen sisältämän energian kautta saataisiin varmasti tarkin tulos niiden sisältämästä lämpöenergiasta.

## 9. POTENTIAALISET ENERGIANSÄÄSTÖKOHTEET KARTONKIKONE 5: LLÄ

Tämän diplomityön yhteydessä tehtiin Lean six sigma Green belt- työ. Työssä kartoitettiin kuitulinjan ja kartonkikoneen energiankulutuskohteet höyryn, sähkön ja maakaasuun osalta. Kulutuskohteen kartoitus tehtiin projektiryhmän kanssa prosessikaavioon ja tämän jälkeen kulutuskohteet pisteytettiin XY- matriisiin. Pisteytyksen jälkeen tarkasteltavaksi ja koeajettavaksi kohteeksi valikoitui kartonkikoneen maakaasun käyttö päällysteen kuivatuksessa.

### 9.1. Lean Six Sigma

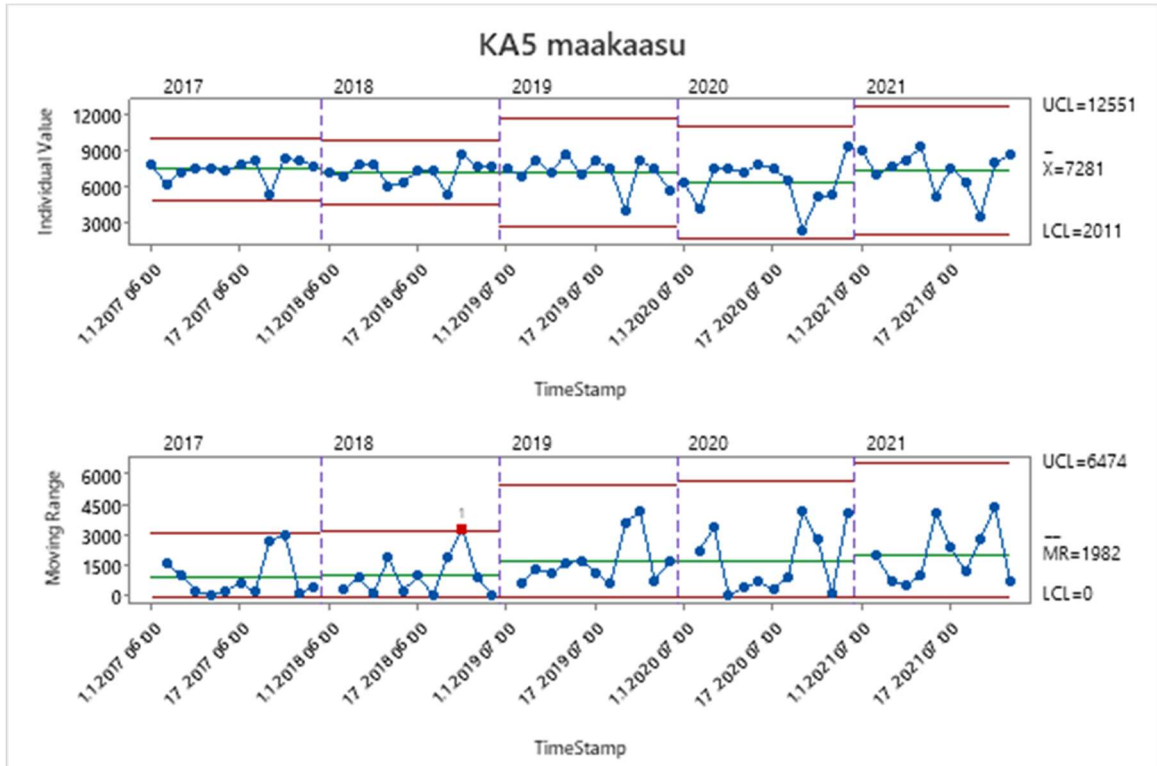
Lean Six Sigmasta puhuttaessa tarkoitetaan parannusmenetelmää, jolla pääsääntöisesti pyritään prosessien ja systeemien suorituskyvyn parantamiseen. Menetelmä kattaa kokonaisuuden ja sillä voidaan mitata kaikkia prosesseja, systeemejä ja työsuorituksia toimialasta riippumatta. Leanilla viitataan aikahukkaan ja six sigmalla ominaisvaihtelun määrään, mistä syntyy materiaalihukkaa, virheitä ja vikoja. Edellä mainitut hukat ovat yhteydessä toisiinsa niin, että usen aikavaihtelun hukka seuraa ominaisvaihtelun hukasta. (Quality Knowhow Karjalainen, 2023)

Lean Six Sigma projekti toteutettiin noudattaen DMAIC- parannusprosessia. DMAIC- muodostuu englannin kielen sanoista Define (määrittely), Measure (mittaus), Analysis (analyysi), Improve (parannus) and Control (ohjaus). (Karjalainen & Karjalainen, 2020)

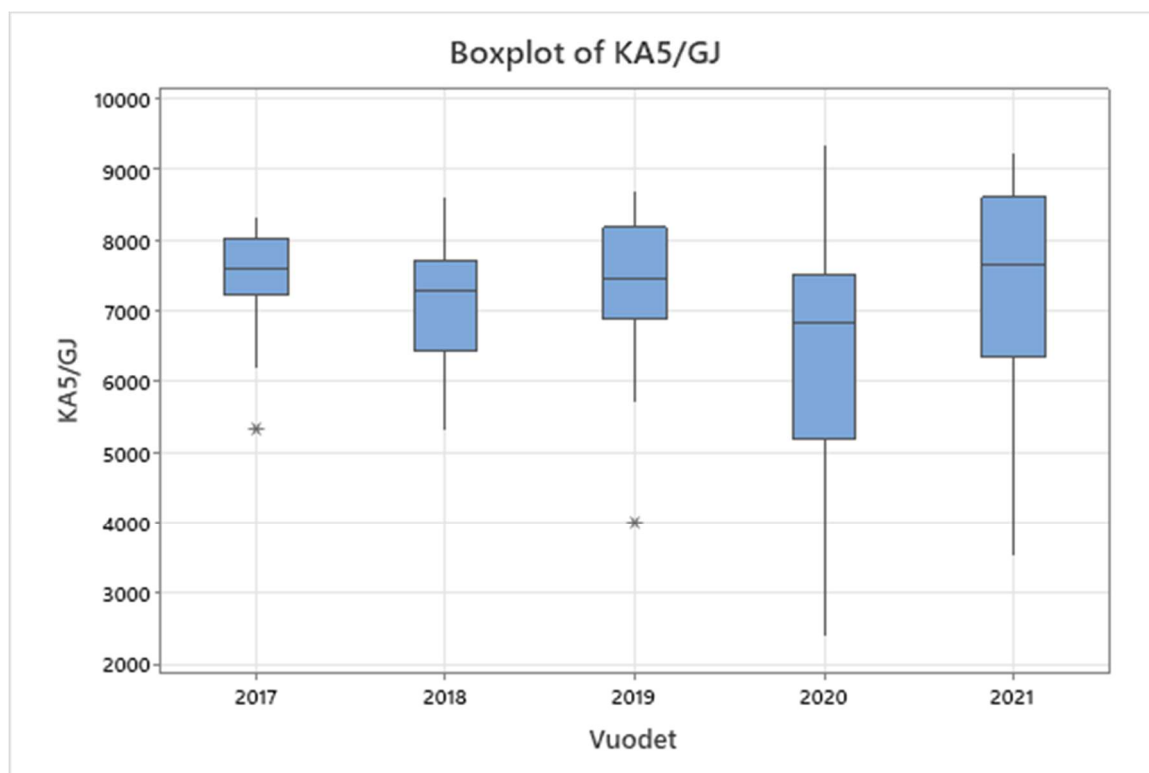
### 9.2. Projektin valinta ja ongelman asetus

Ongelmaksi asetettiin ominaisenergiankulutuksen liian suuri taso nykyhetkellä. Työn aikana maailman tilanteen muuttuessa maakaasun kulutus priorisoitui korkealle saatavuuden ja hinnan takia. Energiankulutusta maakaasun osalta kartoitettiin vuositasolla I-MR korttien ja box

plotien avulla. Kuvista 16 ja 17 nähdään, että maakaasun kulutuksessa ei ole merkittävää eroa vuosien 2017–2021 välillä.



Kuva 16. Kartonkikone 5 maakasun kulutuksen I-MR kortti vuosilta 2017–2021.



Kuva 17. Box plot kuvaaja maakaasun kulutuksesta kartonkikone 5:llä vuosina 2017–2021.

### 9.2.1. Projektin tavoitteet

Metsäteollisuusintegraatin kokonaisenergiankulutuksen ymmärtämisen ohella projektilla tavoiteltiin 5 % pienennystä ominaisenergiankulutukseen ja työn aikana alkanut energian hintojen nousu ja maakaasun saatavuushaasteet vaikuttivat tavoitteeseen saada mahdollisimman suuri säästö maakaasun kulutukseen ilman investointeja.

### 9.2.2. Projektin strategia

Projektissa edettiin DMAIC- periaatteella eli aluksi määritettiin ongelma, joka tässä työssä oli ominaisenergiankulutuksen liian suuri taso. Tämän jälkeen lähdettiin mittausvaiheeseen, jossa lähdettiin tunnistamaan ja kuvaamaan parannuskohteena olevaa prosessia. Mittausvaiheessa tehtiin SIPOC- kaavio, josta näkee prosessin toimittajat (suppliers), inputit (x:t), itse prosessin, outputit (Y:t) ja asiakkaan. Tässä työssä ulostuloina oli höyry, sähkö ja maakaasu, asiakkaina energia/tuotettu tonni ja euromäärät. Prosessikuvausta varten pidettiin palaveri, johon osallistui operaattoreita vuorosta, tuotannon päivämestari, vuoromestareita,

kehityspäällikkö, booster teamin jäsen ja käyttöpäällikkö. Lisäksi pidin tapaamisia maakaasun, sellutehtaan energiankulutukseen ja sähköenergiankulutukseen liittyen tämän alan erikoisosaajien kanssa. Maakaasun osalta kaasusta vastaava päivämestari, sellutehtaan osalta sellutehtaan päivämestari ja käyttöinsinööri sekä sähköenergiakulutuksen osalta sähköalan projektipäällikkö. Ammattilaisten avulla saatiin tehtyä laaja ja tarkka prosessikuvaus, jonka jälkeen alkoi XY- matriisissa vaikuttavien tekijöiden listaus ja priorisointi. XY- matriisista vaikuttavien tekijöiden listauksesta ja priorisoinnista esiin nousi maakaasu ja maakaasun vaikuttavat tekijät, jotka päästiin koeajamaan. Analyysivaiheessa koeajon tulokset analysoitiin ja saadut parannukseen vaikuttavat tekijät varmistettiin konfirmaatiokoeajolla. Parannusvaihe on tällä hetkellä vielä menossa ja työn alla, koska muutosten saattaminen täyteen käytäntöön vaatii vielä hyväksyntä muun muassa asiakas- ja tuotepuolelta mahdollisen laaturiskin hallitsemiseksi. Ohjausvaiheeseen tehdään ohjeistus liiketoimintajärjestelmään ja koulutetaan vuorot uusien ajomallien osalta.

### 9.3. Prosessin räjäytys

#### 9.3.1. Prosessikartta

Prosessikuvauksessa prosessi jaettiin kolmeen osaan sisääntulojen mukaan. Sisääntuloina ovat höyry, sähkö ja maakaasu. Höyryn osalta lähdettiin reduktioasemalta kohti sellutehtaan ja kartonkikoneen höyrynkulutuskohteita. Reduktioasemalla kaukopäästä putkilinjaa pitkin tuleva höyry toimitetaan loppukäyttöön joko 10 tai 5 barin paineessa. Höyryn osalta tehtiin jako näiden 10 ja 5 barin mukaan, jonka jälkeen projektiryhmän kanssa ajotapapaleverissa käytiin läpi kaikki höyrynkulutuskohteet ja muuttujat, jotka vaikuttavat höyrynkulutukseen. Tämä sama toistettiin sähkö ja maakaasun osalta, nämä ovat nähtävissä liitteessä 1 olevassa prosessikuvauksen osassa.

#### 9.3.2. XY- matriisi

Kuvassa 18 ja 19 on esitetty XY- matriisi, johon ulostuloiksi (Y) tuli 5 bar höyry, 10 bar höyry, sähkö kulutus (MWh/t) ja maakaasun kulutus (GJ/t). Kaikki prosessikuvauksessa projektiryhmän kanssa löydetyt prosessivaiheet ja muuttujat listattiin XY- matriisiin. Ulostuloille valittiin painotus välillä 1–10, jossa 1 tarkoittaa pientä ja 10 suurta painotusta. 5 ja 10 bar höyry sekä sähkö painotettiin luvulla 8 ja maakaasun CO<sub>2</sub> päästöjen, hinnan sekä

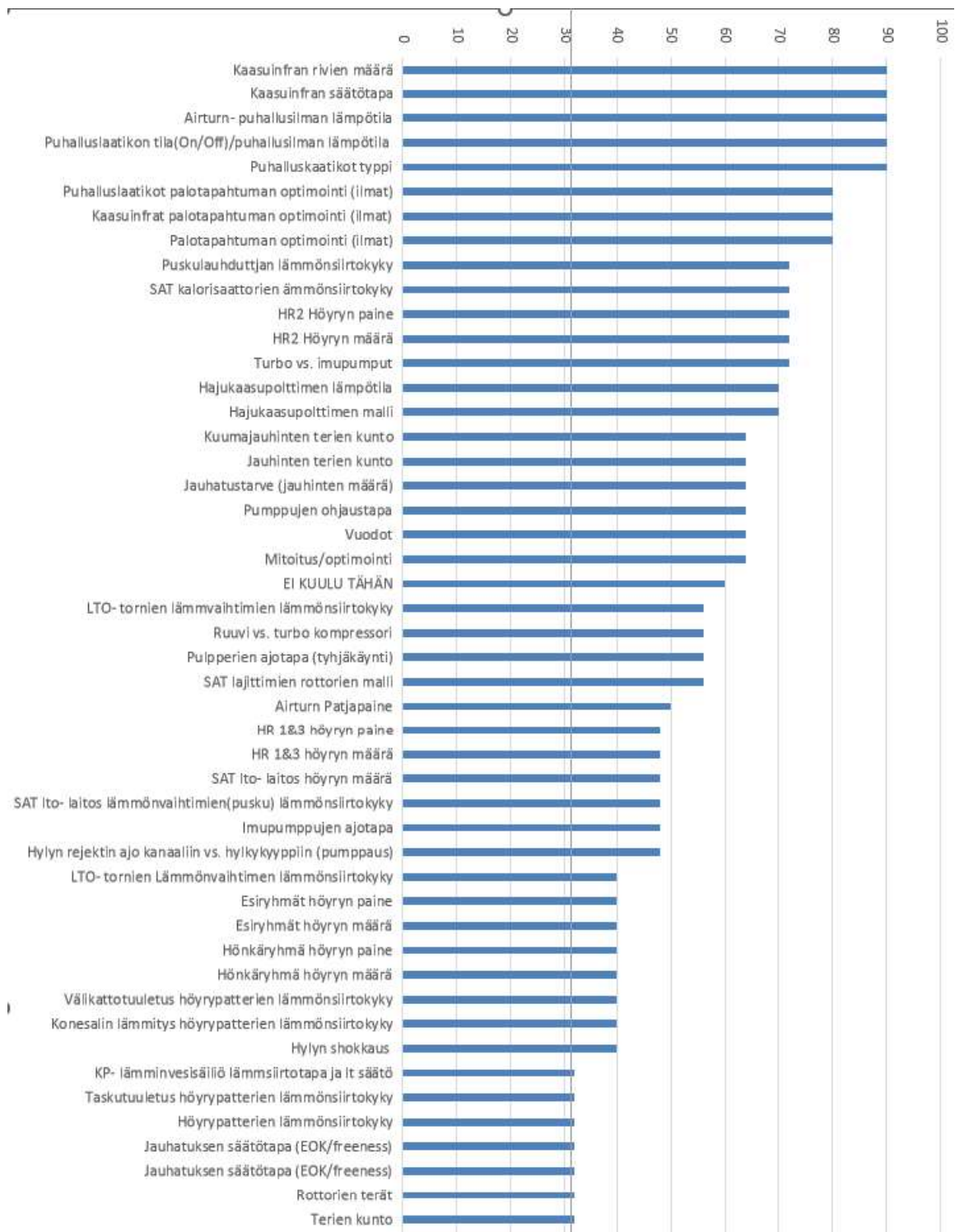


saataavuden johdosta maakaasun painotettiin luvulla 10. Listauksen jälkeen projektiryhmän eri muuttujien osalta kunkin alan ammattilaisten kanssa muuttujat pisteytettiin ulostulon mukaan asteikolla 1–10, jossa 1 tarkoittaa pientä merkitystä ulostuloon ja 10 suurta merkitystä.

Muuttujia projektiryhmän kanssa löydettiin kaikkiaan 83 kappaletta ja pisteytyksen jälkeen saatiin selville mitkä muuttujat näyttävät vaikuttavat eniten ulostuloihin. Tämä näkyy liitteessä 1. Maakaasun korkeamman painotuksen johdosta maakaasun kulutukseen vaikuttavat muuttujat nousivat suurimmiksi prioriteettiluviiksi, mm. kaasuinfrakuivainten rivien määrä ja airturn- polttimen puhallusilman lämpötila.

XY matriisi		Tainion ominaisenergiankulutuksen tarkastelu								
Päivitetty	27.4.2023						1	2	3	4
						Ulostulot (Y's)	Höyry 5 bar	Höyry 10 bar	Sähkö (MWh/t)	Maakaasu(GJ/T)
Prosessivaihe	Muuttujan nimi	Tyyppi (y/x/x)	Luokka (S/C/N/KR)	Vaatimukset	Rank (1-10)	8	8	8	10	
Kaasuinfrat	Kaasuinfran rivien määrä	x							9	
Kaasuinfrat	Kaasuinfran säätötapa	x							9	
Airturn- poltin	Airturn- puhallusilman lämpötila	x							9	
Puhalluslaatikot	Puhalluslaatikon tila(On/Off)/puhallusilman lämpötila								9	
Puhalluslaatikot	Puhalluslaatikot tyyppi								9	
Puhalluslaatikot	Puhalluslaatikot palotapahtuman optimointi (ilmat)								8	
Kaasuinfrat	Kaasuinfrat palotapahtuman optimointi (ilmat)	x							8	
Airturn- poltin	Palotapahtuman optimointi (ilmat)	x							8	
Puskalauhduttaja	Puskalauhduttajan lämmönsiirtokyky					9				
SAT kalorisaaattorit	SAT kalorisaaattorien lämmönsiirtokyky						9			
Höyryryhmä 2	HR2 Höyryn paine						9			

Kuva 18. XY- matriisi.



Kuva 19. XY- matriisin tekijät vaikuttavuuden mukaan listattuna suurimmasta pienimpään.

#### 9.4. Vastemuuttuja

Edellä kuvatun XY- matriisin perusteella vastemuuttujiksi valikoitui maakaasuun vaikuttavat tekijät, joita olivat Airturn- ilmankäntölaitteen tuloilman lämpötila, jota säädetään maakaasupolttimen lämpötilan avulla, 1 ja 2 teräpäällystimien kaasuinfrakuivainten rivien määrä, sekä puhalluslaatikon on/off säätö. Näille muuttujille haluttiin ajaa monimuuttujakoeajo, jolla selvitettiin keskinäis- ja yhdysvaikutuksia edellä mainituille muuttujille. Varsinaisia spesifikaatorajoja eikä kaasun kulutusta tarkkailla sen tarkemmin. Tästä johtuen haluttiin selvittää mahdollisuuksia vaikuttaa maakaasun kulutukseen heikentämättä kartongin laatua tai vaikuttamatta negatiivisesti tuotantonopeuteen.

#### 9.5. Mittaussysteemin analysointi

##### 9.5.1. Mittaussysteemin kuvaus

Vastemuuttujista Airturn- laitteen lämpötila mitattiin prosessiin sijoitetulla kiinteällä online-lämpötilamittarilla, 1 ja 2 teräpäällystimien kaasuinfrakuivainten rivien määrä saatiin dna-ohjelmasta ja tarkastettua katsomalla. Maakaasun kulutusta mitattiin maakaasun tilavuusvirtamittarilla, jonka tieto on luettavissa Valmetin DNA- prosessinohjausjärjestelmästä.

##### 9.5.2. Johtopäätökset

Mittaussysteemille ei tehty GageR&R tutkimusta, mutta voidaan todeta, että mittavirhe maakaasun tilavuusvirtausmittarissa tai Airturn- ilmankäntölaitteen lämpötilamittarissa ei selitä eroja saaduissa tuloksissa. Edellä mainitut mittalaitteet kuuluvat tehtaan kunnossapidon enakkohuoltokohteisiin ja ne tarkastetaan tasaisin väliajoin.

#### 9.6. Prosessin kuvaus

Prosessin suorituskykyä tarkasteltiin maakaasun kulutuksen myötä ja olettamuksena oli maakaasun kulutuksen vähentäminen, kun projektin myötä mahdolliset yhdysvaikutukset saadaan selville.

### 9.6.1. Hajontojen analysointi

Maakaasun kulutuksen osalta ongelmana on keskiarvo ongelma, koska oletuksena maakaasua kuluu keskimääräisesti enemmän kuin olisi tarpeellista. Hajonta on pientä eikä vaihtelua esiinny, ellei jotkin maakaasun kulutuskohteet ole erityisyydestä pois päältä, esimerkkinä laitevika.

### 9.7. Todennäköisten X:n tunnistaminen

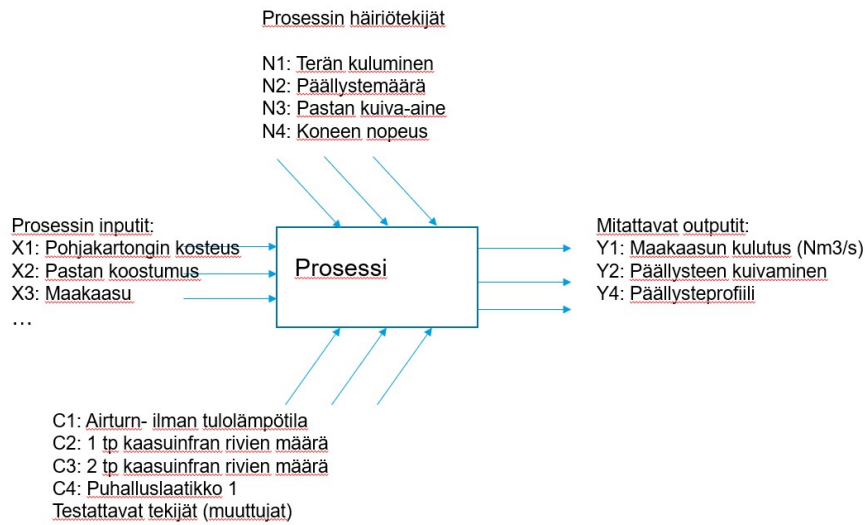
X:t on tunnistettu ammattitaitoisen projektiryhmän ja asiantuntijoiden avulla. Maakaasun kulutuksen osalta todennäköiset X:t on listattu edellä olevaan kuvaan 18. Tekijät valittiin asiantuntijoiden määrittämän vaikuttavuuden ja toteutettavissa olevan koeajettavuuden johdosta.

### 9.8. Koesuunnittelu

#### 9.8.1. DOE suunnitelma

DOE (design of experiment) suunnitelman aloituksessa mietittiin mitä halutaan selvittää. Ongelman kuvauksena päällysteen eri kuivatustapojen yhdysvaikutuksia ei tiedetä. Koejaon tavoitteena oli selvittää optimaalisin päällysteen kuivatustapa suhteessa maakaasun kulutukseen ja löytää yhdysvaikutuksia kuivatustapojen väliltä. Kuvassa 20 on nähtävissä koeajoon vaikuttavat tekijät. Prosessin inputeina, joihin ei pystytä vaikuttamaan oli pohjakartongin kosteus, pastan koostumus ja tuleva maakaasu. Häiriötekijät, jotka vakioitiin parhaan mukaan koeajon aikana, näkyy listattuna kuvassa 20.

## Koeajon tekijät



Kuva 20. Koeajon tekijät prosessikuvauksena.

Koesuunnitelmaa tehdessä valittavaksi koesuunnitelmaksi tuli osittaistekijäkoe täystekijäkokeen sijaista, koska tällä saatiin koepisteiden määrä puolitettua 16 -> 8, mutta kuitenkin selvitettyä kahden tekijän yhdysvaikutuksia. Koeajoon vaikuttavat tekijät ja koeajettavien muuttujen tasot on nähtävissä kuvassa 21. Muuttujen matalat ja korkeat tasot määritettiin asi- antuntija tiimin ja osaavien operaattorien avustuksella.

## Koeajoon vaikuttavat tekijät

Muuttujat (muutettavat tekijät)	Kaasuinfröjen rivien määrä, päällystysasema 1/2, airturn- tuloilman lämpötila, puhalluslaatikko 1 (on/off)		
Vakaat tekijät (vakioidaan koeajon aikana)	Pastan kuiva-aine, koneen nopeus, päällystemäärä		
Häiriötekijät (vaikuttavat tekijät, joita ei voida vakioida)	Päällysteterän kuluminen		
Mittarit (koeajossa seurattavat tekijät)	Maakaasun kulutus (TA-661-FI69), loppukosteus (TA-661-PMR1.OPR)		
Muuttuja	Matala taso	Korkea taso	(Keskipiste)
Airturn It	120	190	
Rivien määrä 1tp	1	3	
Rivien määrä 2tp	1	2	
Puhalluslaatikko 1	OFF	ON	

Kuva 21. Koeajoon vaikuttavat tekijät

Tämän jälkeen luotiin L8 koeajomatriisi Minitab- ohjelmalla. Minitabiin syötettiin korkeat ja matalat tasot valituille muuttujille, jonka jälkeen minitab loi 8 koepisteen koeajomatriisin, josta näkee kunkin koepisteen muuttujien tasot. Ennen koeajoa tämän minitabin luoman koeajomatriisin ajojärjestys muutettiin siihen järjestykseen, jotta se oli helpointa toteuttaa käytännössä. Tulokset toki syötettiin kunkin rivin kohdalle oikeaan sarakkeeseen minitabissa ennen koeajotulosten analysointia. Kuvassa 22 on esitetty koeajomatriisi toteutetussa ajojärjestyksessä.

## Koepisteiden olosuhteet

Ajojärjestys	Airturn lämpötila	1tp rivien määrä	2tp rivien määrä	Puhalluslaatikko 1 (on/off)
1	120	1	1	Off
2	190	1	1	On
3	120	3	1	On
4	190	3	1	Off
5	120	1	2	On
6	190	1	2	Off
7	120	3	2	Off
8	190	3	2	On

Kuva 22. Koepisteiden olosuhteet.

Koeajon jälkeen saadut tulokset analysoitiin ja response optimizerilla Minitabista saatiin paras ajomalli maakaasun kulutukseen liittyen. Tämän avulla pystyttiin ajaman konfirmaatio koeajo seuraavana päivänä, jolla todettiin saadut tulokset. Konfirmaatiokoeajossa ajettavaksi malliksi saatiin kuvan 8 mukainen ajotilanne.

Solution						
Solution	Airturn It	1tp rivit	2tp rivit	Puhalluslaatikko on/off	Maakaasun kulutus ka Fit	Composite Desirability
1	190	1	2	0	0,0738625	0,668159

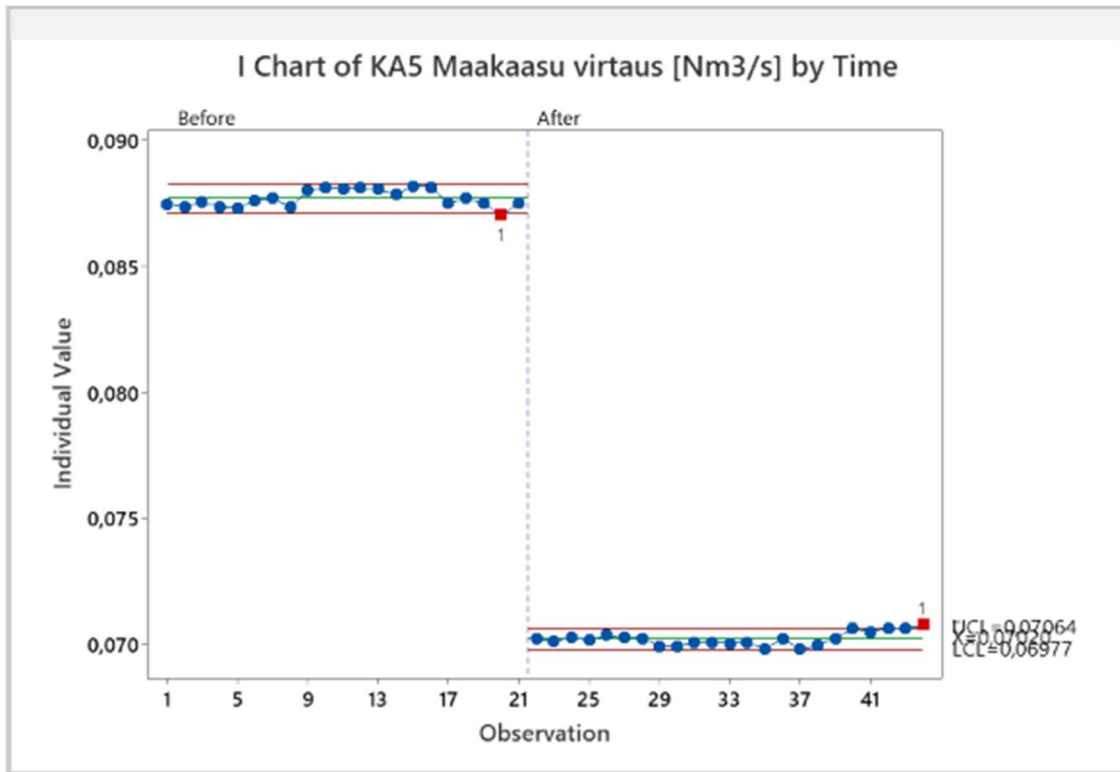
### Multiple Response Prediction

Variable	Setting
Airturn It	190
1tp rivit	1
2tp rivit	2
Puhalluslaatikko on/off	0

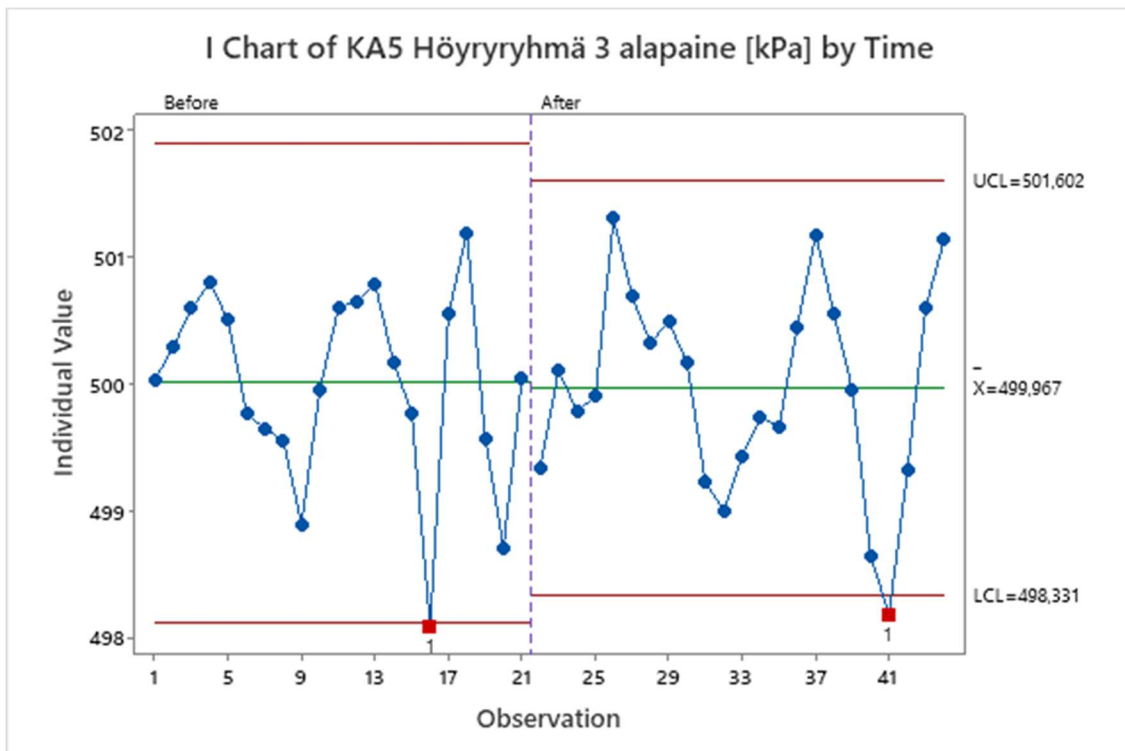
Kuva 23. Konfirmaatiokoeajon ajotilanne (huom. 2 tp rivit arvo 2 tarkoittaa matalaa tasoa, sama kuin koeajo-ohjeiden arvo 1).

#### 9.8.2. DOE tulokset

Konfirmaatiokoeajolla todettuja tuloksia on esitetty kuvissa 24, 25 ja 26. Maakaasun kulutus laski noin 20 % konfirmaatiokoeajon aikana ja koeajosta löytyi suurin vaikuttava tekijä maakaasun kulutukseen, joka oli 1 teräpäällystimen rivien määrä, tämä nähdään kuvasta 27. Kartongin loppukosteus nousee tällä ajomallilla noin 0,2 %- yksikköä, joten se ei nosta tuotantoa, mutta myöskään koneen nopeutta ei jouduttu laskemaan koeajon aikana.

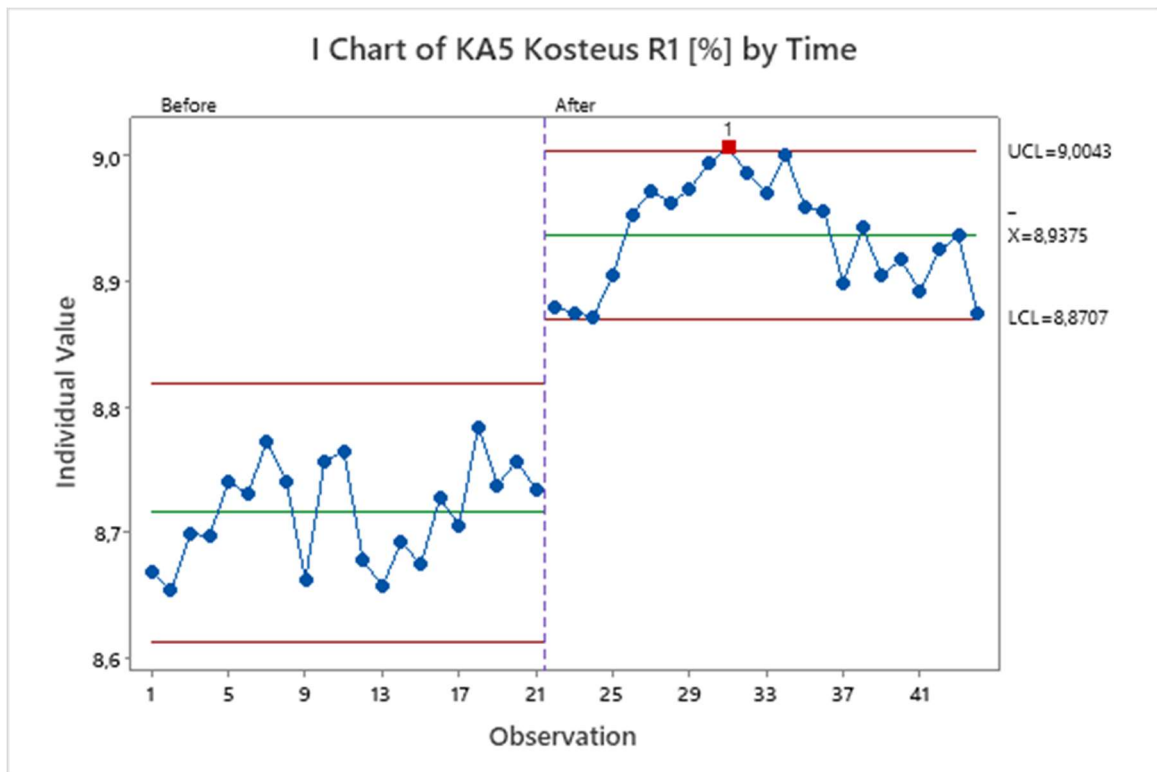


Kuva 24. I- kortti maakaasun kulutuksesta. Before kuvaa normaalia ajotilannetta ja after kuvaa konfirmaatiokoeajon tilannetta.

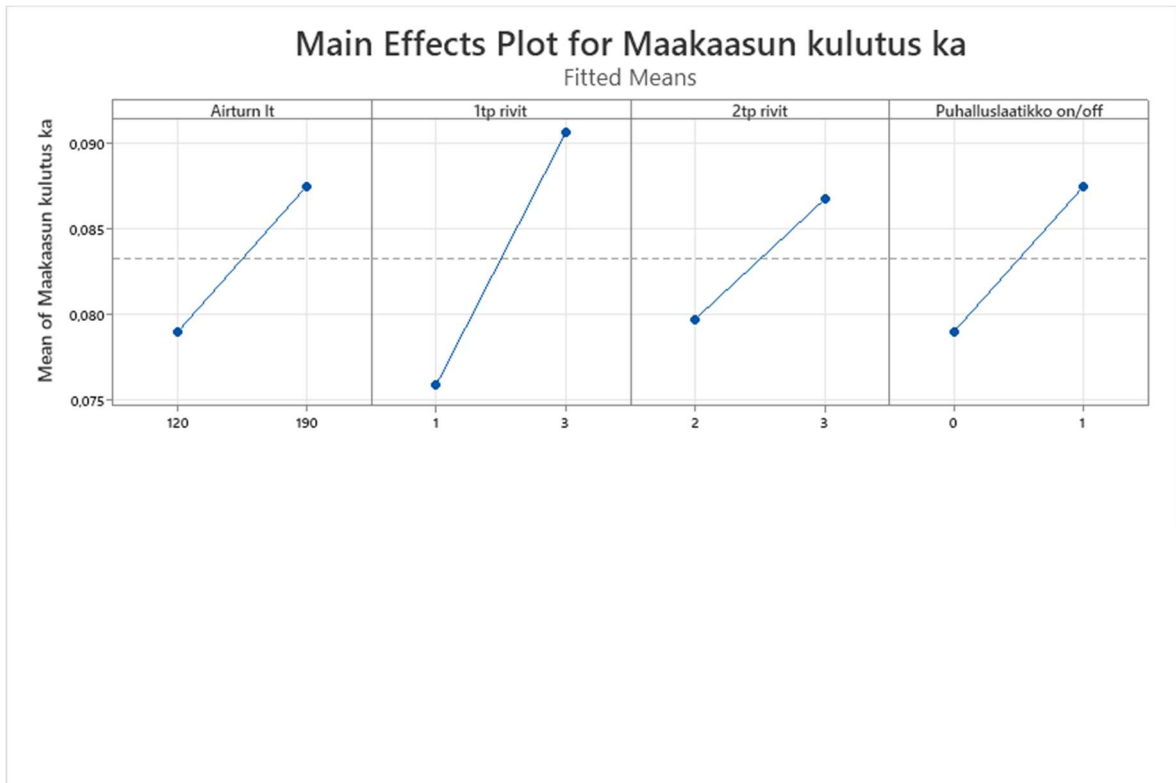


Kuva 25. I- kortti säätöryhmän höyrynpaineesta. Before kuvaa normaalia ajotilannetta ja after kuvaa konfirmaatiokoeajon tilannetta.





Kuva 26. I- kortti kartongin loppukosteudesta. Before kuvaa normaalia ajotilannetta ja after kuvaa konfirmaatiokoeajon tilannetta.



Kuva 27. Maakaasun kulutukseen vaikuttavat tekijät.

### 9.8.3. Koeajojen johtopäätökset

Konfirmaatiokoeajon alkaessa etukuivatusosan kuivatussylintereiden höyrynpaineet olivat maksimiarvossa, 500 kPa, ja konfirmaatiokoeajossa kartongin loppukosteus nousi n. 0,2 %-yksikköä, kun päällysteen kuivatustehoa laskettiin. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut kartonkikoneen nopeuteen. Maakaasun kulutus laski n. 20 %, joten tämä on suositeltava ajomalli etenkin paksummilla CKB- Carrier lajeilla, joilla ajonopeus on alhaisempi korkeammasta kartongin neliöpainoista johtuen.

## 9.9. Parannustoimenpiteet

Uutta ajomallia ja sen käyttöönottoa ei ole vielä päätetty. Airturn- ilmankäätölaitteen tuuloilman lämpötilaa on tarkoitus nostaa vuoden 2023 alussa ja samalla ajaa uudet koeajot. Ajomallin käyttöönotto vaatii tarkkaa laadun seurantaa, jottei päällysteen kuivatusmuutokset vaikuta kartongin laatuun, mm. pölyäminen asiakkaalla.

## 9.10. Ohjaussuunnitelma

Ohjaukseen liittyen asia ohjeistetaan vuoroihin operaattoreille ja sitä seurataan päivittäin kehitysinsinöörin toimesta. Seurannassa keskitytään ja sovitun ajomallin noudattamiseen ja kerrataan asiaa operaattoreiden kanssa tarvittaessa, jos sovitusta ajomallista poiketaan. Virheen estin tekniikkaa tai ohjausmekaniikkaa ei tähän projektiin liittyen tule vaan sitä seurataan prosessinohjausjärjestelmän kautta.

## 9.11. Projektin johtopäätökset

Projektissa päästiin haluttuun tavoitteeseen, kun koeajojen perusteella maakaasun kulutus päällystyksen kuivatuksessa saatiin laskemaan noin 20 % normaaliin ajotilanteeseen verrattuna, tämä esitettyä edellä kuvassa 24. Rahallista säästöä vuositasolla saataisiin 20 % maakaasun kulutuksen vähennyksellä noin 350 000 euroa, 12 % maakaasun kulutuksen vähentämisessä toisi noin 200 000 euron säästöt. Laskelmat on tehty maakaasun vuoden 2023 futuuri hinnoilla ja maakaasun normikuution alemmalla lämpöarvolla 33,54 MJ/Nm<sup>3</sup>. Maakaasun kulutus vähentää myös CO<sub>2</sub> päästöjä, mutta tähän ei otettu kantaa projektissa. Tilannetta tulevaisuuden osalta on haastavaa arvioida, koska vuoden 2023 syksyn vuosihuolto-  
seisokissa maakaasun käyttö vähenee investoinnin myötä. Investoinnissa kaasua käyttävät puhalluslaatikot ja taustan kaasuinfrakuivain vaihdetaan sähköisiin. Investointisuunnitelmissa on korvata myös päällysteen kuivatukseen käytetyt kaasuinfrakuivaimet sähköisillä kuivaimilla. Samaa kuivatus strategiaa kuten koeajoissa todettiin, voitaneen hyödyntää myös sähköisten kuivaimien kanssa, jotta ominaisenergiankulutus saadaan pidettyä mahdollisimman alhaisella tasolla.

## 10. JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiaintensiivisenä teollisuuden alana metsäteollisuudessa on paljon potentiaalia ominaisenergiankulutuksen tason parantamiselle, kuten työn kirjallisuusosa ja kokeellinen osa näyttää. Nykyinen maailman tilanne myös ohjaa koko ajan kohti energiatehokkaampia ratkaisuja ja pois fossiilisista polttoaineista kohti uusiutuvaa energiaa.

Työssä oli tavoitteena perehtyä metsäteollisuuden energiankulutukseen ja energiatehokkuuden parantamista ohjaaviin tekijöihin. Kirjallisuuden kautta saatiin kokonaiskuva, mihin energiankulutus keskittyy sellun – ja kartonginvalmistuksessa höyryn, sähkön ja maakaasun osalta. Diplomityön kanssa samoihin aikoihin alkanut Lean Six Sigma Green Belt- työ antoi lisää työkaluja työn tutkimuskohteena olleen Stora Enson Imatran tehtaiden kartonkikoneen ja kuitulinjan energiankulutuskohteiden määrittelyyn ja priorisointiin.

Kuitulinjan energiankulutuksen osalta selvitettiin hajukaasupolttimen savukaasujen lämmöntalteenoton mahdollisuutta, jotta polttimossa poltetun maakaasun energiasisällöstä saataisiin energiaa hyötykäyttöön. Työn tutkimusten perusteella hukkalämpöä olisi saatavilla, mutta toistaiseksi hukkalämmön hyödyntämiseen liittyviä investointeja ei olla tekemässä. Ulkopuolisen konsulttiyhtiön tekemän selvityksen mukaan kustannukset nostaisivat takaisinmaksuajan saatavaan hyötyyn nähden liian suureksi.

Lean six sigma projektin prosessikuvauksen myötä löydettiin suuri määrä energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ja XY- matriisin sekä priorisoinnin jälkeen maakaasun käyttö kartonkikoneella valikoitui koeajettavaksi tekijäksi. Maakaasun kulutuksen tarkasteluun ohjasi myös maakaasuun mahdolliset saatavuus haasteet ja nopeasti noussut hinta muuttuneen maailmantilanteen johdosta. Koeajolla saatiin todettua ajomallimuutosten vaikututtavuutta maakaasun kulutukseen heikentämättä koneen tuotantonopeutta tai laatua. Toki laadun osalta päällysteen kuivatukseen liittyvissä muutoksissa on oltava varovainen ja riskien arviointi on tehtävä huolella, jottei aiheuteta esimerkiksi pölyämisiongelmaa asiakaan prosessissa.

Kartonkikone 5:n osalta energiatehokkuuden parantamiseen tähtääviä toimia tehdään jatkuvasti niin prosessin ajomalleja muuttamalla kuin investoinneilla. Samaan aikaan kartonkikoneen nopeutta pyritään kasvattamaan ja näin ollen ominaisenergiankulutuksen odotetaan laskevan tulevaisuudessa, joka on totta kai tavoiteltavaa niin taloudellisesti kuin koko maapallon kestävyiden kannalta.

## Lähteet

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J., 2016. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*, Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

Energiavirasto, 2022. *Energiakatselmukset*. [Online]  
Available at: <https://energiavirasto.fi/energiakatselmukset>

Finnish Forest Industries, 2020. Green and vibrant economy - The climate roadmap for the forest industry.

ForestBioFacts, 2022. *a*. [Online]  
Available at: <https://forestbiofacts.com/pulping-and-biorefining/kraft-pulping/washing-screening-and-cleaning-of-pulp/>

ForestBioFacts, 2022. *b*. [Online]  
Available at: <https://forestbiofacts.com/natural-fibre-products/production-of-paper-and-board/drying-of-natural-fibre-products/drying-methods-in-paper-and-board-production/multicylinder-drying/>

ForestBioFacts, 2022. *c*. [Online]  
Available at: <https://forestbiofacts.com/energy-and-biofuels/global-forest-industry-energy-use/>

ForestBioFacts, 2022. *d*. [Online]  
Available at: <https://forestbiofacts.com/energy-and-biofuels/production-processes-recovery-and-energy/>

ForestBioFacts, 2022. *e*. [Online]  
Available at: <https://forestbiofacts.com/energy-and-biofuels/energy-consumption-trends-in-forest-industry/>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H., 2000. *Höyrykattilatekniikka*. 5nd toim. Helsinki: Edita.

Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003. *Paperin ja kartongin valmistus*. s.l.:Helsinki: Opetushallitus, 2003.

International Energy Agency, 2022. *IEA*. [Online]  
Available at: <https://www.iea.org/energy-system/industry/paper>

Järvenreuna, J. & Nummila, M. N., 2020. *Nykyaikainen savukaasupesuri*. [Online]  
Available at: [http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo\\_Savukaasu-pesuri.pdf](http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasu-pesuri.pdf)

Karjalainen, E. E. & Karjalainen, T., 2020. *Lean six sigma 2.0 ja laatuteknologia*. s.l.:Quality Knowhow Karjalainen.

Karlsson, M., 2009. *Papermaking Part 2, Drying*. 2nd toim. Helsinki: Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

KnowPap, 2022. *KnowPap*. [Online]

Available at:

[http://www.knowpap.com/www/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/knowpap.htm](http://www.knowpap.com/www/suomi/knowpap_system/user_interfaces/knowpap.htm)

KnowPulp, 2022. [Online]

Available at: <http://www.knowpulp.com/www/suomi/kps/ui/knowpulp.htm>

Kuisma, K., Suominen, M. & Vakkilainen, E., 2004. *Power Plant Energy Efficiency Analysis – An Effective Tool to Reduce Pulp and Paper Mill Energy Production Costs*, s.l.: s.n.

Laurijssen, J., 2013. *Energy use in the paper industry*, s.l.: s.n.

Lawrence, A., Thollander, P., Andrei, M. & Karlsson, M., 2019. Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences.

Metsäteollisuus, 2023. [Online]

Available at:

[https://metsateollisuus.sharepoint.com/:p:/r/sites/julkiset\\_tilastot/\\_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7BBB38DB440-61A7-4003-8863-65B338B16A3B%7D&file=FI\\_PBL\\_EL\\_72\\_Mets%C3%A4teollisuuden%20tehdaspolttoa\\_inet%20Suomessa.pptx&action=edit&mobileredirect=true](https://metsateollisuus.sharepoint.com/:p:/r/sites/julkiset_tilastot/_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7BBB38DB440-61A7-4003-8863-65B338B16A3B%7D&file=FI_PBL_EL_72_Mets%C3%A4teollisuuden%20tehdaspolttoa_inet%20Suomessa.pptx&action=edit&mobileredirect=true)

Pöyry, 2016. *Suomen metsäteollisuus 2015-2035*, s.l.: Pöyry.

Quality Knowhow Karjalainen, 2023. *Six Sigma*. [Online]

Available at: <https://sixsigma.fi/leansixsigmasta/>

Stora Enso, 2022. *Stora Enso*. [Online]

Available at: [Intranet](#)

Suhr, M. ym., 2015. *Best Available Techniques (BAT) - reference document for the Production of Pulp, Paper and Board*, s.l.: European Commission.

Tilastokeskus, 2020. *Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö*. [Online]

Available at: [http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene\\_2020\\_2021-11-01\\_tau\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_tau_002_fi.html) [Haettu 6 2 2022].

Vakkilainen, E. & Kivistö, A., 2010. Energy consumption trends and energy consumption in modern mills in forest industry. Issue ISBN 9789522650191.

Vakkilainen, E. & Kivistö, A., 2017. Forest industry energy consumption – trends and effect of modern mills. Issue ISBN 978-952-265-649-0.

Valmet, 2022. *a*. [Online]

Available at: <https://www.valmet.com/board-and-paper/stock-preparation/refining/>

Valmet, 2022. *b*. [Online]

Available at: <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating-drying/>

## Liite 1. Osa prosessikuvauksesta

SAT kuunmajauhatus	-> Y1	SAT rejektijauhatus	SAT lajittimet		KAS jauhatus	-> y2	Virta/puristinosan tyhjo	Purppaus
Saatotapa Terien kuluria Terävälliset		Saatotapa Terien kuluria	Koottorin malli		Jauhatus saatotapa Jauhinien Terien kurlu (terävälli/turnni) Jauhatus tarve (jauhinien määrä) Terävällisäätö		Turtoimupuhallin Imuppuujen alustapa Imulaulu/purimpuujen määrä Imuvuodot	Pumpun ohjaus Hylyn rejektisiti Hylynkäntö
Hajukaasupoltin	-> Y1				Kaasuifrat	-> y2		Airturn-poltin
Polttimen lämpötila					Rivien määrä			Tulotilan lämpötila
Polttimen malli					Säätötapa Tyyppi			Patjapaine