



Jauhatusjärjestelmän kustannustehokkuus ja optimointi

Saara Saarinen

Opinnäytetyö, AMK

Tammikuu 2024

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Saarinen, Saara

Jauhatusjärjestelmän kustannustehokkuus ja optimointi

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tammikuu 2024, 70 sivua.

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: Kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Metsä Tissue Oyj:n Mäntässä sijaitseva pehmopaperitehdas. Tehtaalla oli syksyllä 2023 otettu käyttöön uusi jauhinlinja, jonka tarkoituksena oli parantaa tehtaan kustannustehokkuutta vähentämällä pitkäkuitusellun käyttöä ja korvaamalla se lyhytkuidusta valmistettavalla liimamassalla. Jauhinlinjan taustalla olleet teemat liittyivät sekä energian että raaka-aineen hintojen suureen vaihteluun lyhyellä aikavälillä. Liimamassan valmistuksen odotettiin lisäävän paperikoneen energiankulutusta merkittävästi, minkä takia jauhinlinjan operointi haluttiin optimoida energiankäytön kannalta järkeväksi.

Työssä tutkittiin uuden jauhinlinjan resurssien käyttöä, jauhatuksen vaikutuksia lopputuotteisiin sekä optimoitiin paperikoneen lajireseptit ja ajoparametrit työn tulosten perusteella. Opinnäytetyö oli määrällistä tutkimusta, jossa valtaosa tutkimusaineistosta kerättiin paperikoneen prosessinohjaus- ja laadunvalvontajärjestelmistä. Tietoa analysoitiin suuria määriä, joka lopulta järjesteltiin niin, että liimamassan vaikutuksia voitiin tulkita ensin yleisesti paperikoneen tasolla ja sitten paperilajikohtaisesti.

Tutkimuksen pohjalta havaittiin, ettei liimamassa itseasiassa kuluttanut energiaa niin paljoa kuin tutkimus-olettamuksen perusteella odotettiin, ja energiankulutusta pystyttiin tietyillä paperilajeilla jopa vähentämään. Raaka-aineen kulutus kehittyi odotusten mukaisesti ja liimamassan myötä saatiin aikaan toivottuja raaka-ainekustannusäästöjä. Lopputuotteiden laadun osalta merkittävimmät muutokset havaittiin paperin lujuusominaisuuksissa, joka teoriaan perustuen vastasi myös tutkimuksen hypoteesia. Analyysin lisäksi toimeksiantajalle esitettiin muutetut lajireseptit sekä paperikoneen ajoparametrit. Näitä käsiteltiin työssä pin-tapuolisesti arkaluontoisten tietojen takia.

Avainsanat (asiasanat)

Pehmopaperi, paperinvalmistus, kustannustehokkuus, optimointi, laatu

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Ei salassa pidettäviä liitteitä

Saarinen, Saara

Cost effectiveness and optimization of a refining system

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, January 2024, 70 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis was commissioned by Metsä Tissue's tissue paper mill in Mänttä, Finland. In the autumn of 2023, a new refining line was introduced with the aim of improving the mill's cost effectiveness by reducing the share of softwood pulp and replacing it with a glue pulp made from hardwood pulp. Themes behind the interest of improving cost effectiveness were the substantial short-term changes in energy and raw material prices. It was expected that the production of glue pulp would increase the energy consumption on the paper machine, which is why the operation of the refining line was desired to be optimized with energy efficiency in mind.

The thesis studied the utilization of resources in the new refining line, its effects on the end products as well as introduced optimized paper grade recipes and operating parameters based on the study. The thesis was conducted with quantitative research methods, with most of the research data collected from the paper machine's process control and quality management systems. The data was analyzed in large quantities and eventually organized so that the effects of glue pulp could be studied both on general level and specifically on paper grade level.

Based on the study, it was quickly discovered that the glue pulp didn't consume as much energy as was expected based on the hypothesis. For certain paper grades the energy consumption was even reduced. Raw material consumption developed as anticipated, resulting in desired cost savings. Quality-wise the most significant changes in the end products were detected in strength properties, which was anticipated based on theory. In addition to the analysis, modified paper grade recipes and paper machine operating parameters were introduced to the commissioner. In the thesis, paper grade recipes and operating parameters were discussed on a superficial level due to the sensitive nature of the information.

Keywords/tags (subjects)

Tissue paper, papermaking, cost effectiveness, optimization, quality

Miscellaneous (Confidential information)

No confidential appendices

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Metsä Tissue Oyj	6
3	Tutkimusasetelma	7
3.1	Kvantitatiivinen tutkimus	7
3.2	Tutkimuksen eettisyys.....	8
4	Paperinvalmistuksen kustannustehokkuus	9
5	Pehmopaperin valmistus	12
5.1	Pehmopaperikone	12
5.2	Pehmopaperin raaka-aineet.....	14
5.3	Pehmopaperin ominaisuusvaatimukset ja laatutavoitteet.....	16
5.4	Pehmopaperikoneen energiankäyttö	18
6	Massan jauhatus	20
6.1	Jauhintyyppit	21
6.2	Jauhatuksen vaikutus kuituun ja paperin ominaisuuksiin	22
6.3	Jauhatusjärjestelmät	24
6.4	Jauhatuksen hallinta.....	27
6.4.1	Ominaisrämmäkuormateoria	27
6.4.2	Jauhatuste	28
7	Mikrofibriilloitu selluloosa	29
8	Liimamassa	31
9	Työn toteutus	33
9.1	Tarkoitus.....	33
9.2	Tutkimusolettamus	34
9.3	Tutkimusaineiston keruu ja järjestely	36
10	Tutkimuksen tulokset ja tulkinta	38
10.1	Energia.....	38
10.1.1	Paperikone	39

10.1.2	Jauhatusjärjestelmä	45
10.1.3	WC-paperilajit	46
10.1.4	Taluspaperilajit	48
10.2	Sellun kulutus	50
10.3	Lopputuotteen laatu	51
10.4	Jauhatusasteen vaikutus laatuun ja energiankulutukseen	56
10.5	Liimamassan vaikutukset prosessin kustannustehokkuuteen	58
10.6	Paperikoneen lajireseptien ja ajoparametrien optimointi	59
11	Pohdinta ja luotettavuusvarauma	62
11.1	Tulosten luotettavuus	62
11.2	Pohdinta	63
	Lähteet	66
	Liitteet	71
	Liite 1. Paperikoneen suhteutettu kaasun kulutus sekä ominaiskulutus vuonna 2023	71
	Liite 2. Paperikoneen suhteutettu höyryn kulutus ja ominaiskulutus vuonna 2023	72
	Liite 3. Paperikoneen suhteutettu sähkön kulutus ja ominaiskulutus vuonna 2023	73
	 Kuviot	
	Kuvio 1 Pitkä- ja lyhytkuitusellun suhteutettu hintakehitys vuosina 2022 ja 2023	11
	Kuvio 2 Energian pörssihinta lokakuu-joulukuu 2023, vuorokauden keskiarvo	12
	Kuvio 3 Valmetin pehmopaperikone	13
	Kuvio 4 Levy- ja kartiojauhintyyppit	22
	Kuvio 5 Kuitu ennen ja jälkeen jauhatuksen	23
	Kuvio 6 Esimerkki erillisjauhatuksesta	25
	Kuvio 7 Esimerkki yhteisjauhatuksesta	26

Kuvio 8 Freeness-arvon kehitys jauhimen ominaisenergian mukaan	28
Kuvio 9 Jauhamaton lyhytkuitu ja mikrofibrilloitunut lyhytkuitu	30
Kuvio 10 Liimamassan jauhinlinjan peruseriaate	32
Kuvio 11 Tutkimuskohteen jauhatusjärjestelmä	35
Kuvio 12 Kokonaisenergian kulutus vuosina 2022 ja 2023	40
Kuvio 13 Energian ominaiskulutus vuosina 2022 ja 2023	41
Kuvio 14 Paperikoneen suhteutettu energian ominaiskulutus energiamuodoittain vuonna 2023	42
Kuvio 15 Paperikoneen suhteutettu kokonaisenergian kulutus ja energian ominaiskulutus vuonna 2023.....	43
Kuvio 16 Jauhinlinjojen suhteutettu energiankulutus, kuukauden keskiarvo	45
Kuvio 17 Liimamassaa sisältävien TOTI-lajien energian ominaiskulutuksen kehitys.....	47
Kuvio 18 Liimamassaa sisältävien HOTO-lajien energian kokonaiskulutuksen kehitys.....	49
Kuvio 19 Paperikoneen pitkä- ja lyhytkuitusellun kulutuksen kehitys syyskuusta joulukuuhun 2023	51
Kuvio 20 Lajikohtainen konesuuntainen vetolujuus	52
Kuvio 21 Lajikohtainen poikkisuuntainen vetolujuus	53
Kuvio 22 Lajikohtainen konesuuntainen venymä	54
Kuvio 23 Lajikohtainen pehmeys	55
Kuvio 24 Resurssien kustannusten kehitys vuonna 2023	59

Taulukot

Taulukko 1 Kuitudimensiot eri puulajeilla	15
Taulukko 2 Paperilajien ominaiskulutus osaprosesseittain	19
Taulukko 3 Esimerkki paperikoneen ajoparametrien Excel-seurantataulukosta	36
Taulukko 4 Kuivatusosan osaprosessien ominaiskulutuksen prosentuaalinen kehitys TOTI-lajeilla	48

Taulukko 5 Kuivatusosan osaprosessien ominaiskulutuksen prosentuaalinen muutos HOTO-lajeilla	
.....	50

1 Johdanto

Resurssitehokkuus, korkeat laatutavoitteet ja sitä kautta kestävä teollisuus ovat metsäteollisuuden toimialalle imagokysymys ja merkittävä kilpailutekijä. Tilastokeskuksen (2022) mukaan metsäteollisuuden osuus koko teollisuuden energiankäytöstä on peräti 57 %, mikä on kannustanut toimialan yrityksiä panostamaan energiatehokkuutensa kehittämiseen sekä energiankäytön hallintaan. Energiatehokkuuden kehittäminen kulkee käsi kädessä päästöjen hallinnan kanssa, sillä mitä järkevämmiin ja tehokkaammin energiaa käytetään, sitä vähemmän tuotetaan ympäristölle haitallisia päästöjä. Energiatehokkuuden toimenpiteitä on vuodesta 2022 lähtien vauhdittanut myös korkea energian hinta sekä lyhyellä aikavälillä tapahtuva hintojen suuri vaihtelu.

Vuonna 2022 merkittävästi muuttunut maailmantilanne aiheutti myös sen, että metsäteollisuudessa on edelleen oltu huolissaan puuraaka-aineen saatavuudesta ja riittävydestä. Ukrainan sodan myötä puun tuonti Venäjältä Suomeen lakkautettiin käytännössä kokonaan, jolloin korvaava raaka-aine oli hankittava muualta. Tämän takia sellun hinta on ollut pitkään poikkeuksellisen korkealla, ja yhdessä korkeiden energiakustannusten kanssa yritysten on ollut tarpeen tarkastella prosessien resurssien käyttöä sekä optimoida prosessit mahdollisimman kustannustehokkaiksi. Mieli- valtaisesti kustannuksia ei kuitenkaan voida vähentää vaan on pidettävä huoli siitä, että lopputuote on edelleen laadukas ja vastaa loppukäyttäjän tarvetta.

Opinnäytetyössä tutkittiin pehmopaperikoneen uutta jauhatusjärjestelmää ja sen vaikutuksia paperikoneen energian ja raaka-aineen kulutukseen sekä lopputuotteiden laatuun. Uuden jauhinlinjan tarkoituksena oli parantaa paperikoneen kustannustehokkuutta vähentämällä kalliimman pitkäkuitusellun käyttöä ja korvaamalla se lyhytkuidusta valmistettavalla liimamassalla. Liimamassa tarkoittaa pitkälle jauhettua lyhytkuitusellua ja sen valmistus perustuu kuidun vahvaan fibrillaatioon, jonka taustalla oleva teoria on tuttu tiivispaperituotannosta. Teoriaa siis löytyy, mutta pehmopaperituotannon osalta käytännön toteutusta ei yleisen tiedon perusteella ole Suomessa aikaisemmin tehty.

Opinnäytetyön tutkimuksessa tehtyjen havaintojen pohjalta tarkoitus oli myös esittää toimeksiantajalle uudet optimoidut lajireseptit sekä paperikoneen ajoparametrit. Hypoteesina opinnäytetyön tulokselta odotettiin, että uuden jauhatusjärjestelmän myötä paperikoneen energian tarve kasvaa

ja pitkäkuitusellun kulutus laskee, jonka kautta luonnollisesti myös raaka-ainekustannukset laskevat. Hypoteesin perusteella tärkeimmiksi tutkimuskysymyksiksi nousivat:

- Millä tavoin liimamassa ja sen valmistus vaikuttavat pehmopaperikoneen energian ja raaka-aineen kulutukseen sekä lopputuotteen laatuun?
- Miten paperikoneen ajoparametrejä ja massareseptejä tulee optimoida uuden jauhatusjärjestelmän myötä?

Opinnäytetyö rajattiin käytännön syistä koskemaan vain yhtä toimeksiantajan pehmopaperikoneetta ja sillä ajettavia paperilajeja, sillä järjestelmä oli hiljattain vasta asennettu ja otettu käyttöön ja oli siitä syystä käytössä vain tällä kyseisellä paperikoneella kaikkien kolmen koneen sijasta. Myös lopputuotteiden laadun analysointi olisi kasvanut kohtuuttoman työlääksi, jos tutkittavana olisivat olleet kaikki tuotannossa olevat pehmopaperilajit. Opinnäytetyössä tutkittavat 11 pehmopaperilajia olivat tämän lisäksi jaettu kahteen eri kategoriaan tulosten esittämisen ja tulkitsemisen helpottamiseksi.

2 Metsä Tissue Oyj

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Metsä Tissue Oyj, joka on osa suomalaista metsäteollisuus-konserni Metsä Groupia. Metsä Tissue on yksi Euroopan johtavia pehmopapereiden valmistajia sekä maailman johtavia tiivispapereiden valmistajia ja toimittajia, jolla on yhteensä yhdeksän tuotantolaitosta ympäri Eurooppaa; Puolassa, Ruotsissa, Saksassa, Slovakiassa ja Suomessa. (Tuotantolaitokset n.d.)

Metsä Tissuen tuotantolaitoksilla valmistetaan WC- ja talouspapereita, käsipyyhkeitä sekä nenäliinoja teollisuus- ja kuluttajakäyttöön, ja sen tunnetuimpia tuotemerkkejä Pohjoismaissa ovat muun muassa Serla, Lambi ja Katrin (Metsä Tissue yhtiönä n.d.). Metsä Tissuen alaisuuteen kuuluu myös tytäryhtiö Metsä Greaseproof Papers Oy, joka valmistaa rasvatiiviitä leivonta- ja ruoanlaittopapereita (Tiivispaperit n.d.).

Suomessa Metsä Tissuen tuotteita valmistetaan Pirkanmaalla, Mäntän tehtaalla. Tehdas on perustettu Gustaf Adolf Serlachiuksen toimesta vuonna 1868, jolloin tehtaalla valmistettiin puuhioketta.

WC-paperin tuotanto aloitettiin vuonna 1908 ja tiivispaperin tuotanto puolestaan vuonna 1924. Tänä päivänä Mäntässä käy kolme pehmopaperikonetta, 11 pehmopaperin jalostuslinjaa, yksi tiivispaperikone sekä kierrätyspaperin siistauslaitos. Mäntän tehtaan vuorokausituotanto pehmopaperin osalta on noin 340 tonnia, ja tehtaalla työskentelee reilu 400 työntekijää eri tehtävissä. (Metsä Tissue Suomessa n.d.)

Metsä Group

Metsä Group on kansainvälisesti toimiva metsäteollisuuskonserni, jonka omistaa yli 90 000 suomalaisesta metsänomistajasta koostuva Metsäliitto osuuskunta (Metsän tarina n.d.). Metsä Groupin liiketoiminta-alue koostuu viidestä eri yhtiöstä, joita Metsä Tissuen lisäksi ovat Metsä Forest, Metsä Wood, Metsä Fibre ja Metsä Board. Metsä Forest keskittyy puunhankintaan ja metsäpalveluihin, Metsä Wood erilaisiin puutuotteisiin kuten vaneriin, Metsä Fibre sellu- ja sahatavaraan ja Metsä Board kartonkiin (Yritysrakenne n.d.). Lisäksi Metsä Groupiin kuuluu innovaatioyhtiö Metsä Spring, joka sijoittaa erilaisiin puumateriaalien käyttöä kehittäviin hankkeisiin ja startupeihin (Meistä n.d.).

3 Tutkimusasetelma

3.1 Kvantitatiivinen tutkimus

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmä kehittyi hyvin nopeasti kvantitatiiviseksi eli määrälliseksi tutkimukseksi. Määrällisen tutkimuksen luonne ja tutkimusprosessi soveltuivat opinnäytetyön tutkimuskysymysten ratkaisemiseen, sillä tutkimusaineisto oli pääosin numeerisena ja vaati tarkkaa järjestelyä ja analysointia teorian kautta. Lisäksi opinnäytetyön kohteena olleesta prosessista oli olemassa paljon teoriaa ja olettamuksia, muttei juurikaan käytännön tutkimusta.

Määrällisen tutkimuksen tarkoituksena on tutkimuksesta riippuen selittää, kuvata, kartoittaa, vertailla tai ennustaa joko ihmisiä tai luontoa koskevia ilmiöitä ja ominaisuuksia. Tutkimus perustuu nimenomaan numeeriseen tarkasteluun, jossa joko tutkijan saama tutkimustieto on numeroina tai

tutkija esittää tutkimustuloksen numeerisessa muodossa. Tutkija tulkitsee ja analysoi tutkimustietoa, minkä lopputulemana olennainen numerotieto selitetään sanallisessa muodossa. Määrällinen tutkimus vastaa kysymyksiin: *kuinka moni, kuinka paljon tai kuinka usein*. (Vilka 2007, 13–14, 19)

Määrällisen tutkimuksen tarkoituksena on antaa yleiskuva tutkimuksen muuttujien välisistä suhteista ja eroista. Tutkimuksen perusoletuksena on, että jokin tekijä johtaa tietynlaisiin seurauksiin. Tätä syy-seuraussuhteiden etsimistä kutsutaan kausaalisuudeksi. Pelkkä syy-seuraussuhteiden tunnistaminen ei kuitenkaan riitä, vaan tavoitteena on myös pyrkiä löytämään lainalaisuus eli säännönmukaisuus, joka selittää, miten eri asiat liittyvät toisiinsa ja mistä ne johtuvat. Tutkimuksen tuloksissa lainalaisuudet esitetään usein numeraalisesti esimerkiksi keskiarvon tai keskihajonnan muodossa. (Vilka 2007, 23)

Määrälliselle tutkimukselle tyypillistä on myös hypoteesin eli tutkimusolettamuksen asettaminen, joka tarkoittaa niin ikään tutkimusongelmaa. Tutkimusolettamus ilmaistaan perusteltuna väitteenä siitä, mitä tutkija odottaa tutkimuksen tuloksista. Olettamus ei siis ole tutkijan mielivaltaisesti päättämä väite, vaan perustuu aiempiin tutkimuksiin, teorioihin ja malleihin. Tällöin kyse on teoreettisesta hypoteesista. Hypoteesi voidaan joissain tapauksissa asettaa myös tutkijan omien havaintojen ja kokemusten pohjalta, jolloin kyseessä olisi empiirinen hypoteesi. Tutkimuksella voi olla myös niin sanottu nollahypoteesi, jos tutkittavien ilmiöiden välille ei odoteta syntyvän suhdetta tai ennakoituja eroja. (Vilka 2007, 24)

Määrällinen tutkimus perustuu aina vahvaan teorian läpikäymiseen, sillä tutkimus pyrkii lähtökohdaisesti aina rakentamaan, selittämään tai täsmentämään aikaisempia teorioita ja/tai teoreettisia käsitteitä. Tutkimusprosessi on hyvin suoraviivainen ja aloitetaan aina teoriasta, josta edetään käytäntöön ja tutkimusaineiston keräämiseen, jonka jälkeen tutkimusaineisto analysoidaan ja tulkitaan jälleen teorian avulla. (Vilka 2007, 25–26)

3.2 Tutkimuksen eettisyys

Opinnäytetyössä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä sekä tutkimusetiikkaa. Hyvä tutkimus noudattaa aina hyvää tieteellistä käytäntöä, jonka peruspilareita ovat luotettavuus, rehellisyys, arvostus ja vastuunkanto, ja joiden noudattamisesta jokainen tutkija vastaa itse. (TENK 2023) Hyvään

tieteelliseen tapaan kuuluu, että tutkija konsultoi matalalla kynnyksellä asiantuntijoita eettisiin kysymyksiin liittyvissä asioissa sekä on yleisesti ottaen huolellinen ja tarkka tutkimustyössään. Tutkija kerää ja käsittelee usein luottamuksellista tietoa, jolloin tutkijan on kyettävä osoittamaan luotettavuutta ja kunnioitusta tutkittavaa kohdetta ja toimeksiantajayritystä kohtaan. Hyvään tieteelliseen tapaan kuuluu olennaisesti myös lähdekriittisyys ja eettiset tiedonhankinta-, tutkimus- ja arviointimenetelmät. Lisäksi tutkijan tulee noudattaa tutkimusetiikkaa aina tutkimusta tehdessään. Tutkimusetiikalla määritetään tutkimustyötä koskevat pelisäännöt suhteessa kollegoihin, tutkimuskohteeseen, toimeksiantajaan ja suureen yleisöön. Tutkimusetiikkaan kuuluvat olennaisesti myös eettiset toimintaperiaatteet. (Vilka 2007, 89–91)

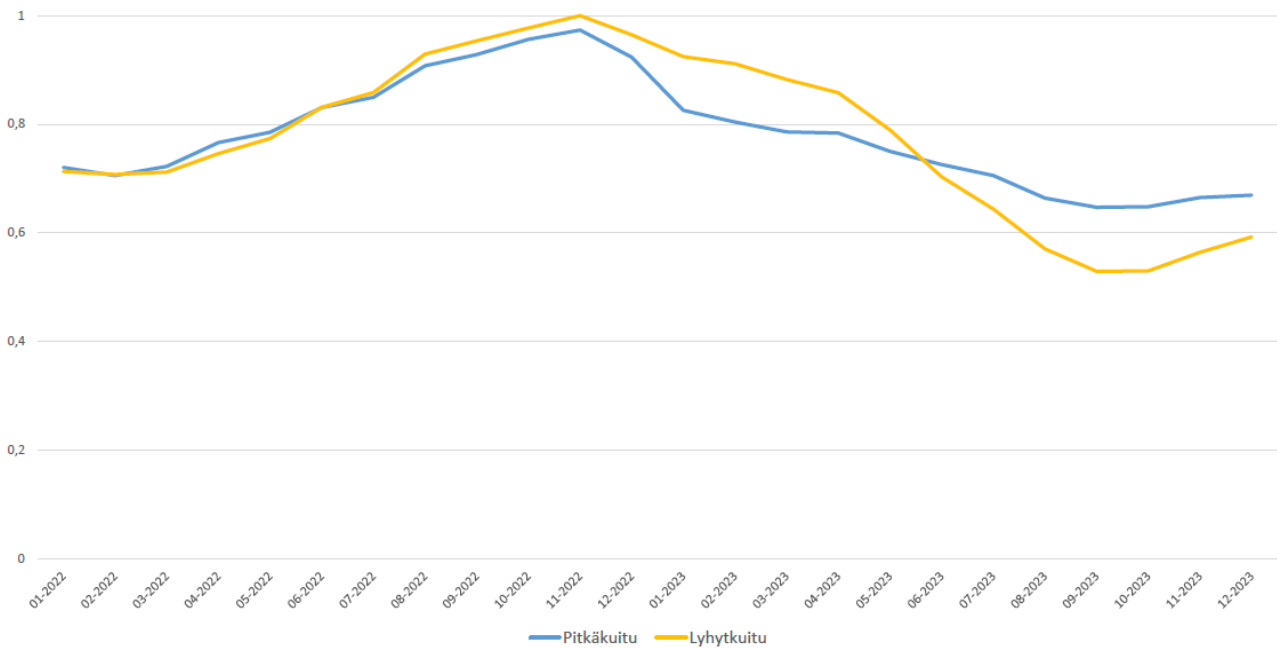
4 Paperinvalmistuksen kustannustehokkuus

Paperinvalmistus on erittäin pääomaintensiivistä, joka tarkoittaa sitä, että suurin osa yrityksen kokonaiskustannuksista liittyy sen pääomaan kuten laitteisiin ja teknologiaan. Pääomaintensiivinen yritys investoi merkittäviä summia kyetäkseen tuottamaan tuotteita ja palveluita, minkä takia keskeisten kustannustekijöiden tunnistaminen on tuotannon kehittämisen ja yrityksen kilpailukyvyn kannalta tärkeää. Pääomaintensiivisyyden vuoksi prosessin on siis oltava myös mahdollisimman kustannustehokas. (Leiviskä 2009, 96; Sundholm 2008, 10; Tuottavuus, kannattavuus ja tehokkuus n.d.)

Prosessi on kustannustehokas, mitä tehokkaammin se kykenee käyttämään tuotteen valmistamiseen tarvittavia resursseja suhteessa resurssien kustannuksiin. Kustannustehokkuus ei välttämättä kuitenkaan tarkoita resurssien vähentämistä, vaan niiden käyttöä pikemminkin optimoidaan. Kustannustehokkuuteen liittyvät olennaisesti myös tuotannon tuottavuus ja kannattavuus, jotka molemmat kuvaavat yrityksen suoriutumiskykyä. Tuottavuudella tarkoitetaan tuotosten suhdetta käytettyihin resursseihin, kun taas kannattavuus kertoo yrityksen kyvystä tuottaa voittoa. Toisin sanoen kannattavuus keskittyy taloudelliseen lopputulokseen ja tuottavuus puolestaan resurssien käyttöön halutun taloudellisen tuloksen saavuttamiseksi. Tuottavuutta mittaamalla pystytään seuraamaan ja kehittämään tuotannon toimintaa, mikä taas vaikuttaa merkittävästi tuotannon kannattavuuteen ja tehokkuuteen. Hyvällä tuottavuudella tuotannosta saadaan myös kestävä ja kilpailukykyistä. (Tuottavuus, kannattavuus ja tehokkuus n.d.)

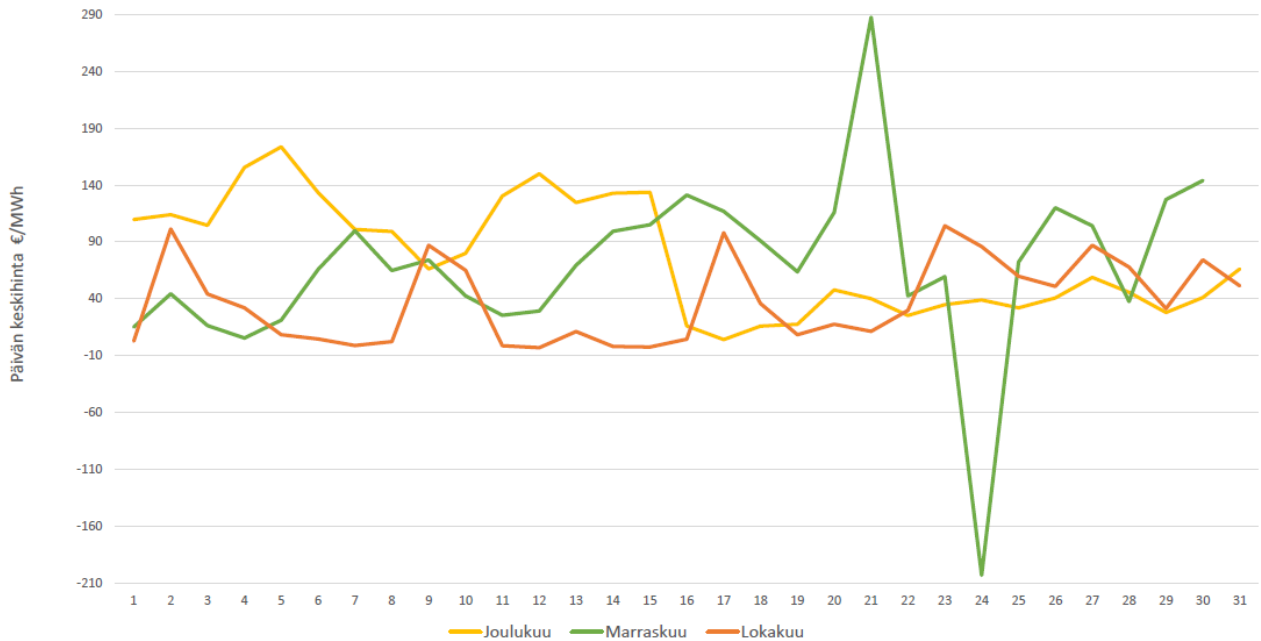
Jotta kustannustehokkuuden merkitys voidaan ymmärtää, on ensin ymmärrettävä myös resurssien kustannusvaikutus. Paperinvalmistuksen merkittävimmät välittömät kustannukset, eli ne kustannukset, jotka syntyvät suoraan tuotteen valmistuksesta, ovat raaka-aine, energia ja työntekijöiden palkat. Raaka-aineen osuus välittömistä kustannuksista voi olla jopa yli 50 % ja energian osuus puolestaan noin 10 %, minkä takia niiden tehokas käyttö on äärimmäisen tärkeää myös tehtaan tuottavuuden kannalta. (Mt.) Useat uutislähteet (Maaseudun Tulevaisuus 2023, Helsingin Sanomat 2023, Yle 2020) ovat uutisoineet sellun hintakehityksestä viimeisen parin vuoden aikana. Perinteisesti pitkäkuitusellu on ollut lyhytkuitusellua kalliimpaa, joskin hintasuhde kehittyi päinvastaiseksi vuosien 2022 ja 2023 aikana. Tämän lisäksi varsinainen sellutonnin hinta on vaihdellut suuresti. Esimerkiksi Helsingin Sanomat uutisoi (2023) lyhytkuitusellun hinnan olleen vuonna 2022 keskimäärin noin 800 dollaria sellutonnilta, kun vuonna 2023 hinta oli laskenut 500–600 dollariin tonnilta. Ylen (2020) uutisen mukaan puolestaan pitkäkuitusellun hinta on viime vuosina ollut korkeimmillaan jopa yli 1200 dollaria sellutonnilta, mutta on sen jälkeen pysytellyt noin 1000 dollarin tienoilla. Kuviossa 1 on kuvattu vuosien 2022 ja 2023 pitkä- ja lyhytkuitusellujen hintakehitystä. Hinnat on esitetty suhdelukuina, sillä ne perustuvat toimeksiantajan ostohintoihin ja ovat täten salassa pidettävää tietoa. Kuviosta havaitaan kuitenkin, kuinka vuoden 2023 alkuun asti lyhytkuitusellu oli pitkäkuitua kalliimpaa, minkä jälkeen hintasuhde on jälleen kääntynyt päinvastaiseksi.

Luvussa 2 kerrottiin, että Mäntän tehtaan vuorokausituotanto on pehmpaperin osalta noin 340 tonnia paperia. Julkisiin lähteisiin perustuen tämä tarkoittaisi sitä, että jos tehtaan sellun kulutus olisi esimerkiksi puolet pitkäkuitusellua ja puolet lyhytkuitusellua, olisivat sellun kustannukset noin 306 000 dollaria vuorokaudessa. Euroissa tämä kustannus olisi tämänhetkisen kurssin perusteella noin 280 000 €.



Kuvio 1 Pitkä- ja lyhytkuitusellun suhteutettu hintakehitys vuosina 2022 ja 2023. (Metsä Tissue 2024)

Koska paperinvalmistus on erittäin energiaintensiivinen prosessi, myös hyvä energianhallinta on kustannustehokkuuden ja resurssien optimaalisen käytön kannalta tärkeää. Energianhallintakyvyn tarkoituksena on muun muassa tunnistaa olennaisimmat energiankäyttöön liittyvät vaikutukset kuten tuotanto ja laitteiston mitoitus. Energiankäytön optimoinnissa on tärkeää olla tietoinen omasta energiankulutuksesta, jotta voidaan päättää, milloin ja miten mitäkin prosessia tulee käyttää, jotta se olisi energiankäytön kannalta järkevää. Kustannustehokkuuden kannalta energiankäytön optimointi on merkittävä toimenpide, sillä ilman sitä energian hinnan suuri vaihtelu koituisi yritykselle erittäin kalliiksi. (Energiatalous n.d.)



Kuvio 2 Energian pörssihinta lokakuu-joulukuu 2023, vuorokauden keskiarvo. (Day-ahead prices 2024)

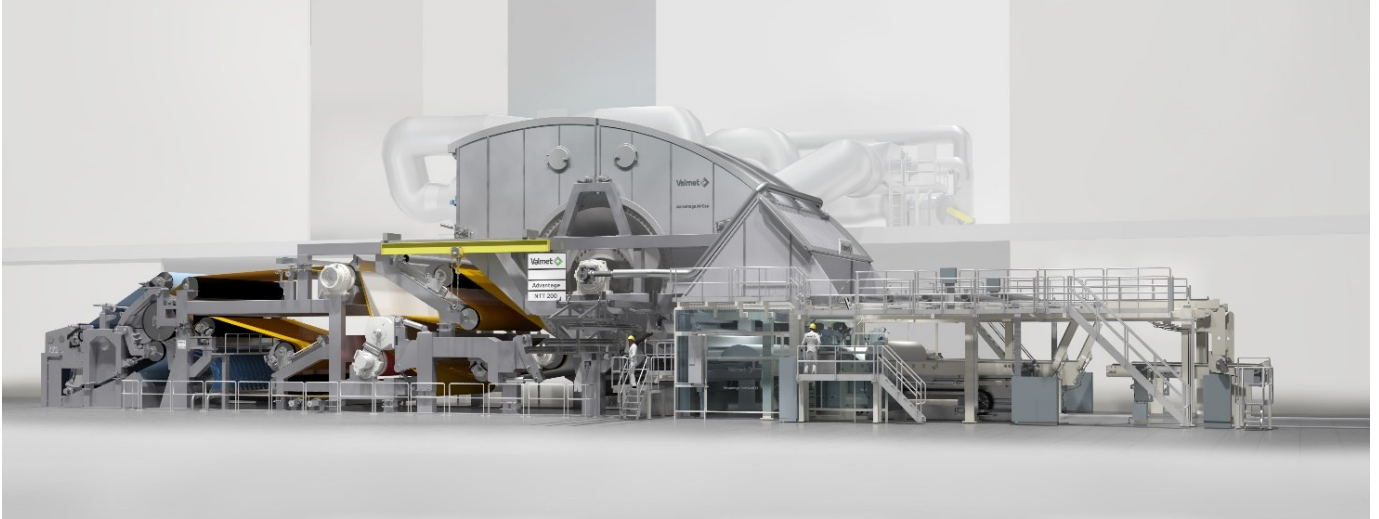
Luvussa 5.4 todetaan, että pehmopaperikone kuluttaa noin 2,8–2,9 MWh paperitonnia kohden, joka jälleen Mäntän tehtaan tuotantoon suhteutettuna tarkoittaisi noin 950 megawattituntia vuorokaudessa. Marraskuussa 2023 (kuvio 2) koettu valtava energian hintapiikki tarkoittaisi tällä tuotannolla 275 000 €:n hintalappua kyseisen vuorokauden energian kulutukselle. Kun pelkästään raaka-aineen ja energian kustannukset lasketaan yhteen, voidaan ymmärtää, miksi kustannustehokas prosessi on tuotannon talouden kannalta merkittävä.

5 Pehmopaperin valmistus

5.1 Pehmopaperikone

Kokonsa puolesta pehmopaperikone on huomattavasti muita paperi- ja kartonkikoneita pienempi, vaikka pehmopaperin valmistusprosessi onkin samankaltainen kuin muillakin lajeilla. Pehmopaperikoneen leveys on maksimissaan 5,5 metriä ja pituus on yleensä vain noin 60 metriä, kun esimerkiksi maailman pisin kartonkikone on peräti 500 metriä pitkä (Holik & Lomic 2013, 823). Pehmopaperin valmistusprosessin keskeisin ero muihin lajeihin verrattuna on paperirainan

kuivatustekniikka ja sen yhteydessä tapahtuva kuivakreppaus, jolla pehmopaperille saadaan sille tyypilliset ominaisuudet. (Pehmopaperin valmistus, n.d.)



Kuvio 3 Valmetin pehmopaperikone (Pehmopaperikoneet n.d.)

Karkeasti lueteltuna pehmopaperikone koostuu perälaatikosta, pehmopaperikoneelle tyypillisestä Crescent-formerista, puristin- ja kuivatusosista sekä rullaimesta. Perälaatikosta massa suihkuteetaan tasaisena, koko koneen levyisenä suihkuna 0,1–0,5 % sakeudessa Crescent-formeriin, jossa paperiraina muodostuu viiran ja puristihuovan väliin. (Pehmopaperin valmistus, n.d.) Viiraosalla vesi suotautuu viiran kudosten välistä, jolloin viiran pinnalle jää huopaantunut paperiraina. Viiraosa määrittää pitkälti paperin perusrakenteen, jota pyritään paperikoneen myöhemmissä prosesseissa mahdollisimman hyvin ylläpitämään. (Märkäviirat -yleistä, n.d.)

Viiraosalta puristihuopa kuljettaa paperirainan aina perälaatikolta kuivatusosalle asti, jolloin vältetään rainan siirtäminen kudokselta toiselle. Viiraosan ja kuivatusosan välistä prosessia kutsutaankin huopaosaksi, jossa rainasta poistuu vettä edelleen suotautumalla, mutta myös puristamalla sekä lämmön avulla. Huopaosan ja kuivatuksen välissä rainasta poistetaan vettä vielä puristinosalla, jossa rainaa puristetaan joko yhdellä imutelalla tai imutelan ja puristintelan sovelusta käyttäen jenkkisylinteriä vasten. (Pehmopaperin valmistus, n.d.)

Pehmopaperikoneelle ominainen kuivatustekniikka on jenkkisynterikuivatus. Jenkkisynteri on halkaisijaltaan 3,5–7,5 metriä suuri sylinteri, joka lämmitetään kyllästettyä, 6–9 barin höyryä käyttäen. Paperiraina puristetaan puristinosalta suoraan jenkkisynterin pintaan, jossa se kuivuu jenkkisynterin kuuman pinnan ja sylinteriä ympäröivän kuuman ilman ansiosta. Kuivuessaan paperi tarttuu synterin pintaan, josta se sitten irrotetaan kaavinterällä kreppaamalla eli ikään kuin rypytämällä. Kreppauksella saadaan aikaan pehmopaperin pehmeys ja imukyky, ja vielä tarkemmin paperin pehmeys sekä venymään voidaan vaikuttaa muuttamalla kaavinterän kreppauskulmaa. Lisäksi paperin venymään, kuohkeuteen ja sitä kautta imukykyyn voidaan vaikuttaa kreppausasteella. Kreppausasteen on oltava 10–25 %, ja se tarkoittaa rullaimen pyörimisnopeutta suhteessa jenkkisynterin pyörimisnopeuteen. Tämä tarkoittaa siis sitä, että jos kreppausaste on 20 %, rullaimen pyörimisnopeus on 20 % jenkkisynterin pyörimisnopeutta hitaampi. (Mt.)

Paperikoneen viimeinen osa on rullain, jossa valmis paperiraina kierretään tampuuritelan ympärille. Valmistunut konerulla ei useinkaan ole valmis lopputuote, vaan jatkokäsittelyn helpottamiseksi paperi käsitellään yleensä vähintään pituusleikkaamalla konerulla pienemmiksi rulliksi. Tämän jälkeen paperi voidaan toimittaa jatkojalostettavaksi. (Rullaus, n.d.)

5.2 Pehmopaperin raaka-aineet

Paperi valmistetaan yhdistelemällä eri kuituja, kemikaaleja ja valmistustekniikoita. Pehmopaperin perusraaka-aineena toimii joko ensikuituinen kemiallinen massa tai ensikuitumassan ja kierrätyskuituisen uusiomassan yhdistelmä. Lisäksi massaan voidaan sekoittaa erilaisia lisämassoja vahvistamaan lopputuotteelle tavoiteltavia ominaisuuksia. (Pehmopaperin raaka-aineet n.d.)

Ensikuidulla tarkoitetaan suoraan puusta saatavaa puhdasta havu- tai lehtipuun kuitua. Havupuukuitu saadaan joko männystä tai kuusesta ja lehtipuukuitu puolestaan koivusta, eukalyptuksesta tai akaasiasta. Pohjoisen havupuukuidun pituus on tavallisesti noin 2–4 mm, kun taas lehtipuukuidun pituus on noin 1–2 mm. Tästä syystä havupuuta kutsutaan paperiteollisuudessa monesti pitkäkuiduksi ja lehtipuuta lyhytkuiduksi. (Kuituraaka-aine n.d.)

Taulukko 1 Kuitudimensiot eri puulajeilla (Kuitudimensiot n.d.)

	Koivu	Haapa	Euka- lyptus	Akaasia	Mänty kevätpuu/ kesäpuu	Kuusi kevätpuu/ kesäpuu
Kuidun pituus, mm	1,1	0,8	1,0	0,7	2,9/2,9	2,9/2,9
Halkaisija, µm	22	18	16	20	35/20	33/19
Seinämän paksuus, µm	3	3	3	2	2,1/5,5	2,3/4,5

Eri kuitujen dimensiot (taulukko 1) vaikuttavat merkittävästi lopputuotteeseen, ja optimoimalla kuitujen osuuksia paperikoneen lajiresepteissä mahdollistetaan papereille halutut ominaisuudet. Lyhytkuidulla paperille saadaan parempi sitoutumiskyky, tasaisempi arkin pinta ja opasiteetti eli läpinäkyväisyys, kun taas pitkäkuitu parantaa etenkin paperin veto- ja repäisylujuuksia. Kuidun pituus vaikuttaa suoraan lopputuotteen lujuusominaisuuksiin, joilla on merkittävä vaikutus sekä paperin ajettavuuteen että jalostettavuuteen. (Kuitudimensiot n.d.)

Suomessa pehmopapereiden raaka-aineena käytetään pääasiassa pohjoisesta männystä ja koi-
vusta valmistettua selluloosaa (Metsät n.d.). Selluloosa eli kemiallisesti kuidutettu massa valmistetaan keittämällä puuraaka-ainetta natriumhydroksidia ja natriumsulfidia käyttäen, jotta puukuituja sitovaa ligniiniä saataisiin mahdollisimman paljon liotettua pois kuitujen välistä ja näin kuidut irrotettua toisistaan. Aivan täysin ligniiniä ei saada poistettua, sillä keiton edetessä tarpeeksi pitkälle myös selluloosamolekyylit alkavat pilkkoutua huonontaan näin lopputuotteen lujuusominaisuuksia. Massa ei kuitenkaan saa sisältää myöskään liikaa ligniiniä, sillä ligniini jäykistää kuitua eivätkä kuidun ominaisuudet soveltuisi silloin enää paperinvalmistukseen. Massan keittoaika ja ligniinipitoisuus riippuvat siitä, mitä massasta aiotaan valmistaa. (Sellun valmistus n.d.)

Uusiomassalla puolestaan tarkoitetaan kierrätyskuidusta valmistettua paperimassaa, jonka raaka-aineena toimii yhdyskuntajätteistä kerättävä keräyspaperi ja tehtaan tuotannossa syntyvä hylkypaperi. Uusiomassaa valmistetaan siistaamalla, jossa paperi hajotetaan ensin pulpperoimalla, jonka jälkeen siitä poistetaan painovärit. Uusiomassa on usein vielä valkaistava, ennen kuin se voidaan annostella paperinvalmistusprosessiin. Värien poisto ja valkaisu ovat pehmopaperin kannalta tärkeitä prosesseja, sillä lopputuotteen on oltava puhdas ja värittään vaalea siistin ulkonäön takaamiseksi. Uusiomassan ongelmana on kuitenkin laadun vaihtelevuus, sillä laatu riippuu täysin siitä, millaista raaka-ainetta milloinkin on saatavilla. Lisäksi keräyspaperin seassa kulkeutuu runsaasti epäpuhtauksia kuten niittejä ja muovia, jotka muun muassa tukkivat prosessilaitteistoa ja voivat pahimmillaan aiheuttaa laiterikkoja. (Uusiomassan raaka-aineet n.d.)

5.3 Pehmopaperin ominaisuusvaatimukset ja laatutavoitteet

Pehmopapereiden ominaisuusvaatimukset ja laatutavoitteet ovat erittäin korkeat erityisesti kuluttajakäyttöön valmistettavissa pehmopapereissa, sillä kuluttajat kiinnittävät entistä enemmän huomiota papereiden ominaisuuksiin ostopäätöstä tehdessään (Reitbauer, Eckhart & Bauer 2023). Laadun merkitys tuotannon kustannuksiin on myös merkittävä, sillä heikkolaatuinen tuote aiheuttaa sekä ulkoisia että sisäisiä kustannuksia. Heikon laadun aiheuttamat kustannukset syntyvät muun muassa reklamaatioina, hylyn käsittelynä, liikatuotantona ja jopa asiakkaiden menetyksenä ja maineen heikkenemisenä. Siitä syystä laatuvirheiden löytäminen ja ehkäiseminen on äärimmäisen tärkeää. (Laatukustannukset n.d.) Päivittäistavaroiden hintojen ollessa korkealla kuluttaja punnitsee vaihtoehtoja hyvinkin tarkkaan, jolloin paperinvalmistajan on tärkeää pitää huoli tuotteen hyvästä hinta-laatusuhteesta.

Pehmopapereiden pääasiallinen käyttötarkoitus suodatinpapereita lukuun ottamatta on pyyhkiminen ja kuivaaminen, minkä takia pehmopaperin tavoiteltuja ominaisuuksia ovat alhainen neliömassa, hyvä vetolujuus, bulkki, pehmeys ja imukyky. Lisäksi WC-paperin tulee olla helposti hajoaava, jottei se tuki viemäriputkistoja, ja talouspaperin puolestaan märkälujaa, jottei paperi hajoa kastuessaan. (Hygieniapaperit n.d.)

Neliömassa

Neliömassalla tarkoitetaan yhden paperiarkin painoa grammoina neliömetriä kohden (g/m^2). Neliömassa vaikuttaa lähes kaikkiin paperin muihin ominaisuuksiin, minkä takia se on paperin tärkein ominaisuus ja täten valitaan jokaiselle lajille tarkkaan. Paperin ominaisuuksista neliömassa vaikuttaa merkittävimmin muun muassa paperin lujuuksiin, paksuuteen, tiiviyteen sekä opasiteettiin, jotka muuttuvat korreloiden neliömassan kasvaessa tai laskiessa. Etenkin lujuusominaisuuksien huonontuminen on pehmopaperin kannalta epäsuotuisaa, sillä se tarkoittaa, ettei paperi kestä esimerkiksi pyyhkimistä enää yhtä hyvin. Neliömassa vaikuttaa suoraan myös paperikoneen energian ja raaka-aineen kulutukseen, sillä pienempi neliömassa vähentää sekä energian että raaka-aineen tarvetta paperin pinta-alayksikköä kohden. (Neliömassa n.d.)

WC-papereiden neliömassa vaihtelee välillä $14\text{--}22 \text{ g}/\text{m}^2$, kun taas talouspaperit asettuvat tyypillisesti välille $20\text{--}24 \text{ g}/\text{m}^2$. Nenäliinat ja kasvopaperit ovat pehmopapereista kevyimpiä $14\text{--}18 \text{ g}/\text{m}^2$ neliömassalla ja teollisuuskäyttöön valmistettavat paperipyyhkeet puolestaan painavimpia $25\text{--}50 \text{ g}/\text{m}^2$ neliömassalla. (Pehmopaperit -yleistä, n.d.) Pehmeää lopputuotetta tavoiteltaessa käytetään raakapaperina usein matalan neliömassan paperia, joka sitten jalostetaan monikerroksiseksi lopputuotteeksi. Vastaavasti, jos pehmeys ei ole lopputuotteen tärkein tavoiteltava ominaisuus, käytetään suuremman neliömassan paperia. (Kimari 2000, 82)

Lujuusominaisuudet

Vetolujuus on pehmopaperin tärkein lujuusominaisuus. Vetolujuudella tarkoitetaan maksimikuormitusta, jolla paperia voidaan sen pinnan suuntaisesti vetää ilman, että paperi rikkoutuu. Pehmopaperin vetolujuuden on oltava tarpeeksi suuri, jotta se kestää loppukäytössä tapahtuvan hankaimisen ja pyyhkimisen. Vetolujuutta ei kuitenkaan voida nostaa mielin määrin lujan paperin toivossa, sillä lujuuden nostaminen laskee aina pehmeyttä ja paksuutta sekä hankaloittaa paperin jalostettavuutta. (Kimari 2000, 83) Pehmopaperin hyvät lujuusominaisuudet ovat tärkeitä myös siitä syystä, että paperia käsitellään ja liikutellaan moneen kertaan ennen kuin se päätyy loppukäyttäjälle, minkä lisäksi paperin on vielä kestettävä sen käyttötarkoituksen mukainen käsittely. (de Assis ja muut 2018, 4599)

Talouspapereilta ja käsipyyhkeiltä vaaditaan muiden ominaisuuksien ohella myös märkälujuuutta. Märkälujuus tarkoittaa nimensä mukaisesti märän paperin lujuusominaisuuksia. Pääasiassa paperin märkälujuus määritetään märkävetolujuuden perusteella, sillä märän paperin muut lujuusarvot ovat monesti niin matalia, ettei niiden mittaamisella ja määrittämisellä ole juuri merkitystä. Paperista saadaan märkälujaa lisäaineiden avulla, jotka annostellaan jo massankäsittelyvaiheessa.

(Chen, Zhang & He 2018, 2184)

Bulkki, pehmeys ja imukyky

Pehmopaperin bulkista puhuttaessa viitataan toimialalla usein paperin paksuuteen. Varsinaisesti bulkki tarkoittaa kuitenkin paperin ominaistilavuutta eli paperipinon tilavuutta massayksikköä kohden (cm^3/g). Pehmopaperista halutaan mahdollisimman bulkista, sillä se vaikuttaa suoraan paperin imukykyyn ja pehmeeseen. (de Assis ja muut 2018, 4598)

Pehmopaperin imukyky ja pehmeys ovat loppukäyttäjälle tärkeimmät ja oleelliset ominaisuudet. Pehmopaperilta toivotaan hyvää imukykyä lähes aina riippumatta lopputuotteen käyttötarkoituksesta, kun taas pehmeys on erityisesti WC-paperin ja liinatuotteiden käyttäjälle merkittävin ominaisuus. Pehmopaperin imukykyä mitataan paperin imukapasiteetin ja –asteen perusteella, jotka tarkoittavat nesteen määrää, jonka paperi jaksaa imeä itseensä sekä aikaa, kuinka kauan paperi kykenee imemään nestettä. Pehmeys sen sijaan on vaikeammin mitattavissa, sillä se on hyvin subjektiivinen ominaisuus eikä sille olekaan yleisesti omaksuttu tiettyä mittaustapaa. Yleisin mittaustavoista lienee kuitenkin niin kutsuttu Hand Feel –mittaus, joka kuitenkin perustuu paperin pinnan sileyteen. Imukykyyn ja pehmeeseen vaikuttavat monet paperin ominaisuudet, kuten jo aikaisemmin mainittu paperin bulkkisuus sekä paperin venymä että raaka-ainekoostumus. (Kimari 2000, 83–84)

5.4 Pehmopaperikoneen energiankäyttö

Paperikoneen energiankulutus riippuu ajettavasta paperilajista, siihen käytettävästä raaka-aineesta sekä rainan kuivatustekniikasta. Kuivatusosa on paperikoneen eniten energiaa kuluttava prosessi paperilajista riippumatta, vaikka kulutus eri kuivatusmenetelmien välillä vaihtelee jonkin verran.

Taulukossa 4 on kuvattu energian ominaiskulutusta eri paperilajeilla, eri osaprosesseissa. Taulukosta havaitaan, että pehmpaperi vie huomattavasti enemmän energiaa verrattuna muihin taulukossa esitettyihin paperilajeihin. Pienimmillään esimerkiksi sanomalehtipaperit voivat kuluttaa vain 1200 kWh tuotettua paperitonnia kohden, kun taas enimmillään korkealaatuisimmat pehmpaperit voivat kuluttaa jopa 6000 kWh tuotettua paperitonnia kohden. (Post 2013, 1013) Paperiteollisuudessa energiankulutus ilmaistaan usein kulutetun energian ja tuotannon välisenä suhteena eli energian ominaiskulutuksena joko kWh/tn tai MWh/tn. Keskimääräisesti pehmpaperikone kuluttaa noin 2800–2900 kWh/tn, joka on muihin paperikoneisiin verrattuna yli puolet enemmän. Pehmpaperikoneen korkea energiantarvetta selittää nimenomaan rainan kuivatukseen käytetty jenkki sylinteri ja sitä ympäröivä huuva sekä massankäsittely. (Pehmpaperin valmistus n.d.)

Taulukko 2 Paperilajien ominaiskulutus osaprosesseittain. Kulutus on ilmoitettu yksikössä MWh/tn arvojen selkiyttämiseksi. Mukailen Laurijssen, Faaij & Worrel (2013)

Laji	Siistaus	Dispergointi	Muu massankäsittely	Viira- ja puristusosa	Esikuivatus	Päällystys, liimaus, laminointi	Jälkikuivatus	Muut osaprosessit	Yht.
Kartonki	0,0	0,0	0,3	0,4	1,3	0,0	0,1	0,1	2,1
Graafinen paperi	0,0	0,0	0,8	0,4	1,3	0,1	0,7	0,2	3,5
Pehmpaperi	0,2	0,4	0,9	0,5	1,9	0,0	0,0	0,1	4,1
Muut	0,2	0,1	0,3	0,4	1,4	0,0	0,1	0,1	2,6

Paperikoneen energiankulutus koostuu sähköstä, lämmöstä ja polttoaineesta. Sähköä tarvitaan paperikoneella prosessilaitteiden käyttöön, joista suurimmat kuluttajat ovat massankäsittelyn prosessit ja niistä erityisesti jauhatus. Sähkönkulutus riippuu suoraan tuotannosta, mutta vaihtelee muun muassa lopputuotteen jauhatusasteen ja koneen ajonopeuden perusteella. (Energiehokas paperin valmistus n.d.) Polttoainetta pehmpaperikone tarvitsee jenkki sylinteriä ympäröivän huvan lämmittämiseen. Huuva koostuu kahdesta niin ikään kotelosta tai lohkoista, joiden sisälle johdettava kuuma ilma lämmitetään polttimia käyttämällä. Huuvan polttimet käyttävät polttoainetta usein öljyä tai kaasua. (Klerelid & Milosavljevic 2010, 191–194)

Lämpöenergian osuus pehmpaperikoneen energiankulutuksesta on ylivoimaisesti suurin, josta suurin osa kulutetaan koneen kuivatusosalla höyryn muodossa. Pehmpaperikoneen kuivatusenergiasta noin 40 % kuluu jenkki sylinterillä ja loppu 60 % huuvasa. (Klerelid & Milosavljevic 2010, 192) Kuivatuksen energiaintensiivisyyttä kuvastaa hyvin se, että kuivatusprosessin aikana

poistetaan vain 1 % paperinvalmistukseen käytettävästä vedestä, mutta kuivatusosa käyttää jopa 80 % koko paperikoneen energiasta. Toisaalta kuivatuksen aikaan saama veden haihtuminen voidaan hyödyntää lämmöntalteenoton avulla, ja talteen otettu lämpö puolestaan käyttää esimerkiksi prosessivesien lämmitykseen. (Energiatehokas paperin valmistus n.d.)

Energian tuottaminen lähellä tuotantolaitosta lisää tehtaan energiatehokkuutta. Suomalaiselle paperitehtaalle onkin ominaista, että se on joko integroitu voimalaitoksen kanssa tai voimalaitos sijaitsee tehtaan välittömässä läheisyydessä. Niin kutsutun CHP-voimalaitoksen (combined heat & power) tarkoitus on tuottaa vähintään paperitehtaan tuotannon vaatima lämpöenergia ja sähköenergiaa siltä osin, kuin voimalaitoksen tuotantokapasiteetti siihen riittää. On kuitenkin yleistä, että paperitehdas joutuu turvautumaan myös ostosähköön. Toisaalta esimerkiksi seisakkien aikaan voimalaitoksen tuottama ylimääräinen energia voidaan syöttää valtakunnalliseen sähköverkkoon ja paikalliseen kaukolämpöverkkoon. (Höyryn ja sähkön taseet n.d.)

6 Massan jauhatus

Käsittelemätön puukuitu ei sinällään sovi juuri minkään paperilajin valmistukseen. Kuitu on käsittelemättömänä jäykkä, sileäpintainen ja sen sidostenmuodostamiskyky on huono. Tämä on erittäin epäsuotuisaa paperin valmistuksen perustuessa nimenomaan puukuidun kykyyn muodostaa kuitusidoksia ja -verkostoja. Juuri tästä syystä jauhatus on kemiallisen massan käsittelyn tärkein osaprosessi, jonka tarkoituksena ei pelkästään ole hallita massan suotautumiskykyä vaan saada kuitun parhaat lujuusominaisuudet esiin sekä muokata kuidun muita ominaisuuksia halutun lopputuotteen saavuttamiseksi. (Koskenhely 2008, 94; Massojen jauhatus -yleistä n.d.)

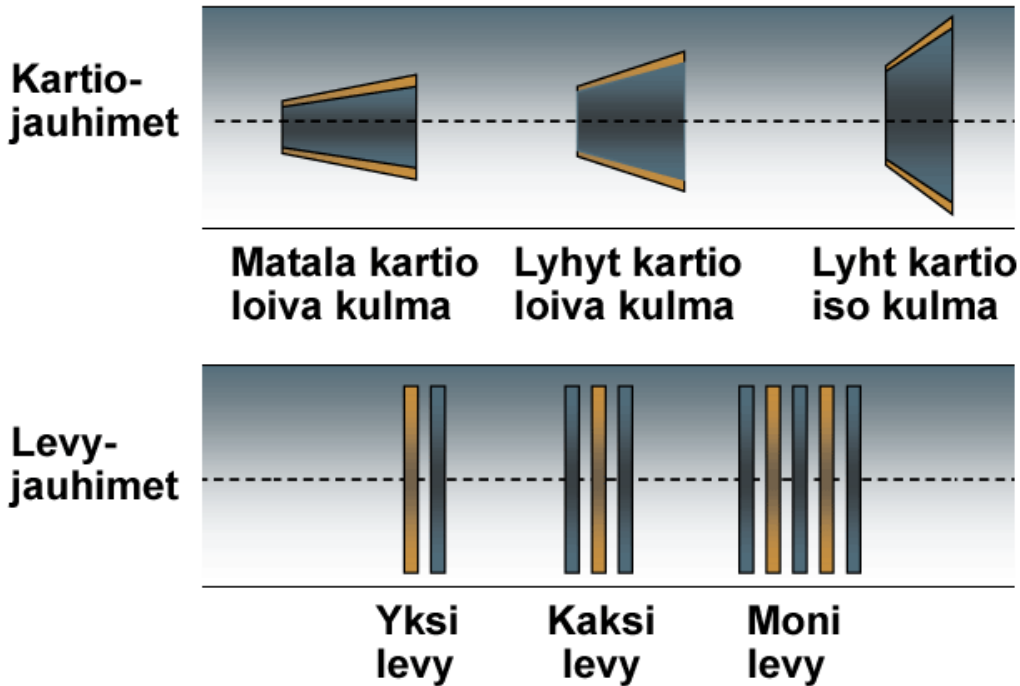
Jauhatuksella määritetäänkin suurelta osin lopputuotteen laatu, minkä takia jauhatuksen hallinta on erittäin tärkeä osa paperin valmistusta. Kun massa on jauhettu, ei lopputuotteen laatua pystytä enää merkittävästi muuttamaan. Huonolla jauhatuksen hallinnalla raaka-aineiden ja prosessiolosuhteiden tuomat häiriöt ennättävät koko paperinvalmistusprosessin läpi ja saattavat aiheuttaa lopputuotteen laadun epäyhtenäisyyttä. Oikeanlaisella jauhatusjärjestelmällä ja jauhatuksen säädöllä pidetään huoli tasalaatuisesta tuotannosta sekä parannetaan paperikoneen ajettavuutta ja energiankäytön hallintaa. (Jauhatuksen hallinta n.d.)

6.1 Jauhintyytit

Jauhatuksessa puukuitua manipuloidaan mekaanisesti jauhinterien välissä. Jauhin koostuu kahdesta terästä, staattorista ja roottorista, joiden välissä varsinainen jauhatus tapahtuu. Jauhatustapahtumassa kuidut kerääntyvät ensin jauhinterien särmille ja kulkeutuvat sitten terien läpi roottorin pyöriessä staattoria vasten, kunnes jauhettu massa lopulta poistuu terien jälkeen paperikoneen massa-annosteluun. Optimaalinen jauhatustulos saadaan oikeanlaisella terägeometrialla sekä jauhatusteholla, joka käytännössä tarkoittaa terien etäisyyttä toisistaan. (Jauhintyytit n.d.)

Yleisesti jauhimia on käytössä kahta tyyppiä: kartio- ja levyjauhimia. Peruseriaatteiltaan niiden toiminta on samanlainen, mutta ne eroavat toisistaan käyttökohteiltaan ja merkittävimmin terämuodoiltaan. Kartiojauhin on nimensä mukaisesti loivan kartion muotoinen, jossa ulompi kartio toimii staattorina ja sisempi kartio roottorina, joka pyörii akselin varassa staattoria vasten. Massa johdetaan jauhimeen kartion pienemmästä päästä, josta se kulkeutuu terien läpi paine-eron ja roottorin aiheuttaman pumppausvoiman avulla. Kartiojauhimia käytetään pääasiassa kemiallisen massan jauhamiseen. (Jauhintyytit n.d.)

Levy- ja kartiojauhintyyppiä

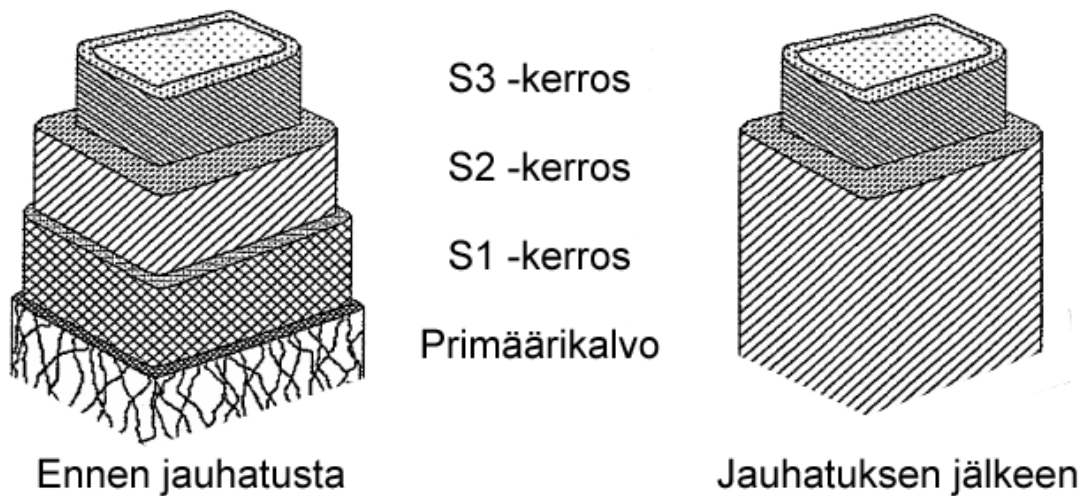


Kuvio 4 Levy- ja kartiojauhintyyppit (Jauhintyyppit n.d.)

Levyjauhin puolestaan koostuu perinteisesti joko kahdesta tai kolmesta teräkiekosta, joiden välissä kuitu liikkuu hydraulisen paineen ja keskipakoisvoiman avulla. Kahden kiekon levyjauhimesta toinen kiekko pyörii ja toinen pysyy paikallaan, kun taas kolmen kiekon levyjauhimesta keskimäinen kiekko pysyy paikallaan ja reunimmaisat kiekot pyörivät sitä vasten. Levyjauhimet ovat yleisemmässä käytössä mekaanista massaa käyttävissä tuotantolaitoksissa. (Jauhintyyppit n.d.)

6.2 Jauhatuksen vaikutus kuituun ja paperin ominaisuuksiin

Jauhatuksen tarkoitus on muuttaa kuidun rakennetta niin, että kuitu kykenee muodostamaan mahdollisimman vahvoja kuitusidoksia. Paperiteknisesti jauhatuksen tärkein tehtävä on rikkoa kuidun uloimmat kerrokset, joilla tarkoitetaan kuidun primäärikalvoa ja S1-kerrosta (kuvio 4). Primäärikalvo estää kuitua turpoamasta, jolloin kuitu ei kykene muodostamaan sidoksia ympäröivien kuitujen kanssa. Primäärikalvon ja S1-kerroksen rikkoutuessa S2-kerroksesta tulee kuidun uusi pintakerros. (Jauhatuksen vaikutus kuituihin ja massoihin n.d.)



Kuvio 5 Kuitu ennen ja jälkeen jauhatuksen (Jauhatuksen vaikutukset kuituihin ja massoihin n.d.)

Jauhatuksen ansiosta kuitu fibrilloituu sekä ulkoisesti että sisäisesti. Ulkoinen fibrillaatio tarkoittaa kuidun pintakerroksen löystymistä ja pinnasta irtoavia fibrillikimppuja, jotka tekevät kuidusta ikään kuin pörröisen. (Sirviö 2008, 68.) Sisäisellä fibrillaatiolla taas tarkoitetaan kuidun sisäisen rakenteen löystymistä. Sisäkerrosten väleissä olevat vetysidokset rikkoutuvat, joiden seurauksena kuitu muuttuu joustavaksi ja plastiseksi. Sisäisen fibrillaation myötä kuitu myös turpoaa, mikä yhdessä kuidun ”pörröisen” ulkomuodon kanssa kasvattavat kuidun pinta-alaa ja parantavat näin kuitujen välistä sitoutumista. (Jauhatuksen vaikutukset kuituihin ja massoihin n.d.)

Etenkin matalasakeusjauhatuksessa ilmenee aina myös enemmän tai vähemmän kuitujen katkeilua, jonka vaikutus lopputuotteeseen on usein negatiivinen. Kuidun pituus on hyvin merkittävässä roolissa etenkin lopputuotteen veto- ja repäisylujuuksia tarkasteltaessa. Katkeilua voidaan yrittää hillitä pienemmällä jauhatusintensiteetillä, mutta silloin taas riskinä on jauhatustuloksen huonontuminen. (Jauhatuksen vaikutus kuituihin ja massoihin n.d.) Jauhatusta on tosin ennen käytetty myös varta vasten kuitujen lyhentämiseen, kun kuituraaka-ainetta on vaihdeltu eikä tarvittavaa kuitupituutta ole välttämättä ollut suoraan saatavilla. Menetelmä ei tosin ole yksittäisiä tuotantolaitoksia lukuun ottamatta enää käytössä. (Koskenhely 2008, 95)

Paperin ominaisuuksien kannalta jauhatus vaikuttaa merkittävimmin paperin lujuuksiin, paperin pinnan sileyteen, optisiin ominaisuuksiin sekä paperin neliömassavaihteluun eli formaatioon. Fibrillaation tuoma kuidun joustavuus ja plastisuus parantavat paperin lujuusominaisuuksia, ja kuidun turpoaminen puolestaan tekee paperin pinnasta sileämmän ja tiheämmän. Tiheämpi paperiraina aiheuttaa tosin sen, ettei vesi suotaudu enää yhtä helposti paperirainasta ja rainan kuivattamiseen joudutaan käyttämään enemmän energiaa. Ulkoinen fibrillaatio osaltaan myös huonontaa vedenpoistoa, sillä ulkoisesti fibrilloitunut kuitu kykenee sitomaan itseensä enemmän vettä verrattuna käsittelemättömään kuituun. Kuidun turpoamisen ja sidostenmuodostuskyvyn on havaittu myös huonontavan paperin bulkkia, joka paperinvalmistajan näkökulmasta on lähtökohtaisesti aina negatiivinen seuraus liiallisesta jauhatuksesta. (Koskenhely 2008, 95–97.)

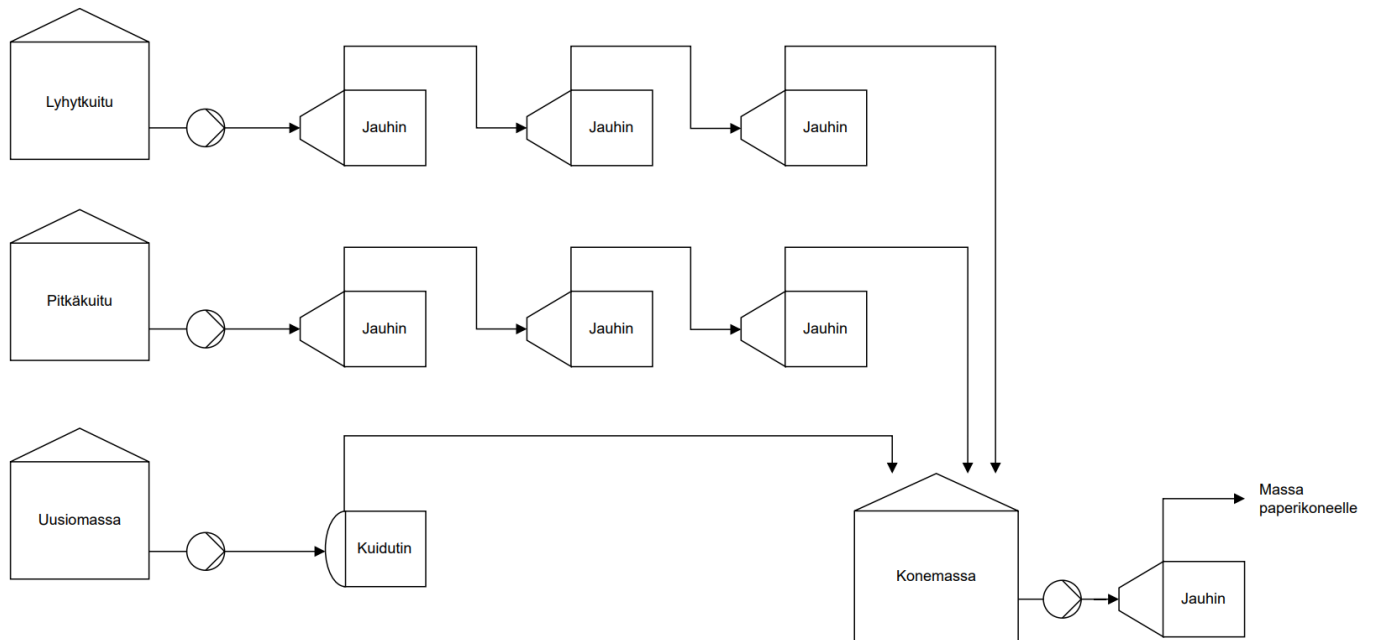
6.3 Jauhatusjärjestelmät

Jauhatusjärjestelmällä tarkoitetaan jauhatuskonseptia sekä jauhinlinjaa tai -linjoja. Jauhatusjärjestelmän suunnittelu ja toteutus tehdään aina lopputuotteen tavoiteltujen ominaisuuksien pohjalta, mutta järjestelmään vaikuttavat suuresti myös paperikoneen tuotantokapasiteetti, raaka-aine sekä luonnollisesti tuotantotilojen koko. Mitä suurempi jauhatustarve, sitä enemmän tarvitaan jauhimia, mikä luonnollisesti vaatii enemmän tilaa. (Koskenhely 2008, 122–123)

Jauhatuskonseptilla tarkoitetaan käytännössä massojen jauhatussakeutta. Konsepteja on olemassa kaksi; matala- ja suursakeusjauhatusta, joita voidaan tietyillä paperilajeilla käyttää myös sekaisin. Matalasakeusjauhatuksessa massan sakeus vaihtelee välillä 3,5–6 %, ja konseptia käytetään monipuolisesti eri paperi- ja kartonkilajeille. Suursakeusjauhatusta käytetään puolestaan erityisen lujaa ja kestäväää kuituverkkoa vaativilla säkki- ja pakkauspapereilla, joiden massa jauhetaan tyypillisesti vähintään 20 % sakeudessa. Konseptien väliin jäävää aluetta kutsutaan keskisakeusalueeksi, jonka sakeuksia voidaan käyttää esimerkiksi joillekin kierrätyskuidusta valmistettaville lajeille. (Jauhatusjärjestelmät n.d.; Koskenhely 2008, 124–125)

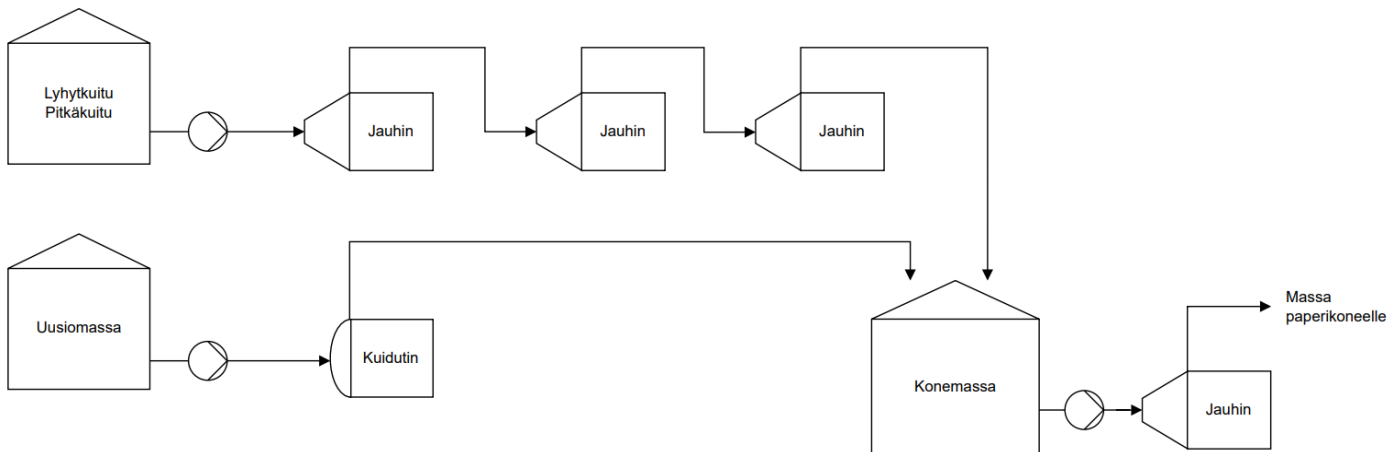
Jauhinlinjalla taas tarkoitetaan eri massakomponenttien jauhatusmenetelmää, jauhimien lukumäärää ja kokoa sekä jauhimien kytkentätapaa. Varsinainen jauhinlinja koostuu massasäiliöistä ja tietystä määrästä jauhimia, jotka ovat kytketty joko rinnan tai sarjaan. Jauhimien määrä riippuu siitä, kuinka suurta jauhatusintensiiteettiä tavoitellaan ja kuinka paljon yhtä jauhinta pystytään

kuormittamaan. Lopputuotteesta riippuen eri massakomponentteja voidaan jauhaa joko yhteisessä jauhinlinjassa tai jokainen komponentti omissa jauhinlinjassaan, jolloin puhutaan erillisjauhatusesta (kuvio 6). (Koskenhely 2008, 122–123)



Kuvio 6 Esimerkki erillisjauhatusesta, mukaillen Koskenhely (2008)

Erillisjauhatusessa jokainen massakomponentti jauhetaan omissa jauhinlinjassaan ja jauhetut massat sekoitetaan lopulta yhteisessä sekoitussäiliössä ennen massan annostelua paperikoneelle. Yleistä onkin, että esimerkiksi pitkä- ja lyhytkuitu jauhetaan omissa jauhinlinjoissaan. Teoriassa erillisjauhatus on kuituominaisuuksien kannalta paras vaihtoehto, sillä silloin tietyn kuitulajin ominaisuuksiin pystytään vaikuttamaan parhaiten. Yhteisjauhatusessa massakomponentit sekoitetaan ensin yhteiseen sekoitussäiliöön, josta ne johdetaan jauhinlinjan läpi paperikoneen massa-annosteluun. Yhteisjauhatusen ongelmana onkin, ettei tietyn massalajin ominaisuuksia saada varmuudella esiin toivotulla tavalla. Yhteisjauhatusessa saattaa myös esiintyä niin sanottua heterogeenisyyttä eli epäyhtenäisyyttä, joka tarkoittaa sitä, etteivät kaikki kuidut saa samanlaista käsitelyä. Toisaalta erillisjauhatusessa on otettava huomioon investointikustannukset sekä usean jauhinlinjan vaatima tila. (Massojen yhteis- ja erillisjauhatus n.d.; Koskenhely 2008, 123–124)



Kuvio 7 Esimerkki yhteisjauhatuksesta, mukailten Koskenhely (2008)

Jauhatusjärjestelmät voivat toiminnaltaan olla myös joko jaksottaisia tai jatkuvia, ja jauhimien kokoonpanon puolesta yksi- tai monivaiheinen. Yllä esitetyt kuvat ovat monivaiheisia jatkuvia järjestelmiä, sillä massa kulkee kerran koko jauhinlinjan läpi, joka koostuu useasta jauhimesta. (Jauhatus tulokseen vaikuttavat tekijät n.d.)

Jaksottaisessa järjestelmässä massa jauhetaan useammassa erässä niin, että massa voidaan jauhimelta palauttaa aina takaisin jauhinlinjan syöttösäiliöön. Jauhimen kuormitusta voidaan säädellä eri jauhatuserien välillä, mikä parantaa jauhatusprosessin hallitsemista ja näin ollen myös massan tasalaatuisuutta. Jatkuvassa järjestelmässä jauhatusprosessia hallitaan puolestaan säätämällä jauhimen tai jauhimien kuormitusta. Halutun jauhatus tuloksen saaminen on siinä määrin haastavampaa, että jauhinlinja on niin sanotusti yksisuuntainen eli jauhinten lukumäärä ja tuotanto pysyvät vakiona. Luonnollisestikaan massaa ei tällöin voida palauttaa uudelleen jauhettavaksi ja jauhatus tulos voi jäädä alle tavoitellun. (Jauhatusjärjestelmät n.d.)

6.4 Jauhatuksen hallinta

6.4.1 Ominaisrämmäkuormateoria

Yleisin jauhatusprosessia kuvaava metodi on Brechtin ja Sievertin vuonna 1966 esittämä ominaisrämmäkuormateoria, jossa oletetaan jauhatusvaikutuksen syntyvän ainoastaan jauhimen teräsärmistä. Teorian mukaan itse jauhimella ei ole vaikutusta jauhatuksen lopputulokseen, vaan haluttu jauhatustulos saadaan aikaan tietyllä ominaisrämmäkuormalla ja jauhatusteholla. Prosessin intensiivisyyttä kuvataan kahdella parametrilla, joista toinen kertoo jauhatuksen määrästä ja toinen jauhatustavasta. (Jauhatusteorioita n.d.)

Jauhatuksen määrää ilmaistaan energian ominaiskulutuksen (EOK) avulla eli jauhimeen vietynä kokonaisenergiana, joka kohdistuu jauhimen läpi virtaavaan massavirtaan (kWh/t). Käytännössä tämä tarkoittaa siis yhtä massatonna kohden kulutettua jauhatusenergiaa. Jauhatuksen hallinnassa EOK on usein vakioitu arvo, sillä sitä säätämällä pystytään tasoittamaan raaka-aineen lyhytaikaiset laatuvahtelut sekä säätämään esimerkiksi massan jauhatusastetta. (Jauhatuksen hallinta n.d.) Energian ominaiskulutuksen on lisäksi havaittu olevan ratkaiseva tekijä muun muassa kuidun sisäisen fibrillaation hallinnassa (Koskenhely 2008, 96).

Jauhatustapaa puolestaan kuvaa ominaisrämmäkuorma (OSK), joka kertoo jauhatuskujen intensiteetistä eli siitä, kuinka paljon energiaa kuitu ottaa vastaan roottorin särmältä staattorin särmälle (J/m). Ominaisrämmäkuorma on kuitukohtainen ja vaihtelee huomattavan paljon esimerkiksi pitkä- ja lyhytkuiduilla. Pitkäkuidulla OSK vaihtelee välillä 2,0–6,0 J/m ja lyhytkuidulla puolestaan välillä 0,8–1,5 J/m. Pitkäkuidun korkeammalla ominaisrämmäkuormalla jauhatustulokseen päästään pienemmällä EOK:lla, joskin lopputuotteen lujuusominaisuuksien kustannuksella. Lyhytkuidulla vaikutus on taas päinvastainen: pienempi OSK nopeuttaa jauhatustulokseen pääsyä sekä parantaa lopputuotteen lujuuksia. (Jauhatusteorioita n.d.; Koskenhely 2008, 96, 115–116)

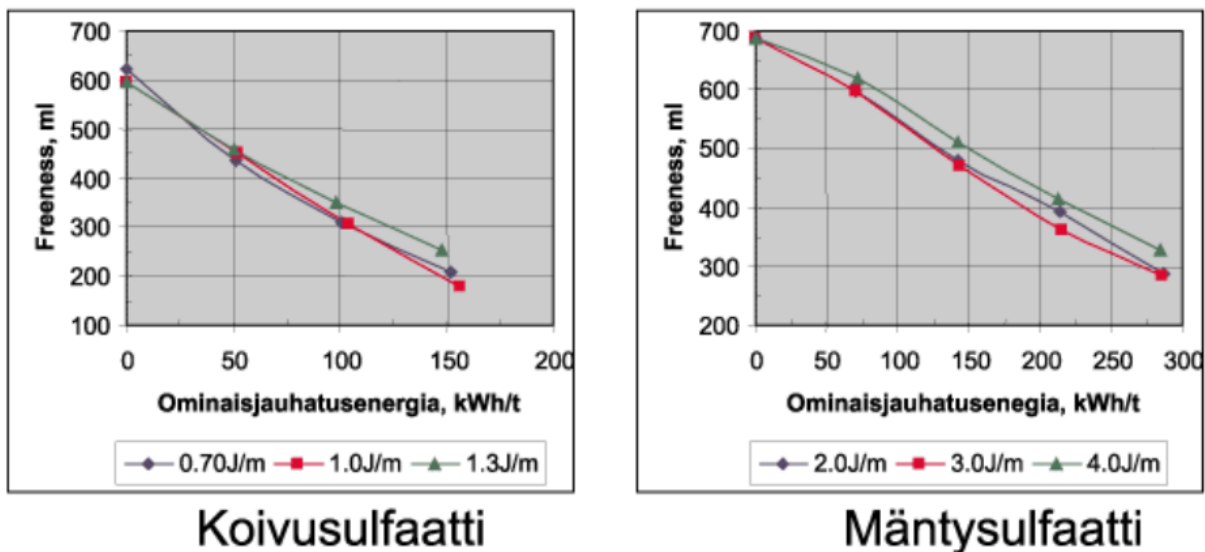
Jauhatustapa sekä jauhatuksen määrä valitaan tarkasti sen perusteella, millaista kuitua käytetään, millainen jauhatustulos halutaan ja mitkä ovat lopputuotteen halutut ominaisuudet. Näihin liittyvät olennaisesti myös aikaisemmassa luvussa käsitellyt jauhinlinjat ja niiden kokoonpano. Useammasta jauhimesta koostuva jauhinlinja ei välttämättä vaadi yksittäiseltä jauhimelta yhtä suurta

energian käyttöä, ja toisaalta yhden jauhimen linjassa jauhimen on kyettävä yksin saavuttamaan haluttu jauhatustulos. (Koskenhely 2008, 122–123)

6.4.2 Jauhatusaste

Jauhatusaste kertoo, kuinka pitkälle massaa on jauhettu. Tavallisesti jauhatusaste ilmaistaan massasulpun suotautumiskyvyn eli toisin sanoen massan vedenpoisto-ominaisuuksien avulla, johon tavallisin käytetty menetelmä on Freeness (CSF, Canadian Standard Freeness). Freeness-mittauksessa mitataan veden määrää (ml), joka suotautuu sihtilevyn läpi tietyssä sakeudessa olevasta massasulpusta. Mitä vähemmän vettä suotautuu, sitä pienempi Freeness-lukema on ja päinvastoin mitä enemmän vettä suotautuu, sitä suurempi Freeness massalla on. (Freeness n.d.)

Luvussa 6.2 kerrottiin jauhatuksen aiheuttamasta fibrillaatiosta, jonka myötä paperirainasta tulee tiheämpi ja näin ollen vesi suotautuu siitä heikommin ja hitaammin. Tällöin voidaan sanoa, että massa on pitkälle jauhettua ja Freeness-arvo on oletettavasti pieni. Massan heikko suotautuvuus ja täten pieni Freeness-arvo tarkoittavat myös siis sitä, että rainaa on kuivatettava enemmän ja räjummin, mikä luonnollisesti lisää puristuksen ja kuivatusenergian tarvetta paperikoneen puristin- ja kuivatusosilla.



Kuvio 8 Freeness-arvon kehitys jauhimen ominaisenergian mukaan (Jauhatustulokseen vaikuttavat tekijät n.d.)

Toinen jauhatustetta kuvaava menetelmä on SR-luvun (Schopper-Riegler) määrittäminen. Free-nekseen verrattuna SR-luku perustuu pikemminkin veden suotautumisnopeuteen kuin suotautuneen veden määrään, minkä perusteella suotautuneen veden tiheys suhteutetaan näytteen alkuperäiseen tiheyteen. (KnowPap sanasto n.d.; ISO 5267-1:1999) Mittausmenetelmät eroavat toisistaan myös sillä tavalla, että siinä missä Freeness on käänteisesti verrannollinen jauhatusteeseen verrattuna, SR-luku puolestaan on suoraan verrannollinen jauhatusteeseen verrattuna. (Heikkurinen ja muut 2009, 479)

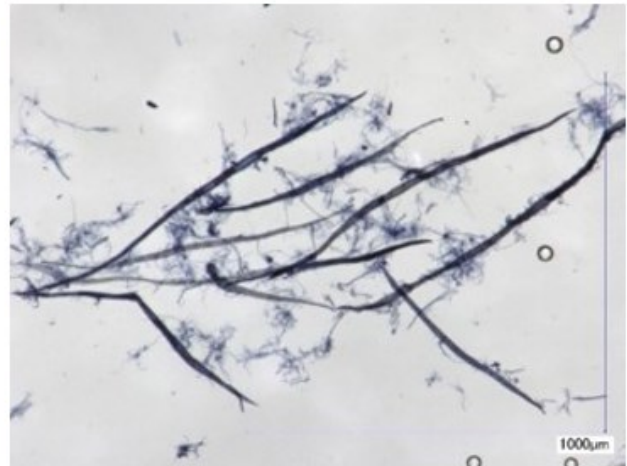
7 Mikrofibrilloitu selluloosa

Mikrofibrilloidulla selluloosalla (MFC, microfibrillated cellulose) tarkoitetaan äärimmäisen pieneen kuitukokoon käsiteltyä sellua. Mikrofibrilloitu sellu valmistetaan irrottamalla ja hajottamalla puukuidun fibrillit ja mikrofibrillit joko kemiallisesti entsyymaattisella käsittelyllä tai mekaanisesti esimerkiksi jauhamalla. Kuidun hierarkisen rakenteen ansiosta kuitu saadaan hajotettua ja fibrilloitua nanomittakaavan selluloosaksi, jonka kuituverkko on vahva ja poikkeuksellisen luja. MFC onkin erityisesti paperiteollisuudessa herättänyt kiinnostusta sen tuomien ominaisuuksien vuoksi. (Alén 2011, 343–345; Boufi ja muut 2016, 152)

Luvussa 5.2 käsiteltiin eri puukuitujen pituuksia, jotka vaihtelevat vajaasta millimetristä jopa muutamisiin millimetreihin. Mikrofibrilloidun kuidun pituus puolestaan liikkuu mikrometreissä ja leveys nanometreissä, joskin myös MFC-kuidun dimensiot vaihtelevat sen raaka-aineesta riippuen. Esimerkiksi paperin valmistukseen käytettävät pitkä- ja lyhytkuidut ovat luonnostaan erilaisia muun muassa kuitumorfologian, kemiallisen koostumuksen sekä sisäisten lujuuksien suhteen kuten luvussa 6.2 todettiin. Eri puulajeista valmistettu MFC tuo luonnollisesti siis myös eri ominaisuuksia lopputuotteelle. (Li ja muut 2023.)



Jauhamaton kuitu



Pitkälle jauhettu kuitu

Kuvio 9 Jauhamaton lyhytkuitu ja mikrofibrilloitunut lyhytkuitu (Metsä Tissue 2019)

Mikrofibrillaatio mahdollistaa lopputuotteen kannalta hyödyllisten ominaisuuksien kehittämisen, kuten paperin märkä- ja kuivalujuuden. Mikrofibrilloidun sellun vaikutukset lopputuotteeseen ovat normaaliin jauhatukseen verrattaessa hyvin samankaltaiset, joskin volyymiltään suuremmat. MFC parantaa paperin kokonaiskestävyyttä, vähentää sen huokoisuutta sekä lisää tiheyttä. Mikrofibrillaatioon liittyvissä tutkimuksissa havaittiin myös, että MFC:n lisääminen paperimassaan nosti myös massan jauhatustasetta huomattavasti, mikä taas lisää paperin kuivatusenergian tarvetta. Tästä syystä mikrofibrilloidun sellun lisäämistä paperilajien kuituseoksiin tulisikin tutkia huolellisesti optimaalisen massaosuuden löytämiseksi. (Boufi ja muut 2016, 156)

Mikrofibrilloidun sellun yksi ongelmista onkin juuri sen suuri energiankulutus. Mikrofibrillaation saavuttamiseksi käytetyimmät mekaaniset käsittelytavat ovat joko jyräntä tai jauhatus, joka esimerkiksi jauhatuksen osalta tarkoittaisi normaalin massan jauhatuksen lisäksi erillistä jauhinlinjaa. Energiankäytön kannalta siis entsymaattinen käsittely olisi kannattavampi vaihtoehto, mutta kemikaalien käyttö saattaa taas ympäristöaspektin näkökulmasta kyseenalaista. (Boufi ja muut 2016, 152)

Mikrofibrilloidun selluloosan etuna on kuitenkin se, että sen vaikutukset näkyvät jo hyvin alhaisilla pitoisuuksilla ja sitä voidaan valmistaa lähes jokaisesta selluloosalähteestä. Se ei myöskään vahin-

goita kuitujen rakennetta koostuessaan samasta raaka-aineesta kuin muukin massa. Mikrofibriloidun selluloosan sekä muiden “nanotuotteiden” monipuolisuus ja potentiaali on vasta viimeisimmän vuosikymmenen aikana ymmärretty, joten niiden tutkiminen on vielä erittäin alkutekijöissä. Sellupohjaisten nanotuotteiden käyttö antaa kuitenkin lupaavia mahdollisuuksia hyödyntää nanotuotteita muun muassa lisäaineina paperin ja kartongin valmistuksessa. (Boufi ja muut 2016, 155; Alén 2011, 343–346)

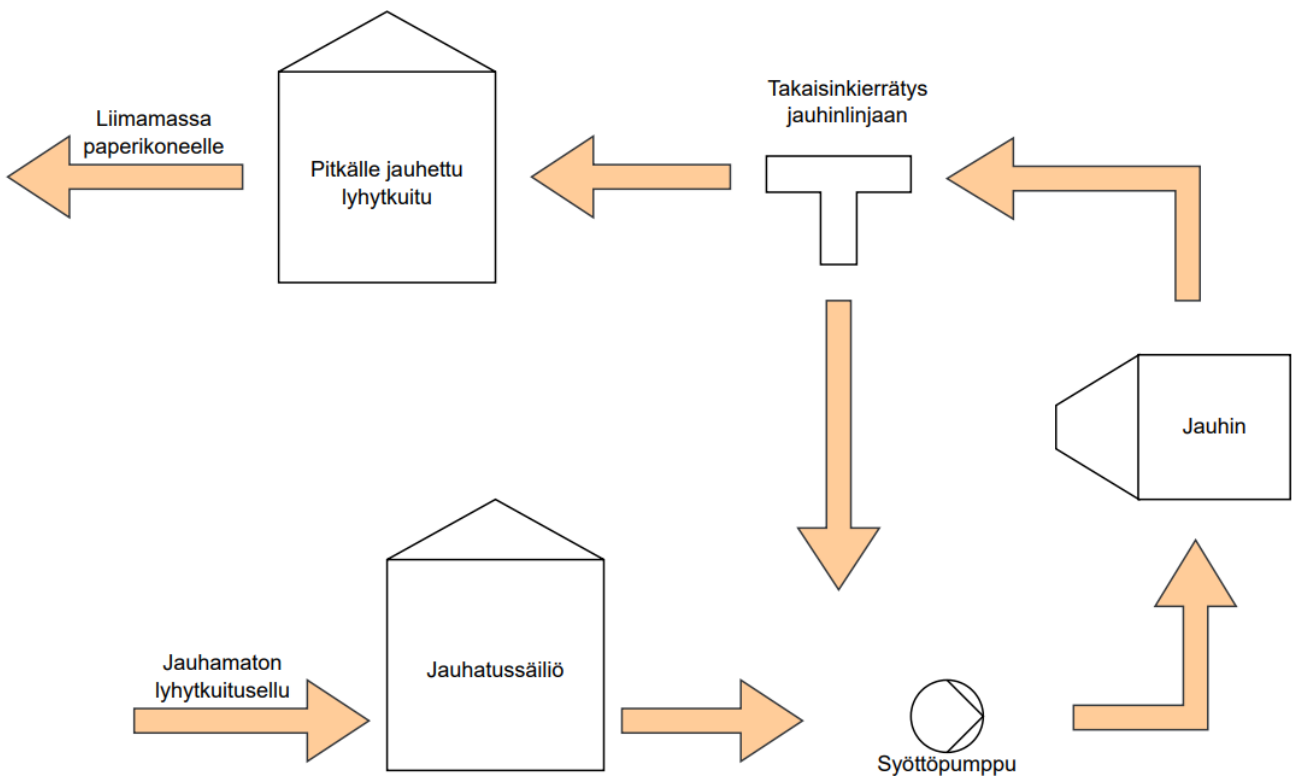
8 Liimamassa

Opinnäytetyössä tutkittava liimamassa (glue pulp) tarkoittaa niin ikään mekaanisesti fibrilloitua lyhytkuitua tai toisin sanoen pitkälle jauhettua lyhytkuitua. Lyhytkuidun tavallista pidempi jauhatus perustuu mikrofibriloidun sellun valmistukseen, joskin liimamassaa ei jauheta aivan mikrofibrillaation tasolle asti. Liimamassakuidut ovat MFC-kuituja hieman suurempia, mutta tuovat lopputuotteelle samoja ominaisuuksia kuin mikrofibrillaatio. Liimamassan tarkoituksena onkin toimia kuitupohjaisena lisäaineena, joka parantaa lopputuotteen lujuusominaisuuksia. Liimamassan käytön tavoitteena onkin vähentää raaka-ainekustannuksia vähentämällä kalliimman pitkäkuitusellun käyttöä, jolla normaalisti haettaisiin lopputuotteelle tavoitellut lujuusominaisuudet.

Liimamassaa käytettäessä lujuusominaisuudet haetaan siis fibrillaation avulla lyhytkuidusta, jota normaalissa lajireseptissä käytetään lähinnä parantamaan lopputuotteen formaatiota, opasiteettia sekä paperin pinnan sileyttä. Kuten luvussa 7 todettiin, mikrofibrillaation avulla kuidusta saadaan paremmin sen lujuusominaisuudet esiin, jolloin lyhytkuituakin voidaan liimamassan muodossa käyttää korvaamaan osa pitkäkuidusta.

Liimamassan valmistus perustuu jaksottaiseen jauhatukseen, jonka taustalla oleva teoria on tuttu muun muassa tiivispaperimassan valmistuksesta. Muihin paperilajeihin verrattuna normaali pehmopaperimassa jauhetaan huomattavasti kevyemmin, kun taas tiivispaperimassa on todella vahvasti jauhettua ja kuitu vahvasti fibrilloitunutta, jolloin sen jauhatusjärjestelmätkin ovat pehmopaperiin verrattuna paljon suurempia. Pehmopaperin jauhatusjärjestelmä koostuu perinteisesti vain yhden jauhimen linjoista, jolloin koko jauhatusjärjestelmässä jauhimia saattaa olla vain 1–3 kappaletta riippuen siitä, jauhetaanko kaikki massakomponentit vai vain osa niistä.

Tiivispaperi taasen on lopputuotteena todella lujaa ja sillä on hyvä öljyn ja rasvankestävyys, minkä takia sitä puhekielessä kutsutaankin monesti voimapaperiksi. Tiivispaperille tavoitellut ominaisuudet saavutetaan lisäaineiden lisäksi nimenomaan suurella jauhatusmäärällä, jolloin tiivispaperimassan jauhinlinja koostuu jopa kuudesta eri jauhimesta. Kuidun samaa jauhatusmäärä on siis moninkertainen verrattuna pehmopaperin kuituihin verrattuna. (Koskenhely 2008, 124; Hartikainen, Laamanen & Lahti 2008, 213)



Kuvio 10 Liimamassan jauhinlinjan peruseriaate

Lyhytkuidun pitkälle jauhaminen perustuu tässä prosessissa siis massan jauhatuksen jaksottamiseen eli osa jauhetusta massasta ohjataan aina takaisin jauhinlinjaan (kuvio 10). Siinä missä tiivispaperimassa jauhetaan usean jauhimen kautta, liimamassassa sama efekti saadaan kierrättämällä massaa saman jauhimen läpi useaan kertaan. Massan kierto eli takaisinkierätys säädetään prosentuaalisesti niin, että asetettu prosenttiosuus massasta kiertää aina takaisin linjaan. Tästä syystä

liimamassalinja onkin oma jauhinlinjansa, sillä pehmopaperille tyypillisesti muut jauhatusjärjestelmän linjat ovat niin sanotusti yksisuuntaisia eikä massaa täten voida kierrättää takaisin jauhatusprosessin alkuun.

9 Työn toteutus

9.1 Tarkoitus

Opinnäytetyössä tehtävä tutkimus oli kolme kuukautta kestävä tarkastelujakso, jonka aikana tutkittiin paperikoneen energian ja raaka-aineen käyttöä sekä lopputuotteiden laatua. Tutkimuksen pohjalta tarkasteltiin liimamassalinjan kustannustehokkuutta sekä arvioitiin liimamassan vaikutuksia 11 eri paperilajin laatuun.

Tutkimuksen tarkoituksena oli analysoida uuden jauhinlinjan vaikutuksia lajikohtaisesti pehmopaperikoneen resurssien käyttöön. Tarkastelujakson aikana tutkittiin, kuinka paperikoneen energiantarve muuttui eri paperilajeilla liimamassan myötä, kuinka lopputuotteiden lujuusominaisuudet kehittyivät ja muuttuiko raaka-aineen kulutus toivotulla tavalla. Tutkimuksen loppupuolella tarkasteltiin myös kolmen lopputuotteen osalta eri jauhatusasteen vaikutuksia energian käyttöön ja laatuun, minkä perusteella saatiin kartoitettua liimamassan maksimijauhatusmäärää.

Opinnäytetyön tutkimuksen pohjalta tarkoitus oli myös optimoida jauhinlinjan operointi ja esittää uudet lajikohtaiset massareseptit sekä ajo-ohjelmat toimeksiantajalle. Uusi jauhinlinja ei ennen opinnäytetyön alkua ollut ollut jatkuvassa tuotannossa mukana lukuun ottamatta asennuksen yhteydessä tehtyjä koeajoja, joten valmiita lajikohtaisia ajo-ohjelmia ei ollut vielä kehitetty. Tämä antoi toisaalta hyvät puitteet vertailla paperikoneen energian ja raaka-aineen käyttöä sekä lopputuotteiden laatua ilman, että tietoa olisi tarvinnut koota pitkältä aikaväliltä. Jauhinlinjan optimoinnissa oli tarkoitus ottaa huomioon myös energian hinta, sillä mikäli jauhinlinja olisi osoittautunut erittäin energiaintensiiviseksi, sen operointia olisi mahdollisesti jouduttu rajoittamaan energian hinnan ollessa korkealla.

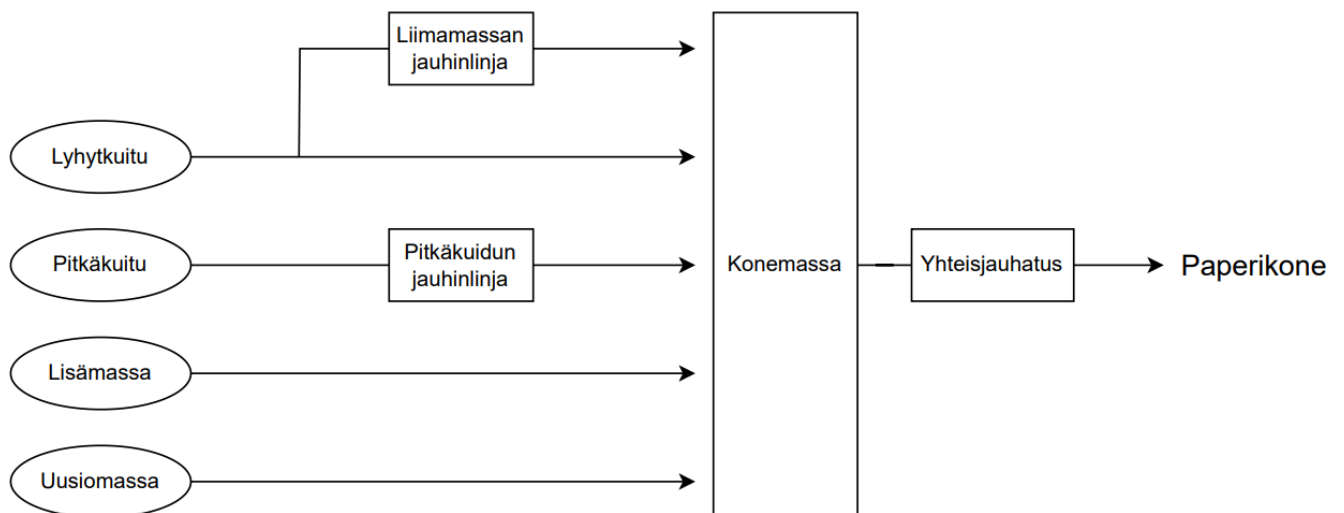
Opinnäytetyössä tehtävä tutkimus perustui vain tiettyyn jauhatusteeseen, joka saavutettiin tietyillä jauhinlinjan asetuksilla. Näihin ei tarkastelujakson aikana tehty muutoksia, jotta jauhatustuloksesta saatiin mahdollisimman tasainen ja siten etenkin energian kulutustiedoista mahdollisimman luotettavat. Myös kuituseoksen osalta liimamassan vaikutuksia tarkasteltiin pääasiassa vain yhdellä osuudella, sillä tutkimusaineiston kerääminen kaikille tutkittaville paperilajeille sekä tulosten analysointi ja esittäminen olisivat muuten paisuneet erittäin työläiksi. Tämän lisäksi opinnäytetyön tutkimukselle varattu aika oli rajallinen. Muitakin massaosuuksia ja eri jauhatustetta päästiin tarkastelujakson aikana kuitenkin koeajamaan muutamilla paperilajeilla, ja näiden koeajojen tuloksia on tuloksissa myös käyty läpi.

9.2 Tutkimusolettamus

Tutkimuskysymyksiä lähestyttiin sillä oletuksella, että liimamassan käyttöönotto tulee lisäämään energiankulutusta paperikoneella lajista riippumatta. Teoriaosuudessa käsiteltiin jauhatuksen ja mikrofibrillaation vaikutuksia paperirainaan ja sitä kautta paperikoneen energiankäyttöön, joiden pohjalta kuivatusenergian tarpeessa odotettiin näkyvän merkittävää nousua. Massan jauhaminen ja kuitujen fibrilloituminen tihentävät paperirainaa ja saavat kuidun sitomaan itseensä enemmän vettä, minkä takia muun muassa vedenpoiston tiedettiin vaativan enemmän energiaa. Kuivatusenergian lisääntyminen pehmopaperikoneella tarkoittaisi siis suurempaa höyryntarvetta jenkkisylinteriin, sylinterin höyryn paineen nousua, kuumempaa ilmaa huuvasysteemiin eli toisin sanoen huuvalohkojen lämmittämiseen tarvittaisiin enemmän kaasua. Hypoteesissa pidettiin mahdollisina toimenpiteinä myös puristuksen sekä imupaineen lisäämistä vedenpoiston tehostamiseksi, jotka puolestaan lisääisivät sähköenergian kulutusta.

Jauhatusenergian osalta oli odotettavissa, että jauhatusjärjestelmän (kuvio 11) energiankulutus tulee nousemaan, vaikkakin paperikoneen muilla jauhimilla ei todennäköisesti olisi tarpeen jauhaa yhtä paljoa kuin ilman liimamassaa. Tämä olettamus perustui fibrillaation tuomiin lujuusominaisuuksien paranemiseen. Jauhatusjärjestelmän täysi jauhatuskapasiteetin käyttö saattaisi aiheuttaa sen, että lopputuote olisi liian lujaa eikä siitä syystä jatkojalostettavaa. Olettamukseen liittyi olennaisesti myös se, että liimamassalinjan maksimi jauhatusteho oli muihin jauhinlinjoihin verrattuna jopa kaksinkertainen.

Laatuaspektin osalta liimamassan odotettiin parantavan lopputuotteiden lujuusominaisuuksia merkittävästi pienelläkin annostelulla. Jauhatuksen aikaansaama kuidun fibrilloituminen suurentaa kuidun pinta-alaa, jolloin kuitu kykenee muodostamaan lujempia sidoksia parantaen etenkin paperin vetolujuutta. Talouspaperin osalta lujuusominaisuuksien parantuminen koettiin myönteiseksi vaikutukseksi, sillä talouspaperista halutaan lopputuotteena usein mahdollisimman lujaa. WC-papereiden osalta liimamassan vaikutuksia lujuuteen haluttiin maltillisemmalla tasolla, sillä liian suuri lujuus saattaisi vaikuttaa paperin jalostettavuuteen sekä hajoavuuteen viemäriputkistoissa. Liimamassan tuomien lujuusominaisuuksien myötä myös paperin paksuudessa ja venymässä odotettiin näkyvän pieniä muutoksia. Parempien kuitusidosten ja lujemman paperin myötä paperin venymä todennäköisesti kasvaisi ja tiheämpi paperi puolestaan pienentäisi paperin paksuutta, mutta näiden muutosten ei odotettu olevan järin merkittäviä.



Kuvio 11 Tutkimuskohteen jauhatusjärjestelmä

Viimeisenä liimamassan varsinaisena tarkoituksena oli vähentää pitkäkuitusellun käyttöä eli pitkäkuidun massaosuudesta korvattaisiin tietty prosentuaalinen osuus liimamassalla. Raaka-aineen kulutuksen odotettiin muuttuvan sen perusteella, kuinka paljon liimamassaa kussakin lajireseptissä käytettiin.

9.3 Tutkimusaineiston keruu ja järjestely

Kustannustehokkuutta tutkittaessa ensimmäinen ja tärkein askel oli tunnistaa ja määrittää tutkitavat resurssit ja tutkia niiden käyttöä prosessissa. Tutkimuksen alussa pyrittiin saamaan perusteellinen kuva tutkimuskohteena olleen paperikoneen toiminnasta, jauhatusjärjestelmästä sekä paperin laadun hallinnasta. Alkukartoitus suoritettiin pitkälti havainnoimalla paperikoneen operaattoreiden toimintaa ja toimenpiteitä haluttujen laatuominaisuuksien saavuttamiseksi.

Kvantitatiiviselle tutkimukselle tyypillisesti valtaosa tutkimusaineistosta kerättiin numeerisessa muodossa paperikoneen prosessiohjaus- ja laadunhallintajärjestelmistä. Aineiston järjestely vaati erittäin paljon tarkkuutta ja järjestelmällisyyttä, sillä esimerkiksi energian kulutustietoja analysoidessa Excel-taulukossa käsiteltiin jopa tuhansia rivejä numeerista tietoa. Keskeisin työkalu opinäytetyön tutkimuksessa olikin Excel, johon kerättiin aluksi lajikohtaisesti tietoa paperikoneen ajoparametreista (taulukko 3). Prosessin ymmärtämisen kannalta oli tärkeää oppia tunnistamaan, miten eri paperilajit vaikuttavat eri parametreihin ja mitkä parametrit olivat merkittävimässä asemassa, jotta vaaditut laadutavoitteet voitiin saavuttaa.

Taulukko 3 Esimerkki paperikoneen ajoparametrien Excel-seurantataulukosta

		Energiankulutus TOTI 1					
		Teho (kW)	EOK (kWh/tn)	Paine (bar)	Kuormitus (kN/m)	Lämpötila (in)	Lämpötila (out)
Tampuuri	Jauhin 1, 2, ... jne.						
	Huuva, märkä pää						
	Huuva, kuiva pää						
	Puristintela						
	Imupaine, imukääntötela						
	Imupaine, viiraosa						
	Jenkkiylinteri						

Laadun tarkkailussa käytettiin tuotannon QMS-laadunvalvontajärjestelmä (quality management system), johon oli mahdollista luoda oma laaturaporttipohja opinäytetyön tutkimusta varten. QMS kerää tampuurikohtaiset tiedot niin on-line laatumittauksista kuin operaattoreiden itse tekemistä mittauksista. Paperikoneen operaattorit suorittavat märkä- ja kuivavetolujuus-, venymä- ja

paksuusmittaukset joka toisesta valmistuneesta tampuurista, joiden tulokset sitten kirjautuvat laadunvalvontajärjestelmään. Paperikoneen on-line mittauksista laaturaporttiin kirjautuvat puolestaan keskimääräiset mittausarvot tampuurin valmistusajalta. Laaturaporttiin pystyttiin näiden lisäksi ajamaan osa energian kulutustiedoista kuten keskimääräinen ajonopeus, jenkkisylinlerin höyryn paine ja lämpötila, huuvalohkojen lämpötilat ja kaasun virtaukset sekä jauhimien asetusarvot. Laaturaportti korvasikin lopulta ylempänä esitetyn Excel-taulukon, sillä aineiston hallinta ja analysointi oli laaturaportin myötä huomattavasti järjestelmällisempää ja helpompaa.

Tarkemmat energiankulutustiedot saatiin ajettua prosessinohjausjärjestelmä Valmet DNA:n Tracer-sovelluksesta sekä Microsoft-pohjaisesta PowerBI-sovelluksesta. Molempien sovellusten keräämät tiedot perustuivat suoraan prosessista saataviin mittauksiin, jotka sovellusten avulla saatiin luettavampaan ja helpommin analysoitavaan muotoon. Raaka-aineen kulutustiedot puolestaan saatiin osin prosessinohjausjärjestelmästä ja osin tehtaan talousosastolta. Lopulta kaikki laatu-, energia- ja raaka-aineen kulutustiedot kasattiin lajikohtaisesti Excel-taulukkoon, jonka avulla varsinainen analyysi suoritettiin.

Kerätty aineisto lajiteltiin ensimmäiseksi paperilajeittain, jonka jälkeen lajikohtaiset tiedot eroteltiin vielä liimamassattomiin ja liimamassallisiin tietoihin. Aineisto jaettiin näiden tietojen kesken vielä resurssien kulutustietoihin eli energiaan ja raaka-aineeseen, laatumittauksiin ja paperikoneen ajoparametreihin. Aineisto järjesteltiin keskiarvojen perusteella niin, että ”nollatulokset” eli esimerkiksi seisakkiajat poistettiin arvoista, jotta esimerkiksi liimamassan jauhulinjan todellinen kulutus saatiin selville ja analysoitua.

Aineiston järjestelyn perusteella luotiin taulukko, jonka avulla energian ja raaka-aineen kulutukset saatiin järjesteltyä paperilajikohtaisesti. Taulukon avulla pystyttiin laskemaan keskimääräinen kulutus sekä paperitonnia että yhtä operointituntia kohden. Tonnikohtainen tieto oli tutkimuksen kannalta tärkeä, sillä näin kulutus pystyttiin suhteuttamaan toteutuneeseen tuotantoon. Tuntikohtaista tietoa käytettiin puolestaan energian hinnan tarkastelussa, joka markkinoilla ilmoitetaan aina tuntikohtaisesti. Laatuominaisuuksia taas tarkasteltiin taulukon avulla, johon luotiin värikoodattu asteikko laatutavoitteiden perusteella. Näin ollen, kun taulukkoon syötettiin minkä tahansa paperilajin laatumittaus, taulukon antama väri indikoi heti, missä suunnassa mittaus oli tavoitteen nähden.

Kun kaikki aineisto oli saatu kerättyä, niistä kerättiin keskiarvot lajikohtaisiin taulukoihin, joiden avulla lopulta vertailtiin prosentuaalista muutosta liimamassallisten ja -massattomien arvojen välillä. Näistä taulukoista luotiin myös lopulliset työssä esitettävät kuviot ja taulukot.

10 Tutkimuksen tulokset ja tulkinta

Tutkimuksen tulokset järjesteltiin ja tulkittiin erikseen energian, raaka-aineen ja laatuominaisuuksien näkökulmasta. Energiankulutusta analysoitiin kokonaisenergiankulutuksena, eri energiamuodoittain sekä osaprosesseittain ensin yleisesti koko paperikoneen tasolla ja sitten paperilajikohtaisesti WC- ja talouspaperit eritellen. Raaka-aineen kulutusta tarkasteltiin yleisellä tasolla ja laatuaspektia puolestaan analysoitiin paperilajeittain. Energiankulutuksen ja laatuominaisuuksien osalta tutkimuksen tuloksia arvioitiin vertailemalla jokaisen paperilajin liimamassattomia ajoja tietyn liimamassaosuuden ja jauhatusasteen ajoihin. Tuloksissa on huomioitava, että analyysi suoritettiin keskimääräisiä arvoja käyttämällä, mutta aineistoa pyrittiin keräämään tarpeeksi pitkältä ajalta, jotta esimerkiksi ajokohtaiset vaihtelut saatiin minimoitua.

Paperilajikohtaisten tulosten selkeyttämiseksi tutkittavat lajit jaettiin kahteen ryhmään, WC- ja talouspapereihin, joihin viitataan tuloksissa lyhenteillä TOTI (toilet tissue) ja HOTO (household towel).

10.1 Energia

Tutkimuksen alkumetreillä huomattiin nopeasti, ettei liimamassan vaikutus paperikoneen energiankulutukseen ollutkaan välttämättä niin merkittävä, kuin mitä tutkimusolettamuksen perusteella odotettiin. Joillain tutkituilla paperilajeilla energiankulutuksen kehitys oli itseasiassa päinvastainen eli energiankulutusta pystyttiin jopa vähentämään liimamassan myötä. Energiankulutusta tutkittiin ensin yleisellä tasolla kokonaisenergiana, jonka jälkeen tarkasteltiin tarkemmin kulutusta eri energiamuodoittain. Lopulta energian kulutusta tarkasteltiin erikseen paperilajeittain sekä paperikoneen osaprosesseittain.

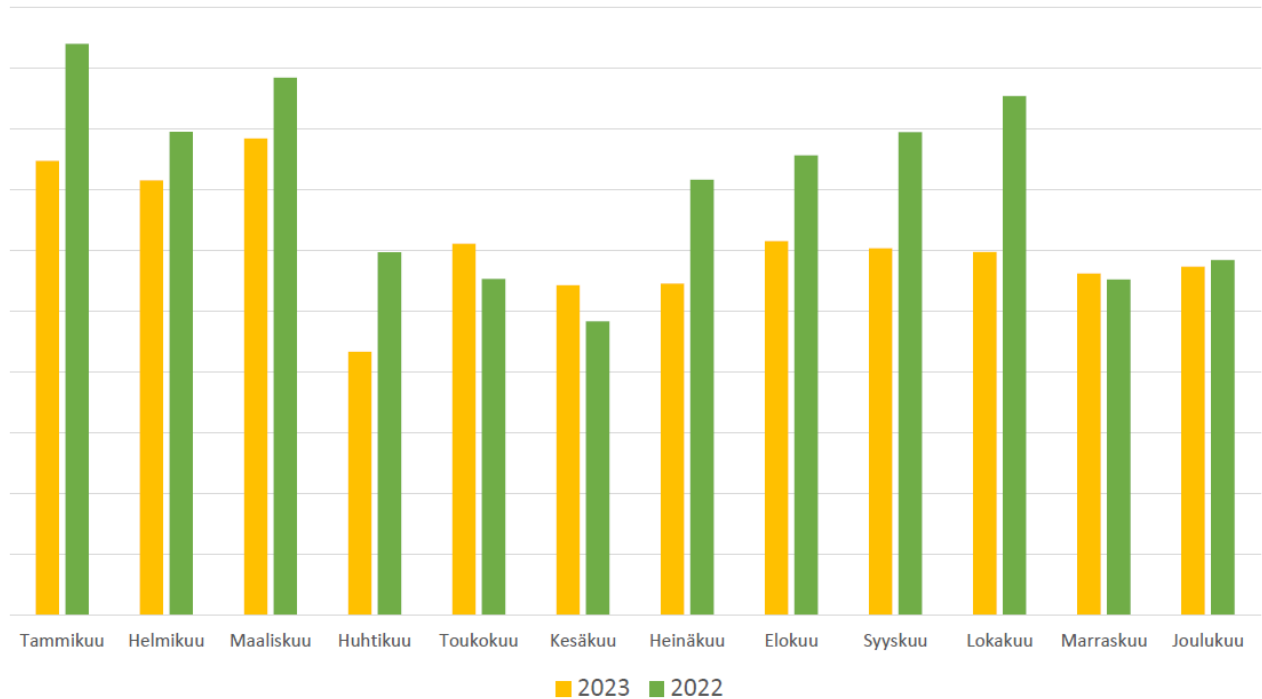
Energiankulutusta tarkasteltiin tutkimuksessa sekä kulutettuna kokonaisenergiana että tuotantoon suhteutettuna energian kulutuksena eli energian ominaiskulutuksena. Kokonaisenergian tarkastelu

loi hyvän kuvan siitä, paljonko energiaa oli todellisuudessa energiayksikkötasolla kulutettu ja se loi näin selkeän vertailupohjan liimamassattoman ja liimamassallisen tuotannon välille. Kokonaisenergiankulutus kertoi myös tarkemmin, miten liimamassa vaikutti paperikoneen energiankäyttöön.

Tuotantoon suhteutettu energiankulutus puolestaan kuvasi tarkemmin energian kulutuksen jakautumista paperitonnille esimerkiksi jokaisella paperilajilla erikseen. Ominaiskulutus oli tärkeä mittari myös liimamassan vaikutusten arvioinnissa, sillä sen avulla voitiin tunnistaa lajikohtaisesti mahdollisuudet energian käytön hallintaan ja energiatehokkuuden parantamiseen.

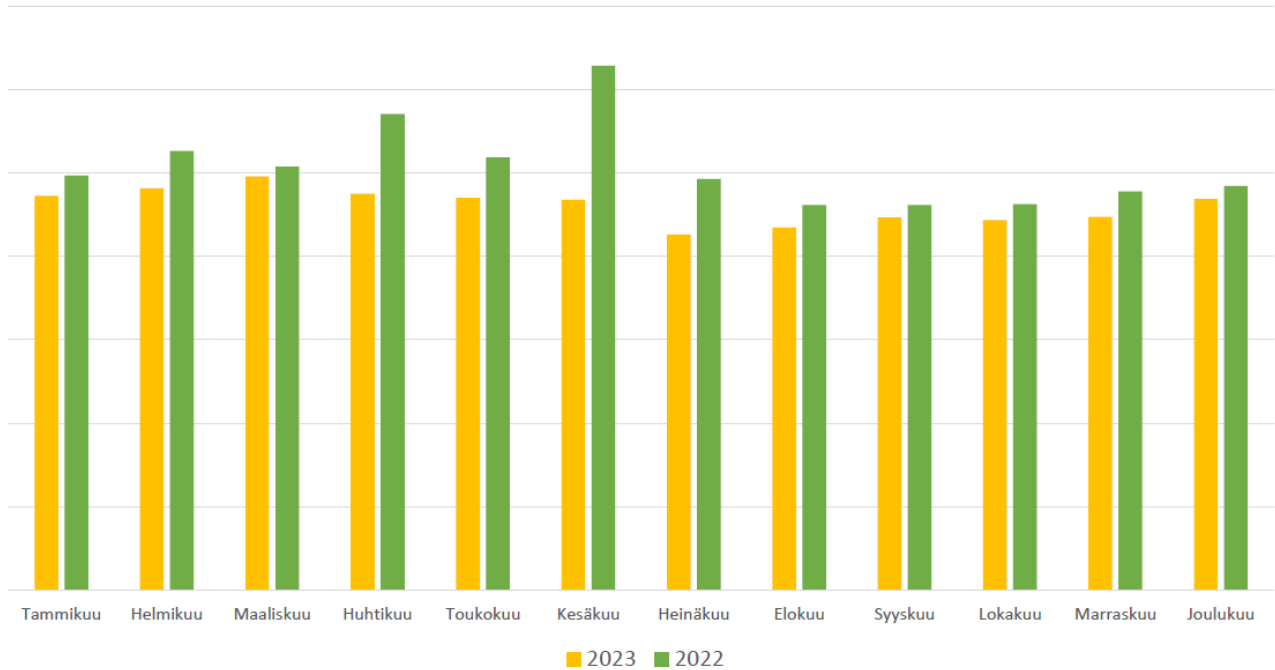
10.1.1 Paperikone

Paperikoneen kokonaisenergiankulutusta tarkasteltaessa oli huomioitava sääolosuhteiden vaikutus energian käyttöön, sillä opinnäytetyön tutkimuksen aikaan marras-joulukuu olivat poikkeuksellisen kylmiä. Kovat pakkaset aiheuttivat muun muassa sen, että paperikoneen molempia huuvalohkoja oli lämmitettävä, vaikka lämpimämmällä säällä vain yhden lohkon havaittiin joillain paperilajeilla riittävän rainan kuivattamiseen. Näistä havainnoista johtuen oli siis tärkeää vertailla energiankulutusta myös aiempiin vuosiin, jotta mahdolliset vuodenaikasadonnaiset trendit voitiin havaita ja huomioida tulosten analysoinnissa. Aikaisempia vuosia tarkasteltaessa oli toisaalta taas huomioitava se seikka, että tutkimuksen kohteena olleen paperikoneen kuivatusosa uusittiin kokonaisuudessaan vuoden 2022 kesällä, joka osaltaan on myös vaikuttanut paperikoneen energiankulutukseen.



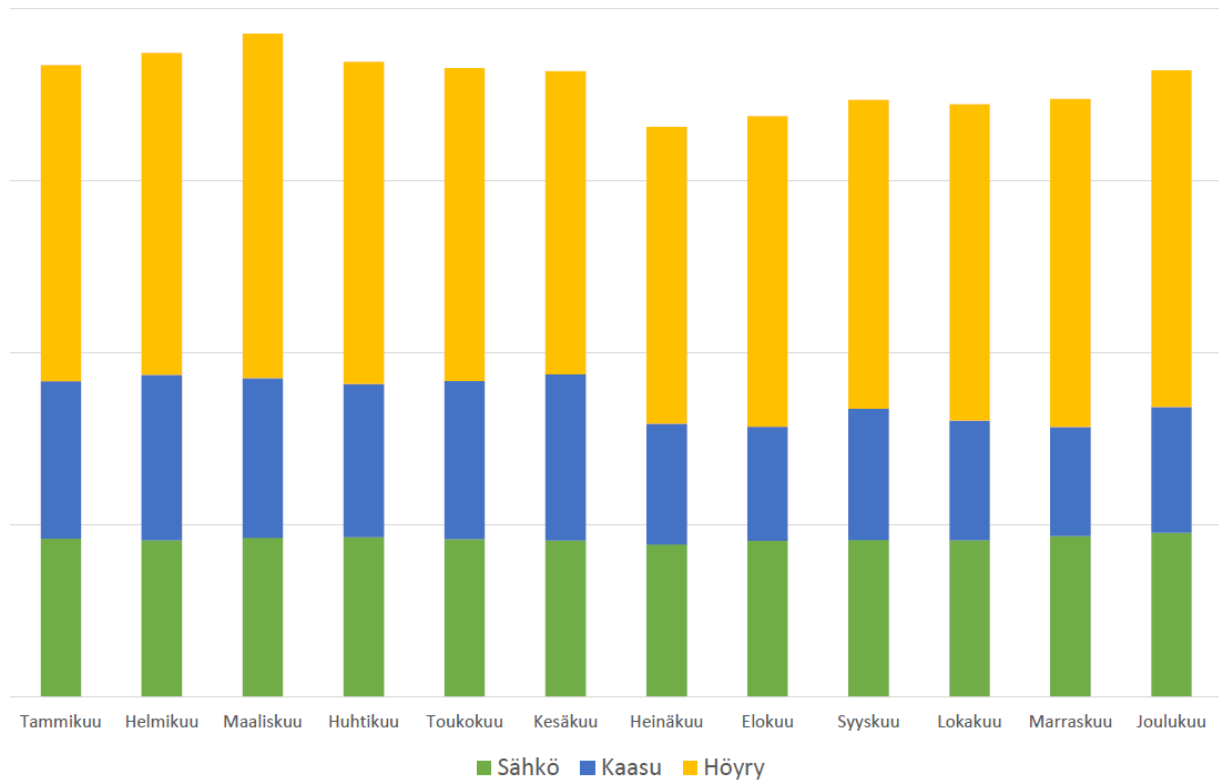
Kuvio 12 Kokonaisenergian kulutus vuosina 2022 ja 2023

Kuviosta 12 voidaan havaita, että tammi-maaliskuu akselilla kokonaisenergian kulutus oli loppuvuoteen verrattuna korkeimmillaan ja vuodenvaihdetta kohden oli havaittavissa kulutuksen maltillista nousua, joka indikoi talvikuukausien kylmästä säästä. Kokonaiskuvaa analysoidessa voidaan todeta myös, että kokonaisenergiankulutus oli vuonna 2023 matalampi kuin edeltävänä vuonna lukuun ottamatta toukokuuta ja kesäkuuta. Vuonna 2022 tehty kuivatusosan uusinta ajoittui juuri näille kuukausille, minkä takia kulutus on ollut kyseisenä vuonna vähäistä. Vuoteen 2022 verrattessa kulutus on kuitenkin ollut matalampi koko vuoden 2023 ajan, joten energian kulutuksen vähentyminen ei yksinomaan ole selitettävissä liimamassan käyttöönotolla. Kuviosta voidaan kuitenkin havaita myös se, ettei liimamassan käyttöönotto lokakuussa 2023 ole aiheuttanut huomattavaa energian kulutuksen nousua. Tutkimusolettamusta ajatellen tasaisena pysynyt energiankulutus on merkittävä havainto.



Kuvio 13 Energian ominaiskulutus vuosina 2022 ja 2023

Kuviossa 13 taasen on esitetty paperikoneen ominaisenergiankulutus eli energiankulutus tuotettua paperitonnia kohden. Kuviosta voidaan havaita, että vaikka kuukausittainen vaihtelu on maltillisempaa kokonaisenergian kulutukseen verrattaessa (kuvio 12), on vuonna 2022 silti kulutettu enemmän energiaa tuotantoa kohden ja vaihtelu kuukausien välillä on ollut suurempaa. Alku-kesästä 2022 tehty kuivatusosan uusiminen on kuitenkin rauhoittanut ominaiskulutuksen. Kuviosta havaittiin myös, että vaikka loppuvuodesta 2022 energian ominaiskulutus onkin ollut tasaista, on vuonna 2023 samaan aikaan käytetty silti vähemmän energiaa paperitonnia kohden, vaikka uusi jauhinlinja on ollut jatkuvassa tuotannossa.

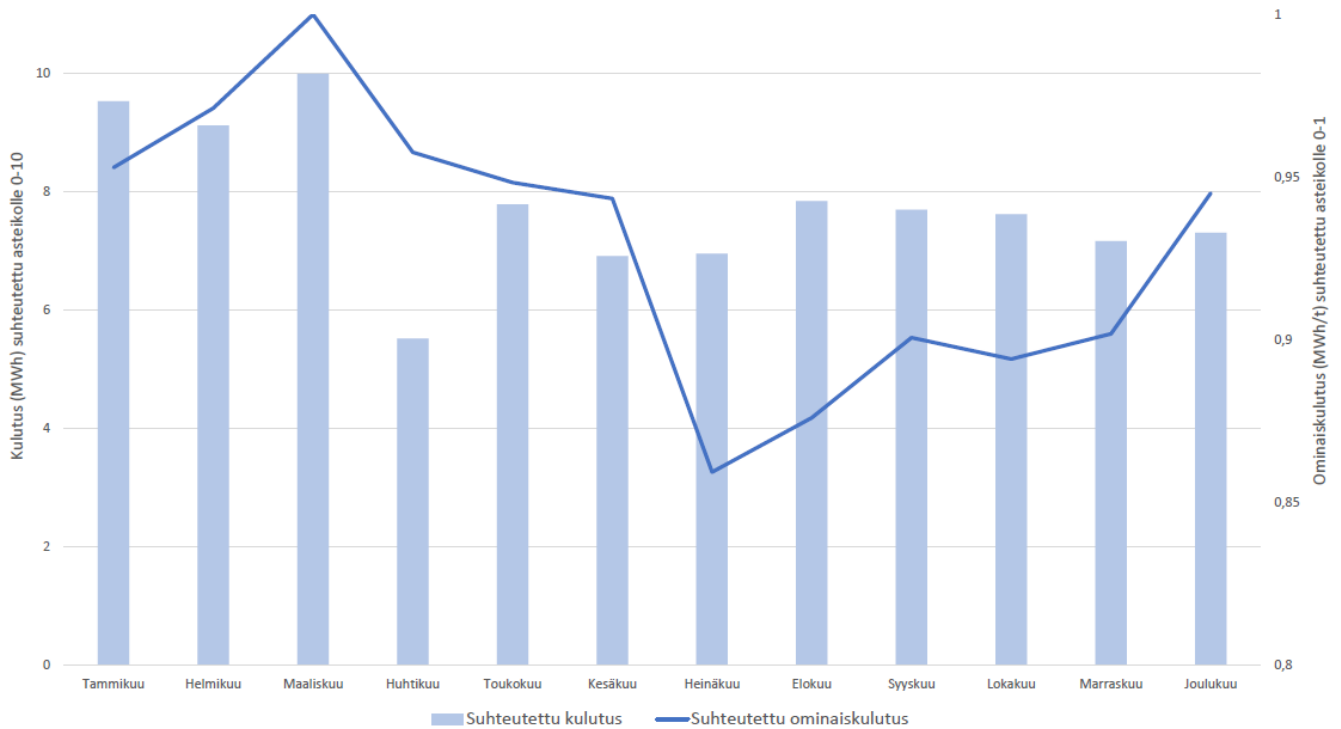


Kuvio 14 Paperikoneen suhteutettu energian ominaiskulutus energiamuodoittain vuonna 2023

Kuviosta 14 nähdään eri energiamuotojen osuus paperikoneen energian ominaiskulutuksessa. Luvussa 5.4 kerrottiin paperikoneen energiankäytöstä ja sen jakautumisesta eri energiamuodoille, joita käytännön havainnot vahvistivat. Vuonna 2023 paperitonnia kohden kulutetusta energiasta keskimäärin 52 % kului höyryn muodossa, sähkönä 26 % ja kaasuna keskimäärin 23 %. Kuviosta voidaan kuitenkin havaita, että höyryn ja sähkön osuudet pysyivät läpi vuoden jotakuinkin tasaisina, mutta kaasun kulutuksessa on havaittavissa enemmän vaihtelevuutta. Kaasun osuus vaihteli 18 % ja 27 % välillä, mikä indikoi paperirainan kuivatustarpeesta.

Kaasua käytetään polttoaineena huuvan polttimissa, joilla puolestaan lämmitetään paperirainan kuivatusilma. Kaasun kulutus riippuu siitä, miten rainaa on tarpeen kuivattaa eli tarvitseeko rainan kuivatus molemmat huuvalohkot vai riittääkö vain yksi lohko. Liitteessä 1 on tarkemmin kuvattu kaasun kulutusta sekä ominaiskulutusta, mistä selviää, että kaasun kulutus on riippuvaista myös vuodenajasta. Kylmimpinä kuukausina molempia huuvalohkoja on lämmitettävä, jottei niiden sisään kerry kosteutta. Paperin laadun kannalta on erittäin tärkeää, ettei huuvesta missään tilanteessa pääse tippumaan esimerkiksi vesipisaroita kuivattavan rainan päälle. Myös paperikoneen

ajonopeus on suuressa roolissa huuvan lämmitystarpeen kannalta, sillä mitä hitaammin paperiraina kulkee kuivatusosan läpi, sitä vähemmän energiaa rainan kuivattamiseen tarvitaan. Vastavasti suuremmalla ajonopeudella myös raina täytyy kuivattaa nopeammin, jolloin energiaakin tarvitaan enemmän.



Kuvio 15 Paperikoneen suhteutettu kokonaisenergian kulutus ja energian ominaiskulutus vuonna 2023

Kuviossa 15 on yhdistetty paperikoneen kokonaisenergian kulutus sekä energian kokonaisominaiskulutus vuonna 2023. Kuvioista voidaan havaita, että kulutus tuotantoa kohden oli lokakuun jälkeeseen nousemaan päin, joskin kokonaisenergiakulutus oli itse asiassa lievässä laskussa. Koska ominaiskulutus tarkoittaa energiankulutusta tuotantoa kohden, indikoi ominaiskulutuksen kasvu sitä, että paperikoneella on tuotettu vähemmän suhteessa energiankulutukseen. Tällaisessa tilanteessa on kuitenkin huomioitava mahdolliset huoltoseisakit sekä muut tuotannonrajoitukset. Marras-joulukuussa nimittäin koettiin muun muassa korkeita energian hintapiikkejä (kuvio 2), joiden taloudel-

lisia vaikutuksia pyrittiin paperikoneen ajo-ohjelmaa muuttamalla hillitsemään. Prosessin energia-
tehokkuuden kannalta onkin järkevää, jos tuotantoa pystytään säätelemään energian hintaa sil-
mällä pitäen.

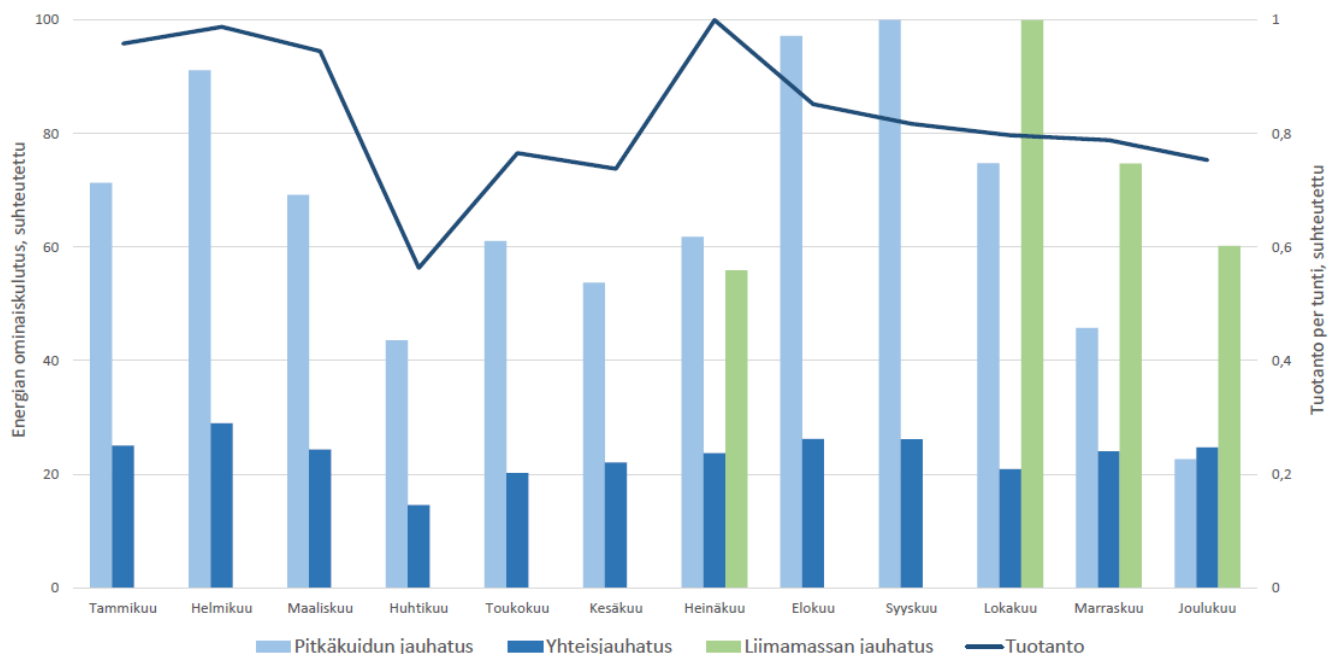
Liimamassan vaikutuksia arvioitaessa voidaan siis todeta, ettei liimamassan käyttöönotto ole ollut
primäärisyyinä ominaisenergian kulutuksen kasvulle. Vuoteen 2022 verrattuna (kuviot 12 ja 13)
sekä paperikoneen kokonaiskulutus että ominaiskulutus ovat samoilla tasoilla, mikä tarkoittaa,
ettei prosessissa nähtävästi ole energian käytön kannalta tapahtunut merkittäviä muutoksia liima-
massajärjestelmän myötä. Jos ominaisenergian kasvu olisi ollut liimamassasta riippuvaista, vaiku-
tukset nähtäisiin todennäköisesti myös kokonaisenergian kulutuksessa.

Kaasun kulutuksen (liite 1) osalta sekä kokonaiskulutuksen että ominaiskulutuksen kuukausittai-
nen vaihtelu oli suurempaa kuin muilla energiamuodoilla. Koska kaasua käytetään pelkästään pa-
perikoneen huuvan lämmittämiseen, kulutuksen vaihtelu on selitettävissä sen perusteella, kuinka
suuri osa huuvan kuivauskapasiteetista on ollut käytössä. Alkuvuoden korkeista kulutuksista voi-
daan päätellä, että paperia on kuivattu molemmilla huuvalohkoilla, kun loppuvuoden kulutuksen
perusteella tarvittava kuivatusenergia on saatu pelkästään märän pään huuvalalla. Kokonais- ja oimi-
naiskulutuksen nousua marraskuusta joulukuuhun voidaan selittää kylmällä ulkolämpötilalla, sillä
mikäli kaasun kulutuksen kasvu olisi liimamassasta johtuvaa, kulutus olisi ollut nousussa jo loka-
kuusta lähtien. Lisäksi marraskuussa havaittiin peräti kaasun kulutuksen laskua, vaikka liimamassaa
jauhettiin koko kuukauden ajan kahta paperilajia lukuun ottamatta. Tästä voidaan päätellä, ettei
liimamassaa sisältänyt paperi vaatinut merkittävää kuivatustarpeen kasvua.

Liitteissä 2 ja 3 on kuvattu myös höyryn ja sähkön kulutuksen kehittyminen vuonna 2023. Liima-
massan käyttöönoton myötä syys-lokakuusta lähtien molempien energiamuotojen kulutuksessa
havaittiin itseasiassa jopa kulutuksen laskua, joka etenkin sähkön kulutuksen osalta oli yllättävä
havainto. Massankäsittely ja etenkin jauhatus ovat paperikoneen suurimmat sähkön kuluttajat, jo-
ten tuloksissa odotettiin näkyvän sähkön kulutuksen kasvua edes jossain määrin. Havainnon perus-
teella todettiin, että liimamassan tuoma sähköenergian tarve taas toisaalta vähentyi jossain muu-
alla.

10.1.2 Jauhatusjärjestelmä

Liimamassan suurin vaikutus nähtiin jauhatusjärjestelmän energian käytössä (kuvio 16). Kuviossa on kuvattu kuukauden keskimääräinen energian ominaiskulutus sekä keskimääräinen tuotanto. Suurin muutos on havaittavissa pitkäkuidun jauhatuksessa, jonka ominaiskulutusta saatiin syyskuusta lokakuuhun pienennettyä peräti 25 %. On kuitenkin huomioitava, että liimamassajärjestelmä otettiin lokakuun aikana vasta käyttöön eikä jauhulinjojen operointia ollut vielä optimoitu. Liimamassan vaikutuksia ei vielä tunnettu eikä jauhimien operointi näin ollen ollut erityisen hallittua. Tämä tarkoitti sitä, että lopputuotteen laadun hallitsemiseksi massan jauhautuneisuutta säädettiin eri jauhimilla eri tavoin. Syyskuuta ja joulukuuta verrattaessa pitkäkuidun jauhatusenergia laski kuitenkin peräti 77 % eli toisin sanoen pitkäkuitu voitiin ajaa pääosin jauhamattomana. Pitkäkuidun jauhatukseen vaikutti merkittävästi myös se, että jauhulinja tarvitsee tietyn massavirtauksen, jotta jauhatus voidaan pitää käynnissä. Näin ollen, mikäli pitkäkuidun osuus lajireseptissä oli tarpeeksi pieni, jauhulinjan virtaus oli matala ja kuitu ajettiin jauhamattomana. Tässä puolestaan nähtiin potentiaalia energian säästämiseksi.



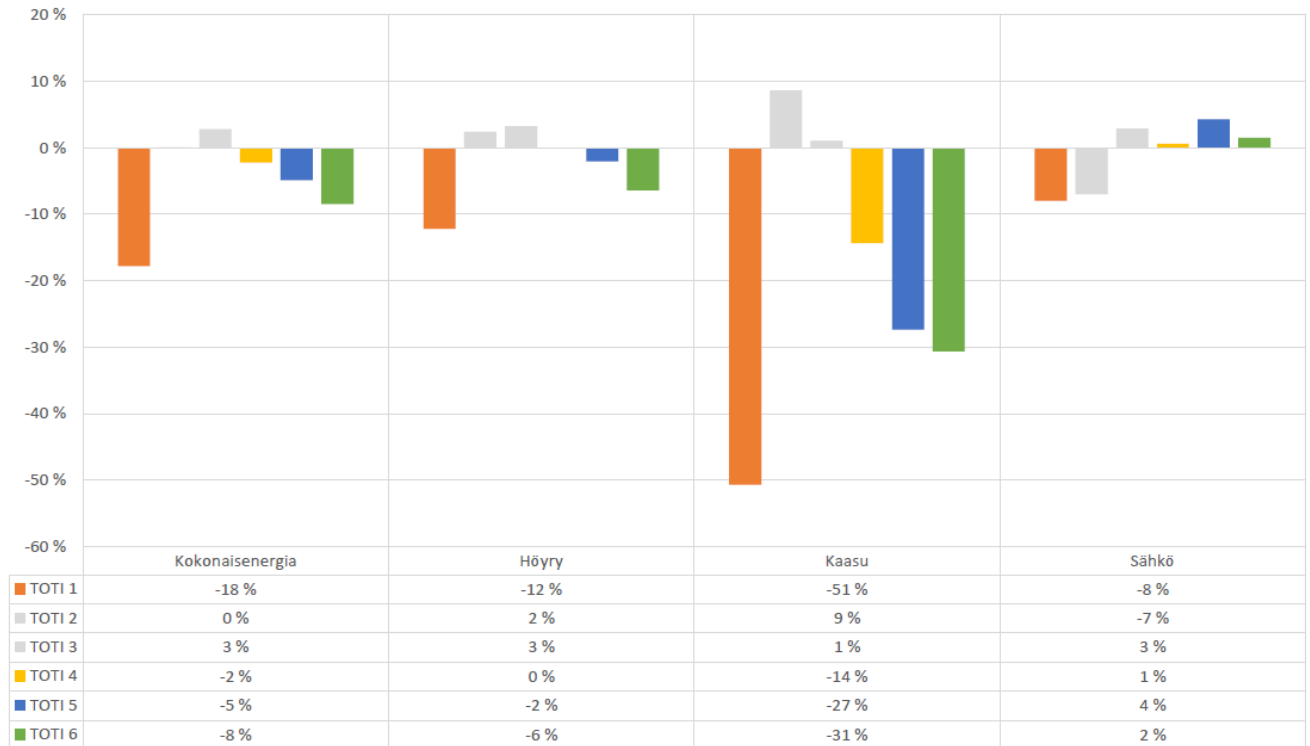
Kuvio 16 Jauhatusjärjestelmän suhteutettu energiankulutus, kuukauden keskiarvo

Yhteisjauhatuksen osalta kulutusta pystyttiin laskemaan lokakuun aikana 20 % verrattuna syyskuun ominaiskulutukseen, mikä on osittain selitettävissä jo aikaisemmassa kappaleessa mainitulla jauhinten epäsystemaattisella operoinnilla. Koko vuotta tarkastellessa huomataan kuitenkin, että yhteisjauhatuksen energiankulutus vaihteli pitkäkuidun jauhatusta maltillisemmin eikä liimamassan käyttöönotto lokakuuta lukuun ottamatta ole merkittävästi vähentänyt yhteisjauhatuksen tarvetta, muttei toisaalta myöskään kasvattanut sitä. Yhteisjauhatuksen tarkoituksena onkin viimeisenä keinona hallita massan jauhuneisuutta, ja se toimii myös operaattoreiden välineenä laadunhallinnassa.

Liimamassan ominaiskulutuksesta mainitsemisen arvoinen on heinäkuun yksittäinen kulutuspiikki, joka johtui jauhinlinjan asennuksesta ja jauhimen koeajoista. Tätä ei työn tuloksissa ole tämän enempää huomioitu. Loka-joulukuun ajalta havaitaan myös, että ominaiskulutus on ollut jyrkässä laskussa, joka jälleen kerran on selitettävissä tuotannon loivalla laskulla. Mitä vähemmän paperia on tuotettu, sitä suurempi on luonnollisesti energiankulutuksen jakautuminen yksittäiselle paperitonnille. Liimamassan käyttöön ja sen energiankulutukseen vaikuttavat luonnollisesti myös paperikoneen ajo-ohjelmat ja ajettavat paperilajit, sillä mikäli kuukauden aikana on ajettu paljon liimamassattomia lajeja, jää liimamassalinjan energiankulutus matalammaksi.

10.1.3 WC-paperilajit

Paperilajikohtaista energiankulutusta tarkastellessa WC-paperilajeissa oli havaittavissa merkittävämpiä muutoksia kuin esimerkiksi luvussa 10.1.4 käsiteltävissä talouspaperilajeissa. WC-paperilajien vertailussa on huomioitava, että lajit TOTI 2 ja 3 jätettiin ensimmäisten liimamassakoeajojen jälkeen pois koeajoista. Lajit pidettiin kuitenkin vertailuissa mukana, mutta ne ovat merkitty kuvioihin harmaalla värillä. Näiden osalta on kuitenkin huomioitava, että vertailukelpoinen liimamassallinen data on muita lajeja huomattavasti vähäisempi.



Kuvio 17 Liimamassaa sisältävien TOTI-lajien energian ominaiskulutuksen kehitys

Kuviosta 17 voidaan havaita, että merkittävin muutos energiankulutuksessa tapahtui kaasun kulutuksen osalta. Kulutus laski kaikilla lajeilla lukuun ottamatta tutkimuksen alkumetreillä pois jätettyjä TOTI 2 ja TOTI 3 -lajeja. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, kaasun kulutuksen väheneminen indikoi paperirainan pienemmästä kuivatustarpeesta. Taulukossa 4 on tarkemmin kuvattu kuivatusosan energian ominaiskulutuksen muutosta lajeittain, mistä nähdäänkin tarkemmin kaasun kulutuksen laskun selittävät tekijät. TOTI 2 ja 3 lajeja lukuun ottamatta kaikkia WC-paperilajeja on voitu ajaa joko kokonaan ilman kuivan pään huuvaan tai kyseistä huuvalohkoa ei ole ollut tarpeen lämmittää yhtä paljoa. Toisaalta märän pään huuvaan lämpötila nousi liimamassan myötä noin 10 %, mikä puolestaan nosti kaasun kulutusta jopa yli 30 %. Huuvaan kuivan pään energiankulutuksen lasku oli volyymiltään kuitenkin niin merkittävä, että energiankulutuksen osalta vaikutus jää lopulta negatiiviseksi. Tulokset todistivat hyvin myös sen, kuinka energiaa kuluttava prosessi paperin kuivattaminen on ja kuinka suuri merkitys vähäiselläkin kuivatusenergian laskulla on prosessin kokonaisenergiankulutuksen kannalta.

Taulukko 4 Kuivatusosan osaprosessien ominaiskulutuksen prosentuaalinen kehitys TOTI-lajeilla

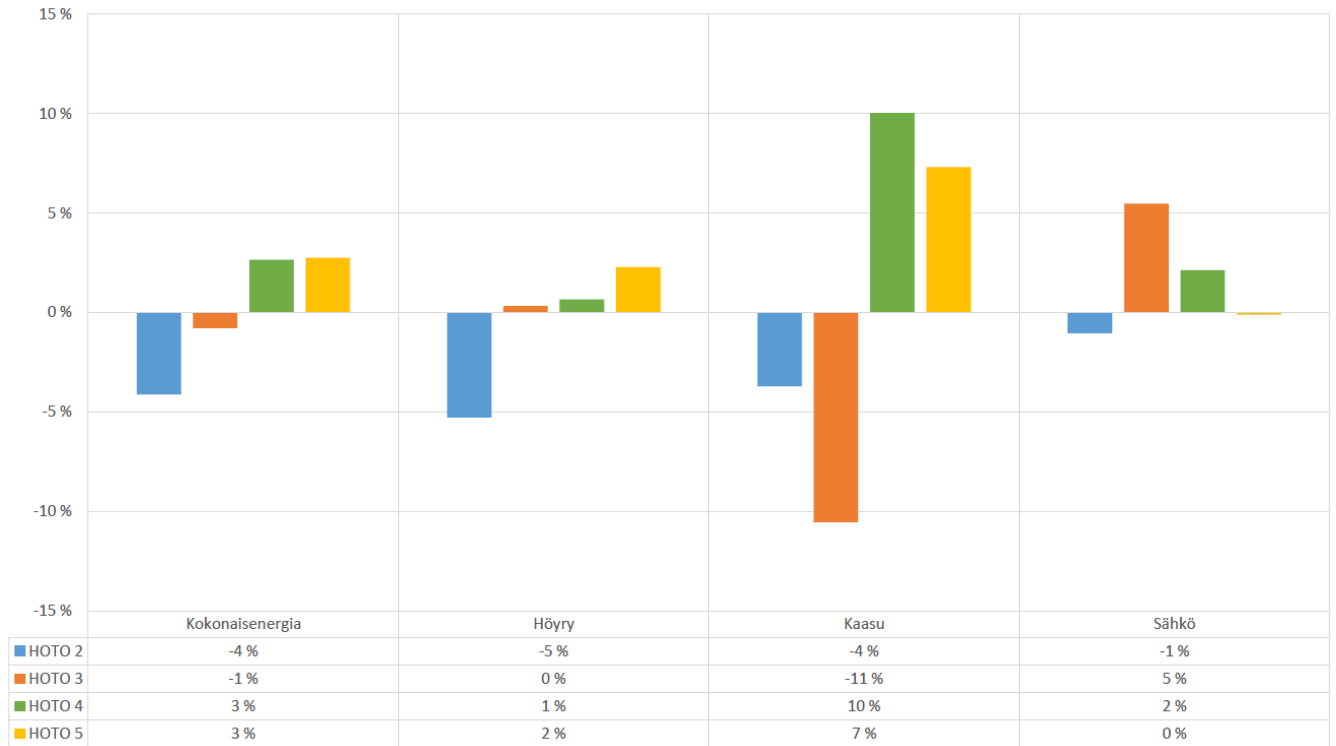
Laji	Jenkkisyylinterin paine bar	Jenkkisyylinterin höyryn lämpötila °C	Huuvan lämpötila, märkä pää °C	Huuvan kaasuvirtaus, märkä pää kg/h	Huuvan lämpötila, kuiva pää °C	Huuvan kaasuvirtaus, kuiva pää kg/h
TOTI 1	1 %	1 %	12 %	20 %	-55 %	-27 %
TOTI 2	-3 %	-1 %	11 %	8 %	6 %	2 %
TOTI 3	-8 %	-2 %	2 %	-12 %	37 %	-3 %
TOTI 4	3 %	2 %	8 %	36 %	-26 %	18 %
TOTI 5	8 %	3 %	6 %	32 %	-41 %	-6 %
TOTI 6	0 %	1 %	-10 %	-2 %	-6 %	-8 %

Höyryn ja sähkön kulutuksessa muutokset liimamassan myötä olivat kaasua maltillisemmat. Sähkön kulutuksessa havaittiin muutamien prosenttien nousua lukuun ottamatta TOTI 1 ja 2 lajeja. Syyn tähän selittää jauhatusenergian jyrkkä lasku, sillä näissä kahdessa lajissa pitkäkuitun osuudet kuituseoksissa olivat liimamassan myötä kaikista pienimmät. Tämä tarkoitti sitä, että pitkäkuitua ei käytännössä tarvinnut jauhaa lainkaan. Muutamien prosenttien nousu muissa lajeissa ei toisaalta ole vielä merkittävä muutos ja saattaakin johtua yksittäisistä, satunnaisista tekijöistä.

Höyryn kulutuksen kehityksessä havaittavat muutokset ovat sähkön kulutuksen lailla hyvin maltilliset. Taulukko 4 osoittaa, ettei esimerkiksi jenkkisyylinteriä tarvinnut lämmittää normaalia enempää. Energian kokonaiskulutusta katsottaessa on kuitenkin ilmeistä, että liimamassa on odotusten vastaisesti jopa laskenut kulutusta.

10.1.4 Talouspaperilajit

Talouspaperilajien energiankulutusta tutkittaessa huomattiin, ettei liimamassa vaikuttanut paperilajien energiankulutukseen yhtä voimakkaasti kuin edellisessä kappaleessa käsitellyillä WC-paperilajeilla. Tuloksissa havaittiin pääasiassa vain muutamien prosenttien muutoksia suuntaan ja toiseen, joskin suurin muutos näkyi jälleen kaasun kulutuksessa. Kuvioista 18 nähdään kuitenkin, että useimmilla paperilajeista energiankulutus on ollut kasvamaan päin, vaikkakin kasvu on ollut suhteellisen pientä. WC-papereihin verrattuna tätä saattaa selittää muun muassa talouspapereiden korkeampi neliömassa, korkeammat lujuusvaatimukset sekä massaon lisättävä märkälujaliima.



Kuvio 18 Liimamassaa sisältävien HOTO-lajien energian kokonaiskulutuksen kehitys

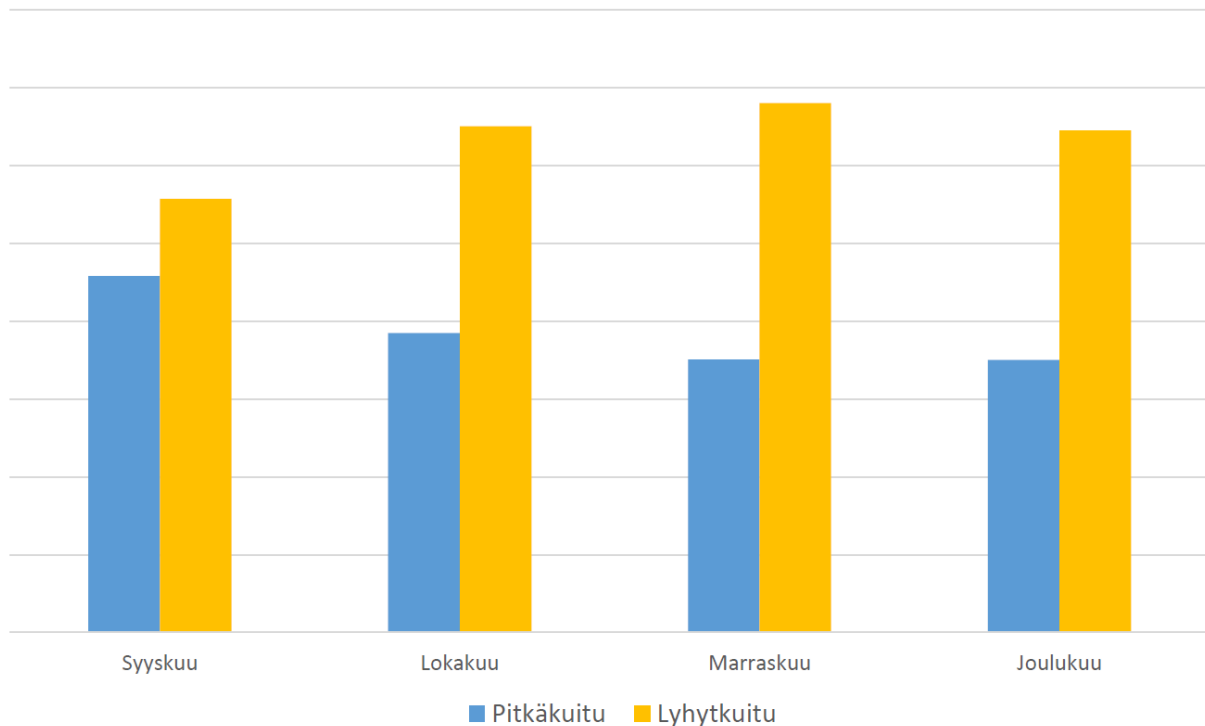
Kuten WC-papereilla, myös talouspaperilajeilla kaasun kulutuksen muutos oli energiamuodoista merkittävin, joka selittynee jälleen huuvasysteemin energiankäytöllä. Taulukosta 5 nähdään, ettei jenkkisynterinin paineelle tai höyryn lämpötilalle ole HOTO 2 -lajia lukuun ottamatta tapahtunut juuri minkäänlaisia muutoksia liimamassan myötä. Huuvan osalta merkittävimmät muutokset nähtiin HOTO 2 lisäksi HOTO 3 ja 5 lajeilla, joista HOTO 3 laskevasti ja HOTO 5 nousevasti. HOTO 5 kuivatustarpeen kasvua selittänee kaikista vertailtavista paperilajeista suurin neliömassa. Kuten luvussa 5.3 mainittiin, suurempi neliömassa vaikuttaa automaattisesti muun muassa paperikoneen energiankulutukseen. Kun tähän yhtälöön lisätään vielä paperirainaa tihentävä ja lujentava liimamassa, voidaan suuremmilla neliömassoilla havaita todennäköisemmin energian tarpeen kasvua.

Taulukko 5 Kuivatusosan osaprosessien ominaiskulutuksen prosentuaalinen muutos HOTO-lajeilla

Laji	Jenkki sylinterin paine bar	Jenkki sylinterin höyryn lämpötila °C	Huuvan lämpötila, märkä pää °C	Huuvan kaasuvirtaus, märkä pää kg/h	Huuvan lämpötila, kuiva pää °C	Huuvan kaasuvirtaus, kuiva pää kg/h
HOTO 2	-6 %	1 %	-11 %	-3 %	-5 %	13 %
HOTO 3	0 %	0 %	-7 %	-35 %	-3 %	-8 %
HOTO 4	0 %	0 %	4 %	5 %	-2 %	5 %
HOTO 5	-4 %	-1 %	3 %	16 %	3 %	8 %

10.2 Sellun kulutus

Liimamassan tarkoituksena oli korvata paperilajikohtaisesti tietty prosentuaalinen määrä pitkäkuitusellusta. Kuviossa 19 on esitetty paperikoneen sekä pitkä- että lyhytkuidun kulutus syyskuusta joulukuuhun 2023. Syyskuussa paperikoneella ajettiin vielä normaalien lajireseptien mukaisesti, lokakuussa liimamassajärjestelmä otettiin käyttöön, mutta sitä ajettiin vielä melko satunnaisesti ja marraskuusta eteenpäin liimamassa oli jatkuvassa tuotannossa mukana. Suurin muutos oli kuitenkin nähtävillä nimenomaan syyskuusta lokakuuhun, jolloin pitkäkuitusellun kulutus laski peräti 16 % ja lyhytkuitusellun kulutus puolestaan nousi 17 %. Kaikkien kolmen kuukauden osalta pitkäkuitusellun kulutus laski keskimäärin 18 % ja lyhytkuidun kulutus taas nousi 21 %.



Kuvio 19 Paperikoneen pitkä- ja lyhytkuitusellun kulutuksen kehitys syyskuusta joulukuuhun 2023

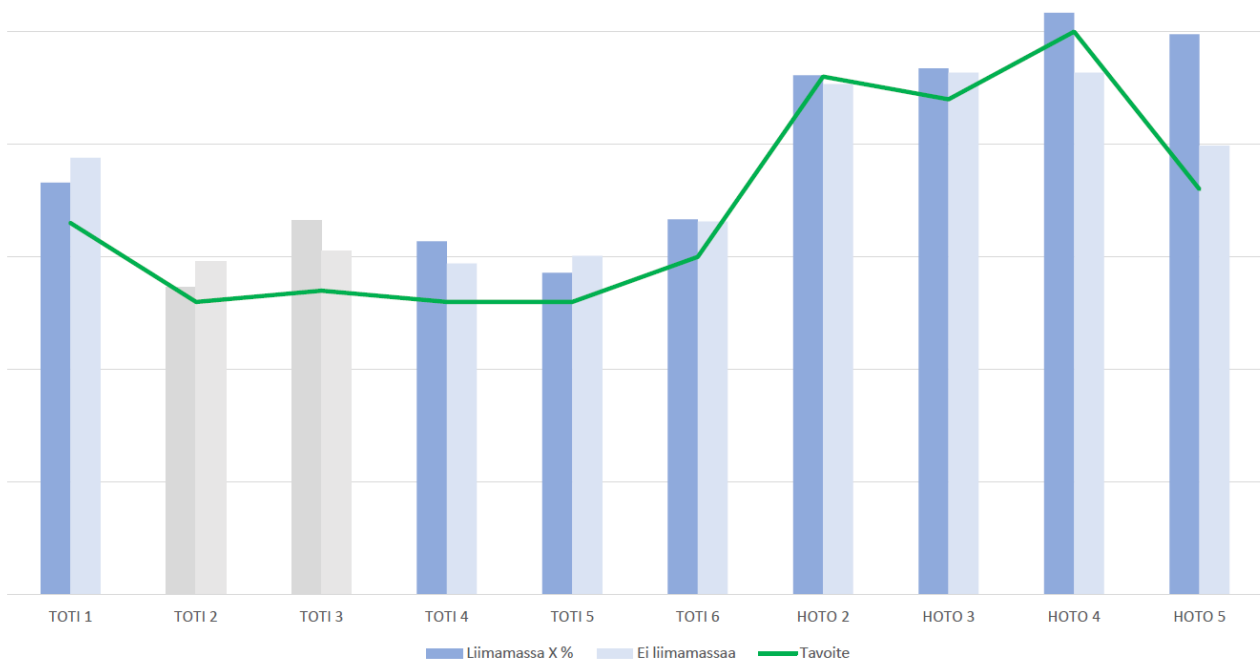
Tutkimusolettamuksen perusteella odotettiin, että sellun kulutus tulisi kehittymään samassa suhteessa molemmilla sellulaaduilla – eli kun pitkäkuitua vähennetään tietty määrä, lyhytkuitua lisätään sama määrä. Todellinen prosentuaalinen muutos ei aivan täysin vastannut olettamusta, mutta tällaisessa tilanteessa on myös otettava huomioon eri lajireseptien kuituseokset. Sellun kulutus riippuu paljon myös siitä, paljonko mitäkin paperilajia milloinkin ajetaan. Paperilajien kuituseokset eivät luonnollisestikaan ole samanlaisia ja eri massakomponenttien suuruudet vaihtelevat merkittävästi.

10.3 Lopputuotteen laatu

Lopputuotteiden laatua valvottaessa laatumittauksia suoritetaan muun muassa paperin neliöpainosta, paksuudesta, pehmeydestä, kone- ja poikkisuuntaisista kuiva- ja märkälujuuksista, venymistä sekä paperin hajoavuudesta. Osa mittauksista saadaan suoraan paperikoneen on-line mittauksista, ja osan näytteistä operaattorit tekevät ja analysoivat itse tietyin väliajoin.

Tutkimusolettamuksen mukaan liimamassan odotettiin vaikuttavan erityisesti paperin vetolujuusominaisuuksiin. Muutoksia huomattiin kuitenkin myös esimerkiksi konesuuntaisessa venymässä ja joillain lajeilla myös pehmeudessa, joita käsitellään tässä luvussa myös lyhyesti. Alla analysoitavissa kuvioissa on vertailtu lajikohtaisesti eri laatumittauksia tietyllä liimamassaosuudella, paitsi HOTO 5:n osalta, johon ajettiin muista lajeista poiketen koko ajan pienemmällä liimamassaosuudella. Tästä huolimatta laji otettiin vertailuun mukaan, sillä jo minimiannostelun vaikutukset paperin laatuun olivat huomattavat.

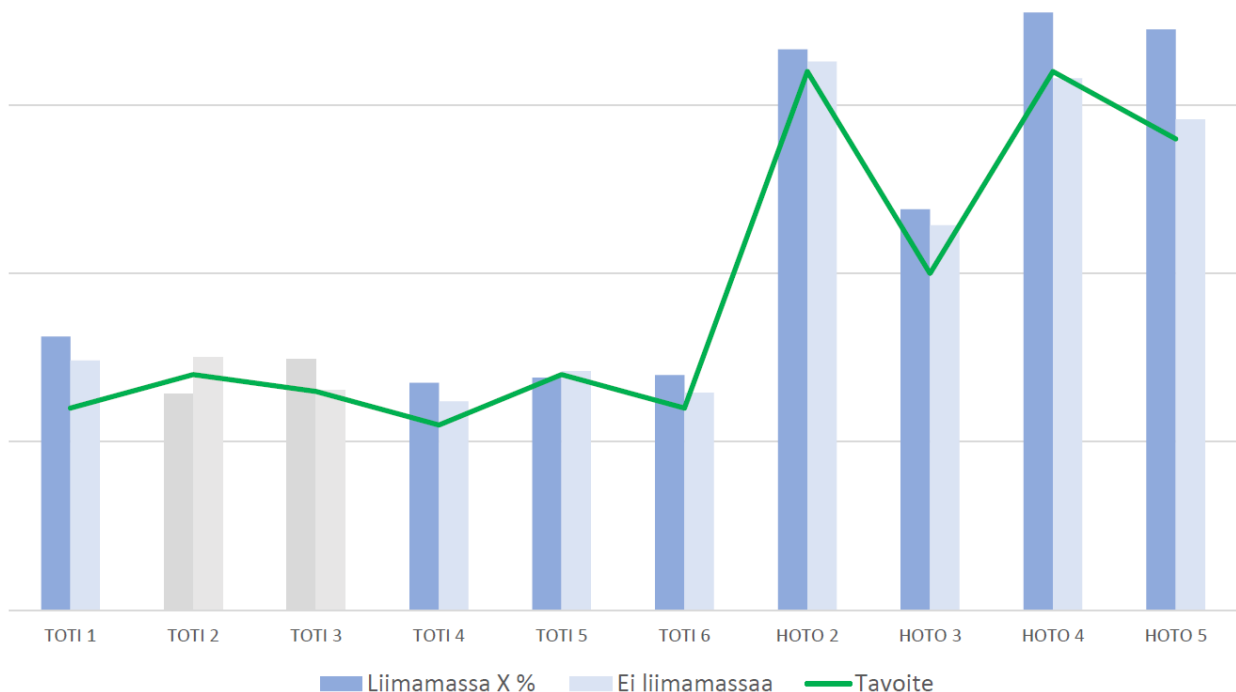
Kuvioihin on vihreällä viivalla ilmaistu kyseisen laatumittauksen tavoitearvo, jotta mittaustuloksia voidaan vertailla lajikohtaisiin tavoitteisiin. Paperilajien laatuavoitteet ovat toimeksiantajalla määritetty viiden arvon tavoitealueena. Tämä tarkoittaa, että varsinainen tavoitearvo on jokin tietty luku, jonka ympärille on määritetty alue, jonka sisällä lopputuotteen laadun täytyy olla. Kuvioihin merkitty vihreä viiva on määrätty tavoitearvo eli mikäli kuvioissa laatumittaus on yli tai alle tavoitteen, ei paperi kuitenkaan ole välttämättä ollut hylkyä.



Kuvio 20 Lajikohtainen konesuuntainen vetolujuus

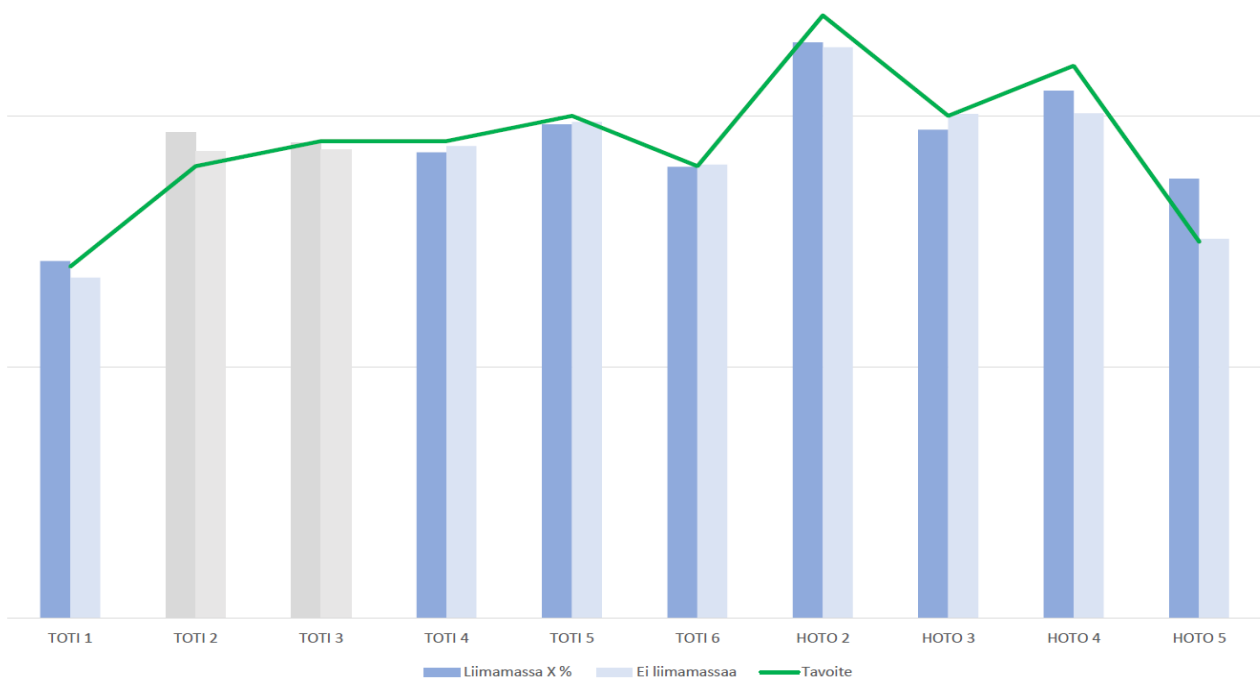
Kuvioissa 20 ja 21 käsitellään paperilajien kone- ja poikkisuuntaisia vetolujuuksia. Kuviosta 20 havaitaan, että WC-paperilajien osalta TOTI 1, 2 sekä 5 kohdalla liimamassaton paperi on itseasiassa ollut konesuunnassa edelleen liimamassallista paperia lujempaa. Poikkisuunnassa sama on havaittavissa edelleen TOTI 2 ja TOTI 5 -lajeilla. TOTI 3 ja 4 osalta liimamassa on lujentanut paperia molemmissa suunnissa ja TOTI 6 puolestaan konesuuntainen vetolujuus on pysynyt pitkälti samana, mutta muutosta havaittiin poikkisuuntaisessa vetolujuudessa. Tavoitteiden osalta konesuuntaisessa vetolujuudessa sekä liimamassallinen että liimamassaton paperi ovat olleet tavoitteeseen nähden kaikissa WC-paperilajeissa yläkanttiin. Poikkisuuntaisessa vetolujuudessa kaikkien lajien osalta oltiin lähempänä tavoitearvoja TOTI 1 lukuun ottamatta.

Talouspapereista merkittävimmät muutokset liimamassan myötä nähtiin lajeissa HOTO 4 ja 5, joissa molemmissa liimamassa nosti sekä kone- että poikkisuuntaisia vetolujuuksia merkittävästi. Lisäksi kuviosta 22 nähdään, että näillä kahdella lajilla myös konesuuntainen venymä on ollut liimamassattomaan paperiin verrattuna korkeampi. Venymän muutokset vaikuttavat muun muassa paperin pehmeyteen sekä imukykyyn. HOTO 4 ja 5 muutoksia selittänee lajien neliömassat, sillä HOTO 4 ja 5 olivat tutkittavista papereista neliömassaltaan painavimmat.



Kuvio 21 Lajikohtainen poikkisuuntainen vetolujuus

Lisäksi HOTO 5 molemmissa vetolujuuksissa on huomioitava, että lujuus on ollut myös tavoitteeseen nähden erittäin korkealla, jolloin riskinä olivat hylkyrajojen ylitykset. HOTO 2 ja HOTO 3 laatu- mittauksia analysoitaessa huomattiin, ettei liimamassa puolestaan vaikuttanut juurikaan näiden papereiden lujuusominaisuuksiin ja tavoitteeseen nähden oltiin joko täysin tai ainakin lähes tavoitteessa. Näiden havaintojen perusteella todettiin, ettei liimamassan osuutta HOTO 5:n ole kannattavaa nostaa, vaikka muissa talouspaperilajeissa potentiaalia suuremmalle liimamassaosuudelle olikin.

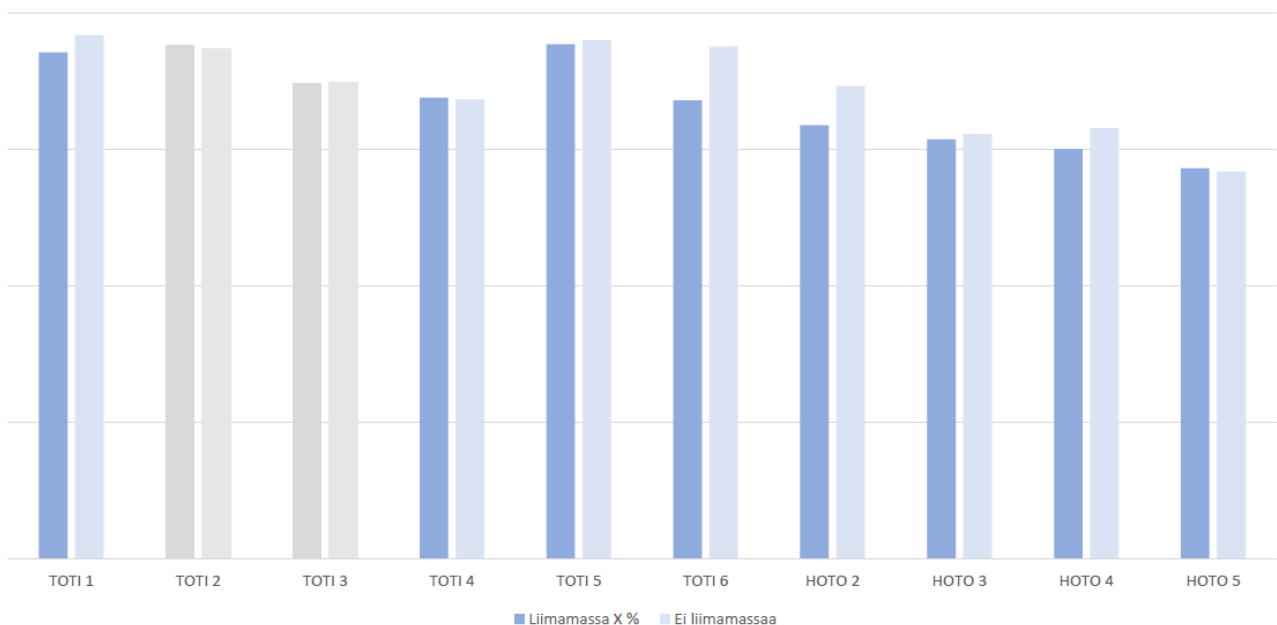


Kuvio 22 Lajikohtainen konesuuntainen venymä

Teorian pohjalta liimamassan odotettiin vaikuttavan myös talouspaperilajien märkävetolujuuteen. Tutkimuskohteen paperilajeista märkävetolujuutta mitataan neljältä talouspaperilajilta, joista opinnäytetyön tutkimuksen kannalta vertailukelpoisia olivat HOTO 2, 3 ja 4. HOTO 1 jätettiin kaikkien laatuvertailujen ulkopuolelle, sillä se on uusi paperilaji eikä sille ollut liimamassatonta vertailupohjaa. Kuivalujuusominaisuuksien tavoin odotettiin, että liimamassa vaikuttaa talouspaperin märkävetolujuuteen nostavasti. Märkävetolujuuden kasvua havaittiin kahdella kolmesta talouspaperilajista, joskin hyvin maltillisella tasolla. Tämän havainnon perusteella nähtiin säästöpotentiaa-

lia märkälujaliiman annostelun pienentämisessä niiden lajien osalta, joiden märkävetolujuuden havaittiin kasvavan liimamassan myötä. Talouspaperin märkälujuus saadaan erikseen annosteltavalla lisäaineella, jonka annostusta pienentämällä voitaisiin mahdollisesti pienentää kemikaalikustannuksia. Toimeksiantajan näkökulmasta havainto vaatisi kuitenkin tarkempaa tutkimusta ja analyysiä.

Talouspaperilajeilla sekä TOTI 6 -lajilla liimamassan huomattiin laskevan vähän myös paperin pehmeyttä (kuvio 24). Talouspaperilajien osalta tämä havainto ei sinänsä ole kriittinen, sillä pehmeys ei lähtökohtaisesti ole talouspaperin tavoiteltavin ominaisuus. Havainto on kuitenkin siinä mielessä merkittävä, sillä jos liimamassalla on taipumus huonontaa pehmeyttä, täytyy WC-paperilajien pehmeyttä seurata erityisen tarkkaan. WC-paperilla pehmeiden heikentyminen on erittäin epätoivottavaa, sillä pehmeys on etenkin kuluttajakäyttöön valmistettavalla WC-paperilla yksi sen tärkeimmistä ominaisuuksista.



Kuvio 23 Lajikohtainen pehmeys

Yhteenvedona tutkimusolettamuksen mukaisesti liimamassan suurimmat vaikutukset nähtiin paperilajien vetolujuuksissa. Lujuusominaisuuksien parantumista voidaan yksinkertaisesti selittää teoriiaan perustuen sillä, että lyhytkuidun jauhaminen pitkälle ja sen myötä kuidun fibrilloituminen saa

kuidut tarttumaan toisiinsa helpommin ja muodostamaan lujempia kuitusidoksia. Lujempi paperi selittää myös talouspaperilajien osalta märkälajuuden kasvua.

10.4 Jauhatusasteen vaikutus laatuun ja energiankulutukseen

Tarkastelujakson loppupuolella päästiin tarkastelemaan myös kahta eri jauhatusastetta sekä niiden eroavaisuuksia paperikoneen energian ja raaka-aineen kulutuksen sekä lopputuotteiden laadun suhteen. Koska aikaa oli rajallisesti, vertailukelpoisia lajeja saatiin vain kolme, joista kaksi oli WC-paperilajeja ja yksi talouspaperilaji. Tämä antoi kuitenkin osviittaa peilata tuloksia myös muihin paperilajeihin.

Vertailtavana oli kaksi eri jauhatusastetta, joiden ero jauhinlinjan asetuksien osalta oli vain massan sakeudessa. Raaka-aineen kulutuksen osalta eroa näiden kahden jauhatusasteen välillä ei odotettu eikä havaittu, sillä jauhatusasteen muutoksen ei pitäisi vaikuttaa raaka-aineen kulutukseen. Kuten aikaisemmin on todettu, jauhatusaste muuttuu jauhimen energian ominaiskulutuksen ja liimamassalinjan takaisinkierrätyksen myötä.

Energiankulutuksen osalta havaittavissa oli puolestaan huomattavia eroavaisuuksia jauhatusasteiden välillä. Talouspaperilajin (HOTO 2) valmistuksessa suurempi jauhatusaste kulutti jopa 13 % enemmän energiaa. Korkein nousu ilmeni kaasun kulutuksessa, mistä voidaan päätellä, että paperiraina on ollut huomattavasti alhaisempaa jauhatusastetta tiheämpää ja vaatinut näin enemmän kuivatusenergiaa. Laatuominaisuuksia vertailtaessa huomattiin, että laatuarvoista paksuus, konesuuntainen vetolujuus, märkälajuus sekä konesuuntainen venymä heikkenivät suuremman jauhatusasteen myötä eniten. Poikkisuuntainen venymä puolestaan kasvoi 10 %.

WC-paperilajeista TOTI 4 -lajin energiankulutus pysyi kummallakin jauhatusasteella päällisin puolin tarkasteltuna samana, vaikka kulutusta tarkemmin tarkasteltaessa sen sisällä esiintyi merkittäviä muutoksia. Esimerkiksi massojen yhteisjauhatukseen jouduttiin käyttämään 25 % enemmän energiaa, mutta toisaalta pitkäkuitua ei jauhettu lainkaan, joka jauhatusasteen kokonaisenergian kulutuksessa ikään kuin kumosi yhteisjauhatuksen suuremman energian tarpeen. TOTI 4 -lajin laadussa havaittiin merkittävä heikkeneminen, kun paperin sekä kone- että poikkisuuntaiset vetolujuudet

laskivat lähes 15 %. Venymä puolestaan nousi 13 % konesuunnassa ja 8 % poikkisuunnassa. Suuremman jauhatuksen myötä paperin paksuus ja pehmeys kasvoivat kumpikin noin 2 %. WC-paperin parempi paksuus ja pehmeys ovat toisaalta hyviä kehityssuuntia, mutta muiden laatuominaisuuksien merkittävän huonontumisen rinnalla toissijainen seikka.

TOTI 5 –lajissa suuremman jauhatusasteen vaikutukset energian kulutuksen osalta olivat kolmen vertailun lajin kesken kaikista suurimmat. Kaasun kulutus nousi peräti 30 % ja huuvan kuivan pään puoliskoa jouduttiin operoimaan jopa 40 % kuumempina kuin pienemmällä jauhatusasteella. Myös kaasun virtaus kuivan pään huuvaan nousi 10 %, kun märän pään osalta virtaus peräti laski 10 %. Myös höyryn kulutus nousi muutamia prosentteja, mikä selittyikin rainan vaatimalla suuremmalla kuivatustarpeella.

Laadun osalta TOTI 5:n eroavaisuudet olivat maltillisemmat. Laatuominaisuuksien osalta kone-suuntainen vetolujuus laski noin 5 %, ja paksuudessa oli havaittavissa muutaman prosentin kasvua. Suurempi paksuus saattaa tosin selittyä sen perusteella, onko paperi mennyt jatkokäsiteltäväksi pituusleikkaukseen vai ei. Pituusleikattavat tampoirit ajetaan paperikoneella aina hieman tavoitetta paksumpana, sillä paksuutta menetetään aina pituusleikkauksessa jonkin verran. Ajamalla paperi paksumpana paperikoneella voidaan varmistaa, että lopullinen tuote on laadussaan.

Näiden havaintojen pohjalta tultiin siihen tulokseen, että suurempaan jauhatusasteeseen jauhettu massa saattoi olla jopa jo liiankin pitkälle jauhettua. Yleisesti ottaen jauhatus parantaa lopputuotteen ominaisuuksia tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen ominaisuudet alkavat huonontua. Vertailun perusteella vaikuttaisikin siltä, että kyseisillä jauhinlinjan asetuksilla liimamassan maksimijauhatus sekä suurin jauhatusaste saatiin löydettyä. Energian käytön kannalta havainto on positiivinen, sillä vähempi jauhatus kuluttaa luonnollisesti vähemmän energiaa.

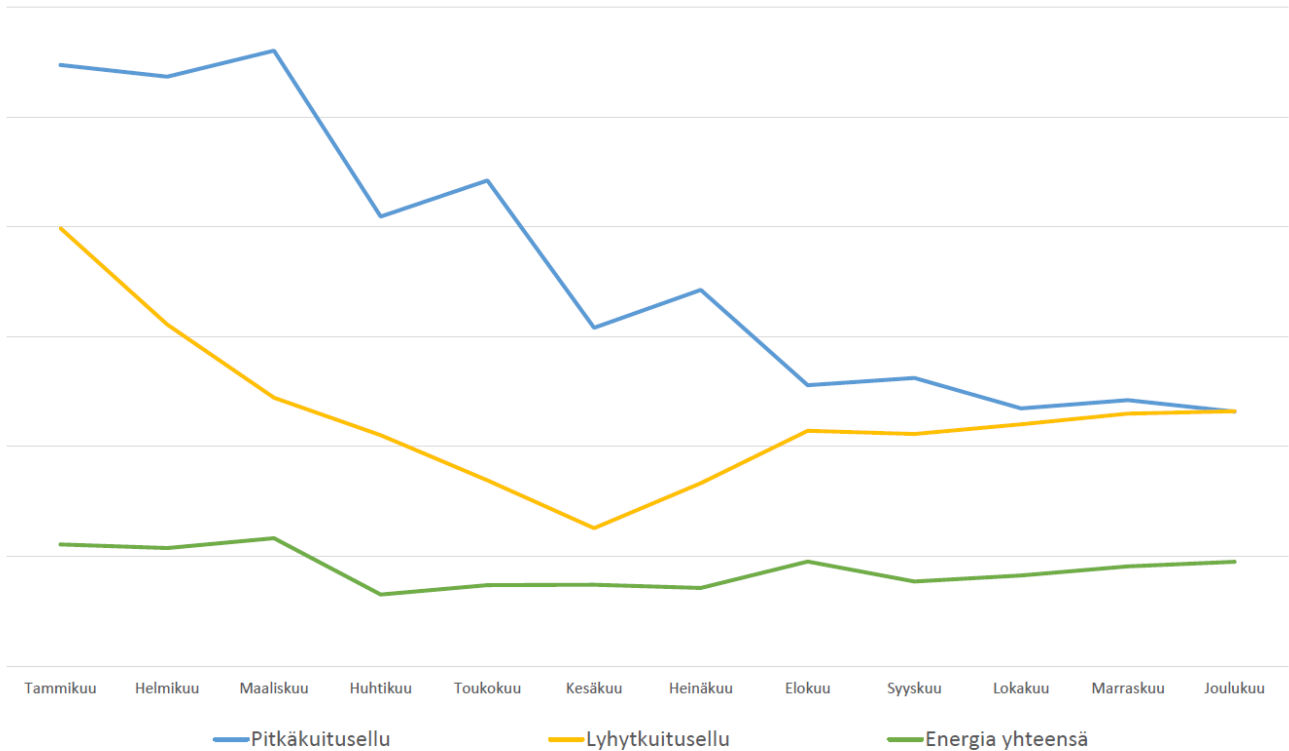
Vertailu osoittautui massaosuuksien ja jauhinlinjan optimaalisten ajoparametrien kannalta kuitenkin haastavaksi. Massaa oli jauhettu aikaisemmin hieman liian laimeana ja kun sakeutta myöhemmin nostettiin lyhytkuidulle optimaaliselle tasolle, jauhatusasteen kasvu huononsi lopputuotteiden laatua merkittävästi. Tämä tarkoittaa sitä, että jauhinlinjan ominaiskulutusta ja/tai takaisinkierrätystä on laskettava, jotta jauhinlinja saavuttaa tavoitesakeudella pienemmän jauhatusasteen. Ai-

kaisemmin jauhettu massa ei siis ole ollut tarpeeksi sakeaa, ja alhainen massan sakeus oli jauhinlinjalla ilmennyt jauhinterien värähtelyllä. Terävärähtelyt ovat prosessin ajettavuuden kannalta erittäin epätoivottavia, sillä se indikoi siitä, että jauhimen terät käyvät liian lähellä toisiaan. Riskinä on teräkosketus, joka puolestaan rikkoisi jauhinterät ajokelvottomiksi.

10.5 Liimamassan vaikutukset prosessin kustannustehokkuuteen

Liimamassan myötä tutkimuskohteen kustannustehokkuutta kyettiin parantamaan. Raaka-aineen kulutusta pystyttiin kehittämään niin, että edullisemmalla lyhytkuitusellulla pystyttiin korvaamaan tarvittava määrä pitkäkuitusellua ja sen kautta saavuttamaan tavoiteltuja kustannussäästöjä. Liimamassajärjestelmän myötä prosessista saatiin tuottavampi, sillä pienemmillä raaka-ainekustannuksilla ja samalla energiamäärällä saavutettiin edelleen laadukkaat lopputuotteet. Myös prosessin energiatehokkuus kehittyi etenkin WC-paperilajien osalta, kun yhdellä tehokkaalla jauhinlinjalla saatiin vähennettyä kahden pienemmän jauhinlinjan energiankulutusta.

Luvussa 4 käytiin teoreettisella tasolla läpi sellun kulutuksen kustannuksia, jotka ovat suurin ja merkittävin meno paperitehtaan kustannusrakenteessa. Tutkimuskohteen raaka-ainekustannukset pitkäkuidun osalta laskivat liimamassan myötä jopa 21 % ja lyhytkuidun kustannukset puolestaan nousivat noin 30 %. Vaikka prosentuaalisesti yhdelle paperikoneelle lyhytkuidun kustannusten kehitys vaikuttaa todella korkealta, koko tehtaan mittakaavassa lyhytkuidun kustannukset kasvoivat kuitenkin vain noin 10 %. Sen sijaan pitkäkuidun kustannukset koko tehtaan mittakaavassa laskivat peräti 13 %. Vaikka kustannusten toisaalta odotettiin kehittyvän tällä tavalla, on 3 %:n lasku sellun nettokustannuksissa merkittävä. Huomioitavaa on myös se, että kehitys on yhden paperikoneen optimoinnin seuraus. Mikäli tutkimuskohteessa haluttaisiin optimoida kaikki pehmopaperikoneet, olisivat kustannussäästöt oletettavasti vielä suuremmat. Näin ollen tulosten perusteella oli ilmeistä, että liimamassa tarjoaa suuren potentiaalisen säästää raaka-ainekustannuksissa.



Kuvio 24 Resurssien kustannusten kehitys vuonna 2023

Liimamassallisen ja liimamassattoman tuotannon välillä energiankäytön kustannuksia on vaikeampi verrata hintojen suuren vaihtelun takia. Vaikka energiaa kulutettiin loppuvuoden kuukausina vähemmän verrattuna esimerkiksi syyskuuhun, jolloin liimamassa ei ollut tuotannossa, eivät energian kustannukset (kuvio 24) näennäisesti kuitenkaan laskeneet. Energian kustannusten osalta merkittävin havainto oli kuitenkin se, ettei liimamassan havaittu vievän normaalia enempää energiaa eivätkä täten kustannuksetkaan nousseet normaalia korkeammiksi.

10.6 Paperikoneen lajireseptien ja ajoparametrien optimointi

Tulosten perusteella opinnäytetyön tarkoituksena oli myös optimoida paperikoneelle uudet lajireseptit sekä ajoparametrit. Jotta lajireseptejä ja ajoparametrejä voitiin optimoida ja muuttaa, oli ymmärrettävä prosessi, liimamassan vaikutukset sekä lopputuotteiden laatuvaatimukset, minkä takia optimointi suoritettiin työssä viimeisenä. Koska lajireseptit ovat erittäin arkaluontoista tietoa eikä tarkkoja prosenttiosuuksia voida työssä käsitellä, ilmaistaan massaosuudet tässä luvussa numeroin massa 1, massa 2 ja massa 3. Massa 1 oli liimamassaosuudeltaan pienin ja massa 3 suurin.

Koeajoja suoritettiin käytettävissä olevan ajan puitteissa pääosin vain massa 2:lla ja muita massa-osuuksia vain tietyillä paperilajeilla yksittäisiä ajoja.

Liimamassalle optimaalisimman massaosuuden ja jauhatusasteen löytämiseksi olisi ollut tarpeen laatia lajikohtaisesti liimamassan jauhatuskäyrät. Jauhatuskäyrällä kuvataan massan Freeness-arvon kehitystä jauhimien energian ominaiskulutukseen nähden, ja sen avulla pystytään määrittämään massalle parhain jauhatusaste sekä maksimijauhatus. Opinnäytetyölle varatun ajan puitteissa jauhatuskäyriä ei keretty tekemään, mutta työn tulosten perusteella sekä muiden toimeksiantajan tuotantolaitosten tekemien koeajojen perusteella löydettiin toistaiseksi sopivat lajireseptit sekä paperikoneen ajoparametrit.

Paperikoneen lajireseptejä muokattiin kuituseoksen lopulta niin, että kahta lajia lukuun ottamatta kaikki paperikoneella ajettavat lajit sisältäisivät liimamassaa. Liimamassajärjestelmän käyttöönoton yhteydessä viitteelliset massaosuudet ja ajoparametrit saatiin toimeksiantajan muiden tuotantolaitosten tekemien koeajojen perusteella, joiden pohjalta yhdessä opinnäytetyön tulosten kanssa tutkimuskohteelle haettiin omat lajikohtaiset optimit.

WC-paperilajien tuotannon osalta muissa tuotantolaitoksissa oli havaittu, että massa 2 oli laatuominaisuuksien puolesta maksimi massaosuus liimamassalle. Korkeampi liimamassaosuus aiheutti paperin laadussa etenkin pehmeuden laskua, joka etenkin WC-paperilajeille on erittäin epätoivottavaa. Massa 1 eli pienin liimamassaosuus tuotti edelleen laadukasta paperia, mutta teki liimamassalinjan operoinnista hankalaa epätasaisen käynnin vuoksi. Massa 1:llä liimamassan annostelu yhdelle paperikoneelle oli volyymiltään niin pieni, ettei jauhinlinja pysynyt käynnissä vähäisen menekin takia. Jauhinlinjan jatkuva käynnistyminen ja pysähtyminen ei myöskään ole energiankäytön kannalta järkevää, sillä linja ottaa käynnistyessään aina suuren energiankulutuspiikin, mikä saattaa muun muassa rasittaa prosessilaitteistoa. Mikäli liimamassaa annosteltaisiin kaikille kolmelle toimeksiantajan pehmopaperikoneelle, pienempi massaosuus ei välttämättä aiheuttaisi yhtä paljon ongelmia.

Talouspaperilajeilla potentiaali liimamassan suuremmalle massaosuudelle oli korkeampi. Laatimitauksista nähtiin, että massa 2:n kuituseoksella laatu oli ajoittain jopa liimamassatonta paperia

heikompi, joskin liimamassa kasvatti talouspapereiden energiankulutusta. Suuremmalla liimamassan annostelulla energiankulutus voisi olla hallittavissa muun muassa pienemmällä pitkäkuitu- ja yhteisjauhatuksella sekä huuuvan märän pään lämpötilaa säätämällä. Suurempi massa-annostelu ei sinänsä vaikuttaisi liimamassan jauhinlinjan energiankulutukseen, mikäli jauhatusteho pysyy samana.

Jauhatustehon osalta energiankulutusta voitaisiin hallita myös kemikaalien käytöllä. Luvussa 7 käytiin läpi selluloosan mikrofibrillaatiota, joka mekaanisen käsittelyn lisäksi voidaan tehdä entsyymien avulla. Tutkimuksen aikana käytiin keskustelua myös entsyymien käytöstä, joiden avulla voitaisiin parantaa kuidun fibrillaatiota ja massan jauhautumista. Tämä toisi potentiaalisen säästää jauhatustehossa, mikäli sama jauhatusteho saataisiin aikaan kemiallisilla lisäaineilla ja energiaa vähentämällä.

Paperikoneen ajoparametrien optimoimisessa keskityttiin niihin osaprosesseihin, joissa havaittiin liimamassan myötä merkittävimmät muutokset. Näitä osaprosesseja olivat jauhatusjärjestelmä kokonaisuudessaan sekä paperikoneen kuivatusosa. Jauhatusjärjestelmän osalta todettiin, että valtaosaan tutkituista paperilajeista pitkäkuitu voidaan ajaa jauhamattomana liimamassan tuomien lujuusominaisuuksien ansiosta. Mikäli lujuusominaisuuksissa huomattaisiin laskua tai nousua, voitiin jauhatusta säätää vielä varsinaisen konemassan yhteisjauhatuksella.

Liimamassalinjan operointiin liittyi erinäisiä haasteita, minkä takia tavoitteena oli pitää linjan asetukset lajista riippumatta samana. Esimerkiksi jauhatustehoa ei opinnäytetyön aikana saatu mitattua on-line mittauksena, joten jauhinlinjalle oli etsittävä mahdollisimman hyvät ajoparametrit tasaisen jauhatustuloksen takaamiseksi. Ohjeistus paperikoneen prosessinhoitajille oli, ettei liimamassalinjan asetuksia tulisi muuttaa, ellei lopputuotteen laatu sitä ehdottomasti vaatisi. Tarvittavat muutokset jauhatukseen kyettäisiin tekemään yhteisjauhatuksessa.

Kuivatusosan optimoinnissa havaittiin, ettei esimerkiksi jenkisylinterin ajoparametreihin ollut tarpeen tehdä muutoksia. Liimamassan aiheuttamat muutokset olivat hyvin maltillisia jokaisella paperilajilla, minkä takia tältä osin aikaisempi lajiresepti koettiin edelleen päteväksi. Huuvusysteemin osalta taulukoissa 4 ja 5 puolestaan havaittiin, että etenkin suurimmalle osalle WC-paperilajeista tarvittava kuivatusenergia saatiin jo yhdellä huuvalohkolla. Lajireseptejä kehitettiin siis niin, että

WC-paperilajeissa huuvan kuivan pään lämpötilaa voitiin tiputtaa minimiin. Talouspaperilajeissa oli edelleen ilmeistä, että molemmat huuvalohkot tarvittiin paperirainan kuivattamiseen, mutta lohkojen lämmitystä oli energiankulutustietojen perusteella (taulukko 5) tarpeen tasata. Koska osassa talouspaperilajeista havaittiin, että ensimmäisessä huuvalohkossa lämpötila laskee ja toisessa puolestaan nousee, olisi mahdollisesti kannattavampaa nostaa märän pään huuvan lämpötilaa korkeammaksi ja pitää kuivan pään lämpötila joko entisellään tai laskea lämpötilaa. Näin saataisiin aikaan WC-paperilajeissa havaittu ilmiö, joka lopulta laskee merkittävästi kaasun kulutusta. Kuivatusosan operoinnissa on tosin huomioitava ympäristötekijät ja se, että paperikoneen prosessinhoitajat muuttavat ajoparametreja aina tarpeen mukaan. Erityisen eksakteja lukuja ajoparametreille ei siis ole tarpeen määrittää, vaan optimointi toimii prosessinhoitajalle suuntaa antavana ohjeena.

Alun perin liimamassalinjan operointi oli tutkimusolettamukseen perustuen tarkoitus myös optimoida niin, että operoinnissa otettaisiin huomioon myös energian hinta. Koska liimamassan odotettiin lisäävän energian tarvetta merkittävästi, pidettiin tarpeellisena kartoittaa niin sanotusti kannattavimmat ajat valmistaa liimamassaa, jotta se olisi energian hinnan kannalta kannattavaa. Liimamassalinjan vaikutukset paperikoneen energiankulutukseen osoittautuivatkin odotettua lievemmiksi, minkä perusteella todettiin, ettei liimamassalinjan operointi energian hintojen perusteella ollut välttämättä tarpeellista. Raaka-aineen hintojen osalta voitiin myös todeta, että mikäli sellulaatujen hintasuhde kääntyy jälleen niin, että lyhytkuitu onkin pitkäkuitua kalliimpaa, voidaan liimamassalinjan tuotanto pysäyttää ja palata alkuperäisiin lajiresepteihin.

11 Pohdinta ja luotettavuusvarauma

11.1 Tulosten luotettavuus

Hyvässä tutkimuksessa tutkija pyrkii aina arvioimaan tulostensa luotettavuutta. Tavallisimmat luotettavuuteen vaikuttavat tekijät työssä olivat erilaiset mittausvirheet, joiden takia tutkimuksessa käytetyt arvot saattoivat poiketa pienissä määrin todellisista luvuista. Suurin osa tutkimustuloksista perustettiin myös mittaustulosten keskiarvoihin, joka saattoi piilottaa taakseen suuriakin arvojen vaihteluita. Tätä pyrittiin välttämään sillä, että tutkimustietoa kerättiin mahdollisimman pitkältä aikaväliltä.

Paperilajien keskeistä vertailua hankaloitti osin myös se, ettei kaikista paperilajeista ollut yhtä paljon dataa saatavilla. Paperikoneen ajo-ohjelma riippuu siitä, kuinka paljon millekin paperilajille on kysyntää, joten joitain paperilajeja saatetaan ajaa useita kertoja kuukaudessa, kun taas toisia ei välttämättä edes kuukausittain. Toisin sanoen siis joistain paperilajeista saatiin kerättyä aineistoa huomattavasti enemmän kuin toisista.

Laatuaspektia tutkittaessa havaittiin, ettei liimamassan jauhatuste välttämättä ollut täysin staabiili tutkimuksen aikana. Liimamassan jauhinlinjan asetukset pidettiin kuitenkin samoina koko tutkimuksen ajan, jotta jauhatustuloksesta saatiin mahdollisimman tasainen. Koska reaaliaikaista tietoa jauhatusteesta ei saatu, täyttä varmuutta massan jauhautuneisuudesta ei ollut.

Jauhatusteesta tosin tarkkailtiin opinnäytetyön aikana laboratoriomittauksilla, joissa havaittiin jauhatusteiden pientä vaihtelua. Luvussa 10.4 tutkittu jauhatusteiden vaikutus energiankulutukseen varmistettiin kuitenkin laboratoriomittauksin, jotka osoittivat vertailun tulokset tarpeeksi luotettaviksi.

Opinnäytetyö toteutettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun sekä Metsä Tissuen eettiset periaatteet, asianmukainen raportointi ja salassapidolliset seikat huomioon ottaen. Opinnäytetyö laadittiin niin, ettei siihen liitetty lainkaan toimeksiantajan salaiseksi määrittämää tietoa, ja arkaluontoisten tuotantoteknisten seikkojen takia myös tutkimustulos esitettiin niin, ettei siitä voi päätellä eksakteja lukuja, jotka olisivat toimeksiantajan yritystoiminnalle haitallisia.

11.2 Pohdinta

Opinnäytetyön tutkimukseen tartuttiin sillä oletuksella, että käsissä oli paljon energiaa kuluttava ja lopputuotteiden laatuun merkittävästi vaikuttava jauhatustejärjestelmä. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia liimamassajärjestelmän resurssien käyttöä, laatuvaikutuksia sekä optimoida havaintojen perusteella paperikoneen lajireseptejä ja ajoparametrejä. Tutkimus vaati perusteellisen tutustumisen paperikoneen massankäsittelyyn ja lopputuotteiden laadun hallintaan, jotta liimamassan aiheuttamat syy-seuraussuhteet voitiin havaita ja ymmärtää.

Tutkimusolettamuksen näkökulmasta yllättävänä käänteinä liimamassa ei kuluttanutkaan energiaa yhtä paljon kuin alun perin arvioitiin. Tiettyjen prosessien osalta energiankulutusta saatiin

jopa vähennettyä, ja toimeksiantajan näkökulmasta myös se oli merkittävä havainto, ettei energiaa myöskään kulutettu normaalia enempää. Raaka-aineen kulutus kehittyi odotetulla tavalla, ja pitkäkuitusellun vähentämisen myötä saavutetut kustannussäästöt nähtiin koko tehtaan mittakaavassa. Oppimisen kannalta havainnot olivat merkittäviä, sillä ne osoittivat käytännössä, kuinka suuret paperitehtaan raaka-ainekustannukset oikeastaan ovat ja kuinka suuri vaikutus pienelläkin prosessin optimoinnilla saattaa olla. Laadussa esiintyneitä vaikutuksia puolestaan osattiin teorian pohjalta odottaa ja laadunhallinnan osalta paperikoneen operaattoreiden ammattitaito korostui liimamassan koeajoissa, jotta hylkäysrajojen ylityksiltä vältyttiin. Laadunvalvonnan perusteella liimamassan vaikutuksia havaittiin eniten WC-paperilajien osalta, joskin parilla talouspaperilajilla havaitut vaikutukset olivat WC-papereita suuremmat.

Lajireseptien ja paperikoneen ajoparametrien optimoinnin osalta opinnäytetyön tulos tarjosi yleis-pätevät ohjeistukset paperikoneen ja jauhinlinjojen operointiin, mutta tarkempi ja perusteellisempi optimointi olisi vaatinut enemmän aikaa ja järjestelmällisempiä koeajoja. Tiukan aikataulun ja työlään aineistonkeruun vuoksi tämä osuus jäi työssä suppeammaksi, mutta loppupeleissä työn tärkein tavoite olikin nimenomaan kartoittaa liimamassajärjestelmän vaikutus resurssien käyttöön.

Koska liimamassajärjestelmä otettiin tuotantoon samaan aikaan opinnäytetyön alkaessa, päästiin työn aikana osallistumaan jauhinlinjan käyttöönottoon sekä siihen liittyvien havaintojen ja ongelmien ratkaisuun. Varsinainen tutkimustyö sisälsi myös paljon kommunikointia muun muassa laite-toimittajien ja tehtaan eri toimintojen välillä, ja työn tuloksia esiteltiin toimeksiantajan lisäksi myös muille tahoille. Tutkimus ja sen tulokset herättivät paljon mielenkiintoa ja kysymyksiä, jotka puolestaan innostivat perehtymään opinnäytetyön teemoihin entistä tarkemmin. Toimeksiantaja oli opinnäytetyön tuloksen osalta vaativa, mutta kannustava, mikä motivoi tarkkaan ja järjestelmälliseen työskentelyyn, perusteelliseen tiedonhakuun ja sitä kautta laadukkaaseen lopputulokseen.

Suurin hyöty opinnäytetyöstä jäi kuitenkin itse työn tekijälle. Tutkimuksen myötä tietoa ja käytännön havaintoja saatiin niin pehmopaperin valmistuksesta, paperin valmistukseen käytettävistä raaka-aineista, jauhatuksen vaikutuksista kuin tehtaan talouden toiminnasta. Aikaisempi työkokemus pehmopaperin jalostuksesta auttoi ymmärtämään paperilajien laatutavoitteiden merkityksen ja toisaalta tutustuminen pehmopaperin valmistukseen antoi uusia näkökulmia myös aiemmissa

työtehtävissä opittuihin asioihin. Kaiken kaikkiaan työ oli onnistunut ja tutkimuskysymyksiin onnistuttiin vastaamaan perusteellisesti.

Lähteet

Alén, R. 2011. Cellulose derivatives. Papermaking science and technology. Book 20: Biorefining of Forest Resources. Viitattu 29.12.2023.

Boufi, S., González, I., Delgado-Aguilar, M., Tarrès, Q., Àngels Pèlach, M. & Mutjé, P. 2016. Nano-fibrillated cellulose as an additive in papermaking process: A review. Carbohydrate Polymers 154(2). 151–166. Viitattu 29.12.2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.117>

Brännare, S. 2020. Sellun hinta on romahtanut ja sellubuumi on tältä erää ohitse – Suomeen suunnitellaan silti samaan aikaan jättimäisiä uusia sellutehtaita. Verkkouutinen Ylellä 15.1.2020. Viitattu 23.1.2024. <https://yle.fi/a/3-11156760>

Chen, Z., Zhang, L., & He, Z. 2018. Rethinking the determination of wet strength of paper. BioResources. 13(2). Viitattu 30.11.2023 <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2184-2186>

Day-ahead prices. 2024. Nordpoolin päivittyvä sähkömarkkinadata. Haettu 10.1.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?view=table>

De Assis, T., Reisinger, L. W., Pal, L., Pawlak, J., Jameel, H. & Gonzalez, R. W. 2018. Understanding the effect of machine technology and cellulosic fibers on tissue properties – A Review. BioResources, 13(2). Viitattu 7.11.2023. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.DeAssis>

Energiatalous. N.d. Artikkelit KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 15.1.2024. https://www.knowpap.com/extranet/suomi/prod_environment/10_energy/frame.htm?zoom_highlightsub=energianhallinta

Energiätehokas paperin valmistus. N.d. Artikkelit KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 1.12.2023. http://www.knowpap.com/extranet/suomi/prod_environment/energy_efficiency/4_ee_papermak/frame.htm

Hartikainen, K., Laamanen, M. & Lahti, J. 2008. Greaseproof and glassine papers. Fibre-based packaging materials. Papermaking science and technology: Book 12, Paper and paperboard converting. Jyväskylä: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja puu. Viitattu 9.1.2024.

Heikkurinen, A., Leskelä, L., Heinemann, S. & Vehniäinen, A. 2009. The character and properties of mechanical pulps. Papermaking science and technology: Book 5, Mechanical pulping. 2nd totally updated ed. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu. Viitattu 22.12.2023.

Holik, H. & Lomic, S. 2013. Carton Board Machines. Handbook of paper and board. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH. Viitattu 12.11.2023.

Höyryn ja sähkön taseet. N.d. Artikkelit KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 14.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/monipoltt_kat_tilat/11_hoyry_sahk_taseet/frame.htm

Hygieniapaperit. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 9.11.2023. http://www.knowpap.com/extranet/suomi/grades/1_papers/5_special_papers/1_tissues/0_grade_specif/frame.htm

Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK). 2023. Tietosivu Tutkimuseettisen neuvottelukunnan verkkosivuilla. Viitattu 30.10.2023. <https://tenk.fi/fi/hyva-tieteellinen-kaytanto-htk>

ISO 5267-1:1999 – SR-luku. Viitattu 22.12.2023.

Jauhamaton lyhytkuitu ja mikrofibrilloitunut lyhytkuitu. 2019. Kuva Metsä Tissuen henkilökohtaiseen tiedonantoon perustuen. Saatu 12.10.2023.

Jauhatuksen hallinta. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 28.12.2023. https://www.knowpap.com/extranet/suomi/paper_technology/2_stock_system/7_refining/12_refing_control/frame.htm

Jauhatusteorioita. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 14.12.2023. http://www.knowpap.com/extranet/suomi/paper_technology/2_stock_system/7_refining/6_theor_models/frame.htm

Jauhatustulokseen vaikuttavat tekijät. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 28.12.2023. https://www.knowpap.com/extranet/suomi/paper_technology/2_stock_system/7_refining/4_refining_result/frame.htm

Jauhintyyppit N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 14.12.2023. http://www.knowpap.com/extranet/suomi/paper_technology/2_stock_system/7_refining/5_refiners/frame.htm

Kananen, J. 2017. Laadullinen tutkimus pro graduna ja opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 18.10.2023.

Kimari, O. 2000. Quality requirements. Tissue. Papermaking science and technology: Book 18, Paper and board grades. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Suomen paperi-insinöörin yhdistys, Paulapuro, H. & Gullichsen, J. Helsinki: Fapet. Viitattu 29.11.2023.

Klerelid, I. & Milosavljevic, N. 2010. Yankee hood drying, ventilation and heat recovery. Drying of tissue. Papermaking science and technology: Book 9, Papermaking: part 2, Drying. 2nd ed., totally updated version. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu. Viitattu 1.12.2023.

Koskenhely, H. 2008. Refining of chemical pulp fibres. Papermaking science and technology: Book 8, Papermaking: part 1: Stock preparation and wet end. 2nd totally updated ed. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu. Viitattu 19.12.2023.

Kuitudimensiot. N.d. Artikkele KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 25.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/8_fiber_dimension/frame.htm

Kuituraaka-aineet. N.d. Artikkelit KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 25.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/1_trees/frame.htm

Laatukustannukset. N.d. Artikkelit KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 11.1.2024. https://www.knowpap.com/extranet/suomi/prod_environment/7_quality_costs/frame.htm

Lämmön talteenotto. N.d. Artikkelit KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 14.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/paper_technology/paper_machine/drying_section/20_heat_recovery/frame.htm

Lassila, A. 2023. Metsäyhtiöt varoittavat, ja pian tiedossa voi olla ikäviä uutisia. Verkkouutinen Helsingin Sanomissa 17.5.2023. Maksullinen uutinen. Viitattu 23.1.2024. <https://www.hs.fi/talous/art-2000009588997.html>

Laurijssen, J., Faaij, A. & Worrell, E. 2013. Benchmarking energy use in the paper industry: a benchmarking study on process unit level. Energy Efficiency 6(1). Viitattu 1.12.2023. <https://doi.org/10.1007/s12053-012-9163-9>

Leiviskä, K. 2009. Process control in the fibre line. Papermaking science and technology: Book 14, Process and maintenance management. 2nd edition. Jyväskylä: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu. Viitattu 11.1.2024.

Li, H., Chen, B., Kulachenko, A., Jurkijane, V., Mathew, A. & Sevastyanova, O. 2023. A comparative study of lignin-containing microfibrillated cellulose fibers produced from softwood and hardwood pulps. Cellulose. Viitattu 29.12.2023. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05674-y>

Märkäviirat -yleistä. N.d. Artikkelit KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 12.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/maintenance/3_equipment/6_f_fabrics/1_forming_fabrics/frame.htm

Massojen jauhatus -yleistä. N.d. Artikkelit KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 16.11.2023. http://www.knowpap.com/extranet/suomi/paper_technology/2_stock_system/7_refining/1_introduction/frame.htm

Meistä. N.d. Tietosivu Metsä Springin verkkosivuilla. Viitattu 2.10.2023. <https://metsaspring.com/fi/about-us/>

Metsä Tissue Suomessa. N.d. Tietosivu Metsä Tissuen verkkosivuilla. Viitattu 7.11.2023. <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/tuotanto/tuotanto-suomessa-mantta/>

Metsä Tissue yhtiönä. N.d. Tietosivu Metsä Tissuen verkkosivuilla. Viitattu 2.10.2023. <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/>

Metsän tarina. N.d. Tietosivu Metsä Groupin verkkosivuilla. Viitattu 2.10.2023 <https://www.metsagroup.com/fi/tietoa-metsa-groupista/tietoa-meista/metsan-tarina/>

Metsät. N.d. Artikkele Metsä Tissuen verkkosivuilla. Viitattu 24.11.2023. <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/kestava-kehitys/metsat/>

Neliömassa. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 9.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/paper_board_properties/2_general_properties/1_basis_weight/frame.htm

Pawlak, J. J., Frazier, R., Vera, R. E., Wang, Y. & Gonzalez, R. 2022. Review: The softness of hygiene tissue. BioResources, 17(2). Viitattu 7.11.2023. <https://doi.org/10.15376/biores.17.2.Pawlak>

Pehmopaperikoneet. N.d. Kuva Valmetin mediapankista. Haettu 20.11.2023. <https://www.valmet.com/fi/media/mediapankki/liiketoiminnat/#pehmopaperi>

Pehmopaperin raaka-aineet. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 24.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/tissue/3_raaka-aineet/frame.htm

Pehmopaperin valmistus. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 11.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/tissue/4_valmistus/frame.htm

Pehmopaperit -yleistä. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 9.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/tissue/1_yleista/frame.htm

Pitkä- ja lyhytkuitusellun suhteutettu hintakehitys vuosina 2022 ja 2023. 2024. Kuva Metsä Tissuen henkilökohtaiseen tiedonantoon perustuen. Saatu 11.1.2024.

Post, H. 2013. Plant engineering and energy. Handbook of paper and board. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH. Viitattu 11.11.2023.

Reitbauer J., Eckhart, R. & Bauer, W. 2023. An analytical approach to assess the interrelation of surface properties and softness of tissue paper. TAPPI Journal, 22(2). Viitattu 7.11.2023. <https://doi.org/10.32964/TJ22.2.87>

Rullaus. N.d. Artikkele KnowPap-oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 12.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/paper_technology/9_reeling/1_reeling/frame.htm

Sellun valmistus. N.d. Artikkele KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 24.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/raw_materials/3_pulps/3_chem_pulps/3_process/frame.htm

Sirviö, J. 2008. Pulping effects. Fibres and bonds. Papermaking science and technology: Book 16, Paper physics. 2nd totally updated ed. Jyväskylä: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja puu. Viitattu 14.12.2023.

SR-luku. N.d. Määritelmä KnowPap-oppimisympäristön sanastossa. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 28.12.2023.

Sundholm, P. 2008. Mill operations in the production of main paper and board grades – an overview. Papermaking science and technology: Book 8, Papermaking: part 1: Stock preparation and wet end. 2nd totally updated ed. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu. Viitattu 11.1.2024.

Suojanen, S. 2023. Sellun huippuhinnat ovat ohi – laskua odotetaan koko tälle vuodelle. Verkkouutinen Maaseudun Tulevaisuudessa 12.4.2023. Viitattu 15.1.2024.

Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain 2007–2022. 2023. Tilastokeskuksen tietokanta. Viitattu 12.12.2023. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_tene/stat-fin_tene_pxt_11wy.px/table/tableViewLayout1/

Tiivispaperit. N.d. Tietosivu Metsä Tissuen verkkosivuilla. Viitattu 7.11.2023. <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/tuotteet-ja-palvelut/greaseproof-papers/>

Tuotantolaitokset. N.d. Tietosivu Metsä Tissuen verkkosivuilla. Viitattu 7.11.2023. <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/tuotanto/>

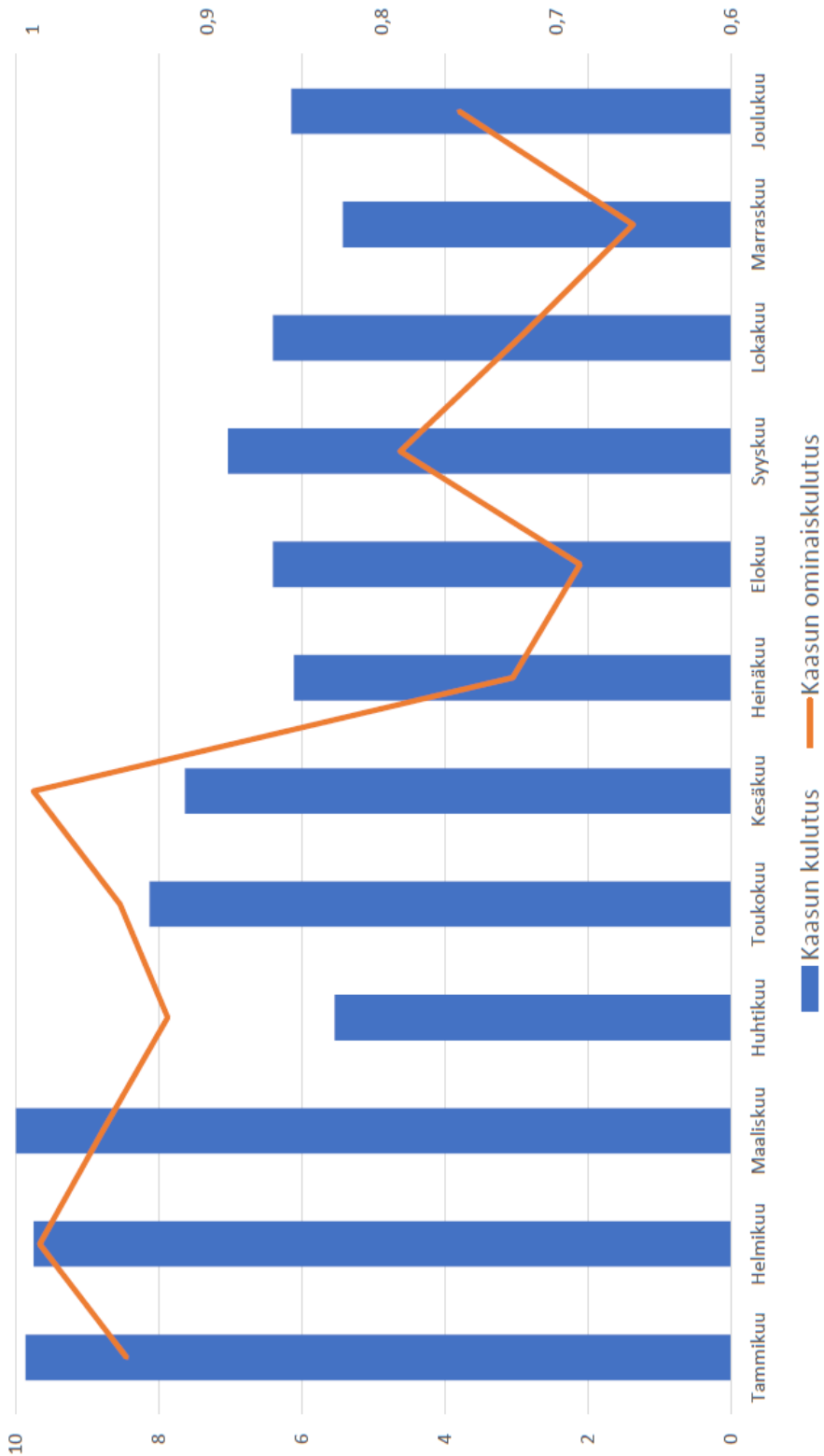
Uusiomassan raaka-aineet. N.d. Artikkelit KnowPap oppimisympäristössä. Vaatii kirjautumisen. Viitattu 25.11.2023. http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/raw-materials/3_pulps/4_recycled/1_raw_material/frame.htm

Vilka, H. 2007. Tutki ja mittaa: Määrällisen tutkimuksen perusteet. Helsinki: Tammi. Viitattu 20.10.2023.

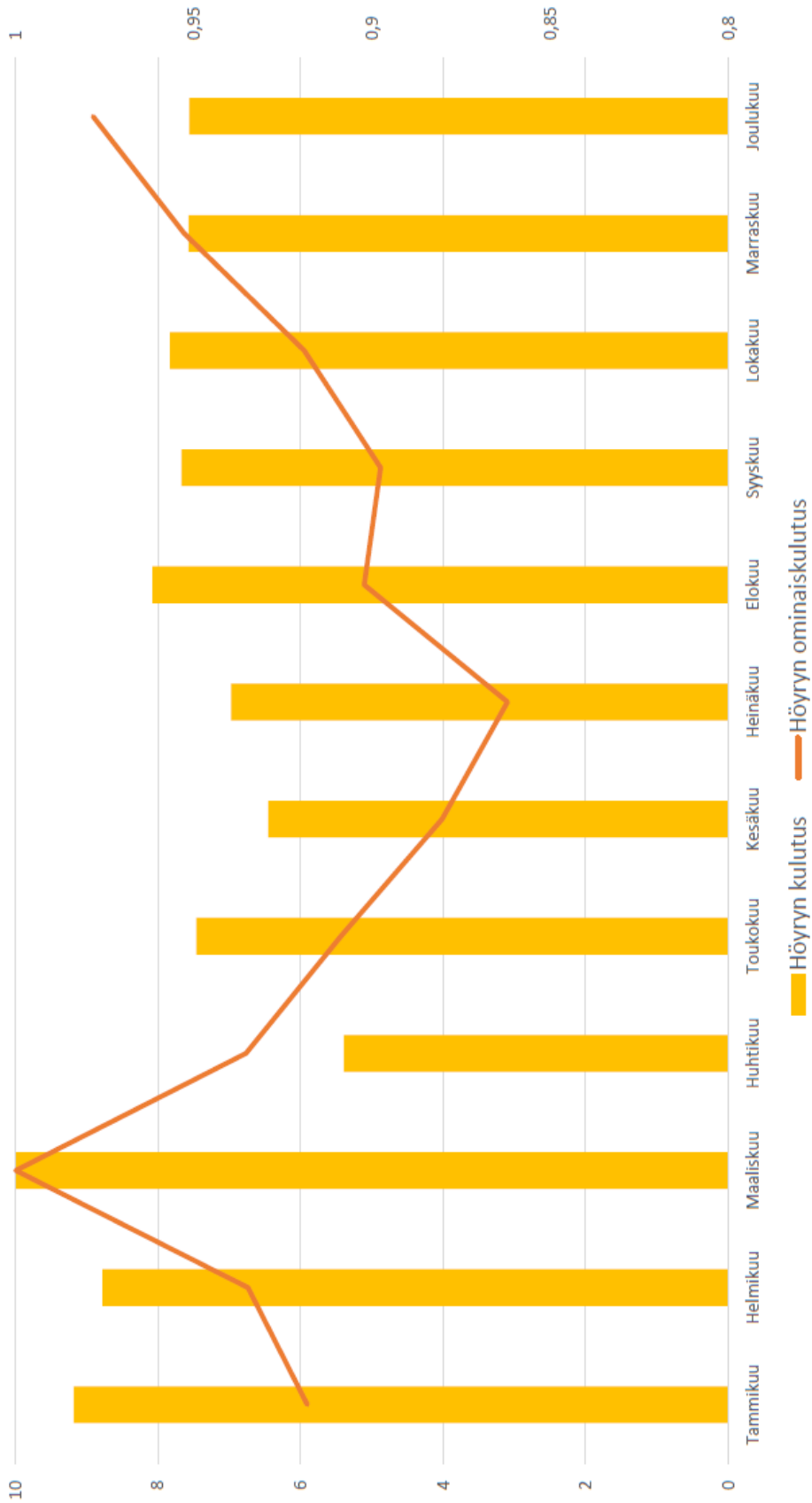
Yritysrakenne. N.d. Tietosivu Metsä Groupin verkkosivuilla. Viitattu 2.10.2023 <https://www.metsagroup.com/fi/tietoa-metsa-groupista/tietoa-meista/yritysrakenne/>

Liitteet

Liite 1. Paperikoneen suhteutettu kaasun kulutus sekä ominaiskulutus vuonna 2023



Liite 2. Paperikoneen suhteutettu höyryn kulutus ja ominaiskulutus vuonna 2023



Liite 3. Paperikoneen suhteutettu sähkön kulutus ja ominaiskulutus vuonna 2023

