



## **ENERGIAN OSATUOTTAVUUDEN KUSTANNUSTEHOKAS KEHITTÄMINEN**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tuotantotalouden diplomityö

2023

Toni Viitasaari

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Ukko

Apulaisprofessori, TkT Minna Saunila

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Tuotantotalous

Toni Viitasaari

### **Energian osatuottavuuden kustannustehokas kehittäminen**

Tuotantotalouden diplomityö

2023

108 sivua, 14 kuvaa, 13 taulukkoa ja 15 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Ukko

Apulaisprofessori, TkT Minna Saunila

Avainsanat: Suorituskyky, tuottavuus, osatuottavuus, energiatehokkuus, kustannustehokkuus

Energiakustannukset nousivat vuoden 2022 aikana voimakkaasti energiaintensiivisessä teollisuudessa, mikä aiheutti suuria kustannussäästöpaineita usealle yritykselle. Tutkimuksen tavoitteena olikin tutkia energian tuottavuuden kustannustehokasta kehittämistä pehmopaperikoneella.

Tutkimus sisältää kirjallisuuskatsauksen sekä empiriaosuuden, jossa asiaan liittyviä tekijöitä tutkittiin erilaisten koeajojen, haastatteluiden sekä analyysien avulla. Kirjallisuuskatsauksessa keskityttiin suorituskykyyn ja siihen liittyviin asioihin. Katsaus kattaa myös paperin valmistukseen liittyviä perusteita. Kokeellisessa osuudessa energiankulutusta analysoitiin erilaisten muuttujien avulla samalla pyrkien vakioimaan muut olosuhteet. Koeajotulosten perusteella optimaalisilla kuituvalinnoilla on oleellinen merkitys energian tuottavuuteen, mutta vaikutus saattaa olla kustannustehokkuuden näkökulmasta käännteinen. Valituilla tuotantomenetelmillä ja -tavoilla on myös huomattava merkitys energian tuottavuuteen ja kustannustehokkuuteen.

Tutkimuksessa havaittiin konkreettisesti, miten suorituskyvyn mittaamisella on suora yhteys suorituskyvyn johtamiseen. Suorituskyvyn johtamisen edellytys on ajantasainen tieto. Ilman mitattua tietoa päätökset saattavat pahimmillaan johtaa ei-toivottuun lopputulokseen.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Industrial Engineering and Management

Toni Viitasaari

### **Cost-effective development of energy productivity**

Master's thesis

2023

108 pages, 14 figures, 13 tables and 15 appendices

Examiners: Professor, D. Sc. Tech. Juhani Ukko

Associate Professor, D. Sc. Tech Minna Saunila

**Keywords:** Performance, productivity, partial productivity, energy efficiency, cost-efficiency

The energy costs increased drastically during 2022 for the energy-intensive industries, which caused significant cost-saving pressures for several companies. The aim of the research was to investigate the cost-effective development of energy productivity on a tissue paper machine.

The research includes a literature review and an empirical section, where related aspects were reviewed by means of examination of various test runs, interviews, and analyses. The literature review focuses on performance and related issues, including the fundamentals of paper manufacturing. In the examination part, energy consumption was analyzed using different variables while also seeking to standardize other conditions. Based on the test results, optimal fiber choices are essential for energy productivity, but their impact may be counterproductive from a cost-efficiency perspective. The selected production methods and techniques also have a significant impact on energy productivity and cost-efficiency.

The research showed particularly how performance measurement has a direct connection to performance management. The prerequisite for performance management is up-to-date information. Without measured data, decisions may lead to unwanted results.

## ALKUSANAT

Diplomityön aihepiiri oli jo pitkään ollut tiedossa, mutta lopullisesti se naulattiin kiinni vuoden 2022 lopussa. Varsinaisesti työ päästiin aloittamaan vuoden 2023 alussa ja nyt tätä kirjoittaessa työ on valmis. Tavoitteena oli, että pystyn luovuttamaan työn eteenpäin toukokuun 2023 loppuun mennessä eli aikataulu toteutui suunnitelman mukaisesti

Diplomityö oli kaikessa kuormittavuudessaan huomattava puristus. Kuormitukseen vaikutti oleellisesti se, että samanaikaisesti kävin normaalisti töissä eli vapaa-aika jäi lähes olemattomaksi. Käytännössä diplomityötä pääsin kirjoittamaan aina iltaisin työpäivän jälkeen ja näin jälkikäteen ajateltuna saanto näistä iltapuheista oli monestikin pieni, jopa olematon. Onneksi pystyin hyödyntämään viikonloppuja ja muita vapaita hyvin diplomityön tekemiseen, koska muussa tapauksessa työn valmistuminen nyt ei olisi mahdollista.

Työn aikana sain kattavaa tukea useilta eri henkilöiltä. Kiitokset teille kaikille! Erityiskiitokset haluan antaa muutamille henkilöille. Professori Juhani Ukko työni ohjaajana esitti hyviä kysymyksiä ja kommentteja, joilla sain suunnattua työtäni oikeaan suuntaan. Juhaniin kannustava ja positiivinen asenne ansaitsevat myös erityismaininnan! Kiitos myös työnantajalleni Metsä Tissuelle positiivisesta suhtautumisesta niin opiskeluun kuin diplomityöhönkin. Yrityksen puolelta ohjaajani Jarkko Lindroos tuki minua koko hankkeen ajan, mikä oli varmastikin yksi edellytyksistä opiskeluiden tavoitteelliseen suorittamiseen. Jarkolta myös sain hyviä kehitysideoita tutkimuksen varrella. Haluan huomioda myös siskoni Terhin, joka avusti kielenhuoltoon liittyvissä asioissa. Kiitokset kuuluvat myös opiskelukavereilleni. Opiskelukavereista haluan mainita erikseen Marjan, Aaron, Juhan ja J-P:n. Teidän kanssanne tuli vietettyä useampikin ilta erinäisten projektitöiden puitteissa. Juhan ja J-P:n kanssa kävimme diplomityön tekemisen aikana lukemattomia keskusteluita, joissa haastoimme toistemme ajatuksia puolin ja toisin. Kiitokset näistä erinomaisista keskusteluista.

Suurin kiitos kuuluu vaimolleni Tealle. Ilman sinua tämä projekti ei olisi tullut koskaan maaliin.

Mäntässä 18.5.2023

*Toni Viitasaari*

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### **Kuitujakeet**

BCTMP	Valkaistu kemitermomekaaninen massa (bleached chemi-thermomechanical pulp). Voidaan valmistaa havu- tai lehtipuusta
Pitkä kuitu	Tyypillisesti havupuusta valmistettu valkaistu sellu, sisältää esim. kuusi- ja mäntykuitua
Lyhyt kuitu	Lehtipuusta valmistettu valkaistu sellu, esim. koivu tai eucalyptus

### **Lyhenteet**

LNG	Nesteytetty maakaasu (liquified natural gas)
EOK	Energian ominaiskulutus, yksikkönä MWh/tn. Kertoo, miten paljon energiaa on jouduttu käyttämään yhden paperitonnin valmistamiseen
PK10	Paperikone 10

### **Termit**

Sulppu	Kuitujen ja muiden paperin raaka-aineiden vesiliete
Raina	Paperikoneen viiralle suotauttamalla muodostuva paperirata
Tampuuri	Ns. konerulla, koko rainan levyinen suuri paperirulla
Kuitukoostumus	Paperin valmistuksessa käytetty sekoitus eri kuitulajeista
Loppukosteus	Paperin lopullinen kosteusprosentti paperin valmistuksen jälkeen
Tuotantonopeus	Nopeus, jolla paperikonetta ajetaan. Tyypillisesti m/min
Kuivatushuuva	Paperikoneessa oleva kammio, jonka avulla paperiin puhalletaan kuumaa ilmaa paperin kuivamisen tehostamiseksi
Jenkki	Kuivatussylinteri, jonka halkaisija on useita metrejä. Myös termillä jenkkisylinteri

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Tutkimuksen tausta .....	9
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus .....	11
1.3	Tutkimuksen toteutus .....	13
1.4	Tutkimusmenetelmät.....	14
1.5	Tutkimuksen rakenne .....	21
2	Suorituskyky.....	23
2.1	Suorituskyvyn osa-alueet .....	23
2.2	Suorituskyvyn johtaminen .....	27
2.3	Suorituskyvyn analysointi.....	29
2.4	Kannattavuus.....	31
2.5	Kustannukset.....	33
2.6	Tuottavuus.....	35
2.6.1	Tuottavuuden ja kannattavuuden välinen suhde.....	38
2.6.2	Tuottavuuden mittaaminen .....	39
2.6.3	Tuottavuuden kehittäminen .....	41
2.6.4	Osatuottavuus.....	42
2.7	Tuottavuuden kehittämisen esteet .....	44
3	Paperin valmistus.....	47
3.1	Paperin valmistuksen perusteet.....	47
3.2	Energian käyttö paperin valmistuksessa .....	51
3.3	Energian kulutukseen vaikuttavia muuttujia.....	53
4	Tutkimuksen kohdeyritys .....	55
4.1	Metsä Group.....	55
4.2	Metsä Tissue.....	56

4.3	Metsä Tissuen strategia .....	57
5	Tutkimuksen toteutus .....	58
5.1	Teemahaastattelu.....	58
5.2	Paperikoneella suoritettavat koeajot .....	60
6	Empiirinen tutkimus .....	63
6.1	Teemahaastattelu.....	63
6.2	Kuitukoostumuksen vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin .....	67
6.3	Paperikoneen tuotantonopeuden vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin .....	73
6.4	Paperin loppukosteuden vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin .....	78
6.5	Lajinvaihtojen vaikutus energiankulutukseen.....	83
7	Tulosten analysointi.....	87
7.1	Teemahaastattelu.....	87
7.2	Kuitukoostumuskoeajon analysointi .....	89
7.3	Tuotantonopeuskoeajon analysointi.....	90
7.4	Paperin loppukosteuskoeajon analysointi .....	91
7.5	Lajinvaihtojen vaikutuksen analysointi.....	91
8	Johtopäätökset .....	93
8.1	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus .....	93
8.2	Tutkimuskysymykset .....	94
8.3	Tulosten käytettävyys, luotettavuus ja suositukset jatkotutkimukselle.....	96
9	Yhteenveto.....	98

## Liitteet

Liite 1. Työntekijöiden teemahaastattelun runko

Liite 2. Asiantuntijoiden teemahaastattelun runko

Liite 3. Paikallisjohdon teemahaastattelun runko

Liite 4. Kuitukoostumuskoeajojen energian indeksoidun ominaiskulutuksen tilastolliset tunnusluvut

Liite 5. Kuitukoostumuskoeajon sähkön indeksoidun ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 6. Kuitukoostumuskoeajon höyryn indeksoidun ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 7. Kuitukoostumuskoeajon kaasun indeksoidun ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 8. Nopeuskoeajon energian indeksoitujen ominaiskulutusten sekä tuotantomäärän tilastolliset tunnusluvut

Liite 9. Nopeuskoeajon sähköenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 10. Nopeuskoeajon höyryenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 11. Nopeuskoeajon kaasuenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 12. Kosteuskoeajon energian indeksoitujen ominaiskulutusten tilastolliset tunnusluvut

Liite 13. Kosteuskoeajon sähköenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Liite 14. Kosteuskoeajon höyryenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

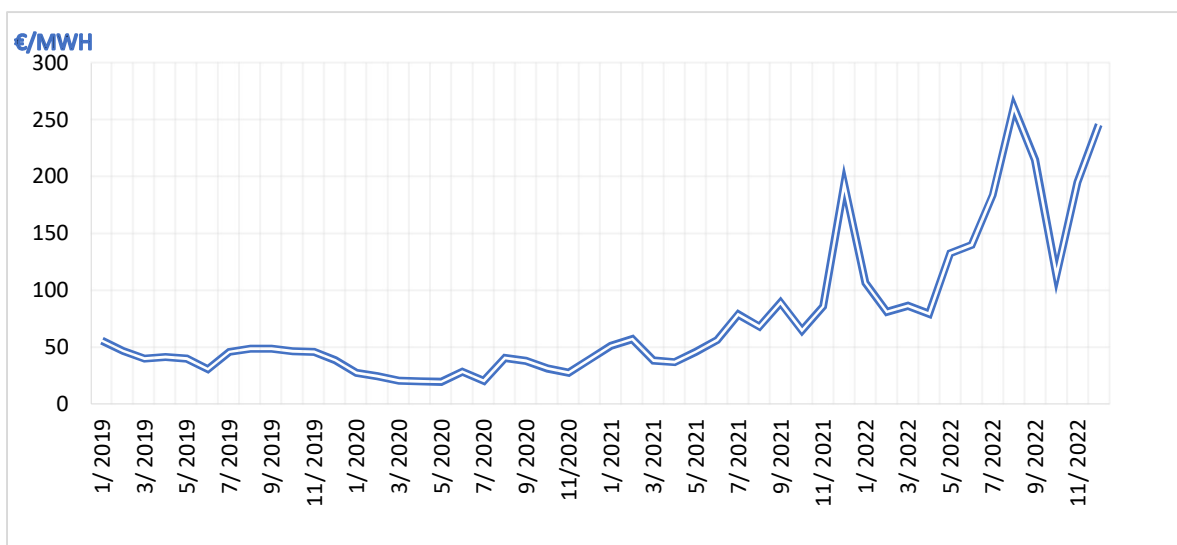
Liite 15. Kosteuskoeajon kaasuenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu



# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Vuoden 2021 aikana energiahinnat alkoivat nousta globaalisti. Nousu oli aluksi kohtalaisen maltillista, mutta vuoden 2022 aikana hinnat nousivat merkittävästi aiheuttaen huomattavia kustannuksia energiaintensiiviseen teollisuuteen, kuten esimerkiksi paperiteollisuuteen. Pörssisähkön veroton hinta oli vuoden 2019 tammikuussa 55,78 €/MWh, kun taas vuoden 2022 joulukuussa hinta oli jo 245,98 €/MWh eli käytännössä hinta on vajaassa kolmessa vuodessa yli nelinkertaistunut (Nord Pool 2023). Kuvasta 1 käy selkeästi ilmi, miten kausittainen vaihtelu muuttui vuoden 2021 loppupuolella. Vuoden 2022 aikana hinta vaihteli suuresti pysyen korkealla suuren osan vuodesta. Kustannuskehitys oli negatiivista myös muiden energiajakeiden osalta eli ongelma ei rajoittunut pelkästään sähköenergiaan. Paperin valmistusprosessissa paperin kuivatukseen käytettävän LNG:n hinta nousi osin jopa sähkön hintaa-kin enemmän, mutta LNG:n osalta ei ole saatavissa vertailukelpoista tietoa. Höyryn osalta kustannuskehityksestä ei voi tehdä suoraan vastaavia vertailuja, koska asiaan vaikuttavia muuttujia on muita energiajakeita enemmän. Höyryllä on kuitenkin osuus kuivatukseen liittyvissä kustannuksissa eli tarkkoja kalkyylejä muodostettaessa höyry on huomioitava yhdessä muiden jakeiden kanssa.



Kuva 1: Pörssisähkön hinta aikavälillä 10/ 2020–10/ 2022 (mukaiillen Nord Pool 2023)

Vuonna 2008 Saksassa paperiteollisuuden osuus teollisuuden energiatarpeesta oli noin 9 %. Tätä edeltäneenä parina kymmenenä vuotena paperiteollisuuden energiatehokkuudessa oli havaittu ainoastaan pieniä kehitysaskelaita. (Fleiter, Fehrenbach, Worrell ja Eichhammer 2012, s. 84) Toisaalta on todettu, että Euroopassa energiakustannusten osuus paperin ja sellun valmistukseen liittyvistä kokonaiskustannuksista oli vuonna 2005 noin 19 % (Laurijssen, Faaij ja Worrel 2013, s. 49).

Tutkimuksen tausta yrityksen näkökulmasta oli ensisijaisesti kustannuslähtöinen, mutta energian säästöllä on myös kestävä liiketoiminnan kannalta merkittävä osuus toiminnassa. Ympäristön kestävyuden kannalta ominaisenergiankulutuksen pienentäminen on monessakin mielessä tärkeää. Case-yrityksen tavoitteena on tehdä tuotannosta täysin fossiilivapaata vuoteen 2030 mennessä. Ominaisenergiankulutuksen pienentäminen ei sinällään ratkaise ongelmaa, mutta on askel kohti pitkän tähtäimen tavoitetta. (Metsä Group 2023)

Tutkimuksen avulla kartoitettiin ennalta määrättyjen muuttujien vaikutusta energian tuottavuuteen sekä yleiseen kustannustehokkuuteen. Pelkkä energian tuottavuuden kehittäminen ei välttämättä ole kustannustehokkuuden kannalta järkevää. Tämä ristiriitaisuus on helppo osoittaa käytännön esimerkillä. Paperilaatu voidaan valmistaa esim. kahdesta eri kuitulajista, kuidusta A ja kuidusta B. Kuidun A vaatima kuivatusenergian tarve saattaa olla vain 50 % kuidun B vastaavasta tarpeesta, mutta kuidun A hinta saattaa olla 50 % suurempi kuituun B verrattuna. Tutkimuksessa pyrittiinkin löytämään optimaalisia vaihtoehtoja niin energian hyvään tuottavuuteen kuin myös kustannustehokkaaseen paperin valmistukseenkin.

Pehmopaperin valmistuksessa muuttuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista on huomattava. Muuttuvissa kustannuksissa suurin osa kustannuseristä muodostuu kuituraaka-aineista sekä paperin valmistukseen käytettävästä energiasta. Energian hinnan noustessa nopeasti ei kustannuksia monestikaan pystytä suoraan siirtämään tuotteen hintaan ainakaan nopealla aikataululla. Yritysten onkin kehitettävä omaa kustannustehokkuuttaan, jotta kannattavuus säilyisi hyväksyttävällä tasolla.

Energian kulutuksen ja kustannuksien välistä yhteyttä on tutkittu laajasti eri toimialoilla. Hämäläinen ja Hilmola (2017, s. 819) ovat paperiteollisuuden energiankulutukseen liittyvässä tutkimuksessaan suositelleet, että jatkotutkimuksena on välttämätöntä kehittää keinoja energiankulutuksen, kustannuksien ja kannattavuuden hallintaan. He myös suosittelevat, että tarkastelua ei toteuteta laitoskohtaisesti. Hämäläinen ja Hilmola (2017, s. 819) myös

mainitsevat, että analysoinnin on syytä pureutua syvemmälle tasolle. He lisäävät, että energiankulutus on syytä jakaa eri luokkiin. He nostavat myös esille kustannustietojen ajantasaisuuden, jotta kustannuksien ja kannattavuuden vertailu olisi mahdollisimman totuudenmukaista. Tämän tutkimuksen avulla pyrittiinkin osaltaan toteuttamaan Hämäläisen ja Hilmolan (2017) suosittamia jatkotutkimuksia. Pelkkä energiakustannuksen minimointi ei ole kustannusten kannalta riittävää, vaan on huomioitava myös muut muuttuvien kustannusten osa-alueet kuten materiaalikustannukset.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksen ensisijainen tavoite oli selvittää keinoja parantaa energian tuottavuutta ja kustannustehokkuutta. Pelkkä energian tuottavuuden kehittäminen ei välttämättä ole riittävää, vaan myös muuttuvien kustannusten huomiointi on tärkeää, jotta kokonaiskustannukset pystytään minimoimaan. Tutkimuksella pyrittiin selvittämään energian tuottavuuden ja kustannuksien välistä riippuvuutta neljällä eri osa-alueella:

1. energian tuottavuuden ja kuitukoostumuksen välinen riippuvuus
2. energian tuottavuuden ja paperikoneen tuotantonopeuden välinen riippuvuus
3. energian tuottavuuden ja paperin loppukosteuden välinen riippuvuus
4. lajinvaihtojen vaikutus energian tuottavuuteen

Tutkimus toteutettiin kokeellisena tutkimuksena Metsä Tissueen Mäntän tehtaalla paperikoneella numero 10 (jatkossa PK10). Muut paperikoneet rajattiin tutkimuksesta pois. Myöskään muita osatuottavuuden lajeja ei tutkittu tässä yhteydessä, ellei asiasta ole erikseen mainittu. Muiden paperikoneiden tutkiminen tässä yhteydessä ei ollut järkevää, koska paperikoneet ovat rakenteiltaan erilaisia ja tulosten vertailtavuus ei siksi olisi ollut mielekäästä. Vastaavasti muiden osatuottavuuksien tutkiminen ei ollut mahdollista tutkimuslaajuuden puitteissa. Tutkimusta aloitettaessa tiedostettiin, että eri osatuottavuuksilla on suhde toisiinsa ja yksittäisen osatuottavuuden tarkastelu saattaa olla osin ongelmallista. Oletuksena kuitenkin oli, että tutkimus pystytään toteuttamaan suunnitellusti, vaikka jokaista osatuottavuuden aluetta ei tarkasteltaisikaan tässä yhteydessä.

Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin myös päästöihin liittyvä ulottuvuus. Tutkimusta tehdessä tiedostettiin, että energiankäytöllä on merkittävä vaikutus tuotannosta muodostuviin päästöihin, mutta tutkimuslaajuuden puitteissa tätä ei tarkasteltu.

Tutkimuksen tutkimusongelma liittyi epätietoisuuteen, joka koskee paperin valmistuksen energian kulutusta sekä eri muuttujien kustannusvaikutusta. Käytännön tasolla on tiedossa, että esim. kuitukoostumus vaikuttaa oleellisesti energiankulutukseen. Vähemmälle tiedolle on jäänyt kuitukoostumuksen ja energiankulutuksen vaikutus kokonaiskustannuksiin. Myös useiden muiden tuotantoteknisten muuttujien vaikutusten merkitys on jäänyt vähemmälle analysoinnille, minkä vuoksi tällä tutkimuksella pyrittiin valaisemaan näitä aihealueita.

Tutkimuksella pyrittiin löytämään vastaukset kahteen tutkimuskysymykseen:

- Miten erilaiset kuitukoostumukset vaikuttavat energian tuottavuuteen kokonaiskustannukset huomioiden?
- Miten erilaiset tuotantotavat ja käytännöt vaikuttavat energian tuottavuuteen kokonaiskustannukset huomioiden?

Tutkimuksen tuotoksena pyrittiin luomaan suuntaviivat, joiden perusteella pystytään valitsemaan kustannustehokas tuotantomenetelmä. Tärkeää oli myös huomioida, että paperin laatuavoitteet säilyvät ennallaan eli niitä ei muuteta tutkimuksen puitteissa. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että laatuavoitteiden saavuttaminen oli aina tärkeintä; energian tuottavuuden ja kustannustehokkuuden piti tukea tätä tavoitetta. Tämä osaltaan asetti reunaehdot empiiriselle tutkimukselle, koska tuotettava paperi piti olla laadultaan moitteetonta, minkä vuoksi kaikkia raja-arvoja ei pystytä hakemaan koeajoissa.

Tutkimukseen tarvittavissa lähdetiedoissa oli runsaasti yrityksen liiketoiminnan kannalta kriittistä tietoa, minkä vuoksi kustannus- ja energiatiedot esitetään indeksoituna, jolloin muutos alkuperäiseen tilanteeseen on tulkittavissa. Osa lähdetiedoista on esitetty suorina kustannuksina tai hintoina, mutta nämä tiedot on saatu poikkeuksetta julkisista lähteistä. Yrityksen sisäisiä hinta-, energia- tai kustannustietoja ei julkaista missään vaiheessa tämän tutkimuksen puitteissa. Myös kuitukoostumuskoeajon tarkat kuitukoostumukset on salattu, koska kyseiset tiedot ovat yrityksen toiminnan kannalta luottamuksellista tietoa.

Tutkimusta rajoitti osaltaan paperin valmistukseen liittyvät realiteetit. Paperin laatu piti olla kaikkina aikoina spesifikaation mukainen, mikä osaltaan rajoitti testattavien vaihtoehtojen

määrää. Toisaalta tutkimus ei olisi ollut mielekäs, jos tuotetta ei olisi pystytty myymään asiakkaalle. Tutkimusraportti ei sisällä laatuparametrejä tai niiden raja-arvoja, ellei toisin ole mainittu.

### 1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutettiin kokeellisena tutkimuksena, joka sisälsi kirjallisuustutkimuksen sekä laajan empiirisen koeajo-osuuden. Kaikki koeajot toteutettiin Metsä Tissuen Mäntän pehmpaperitehtaan PK10:llä. Aikataulullisesti työ aloitettiin tammikuussa 2023 esitietojen ja kirjallisuusaineiston keräämisellä. Koeajovaiheeseen tutkimuksessa siirryttiin huhtikuussa 2023. Koeajot pyrittiin ajoittamaan tiiviille ajanjaksolle, jotta koeajotuloksiin vaikuttavia muuttujia olisi ollut mahdollisimman vähän. Tuloksiin olisi saattanut vaikuttaa esim. paperikoneella käytössä oleva puristinhuopa; puristinhuovan ajoilla on oleellinen vaikutus paperikoneen energiatehokkuuteen. Jos koeajojen vertailutietoina olisivat olleet tulokset, jotka on saatu ajettaessa täysin uudella puristinhuovalla tai vastaavasti pari kuukautta vanhalla huovalla, olisi vertailukelpoisuus ollut vähintäänkin kyseenalaista.

Tutkimustulokset koeajojen osalta perustuivat kaikilta osin paperikoneen prosessijärjestelmistä saatuihin tietoihin. Oletuksena mittaustiedoissa oli, että mittaustulokset ovat oikeita ja siten vertailukelpoisia. Mittaustulosten oikeellisuutta puoltaa myös mittalaitteilla säännöllisesti tehtävä kalibrointi, jonka aikana mittalaitetta tarvittaessa huolletaan tai säädetään. Työhön sisältyi myös haastatteluosuus, jossa haastateltiin työntekijöitä, asiantuntijoita sekä paikallisjohtoa. Haastattelun tavoitteena oli saada aikaan ymmärrys vallitsevasta tilasta eli onko henkilöstöllä riittävät tiedot, taidot ja mahdollisuudet vaikuttaa päivittäiseen toimintaan energiankulutuksen näkökulmasta. Haastattelulla olisi saattanut olla vaikutusta myös toteutettaviin koeajoihin. Jos haastatteluissa olisi noussut esiin erityinen tekijä, jolla voisi olla oleellista vaikutusta tutkimuksen teemaan liittyviin asioihin, olisi asiaa tutkittu mahdollisuuksien mukaan myös koeajojen avulla. Tutkimuksen aikataulun vuoksi esim. investointien kautta tehtäviä hankkeita ei ollut mahdollista sisällyttää tutkimukseen.

## 1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusstrategialla tarkoitetaan menetelmällisten ratkaisujen kokonaisuutta tutkimuksen sisällä. Tutkimusmetodilla taas tarkoitetaan tutkimusstrategian alamääritelmää. Tutkimusmetodi eli tutkimusmenetelmä on käsitteenä suppeampi kuin tutkimusstrategia. Tutkimusongelma ja -tehtävä vaikuttavat siihen, mitä tutkimusstrategiaa tai -metodia kulloinkin käytetään. (Hirsjärvi, Remes ja Sajavaara 2007, s. 128) Tutkimusmenetelmät koostuvat niistä käytännöistä ja toimista, joiden avulla tehdään havaintoja, sekä säännöistä, joiden mukaan havaintoja käsitellään (Alasuutari 2011, s. 82).

Tutkimusstrategia voidaan määritellä tai jakaa monilla eri tavoin. Hirsjärvi et al. (2007, s. 128–130) jakavat tutkimusstrategian kolmeen eri ryhmään:

1. kokeellinen tutkimus
2. survey-tutkimus
3. tapaustutkimus eli case-tutkimus

Kokeellisessa tutkimuksessa mitataan perinteisesti yhden muuttujan vaikutusta toiseen muuttajaan. Tutkimus voidaan käytännössä toteuttaa siten, että olosuhteita muutetaan hallitusti ja samalla seurataan yksittäisen tekijän vaikutusta toisiin muuttujiin. Muutokset mitataan tyypillisesti numeerisesti. Survey-tutkimuksessa ihmisjoukolta kerätään tietoa standardoidussa muodossa. Tyypillisiä piirteitä survey-tutkimukselle ovat kyselylomakkeiden ja strukturoitujen haastatteluiden hyväksikäyttö. Ihmisjoukosta valitaan otos, jolta tietoa kerätään valituilla menetelmillä. Haastatteluista ja kyselyistä saadun tiedon avulla pyritään kuvaamaan tutkittavaa ilmiötä. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 130) Jyväskylän yliopiston (2023a) mukaan kokeellista aineistoa voidaan analysoida niin kvantitatiivisilla kuin kvalitatiivisillakin menetelmillä.

Tapaustutkimuksen avulla pyritään saamaan yksityiskohtaista tietoa yksittäisestä tapauksesta. Tapaustutkimuksen avulla on myös mahdollista tutkia useampia toisiinsa liittyviä tapauksia. Tyypillisimmillään valitaan yksittäinen tapaus, joka saattaa olla esim. ryhmä, yhteisö tai prosessi. Tapaustutkimuksessa tutkimuskohdetta tutkitaan yhteydessä omaan ympäristöönsä. Aineistoa voidaan kerätä useilla erilaisilla menetelmillä kuten esim. havainnoinnin tai haastatteluiden avulla. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 130) Laineen, Bambergin ja

Jokisen (2007, s. 9) mukaan tapaustutkimus mielletään usein tutkimusmetodiksi, mikä on heidän mukaansa jossain määrin virheellinen käsitys. Samassa yhteydessä he mainitsevat, että tapaustutkimus on tutkimusstrategia, joka voi sisältää useita erilaisia tutkimusmenetelmiä. Metsämuurosen (2006, s. 92) mukaan tapaustutkimus voidaan mieltää keskeiseksi kvalitatiivisen metodologian tiedonhankintastrategiaksi. Hänen mukaansa voidaan jopa yleistää lähes kaiken kvalitatiivisen tutkimuksen olevan tapaustutkimusta.

Tapaustutkimus voidaan jakaa useisiin alatyyppeihin. Kirjallisuudessa usein mainittavia tapaustutkimuksen tyyppejä ovat seuraavat (Eriksson ja Koistinen 2014, s. 11–16):

- kuvaileva tapaustutkimus
- selittävä tapaustutkimus
- eksploratiivinen ja uutta kehittävä tapaustutkimus
- itsessään arvokas, välineellinen ja kollektiivinen tapaustutkimus
- intensiivinen ja ekstensiivinen tapaustutkimus

Yllä olevan listan kolme ensimmäistä kuvattuna tarkemmin alla. Kaksi viimeistä eivät ole relevantteja tämän tutkimuksen puitteissa:

### **Kuvaileva tapaustutkimus**

Kuvailevan tapaustutkimuksen tavoite on tuottaa ns. hyvä tarina tutkittavasta tapauksesta (Dyer ja Wilkins 1991, s. 618). Toisaalta Dawson (2009, s. 4–5) korostaa ns. tiheän kuvauksen merkitystä. Tiheällä kuvauksella hän tarkoittaa tapauksen laajaa ymmärtämistä. Eriksson ja Koistinen (2014, s. 12) lisäävät, että tapauksen kuvaamisella saatetaan pyrkiä kuvailemaan tapaus normaalissa arkipäiväisessä tilanteessa.

### **Selittävä tapaustutkimus**

Selittävä tapaustutkimus vastaa kysymykseen, miksi jokin tapaus on jonkinlainen. Selittävään tapaustutkimukseen liittyy usein monimutkaisia asioiden välisiä suhteita tai toisaalta itse tapaukset saattavat olla monimutkaisia. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että kyseisiä ilmiöitä pystytään tutkimaan ainoastaan tapaustutkimuksen avulla. (mm. Eriksson ja Koistinen 2014, s. 13 ja Harder 2009, s. 2–4)

Ryan, Scapens ja Theobald [1992, s. 115] esittävät, että selittävässä tapaustutkimuksessa olemassa oleva teoria ei välttämättä ole riittävää, vaan sitä on kehitettävä tai muotoiltava tapaustutkimusta varten. He myös lisäävät, että tätä luotua teoriaa voidaan hyödyntää myöhemmissä tutkimuksissa. Selittävällä tapaustutkimuksella onkin siis tavoitteena luoda uusia teorioita. (Eriksson ja Koistinen 2014, s. 13)

### **Eksploratiivinen ja uutta kehittävä tapaustutkimus**

Ryan et al. [1992, s. 115] mukaan eksploratiivisen ja uutta kehittävän tapaustutkimuksen pyrkimyksenä on nimensä mukaisesti mm. luoda uusia teoreettisia ideoita ja käsitteitä niistä olosuhteista ja prosesseista, jotka tuottavat tutkittavia tapauksia. Näitä tekijöitä voidaan tutkia samassa tai myös uusissa tapaustutkimuksissa. Tapaustutkimus voikin toimia toisen tutkimuksen esitutkimuksena. (Eriksson ja Koistinen 2014, s. 14) Tiivistetysti voitaneenkin todeta, että eksploratiivisella ja uutta kehittävällä tapaustutkimuksella pyritään luomaan uusia teorioita.

Tutkimusmenetelmät jaetaan tyypillisesti kahteen osa-alueeseen, teoreettiseen tutkimukseen ja empiiriseen tutkimukseen. Teoreettisessa tutkimuksessa tiedonhankinta perustuu nimensä mukaisesti olemassa olevaan tietomateriaaliin. Vastaavasti empiirisessä tutkimuksessa menetelmät on kehitetty teoreettisen tutkimuksen kautta. Näiden kahden tutkimusmenetelmän väliin mahtuu useita muita tutkimusmenetelmiä. Kaikille näille menetelmille yhteistä on, että tavoitteena on löytää vastaukset tutkimusongelmasta johdettuihin kysymyksiin. (Heikkilä 2014, s. 12)

Empiirinen tutkimus voidaan jakaa useisiin eri tyyppeihin mm. tutkimuksen tarkoituksen tai tutkimusotteen mukaisesti. Myös tiedonkeruumenetelmällä saattaa olla merkitystä tyypitykseen. Heikkilä (2014, s. 13–14) jakaa tutkimustyyppit seuraavasti:

- kartoittava tutkimus
- kuvaileva tutkimus
- selittävä tutkimus
- kokeellinen tutkimus
- toimintatutkimus
- evaluaatiotutkimus



Kartoittavalla tutkimuksella pyritään valaisemaan tutkittavaa ongelmaa ilman, että ongelmaan liittyen kerätään järjestelmällisesti tietoa. Kartoittavaa tutkimusta käytetään usein esitutkimuksena ja sillä kerätään tietoa ja vaihtoehtoja varsinaista tutkimusta varten. Kuvailevalla tutkimuksella taas pyritään vastaamaan kysymyksiin *mikä, kuka, millainen, missä ja milloin*. Kuvaileva tutkimus liittyykin yleensä jokaiseen tutkimukseen ainakin jossain määrin. (Heikkilä 2014, s. 13–14)

Selittävällä tutkimuksella pyritään löytämään ilmiöiden kausaalisia suhteita eli miten jokin ilmiö on vaikuttanut toiseen ilmiöön. Kokeellinen tutkimus voidaan tulkita selittävän tutkimuksen erityistyyppiksi. Kokeellisella tutkimuksella selvitetään jonkin tekijän vaikutusta muihin tekijöihin. Huomioitavaa on myös, että olosuhteet kokeellisessa tutkimuksessa ovat kontrolloidut. (Heikkilä 2014, s. 14)

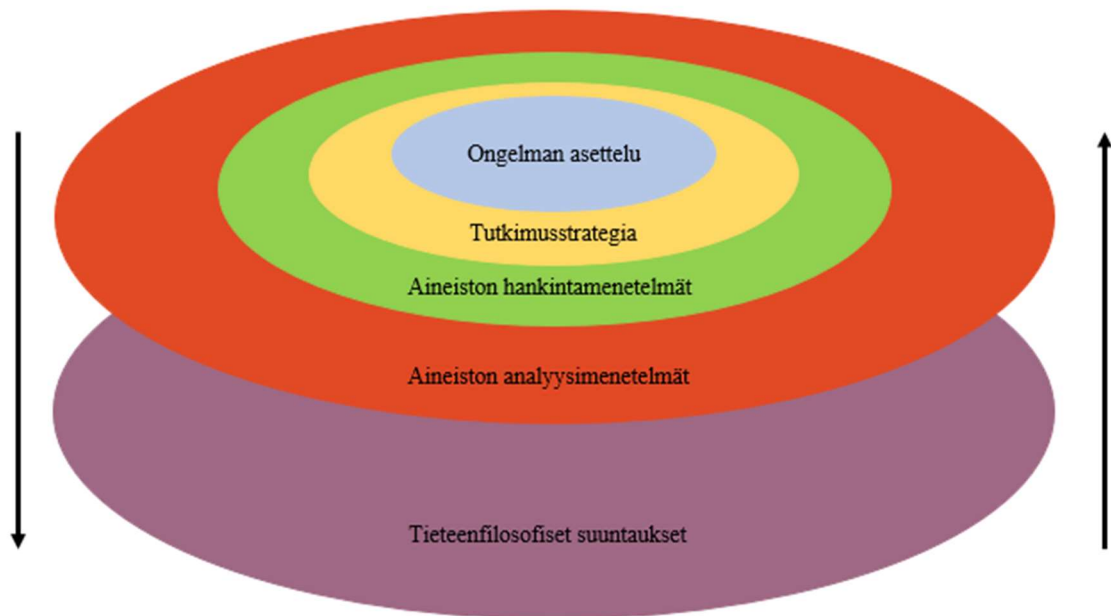
Toimintatutkimuksessa tutkija osallistuu prosessiin yhdessä tutkittavien kanssa eli tutkija vaikuttaa itse prosessiin. Toimintatutkimus soveltuu käytettäväksi mm. jonkin uuden menetelmän kehitystyöhön. Evaluaatiotutkimuksen avulla pyritään selvittämään tietyn ilmiön tai tehtyjen päätösten vaikutusta ja vaikuttavuutta. (Heikkilä 2014, s. 14)

Tutkimusote voidaan jakaa kahteen eri osa-alueeseen, kvantitatiiviseen eli määrälliseen tutkimukseen ja kvalitatiiviseen eli laadulliseen tutkimukseen (Heikkilä 2014, s. 14). Hirsjärven et al. (2007, s. 131) mukaan näitä kahta tutkimussuuntausta ei kuitenkaan pidä tulkita toistensa ääripäiksi, vaan ennemminkin jatkumoiksi. Vilka (2015, s. 68–69) toteaa, että tutkija ei valitse tutkimussuuntausta oman mieltymyksensä mukaan, vaan valinta perustuu tutkimusongelmaan ja tutkimuskysymyksiin. Hän myös toteaa yleisesti, että tutkijan on käytettävä metodeja, jotka hän tuntee. Pertti Töttö vertaa kvalitatiivista ja kvantitatiivista tutkimusta seuraavasti (Töttö 1999, s. 291):

*Itse vertaisin valintaa kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen välillä valintaan sahan ja kirveen välillä: toinen puree poikkisyin, toinen syiden myötäisesti. Tutkija voi tietysti olla taitavampi toisen välineen käyttäjä, mutta jos hän on päättänyt käyttää aina vain tuota samaa välinettä, hän on kuin kirvesmies, joka jättää lautojen katkomisen kaverilleen.*

Perustellusti voidaankin olettaa, että erilaisia tutkimusstrategioita, -menetelmiä ja -suuntauksia tarvitaan ja ne myös tukevat toinen toisiaan. Tutkimusongelman ja -kysymyksien perusteella tutkijan on päätettävä menetelmät ongelman kattavaan analysointiin. Jos ongelmaa tai ongelmia lähestytään aina samasta näkökulmasta, tulisi se todennäköisesti johtamaan

yksipuoleisiin tulkintoihin ja puutteellisiin analyysihin. Kuvassa 2 osoitetaan havainnollisesti, miten tutkimusongelman perusteella valitaan ensimmäisenä tutkimusstrategia. Tämän jälkeen valitaan parhaiten soveltuvat menetelmät eri osavaiheisiin:



Kuva 2: Tutkimusmenetelmän valintaperiaate (mukaillen Jyväskylän Yliopisto 2023b)

Kvantitatiivisella tutkimuksella selvitetään lukumääriin ja osuuksiin liittyviä asioita, minkä vuoksi yksi perusedellytyksistä onkin suuri ja edustava otos. Aineistoa tutkimukseen kerätään tyypillisesti standardoiduilla kyselylomakkeilla, joissa on valmiit vastausvaihtoehdot. Kvantitatiivisen tutkimuksen yksi piirre on, että vallitseva tilanne saadaan yleensä kartoitettua hyvin, mutta tilanteeseen vaikuttavat syyt saattavat jäädä epäselväksi. (Heikkilä 2014, s. 15) Muita kvantitatiivisille tutkimuksille tyypillisiä ominaisuuksia ovat mm. johtopäätökset aiemmista tutkimuksista, hypoteesit, koejärjestelyjen suunnitelmat sekä aineiston saattaminen tilastollisesti käsiteltävään muotoon. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 136)

Kvalitatiivisen tutkimuksen avulla pyritään ymmärtämään tutkittavaa kohdetta ja selittämään siihen liittyviä asioita ja syitä. Tutkimuksessa rajoitutaan pääsääntöisesti pieneen määrään tapauksia, mutta ne analysoidaan mahdollisimman tarkasti. Tutkimukseen valittavat tutkittavat henkilöt valitaan usein harkinnanvaraisesti (Heikkilä 2014, s. 15). Hirsjärven et al. (2007, s. 157–158) mukaan kvalitatiivisessa tutkimuksessa on kyse todellisen elämän kuvaamisesta, johon sisältyy ajatus moninaisesta todellisuudesta ja, että kohdetta pyritään tutkimaan kokonaisvaltaisesti. Hirsjärvi et al. (2007, s. 160) toteavat myös kvalitatiivisen tutkimuksen tyypillisiksi piirteiksi mm. kokonaisvaltaisen tiedon hankinnan, ihmisen

suosimisen tiedon keruuvälineenä, induktiivisen analyysin sekä laadullisen aineiston hankinnan metodin. He myös lisäävät, että tutkimuksen kohdejoukko on valittu tarkoituksenmukaisesti sekä myös, että tutkimussuunnitelma mukautuu tutkimuksen aikana. Huomioitavaa on myös, että tutkimuksessa tapaukset käsitellään ainutlaatuisena, mikä on huomioitava aineiston tulkinnassa. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 160)

Tiedonhankintamenetelmät vaihtelevat eri tutkimusmenetelmien mukaisesti ja ne voidaan jakaa neljään eri päämenetelmään. Menetelmiä ovat kyselyt, haastattelut, havainnoinnit sekä dokumentit. Tutkimus saattaa koostua vain yhdestä menetelmästä, mutta usein tietoa kerätään useilla eri menetelmillä. Nämä neljä päämenetelmää soveltuvat käytännössä jokaiselle tutkimustyyppille. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 186–187)

Haastattelu nähdään hyödyllisenä tiedonkeruumuotona erityisesti tilanteissa, joissa aineistoa pyritään keräämään joustavasti ja samalla vastaajia myötäillen. Tiedonkeruumenetelmäksi haastattelu valitaan yleensä seuraavien syiden vuoksi: (Hirsjärvi et al. 2007, s. 200–201)

- halutaan korostaa ihmisen roolia subjektina tutkimustilanteessa
- tutkimuskohde on vähän kartoitettu
- ennalta on tiedossa, että tutkimuksen aihe saa aikaan monitahoisia vastauksia
- tavoitteena on syventää tutkimuksesta saatavia tietoja
- tutkimus sisältää arkoja tai vaikeita aiheita

Haastattelut eivät kuitenkaan ole täysin ongelmattomia. Haastatteluun valmistautuminen ja itse haastattelu vievät usein runsaasti aikaa. Ajankäytön tarvetta kuvaa toteamus, että alle puolen tunnin haastatteluun ei välttämättä kannata ryhtyä, koska todennäköisesti kyselylomake olisi riittävä. Toisaalta haastatteluun liittyy potentiaalisia virhemahdollisuuksia, jotka saattavat aiheutua niin haastattelijasta, haastateltavasta tai itse haastattelutilanteesta. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 201)

Haastattelutyypit voidaan jakaa kolmeen erilaiseen lajiin; strukturoituun haastatteluun, teemahaastatteluun ja avoimeen haastatteluun. Strukturoidussa haastattelussa kysymykset, vastaukset ja kysymysjärjestykset ovat etukäteen määrätty. Teemahaastattelu voidaan nähdä strukturoidun ja avoimen haastattelun välimuotona. Teemahaastattelun aiheet ovat määritetty, mutta kysymyksien muotoa ja järjestystä ei ole asetettu etukäteen. Teemahaastattelu

liittyy usein kvalitatiiviseen tutkimukseen. Avoin haastattelu on nimensä mukaisesti avoin keskustelutilaisuus, jonka kulkua ei ole etukäteen määritetty. Keskusteluaihe saattaaakin muuttua haastattelun aikana. (Hirsjärvi et al. 2007, s. 201) Alasuutari (2011, s. 149–150) huomauttaa teemahaastatteluista, että haastateltava vastaa aina kysymyksiin miettien, mihin haastattelijä kysymyksellään pyrkii. Samassa yhteydessä Alasuutari toteaa saman pätevän myös strukturoituihin haastatteluihin; haastateltava pyrkii muodostamaan käsityksen kysymyksen merkityksestä.

Tämä tutkimus toteutettiin kokeellisena tutkimuksena, koska tutkimuskohteesta pyrittiin saamaan tietoa tutkimalla yhden muuttujan vaikutusta toiseen muuttujaan. Toisaalta tutkimuksessa oli erittäin vahvoja tapaustutkimuksen piirteitä, koska siinä pyrittiin saamaan yksityiskohtaista tietoa yksittäisestä tapauksesta eli Metsä Tissuen Mäntän tehtaan PK10:stä. Tutkimuksessa oli myös piirteitä niin kvalitatiivisesta kuin kvantitatiivisesta otteesta. Kvalitatiivisia piirteitä olivat mm. teemahaastattelu sekä pyrkimys löytää kausaalisia suhteita tutkimuskysymysten puitteissa. Kvantitatiiviset piirteet liittyivät erityisesti koeajo-osuuden tietojen keräämiseen: tulokset saatiin paperikoneen ohjaus- ja laatuajärjestelmistä, jotka laskevat erilaisia toteutuneita keskiarvoja suuren tietomäärän perusteella. Suurimmillaan tietoa kerättiin kerran sekunnissa, mutta toisaalta joitain tietoja kerättiin vain kerran minuutissa. Empiirisen tutkimusosion tutkimustyyppi oli selkeästi kokeellinen tutkimus eli koko tutkimusta voidaan siis pitää kokeellisena tutkimuksena.

Tutkimukseen sisältyi teemahaastattelu ennalta valituille henkilöille eri organisaatiotasoilta. Haastattelu ei ollut ”puhdas” teemahaastattelu vaan siinä oli myös piirteitä avoimesta haastattelusta. Haastattelua ei rajattu tarkasti, vaan keskustelun annettiin kulkea laajasti aihepiirin ympärillä. Haastattelun tavoitteena oli kartoittaa nykytilaa energian kulutukseen liittyvän ilmiön ympärillä.

Tutkija tiedosti, että haastattelusta saataviin tuloksiin saattaa liittyä luotettavuusongelma. Haastattelijalla oli esimiesasema suureen osaan haastateltavia, mikä saattoi aiheuttaa vääristymiä haastattelutuloksiin. Haastattelujen otos jäi pieneksi tuotannon johdon osalta. Haastattelukysymykset testattiin koehenkilöillä ennen varsinaista haastattelua, jotta haastattelutilaisuus ja kysymykset olisivat toimineet mahdollisimman hyvin haastatteluhetkessä.

## 1.5 Tutkimuksen rakenne

Tutkimus koostuu yhteensä yhdeksästä luvusta, lähteistä ja liitteistä. Tutkimuksen yleinen rakenne on esitetty taulukossa 1. Tutkimuksen ensimmäisenä lukuna on johdanto, jossa kuvataan tutkimuksen tausta, tavoitteet ja rajaus sekä tutkimuksen toteutus ja tutkimusmenetelmät. Johdannon viimeisenä osuutena on tutkimuksen rakenne. Toisessa luvussa kuvataan suorituskykyä ja siihen liittyviä elementtejä: suorituskyvyn osa-alueet, suorituskyvyn johtaminen, suorituskyvyn analysointi, kannattavuus ja kustannukset. Näiden lisäksi toisessa luvussa kuvataan tuottavuutta ja sen erityispiirteitä kuten tuottavuuden ja kannattavuuden välistä suhdetta, tuottavuuden mittaamista, tuottavuuden kehittämistä sekä osatuottavuutta. Toisen luvun viimeisenä osuutena on tuottavuuden kehittämisen esteet. Kolmannessa luvussa keskitytään paperin valmistukseen. Luvussa käsitellään paperin valmistuksen perusteita, energian käyttöä paperin valmistuksessa sekä energian kulutukseen vaikuttavia muuttujia.

Neljännessä luvussa kuvataan kohdeyritystä ja siihen liittyviä asioita. Luvussa kerrotaan Metsä Groupista, Metsä Tissuesta sekä Metsä Tissuen strategiasta. Viidennessä luvussa kuvataan tutkimuksen teemahaastattelun, koeajojen sekä lajinvaihtanalyysin toteuttamista. Luvussa käydään läpi empiriaosuuden tutkimussuunnitelmaa sekä itse tutkimuksen toteutusta. Kuudes luku sisältää empiirisen tutkimuksen tulokset teemahaastattelusta, eri koeajovaiheista sekä lajinvaihtanalyysistä. Vaiheet ovat teemahaastattelu, kuitukustannuksen vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin, paperikoneen tuotant nopeuden vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin, paperin loppukosteuden vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin sekä lajinvaihtojen vaikutus energiankulutukseen.

Seitsemännessä luvussa analysoidaan tutkimuksessa saavutetut tulokset. Kahdeksannessa luvussa tutkimustuloksista muodostetaan johtopäätökset. Viimeisessä yhdeksännessä luvussa esitellään tutkimuksen yhteenveto. Yhteenvedon jälkeen tutkimus sisältää lähdeluettelon sekä tutkimukseen liittyvät liitteet.

Taulukko 2: Tutkimuksen rakenne

LUKU	TARKASTELUKOhteet
1. Johdanto • Tutkimuksen tausta ja tarkoitus	Tutkimuksen tausta, tavoite ja rajaus, tutkimuskysymykset, tutkimuksen toteutus ja -menetelmät, tutkimuksen rakenne
2. Suorituskyky • Kirjallisuustutkimus suorituskyvystä ja tuottavuudesta	Suorituskyvyn osa-alueet, suorituskyvyn johtaminen ja analysointi, kannattavuus ja kustannukset, tuottavuus, tuottavuuden kehittämisen esteet
3. Paperin valmistus • Selvitys paperitekniiikan perusteista sekä paperin valmistuksen energian kulutuksesta	Paperin valmistuksen perusteet, energian käyttö paperin valmistuksessa, energian kulutukseen vaikuttavia muuttujia
4. Kohdeyritys • Kohdeyrityksen esittely	Metsä Group, Metsä Tissue, Metsä Tissuen strategia
5. Tutkimuksen toteutus • Empiriaosuuden kuvaus	Empiriavaiheen suunnitelma; teemahaastattelu, paperikoneen koeajot, lajinvaihtoanalyysi
6. Empiirinen tutkimus • Empiriätutkimuksessa saadut tulokset	Teemahaastattelu, energian tuottavuutta kuvaavat koeajot, lajinvaihtotietojen analysointi
7. Tulosten analysointi • Saatujen tulosten analysointi	Empiriaosuuden tulosten analysointi
8. Johtopäätökset • Tutkimuksen läpikäynti	Tutkimustulokset, tutkimuksen tavoitteet ja rajaus, tutkimuskysymykset, tulosten käytettävyys, luotettavuus ja suositukset jatkotutkimukselle. Johtopäätökset
9. Yhteenveto • Tutkimuksen tiivistys	Koko tutkimuksen yhteenveto
Lähteet Liitteet	

## 2 Suorituskyky

### 2.1 Suorituskyvyn osa-alueet

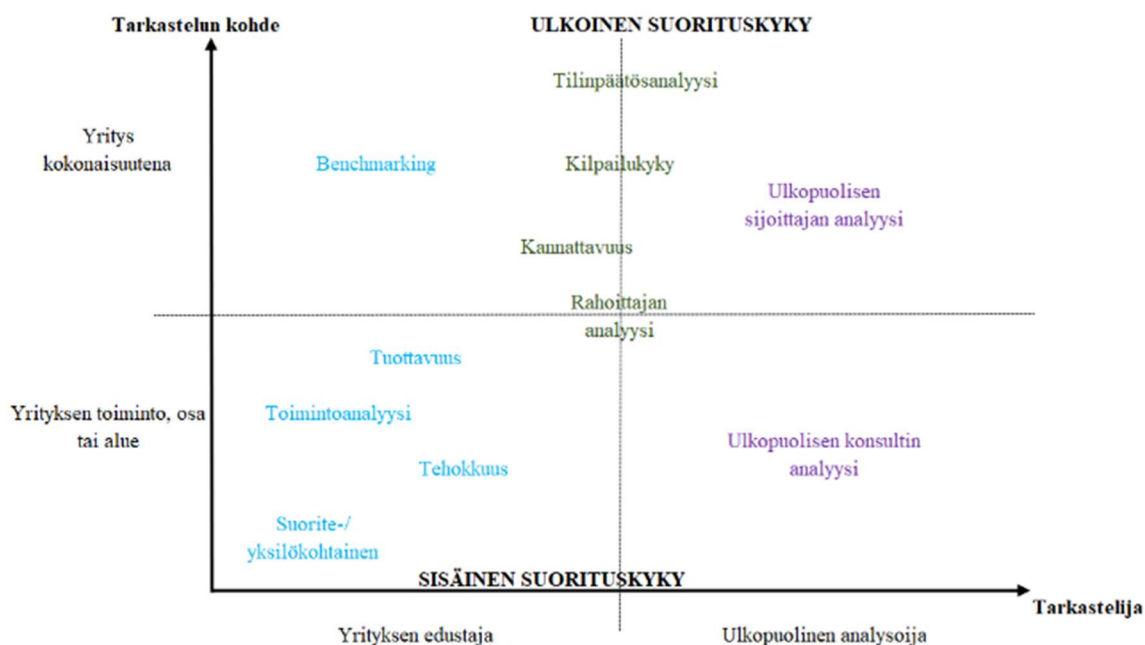
Suorituskyky voidaan määritellä yrityksen kyvyksi saada aikaan tuotoksia asetetuilla ulottuvuuksilla suhteessa asetettuihin tavoitteisiin. Ulottuvuudet liittyvät kiinteästi yrityksen kykyyn maksimoida yrityksen omistajien saama hyöty. Terminologisesti on tärkeää erottaa suorituksen ja suorituskyvyn mittaamiset. Suorituksen mittaaminen suuntautuu aina menneisyyteen, kun taas suorituskyvyn mittaaminen suuntautuu yleensä tulevaisuuteen. (Laitinen 1998, s. 279–280)

Lönnqvist (2004, s. 28) kuvaa väitöskirjassaan, miten suorituskyky voidaan ymmärtää terminologisesti usealla eri tavalla. Ensimmäisenä hän mainitsee, että suorituskyky viittaa tiettyjen toimintojen tuloksiin tai tuotoksiin. Toisena hän listaa, että suorituskyky viittaa siihen, miten jokin toiminto suoritetaan tai toteutetaan. Kolmanneksi kohdaksi hän lisää, että suorituskyvyllä voidaan tarkoittaa kykyä saavuttaa tuloksia. Käytännössä siis suorituskyvyllä voidaan tarkoittaa tuloksia, toimintoja tai potentiaalia saavuttaa tuloksia. Lönnqvist (2004, s. 28) myös lisää, että suorituskyky voi vaihdella tarkastelunäkökulman mukaan.

Yrityksen tavoitteena on yleensä maksimoida omistajiensa saama hyöty. On kuitenkin tärkeää huomioida, että minkään sidosryhmän tarpeet eivät saa jäädä täysin huomioimatta. Tämä saattaisi johtaa pidemmällä aikavälillä sidosryhmän irtautumiseen yrityksestä. (Uusi-Rauva 1994, s. 23) Vastaavasti yhden sidosryhmän liiallinen korostaminen saattaa lyhyellä tähtäimellä olla tuloksellista, mutta pitkällä tähtäimellä tämä johtaa kokonaistilanteen heikkenemiseen. Esimerkkinä tästä voidaan pitää lyhytaikaisen voiton maksimointi investointeja ja kehityshankkeita laiminlyömällä. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 4)

Kuvassa 3 kuvataan, miten suorituskyky voidaan jakaa yleisellä tasolla kahteen eri osa-alueeseen, sisäiseen ja ulkoiseen suorituskykyyn. Sisäisen suorituskyvyn analysoinnilla tarkoitetaan yrityksen sisällä tapahtuvaa suorituskyvyn mittaamista ja analysointia. Yrityksen sisällä tapahtuvan analysoinnin tekeminen yrityksen ulkopuolelta käsin saattaisi olla haastavaa tai jopa mahdotonta, koska vaadittavia tietoja ei välttämättä ole saatavilla. Tyypillisiä sisäisen suorituskyvyn osa-alueita ovat tuottavuus, tehokkuus, taloudellisuus, laatu ja

kapasiteetti. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 11–12) Kuvassa 3 myös osoitetaan, miten suorituskyvyn eri osa-alueet sijoittuvat suorituskyvyn analysoinnin viitekehukseen.



Kuva 3: Sisäinen ja ulkoinen suorituskyky (mukaihen Rantanen 2001b, s. 5)

Ulkoisella suorituskyvyllä tarkoitetaan pääsääntöisesti yrityksen ulkopuolella tapahtuvaa tarkastelua, mutta tarkastelun saattaa tehdä myös yritys itse. Analysointi saattaa perustua esim. yrityksen tilinpäätöstietoihin tai muihin julkisiin tietoihin. Analysoinnin tekijöinä ovat tyypillisesti esim. rahoittajat ja osakesijoittajat. Ulkoinen suorituskyky jaetaan tyypillisesti kolmeen osa-alueeseen; kannattavuuteen, maksuvalmiuteen ja vakavaraisuuteen. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 13–14)

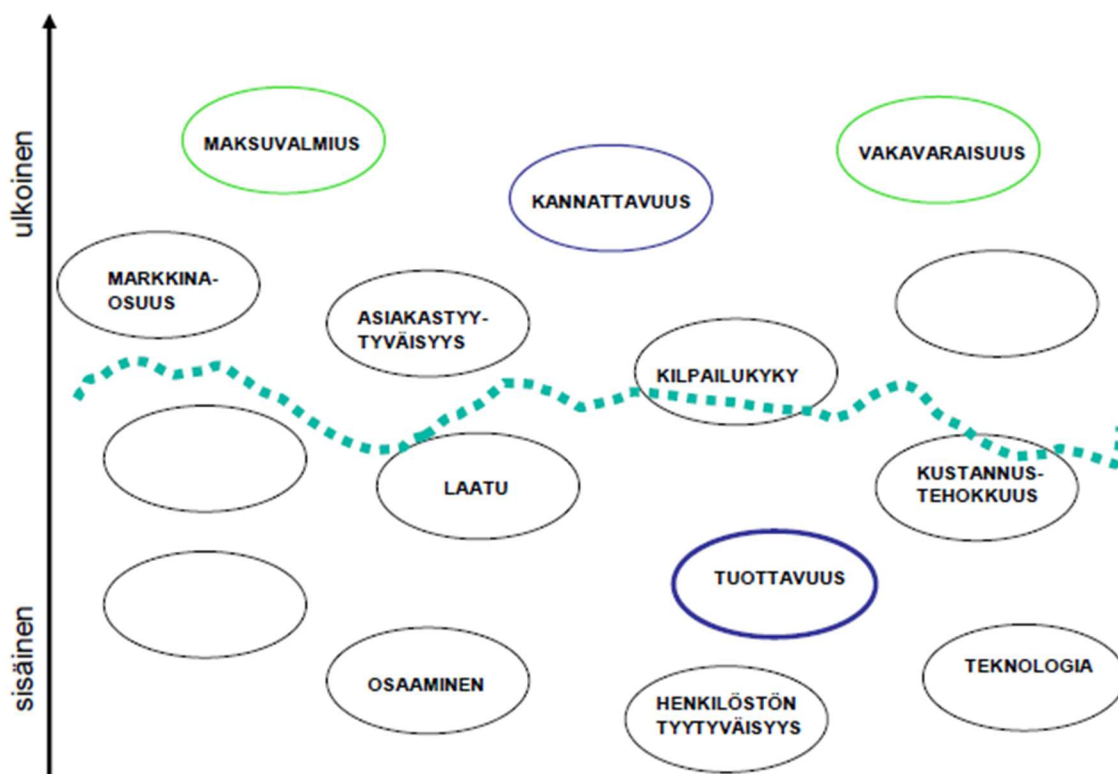
Yrityksen laskentatoimi tuottaa tietoa suorituskyvyn analysointia varten. Perinteisesti yrityksen laskentatoimi jaetaan kahteen osa-alueeseen; yleiseen laskentatoimeen sekä johdon laskentatoimeen. Yleinen laskentatoimi, toiselta nimeltään ulkoinen laskentatoimi, perustuu yrityksen kirjanpitoon ja sen tärkein dokumentti on yrityksen tilinpäätös. Yleisen laskentatoimen yksi päätehtävistä on tuottaa informaatiota yrityksen eri sidosryhmille kuten esim. osakkeenomistajille. Lainsäädäntö asettaa tarkat vaatimukset mm. tilinpäätökselle, minkä ansiosta kyseinen dokumentti on aina vertailukelpoinen muiden vastaavien dokumenttien kanssa. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 13)



Johdon laskentatoimi tuottaa päätöksentekoa tukevaa tietoa ja laskelmia yrityksen johdolle. Tyypillinen johdon laskentatoimen laskelma on investointilaskelma, jolla verrataan eri investointivaihtoehtoja keskenään. Myös yrityksen budjetti on yksi tyypillisimmistä johdon laskentatoimen tuottamista laskelmista. Johdon laskentatoimen tuottamaa informaatiota ei säädellä vastaavasti kuin esim. yleisen laskentatoimen tuottamaa tilinpäätöstä. Johdon laskentatoimen tuottama laskelma voi olla laadittu esim. ennusteiden ja vastaavien perusteella, minkä vuoksi laskelma itsessään sisältää epätarkkuuksia. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 14)

Käytännössä yrityksen yleinen laskentatoimi tuottaa informaatiota niin sisäisen kuin ulkoisenkin analysoinnin käyttöön. Johdon laskentatoimi sitä vastoin tuottaa informaatiota lähes poikkeuksetta yrityksen sisäisen analysoinnin tarpeisiin. Tätä tietoa voidaan jakaa myös ulkoisten analysoijien tarpeisiin, mutta tämä edellyttää aina yritykseltä erillistä sisäistä päätöstä. Yleisellä tasolla johdon laskentatoimella voidaan nähdä kaksi tehtävää: (1) tiedon tuottaminen yrityksen johdolle tukemaan päätöksentekoa sekä (2) ihmisten ohjaaminen kohti organisaation tavoitteita (Horngren 1995, s. 281).

Yrityksen suorituskyvyn kenttään voidaan laskea kuuluvaksi lukuisia eri tekijöitä. Tyypillisimmillään näitä ovat mm. henkilöstön osaaminen, henkilöstön tyytyväisyys, tuottavuus, kustannustehokkuus, laatu, kannattavuus sekä vakavaraisuus. Suorituskyvyn eri osa-alueilla on tyypillisesti vaikutusta muihin osa-alueisiin. Kuvassa 4 esitetään, miten kuvan alaosassa olevat suorituskyvyn osa-alueet vaikuttavat kuvassa ylempänä oleviin osa-alueisiin. Käytännössä tätä vaikutussuhdetta voidaan kuvata siten, että osaava ja tyytyväinen henkilöstö nykyaikaisella teknologialla varustettuna on suurella todennäköisyydellä myös tuottavuuden näkökulmasta verrokkejaan parempia. Vastaavasti tuottavuuden kehittyessä tuotteen yksikkökustannukset laskevat, jolloin yritys on aiempaa kustannustehokkaampi, ja edelleen kilpailukykyisempi markkinoilla. Tämä johtaa aiempaa parempaan kannattavuuteen ja sitä kautta parempaan maksuvalmiuteen ja vakavaraisuuteen. Muodostuneen varallisuuden avulla yritys pystyy panostamaan henkilöstön osaamiseen, tyytyväisyyteen ja teknologiaan, mikä johtaa kierteen omaiseen tuottavuuden kasvuun. Tämä kierre voi kuitenkin toimia myös päinvastaisesti aiheuttaen aiempaa heikompia tuloksia. (Rantanen 2005, s. 4)



Kuva 4: Tuottavuus suorituskyvyn osa-alueiden kentässä (Rantanen 2005, s. 4)

Kuvasta 4 käy myös hyvin ilmi, miten eri suorituskyvyn osa-alueita voidaan analysoida. Ymmärrettävästi henkilöstön osaamista ja tyytyväisyyttä pystytään arvioimaan parhaiten yrityksen sisäisissä tarkasteluissa. Vastaavasti kannattavuutta tarkastellaan myös yrityksen ulkopuolella. Tarkasteluraja ei myöskään ole tarkka, vaan ennemminkin eräänlainen veteen piirretty viiva. Esimerkiksi henkilöstön tyytyväisyydestä saatetaan tehdä tiettyjä analyysejä, jos henkilöstö kirjoittaa työasioita sosiaaliseen mediaan.

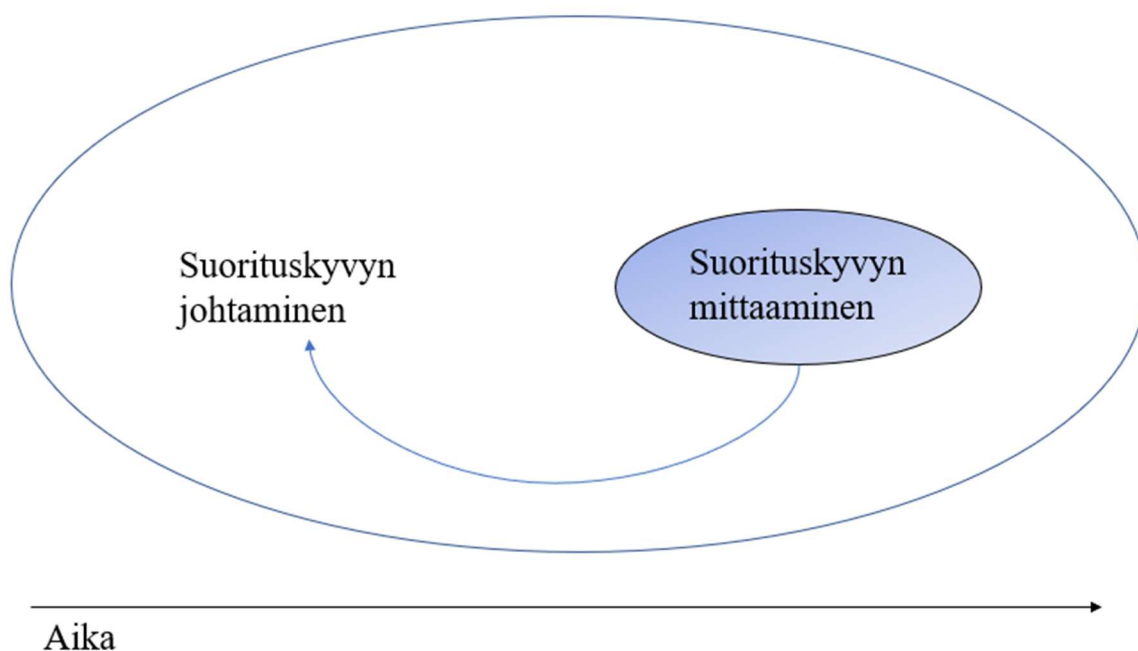
Historiassa suorituskykyä on analysoitu enimmäkseen taloudellisilla mittareilla ja jätetty ei-taloudelliset asiat vähemmälle huomiolle. Robert S. Kaplan (1984, s. 141–142 ja 145) suosittelee jo 80-luvulla yrityksiä lisäämään ei-taloudellisten mittareiden osuutta. Hänen mukaansa perinteisten taloudellisten mittareiden käyttö ei anna riittävää kuvaa suorituskyvyn arvioinnista. Hän määrittelee mm. laadun, tuottavuuden ja työntekijät asioiksi, joita pitää mitata tarkasteltaessa suorituskykyä. Toisaalta tutkimuksissa on havaittu, että ylin johto käyttää pääosin taloudellisia mittareita ei-taloudellisten mittareiden ollessa pienemmässä roolissa (Pekkola ja Rantanen 2014, s. 31). Kaplanin näkemystä on myötätily myös myöhemmissä tutkimuksissa, mutta taloudellisten mittareiden roolia ei voi kuitenkaan sivuuttaa.

Chow ja Van der Stede (2006, s. 7) ovat todenneet, että ei-taloudelliset mittarit eivät sinällään ole ylivoimaisia, vaan tärkeää on löytää kattava yhdistelmä erilaisia mittareita.

## 2.2 Suorituskyvyn johtaminen

Suorituskyvyn johtaminen ja suorituskyvyn mittaaminen tarkoittavat termeinä toisiaan lähellä olevia asioita. Lebasin (1995, s. 34) mukaan suorituskyvyn johtaminen voidaan nähdä filosofiana, jota suorituskyvyn mittaaminen tukee. Toisaalta taas suorituskyvyn mittaamisen yksi päätarkoitus on tuottaa organisaation johdolle informaatiota tukemaan päätöksentekoa (Ukko, Tenhunen ja Rantanen 2008, s. 87). Bititci, Carrie ja McDevitt (1997, s. 524) taas määrittelevät suorituskyvyn johtamisen prosessiksi, jossa organisaatio johtaa suorituskykyään organisaatiostrategioiden ja tavoitteiden kanssa.

Kuvassa 5 osoitetaan, miten suorituskyvyn mittaaminen ja johtaminen liittyvät toisiinsa. Lebasin (1995, s. 34) mukaan suorituskyvyn mittaaminen seuraa suorituskyvyn johtamista päättymättömässä luopissa.



Kuva 5: Suorituskyvyn johtamisen ja mittaamisen välinen yhteys (mukaillen Lebas 1995, s. 34)

Kuten edellä jo todetaan, suorituskyvyn mittaamisen yksi tärkeimmistä tavoitteista on tuottaa luotettavaa informaatiota johdolle päätöksenteon tueksi (Ukko, Tenhunen ja Rantanen 2007, s. 39). Kyseessä ei kuitenkaan ole pelkkä johdon työkalu, vaan suorituskyvyn mittaamisella on myös laajempia tarkoituksia ja vaikutuksia. Ukko et al. (2007, s. 39) toteavat, että suorituskyvyn mittaaminen tapahtuu usein organisaation alemmilla tasoilla mittareiden ollen usein operatiivisia ja lähellä työntekijöitä, minkä vuoksi suorituskyvyn mittaamisella on myös ihmisten käyttäytymiseen vaikuttavia ominaisuuksia. Tutkimuksensa johtopäätöksissä Ukko et al. (2007, s. 49–50) toteavat, että suorituskyvyn mittaamisella on sopivissa olosuhteissa useita positiivisia vaikutuksia. Erityisesti he nostavat esille, että suorituskyvyn mittausjärjestelmällä, suorituskyvyn mittaamisen kytkemisellä henkilöstön palkitsemiseen sekä henkilöstön koulutustasolla näyttäisi olevan oleellinen merkitys positiivisten tulosten saavuttamisessa.

Suorituskyvyn mittaamiseen on kehitetty lukuisia erilaisia analyysimalleja, jotka huomioivat suorituskykyä hieman erilaisista näkökulmista. Malliesimerkki mittaristosta, joka pyrkii huomioimaan sidosryhmät mahdollisimman kattavasti, on suorituskykyprisma. Sen tavoitteena on mitata kaikkien sidosryhmien tyytyväisyys. Toisaalta suorituskykyprisma poikkeaa muista perinteisistä mittaristomalleista, koska siinä mittareita ei johdeta yrityksen strategiasta. Esim. Balanced Scorecardin ja suorituskykymatriisin mittarit johdetaan yrityksen strategiasta. (Ravelomanantsoa, Ducq ja Vallespir 2019, s. 5030, 5032 ja 5036)

Suorituskyvyn johtamisessa ei voi unohtaa HR-toimintojen merkitystä henkilöstöön ja sitä kautta koko yrityksen suorituskykyyn. den Hartog, Boselie ja Paauwe (2004, s. 565) ovat tutkimuksensa perusteella listanneet tekijöitä, joilla on erityinen merkitys suorituskyvyn johtamiseen henkilöstöjohtamisen näkökulmasta:

- Henkilöstöjohtaminen toteutetaan pääsääntöisesti lähiesimiesten toimesta, minkä vuoksi esimiesten toiminnalla on suuri vaikutus henkilöstön toimintaan.
- Johtamiskäytännöillä vaikutetaan henkilöstön toimintaan. Oleellista on, miten henkilöstö kokee annetun informaation.
- Henkilöstön käyttäytymisellä on vaikutus organisaation toimintaan.
- Kausaalisilla suhteilla on merkitystä henkilöstön johtamisessa niin henkilöstön kuin johdon suuntaan.
- Organisaation sisäiset ja ulkoiset tekijät sekä henkilöstöön liittyvät tekijät saattavat vaikuttaa henkilöstöjohtamiseen ja suorituskyvyn johtamiseen

Henkilöstön sitouttamisella ja hyvällä johtamisella voidaankin olettaa olevan suuri merkitys yrityksen toiminnalle yleisesti. Saunila, Tikkamäki ja Ukko (2015, s. 370) ovat todenneet tutkimuksensa tuloksissa, että refleктоivat työkäytännöt tukevat organisaation suorituskykyä. He nostavat erikseen esille viisi suorituskykyä tukevaa asiaa:

- refleктоivien käytäntöjen tekeminen läpinäkyväksi
- refleктоivien keskustelujen tukeminen
- tavoitellun mittauskulttuurin luominen
- tavoitteiden määrittely kaikilla organisaatiotasolla
- henkilöstön motivointi palkitsemalla käyttämään refleктоivia työkäytäntöjä

Edellä mainittujen tutkimusten tulokset tukevat toisiaan korostamalla henkilöstön roolia suorituskyvyn kontekstissa. Oikeilla johtamiskäytänteillä henkilöstö pystytään motivoimaan aiempaa paremmin pyrkimään kohti organisaation tavoitteita.

### 2.3 Suorituskyvyn analysointi

Suorituskyvyn analysointimenetelmät ovat muuttuneet ajan saatossa runsaasti. 1900-luvun ensimmäisellä puoliskolla, jolloin kysyntä ylitti tarjonnan, suorituskyvyn analysointi oli keskittynyt lähinnä tuotantokustannusten minimointiin ja myyntimäärän kasvattamiseen. Näinä aikoina suorituskyky, tuottavuus ja kannattavuus olivat käytännössä samaa tarkoittavia asioita. Yritysten välinen kilpailu alkoi lisääntyä tullessa kohti 80-lukua, kun kysyntä ja tarjonta alkoivat vastata enemmän toisiaan. Samaisina aikoina myös asiakkaiden odotukset alkoivat kasvaa lisäten entisestään yritysten välistä kilpailua. 80-luvulla tarjonta alkoi ylittää kysynnän, mikä aiheutti yrityksille tarpeen alkaa seurata aiempaa laajemmin omaa suorituskykyään. (Ravelomanantsoa et al. 2019, s. 5026)

Suorituskyvyn analysoinnissa tärkeää on verrata mitattua tulosta johonkin toiseen arvoon, jolloin niiden suhdetta toisiinsa voidaan analysoida. Tietoa tuottava mittaus itsessään voi tapahtua spontaanisti tai suunnitellusti. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 17–19) Suorituskyvyn analysointi siis perustuu olemassa olevaan tietoon. Jotta analysointitulokset olisi totuudenmukainen, on suorituskykyä mittaavien mittareiden täytettävä tietyt kriteerit. Sink [1985, s. 68–

69] listaa mittareiden suunnittelukriteereiksi yhdeksän eri kriteeriä (Rantanen ja Holtari 1999, s. 20):

- validiteetti
- harhattomuus ja tarkkuus
- kokonaisvaltaisuus
- ainutlaatuisuus
- luotettavuus
- ymmärrettävyys
- kvantifioitavuus
- kontrolloitavuus
- kustannustehokkuus

Kirjallisuudesta löytyy myös muita kriteereitä. Laitinen (1998, s. 121–138) mainitsee viisi tärkeää kriteeriä mittareiden vaatimuksista:

- relevanttius
- edullisuus
- validiteetti
- reliabiliteetti
- uskottavuus

Edellä mainituista edullisuuden tai kustannustehokkuuden voidaan olettaa olevan näistä tärkeimpiä, koska muussa tapauksessa mittaristosta saaduilla hyödyillä ei välttämättä katettaisi mittariston käyttöön liittyviä kustannuksia. Luonnollisesti jokainen edellä listatuista kriteereistä on tärkeä, koska muussa tapauksessa mittarin tuottaman informaation käyttämiseen ei olisi olemassa riittäviä edellytyksiä.

## 2.4 Kannattavuus

Perinteisen yritystoiminnan perimmäiseksi tavoitteeksi voidaan määritellä kyky tuottaa voittoa, mikä taas voidaan rinnastaa yrityksen kannattavuuteen. Vaatimus kannattavalle liiketoiminnalle on jopa jossain määrin määritelty lakiteksteissä. Osakeyhtiölaissa osakeyhtiön tehtäväksi määritellään voiton tuottaminen osakkeenomistajille (Osakeyhtiölaki 2006).

Yrityksen kannattavuus liittyy yrityksen kykyyn toimia siten, että se pystyy myyntituloillaan kattamaan menonsa, voitonjakonsa ja lainanlyhennyksensä sekä saavuttamaan itselleen asettamansa kannattavuustavoitteen. Jotta yrityksen toiminta olisi kannattavaa, on yrityksen tuottojen oltava menoja suurempia. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 19–21) Toisaalta kannattavuus voidaan määritellä pitkän tähtäimen tuloksentuottamiskyvyksi suhteessa sidosryhmien yritykselle asettamiin vaateisiin (Ukko, Karhu, Pekkola, Rantanen ja Tenhunen 2007, s. 4). Rantasen ja Holtarin (1999, s. 4) mukaan yrityksen jokaisen sidosryhmän perimmäinen tavoite on yritystoiminnan kannattavuus. Rantanen toteaa väitöskirjassaan (1995, s. 34) kannattavuutta analysoitavan ja mitattavan usealla eri tasolla kuten kansallisella-, toimiala-, yritys-, investointi- ja tuotetasoilla. Laitisen (1989, s. 215) mukaan alkuperäisesti kannattavuudella tarkoitetaan sitä sisäistä korkokantaa, jonka kokonaistulot tuottavat niiden synnyttämiseksi käytetyt kokonaisuudet. Rantanen (2005, s. 18) kuitenkin toteaa, että määriteltäessä kannattavuus sisäisen korkokannan avulla on kannattavuuden mittaus vaikeaa ja tämän vuoksi sisäiseen korkokantaan liittyvä määrittely on jäänyt enemmänkin teoreettiseen käyttöön. Rantanen (2005, s. 18) toteaa myös, että perusajatuksena yrityksen kannattavuudella on yrityksen kyky tuottaa tulojen ja menojen erotuksena syntyvää voittoa.

Analysoitaessa kannattavuutta edellä mainitusta alkuperäiskäsitteen näkökulmasta, voidaan tyypillisiksi kannattavuuden mittareiksi nimetä pääoman tuottosuhteen sekä käyttökateprosentin. Toisaalta kannattavuutta voidaan analysoida omistajan oman pääoman tuottosuhteella. Tässä tapauksessa kannattavuuden käsite liittyy omistajan yritykseen tekemän sijoituksen sisäiseen korkokantaan. (Laitinen 1989, s. 232)

Kannattavuutta pystytään analysoimaan useilla eri menetelmillä ja useista eri näkökulmista. Yleisesti kannattavuutta analysoidaan yrityksen johdon sekä omistajien näkökulmista. Nämä näkökulmat eivät välttämättä vastaa toisiaan. Analysointi voidaan jakaa lyhyen ja pitkän tähtäimen analysointeihin ja tunnuslukuihin. Lyhyen ja pitkän aikavälin tunnuslukuja on kuvattu taulukossa 2. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 274–281)

Taulukko 2: Lyhyen ja pitkän aikavälin kannattavuuden tunnuslukuja (mukaiillen Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 274–281)

Lyhyt aikaväli	Pitkä aikaväli
Myyntikate	Pääoman tuotto prosentti (ROI)
Käyttökate	Oman pääoman tuotto prosentti (ROE)
Liikevoitto	
Tilikauden voitto	

Taulukossa 2 kuvatut lyhyen aikavälin kannattavuuden tunnusluvut voidaan suhteuttaa myös yrityksen liikevaihtoon, jolloin lukuja pystytään vertaamaan paremmin saman toimialan sisällä. Pitkän aikavälin tunnusluvuissa on erityisen tärkeää huomioida kulloinenkin laskentatapa. Esimerkiksi pääoman tuotto prosentista on olemassa lukuisia erilaisia laskentatapoja, mutta usein näistä kaikista käytetään samaa termiä pääoman tuotto prosentti.

Kreikassa toteutetun tutkimuksen mukaan yrityksen kannattavuuden kannalta tärkeimpiä tekijöitä ovat yrityksen kokoluokka, myynnin kasvu sekä investoinnit (Asimakopoulos, Samitas ja Papadogonas 2009, s. 937). Toisaalta Gaganis, Pasiouras ja Voulgari (2019, s. 289) ovat osoittaneet, että pienissä ja keskisuurissa yrityksissä kansallisella kulttuurilla on merkittävä vaikutus PK-yritysten kannattavuuteen. Samassa tutkimuksessa on havaittu, että korruptiovapaa yhteiskunta, vapaa liiketoiminta sekä mahdollisuus saada luototusta vaikuttavat myönteisesti PK-yritysten kannattavuuteen. He myös toteavat tutkimuksessaan, että institutionaalisella kehityksellä ja poliittisella vakaudella on oma myönteinen roolinsa yrityksen kannattavuuteen. Tutkimustulosten osittaisen eroavaisuuden vuoksi voitaneen perustellusti olettaa, että kannattavuuteen vaikuttavia asioita ja tekijöitä ei pystytä yksiselitteisesti listamaan, koska asiaan voi vaikuttaa mm. yrityksen koko ja yhteiskunnan kulttuuriin liittyvät asiat. Huomioimatta ei voi myöskään jäädä yrityksen strategia ja siihen liittyvät valinnat. Vaikka vuonna 1981 Beardin ja Dessin (1981, s. 686) toteuttama tutkimus onkin jo vanha, voitaneen näiden havaintojen olettaa pätevän vielä edelleen. Tutkimuksessa on todettu, että niin ylimmän tason kuin liiketoimintatasojenkin strategioilla on merkitystä yrityksen kannattavuuteen ja sen vaihteluun. Beard ja Dess (1981, s. 686) myös nostavat esille, että yrityksen kokoluokka ei välttämättä ennusta yrityksen kannattavuutta tietyllä toimialalla. Yrityksen strategialla siis voidaan olettaa olevan merkittävä vaikutus yrityksen



kannattavuuteen. Heikosti valmisteltu tai puutteellinen strategia saattaa johtaa yrityksen kannalta huonoon lopputulokseen.

Kuten edellä todetaan, kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä on useita, ja yksiselitteisen listan tekeminen onkin haastavaa ja ehkä jopa kyseenalaista. Kirjallisuudessa on kuitenkin nostettu tyypillisiä kannattavuuteen positiivisesti vaikuttavia tekijöitä. Edellä mainittujen kannattavuuteen vaikuttavien asioiden lisäksi kirjallisuudessa on useita muitakin tekijöitä. Goddard, Tavakoli ja Wilson (2005, s. 1280) nostavat kannattavuuden näkökulmasta tärkeiksi tekijöiksi suuren markkinaosuuden sekä likviditeettisuhteen. Smith ja Wright (2004, s. 203) nostavat kannattavuuden näkökulmasta tärkeiksi tekijöiksi jälkimarkkinoinnin palvelun laadun sekä asiakastyytyvyyden.

## 2.5 Kustannukset

Laskentatoimen yksi tärkeimmistä tehtävistä on laskea yrityksen toiminnan tulos. Ajattelumallin lähtökohtana on ajatus katetuottoajattelusta sekä siihen liittyvästä kannattavuudesta. Tarkastelutasona voi olla koko yritys, yksittäinen toiminto tai tuote. Tässä viitekehyksessä kustannukset jaetaan muuttuviin ja kiinteisiin kustannuksiin. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 67)

Katetuottolaskentaa pystytään hyödyntämään tuotteen kannattavuuden arviointiin ja hallintaan. Katetuottolaskennan peruseriaatteena on kustannuksien jako muuttuviin ja kiinteisiin kustannuksiin. Katetuotto saadaan selvitettyä, kun tuotoista vähennetään muuttuvat kustannukset. Vähennettäessä katetuotosta kiinteät kustannukset, saadaan selvitettyä tulos. Tässä laskentatavassa kiinteisiin kuluihin lasketaan kuuluvaksi myös poistot, verot ja korot. (Alhola ja Lauslahti 2000, s. 66) Edellä kuvattu katetuottolaskelman laskentakaava on esitetty taulukossa 3 ja periaate kuvassa 6, jossa laskelma on esitetty myyntituotoista aina yrityksen aikaansaamaan voittoon asti.

Taulukko 3: Katetuottolaskennan peruskaava. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 67)

	Myyntituotot
-	Muuttuvat kustannukset
=	Katetuotto
-	Kiinteät kustannukset
=	<b>Tulos</b>



Kuva 6: Katetuottolaskennan kulku. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 67)

Muuttuviin kustannuksiin luetaan tyypillisesti raaka-aineet, osto-osat, puolivalmisteet, tuotantotoiminnan alihankintapalvelut, valmistuksen palkkakustannukset sivukuluineen, tuotantomäärän mukaan vaihtelevat apupalkat, energiankulutusmaksut sekä koneiden ja laitteiden ylläpito. Vastaavasti kiinteisiin kustannuksiin lasketaan kuuluvaksi laitteiston sitoman pääoman korot ja poistot, vuokrat, lämmitys, siivous, sähkön perusmaksut, yritysjohton ja toimihenkilöiden palkat sivukuluineen sekä erilaiset hallintokustannukset. (Neilimo ja Uusi-Rauva 2005, s. 56) Anderson (2009, s. 27) kuitenkin huomauttaa, että mikään kustannus ei yleensä ole puhtaasti kiinteä tai muuttuva kustannus. Tutkimuksen kohdeyrityksessä henkilöstökulut tulkitaan kuuluvaksi täysimääräisesti kiinteisiin kustannuksiin eli laskenta ei siltä osin vastaa täysin kirjallisuudessa kuvattua tapaa. Tämä tosin ei liene täysin poikkeuksellista, koska mm. Anderson (2009, s. 27) määrittelee henkilöstökustannuksen tutkimuksessaan kiinteäksi kustannukseksi.

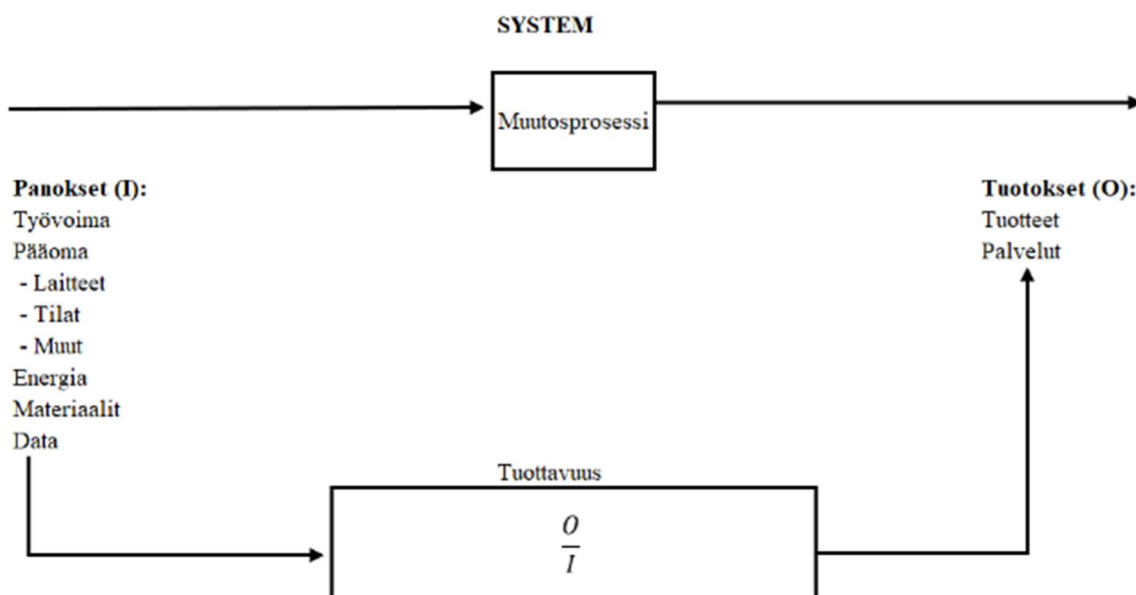
Yrityksen kannattavuuden näkökulmasta kustannuksien tarkka tunnistaminen ja kohdentaminen ovat tärkeitä osa-alueita. Kee (2008, s. 683) on todennut tutkimuksessaan, että tuotteen valmistamiseen käytetyt kustannukset ovat laaja-alaisesti käytössä tuotteiden

hinnoittelussa. Samassa yhteydessä Kee toteaa, että tuotteen hinnoittelussa tärkeä tekijä on tuotteen valmistuksen kokonaiskustannukset. Kustannusseuranta ja -analysointi voitaneenkin perustellusti todeta olevan yrityksen kannattavan toiminnan kannalta tärkeässä roolissa. Huomioitavaa on myös kustannusseurantaan käytettävän järjestelmän rooli. Novák ja Popesko toteavat, että järjestelmän pitää tukea kustannusanalyysijä sekä järjestelmän pitää pystyä mukautumaan muuttuvaan toimintaympäristöön tai pahimmillaan mukautumaton järjestelmä saattaa tuottaa virheellistä informaatiota kustannuksista ja kannattavuudesta yrityksen johdolle (Novák ja Popesko 2014, s. 91).

## 2.6 Tuottavuus

Tuottavuus terminä on jokaiselle tuttu, mutta käytännössä termin ymmärtämisen taustalla on erilaisia käsityksiä siitä, mitä tuottavuudella tarkoitetaan. Termi tuottavuus sekoitetaan usein joko kannattavuuteen, taloudellisuuteen, tuloksellisuuteen tai vaikkapa tehokkuuteen. Nämä kaikki ovat läheisessä suhteessa toisiinsa, mutta terminologisesti puhutaan eri asioista. Huomioitavaa on myös, että tuottavuuden parantuminen ei välttämättä tarkoita kannattavuuden parantumista. Tuottavuutta tutkittaessa ja analysoitaessa on tärkeää erottaa toisistaan tuottavuus ja tuottavuuden mittaaminen. Tuottavuus käsitteenä sisältää sen, miten tuottavuus ymmärretään sekä myös sen, miten tuottavuus määritellään. Tuottavuuden mittaaminen taas liittyy tuottavuuden eri mittareihin sekä mittaamiseen liittyviin ongelmiin. (Rantanen 2005, s. 1–2)

Scott D. Sink [1985, s. 3] on kuvannut tuottavuutta kuvan 7 mukaisesti. Sinkin mukaan tuottavuus on järjestelmän aikaansaamien tuotoksien ja vaadittujen panoksien välinen suhde. Panoksiin laskettavat työvoima, pääoma, energia, materiaalit ja data tuodaan systeemiin. Systeemiin tuodut panokset muutetaan muutosprosessissa tuotoksiksi, jotka voivat olla tuotteita tai palveluita. Tuottavuus on systeemin tuottamien tuotoksien ja käytettyjen panosten välinen suhde annetussa aikaikkunassa. (Rantanen 2005, s. 7)



Kuva 7: Yleinen tuottavuuskonsepti (mukaillen Sink 1985, s. 3)

Tuottavuuden osuutta yrityksen liiketoiminnassa ei voida liikaa korostaa. Tuottavuus katso- taankin yhdeksi tärkeimmistä tekijöistä liiketoiminnan kannalta. Toisaalta tuottavuus on jä- tetty usein tärkeysjärjestyksessä vasta toiselle sijalle ja pahimmillaan jätetty jopa huomioi- matta tuotantoprosesseista vastaavien henkilöiden toimesta. Toisaalta yrityksissä on 1900- luvun lopulla alettu ymmärtää tuottavuuden merkitys ja tarpeellisuus. (Singh, Motwani ja Kumar 2000, s. 234) Tangen (2005, s. 35) on esittänyt mahdollisena syynä tuottavuuden heikolle ymmärrykselle sitä, että ei ole yhteistä ymmärrystä siitä, mitä tuottavuudella tarkoi- tetaan. Samassa yhteydessä Tangen toteaa, että on jopa osoitettu, että tuotannon tehokkuu- teen liittyviä päätöksiä tekevät ihmiset eivät välttämättä osaa vastata kysymykseen, mitä tuottavuudella tarkoitetaan.

Tuottavuuden määrittely voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäinen ryhmä käsittelee laajemmin tuottavuuden olemusta, kun taas toiseen ryhmään kuuluvat määrittelyt, joissa ku- vataan sanallisesti tuottavuuden formaalista esitysmuotoa. Määrittelyitä on lukuisia erilaisia, mikä osaltaan selittää edellä kuvattua ongelmaa ymmärtää tuottavuus terminä. Laajasti ym- märrettyinä tuottavuus voidaan määrittellä esim. *haluna parantaa nykytilannetta riippumatta siitä, miten hyvältä se näyttää*. Toisaalta yksinkertaisimmillaan voidaan puhua työntekijöi- den kyvystä aikaansaada tuotoksia. (Rantanen 2005, s. 6)

European Productivity Agency'n Rooman konferenssissa vuonna 1958 tehdyn määritelmän mukaisesti tuottavuudella tarkoitetaan sitä, mitä henkilö saa aikaan materiaaleilla, pääomalla

sekä teknologialla (Saari 2006, s. 96). Myöhemmin tätä ajatusmallia on laajennettu, mutta itse perusajatus on säilynyt pitkälti muuttumattomana. Tuotantotaloudessa tuottavuus määritellään yleisesti tuotoksien ja panosten väliseksi suhteeksi (Tangen 2005, s. 35). Tangen (2005, s. 36) on listannut useita määritelmiä tutkimuksessaan:

- Kyky tuottaa (faculty to produce) [Littré 1883]
- Tuotoksien suhde panoksiin (Chew 1988, s. 111)
- Kyky tyydyttää markkinoiden tarpeita mahdollisimman pienellä resurssien kulutuksella [Moseng ja Rolstadås 2001]

Yllä olevat esimerkit ovat vain pieni osa erilaisista tuottavuuden määrittelyistä, mutta niistä saa hyvän kuvan, miten laaja-alaisesti tuottavuus voidaan ymmärtää. Tässä tutkimuksessa lähdetään näkökulmasta, että tuottavuus on kaikkien tuotosten summa suhteutettuna kaikkien panosten summaan.

$$Tuottavuus = \frac{\sum Tuotos}{\sum Panos} \quad (1)$$

Tarkasteltaessa tuottavuutta yritystasolla lasketaan tuotokseksi koko tarkasteluajanjakson yhteenlaskettu kokonaistuotos eli siihen luetaan niin puolivalmisteet kuin valmistunutkin tuotanto. Tarkasteltaessa tuotosta rahamääräisesti, on tuotannon arvoon lisättävä saadut korko- ja osinkotuotot sekä mahdolliset muut tuotot. Käytännössä rahamääräinen tarkastelu on ainut vaihtoehto kokonaistuottavuuden analysoinnissa, koska tuotoksien ja panosten fyysisten mittayksiköiden yhdistäminen on lähes mahdotonta. (Rantanen 2005, s. 8)

Tuottavuus voidaan kuvata osatuottavuuksien funktiona. Kuten edellä on todettu, tuottavuus on tuotoksien ja panosten välinen suhde. Gonsalvesin ja Eilerin [1966] mukaan panokset voidaan jakaa osiin, jolloin laskentakaava saadaan jaettua osiin (Hannula 2002, s. 64):

$$P_t = \frac{O}{I_L + I_C + I_M + I_E + I_Q} \quad (2)$$

, missä

$P_t$  = Kokonaistuottavuus

O = Kokonaistuotos

$I_L$  = Työpanokset

$I_C$  = Pääomapanokset

$I_M$  = Materiaalipanokset

$I_E$  = Energiapanokset

$I_Q$  = Muut panokset

Rantasen (2005, s. 15) mukaan kokonaistuottavuuden muutoksella tarkoitetaan sitä muutosta, jota ei voida selittää panosten kasvulla. Kasvatettaessa panoksia myös tuotoksien määrän voidaan olettaa kasvavan. Panosten määrän kasvu kuitenkin selittää pääsääntöisesti pienemmän osan kuin itse tuottavuuden kasvu.

Laajasti tunnustetaan, että tuottavuuden kehittyminen on tarpeellista yrityksen tai vaikkapa yhteiskunnan kannalta. Tuottavuuden kehittyminen mahdollistaa osaltaan kannattavuuden nousun, minkä ansiosta jakovara niin työntekijöille kuin omistajillekin kasvaa. Samaisen jakovaran kasvun ansiosta yrityksellä on myös aiempaa paremmat mahdollisuudet kehittää omaa toimintaansa entistä tuottavampaan suuntaan. Kehittyneessä yhteiskunnassa ja teollisuudessa tuottavuuden kehittäminen ei enää tyypillisesti voi tapahtua panosten kasvattamisen kautta; pitää pystyä toimimaan aiempaa tehokkaammin ja älykkäämmin keinoin. (Rantanen, Rantala, Pekkola 2015, s. 7)

### 2.6.1 Tuottavuuden ja kannattavuuden välinen suhde

Kuten edellä on kuvattu, tuottavuuden ja kannattavuuden käsitteet sekoitetaan usein keskenään. Kyseessä ovat eri asioita tarkoittavat termit, jotka kuitenkin ovat toisistaan riippuvia käsitteitä (Tangen 2005, s. 39). On syytä huomioda, että tuottavuudeltaan erinomainen yritys ei välttämättä ole kannattava. Esimerkiksi yritys, joka valmistaa vanhoja pöytäpuhelimia eriomaisella tuottavuudella, ei välttämättä ole nykypäivänä kannattava, koska tuotetta ei saada markkinoilla kaupaksi. Toisaalta taas raaka-aineiden hinta markkinoilla saattaa olla niin korkea, että huipputuottavuudesta huolimatta yritys ei pysty toimimaan kannattavasti. Tuotteet pitääkin pystyä myymään asiakkaille hyvällä hinnalla ja hyväksyttävillä kustannuksilla. Rantanen (1995, s. 11) toteaa väitöskirjassaan, että yrityksellä on kaksi keinoa parantaa voittoa tuotettua yksikköä kohden. Ensimmäinen listatuista keinoista on nostaa tuotoksen (tuotteen) hintaa enemmän kuin panosten hinta on noussut. Toinen keino on parantaa yrityksen tuottavuutta. Samassa yhteydessä Rantanen myös toteaa, että korkea tuottavuus ja

kustannusten alentaminen saattavat olla päinvastaisia yrityksen tavoitteeseen maksimoida voittoa. Tällä tarkoitetaan tuottavuusparadoksia: yrityksen kannattavuus saattaa olla erinomainen, mutta yrityksen tuottavuus vastaavasti huono (Rantanen 1995, s. 11).

Vaikka tuottavuuden ja kannattavuuden välinen suhde ei olekaan täysin selvä, voidaan monesti todeta tuottavuuden kehittämisen olevan tärkeää yrityksen pitkän aikavälin kannattavuuden kannalta (Tangen 2005, s. 39). Tuottavuuden kasvu mahdollistaa kustannusten alenemisen ja kannattavuuden nousun. On jopa todettu, että tuottavuuden kasvu on talouden terveyden mittari; tuottavuuden kasvaessa voidaan taloustilanne olettaa olevan terveellä pohjalla (Steindel ja Stiroh 2001, s. 30). Berghäll, Junka ja Kiander [2006] ovat todenneet, että pitkällä tähtäimellä talous voi kasvaa ainoastaan tuottavuutta nostamalla (Rantanen et al. 2015, s. 11). Vaikka Berghäll et al. tarkoittavatkin enemmän kansantalouden tasoa, voitaneen tämä olettaa pätevän myös yritystasolle.

Tuottavuuden ja kannattavuuden välistä suhdetta on tutkittu suhteellisen vähän. Kirjallisuutta aiheeseen liittyen ei ole juurikaan olemassa, mikä osaltaan hankaloittaa ilmiön tarkempaa analysoimista. Toisaalta taas tuottavuus ja kannattavuus ovat monessakin mielessä erillisiä asioita ja niiden yhdistäminen saattaisikin olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Rantanen (1995) on väitöskirjassaan tutkinut tuottavuuden ja kannattavuuden välistä yhteyttä. Hänen mukaansa tuottavuudella on rooli yrityksen kannattavuudessa esim. alentuneina yksikkökustannuksina, mutta tiedossa ei ole, miten organisaation alimman tason tuottavuuden nousu vaikuttaisi yrityksen kannattavuuteen.

## 2.6.2 Tuottavuuden mittaaminen

Tuottavuuden mittaamisen perussyynä on aina saada tietoa tutkittavan kohteen toiminnan tehokkuudesta. Syiden luokitteluita on useita, mutta perusajatuksena on pääsääntöisesti tavoite parantaa tuottavuutta ja sitä kautta tarkasteltavan kohteen taloudellista asemaa. Jotta tuottavuutta voitaisiin parantaa, on tuottavuutta mitattava. (Rantanen 2005, s. 27)

Kirjallisuudessa on listattu useita erilaisia luokittelutapoja tuottavuuden mittaamiselle. Mohamed (1986, s. 14) on väitöskirjassaan listannut viisi erilaista tarkastelukulmaa

tuottavuuden mittaamiselle. Mohamedin (1986, s. 15) mukaan listan kolme ensimmäistä liittyy enemmänkin makrotason tarkasteluun, kun taas kaksi viimeistä liittyy mikrotason analysointiin:

- Yksittäinen osatuottavuus (SFP, single-factor productivity)
- Monitekijätuottavuus (MFP, multifactor productivity)
- Kokonaistuottavuus (TP, total productivity)
- Johtamisen tunnusluvut (MCR, managerial control ratio)
- Tuottavuuden kustannukset (productivity costing)

Yksittäisen osatuottavuuden (SFP) mittaaminen on pääsääntöisesti helppoa ja vertailutietojen saanti on mahdollista useasta eri lähteestä. Huomioitavaa kuitenkin on, että yksittäisen osatuottavuuden mittaaminen ei välttämättä kerro kokonaiskuvaa tuottavuudesta. Myös panosten määrän muutos voi vääristää mittaustuloksia. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 29) Mohamedin (1986, s. 15) mukaan yksittäisen osatuottavuuden laskennassa huomioidaan ainoastaan yksittäinen panos (esim. työpanos rahaksi muutettuna), kun taas tuotoksena voidaan käyttää valmistettujen tuotteiden rahallista arvoa.

Monitekijätuottavuuden (MFP) avulla mitataan tuotoksen sekä työ- ja pääomapanoksien summan välistä suhdetta eli esim. materiaali- ja energiapanokset jätetään huomioimatta. Tuotos monitekijätuottavuudessa lasketaan ”perinteisesti” eli kokonaistuotoksen perusteella. Tämä mittaamenetelmä ei kuitenkaan sovellu kovinkaan hyvin aloille, joilla materiaalin tai energian käyttö on merkittävässä roolissa. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 29)

Kokonaistuottavuuden (TP) mittaamisella tarkoitetaan nimensä mukaisesti tuottavuuteen kokonaisuudessaan vaikuttavien tekijöiden mittaamista. Laskennassa huomioidaan kokonaistuotos sekä kaikkien panosten summa. Tämä menetelmä kuvaa hyvin tarkasteltavan kohteen tuottavuutta, mutta yksittäisten osatuottavuuksien vaikutuksia ei välttämättä näe kokonaistuottavuutta tarkasteltaessa. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 29) Mohamed (1986, s. 26) huomauttaa, että tarkasteltavat hintatasot pitää olla deflatoituja tiettyyn hetkeen.

Johtamisen tunnuslukutarkastelulla tarkoitetaan tuottavuuden analysointia, jossa yhdistetään kannattavuuden tunnusluku ja siitä johdetut panostekijät. Malliin sisältyy erilaiset tuottavuusmittarit osatuottavuuksien ollessa tyypillisiä. (Rantanen ja Holtari 1999, s. 29)



Mohamedin (1986, s. 37) mukaan tuottavuuden kustannustarkastelussa yhdistetään tuottavuuden mittaaminen ja kustannukset perustuen tuotantokapasiteettiin. Rantanen ja Holtari (1999, s. 29) kuitenkin huomauttavat, että tämä malli tarkastelee enemmän kustannuksia ja voittoa kuin itse tuottavuutta.

Yksittäinen tuottavuuden mittaustulos ei välttämättä kerro kohdeorganisaation tuottavuudesta juuri mitään. Jotta mittaustulos kertoisi tilanteesta pelkkää lukuarvoa enemmän, on saatua tietoa verrattava joko kohdeorganisaation aiempiin tuloksiin tai saman toimialan muiden organisaatioiden vastaaviin mittauksiin.

### 2.6.3 Tuottavuuden kehittäminen

Vuonna 2008 Nobelin taloustieteen palkinnon voittanut Paul Krugman on todennut (1997, s. 11), että *”tuottavuus ei ole kaikki kaikessa, mutta pitkällä aikavälillä se on lähes kaikki”*. Tämä lause kuvaa hyvin tuottavuuden pitkän aikavälin kehittämisen merkitystä. Krugmanin toteamusta tukee Baumolin [1984] vastaavan suuntainen lause *”...pitkällä aikavälillä luultavasti mikään ei ole niin tärkeää taloudellisen hyvinvoinnin näkökulmasta kuin tuottavuuden kasvamisnopeus”* (Harris ja Moffat 2015, s. 1).

Tuottavuuden, tai laajemmin suorituskyvyn, kehittämiseen löytyy lukemattomia erilaisia tapoja, joiden painopistealueet vaihtelevat teknisistä sovelluksista aina ihmisten johtamiseen. Toisaalta tuottavuutta voidaan kehittää osatuottavuuksien kautta, jolloin painopisteet liittyvät kulloiseenkin osatuottavuuteen. Yleisellä tasolla voitaneen tiivistää, että tuottavuuden kehittämiseen ei löydy ainoastaan yhtä keinoa tai menetelmää, vaan ilmiö on monimutkaisempi. Tuottavuuden kehittämiseen vaikuttavia asioita on kuitenkin pystytty osoittamaan lukuisia erilaisia.

Mm. Sink (1985, s. 26) ja Tangen (2005, s. 37) ovat todenneet, että yrityksen tuottavuus voi nousta viidellä eri tavalla:

- tuotoksen määrä kasvaa panoksien määrän pysyessä ennallaan
- tuotoksen määrä säilyy ennallaan panoksien määrän laskiessa
- sekä tuotoksen, että panoksien määrät kasvavat, mutta tuotoksen määrä kasvaa enemmän

- tuotoksien määrä kasvaa ja panoksien määrä laskee
- sekä tuotoksien, että panoksien määrät laskevat, mutta panoksien määrä laskee enemmän

Ihmisten motivaatiolla on suuri merkitys ihmisten käyttäytymiseen ja toimimiseen työelämässä. Saunila, Tikkamäki ja Ukko (2015, s. 370) ovat tutkineet suorituskyvyn johtamista reflektoitavien työkäytäntöjen yhteydessä. He ovat todenneet, että suorituskyvyn johtamisella pystytään vaikuttamaan ja ohjaamaan ihmisten käyttäytymistä organisaatiossa. Vaikkakin kyseinen tutkimus käsittelee suorituskykyä yleisemmin, voitaneen olettaa sen olevan yleistettävissä myös suorituskyvyn yksittäiseen osa-alueeseen, tuottavuuteen.

Vanha totuus ”sitä saat, mitä mittaat” pätee myös tuottavuuden kehittämisessä. Tämän vuoksi tuottavuutta kehitettäessä on huomioitava, että mikään osa-alue ei jää täysin huomioidatta. Jos jokin osa-alue jää mittauksen ja analysoinnin ulkopuolelle, saattaa se osa-alue heikentyä muiden osa-alueiden mahdollisesti kehittyessä. Toisaalta kaikkea ei voi, eikä välttämättä edes kannata mitata.

Yksi tyypillisimmistä keinoista kehittää tuottavuutta liittyy Lean-käytäntöjen implementointeihin yrityksissä. Mm. Pohjois-Intiassa toteutetussa tapaustutkimuksessa on selkeästi osoitettu Lean-käytänteiden positiivinen vaikutus yrityksen tuottavuuteen (Singh, Singh ja Singh 2018, s. 1414). Tutkimuksessa on erityisesti nostettu esiin JIT-mallin (just in time) suuri merkitys tehokkuuden nostamisessa. Lean-käytänteiden vaikutus vahvistetaan useissa eri tutkimuksissa. Joseph, Kanya, Bhaskar, Xavier, Sendilvelan, Prabhakar, Kanimozhi ja Geetha (2021, s. 7182) ovat omassa tutkimuksessaan saaneet vastaavia tuloksia kuin Singh et al. edellä. Joseph et al. (2021, s. 7182) osoittivat tutkimuksessa lähes 20 % nousun päivittäisessä tuotantotasossa Lean-menetelmien implementoinnin jälkeen.

#### 2.6.4 Osatuottavuus

Tuottavuuteen liittyvät panokset voidaan jakaa viiteen eri luokkaan: työ, pääoma, materiaali, energia ja muut panokset. Työpanoksiin lasketaan kuuluvaksi kaikki yrityksen työpanokset johdosta työntekijöihin. Pääomapanokseen kuuluu yrityksen kiinteä pääoma. Materiaalipanos sisältää kaikki raaka-aineet, osat ja komponentit. Energiapanos sisältää vastaavasti

kaikki käytetyt energiajakeet kuten sähkön, höyryn ja lämmön. Muihin panoksiin lasketaan kuuluvaksi muut mahdolliset panokset, joita tuotoksen tekemiseen tarvitaan. (Rantanen 2005, s. 8–9)

Syverson (2011, s. 329–330) toteaa, että yleisin yksittäinen osatuottavuuden mittausta koskee työn tuottavuutta, mutta myös muita osatuottavuuden lajeja mitataan. Neilimo ja Uusi-Rauva (2005, s. 311) taas toteavat, että laaja-alainen tuottavuuden kehittäminen edellyttää tuottavuuden tarkastelua kaikilla tarkastelutasoilla kuten esim. toimialan, yrityksen tai toiminnon tasolla. Voitaneenkin olettaa, että tuottavuutta ilmiönä pitää tarkastella monesta eri näkökulmasta parhaan mahdollisen tuloksen saavuttamiseksi. Rantanen (2005, s. 15) huomauttaa, että osatuottavuudet saattavat olla toisiaan korvaavia. Samassa yhteydessä Rantanen käyttää esimerkkinä investointia uuteen tuotantolaitteeseen: todennäköisesti työn tuottavuus kasvaa työmäärän pysyessä muuttumattomana, mutta pääoman tuottavuus laskee. Jos pääoman tuottavuuden lasku on esimerkissä suurempi kuin työn tuottavuuden nousu, tarkoittaa se kokonaistuottavuuden laskua.

Kokonaistuottavuuden ja osatuottavuuksien suhde voidaan esittää kaavamuodossa seuraavasti (mukaillen Rantanen 2005, s. 17)

$$\frac{I}{P_t} = \frac{I_L}{O} + \frac{I_C}{O} + \frac{I_M}{O} + \frac{I_E}{O} + \frac{I_Q}{O} \quad (3)$$

, missä

$P_t$  = Kokonaistuottavuus

O = Kokonaistuotos

$I_L$  = Työpanokset

$I_C$  = Pääomapanokset

$I_M$  = Materiaalipanokset

$I_E$  = Energiapanokset

$I_Q$  = Muut panokset

Tarkasteltaessa yksittäisiä osatuottavuuksia on huomioitava niiden mahdollinen vaikutus muihin osatuottavuuden lajeihin. Rantasen (2005, s. 17) mukaan osatuottavuuksien välinen suhde on monimutkainen eikä osatuottavuuksia yhteen laskemalla voida muodostaa

kokonaistuottavuutta. Hannula (2002, s. 64) taas toteaa, että osatuottavuuden suhdelukuja voidaan käyttää kokonaistuottavuuden mittaamiseen. Hän myös mainitsee, että osatuottavuuksien hyödyntäminen täyttää suorituskyvyn mittaamisen yhden tärkeimmistä kriteereistä eli mittarin vaatima vaivannäkö jää hyötyjä pienemmäksi.

Yksittäiset osatuottavuudet voidaan johtaa edelleen kaavasta 4 (mukaiillen Rantanen 2005, s. 16–17):

$$P_N = \frac{O}{I_N} \quad (4)$$

, missä:

$P_N$  = Yksittäinen osatuottavuus (esim. työn tuottavuus tai energian tuottavuus)

O = Kokonaistuotos

$I_N$  = Yksittäisen osatuottavuuden lajien panosten summa (esim. energiapanosten summa tai materiaalipanosten summa)

## 2.7 Tuottavuuden kehittämisen esteet

Bashir, Alzebdeh ja Al Riyami (2014, s. 6) toteavat tutkimuksessaan, että kirjallisuudesta löytyy lukuisia tutkimuksia, jotka ovat keskittyneet tuottavuuden kehittämiseen. He kuitenkin lisäävät, että ainoastaan muutamassa tutkimuksessa on tutkittu esteitä, jotka vaikuttavat tuottavuuden kehittämiseen. Rantanen et al. (2015, s. 14–17) nostavat erityisiksi haasteiksi tuottavuuden kehittämisessä viisi eri ryhmää:

- teoreettiset tai käsitteelliset kysymykset
- tuottavuuden mittaamiseen liittyvät tekijät
- organisaation toiminnalliset ja toimijoihin liittyvät tekijät
- rahoitukseen liittyvät tekijät
- tiedon hyödyntäminen johtamisessa

Teoreettisilla ja käsitteellisillä kysymyksillä tarkoitetaan terminologiaan liittyviä ongelmia eli käytännökö samoja termejä tuottavuudesta puhuttaessa. Toisaalta tällä tarkoitetaan myös, että onko henkilökohtainen kokemus tuottavuuden merkityksestä kaikille henkilöille sama. Tähän saattaa vaikuttaa mm. henkilön arvopohja. Tuottavuuden mittaamiseen liittyvällä esteellä tarkoitetaan ongelmaa, joka liittyy eri suureiden erilaiseen mittayksikköön. Mittaamisongelmat saattavat koskea myös mittausvälineen tai -järjestelmän puutteellisuutta. (Rantanen et al. 2015, s. 14)

Organisaation toiminnallisilla ja toimijoihin liittyvillä esteillä tarkoitetaan mm. henkilöstön osaamiseen ja asenteisiin liittyviä haasteita. Toisaalta nämä tekijät saattavat liittyä johtamisjärjestelmiin ja niihin liittyviin tekijöihin. Rahoitukseen liittyvillä esteillä tarkoitetaan taas rahoituksen saatavuuteen tai jaksotukseen liittyviä tekijöitä. Toisaalta tämä voi liittyä myös teknologian kehittämiseen liittyviin suuriin kustannuksiin ja toisaalta kohdeorganisaation pieneen varallisuuteen. (Rantanen et al. 2015, s. 14)

Viides tuottavuuden este, tiedon hyödyntäminen johtamisessa, liittyy organisaation kyvyttömyyteen hyödyntää tietoa tuottavuuden tasosta. Organisaatiolla saattaa olla tuottavuuden taso tiedossa, mutta tuottavuuteen ei silti panosteta. Tämä saattaa johtua esimerkiksi siitä, että organisaatiolla ei ole saatavilla vertailutietoa, jolloin omaakaan huonoa tilannetta ei ymmärretä riittävästi. (Rantanen et al. 2015, s. 14)

Bashir et al. (2014, s. 6) ovat omassa tutkimuksessaan nostaneet kolme pääestettä tuottavuuden kehittymisessä:

- puutteelliset johtamiskäytännöt
- henkilöstön alhainen työtyytyväisyys
- puutteelliset henkilöstöjohtamisen menetelmät

He suosittelevatkin toteutettavaksi toimenpiteitä, jotta tuottavuusesteitä saadaan poistettua. Tutkimus on tehty Omanissa sijaitsevissa yrityksissä ja se ei välttämättä ole kaikilta osin sovellettavissa Suomeen. He kuitenkin pitävät tärkeänä johdon osaamistasoa sekä työtyytyväisyyden kehittämistä muultakin osin kuin palkan osalta. (Bashir et al. 2014, s. 6) Näiden suosituksien voitaneen olettaa pätevän kaikkialla.

Tuottavuusesteet voidaan jakaa yleisellä tasolla kolmeen eri pääryhmään: sisäisiin, ulkoisiin ja yleisiin tuottavuusesteisiin. Sisäisillä tuottavuusesteillä tarkoitetaan esteitä, jotka ovat

organisaation sisäisiä ja niihin pystyy vaikuttamaan organisaation omilla toimilla. Tyypillisesti näitä sisäisiä tuottavuusesteitä ovat mm. henkilöstön asenne, ajan puute, huonot tuotantomenetelmät ja tiedon puute. Ulkoiset tuottavuusesteet liittyvät nimensä mukaisesti organisaation ulkopuolisiin esteisiin. Näihin esteisiin on joko vaikeaa tai jopa mahdotonta vaikuttaa. Tyypillisesti ulkoisiin tuottavuusesteisiin voidaan lukea esim. lainsäädännön asettamat haasteet sekä elinkeinopolitiikka. Yleisiin tuottavuusesteisiin luetaan esteet, joita ei pysty kategorisoimaan edellä mainittuihin kahteen ryhmään tai toisaalta ne voivat kuulua molempiin ryhmiin. Näitä yleisiä tuottavuusesteitä voivat olla mm. erilaiset teoreettiset kysymykset tai toisaalta hankaluus käyttää tuottavuutta palkanmaksun perusteena. (Rantanen 2001a, s. 87)

## 3 Paperin valmistus

### 3.1 Paperin valmistuksen perusteet

Yleisellä tasolla paperin valmistusprosessi voidaan jakaa kuuteen eri vaiheeseen (mukaiillen Bajpai (2015, s. 12) ja Ghosh (2011, s. 537)):

- pulperointi ja jauhatus
- sulpun laimennus alhaiseen sakeuteen ja sakeuden ylläpito
- sulpun syöttö paperikoneen viiraosalle
- puristinosa
- kuivatusosa
- viimeistely

Käytännössä jokaisen yllä olevan prosessin osavaiheeseen sisältyy lukuisia prosessin kannalta tärkeitä vaiheita. Vaiheita ei pystytä yksiselitteisesti määrittelemään, vaan tekijät vaihtelevat valitun teknologian, valmistettavan paperilaadun ja usean muun tekijän vaikutuksesta.

Pulperointi ja jauhatus voidaan lukea kuuluvaksi massankäsittelyvaiheeseen (stock preparation). Massankäsittelyn tehtäväksi voidaan karkeasti lukea kuuluvan erilaisten kuitujakeiden varastoinnin, liettämisen ja laimentamisen sekä kuitujen jauhamisen sekä annostelun. Jokainen kuitujae joudutaan laimentamaan alhaiseen sakeuteen ennen paperikoneelle syöttämistä. Tämän vuoksi osa paperikoneen kiertovesijärjestelmistä voidaan tulkita kuuluvaksi massankäsittelyvaiheeseen. (Hägglom-Ahnger, Komulainen ja Seppälä 2001, s. 112)

Pulperoinnissa eli massan hajotuksessa sellupaali tai vastaava hajotetaan veden avulla pumppattavaan muotoon. Pulperointisakeus on tyypillisesti noin 5 %. Pulperointi ei kuitenkaan vaikuta kuidun ominaisuuksiin eli vaiheen tarkoitus on pelkästään saada kiinteässä olomuodossa oleva kuitu, esim. sellupaali, hajotettua. Jauhatusvaiheessa kuitua käsitellään erillisillä laitteilla tavoitteena kuidun sisäinen ja ulkoinen fibrillaatio sekä hienoaineen syntyminen; perimmäinen tavoite jauhamiselle on pääsääntöisesti kuidusta saatavien

lujuusominaisuuksien lisääminen. Kuidun ulkoisella fibrillaatiolla tarkoitetaan kuitujen uloimman kerroksen osittaista irtoamista, mikä parantaa kuitujen välistä sitoutumista. Sisäisellä fibrillaatiolla tarkoitetaan veden tunkeutumista kuituseinämien lamellien väliin, minkä ansiosta kuitu muuttuu aiempaa notkeammaksi mahdollistaen laajemman kontaktipinnan kuitujen välissä. Hienoaineen synty parantaa kuitujen välisten sidosten syntymistä. Edellä mainittujen lisäksi jauhatustapahtumalla on lukuisia, yleensä ei-toivottuja vaikutuksia paperiprosessissa, mutta niitä ei tarkemmin analysoida tässä yhteydessä. Jauhatustapahtumaa itsessään säädetään muuttamalla jauhimen sisällä olevien terien teräväliä, millä on suora vaikutus jauhimen ottamaan sähkötehoon. Paperikoneelle annosteltava kuituseos säädetään haluttuun sakeuteen ennen varsinaista paperikonetta. Tyypillinen sakeus voi olla esim. tasolla 3 %. (Hägglom-Ahnger et al. 2001, s. 112–113)

Jauhatusvaiheen jälkeen käsitelty kuituseos annostellaan ns. paperikoneen lyhyeen kiertoan. Samassa yhteydessä kuituseos laimennetaan siten, että paperikoneen perälaatikolle menevän massan sakeus on enää 0,2–1,2 %. Lyhyen kierron yksi päätehtävistä on siis laimentaa sakea massa perälaatikkosakeuteen ja annostella massa paperikoneen alkupäähän perälaatikolle. (Hägglom-Ahnger et al. 2001, s. 125)

Sulpun syöttö paperikoneen viiralle eli rainanmuodostus tapahtuu paperikoneen viiraosalla ns. märässä päässä. Rainanmuodostusosa koostuu perälaatikosta syöttöputkineen sekä viiraosasta. Rainanmuodostusosan päätehtäviksi voidaan lukea mm. seuraavat tehtävät: (mukailen Hägglom-Ahnger et al. 2001, s. 131)

- tuottaa tasainen massasuihku perälaatikolta viiraosalle
- poistaa vettä perälaatikolta tulevasta sulpusta
- hallita vedenpoistoon liittyviä voimia tasaisen paperilaadun aikaansaamiseksi
- nostaa rainan kuiva-ainepitoisuus mahdollisimman korkeaksi

Rainanmuodostus- eli viiraosalla on muitakin prosessin kannalta kriittisiä tehtäviä, mutta tässä yhteydessä niiden läpikäynti ei ole tarpeellista.

Viiraosalla on merkittävä rooli paperikoneen vedenpoistossa. Paperikoneen perälaatikolta viiralle tulevan sulpun sakeus on noin 0,2–1,2 %, mutta viiraosan jälkeen syntyneen rainan kuiva-ainepitoisuus on jo noin 15–20 %, mikä käytännössä tarkoittaa, että rainanmuodostusosalla poistetaan yli 95 % sulpun sisältämästä vesimäärästä. (Hägglom-Ahnger et al. 2001,



s. 137) Tästä voitaneenkin päätellä, että viiraosan optimaalinen toiminta on tärkeää paperikoneen kokonaisenergiankulutuksen kannalta, koska muussa tapauksessa poistumaton vesi joudutaan poistamaan prosessin myöhemmissä vaiheissa, joka pääsääntöisesti on energian tuottavuuden kannalta ei-toivottu tapahtuma.

Viiraosan jälkeen seuraava osaprosessi paperin valmistuksessa on puristinosalla, jossa paperirainaa kuivatetaan puristamalla. Paperiraina tulee puristinosalle kuiva-aineessa 15–20 % ja poistuu puristinosalta kuiva-aineessa 40–55 %. Käytännössä puristinosalla paperirataa puristetaan kahden telan välissä, jolloin rainaan sitoutunut vesi poistuu puristustapahtumassa mukana olevaan puristinhuopaan. Vaikka kuiva-aineen nousu puristinosalla on merkittävä, on poistuva vesimäärä vähäinen viiraosalla poistuvaan määrään verrattuna. (Hägglom-Ahnger et al. 2001, s. 155)

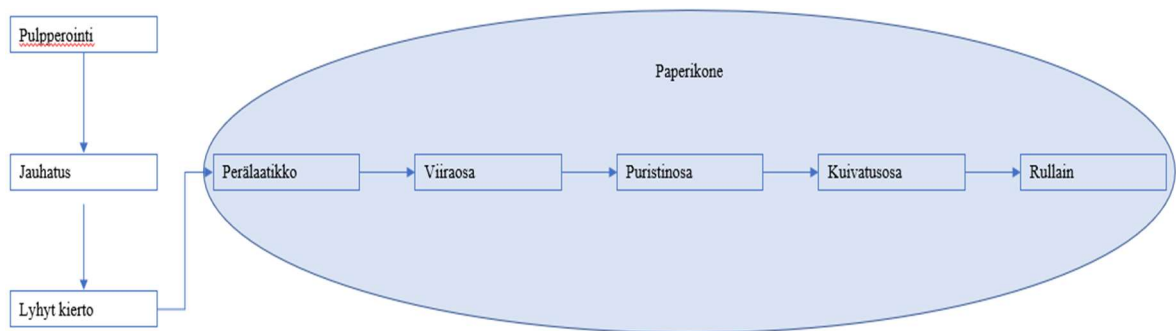
Paperikoneen puristinosalta paperiraina siirtyy paperikoneen kuivatusosalle, jossa paperia kuivataan haluttuun loppukosteuteen esim. höyryn avulla. Edellisessä kappaleessa kuvatulla kuiva-aineen nousulla on merkittävä vaikutus kokonaiskuivatusenergian käyttöön. Mitä suurempi paperirainan kuiva-ainepitoisuus on puristinosan jälkeen, sitä vähemmän kuivatusosalla rainaa pitää kuivattaa.

Paperiteollisuudessa yleinen pääkuivausmenetelmä on käyttää höyrylämmitteisiä kuivaussylintereitä. Toinen tärkeä vaikuttava mekanismi kuivatuksessa on kuuman ilman vaikutus kuivatusosan ympäristössä. (Ghosh 2011, s. 537) Pehmopaperin valmistus eroaa perinteisestä paperin valmistuksesta erityisesti kuivatusosan puolesta. Pehmopaperikoneen kuivatusosa koostuu pääsääntöisesti yhdestä suuresta kuivatussylinteristä, ns. jenkki-sylinteristä, sekä kuivatussylinterin päällä olevasta kuivatushuuvasta, jonka avulla paperirataa puhalletaan kuumaa ilmaa kuivatuksen tehostamiseksi. Hägglom-Ahngerin et al. (2001, s. 169) mukaan jenkki-sylinterin halkaisijat vaihtelevat tyypillisesti 4–7 m välillä. Kuivatusosalla paperin loppukosteus säädetään haluttuun tasoon. Ghoshin (2011, s. 535) mukaan tyypillinen paperin loppukosteus on 6–7 %, mutta käytännössä tämä vaihtelee jopa 4–8 % välillä paperilaadun mukaan.

Paperin valmistuksen viimeisenä osavaiheena voidaan pitää viimeistelyä. Tässä yhteydessä viimeistelyyn lasketaan kuuluvaksi paperin rullaus tampo-urille sekä paperin leikkaus asiakasmittoihin. Paperi rullataan tampo-urille paperikoneen lopussa kiinnirullaimen eli ns. popesylinterin avulla (Hägglom-Ahnger et al. 2001, s. 220). Rullainkokonaisuuteen voidaan

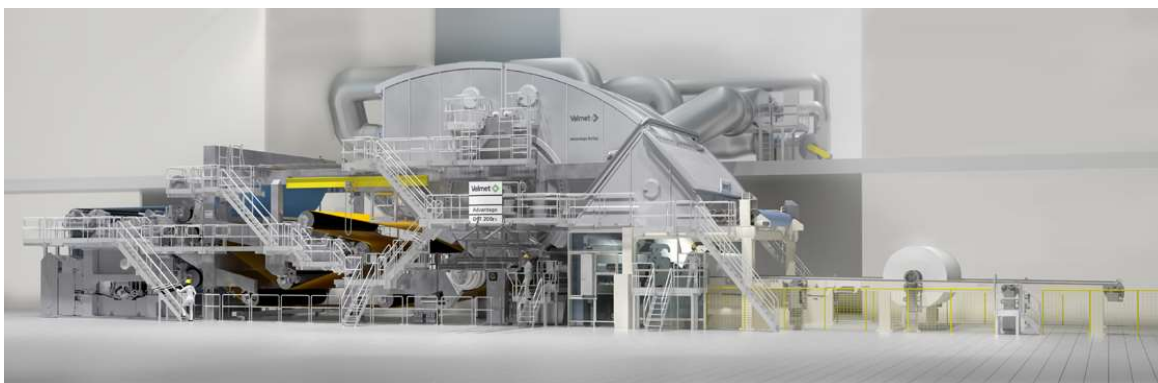
laskea kuuluvaksi popesylinteri, tampuurirautojen hallinta ja käsittelylaitteet. Valmistunut tampuuri leikataan asiakasmittoihin pituusleikkurin avulla. Tässä yhteydessä pituusleikkausvaihetta ei tarkastella tarkemmin, koska sillä ei ole merkitystä tutkimuksen toteutuksen tai tulosten kannalta.

Kuvassa 8 on kuvattu lohkokkaavion avulla Mäntän PK10:n osaprosesseja. Osaprosesseja ei käytännössä kuitenkaan voi jakaa täysin omiksi osaprosesseikseen vaan toimiakseen paperikone tarvitsee näitä jostaista osavaihetta. Huomioitavaa on, että kiinteästi paperikoneeseen kuuluvia vaiheita ovat perälaatikko, viiraosa, puristinosa, kuivatusosa sekä rullain. Myös lyhyt kierto voidaan laskea kuuluvaksi paperikoneeseen, mutta tässä tarkastelussa se eriytetään, koska siihen kuuluu runsaasti muita vaiheita, joita ei sinällään lasketa kuuluvaksi itse paperikoneeseen.



Kuva 8: PK10:n paperin valmistukseen liittyvät pääprosessivaiheet

Pehmopaperikone eroaa perinteisestä hienopaperikoneesta erityisesti puristinosa ja kuivatusosa suhteen. Pehmopaperikoneen puristin- ja kuivatusosat ovat osin fyysisesti samalla alueella, koska puristinosaan toteutetaan kuivatusosaan kuuluvaa jenkki-sylinteriä vasten. Kuvassa 9 on nähtävissä Valmet Oyj:n valmistama tyypillinen kenkäpuristimella varustettu pehmopaperikone. Kuvan vasemmalla puolella nähtävissä viiraosa, minkä jälkeen koneessa sijaitsee puristinosa oheislaitteineen. Keskellä kuvaa nähtävissä jenkki-sylinteri sekä kuivatushuuva. Kuvan oikealla puoliskolla on nähtävissä rullausosa oheislaitteineen.



Kuva 9: Pehmopaperikoneen sivukuva (Valmet Oyj 2023)

### 3.2 Energian käyttö paperin valmistuksessa

Paperiteollisuudessa energiakustannukset ovat materiaalikustannusten ohella suurimpia yksittäisiä kulueriä muuttuvien kustannusten piirissä. Energiakustannukset ja niihin liittyvät asiat onkin tunnistettava, jotta niihin pystyttäisiin vaikuttamaan. Puutteellinen informaatio energiakustannuksista saattaa olla merkittävä este energiatehokkuuteen liittyvien toimenpiteiden toteuttamiselle (Mickovic ja Wouters 2020, s. 24–25). Mickovic ja Wouters (2020, s. 24–25) toteavat tutkimuksensa johtopäätöksissä, että ainoastaan pieni osa tuotantoa harjoittavista yrityksistä hakee aktiivisesti menetelmiä energiankulutuksen mittaamiseen. He myös lisäävät, että tarkka ja joustava kustannusten seurantarjestelmä voi tukea energiatehokkuuteen liittyvissä toimissa.

Paperin valmistuksessa eri energijakeita käytetään lukuisissa eri prosessin vaiheissa. Vuonna 2005 paperi- ja selluteollisuuden käyttämä energia oli noin 6 % kaikesta maailman teollisuuden energian käytöstä. Energiankulutuksen aiheuttama kustannus onkin yksi merkittävimmistä kustannuseristä paperi- ja selluteollisuudessa. Vuosituhannen alun Euroopassa paperiteollisuuden energiakustannus vaihteli tasolla 15–19 % paperiteollisuuden kokonaiskustannuksista. Vuonna 2008 osuus nousi jopa 30 %:n tasolle (Laurijssen et al. 2013, s. 49). Nykyisestä tilanteesta ei ole tarkkaa kuvaa, mutta vuoden 2022 aikana tapahtunut raju energiahintojen nousu heikensi tilannetta entisestään.

Paperin valmistuksessa energian käyttö tapahtuu useissa eri prosessivaiheissa vaihdellen mm. konekonstruktioiden mukaan. Taulukossa 4 kuvataan eri paperilaatujen valmistamiseen

tarvittavaa energiamäärää. Taulukosta käy hyvin ilmi, miten tissue-paperin valmistamiseen vaadittava energiamäärä on poikkeuksellisen suuri verrattuna muihin paperilaatuihin. Tutkimustulokset osoittavat, että tissue-paperin valmistuksessa massankäsittely sekä esikuivatus näyttelevät poikkeuksellisen suurta osuutta muihin prosesseihin verrattuna (Laurijssen et al. 2013, s. 61). Taulukon 4 luvuista havaitaan, että yksittäisistä osaprosesseista suurimpia energiankuluttajia ovat kuivatus ja massan käsittely.

Taulukko 4: Keskimääräinen energian ominaiskulutus prosesseittain eri paperilaaduilla (mukaiillen Laurijssen et al. 2013, s. 49)

	Siistaus (MWh/tn)	Dispergointi (MWh/tn)	Massan käsittely (MWh/tn)	Viira- ja puristinos (MWh/tn)	Esikuivatus (MWh/tn)	Päällystys ja lamiointi (MWh/tn)	Jälkikuivatus (MWh/tn)	Muut prosessit (MWh/tn)	Yhteensä (MWh/tn)
Kartonki	0	0	0,3	0,4	1,3	0	0,1	0,1	2,1
Graafinen paperi	0	0	0,8	0,4	1,3	0,1	0,7	0,2	3,5
Tissue	0,2	0,4	0,9	0,5	1,9	0	0	0,1	4,1
Muut	0,2	0,1	0,3	0,4	1,4	0	0,1	0,1	2,6

Taulukossa esitetyt tyypilliset luvut eivät ole välttämättä yleistettävissä koko toimialalle. Esitetyt luvut ovat suhteellisen korkeita ja todennäköisesti useat tehdasyksiköt pystyvät toimimaan tehokkaammalla tasolla. Vertailutietoa asiaan liittyen ei ole juurikaan saatavilla. Yksittäisten yritysten sisällä energian käyttöön liittyvät vertailut toteutetaan oman yrityksen toisiin koneisiin, jolloin tiedot ovat suurella todennäköisyydellä tarkempia. Geneerisiin lukuihin vertaaminen ei välttämättä tuota luotettavaa informaatiota yrityksen energian kuluksi liittyvästä tilanteesta.

Kokonaisenergiankulutuksen kannalta puristinosan toiminta ja tehokkuus ovat tärkeitä tekijöitä kustannustehokkaan toiminnan kannalta. Jos puristinosalla ei pystytä nostamaan paperin kuiva-ainetta riittävästi, joudutaan paperia kuivaamaan enemmän lämmittämällä. On arvioitu, että 1 %-yksikön nousu puristinosalla vähentää kuivausenergian tarvetta 3–8 % (Berger, Shahri ja Farghadan 2021, s. 53). Paperiteollisuudessa yleisesti käytetään peukalosäätönä, että 1 %-yksikön kuiva-aineen nousu puristinosalla tarkoittaa 4 % säästöä kuivausenergiassa. Tämän vahvistavat myös Krochak ja Östlund (2017, s. 323) sekä Kullander,

Nilsson ja Barbier (2012, s. 951) tekemissään tutkimuksissa. Tämä voidaan osoittaa myös laskennallisesti.

$$KS = \frac{100-KAP}{KAP} = \frac{100-40}{40} = 1,5 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g kuitua}} \quad (5)$$

$$KS = \frac{100-KAP}{KAP} = \frac{100-41}{41} \approx 1,44 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g kuitua}} \quad (6)$$

$$\frac{1,5-1,44}{1,5} \approx 0,04 = 4\% \quad (7)$$

, missä

KS=Kosteussuhde ( $\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g kuitua}}$ )

KAP=Kuiva-ainepitoisuus (%)

Laskelma osoittaa, että yhden prosenttiyksikön nousu kuiva-ainepitoisuudessa vähentää poistettavaa vesimäärää noin 4 %, minkä ansiosta kuivatukseen tarvittava määrä vähenee samaiset 4 %. Laskelma on teoreettinen, mutta kuvaa ilmiötä riittäväällä tarkkuudella.

### 3.3 Energian kulutukseen vaikuttavia muuttujia

Paperikoneen kokonaisenergian kulutukseen vaikuttavat useat eri muuttujat. Tämän tutkimuksen kannalta tärkeässä roolissa on esim. paperin valmistuksessa käytettyjen kuituraaka-aineiden vaikutus energian kulutukseen. Vuonna 2012 tehdyssä tutkimuksessa on osoitettu, että paperikoneen puristinosan toimintaan vaikuttavat oleellisesti valitut kuituraaka-aineet sekä niiden käsittely (Kullander et al. 2012, s. 951). Kullander et al. (2012, s. 951) toteavat myös, että lehtipuukuidut sitovat havupuukuituja enemmän vettä itseensä, mutta toisaalta veden poisto on lehtipuukuidusta helpompaa. Helpompi veden poisto selittyy sillä, että lehtipuukuidun makrohuokosissa on havupuukuituja enemmän vettä, mikä tehostaa veden poistoa puristinosalla (Kullander et al. 2012, s. 951). Puristinosan toiminta on tärkeässä asemassa energian kulutuksen kannalta, kuten edellä luvussa 3.2 on osoitettu.

Kullander et al. (2012, s. 951) toteavat, että koelaitteistolla tehdyn tutkimuksen mukaan kuitujen jauhatuksella ei ole merkittävää vaikutusta energian kulutukseen ja kuiva-aineen nousuun. Tähän tutkimustulokseen on osittain suhtauduttava varauksella, koska

paperiteollisuuden yleisen nyrkkisäännön mukaan hienoainepitoisuuden kasvaminen jauhatusta lisäämällä lisää vedenpoistumisaikaa ja sitä kautta kuivatusenergian tarvetta (Lindqvist, Salminen, Kataja-aho, Retulainen, Fardim ja Sundberg. 2012, s. 892–893). Koelaitteistolla tehdyillä koeajoilla ei välttämättä pystytä täysin simuloimaan tehdasmittakaavaista prosessia, mikä saattaa vaikuttaa tutkimustuloksiin. Kullander et al. (2012, s. 951) ovatkin nostaneet loppupäätelmässään esille, että koelaitteistolla tehtävä jauhatus toteutetaan hyvin alhaisella intensiteetillä, mikä vähentänee oleellisesti hienoaineen muodostumista.

Pehmopaperin kokonaisenergian käyttöön vaikuttavia tekijöitä on useita, joista osalla tekijöistä vaikutus kokonaisenergian kulutukseen on merkittävämpi. Berger et al. (2021, s. 31) mukaan pehmopaperin valmistuksessa suurimmat energiaa kuluttavat prosessivaiheet ovat paperin kuivatus sekä kuitujen jauhatus muiden osa-alueiden jäädessä vähäisemmäksi. Heidän mukaansa toinen huomattava energiaa kuluttava vaihe on lyhyt kierto, jonka osuus kuitenkin jää kuivatusta ja jauhatusta selkeästi pienemmäksi.

## 4 Tutkimuksen kohdeyritys

### 4.1 Metsä Group

Metsä Group on suomalainen metsäteollisuusyritys, jonka omistaa Metsäliitto Osuuskunta. Metsäliitto Osuuskunta on nimensä mukaisesti jäsentensä omistama osuuskunta. Osuuskunnan omistajina on yli 90000 suomalaista metsänomistajaa. Metsäliitto Osuuskunnan omistama Metsä Group on metsäteollisuudessa toimiva yritys, jonka kokonaisliikevaihto vuonna 2022 oli noin 7,0 miljardia euroa liiketuloksen ollessa noin 1,3 miljardia euroa. Henkilöstöä Metsä Groupiin kuuluu yhteensä noin 9500 henkilöä. (Metsä Group 2023)

Metsä Groupiin kuuluu viisi eri toimialaa, jotka toimivat omina yrityksinään, mutta tekevät kuitenkin keskenään yhteistyötä monin eri tavoin. Metsä Groupin eri toimialat ovat seuraavat:

- Metsä Forest
- Metsä Wood
- Metsä Fibre
- Metsä Board
- Metsä Tissue

Metsä Forestin toimialaan kuuluu niin puunhankintaan kuin erilaisiin metsäpalveluihin liittyviä toimintoja. Liikevaihto Metsä Forestilla oli vuonna 2022 noin 2,1 miljardia euroa. Metsä Wood taas valmistaa erilaisia puutuotteita kuten esim. viilupuutuotteita. Liikevaihto Metsä Woodilla oli 2022 noin 0,6 miljardia euroa. Metsäliitto Osuuskunta omistaa Metsä Forestin ja Metsä Woodin kokonaisuudessaan eli omistusosuus on 100 %. (Metsä Group 2023)

Metsä Fibren toimialaan kuuluvat saha- ja selluteollisuus. Kokonaisliikevaihto Metsä Fibrellä oli vuonna 2022 noin 3,1 miljardia euroa. Metsä Board taas valmistaa tuotantolaitoksissaan taivekartonkia. Liikevaihto heillä oli vuonna 2022 noin 2,5 miljardia euroa.

Metsäliitto Osuuskunta omistaa niin Metsä Fibrestä kuin Metsä Boardista molemmista 50 %. (Metsä Group 2023)

## 4.2 Metsä Tissue

Metsä Tissue valmistaa pehmo- ja tiivispaperituotteita viidessä eri Euroopan maassa: Suomessa, Ruotsissa, Puolassa, Saksassa sekä Slovakiassa. Pehmopaperia valmistavia tehtaita on yhteensä kahdeksan kappaletta. Tämän lisäksi valmistetaan ruoanlaittoon tarkoitettuja papereita Saksassa sekä Suomessa Mäntän tehtaalla. (Metsä Tissue 2023a)

Metsä Tissue valmisti vuonna 2022 noin 540 000 tonnia pehmopaperia ollen yksi suurimmista Euroopassa pehmopaperia valmistavista yrityksistä. Samaisena ajankohtana yrityksen liikevaihto oli noin 1,2 miljardia euroa. Metsä Tissuen tehtailla valmistetaan pehmopapereita paikallisesti kohdemarkkinoille. Metsä Tissuen tekemien laskelmien mukaan yrityksen kohdemarkkinat kattavat 17 Euroopan maata ja 65 % Euroopan pehmopaperin käytöstä. (Metsä Tissue 2023a)

Metsä Tissuen Mäntän tehdas on perustettu vuonna 1868 Gustaf Adolf Serlachiuksen toimesta. Alkujaan tehtaalla valmistettiin puuhioketta, mutta jo vuonna 1908 tehtaalla alettiin valmistaa WC-papereita. Ruoanlaittopapereiden valmistus alkoi vuonna 1924. Nykyisin tehtaalla on kolme pehmopaperikonetta, yksi tiivispaperikone sekä 11 pehmopaperia jalostavaa jalostuslinjaa. Näiden lisäksi Mäntässä on yksi uusiomassaa valmistava siistauslaitos. (Metsä Tissue 2023a)

Metsä Tissuen Mäntän tehtaalla työskenteli vuonna 2022 yhteensä noin 430 henkilöä valmistuen noin 113 000 tonnia paperia vuodessa. Paperilaaduista tunnetuimpia brändejä ovat mm. Lambi, Serla, Katrin ja Saga. Tehtaalle on myönnetty useita erilaisia sertifikaatteja kuten esim. laatu-, ympäristö-, elintarviketurvallisuus- ja energianhallintajärjestelmiin liittyviä sertifikaatteja. (Metsä Tissue 2023b)



### 4.3 Metsä Tissuen strategia

Metsä Tissuen strategiana on edistää bio- ja kiertotaloutta valmistamalla laadukkaita pehmo- ja tiivispaperituotteita tehden ihmisten arjesta puhtaampaa. Pääraaka-aineena paperin valmistuksessa käytetään uusiutuvaa ensikuitua, joka on peräisin hoidetuista pohjoisista metsistä. Metsä Tissue pyrkii toimimaan lähellä asiakkaitaan ja tarjoamaan heille kestäväan käyttöön perustuvia hygieniaratkaisuja. Metsä Tissuen arvolupaus on tehdä puhtaampaa arkea. Visiona on olla asiakkaan halutuin kumppani kestävässä liiketoiminnassa. (Metsä Tissue 2023c)

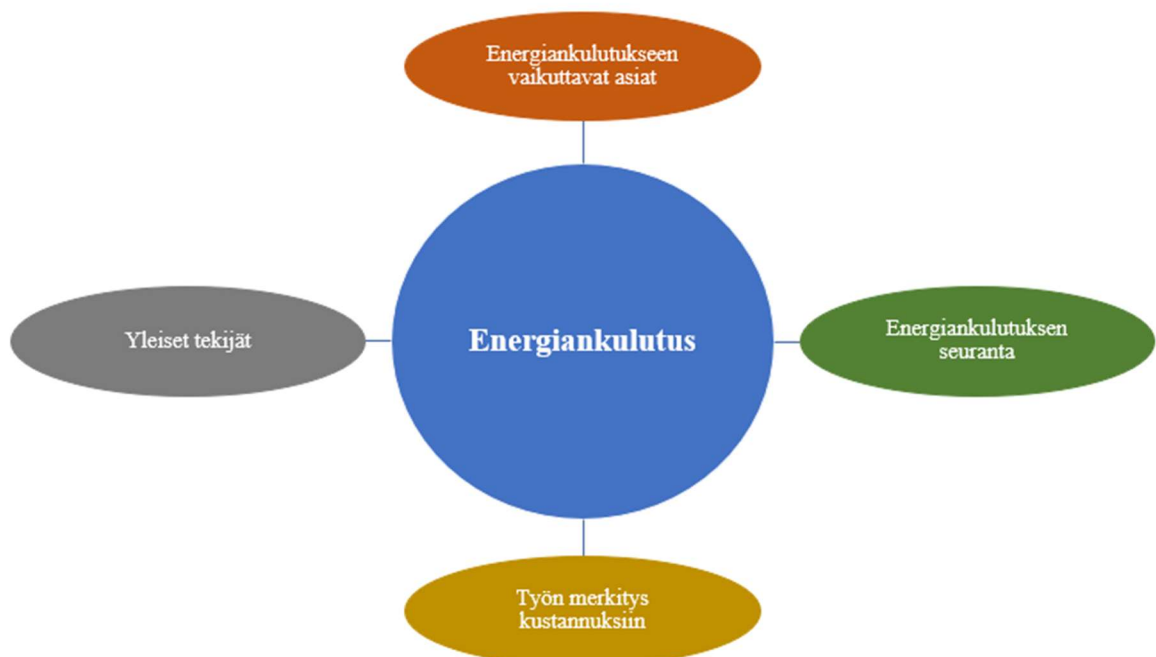
Metsä Tissue toteuttaa strategiaansa strategisilla ohjelmilla, jotka ovat Customer Focus-, Lean Supply Chain- ja Future Mill -ohjelmat. Customer Focus -ohjelman avulla yritys pyrkii kasvuun avainasiakkaidensa kanssa. Lean Supply Chain -ohjelmalla pyritään luomaan tehokas tarjooma ja arvolupaus paikallisille markkinoille. Future Mill -ohjelma pitää sisällään kestäväan kehitykseen perustuvan tehdasverkoston kehittämisen sekä ensikuituihin perustuvan huipputuottavuuden. (Metsä Tissue 2023c)

Metsä Tissue on tunnistanut viisi omaan toimintaansa keskeisesti vaikuttavaa megatrendiä: (1) tiedostava kuluttaminen, (2) resurssitehokkuus, (3) paikallisuus, (4) kestävä kehitys sekä (5) digitalisaatio. Tiedostava kuluttaminen liittyy ihmisten pyrkimykseen toimia vastuullisesti maapallon kantokyky huomioiden. Resurssitehokkuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä luonnonvarojen kestäväa käyttöä sekä jätemäärien vähentämistä. Paikallisuus liittyy yrityksen toimimiseen paikallisesti, mikä vähentää kuljetustarpeita sekä tukee paikallista työllisyyttä. Kestäväällä kehityksellä tarkoitetaan ilmastonmuutoksen hallitsemista ja muita siihen liittyviä asioita. Kuten edellä on todettu, Metsä Gropin ja Metsä Tissuen tavoitteena on fossiilivapaa tuotanto vuoteen 2030 mennessä. Digitalisaatio liittyy kuluttajakäyttäytymiseen, asiakaskokemukseen sekä teollisuuteen yleisesti. Digitalisaation vuoksi keräyspaperin saatavuus heikkenee, mikä osaltaan vahvistaa ensikuidun merkitystä paperin valmistuksessa. (Metsä Tissue 2023c)

## 5 Tutkimuksen toteutus

### 5.1 Teemahaastattelu

Empiirinen osuus suunniteltiin aloitettavaksi teemahaastattelulla, jossa kartoitetaan nykytilaa energiankulutukseen liittyvien asioiden osalta. Haastatteluilla pyrittiin saamaan kuva tutkimuskohteesta erityisesti työntekijöiden näkökulmasta. Toisaalta tutkimuksella pyrittiin selvittämään, miten esimiehet ja paikallisjohto näkevät työntekijöiden mahdollisuudet vaikuttaa energiankulutukseen. Haastattelun tavoitteena oli siis saada erityisesti tietoa työntekijöiden roolista paperikoneen energiankulutuksessa. Haastateltavat henkilöt voitiin jakaa kolmeen eri ryhmään: työntekijät, asiantuntijat sekä tehtaan paikallisjohto. Haastattelun kysymykset rakennettiin siten, että ilmiöstä saataisiin mahdollisimman realistinen kokonaiskuva, minkä vuoksi kysymysten muoto vaihteli eri haastatteluryhmän mukaisesti. Haastattelutapahtuma oli kuitenkin vapaamuotoinen ja keskustelun annettiin tarvittaessa rönsyillä. Haastatteluiden aihetta, energiankulutusta, tutkittiin neljän eri teeman mukaisesti. Teemat nähtävissä kuvassa 10.



Kuva 10: Teemahaastattelun neljä eri teemaa

Energiankulutuksen seuranta -teemalla pyrittiin selvittämään, miten energiankulutusta seurataan ja tukevatko olemassa olevat järjestelmät tätä seurantaa. Työn merkitys kustannuksiin -teemalla kartoitettiin, miten hyvin työntekijät ymmärtävät paperin valmistukseen liittyvän kustannusrakenteen. Energiankulutukseen vaikuttavat asiat -teemalla selvitettiin, mitä tekijöitä työntekijät pitävät tärkeänä kokonaisenergiankulutuksen kannalta. Neljänteen teemaan, yleiset tekijät, listattiin kysymykset, jotka eivät sopineet kolmeen edellä mainittuun teemaan.

Teemahaastattelun tietojen luotettavuuteen kiinnitettiin erityistä huomiota, koska haastatella oli esimiessuhteessa useisiin haastateltaviin nähden. Haastattelutilanne pyrittiin luomaan luottamukselliseksi ja avoimeksi, jotta henkilöstö olisi kertonut mahdollisimman totuudenmukaisesti omat mielipiteensä tutkittavaan ilmiöön liittyen. Jokaiselle haastateltavalle esiteltiin ennen haastattelua tutkimuksen tavoite sekä kerrottiin tutkimukseen liittyvistä taustoista. Jokaisella haastatellulla oli myös mahdollisuus kieltäytyä haastattelusta niin halutesaan. Haastattelut järjestettiin erillisessä tilassa, jotta häiriötekijät olisivat olleet minimaaliset haastattelun aikana. Ennakkoarvion ja tehtyjen koehaastatteluiden perusteella yhden haastattelun kestoksi arvioitiin noin yksi tunti. Haastattelun suunnitteluvaiheessa päätettiin, että haastattelutilaisuutta ei tallenneta, vaan kaikki muistiinpanot tehdään haastattelun aikana tai välittömästi sen jälkeen. Tallennus päätettiin jättää toteuttamatta, koska tallentamisella saattaa olla tietyissä tapauksissa vaikutusta ihmisten vastaamiskäyttäytymiseen. Pienen otoksen ansiosta haastattelut pystyttiin toteuttamaan ilman tallennusmahdollisuutta.

Taulukossa 5 on kuvattu työntekijöille, asiantuntijoille ja paikallisjohdolle esitetyt kysymykset. Kysymykset toimivat runkona, mutta kysymysten muoto saattoi vaihdella ja elää haastattelun aikana. Haastattelun aikana olisi saattanut tulla myös uusia kysymyksiä, jos keskustelu olisi johtanut hedelmällisen aiheen pariin. Haastattelulomakkeet ovat nähtävillä liitteissä 1, 2 ja 3.

Taulukko 5: Teemahaastattelun kysymykset

Teema	Työntekijät	Asiantuntijat	Paikallisjohto
Energiankulutukseen vaikuttavat asiat	Mitkä tekijät mielestäsi vaikuttavat eniten paperikoneen energiankulutukseen?	Mitkä tekijät omasta mielestäsi vaikuttavat eniten paperikoneen energiankulutukseen?	Tukevatko olemassa olevat järjestelmät riittävästi energiankäytön optimointia?
	Onko energiankulutusta mahdollista vähentää operaattorin toimesta? Jos on, niin miten?	Onko energiankulutusta mahdollista vähentää tuotanto-operaattorin toimesta? Jos on, niin miten?	Onko operaattoreilla ja vuorotyönjohdolla riittävästi valtuuksia tehdä muutoksia paperin valmistusprosessiin kustannusten minimoimiseksi?
Energiankulutuksen seuranta	Miten seuraat energian kulutusta paperin valmistuksen aikana?	Miten operaattorit seuraavat energiankulutusta paperin valmistuksen aikana?	
	Mahdollistavatko käytettävissä olevat työkalut energiankulutuksen seurannan? Jos kyllä, niin miten?	Mahdollistavatko käytettävissä olevat työkalut operaattoreiden tekemän energiankulutuksen seurannan? Jos kyllä, niin miten?	
		Onko esimiehillä riittävästi mahdollisuuksia vaikuttaa paperin valmistusprosessiin energian kulutuksen minimoimiseksi? Jos kyllä, niin miten?	
Työn merkitys kustannuksiin	Onko operaattoreilla riittävästi tietoa kokonaiskustannusten muodostumisesta? Mitkä ovat mielestäsi tärkeimpiä tekijöitä?	Onko operaattoreilla riittävästi tietoa kokonaiskustannusten muodostumisesta?	Ovatko nykyiset järjestelmät riittäviä kustannusten minimoimisen näkökulmasta? Käytetäänkö järjestelmiä optimaalisesti?
Yleiset tekijät	Pääsevätkö työntekijät osallistumaan riittävästi kehityshankkeisiin? Jos kyllä, niin miten?	Pääsevätkö työntekijät osallistumaan kehityshankkeisiin? Jos kyllä, niin miten?	Mitä teidän näkemystenne mukaisesti pitäisi tehdä/ kehittää energiankulutuksen ja kustannusten minimoimiseksi?
	Mitä näkemyksenne mukaan pitäisi tehdä/ kehittää energian kulutuksen ja kustannusten minimoimiseksi?	Mitä näkemyksenne mukaisesti pitäisi tehdä/ kehittää energiankulutuksen ja kustannusten minimoimiseksi?	

## 5.2 Paperikoneella suoritettavat koeajot

Paperikoneella suunniteltiin toteutettavaksi yhteensä kolme koeajoa, joista jokainen toteutettiin omina päivinään. Päällekkäisiä koeajoja vältettiin, jotta tutkimustulokset eivät olisi vääristyneet ja tulosten tulkinta vaikeutunut. Koeajot aloitettiin kuitukoeajoilla, joilla

selvitettiin eri kuitujakeiden vaikutusta energian kulutukseen. Kuitukoeajoilla haettiin eroavaisuuksia viiden eri kuitukoostumuksen välillä:

1. pitkäkuituvoittoinen resepti, jossa mukana myös lyhyttä kuitua sekä BCTMP:tä
2. Pitkäkuituvoittoinen resepti, jossa lyhyen kuidun osuus reseptiä 1 suurempi. BCTMP:n osuus reseptiin 1. verrattuna oleellisesti pienempi.
3. pitkän kuidun ja lyhyen kuidun osuudet toisiaan vastaavat
4. lyhytkuituvoittoinen resepti, jossa mukana myös pitkää kuitua
5. pitkäkuituinen resepti, jossa mukana myös lyhyttä kuitua

Kuitukoostumuksia ei voitu muuttaa täysin rajattomasti, koska paperin laadun piti täyttää varmuudella kaikki laatuvaatimukset. Toisaalta ei olisi ollut mielekästä tutkia energian tuottavuutta ja kustannustehokkuutta tuotteella, jota ei olisi voinut myydä asiakkaalle epäkuranttin laadun vuoksi.

Varsinainen koeajo paperikoneella suunniteltiin aloitettavaksi siinä vaiheessa, kun ajo-olosuhteet olisivat stabiloituneet paperikoneella. Tämä todennettaisiin koeajon aikana visuaalisesti. Käytännössä tämä havaittaisiin laatusäätöjärjestelmistä; online -mittausten näyttäessä vakaita lukemia voitaisiin prosessin olettaa olevan stabiilissa tilassa. Yksittäinen koeajovaihe kestäisi ennakoarvioiden mukaan noin kaksi tuntia, minkä jälkeen paperikoneella suoritettaisiin siirtyminen kuitukoostumukseen numero 2. Vastaavasti vaihtoehdon 2 alussa seurattaisiin, milloin prosessi on stabiloitunut, minkä jälkeen aloitettaisiin varsinainen koeajo ja tulosten kerääminen. Vastaavalla menetelmällä suunniteltiin toteutettavaksi kaikki viisi koeajopistettä. Kuitukoostumukseen liittyvän koeajon aikana prosessissa vakioitaisiin tuotantonopeus ja kenkäpuristimen viivakuorma. Kuitujen jauhatusta jouduttaisiin koeajopisteiden välillä muuttamaan, mutta muutokset pyrittäisiin tekemään mahdollisimman nopeasti vaihteluiden minimoimiseksi. Hypoteesina oli, että BCTMP tulisi olemaan energian tuottavuuden kannalta heikoin, mutta lyhyen ja pitkän kuidun välissä ei olisi merkittävää eroavaisuutta.

Toisella koeajolla suunniteltiin tutkittavaksi paperikoneen tuotantonopeuden vaikutusta energian ominaiskulutukseen ja kokonaistaloudellisuuteen. Tietyissä olosuhteissa maksimaalinen ajonopeus ei ole välttämättä optimaalisin vaihtoehto taloudellisuuden näkökulmasta. Tutkimus suunniteltiin toteutettavaksi muuttamalla paperikoneen ajonopeutta välillä

1300 m/min – 1500 m/min samalla energian ominaiskulutuksia seuraten. Tämän pisteen koeajotuloksissa huomioitaisiin myös korkeammalla ajonopeudella saatu lisätuotanto. Hypoteesi oli, että energian tuottavuus ei juurikaan muuttuisi tuotantonopeuden noustessa eli ominaisenergiankulutus pysyisi vakiona tuotantonopeuden kasvaessa.

Kolmas paperikoneella tehtävä koeajo käsitteli paperin loppukosteuden vaikutusta energian tuottavuuteen sekä kokonaiskustannuksiin. Loppukosteudella ymmärrettiin olevan vaikutusta myös materiaalin osatuottavuuteen, mutta se jätettiin analysoimatta tutkimusrajoituksen puitteissa. Koeajo suunniteltiin toteutettavaksi muuttamalla paperin loppukosteutta välillä 4,0 % - 6,8 %, jos paperin laatuarvot tämän sallisivat. Muutokset tehtäisiin 0,4 %-yksikön välein. Koeajon aikana vakioitaisiin paperikoneen tuotantonopeus sekä kenkäpuristimen viivakuorma. Koeajossa pyritäisiin ensisijaisesti muuttamaan kaasun kulutusta, mutta myös höyryn kulutusta saatettaisiin joutua muuttamaan. Hypoteesimielessä energian tuottavuus tulee kasvamaan aina loppukosteuden noustessa. Oletuksena oli myös, että energian kulutus olisi suurinta alhaisilla kosteuksilla.

Kolmen koeajon lisäksi päätettiin, että tehdastietojärjestelmien avulla analysoidaan lajinvaihtojen vaikutusta energian tuottavuuteen. Seuranta toteutettaisiin analysoimalla keskimääräistä lajinvaihtoaikaa ja sen aikana kulunutta energiaa. Saadun tiedon perusteella arvioidaisiin lajinvaihtojen vaikutusta energian tuottavuuteen ja kustannustehokkuuteen. Analyysi suoritettiin historiatietojen perusteella, jotta analyysiin saatiin mahdollisimman kattava otos. Jos analyysi olisi toteutettu esim. kahden viikon seurantajakson perusteella, olisivat tulokset saattaneet vääristää kokonaiskuva.

Kaikki koeajotulokset paperikoneella suoritetuista koeajoista saatiin paperikoneen omista järjestelmistä. Järjestelmät mittaavat lukuisia eri parametrejä, kuten esim. energian kulutusta, ja näitä tietoja hyödynnettiin lopullisessa tulosten analyysissä. Mittajärjestelmät kalibroidaan säännöllisesti, minkä ansiosta luotettavuus saatiin koeajotuloksiin voitiin olettaa hyväksi.

## 6 Empiirinen tutkimus

### 6.1 Teemahaastattelu

Teemahaastattelut toteutettiin yksilöhaastatteluna erillisessä neuvotteluhuoneessa mahdollisimman keskusteleavassa hengessä. Tutkimuskysymykset ja kirjattavat vastaukset olivat haastattelun aikana haastateltavan nähtävillä, minkä ansiosta haastateltavalla oli mahdollisuus kommentoida kirjattaviin muistiinpanoihin. Haastatteluiden alussa haastateltavalle kerrottiin, mihin haastattelutuloksia käytetään ja miksi haastattelu toteutetaan. Samalla haastateltaville kerrottiin, että haastateltavan nimi ei tule näkymään tutkimusraportissa. Haastatelluilla henkilöillä oli mahdollisuus kieltäytyä haastattelusta niin halutessaan. Haastattelut kestivät lyhimmillään noin 40 minuuttia ja pisimmillään 65 minuuttia. Keskiarvallisesti haastattelujen kesto oli noin 50 minuuttia.

Haastatelluista henkilöistä neljä työskenteli paperikoneen työntekijätehtävissä, neljä erilaisissa tuotannon asiantuntijatehtävissä sekä yksi henkilö tehtaan johdossa. Haastateltavia henkilöitä ei valittu sattumanvaraisesti vaan valinta perustui tutkimusta tekevän henkilön aiempaan tuntemukseen tutkittavasta alueesta ja yrityksen henkilöstöstä. Haastattelun aikana myös korostettiin, että kysymyksiin ei ole vääriä vastauksia, vaan tavoite on kartoittaa nykytilaa tutkittavan ilmiön ympärillä.

Haastatelluilla kolmella eri ryhmällä oli monessa aihealueessa toisistaan eroavat kysymykset. Tämä oli tietoinen valinta kysymyksiä laadittaessa. Tavoitteena tällä eroavaisuudella oli saada mahdollisimman kattava näkemys nykytilasta ja siihen vaikuttavista asioista. Mielenkiintoista oli myös havaita, että kysymysten eroavaisuudesta huolimatta keskustelu pyöri usein samojen teemojen ja aiheiden piirissä. Haastattelukysymykset liittyivät neljään eri näkökulmaan: (1) energiankulutukseen vaikuttavat asiat, (2) energiankulutuksen seuranta, (3) työn merkitys kustannuksiin sekä (4) yleiset tekijät.

## **Energiankulutukseen vaikuttavat tekijät**

Energiankulutukseen yleisesti vaikuttavat tekijät koettiin haastattelun perusteella ymmärrettävän samalla tavalla eri organisaatiotasolla joitain hienoisia eroja lukuun ottamatta. Työntekijätasolla suurimmat tekijät nähtiin liittyvän paperin valmistusta koskeviin ajoteknisiin tekijöihin. Haastattelussa esiin nousi useasti paperikoneen kuivatushuuvan ja jenkkisylinterin välinen kuivatussuhde eli kummalla tekijällä on suurempi osuus kuivatuksessa. Toinen usein esiin noussut tekijä liittyi käytettäviin kuitulaatuihin ja niiden eroavaisuuksiin kuivatusenergian tarpeessa. Merkittävänä tekijänä nähtiin myös yleiset paperitekniset laatutavoitteet. Laatutavoitteilla on merkitystä käytettävään energiankulutukseen esim. paperin loppukosteustavoitteen muodossa. Neljäs usein esiin noussut tekijä oli paperikoneen veden käyttö eli ns. vesitalous. Tällä käytännössä tarkoitettiin minimaalista veden käyttöä paperikoneella, jolloin energiaa ei tarvitse käyttää kylmien vesien lämmittämiseen. Viides yleisesti esiin noussut tekijä oli paperikoneen tuotantonopeus ja sen vaikutus energiankulutukseen. Muut esiin nousseet tekijät esiintyivät työntekijöiden haastatteluissa harvemmin.

Työntekijät myös näkivät, että heillä on mahdollisuuksia pienentää omilla toimillaan energiankulutusta. Selvimmin esiin nousi kaksi tekijää: jenkkisylinterin ja kuivatushuuvan välinen kuivatussuhde sekä tavoitteen mukaiset laatuarvot. Esiin nousi myös muita mahdollisuuksia, mutta ne olivat vähemmistössä. Näitä mahdollisuuksia olivat mm. kenkäpuristimen optimaalinen ajomalli.

Asiantuntijoiden haastattelussa hajonta näkemyksissä oli suurta eikä selkeitä yhteneväisyyksiä ollut havaittavissa. Haastatteluissa nousi esiin useimmiten paperikoneen vesitalous ja sen vaikutus kuivatusenergian tarpeeseen. Muilta osin vastaukset erosivat ja ”samoja” vastauksia ei ollut havaittavissa. Tärkeinä tekijöinä pidettiin mm. paperin valmistusta laatutavoitteiden mukaisesti, käytettäviä kuitulaatuja sekä yleistä tehokkuutta. Esiin nousi myös henkilöstön osaamistason vaikutus energiankulutukseen. Syytä vastausten laajaan skaalaan verrattuna työntekijöiden näkemyksiin on vaikea arvioida. Yksi mahdollinen syy saattaa liittyä tarkastelukulman vaihtumiseen. Jokainen henkilö analysoi kysymyksiä omista lähtökohdistaan ja sillä saattaa olla vaikutusta lopulliseen vastaukseen.

Asiantuntijat näkivät työntekijöiden tavoin, että tuotanto-operaattoreilla on mahdollista vähentää paperin valmistuksen energiankulutusta oikeilla toimilla. Asiantuntijat näkivät yleisimmin, että ohjeistuksien noudattaminen ja ohjeistuksien laadinta ovat merkittäviä tekijöitä



energiankulutuksen minimoimisessa. He myös nostivat esiin, että tuotantoprosessin seurannalla sekä jenkin ja kuivatushuuvan välisellä kuivatussuhteella on vaikutusta energiankulutuksen pienentämisessä. Muita yksittäisiä esiin nousseita keinoja olivat mm. kuitukoostumuksen vähittäinen muuttaminen sekä laitteistojen suunnitelmallinen ennakoiva kunnossapito.

Tehtaan johdon haastattelussa nousi esiin energiankulutuksen mittaamisen tärkeys. Johdon näkemyksen mukaan energiankulutusta on mitattava jokaisen energiajakeen osalta, mutta tärkeää on huomioida myös tavoitetaso eli pelkkä mittaaminen ei ole riittävää. Kattavalla energiaan liittyvällä mittaristolla operaattori pystyy näkemään oman työnsä vaikutuksen energiankulutukseen välittömästi ja tämä osaltaan mahdollistaa parhaiden käytäntöjen jakamisen uusille henkilöille. Esiin nousi myös puute nykyiseen suorituskvyn mittaristoon liittyen; nykyinen mittaristo ei anna riittävästi informaatiota lyhyen aikavälin päätöksiä varten.

Keskusteltaessa tehtaan johdon kanssa työntekijöiden ja työnjohdon mahdollisuuksista vaikuttaa paperin valmistusprosessiin, nousi esiin muutamia tekijöitä. Yrityksen tavoitteena on aina tuottaa paperia maksimaalisella tuotantonopeudella laatuarvot huomioiden. Johdon näkemyksen mukaan henkilöstöllä on mahdollisuus tehdä tuotantoprosessin sisällä itsenäisesti valintoja annettujen raamien sisällä pysyttäessä.

### **Energiankulutuksen seuranta**

Haastattelujen perusteella työntekijöiden energiankulutuksen seuranta liittyi pääsääntöisesti energiankulutuksen sekundäärisiin asioihin, ei itse energiankulutukseen. Näitä sekundäärisiä asioita olivat paperin kuivatusvaiheen lämpötilatasot, vedenkulutus ja paperin toteutuneet laatuarvot kuten paperin loppukosteus. Esiin nousi myös kuitujen jauhatus ja sen vaikutus kokonaisenergiankulutukseen. Vastaukset olivat yhteneviä lähes kaikkien työntekijöiden osalta.

Vastaukset yhtenivät työntekijöillä myös keskusteltaessa nykyisten työkalujen ja järjestelmien toimivuudesta energiankulutuksen seurannassa. Jokaisessa keskustelussa nousi esiin nykyjärjestelmien puutteellisuus, ja vastausten perusteella energiankulutuksen seuranta ei ole kaikilta osin mahdollista.

Asiantuntijoiden näkemykset operaattoreiden mahdollisuuksista seurata energiankulutusta vastasivat suurelta osin työntekijöiden näkemystä. Myös asiantuntijat nostivat esiin energiankulutuksen sekundäärisen seurannan eli seuranta ei liity suoraan itse energiankulutukseen.

Vastaukset yhtenivät myös työkalujen ja järjestelmien soveltuvuudesta energiankulutuksen seurantaan. Käytännössä järjestelmät eivät nykyisin mahdollista tätä toimenpidettä. Asiantuntijoiden haastattelussa keskusteltiin myös esimiesten mahdollisuudesta vaikuttaa energiankulutuksen minimointiin. Jokaisessa haastattelussa nousi esiin keinoja, mutta tässä kysymyksessä vastausten välinen eroavaisuus oli huomattava. Yleisimmin esiin nousi erilaiset ohjeistukset ja koulutukset sekä mahdollisuudet nostaa investointitarpeita esiin. Yleisellä tasolla kuitenkin asiantuntijat näkivät, että esimiehillä on mahdollisuus vaikuttaa tuotantoprosesseihin energiankulutuksen minimoinnin näkökulmasta. Täysin vastaava näkemys nousi esiin myös tehtaan johdon haastattelussa, vaikkakaan kysymystä ei suoraan esitettykään, mutta näkemys nousi esille keskusteluiden aikana.

### **Työn merkitys kustannuksiin**

Työntekijöiden haastattelussa nousi selkeästi esiin, että henkilöstöllä ei ole tarkkaa tietoa kustannusten muodostumisesta ja suuruusluokasta. Yleisellä tasolla oli tiedossa, että merkittävimmät kustannuserät paperin valmistuksessa ovat kuitukustannukset sekä energiaan liittyvät kustannukset. Tiedossa ei kuitenkaan ollut suuruusluokkaa, ja epätietoisuutta oli myös omien työhön liittyvien valintojen merkityksestä muodostuviin kustannuksiin. Asiantuntijoiden haastattelussa näkemykset yhtyivät työntekijöiden näkemyksiin. Asiantuntijoiden mukaan työntekijöillä on ainoastaan vähän tietoa kustannusrakenteesta, mutta haastattelujen perusteella myös asiantuntijat kokevat, että heillä itsellään ei ole riittävästi tietoa kustannuksista.

Tehtaan johdon haastattelussa kysyttiin, tukevatko järjestelmät kustannusten minimointia. Haastattelun perusteella nykyjärjestelmät eivät suoraan tue kustannusten minimointia. Toisaalta olemassa olevia järjestelmiä käytetään oikein, mutta niiden vaikutus kustannusten minimointiin on välillinen. Haastattelun aikana käydyssä keskustelussa nousi esiin myös tarve henkilöstön kustannustietoisuuden kehittämistä.

### **Yleiset tekijät**

Työntekijöillä oli melko yhtenevä näkemys työntekijöiden mahdollisuuksista osallistua erilaisiin kehityshankkeisiin, mutta esiin nousi myös näkemyksiä, joiden mukaan osallistuminen tai tiedottaminen eivät aina ole riittäviä. Työntekijöiden mukaan he ovat päässeet mukaan esim. investointien projektiryhmään ja päässeet sitä kautta vaikuttamaan erilaisiin hankkeisiin. Asiantuntijoiden näkemykset olivat vastaavan kaltaisia, mutta myös heiltä

nousi esiin näkemyksiä, joiden perusteella henkilöstön osallistaminen erilaisiin hankkeisiin ei aina ole riittävää. Asiantuntijoiden vastausten mukaan työntekijöiden osallistuminen erilaisiin projekteihin on kuitenkin melko normaali käytäntö ja tavoitteena tässä on saada työtä tekevien henkilöiden näkemys hankkeeseen parhaan mahdollisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Yleisellä tasolla niin työntekijät kuin asiantuntijat näkivät osallistamisen olevan riittävää, mutta osallistamista voisi myös lisätä.

Haastattelun viimeisessä vaiheessa kartoitettiin ehdotuksia energiankulutuksen ja kustannusten minimointiin. Työntekijöiltä nousi runsaasti ehdotuksia, minkä vuoksi hajonta vastauksissa oli suurta. Yhteneväisyyksiä oli kuitenkin havaittavissa erityisesti käytettävän kuiturakenteen osalta. Työntekijät ehdottivatkin, että erilaisille paperilaaduille on haettava mahdollisimman optimaalinen kuitukoostumus, jolloin sekä energiankulutus että kustannukset pystyttäisiin minimoimaan. Muita esille nousseita asioita olivat mm. yleisen kustannustietoisuuden parantaminen, lajinvaihtomäärien minimoiminen sekä optimaaliset laatutavoitteet. Asiantuntijoiden vastaukset poikkesivat osittain työntekijöiden vastauksista, mutta myös yhteneväisyyttä oli selkeästi havaittavissa. Asiantuntijat nostivat esille erityisesti suorituskyvyn mittaamisen kehittämisen, kustannustietoisuuden parantamisen sekä henkilöstön koulutuksen. Asiantuntijat painottivat myös investointien merkitystä toiminnan kehittämisessä. Tehtaan johdon kommentit voidaan rinnastaa moneltakin osin muiden ryhmien vastauksiin. Tehtaan johto painotti erityisesti suorituskyvyn mittaamista ja mitattuun tietoon perustuvaa johtamista ja päätöksentekoa. Esiin nousi myös kustannustietoisuuden parantamisen merkitys toiminnan kehittämisessä.

## 6.2 Kuitukoostumuksen vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin

Kuitukoostumuksen vaikutusta energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin tutkittiin vertaamalla viittä eri kuitukoostumusta keskenään. Olosuhteet pyrittiin mahdollisuuksien mukaan vakioimaan, mutta laatu teknisten syiden vuoksi koeajon aikana jouduttiin ajoasetuksia muuttamaan jokaisen kuitukoostumuksen välillä. Tämä sinällään ei vaikuta koeajotulosten arviointiin, koska pyrkimyksenä oli arvioida kokonaisvaikutuksia, jolloin

myös laadullisten tekijöiden vaikutus energiankulutukseen tulee huomioiduksi. Paperikoneen tuotantonopeus ja paperin loppukosteus pidettiin vakiona koko koeajon ajan.

Kuitukoostumukset koeajossa olivat seuraavat:

1. pitkäkuituvoittoinen resepti, jossa mukana myös lyhyttä kuitua sekä BCTMP:tä
2. Pitkäkuituvoittoinen resepti, jossa lyhyen kuidun osuus reseptiä 1 suurempi. BCTMP:n osuus reseptiin 1. oleellisesti pienempi.
3. pitkän kuidun ja lyhyen kuidun osuudet toisiaan vastaavat
4. lyhytkuituvoittoinen resepti, jossa myös mukana pitkää kuitua
5. pitkäkuituinen resepti, jossa mukana myös lyhyttä kuitua

Koeajon toteutusjärjestys meni yllä kuvatun numerojärjestyksen mukaisesti. Eri koeajovaiheiden välissä prosessi annettiin tasaantua siten, että prosessi oli silmämääräisesti tasainen. Tämä varmistettiin myös paperikoneen ohjausjärjestelmistä saadulla informaatiolla. Koeajon aikana seurattiin sähkö-, höyry- ja kaasunenergioiden ominaiskulutuksia ja niiden muutoksia. Jo ennen koeajon aloitusta tiedettiin, että kuitukoostumuksen vaihtelu saattaa aiheuttaa tarpeen kuitujen jauhatusmuutokselle, koska paperin lujuusominaisuudet tulisivat todennäköisesti muuttumaan. Tämä myös tapahtui koeajon aikana. Kokonaisuutena kuitukoeajo kesti noin kymmenen tuntia.

Kuitukoostumusten 1, 2 ja 3 aikana vähennettiin BCTMP:n suhteellista osuutta samalla lyhyen kuidun osuutta kasvattaen. Odotuksena oli paperin lujuustasojen kasvaminen BCTMP:n määrän pienentyessä. Tämä havaittiin toteutuvan koeajopisteiden välillä. Toisaalta odotuksena oli myös, että kuivatusenergian tarve tulee pieneneään, kuten koeajossa kävikin. Koeajopisteiden 3, 4 ja 5 välillä muutettiin vastaavasti pitkän ja lyhyen kuidun suhteellisia osuuksia.

Taulukossa 6 on kuvattuna indeksoitujen ominaisenergiankulutusten keskiarvot eri kuitukoostumuksilla. Taulukon ensimmäistä tulosriviä, resepti 1, pidetään referenssitasona, jonka kohdalla kokonaisominaisenergiankulutus oli 1. Taulukosta havaitaan, että kolmen ensimmäisen koeajovaiheen kohdalla ominaisenergiankulutus on pääsääntöisesti laskenut. Kaasun ominaisenergiankulutus on kasvanut koeajovaiheen 2 ja 3 välillä, mutta tämä selittyy enimmäkseen ajoteknisillä valinnoilla. Jos höyryn ja kaasun käyttö olisi pystytty optimoimaan

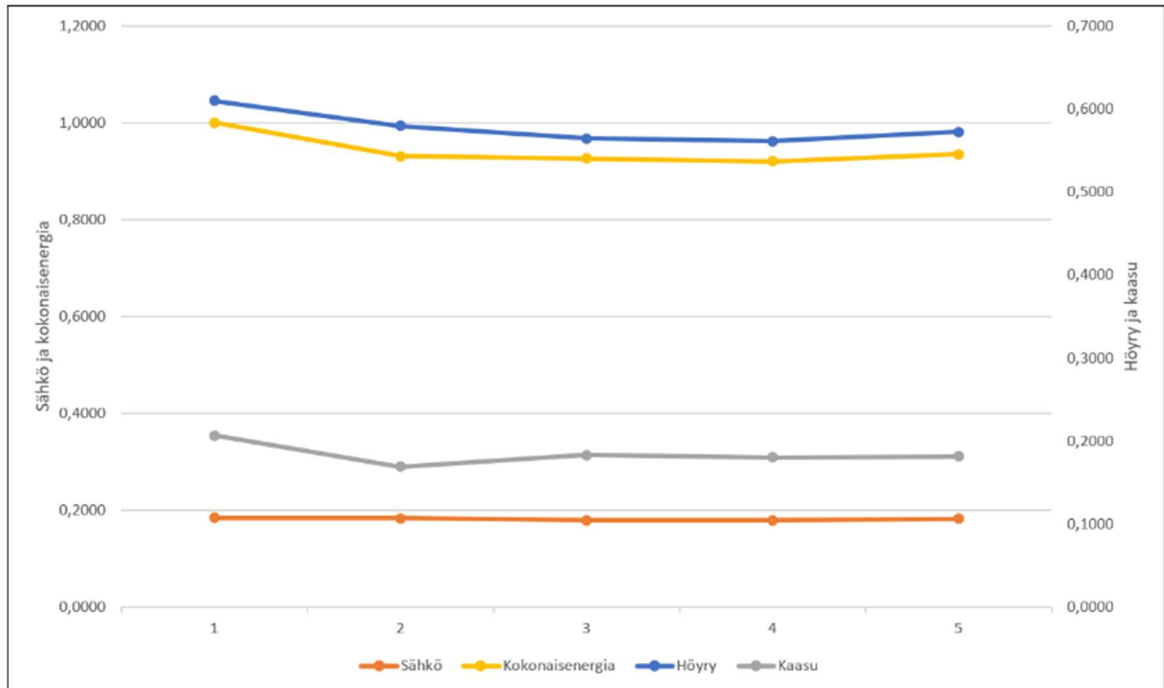
täydellisesti, olisivat ominaiskulutukset suurella todennäköisyydellä laskeneet kaikilta osin kolmen ensimmäisen koeajopisteen aikana. Liitteessä 4 on kuvattu kuitukoeajojen eri koeajopisteiden tilastollisia tunnuslukuja.

Taulukko 6: Kuitukoeajojen indeksoidut ominaisenergiankulutukset

Kuitukoostumus	Höyry	Sähkö	Kaasu	Kokonaisenergia
Resepti 1	0,6101	0,1835	0,2064	1,000
Resepti 2	0,5795	0,1826	0,1690	0,9312
Resepti 3	0,5643	0,1792	0,1832	0,9268
Resepti 4	0,5609	0,1792	0,1803	0,9204
Resepti 5	0,5722	0,1819	0,1813	0,9354

Koeajopisteiden 3 ja 4 välillä ominaisenergiankulutus jatkoi hienoista laskua, mutta keskiarvojen valossa muutos on ollut vähäinen. Siirryttäessä koeajopisteestä 4 koeajopisteeseen 5 havaitaan, että ominaisenergiankulutus on kasvanut kaikilla energijakeilla. Muutos ei ollut täysin odotetun kaltainen ja varma analysointi olisi vaatinut koeajon toistamisen ja erilaisten näytteiden ottamisen koeajon aikana. Toteutetussa koeajossa ei ollut mahdollisuuksia lisänäytteiden ottamiseen. Muutos koeajopisteiden 4 ja 5 välillä saattaa selittyä aiemmin kuvatulla Kullanderin et al. (2012, s. 951) toteamuksella, että lehtipuukuidusta on helpompi poistaa vettä puristinosalla. Viimeisessä koeajovaiheessa lyhyen kuidun eli lehtipuukuidun osuus oli pieni, mikä tukee Kullanderin et al. tutkimusta.

Kuvassa 11 on kuvattuna sähkön, höyryn ja kaasun ominaisenergiankulutukset sekä eri jakeista määritetty kokonaisenergian ominaiskulutus. Kuvaajasta havaitaan selvästi, että koeajopisteiden 1, 2 ja 3 välillä energiankulutus pienenee. Havaittavissa on myös, että energiankulutus kasvaa siirryttäessä koeajopisteestä 4 koeajopisteeseen 5.



Kuva 11: Sähkön, höyryn, kaasun ja kokonaisenergian ominaiskulutukset

Koeajotulosten perusteella on helppo todeta, että energian tuottavuuden kannalta BCTMP oli muita koeajettuja kuitulaatuja heikompi vaihtoehto. BCTMP:n osuuden ollessa suurimmillaan tarkoitti se yli 7 % eroa energiankulutuksessa tilanteeseen, jossa BCTMP oli jätetty kokonaan pois. Yksittäisen koeajon perusteella ei kuitenkaan voida tehdä mittavia johtopäätöksiä prosentuaalisesta säästöpotentiaalista. Pitkän ja lyhyen kuidun energian tuottavuuteen liittyvä analyysi oli haastavaa saaduilla koeajotiedoilla. Koeajotulosten mukaan lyhyen kuidun käyttö oli perusteltua energian tuottavuuden kannalta pitkään kuituun verrattuna, mutta prosentuaalista eroa oli vaikea todentaa. Varmuudella pystytään toteamaan, että tutkituista kuitulajeista BCTMP oli energian tuottavuuden kannalta heikoin vaihtoehto. Vastaavasti lyhyt kuitu tulee toisena ja pitkä kuitu kolmantena, mutta kahden viimeisen ero energian tuottavuusmielessä ei ollut ratkaisevan suuri.

Kustannustehokkuutta analysoitaessa on huomioitava eri kuitulaatujen hinta. Vertailutietoina pitkän ja lyhyen kuidun osalta on käytetty yleisiä maailmanmarkkinahintoja (Norexco 2023). BCTMP:stä ei ole saatavilla julkisia markkinahintoja, minkä vuoksi BCTMP:n osalta vertailu jää osin puutteelliseksi. Natural Resources Canada (2023) ilmoittaa, että BCTMP:n hinta Kiinassa olisi ollut helmikuussa 2023 640 €/tn. Tämä kuitenkin tuntuu alhaiselta. Mahdollisesti hinnoittelu Kiinassa poikkeaa Euroopan hinnoittelusta. Natural Resourcesin (2023) tiedoista havaitaan, että esim. pitkän kuidun hinnoittelu vaihtelee suuresti

maanosittain. Tässä tutkimuksessa BCTMP:n hinta on suhteutettu Euroopan hintatasolle eli Natural Resourcesin tietoa ei ole käytetty suoraan. Suhteutuksessa apuna käytettiin pitkän kuidun hintatietoja Euroopassa ja Kiinassa. Vuoden 2023 alussa pitkän kuidun hinta oli noin 1305 €/tn, lyhyen kuidun hinta noin 1270 €/tn (Norex 2023). BCTMP:n hintana käytettiin arvoa 904 €/tn (soveltaen Natural Resources Canada 2023). Hinnoista pystyttiin päättämään, että kuitukustannus oli suurella todennäköisyydellä yli 1000 €/tn. Todelliset kuitukustannukset ovat yritystoiminnan kannalta luottamuksellista tietoa. Vertailtavuuden vuoksi kuitukoostumuksen 1 kuitukustannukseksi on valittu kiinteä 1000 €/tn. Muiden kuitukoostumusten hinnat on suhteutettu tähän valittuun tasoon.

Edellä kuvatun kuituhinnan lisäksi kustannustehokkuusanalyysissä tarvittiin energiaan liittyviä kustannustietoja. Tilastokeskuksen (2023) tietojen mukaan vuoden 2022 keskimääräinen maakaasun hinta jakeluverkkoasiakkaille oli noin 114 €/MWh. Sähkön osalta vastaavan vertailun tekeminen ei ole välttämättä mielekäästä suuren hintavaihtelun vuoksi. Tässä tarkastelussa sähkön hintana käytettiin arvoa 100 €/MWh. Höyryn osalta täysin vertailukelpoista tietoa ei ole saatavilla. Energiateollisuuden (Energiateollisuus 2023, s. 6) mukaan kaukolämmön hinta myynnillä painotettuna on ollut noin 81 €/MWh. Kaukolämmön valmistus ei ole kaikilta osin vertailukelpoinen paperitehtaan käyttämään höyryyn.

Taulukossa 7 on kuvattu kuitukustannuksien ja energiankulutuksen vaikutusta kokonaiskustannuksiin. Laskennan visualisoinnin vuoksi eri energiajakeiden ominaiskulutukset on kuvattu esimerkin omaisesti, jotta tulkinta ja laskenta mahdollistuisivat. Luvut eivät kuitenkaan perustu todellisiin arvoihin. Samoja ominaiskulutuksen lähtötietoja käytetään kaikissa esimerkkilaskelmissa myös muiden analyysien osalta.

Taulukosta 7 havaitaan selkeästi, miten kustannustehokkuutta analysoitaessa on huomioitava kokonaisvaikutukset. Esim. yksittäisen tuottavuuden analysointi ei kerro riittävästi kokonaisuudesta ja saattaa pahimmillaan johtaa virheellisiin johtopäätöksiin kannattavuuden näkökulmasta. Koeajotietojen perusteella energian tuottavuuden kannalta heikoin vaihtoehto onkin kokonaiskustannuksien kannalta edullisin vaihtoehto. Tuloksia analysoitaessa on kuitenkin huomioitava, että energiaan liittyvät lukuarvot eivät ole todellisia, vaan kyseessä esimerkin omaiset ominaiskulutusarvot. Myös kuitukustannukset ovat esimerkinomaisia luottamuksellisen tiedon aiheuttamien rajoitusten vuoksi.

Taulukko 7: Energian ja kuitujen muodostamat muuttuvat kustannukset

	1	2	3	4	5
Sähköenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,1835	0,1826	0,1792	0,1792	0,1819
Kaasuenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,2064	0,1690	0,1832	0,1803	0,1813
Höyryenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,6101	0,5795	0,5643	0,5609	0,5722
Yhteenlaskettu indeksoitu ominaiskulutus	1,000	0,9311	0,9267	0,9204	0,9354
Esimerkkilaskelma sähköenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	0,500	0,4975	0,4883	0,4883	0,4956
Esimerkkilaskelma kaasuenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	0,500	0,4094	0,4438	0,4368	0,4392
Esimerkkilaskelma höyryenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	1,500	1,4248	1,3874	1,3790	1,4068
Sähkön liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	50	50	49	49	50
Kaasuun liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	57	47	51	50	50
Höyryyn liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	122	115	112	112	114
<b>Energian kokonaiskustannukset (€/tn)</b>	<b>229</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>211</b>	<b>214</b>
<b>Kuitukustannukset (€/tn)</b>	<b>1000</b>	<b>n. 1050</b>	<b>n. 1095</b>	<b>n. 1090</b>	<b>n. 1100</b>
<b>Energian ja kuidun kokonaiskustannus (€/tn)</b>	<b>1229</b>	<b>1262</b>	<b>1307</b>	<b>1301</b>	<b>1314</b>

Taulukosta 7 havaitaan, että vaikka energiakustannus on huomattava tekijä kokonaiskustannusten muodostumisessa, on kuitukustannukselle huomattavasti merkittävämpi rooli kokonaiskustannuksissa.

Koeajotuloksia analysoitiin myös tilastollisesti Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testillä. Wilcoxonin testi valittiin analysointiin, koska se soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa tutkimustulokset eivät noudata normaalijakaumaa. Testitulokset ovat esitetty liitteissä 5, 6 ja 7. Sähkön ominaiskulutuksen analysointi on kuvattu liitteessä 5, höyryn liitteessä 6 ja kaasun liitteessä 7. Sähkön ominaiskulutuksen analysoinnissa havaitaan, että verrattaessa koeajopisteitä 1, 2 ja 3 keskenään, ominaiskulutuksessa on merkittävää tilastollista eroavaisuutta. Verrattaessa pisteitä 3 ja 4 keskenään tilastollista merkittävyyttä ei ole havaittavissa, koska P-arvo on 0,143. Muiden koeajopisteiden osalta P-luku on alle 0,05. Sähkön osalta tämä oli myös odotettavissa, koska kuitujen jauhatustasoa jouduttiin muuttamaan eri koeajopisteiden välillä.

Höyryn tilastollisen analyysin perusteella jokainen koeajovaihe erosi merkittävästi toisistaan, koska P-arvo on eri pisteiden välillä poikkeuksetta alle 0,05. Tämäkin tulos oli



odotettavissa, koska eri koeajopisteiden välillä kuivatusenergian määrää jouduttiin muuttamaan, jotta paperin loppukosteus pysyisi tavoitteen mukaisena. Kaasun osalta tulokset vastasivat höyryn tilastollista analyysiä eli myös kaasun osalta P-arvo oli kaikkien mittapisteiden välillä alle 0,05.

Tilastollisen analyysin perusteella voidaan olettaa, että koeajopisteiden välillä oli eroavaisuutta tilastollisesti eli toisin sanoen eri kuitukoostumuksilla on vaikutusta energian ominaiskulutukseen. Koeajon perusteella ei voida kuitenkaan todeta, että miten paljon energiaa voidaan säästää käyttämällä jotain kuitujaetta toisen kuitujakeen sijasta. Tämän analysoinnin tekeminen vaatisi mittavan koeajosarjan, jotta virhemarginaali pystyttäisiin minimoimaan.

Hypoteesi osui kohdalleen melko hyvin, koska BCTMP osoittautui kiistatta heikoimmaksi vaihtoehdoksi energian tuottavuuden näkökulmasta. Oletus osui kohdalleen myös lyhyeen ja pitkään kuituun liittyen; vaikka eroavaisuutta havaittiinkin, saattaisivat koeajotulokset olla toisenlaisia optimaalisilla ajoparametreilla.

### 6.3 Paperikoneen tuotantonopeuden vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin

Tuotantonopeuden vaikutusta energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin tutkittiin nostamalla paperikoneen tuotantonopeutta tasolta 1300 m/min tasolle 1500 m/min 40 m/min askeleilla. Nopeuden noustessa myös kuivatusenergian tarve kasvaa, koska paperin loppukosteus halutaan pitää vakiona. Kuivatusenergian nosto toteutettiin nostamalla paperikoneen huuven lämpötiloja siten, että paperin tavoiteltu loppukosteus pysyi vakiona. Yleisesti olosuhteet pyrittiin vakioimaan, mutta tiettyjä muutoksia jouduttiin tekemään alati kasvavan tuotantomäärän vuoksi. Muussa tapauksessa valmistettava paperi ei olisi täyttänyt asetettuja laatuvaatimuksia.

Koeajon ensimmäisessä vaiheessa paperikonetta ajettiin tuotantonopeudella 1300 m/min. Ajon aikana seurattiin tuotantomäärää (tn/h), eri energiajakeiden ominaiskulutusta ja paperin loppukosteutta. Tämä mittauspiste määritettiin referenssitasoksi eli tuotantomäärän indeksoitu arvo tässä pisteessä oli 1. Vastaavasti eri energiajakeiden yhteenlaskettu indeksoitu ominaiskulutus oli 1.

Tuotantonopeutta nostettiin aina 40 m/min kerrallaan, minkä jälkeen odotettiin, että prosessi oli silmämääräisesti asetunut uuteen nopeustasoon. Silmämääräinen arvio perustui erilaisen mittalaitteiden tuottamaan informaatioon. Kun prosessi oli asetunut, aloitettiin varsinainen tietojen kerääminen tehdasjärjestelmästä. Noin puolen tunnin seurannan jälkeen tuotantonopeutta nostettiin uudelleen 40 m/min ylöspäin. Sama systematiikka toistui kaikissa mittapisteissä, joten tulokset ovat myös siltä osin vertailukelpoiset. Huomioitavaa on, että höyryn kulutusta ei muutettu koeajon aikana, vaan kaikki kuivatukseen tehtävät muutokset toteutettiin kaasun avulla. Koeajon kesto oli kokonaisuudessaan noin yhdeksän tuntia.

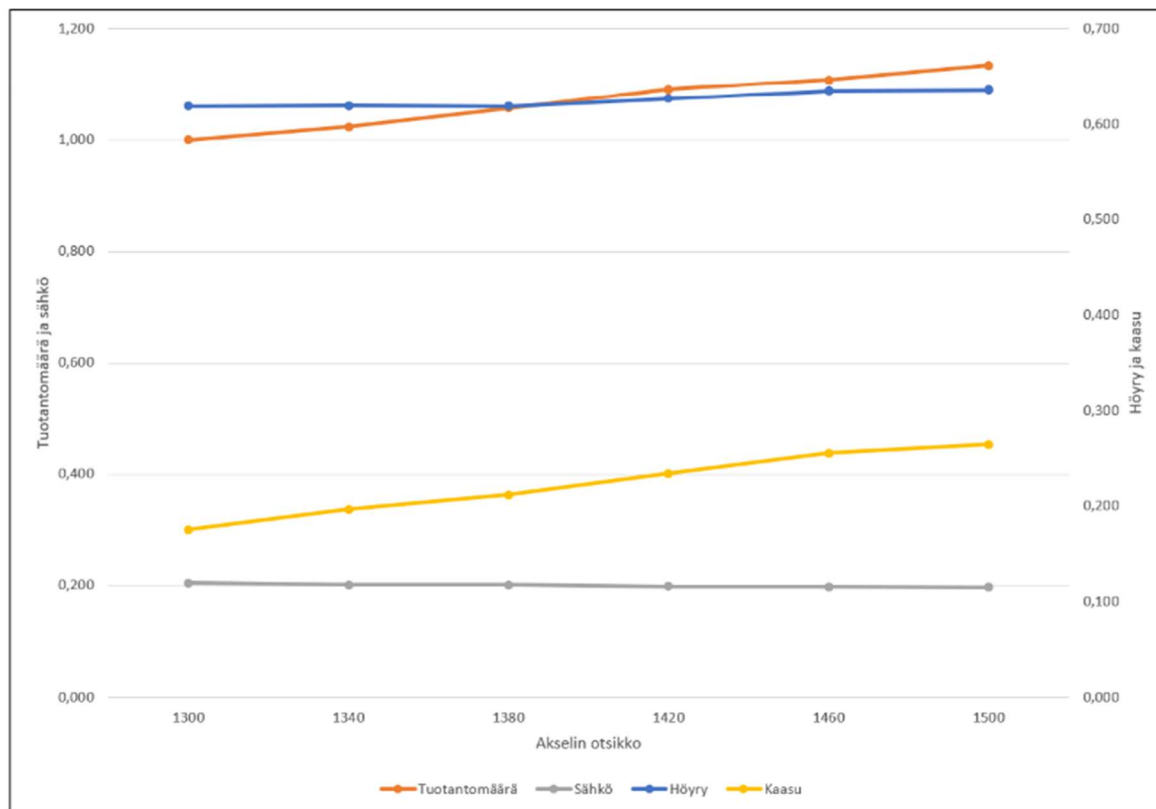
Kuvassa 12 on kuvattuna tuotantomäärän sekä höyryn, sähkön ja kaasun indeksoidun energian ominaiskulutuksen muutoksen suhde tuotantonopeuteen. Kuvan perusteella pystytään suoraan näkemään, että tuotantomäärä (tn/h) nousi samassa suhteessa kuin tuotantonopeuden kanssa. Kuvassa kyseinen muutos ei näyttäisi tapahtuvan täysin suorassa suhteessa, mutta käytännössä näin kuitenkin tapahtuu. Kuvassa nähtävissä oleva poikkeama aiheutui paperikoneen mittaajajärjestelmien epätarkkuudesta ratakatkojen aikana.

Sähköenergian osalta indeksoitu ominaiskulutus näyttäisi pysyneen vakiona kaikissa mittapisteissä, mutta lukuarvoja tarkemmin tarkasteltaessa huomataan indeksoidun ominaiskulutuksen laskeneen. Vertailtaessa keskiarvollista tasoa nopeuksien 1300 m/min ja 1500 m/min välillä havaitaan sähköenergian ominaiskulutuksen laskeneen noin 4 %. Eri mittapisteiden tilastolliset arvot ovat esitetty liitteessä 5. Sähköenergian ominaiskulutuksen aleneminen selittyy vakioiduilla prosessiolosuhteilla. Käytetyn sähköenergian määrä ei nouse samassa suhteessa tuotantomäärän kanssa, minkä vuoksi ominaiskulutus laski, kuten kuvasta pystytään havaitsemaan.

Kaasun indeksoitu energianominaiskulutus nousi selkeästi ylöspäin jokaisessa koeajopisteessä. Muutos nopeuksien 1300 m/min ja 1500 m/min välillä oli huomattava; kaasun ominaiskulutus kasvaa kyseisten pisteiden välillä noin 51 %. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että nopeuden ja tuotantomäärän kasvaessa noin 15 %, kaasun ominaiskulutus kasvaa hieman yli 50 %. Muutos näkyi selvästi juuri kaasunenergiassa, koska koeajon aikana nostettiin kaasun käyttöä, jotta paperin loppukosteus pystyttiin pitämään vakiona.

Höyryn osalta muutos oli huomattavasti pienempi kaasun verrattuna. Mittauspisteiden 1300 m/min ja 1500 m/min välillä höyryn ominaiskulutus kasvoi hieman alle 3 %. Tämän nousun selittäminen vaatisi tarkempia koeajosarjoja. Oletettavasti ominaisenergian nousu liittyi

höyryjärjestelmän automaattisiin säätöihin ja hallintoihin. Koeajoista saadulla tiedolla tätä ei kuitenkaan pystytä varmentamaan.



Kuva 12: Nopeuskoeajon vaikutus tuotantomäärään ja indeksoituihin ominaisenergiankulutuksiin

Tarkasteltaessa kokonaisenergiankulutusta havaitaan, että mittapisteiden 1300 m/min ja 1500 m/min ominaisenergiankulutus on kasvanut noin 10 %. Samalla tuotantomäärä on kasvanut hieman alle 14 %. Laskennallisesti tuotantomäärä olisi pitänyt kasvaa hieman yli 15 %, mutta koneen ajoteknisten muuttujien vuoksi tuotantomäärä jäi laskennallista alhaisemmaksi.

Ominaisenergiankulutuksen ja tuotantonopeuden välistä riippuvuutta analysoitiin tarkemmin myös tilastollisesti. Tilastolliset tunnusluvut on esitetty liitteessä 8, liitteessä 9 on esitetty sähkön indeksoidun ominaisenergiankulutuksen vertailu eri nopeusalueilla, liitteessä 10 on esitetty vastaavat tiedot höyryn osalta ja liitteessä 11 kuvataan tilastollisen analyysin tulokset kaasun osalta. Tilastollinen analyysi toteutettiin Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testillä. Wilcoxonin testi soveltuu analyysiin, kun lähtöaineisto ei noudata

normaalijakaumaa. Testi suoritettiin kaikilta osin siten, että nopeusalueita verrattiin aina ”viereiseen” nopeusalueeseen.

Vertailtaessa sähkön indeksoitua ominaiskulutusta eri nopeusalueilla havaittiin, että nopeuden ollessa välillä 1300–1420 m/min ominaiskulutuksessa oli merkittäviä eroavaisuuksia (P-arvo alle 0,05). Vastaavasti verrattaessa nopeusalueita 1420–1500 m/min, tilastollista merkittävää eroavaisuutta ei ollut havaittavissa. Tätä eroavaisuutta on hankala selittää olemassa olevilla tiedoilla. Yksi mahdollinen selittävä tekijä on, että korkeilla nopeuksilla kitkaan liittyvien tekijöiden merkitys on pienempi alhaisiin nopeuksiin verrattuna.

Vertailtaessa höyryn indeksoitua ominaiskulutusta eri nopeusalueilla tulkinta muuttuu edellistäkin haastavammaksi. Nopeusalueiden 1300 ja 1340 m/min sekä 1340 ja 1380 m/min vertailussa P-arvo oli selkeästi suurempi kuin 0,05 eli tilastollista merkittävyyttä näiden nopeusalueiden välillä ei ollut havaittavissa. Toisaalta analysoitaessa nopeusalueita 1380 ja 1420 m/min sekä 1420 ja 1460 m/min tilastollinen merkittävyys oli selkeä. Vertailtaessa korkeimpia nopeuksia 1460 ja 1500 m/min P-arvo oli yli 0,05 eli kyseisissä mittapisteissä ei ollut havaittavissa tilastollista merkittävyyttä. Tämän tarkempi tulkitseminen ei ollut mahdollista saatujen koeajotietojen perusteella. Merkittävyyden vaihtelu eri koeajopisteissä saattaa osin liittyä keskihajonnassa oleviin vaihteluihin. Mittapisteiden 1420, 1460 ja 1500 m/min keskihajonnat olivat yli 10-kertaisia muihin keskihajontoihin verrattuna. Höyrynkulutusta ei aktiivisesti muutettu koeajon aikana eli tapahtuneet muutokset saattoivat liittyä höyryjärjestelmän optimaalisempaan toimintaan tietyllä nopeusalueella.

Tilastollisesti tarkasteluna kaasun indeksoitu ominaiskulutus oli helppoiten tarkasteltu muutuja. Wilcoxonin testillä analysoituna nopeusalueiden kaasuenergian ominaiskulutus erosi merkittävästi toisista nopeusalueista kaikilta osin eli jokaisen analyysivaiheen P-arvo oli alle 0,05. Tämä oli pääteltävissä jo kuvan 12 perusteella.

Kustannustehokkuutta analysoitaessa oli energiankulutusta arvioitava kokonaisuutena, mutta myös jakeittain, koska jokaisella energiajakeella oli erilainen hinta. Energiakustannuksen lisäksi oli analysoitava tuotantomäärän nousun vaikutus kustannustehokkuuteen:

- Tuotantonopeuden kasvaessa tuotantomäärä lisääntyy karkeasti arvioituna samassa suhteessa nopeuden nousun kanssa

- Mittaustulosten perusteella kokonaisenergiankulutus oli noussut noin 10 % (mittapisteiden 1300 m/min ja 1500 m/min välillä)
  - o Höyryn ominaiskulutus kasvanut hieman alle 3 %
  - o Sähkön ominaiskulutus laskenut hieman alle 4 %
  - o Kaasun ominaiskulutus noussut noin 51 %

Jos paperikoneen tuotantomääräksi oletetaan 6,0 tn/h nopeustasolla 1300 m/min, olisi tuotantomäärä nopeudella 1500 m/min noin 6,8 tn/h. Taulukossa 8 on hahmoteltu kustannustehokkuutta eri nopeustasoilla. Taulukon energiankulutustiedot sekä energian hintatiedot ovat vastaavat kuin esitetty aiemmin taulukossa 7 kuitukoeajojen yhteydessä eli kaasun hintana käytetään arvoa 114 €/MWh, sähkön 100 €/MWh ja höyryn osalta hinta on 81 €/MWh.

Taulukko 8: Energiakustannuksen ja tuotantomäärän välinen riippuvuus

	Nopeustaso 1300 m/min	Nopeustaso 1500 m/min
Tuotantomäärän esimerkki (tn/h)	6,0	6,8
Sähköenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,205	0,197
Kaasuenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,175	0,265
Höyryenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,619	0,636
<b>Yhteenlaskettu indeksoitu kokonaiskulutus</b>	<b>0,999</b>	<b>1,098</b>
Esimerkkilaskelma sähköenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	0,50	0,48
Esimerkkilaskelma kaasuenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	0,50	0,76
Esimerkkilaskelma höyryenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	1,50	1,54
Sähkön liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	50	48
Kaasuun liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	57	86
Höyryyn liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	122	125
<b>Energian kokonaiskustannus esimerkkiluvuilla (€/tn)</b>	<b>229</b>	<b>259</b>

Määritettäessä kustannustasoa yllä olevilla esimerkkiluvuilla havaitaan, että energiaan liittyvät kustannukset kasvaisivat tasolta 229 €/tn tasolle 259 €/tn eli nousua olisi noin 30 €/tn. On kuitenkin huomioitava, että samassa yhteydessä tuotantomäärä kasvaa, minkä ansiosta

myytävää tuotetta syntyy noin 0,8 tn/h enemmän lähtötilanteeseen verrattuna. Jos tuotteesta saatava voitto on enemmän kuin 30 €/0,8 tn paperia tai 38 €/tn, voidaan korkeamman tuotantonopeuden olettaa olevan kustannustehokkaampaa nousseista energiakustannuksista huolimatta.

Tuottavuutta analysoitaessa energian tuottavuus laski tuotantonopeuden noustessa kuten edellä on kuvattu. Toisaalta työn tuottavuus kasvoi, koska samassa aikayksikössä pystyttiin valmistamaan aiempaa suurempi määrä tuotetta. Laskelman virhemarginaali on huomattava, koska käytettävät luvut ovat osin esimerkinomaisia, mutta huomioitava on myös käytetyt energiahinnat. Energiahintojen vaihdellessa suuresti, olisi laskelmia päivitettävä säännöllisesti.

#### 6.4 Paperin loppukosteuden vaikutus energian tuottavuuteen ja muuttuviin kokonaiskustannuksiin

Paperin loppukosteuden vaikutusta paperin valmistuksen ominaisenergiankulutukseen tutkittiin muuttamalla valmistuneen paperin lopullista kosteusprosenttia. Koeajon aikana ajo-olosuhteet lukittiin siten, että ainoastaan paperin kuivatukseen käytettävän höyryn ja kaasun määrää muutettiin. Lähtötaso paperin loppukosteudessa oli 4,0 % ja lopputaso koeajon päättyessä oli 6,8 %. Paperin kosteutta lähdettiin nostamaan tasolta 4,0 % siten, että eri koeajopisteiden välillä kosteutta nostettiin 0,4 %-yksikköä kerrallaan. Prosessin stabiloitumisen vuoksi eri koeajopisteiden välissä jouduttiin odottamaan noin puoli tuntia, ennen kuin uusi koeajovaihe voitiin aloittaa. Kokonaisuudessaan kosteuskoeajo kesti noin kymmenen tuntia.

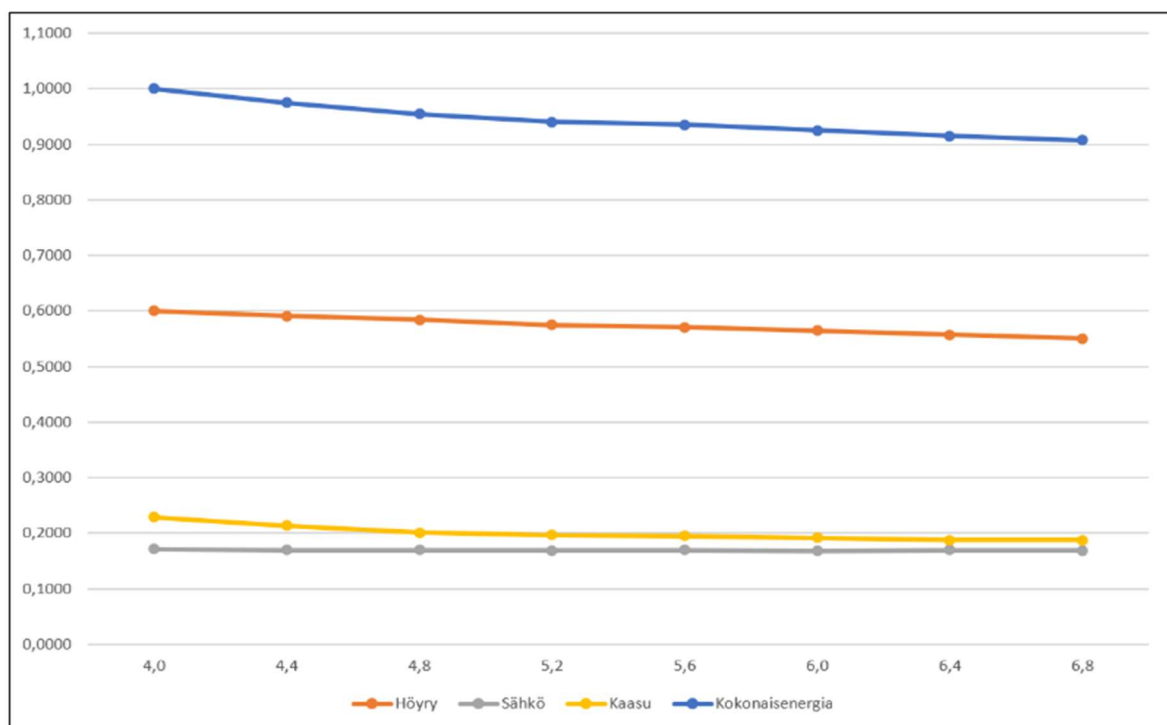
Koeajon ensimmäisessä vaiheessa analysoitiin energiankulutustietoja kosteustasolla 4,0 %. Kyseinen lähtöpiste valittiin referenssipisteeksi, jonka indeksoitu ominaisenergiankulutus oli 1. Luku pitää tässä yhteydessä sisällään höyryn, sähkön ja kaasun indeksoidut ominaiskulutukset.

Loppukosteus nostettiin tasolle 4,4 % laskemalla paperikoneen kuivatushuuvan lämpötiloja eli samalla kaasuun liittyvä ominaiskulutus laski. Tämä havaittiin myös mittausdatasta. Mielienkiintoista oli havaita, että myös höyryenergian ominaiskulutus laski, vaikka höyrylaitteistoihin ei tässä yhteydessä tehty muutoksia. Täysin vastaava tilanne tapahtui myös

seuraavassa koeajopisteessä siirryttäessä kosteudesta 4,4 % kosteuteen 4,8 %. Tämän jälkeen jokaisessa koeajovaiheessa jouduttiin laskemaan niin höyryenergian kuin kaasuenergiainkin määrää paperikoneen prosessitekniisten syiden vuoksi. Koeajon aikana saadut indeksoidut tiedot on esitetty kuvassa 13. Höyryenergian osalta käyrä näyttää melko suorasti laskevalta eli ominaiskulutus oli suoraan riippuvainen paperin loppukosteudesta. Kaasuenergian osalta tulkinta ei ole täysin selvää, koska koeajopisteen 4,8 % jälkeen muutoksia jouduttiin tekemään niin kaasun kuin höyrynkin käytössä.

Sähköenergian ominaiskulutuksessa ensimmäinen mittapiste 4,0 % on osin virheellinen, koska tuotantoprosessissa jouduttiin tekemään muutoksia koeajon aikana. Kyseiset muutokset saattavat vääristää sähkön ominaiskulutusta, mutta muihin energiajakeisiin muutoksilla ei oleteta olevan vaikutusta.

Tarkasteltaessa kokonaisenergiankulutusta havaitaan, että alhaisilla kosteustasoilla (<5 %) ominaisenergiankulutus pieneni suhteessa enemmän kuin korkeilla kosteustasoilla. Tämä on myös yleinen käsitys pehmopaperiteollisuudessa. Tätä osa-aluetta ei kuitenkaan tutkittu tarkemmin tässä tutkimuksessa. Yleinen käsitys on myös, että paperin loppukosteuden noustessa yhden prosenttiyksikön, säästetään kuivausenergiassa noin 8–12 %. Tästä alan peukalosäännöstä ei ole kuitenkaan saatavilla tutkittua tietoa.



Kuva 13: Energian indeksoidut ominaiskulutukset eri loppukosteuksilla

Koeajotuloksista tehtiin erilaisia tilastollisia analyysyjä. Tarkemmat tiedot ovat nähtävillä liitteessä 12. Taulukossa 9 on kuvattu eri mittapisteiden aikana mitatut keskiarvot ominaiskulutukset eri energiajakeille. Taulukosta havaitaan, että kosteustason noustessa ominaisenergiankulutus laskee, kuten jo kuvasta 13 pystyttiin havaitsemaan. Kokonaisenergiankulutus laskee selvästi enemmän alhaisilla kosteuksilla. Tämä näkyy myös yksittäisten energiajakeiden kohdalla. Sähkön ominaiskulutuksessa ei tapahdu juurikaan muutosta.

Taulukko 9: Kosteuskoeajon indeksoidut ominaisenergiankulutukset

Kosteusprosentti	Höyry	Sähkö	Kaasu	Kokonaisenergia
4,0 %	0,600	0,171	0,229	1,000
4,4 %	0,591	0,169	0,214	0,974
4,8 %	0,584	0,170	0,201	0,955
5,2 %	0,574	0,169	0,197	0,940
5,6 %	0,570	0,170	0,195	0,935
6,0 %	0,565	0,168	0,192	0,925
6,4 %	0,557	0,170	0,187	0,915
6,8 %	0,551	0,169	0,188	0,907

Tarkasteltaessa pelkästään höyryn ja kaasun indeksoituja ominaiskulutuksia voidaan havaita, että kosteustasolla 4,0 % yhteenlaskettu ominaiskulutus oli 0,829. Taulukosta 9 ei ole nähtävissä kosteustason 5,0 % indeksoituja arvoja, mutta käytettäessä mittapisteiden 4,8 % ja 5,2 % välistä keskiarvoa, voitaneen kohtalaisella tarkkuudella olettaa kosteustason 5,0 % höyryn ja kaasun yhteenlasketuksi indeksoiduksi ominaiskulutukseksi 0,778. Tämä tarkoittaisi sitä, että koeajon perusteella yhden prosenttiyksikön kosteuden nosto tarkoittaisi hieman yli 6 % säästöä kuivatusenergiassa. Tämä on alhaisempi kuin kyseisen teollisuuden alan yleisesti käytössä oleva 8–12 % peukalosääntö. Tätä eroavaisuutta ei pysty täysin selittämään koeajotulosten perusteella ja tarkempi analysointi vaatisi laajempia koeajosarjoja.

Kuivatusenergian (höyry + kaasu) indeksoitu ominaiskulutus tasolla 6,8 % oli 0,739. Kosteustasolle 5,8 % joudutaan laskemaan keskiarvoinen ominaiskulutus yllä kuvatulla tavalla. Keskiarvoksi saadaan 0,761. Tämä tarkoittaa hieman alle 3 % energian säästöä kosteustasojen 5,8 % ja 6,8 % välillä. Tämä tukee selkeästi edellä kuvattua oletusta, että korkeilla kosteustasoilla energian säästöpotentiaali on pienempi.



Ominaisenergiankulutuksen ja paperin loppukosteudenvälistä riippuvuutta analysoitiin tarkemmin Wilcoxonin testillä, joka soveltuu hyvin tuloksille, jotka eivät noudata normaalijakaumaa. Liitteessä 13 on kuvattu sähkön indeksoidun ominaiskulutuksen ja paperin loppukosteuden välinen analyysi, liitteessä 14 vastaavat tiedot höyrystä ja liitteessä 15 kuvataan kaasun indeksoidun ominaiskulutuksen sekä paperin loppukosteuden välinen analyysi. Analyysi tehtiin vastaavalla tavalla, kuin tuotantonopeuskoeajossakin eli viereisiä kosteusalueita verrattiin keskenään. Esim. loppukosteustasoja 4,0 % ja 4,4 % sekä 4,4 % ja 4,8 % on verrattu keskenään.

Analysoitaessa tilastollista merkittävyyttä höyryn ominaiskulutuksen ja paperin loppukosteuden osalta havaitaan, että jokaisessa koeajovaiheessa oli tilastollista merkittävyyttä, koska jokaisen analyysin P-arvo oli alle 0,05. Tämä tulos oli pääteltävissä jo mittausdatan avulla piirretystä kuvaajasta.

Tarkasteltaessa sähkön ominaiskulutuksen ja paperin loppukosteuden välistä tilastollista merkittävyyttä havaitaan, että P-arvo oli yhtä vertailukohtaa lukuun ottamatta alle 0,05. Kosteusasteojen 4,4 % ja 4,8 välisen tarkastelun P-arvo oli 0,478, mikä tarkoittaa, että merkittävää eroavaisuutta ei ollut havaittavissa. Verrattaessa eri kosteustasojen aikana mitattuja keskiarvollisia kulutuksia havaitaan, että sähkön osalta keskiarvoissa ei juurikaan tapahdu vaihtelua. Tämän vuoksi tilastollisen analyysin tulokset tuntuvat kyseenalaisilta. Kyseenalaisuutta puoltaa myös se, että koeajon aikana ei muutettu prosessia mitenkään sähkön kulutukseen liittyviltä osin.

Wilcoxonin testin perusteella kaasun ominaiskulutuksella ja paperin loppukosteudella on tilastollisesti merkittäviä eroavaisuuksia. P-arvo oli alle 0,05 kaikissa muissa tarkasteluväleissä, paitsi vertailtaessa kosteustasoja 6,4 % ja 6,8 % keskenään. Tämä oli osin arvattavissa, koska varsinaisen koeajon aikana siirryttäessä koeajopisteestä 6,4 % pisteeseen 6,8 % ei kaasuhuuvan toiminnassa havaittu käytännössä juurikaan muutoksia. Tämä liittyy ns. ajoikkunaan; kaasuhuuva oli siirtynyt tai siirtymässä pois optimaaliselta toiminta-alueeltaan, minkä vuoksi kosteusmuutos ei vaikuttanut kaasuhuuvan toimintaan.

Kustannustehokkain vaihtoehto paperin loppukosteuteen liittyen on luonnollisesti valmistaa paperi mahdollisimman korkeassa loppukosteudessa, jolloin energiankulutus on minimaalista, mutta tällä on myös vaikutus materiaalin tuottavuuteen. Raaka-ainetta tarvitaan vähemmän, jos paperin loppukosteutta voidaan nostaa ylöspäin. Taulukossa 10 on analysoitu

kustannusvaikutusta kosteustasojen 4,0 % ja 6,8 % välillä. Lähtötiedot ovat vastaavat kuin nopeuskoeajossakin esitetyt tiedot olivat. Energiakustannus esimerkkiluvuilla kosteustasossa 4,0 % oli noin 229 €/tn. Jos kosteutta päästään nostamaan tasolle 6,8 % voidaan laskelman perusteella olettaa, että energiakustannus laskee tasolle 205 €/tn eli noin 24 €/tn alemmaksi lähtötasoon verrattuna. Lähtötiedot taulukossa ovat vastaavat kuin aiemmissakin koeajovaiheissa eli kaasun hintana käytetään arvoa 110 €/MWh, sähkön hintana 100 €/MWh ja höyryn hintana käytetään arvoa 81 €/MWh.

Taulukko 10: Energiakustannuksen ja paperin loppukosteuden välinen riippuvuus

	Kosteustaso 4,0 %	Kosteustaso 6,8 %
Tuotantomäärä (tn/h)	6,0	6,0
Sähköenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,171	0,169
Kaasuenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,229	0,188
Höyryenergian indeksoitu ominaiskulutus	0,600	0,551
<b>Yhteenlaskettu indeksoitu kokonaiskulutus</b>	<b>1,000</b>	<b>0,908</b>
Esimerkkilaskelma todellisesta sähköenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	0,50	0,49
Esimerkkilaskelma todellisesta kaasuenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	0,50	0,41
Esimerkkilaskelma todellisesta höyryenergian ominaiskulutuksesta (MWh/tn)	1,50	1,38
Sähköön liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	50	49
Kaasuun liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	57	45
Höyryyn liittyvät kustannukset esimerkkiluvuilla (€/tn)	122	111
<b>Energian kokonaiskustannus esimerkkiluvuilla</b>	<b>229</b>	<b>205</b>

Kustannustehokkuuden maksimoinnissa on huomioitava optimaaliset ajoasetukset, jotta paperikoneen kuivatusjärjestelmä toimii tehokkaalla toiminta-alueella. Tämä mahdollistaa kustannustehokkaan toiminnan ja ohjaa parhaimmillaan säätämään kuivatusta siten, että kuivatusjärjestelmä toimii optimaalisella toiminta-alueella. Koeajotulokset vahvistavat hypoteesia, minkä mukaan energian tuottavuus ja kustannustehokkuus kasvavat paperin loppukosteuden kasvaessa. Tarkkoja numeerisia arvoja ei kuitenkaan pystytä tässä yhteydessä määrittämään. Esimerkkilaskelman mukaan kustannussäästöpotentiaali voisi olla noin 15 €/tn kosteustasojen 4,0 % ja 6,8 % välillä.

## 6.5 Lajinvaihtojen vaikutus energiankulutukseen

Paperikoneen lajinvaihtomääriä, niihin käytettyä aikaa sekä lajinvaihtojen aikana kulunutta energiamäärää tutkittiin tehdastietokantoihin tallentuneista tiedoista. Tutkittava aikaväli oli lokakuu 2022 – maaliskuu 2023. Tätä laajempaa aikaväliä ei ollut mielekästä analysoida, koska pidemmällä aikavälillä esim. valmistettavat laadut saattavat vaihtua, jolloin tarkasteluväli ei olisi täysin vertailukelpoinen.

Analyysi aloitettiin selvittämällä lajinvaihtomäärät edellä kuvatulta aikaväliltä. Taulukossa 11 on kuvattuna tehdastietojärjestelmästä poimitut tiedot. Lajinvaihdoksi tulkittavia tapahtumia oli keskimäärin noin 36 kpl/kk eli hieman yli yksi kerta päivässä. Keskiarvallisesti yksi lajinvaihto kesti noin 11 minuuttia eli kuukaudessa lajinvaihtoihin käytettävä keskimääräinen aika oli hieman alle 7 h.

Taulukko 11: Lajinvaihtomäärät 11/2022–3/2023

Lajinvaihtotiedot (LV-tiedot)	11/2022	12/2022	1/2023	2/2023	3/2023	K.A.
LV-määrät (kpl/kk)	33	38	38	34	39	36,4
LV kokonaiskesto (h/kk)	5,7	7	6,7	6,5	7,1	6,6
LV:n keskimääräinen kesto (h)	0,17	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18
LV:n keskimääräinen kesto (min)	10,4	11,1	10,6	11,5	10,9	10,9
Keskimääräinen tilauksen kesto (h)	13,0	14,6	15,7	17,7	19,9	16,2

Keskiarvoja tarkasteltaessa yhden tuotantotilauksen kesto oli noin 16 h ja sille kohdistui yksi lajinvaihto, jonka keskimääräinen kesto oli noin 11 minuuttia. Lajinvaihdon kesto oli noin 1,1 % tuotantotilauksen keskimääräisestä kestoista. Prosentuaalisena osuutena lukuarvo vaikuttaa melko pieneltä, mutta teoreettisesti laskettuna tämä tarkoittaisi vuodessa lajinvaihtojen kestävän yhteensä noin 4 vuorokautta.

Paperikoneen lajinvaihdot kuluttavat energiaa käytännössä täysin saman verran kuin varsinaisen tuotantotapahtumakin kuluttaa. Tämä tarkoittaa sitä, että lajinvaihdon aikana käytettyä energiamäärää ei saa enää takaisin, minkä vuoksi se tulkitaan kokonaisuudessaan menetettyksi ilman, että tuotantoa olisi saatu aikaiseksi. Jos lajinvaihtoaikaa pystytään vähentämään ja korvaamaan se tuotantoajalla, johtaa se suoraan energian tuottavuuden kasvuun, vaikka itse energiankulutus tuotannon aikana pysyisikin entisellään. Lajinvaihtojen aikana

käytettävä energiamäärä vaihtelee lajikohtaisesti siten, että energiankulutus vastaa melko tarkasti lajinvaihdon jälkeen alkavan lajin energiankulutusta.

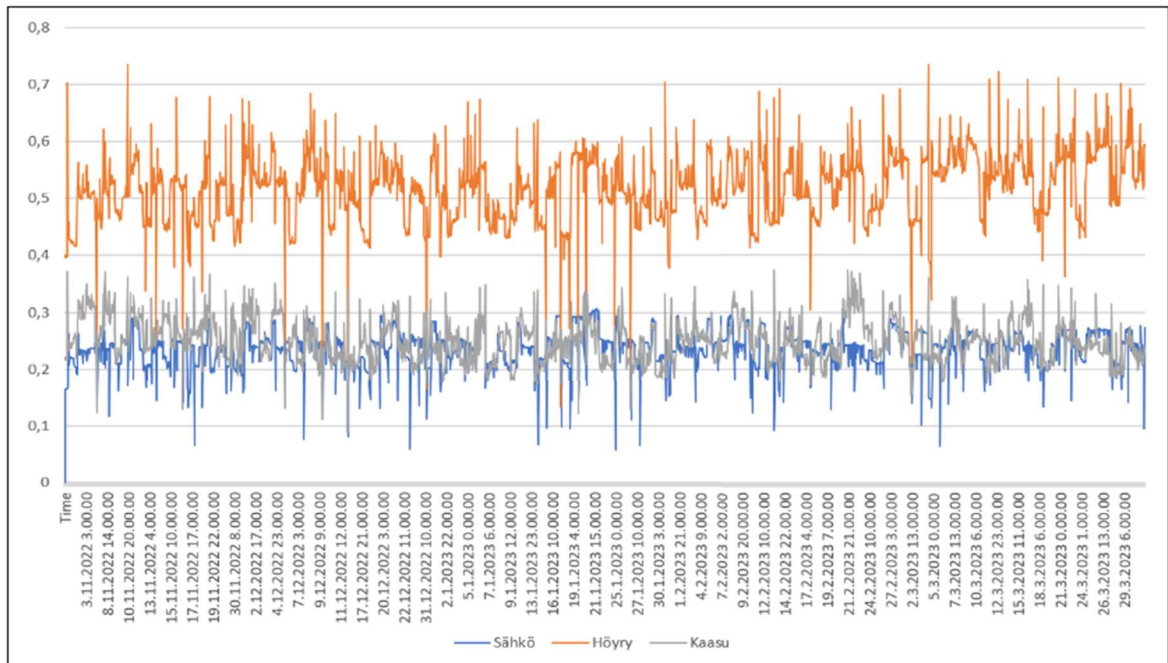
Tässä analysoinnissa indeksointi toteutettiin siten, että tarkasteluajavälin energiankulutuksista laskettiin keskiarvo energijakeittain (sähkö, höyry, kaasu). Hetkellisiä arvoja verrattiin keskiarvolukuihin, jolloin luvut saatiin indeksoituun muotoon. Ominaisenergiankulutuksen arvo kaikki energijakeet yhteenlaskettuna tarkasteluajavälillä oli siis keskiarvillisesti tasan 1.

Lähdetiedot koostuvat noin 3600 eri mittapisteestä eli käytännössä lukuarvot eri energijakeista otettiin kerran tunnissa tarkasteluajanjakson ajalta. Lähdetiedoista poistettiin lukuarvot, jotka poikkesivat yli 50 % mittausvälin keskiarvosta. Kyseiset trendistä poikkeavat luvut poistettiin, koska ne todennäköisesti olivat aiheutuneet virheellisestä mittauksesta. Käytännössä tällä ei kuitenkaan ole juurikaan merkitystä esim. keskihajonnan laskemiseen, koska yksittäisten virheellisten mittausten osuus kaikista mittapisteistä oli alle yhden prosentin. Tarkasteluajaväliltä saadut tiedot on kuvattu taulukossa 12. Jokaisesta energijakeesta saatiin yhteensä 2550 mittaustulosta. Silmiinpistävää on, että keskiarvot ja mediaanit ovat hyvin lähellä toisiaan.

Taulukko 12: Lajinvaihtoanalyysin lähtötiedot

	Sähkö	Höyry	Kaasu
Mittapisteiden lukumäärä	2550	2550	2550
Indeksoitu keskiarvo	0,236	0,516	0,248
Keskihajonta	0,032	0,060	0,037
Mediaani	0,24	0,52	0,246

Kuvassa 14 on esitetty eri energijakeiden indeksoidut ominaiskulutukset aikavälillä 11/2022–3/2023. Kuten kuvasta havaitaan, ominaiskulutuksissa oli vaihtelua, mutta keskiarvoinen vaihtelu oli silmämääräisesti vähäistä. Vaihtelu aiheutui mm. vuodenaikojen vaikutuksesta lämpötiloihin, ajoteknisistä tekijöistä sekä esim. valmistettavien paperilaatujen vaikutuksista.



Kuva 14: Eri energiajakeiden indeksoidut ominaiskulutukset aikavälillä 11/2022–3/2023

Kuvan 14 perusteella kaasun ja sähkön indeksoidut ominaiskulutukset pysyivät melko tasaisena, mutta höyryn osalta kulutuksessa oli tapahtunut tasonousu helmikuussa 2023. Tämän nousun selitystä ei pystytty täysin tulkitsemaan, mutta suurella todennäköisyydellä tämä liittyi paperikoneen puristinhuovan toimintaan. Tämän analysointi ei kuitenkaan kuulunut tähän tutkimuskokonaisuuteen.

Kaasun ja höyryn ominaiskulutukset osittain ”kumoavat” toisensa eli tyypillisesti kaasun kulutus laskee höyryn kulutuksen noustessa ja päinvastoin. Tätä yhteyttä ei kuitenkaan ole havaittavissa yllä olevassa kuvassa. Kaasun ominaiskulutus pysyi pääsääntöisesti melko tasaisena. Kaasun keskihajonta oli kuitenkin ollut suurinta eli se saattaa osaltaan selittää höyryssä näkyvää tasonousua. Tämän todentaminen ei kuitenkaan ollut mahdollista käytössä olevalla tutkimusmateriaalilla.

Lajinvaihdon aikana käytetty energiamäärä vaikuttaa omalta osaltaan paperikoneen kokonaisenergiankulutukseen ja energian tuottavuuteen. Verrattaessa keskimääräisiä aikoja ja keskimääräisiä ominaisenergiankulutuksia pystytään vaikutuksen suuruutta arvioimaan kohtalaisen tarkasti. Kuten edellä on mainittu, paperikoneen energiankulutus on käytännössä riippumaton siitä, onko paperikoneella menossa lajinvaihto vai normaali tuotanto. Poikkeavuutena on ainoastaan se, että lajinvaihdon aikana ei synny tuotantoa eli kyseisenä aikana kulutettu energia heikentää energian tuottavuutta.

Taulukossa 13 kuvataan lajinvaihtoaikojen, tilauspituuksien ja ominaisenergiankulutuksen välistä riippuvuutta. Lajinvaihtoaajan kesto oli noin 1,1 % keskimääräisestä tilauspituudesta. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että paperikoneen suorasta kokonaisenergiankulutuksesta noin 1,1 % käytettiin lajinvaihtoihin. Jos lajinvaihtojen määrää olisi mahdollista vähentää määrällisesti esim. 20 %, saataisiin kuukaudessa vähentyneistä lajinvaihtoaajoista suoraan lisää tuotantoaikaa noin 1,4 h. Tämä jaettaessa tasaisesti kaikkien tuotantotilausten kesken, tarkoittaisi se tilauspituuden kasvamista noin kolmella minuutilla. Tuotannollisesti näin pienellä muutoksella ei oleteta olevan suurtakaan merkitystä esim. tehokkuuteen. Energiankulutuksen kannalta analysoinnissa on kuitenkin huomioitava lajinvaihtojen vähenemisen lisäksi pidentyvä tilauspituus. Tilauspituuksien kasvaessa paperikoneen ajettavuus oletettavasti parantuu, ja tällä voidaan olettaa olevan positiivinen vaikutus myös energiankulutukseen. Tätä osuutta ei kuitenkaan tarkastella tässä tutkimuksessa.

Taulukko 13: Tilauspituuksien vaikutus energiankulutukseen

	Nykytila	Lajinvaihtojen vähennys 20 %:lla
Lajinvaihtoja kuukaudessa (kpl/kk)	36,4	29,1
Lajinvaihdon keskimääräinen kesto (h)	0,18	0,18
Lajinvaihtoaika kuukaudessa (h/kk)	6,6	5,2
Lajinvaihdoista saatu lisätuotantoaika (h)		1,4
Lajinvaihdoista saatu lisätuotantoaika jaettuna tasaisesti kaikille tuotantotilauksille	0	~3 minuuttia
Keskimääräinen tilauspituus (h)	16,2	20,3
Lajinvaihtojen keston suhde tilauspituuteen	1,1 %	0,9 %

Lajinvaihtojen merkitys paperikoneen kokonaisenergiankulutuksessa on huomioitava, mutta kovinkaan merkittävää roolia sillä ei ole. Lajinvaihdon aikana käytetty energiamäärä oli noin 1 % tuotantoerän vaatimasta kokonaisenergiasta. Lajinvaihtojen määrää ei varmastikaan pystytä kokonaan poistamaan eli jatkossakin paperikoneella tullaan ajamaan useita erilaisia laatuja, jotka vaativat eriasteisia lajinvaihtoja. Määrän vähentämiseen on kuitenkin syytä panostaa, koska tilauserien kasvaessa lajinvaihdon suhteellinen osuus pienenee ja sen merkitys kokonaisuudessa vähenee. Huomioitavaa on myös, että lajinvaihtomäärien laskiessa erien aloituskerrat vähenevät, minkä ansiosta esim. paperikoneella muodostuva hylkymäärä saattaa laskea. Tällä on suora vaikutus energian tuottavuuteen.

## 7 Tulosten analysointi

### 7.1 Teemahaastattelu

Teemahaastattelussa kartoitettiin nykytilaa erityisesti energiankulutuksen, mutta suppeammin myös kustannusten minimoinnin näkökulmasta. Tavoitteena teemahaastattelulla oli kartoittaa energiankäyttöön liittyvää nykytilannetta. Teemahaastattelu nähtiin myös hyvänä mahdollisuutena kerätä henkilöstöltä ajatuksia paperikoneella toteutettavaan koeajovaiheeseen. Haastattelussa ei sinällään noussut uusia ideoita koeajoihin, mutta haastattelut vahvistivat valittujen koeajomallien toteuttamisen tarvetta. Haastateltavat ryhmät olivat työntekijät, asiantuntijat sekä tehtaan johto.

Kaikilla organisaatiotasolla nähtiin tarvetta parantaa energiankulutukseen liittyvää mittarointia ja seurantaa. Joidenkin näkemysten mukaan nykyinen mittaristo nähtiin lähes olemattomana energiankulutuksen seurannan osalta. Henkilöstön näkemyksiä vahvistaa koeajo-osuuden aikana tehdyt havainnot. Energiankulutuksen seurantaan tehtiin erillisiä seurantatyökaluja koeajovaiheen mahdollistamiseksi. Nämä työkalut eivät kuitenkaan suoraan tukisi henkilöstön päivittäistä energiaseurantaa.

Toisena merkittävänä tekijänä teemahaastatteluissa nousi esiin käytettyjen kuitujen merkitys energiankulutukseen ja sitä kautta muodostuviin kustannuksiin. Henkilöstölle oli kaikilla organisaatiotasolla muodostunut selkeä käsitys, että osa käytettävistä kuituraaka-aineista vaatii enemmän kuivatusenergiaa toisiin kuituihin verrattaessa. Vaikutuksen suuruus oli kuitenkin epäselvää eli henkilöstö ei pystynyt sanomaan esim. prosentuaalisia eroavaisuuksia. Tähän vaikuttanee osaltaan puutteellinen mittaristo, minkä vuoksi tarkkoja arvioita oli mahdoton antaa.

Kolmas yleisesti haastatteluissa esiin noussut aihe oli laatutavoitteiden noudattaminen ja sen välillinen vaikutus energiankulutukseen. Käytännössä tällä tarkoitettiin sitä, että laatutavoitteita on noudatettava ja tarpeeton ”ylilaadun” tuottaminen ei ole järkevää. Esim. paperin lujustason nostaminen tarpeettoman ylös ei ole laadun kannalta tarpeellista, mutta se saattaa nostaa ominaisenergiankulutusta huomattavasti ylöspäin. Henkilöstöllä oli selkeä käsitys prioriteettijärjestyksestä eli laatutavoitteiden varmistaminen on aina tärkeysjärjestyksessä

tehokkuutta korkeammalla. Laatutoteumien aktiivisen seuraamisen tärkeys nousi myös esiin keskustelujen yhteydessä. Aktiivinen seuranta mahdollistaa ajantasaisen prosessin optimoinnin, jolloin energiankäyttö suurella todennäköisyydellä tehostuu.

Loput esille nousseista aiheista eivät olleet yhtä laajasti esillä edellä kuvattuihin kolmeen aiheeseen verrattuna. Useissa keskusteluissa nousi kuitenkin esiin paperikoneen vesitalouden merkitys paperikoneen energiankulutukseen liittyen. Käytännössä veden kulutuksen minimoimisella energiaa ei tarvitse käyttää veden lämmittämiseen. Muita esille nousseita aiheita olivat mm. tuotantonopeuden vaikutus energian ominaiskulutukseen.

Asiantuntijat nostivat työntekijöistä poiketen merkittäväksi tekijäksi energiankulutukseen liittyen koulutuksen ja osaamisen merkityksen. Henkilöstön säännöllisellä koulutuksella ihmiset oppivat kiinnittämään huomiota oikeisiin asioihin ja samalla tekemään optimaalisia ratkaisuja. Koulutusmenetelmiä nähtiin olevan useitakin, mutta parhaiden käytäntöjen jakaminen nousi esiin muita useammin. Parhaita käytäntöjä kannattaa jakaa laajasti yrityksen sisällä. Pienimmillään tämä voi tapahtua vuorojen välisessä kanssakäymisessä vuorojen vaihtuessa tai laajemmin horisontaalisen organisaation jakaman ohjauksen kautta.

Edellä kuvattuun osaamiseen liittyy osaltaan henkilöstön puutteellinen ymmärrys kustannuksien muodostumisesta, mikä nousi esiin kaikkien organisaatiotasojen haastattelussa. Käytännössä henkilöstöllä ei ollut tietoa kustannusrakenteesta tai sen suuruusluokasta. Haastattelujen perusteella merkittävimmät kustannuserät tiedettiin hyvin, mutta suuruusluokasta ei ollut tarkkaa käsitystä. Esiin nousi myös, että oman työn vaikutuksen suuruudesta kustannuksiin ei ole selkeää arviota.

Teemahaastattelussa kysyttiin myös yleisellä tasolla työntekijöiden mahdollisuutta osallistua erilaisiin kehityshankkeisiin. Tämän kysymyksen tavoitteena oli yleisellä tasolla kartoittaa nykytilaa henkilöstön vaikutusmahdollisuuksista yrityksen sisällä. Haastattelujen perusteella kaikki organisaatiotasot näkivät henkilöstön mahdollisuudet osallistua kehityshankkeisiin hyväksi. Käytännössä tämä on toteutettu mm. siten, että työntekijöitä nimitetään mukaan investointihankkeisiin. Työntekijät näkivät mahdollisuudet osallistua kehityshankkeisiin hieman pienempänä kuin muut haastatellut ryhmät, mutta yleisesti ottaen hekin näkivät osallistumismahdollisuudet hyväksi.

Tehtaan johdon haastattelussa esiin nousi erityisesti mitattuun tietoon perustuva johtaminen ja päätöksien perustuminen erilaisiin mittareilla saatuihin tietoihin. Tämä tukee selkeästi



muun henkilöstön näkemystä tilanteesta. Tehtaan johto nosti esiin myös kustannustietoisuuden merkityksen päivittäisessä työssä ja johtamisessa. Yleisellä tasolla johdon näkemykset vastasivat suurelta osin muun henkilöstön näkemyksiä.

## 7.2 Kuitukoostumuskoeajon analysointi

Kuitukoostumuksella oli koeajojen perusteella selkeä vaikutus energian tuottavuuteen ja sitä kautta paperin valmistukseen liittyviin kustannuksiin. Toteutettujen koeajojen perusteella ei kuitenkaan pystytä määrittämään selkeitä prosentuaalisia eroja eri kuitukoostumusten välillä. Tämä vaatisi lukuisia erilaisia koeajoja, joissa verrattaisiin yksittäisen kuitulajin eroavaisuutta johonkin toiseen kuitulajiin. Tämän tutkimuksen puitteissa ei ollut mahdollisuutta lähteä toteuttamaan tätä koeajosarjaa. Toteutetulla kuitukoeajolla pystyttiin kuitenkin selkeästi osoittamaan, että testatuista kuitulajeista BCTMP oli selkeästi heikoin energian tuottavuuden kannalta muihin testattuihin kuitulaatuihin verrattuna. Tutkimuksen perusteella energian tuottavuuden nousulla ei kuitenkaan pystyttäisi kompensoimaan nousseita kustannuksia. BCTMP oli lähtötietojen perusteella edullisin kuitujae muihin testattuihin kuitujakeisiin verrattuna. Vaikkakin BCTMP nosti selkeästi energiakustannuksia, pysyivät muutuvat kustannukset kuitenkin alhaalla materiaalikustannusten edullisuuden vuoksi.

Energian tuottavuuden kannalta tehokkain kuitulaji oli koeajojen perusteella lyhyt kuitu, toiseksi tehokkain oli pitkä kuitu ja tehottomimmaksi osoittautui BCTMP, kuten edellä on todettu. Pitkän kuidun vaatima kuivatusenergia oli lyhyttä kuitua suurempi, mutta ero näiden kahden kuitulajin välillä oli kuitenkin maltillinen. On mahdollista, että tietyissä olosuhteissa pitkä ja lyhyt kuitu jopa vaihtaisivat paikkaa energian tuottavuuden kannalta. Toteutetun koeajon perusteella voidaan vedenpoiston olettaa olevan lehtipuusellulla tehokkaampaa puristinosalla kuten Kullander et al (2012, s. 951) ovat tutkimuksessaan todenneet. Tämä olisi voitu määrittää myös kokeellisesti paperikoneen puristinosalla ottamalla kuiva-ainenäytteitä eri koeajovaiheista. Tätä ei kuitenkaan voitu toteuttaa tässä yhteydessä, koska kyseisen kuiva-ainenäytteen ottoon sisältyy tiettyjä turvallisuusriskejä.

Yllä selitetty eroavaisuus energian tuottavuudessa ja kustannusten muodostumisessa kuvaa hyvin tuottavuuden ja kannattavuuden välistä suhdetta. Tässä tutkimuksessa energian

tuottavuuden kehittyminen heikensi kuitenkin kustannustehokkuutta. Tämä on suoraan rinnastettavissa Rantasen (1995, s.11) väitöskirjan toteamukseen tuottavuusparadoksista, jonka mukaan yrityksen kannattavuus saattaa olla erinomainen, vaikka tuottavuus on huono.

Energian tuottavuuden ja kuitukustannusten välisen riippuvuuden analysoinnissa on myös huomioitava aina analyysin ajankohta. Energia- ja kuituhinnat vaihtelevat suuresti kuukausittain, minkä vuoksi yksittäisen analyysin yleistäminen laajemmalle aikavälille saattaa johtaa päätökseen, joka perustuu virheelliseen lähtötietoon.

### 7.3 Tuotantonopeuskoeajon analysointi

Paperikoneen tuotantonopeuteen liittyvän koeajon tulosten perusteella energian ominaiskulutus kasvoi nopeuden funktiona, mutta tämän vaikutus ei kuitenkaan kumonnut saavutettuja hyötyjä. Tuotantonopeuteen liittyneen koeajon perusteella kokonaisenergian ominaiskulutus kasvoi koeajopisteiden 1300 m/min ja 1500 m/min välillä noin 10 %, mutta samaan aikaan tuotantomäärä kasvoi noin 15 %. Saavutetulla lisätuotannolla ja lisämyynnillä pystytään kattamaan nousseet kustannukset. Käytännössä noussut tuotantomäärä olisi kannattavuuden kannalta positiivinen asia, koska lisämyynti tulisi kasvattamaan tulosta. Luonnollisesti tämän edellytyksenä on, että tuotos pystytään myymään markkinoilla. Lukuarvollaista analyysiä ei kuitenkaan pysty koeajotulosten perusteella tekemään kovinkaan luotettavasti. Yksittäinen koeajo antaa tässä tapauksessa varmastikin suuntaviivat analyysille, mutta pitkän tähtäimen päätöksiä tekeminen ei ole perusteltua. Todennäköisesti energiankulutuksen kasvua pystyttäisiin minimoimaan ja jopa kääntämään laskevaksi, jos tuotanto ja käytetty kuivatusenergia optimoitaisiin lajikohtaisesti. Koeajossa kuitenkin pyrittiin vakioimaan olosuhteet, mikä saattaa tietyissä tapauksissa vääristää koeajotuloksia.

Paperikoneen kuivatushuuvan toiminta perustuu yleisesti ottaen siihen, että erilaiset ilmamäärät kaasupolttimella ovat optimaaliset. Tämä edellyttää optimaalisia ilmapuhaltimien kierroslukuja, optimaalisia lämpötiloja sekä muita optimaalisia olosuhteita. Näitä ei tässä koeajossa säädetty, minkä vuoksi tulokset saattavat olla osin vääristyneet, kuten yllä on kuvattu.

#### 7.4 Paperin loppukosteuskoeajon analysointi

Paperin loppukosteuteen liittyvässä koeajossa havaittiin oletetusti, että energiankulutus laskee paperin loppukosteuden noustessa. Mielenkiintoista oli havaita, että suurin säästöpotentiaali energiassa oli tilanteissa, joissa kosteustaso oli alhainen (alle 5 %). Kosteustason noustessa myös säästöpotentiaali laski. Tulosten tulkinnan kannalta maksimaalinen kosteus oli niin energian tuottavuuden kuin kustannustenkin kannalta paras vaihtoehto. Laadullisia tekijöitä ei analysoida tässä tutkimuksessa. Loppukosteuden osalta pehmopaperiteollisuuden peukalosääntö on, että 1 %-yksikön nousu loppukosteudessa vastaa 8–12 % säästöä kuivatusenergiassa. Tutkimuskohteena olleella koneella tämä ei toteutunut, mutta tulokset olivat kuitenkin suuntaa antavia tähän peukalosääntöön. Koeajossa saavutettiin laskennallisesti noin 6 %:n energiansäästö kosteustasojen 4,0 % ja 5,0 % välillä. On mahdollista, että 8–12 % taso olisi saavutettu, jos paperikoneen kuivatusjärjestelmiä olisi koeajon aikana säädetty aktiivisesti. Tämä olisi kuitenkin tehnyt yksittäisen koeajon analysoinnin lähes mahdottomaksi.

Tässä tutkimuksessa ei ole analysoitu materiaalin tuottavuutta, mutta paperin loppukosteudella on suora merkitys myös materiaalin tuottavuudelle. Loppukosteuden noustessa pystytään kuitujen käyttöä vähentämään, koska vesi korvaa näissä tilanteissa kuidun. Tällä on oleellinen vaikutus kustannustehokkuuteen, koska kuitukustannukset ovat merkittävin yksittäinen kustannuserä paperiteollisuudessa. Käytännössä yhden %-yksikön loppukosteuden nousu tarkoittaa yhden %-yksikön säästöä valmistuksessa käytettävissä kuitumateriaaleissa.

#### 7.5 Lajinvaihtojen vaikutuksen analysointi

Paperikoneen lajinvaihtoja analysoitaessa havaittiin jopa hieman yllättävästi, että lajinvaihtojen merkitys energiankulutukselle on suhteellisen pieni. Lajinvaihtojen aikana käytetty energiamäärä oli noin 1 % tuotannon aikana käytetystä energiamäärästä. Energian tuottavuuden kannalta lajinvaihtojen määrän vähentämisellä ei juurikaan pystytä parantamaan energian tuottavuutta. Luonnollisesti yksi prosentti on suuri energiamäärä, mutta tämän pienentäminen nolnaan lienee mahdotonta. Tehostaminen on varmastikin mahdollista, mutta se

tarkoittaisi suurella todennäköisyydellä tuotettavien paperilaatujen karsintaa. Jos tämä ei ole mahdollista, on lajinvaihtomäärien pienentäminen vähintäänkin haastavaa.

Lajinvaihtomäärän pienentäminen vaikuttaisi todennäköisesti eniten materiaalin tuottavuuteen, koska tuotantoerien aloituskerrat vähenisivät, minkä ansiosta tuotantoerän alussa muodostuva epäkurantti tuotanto vähenisi. Tämän arviointi vaatisi kuitenkin tarkempaa analyysiä, mutta se ei ole kuulunut tämän tutkimuksen kokonaisuuteen.

Jos lajinvaihtomääriä vähennettäisiin 20 %, tarkoittaisi se sitä, että yhtä tuotantoerää kohti käytetyn energian osuus lajinvaihdon aikana putoaisi tasolta 1,1 % tasolle 0,9 %. Tämä on luonnollisesti energian tuottavuuden kannalta askel oikeaan suuntaan, mutta toimenpiteenä tämä ei varmastikaan ole helppo toteuttaa. Priorisointimielessä edellä kuvatuilla koeajoilla ja niiden osoittamilla tehostamismahdollisuuksilla päästään suurempaan vaikuttavuuteen nopeammin ja todennäköisesti myös helpommin.

## 8 Johtopäätökset

### 8.1 Tutkimuksen tavoitteet ja raja

Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa ennalta määritettyjen asioiden ja tekijöiden vaikutusta energian tuottavuuteen sekä kustannustehokkuuteen. Tuottavuuden ja kustannuksien analysointi yhdessä on tärkeää, jotta vaikutuksia kannattavuuteen pystyttäisiin peilaamaan. Pelkkä tuottavuuden analysointi saattaisi johtaa vääriin päätelmiin.

Ennalta määritettiin neljä eri tekijää, joiden vaikutusta haluttiin selvittää energian tuottavuuden ja kustannustehokkuuden näkökulmasta:

1. energian tuottavuuden ja kuitukoostumuksen välinen riippuvuus
2. energian tuottavuuden ja paperin loppukosteuden välinen riippuvuus
3. energian tuottavuuden ja paperikoneen tuotantonopeuden välinen riippuvuus
4. lajinvaihtojen vaikutus energian tuottavuuteen

Tutkimuksesta rajattiin pois muut osatuottavuuden alueet, jotta tutkimuslaajuus olisi pysynyt ennalta määritetyn mukaisena. Toisaalta tutkimuksessa ei myöskään analysoitu vaikutuksia päästöihin, vaikka tiedossa oli energiankulutuksen suhde esim. CO<sub>2</sub>-päästöihin. Tutkimuksessa ei myöskään analysoitu paperin laatuun vaikuttavia tekijöitä. Paperin laatu pyrittiin pitämään koeajovaiheessa ”vakiona”, mutta tarkempaa analysointia asiaan liittyen ei tehty.

Tutkimusta suunniteltaessa päätettiin, että tarkkoja tuottavuuseroja ei lähdetä määrittämään, koska niiden tarkastelu vaatisi laajempia koeajosarjoja. Näiden toteuttaminen sovitus- aikataulussa ei olisi ollut mahdollista. Jo yksittäisten koeajojen suorittaminen vaati kokonaisuudessaan noin viiden viikon aikaperiodin suunnitteluineen ja toteutuksineen. Koeajojen toteutus pystyttiin ajoittamaan kahden viikon periodille, kuten alkujaan oli tavoitekin. Toisaalta vaihtoehtona oli myös keskittyminen yhteen osa-alueeseen, mutta tämä ei olisi tuottanut kovinkaan laajaa näkemystä ilmiöstä. Päätös olikin pysyä ”ylätasolla”, jotta energian tuottavuudesta ja kustannustehokkuudesta saataisiin mahdollisimman laaja kuva.

## 8.2 Tutkimuskysymykset

### **Tutkimuskysymys 1: Miten erilaiset kuitukoostumukset vaikuttavat energian tuottavuuteen kokonaiskustannukset huomioiden?**

Tutkimustulosten perusteella BCTMP osoittautui energian tuottavuuden kannalta tehottomimmaksi kuituraaka-aineeksi. Koeajotulosten perusteella BCTMP:n osuutta vähennettäessä säästettiin kuivatusenergiassa lähes 7 %. Vähennettäessä BCTMP kokonaisuudessaan pois kuitureseptistä energiankulutuksen positiivinen kehitys jatkui, mutta muutos ei enää ollut yhtä merkittävä. Pitkä kuitu sijoittui toiseksi energian tuottavuuden näkökulmasta, kun taas lyhyt kuitu oli koeajotulosten perusteella vähiten kuivatusenergiaa vaativa kuitujae eli toisin sanoen energian tuottavuuden kannalta paras vaihtoehto. Pitkän kuidun ja lyhyen kuidun ero ei kuitenkaan ollut huomattava. Näihin liittyvissä energiankulutuksissa oli kuitenkin myös tilastollista merkittävyyttä.

Analysoitaessa asiaan liittyvää kustannustehokkuutta havaittiin tulosten kääntyvän päälaelleen. Vaikka BCTMP olikin energian tuottavuuden kannalta heikoin vaihtoehto, oli sillä erittäin positiivinen vaikutus paperin valmistuksen kustannustehokkuuteen. Pitkän kuidun ja lyhyen kuidun ero oli tässäkin yhteydessä huomattavasti pienempi. Koeajotulosten perusteella pitkä kuitu osoittautui kustannustehokkuudeltaan heikoimmaksi vaihtoehdoksi.

Kustannustehokkuusanalyysissä on huomioitava, että laskelma perustuu yleisiin maailmanmarkkinahintoihin pitkän ja lyhyen kuidun osalta. BCTMP:n hinta jouduttiin suurelta osin arvioimaan. Myös energiakustannuksissa hyödynnettiin yleisesti saatavia lukuja. Laskelmissa käytettiin indeksoituja kuitukustannuksia, koska todellisia lukuja ei voitu paljastaa luottamuksellisuuden vuoksi.

### **Tutkimuskysymys 2: Miten erilaiset tuotantotavat ja käytännöt vaikuttavat energian tuottavuuteen kokonaiskustannukset huomioiden?**

Suorituskyvyn mittaaminen ja siitä saatava tieto ovat oleellisessa asemassa suorituskyvyn johtamisessa. Tämä on tärkeä tekijä myös työntekijöiden päivittäisessä toiminnassa. Suorituskyvyn johtaminen pitää perustua mitattuun tietoon, jotta päätökset perustuvat luotettavaan informaatioon. Puutteellinen mittaaminen saattaa johtaa virheellisiin arvioihin ja sitä kautta virheellisiin päätöksiin. Huomioitavaa on myös, että mittaamisen kytkeminen

palkitsemisjärjestelmiin lisää henkilöstön motivoituneisuutta ja saattaa entisestään tehostaa toimintaa (Ukko et al. 2007, s. 49–50).

Paperikoneen tuotantonopeudella oli koeajon perusteella negatiivinen vaikutus paperin valmistukseen liittyviin ominaisenergiankulutuksiin, mutta saavutettu lisätuotanto saattaisi kuitenkin kompensoida nousseet kustannukset. Noususta ominaisenergiankulutusta oli kuitenkin vaikea arvioida numeerisesti. Parhaimmillaan ominaiskulutus saattaisi jopa laskea, kun kuivatusjärjestelmiä säädetään tuotannon aikana kohti optimaalista tilannetta. Tämän arviointi kuitenkin vaatisi laajempia koeajosarjoja.

Paperin loppukosteudella oli kiistattomasti positiivinen vaikutus niin energian tuottavuuteen kuin kustannustehokkuuteenkin. Korkeampi loppukosteus vähensi energian käyttöä, mikä oli muuttuvien kustannusten kannalta positiivista. Koeajotulosten perusteella on erityisen tärkeää, että alhaisimpia loppukosteustasoja (alle 5,0 %) vältetään, koska tulosten perusteella kyseinen alue vaatii eniten energiaa. Toisaalta taas loppukosteuden noustessa korkealle (yli 6,0 %) tehostamismahdollisuudet pienenevät. Tarkkojen lukuarvojen määrittäminen oli kuitenkin lähes mahdotonta, koska asiaan vaikuttavia muuttujia oli lukuisia. Todennäköisesti suuruusluokat muuttuvat myös kuitukoostumusten perusteella.

Paperikoneen lajinvaihoilla oli merkitystä energian tuottavuuteen, mutta tehostaminen tämän kautta saattaa olla haastavaa toteuttaa. Luonnollisesti jokainen vähennetty lajinvaihto lisää energian tuottavuutta ja sitä kautta kustannustehokkuutta, mutta ilmiö itsessään ei ole täysin selvä. Jos lajinvaihtoja vähennetään siten, että tarjoomasta poistetaan kannattava tuote, saattaa energian tuottavuuden tehostaminen kääntyä kannattavuuden näkökulmasta negatiiviseksi.

Yleisesti analysoitaessa voidaan todeta jokaisen tuotantotavan ja -menetelmän vaikuttavan paperikoneen energiankulutukseen sekä kustannustehokkuuteen. Edellä kuvatuilla toimilla on mahdollista tehostaa toimintaa, mutta toimien suuruusluokan arviointi on olemassa olevilla tiedoilla vaikeaa. Seuranta myös vaatii säännöllistä päivitystä ja seurantaa, jotta vaihtelut kustannusrakenteissa pystyttäisiin huomioimaan.

Energian tuottavuuden kannalta oleellista on suorituskyvyn mittaaminen ja saadun tiedon hyödyntäminen päivittäisessä johtamisessa. Jos työntekijöillä on käytössään energiankulutusta seuraavien mittareiden ajantasainen tieto, mahdollisuudet energian tuottavuuden kehittämiseen helpottuvat oleellisesti.

### 8.3 Tulosten käytettävyys, luotettavuus ja suositukset jatkotutkimukselle

Vaikka teemahaastattelun tuloksia ei olekaan tarkoitettu yleistettäväksi, voidaan tuloksien olettaa olevan yleistettävissä niiltä osin, kuin haastattelukysymykset olivat yleisiä. Esim. mittaamisen tärkeys on helppo ymmärtää ja pätee varmasti jopa eri toimialoille. Toisaalta taas yksityiskohtaiset kysymykset ja vastaukset liittyvät yksittäiseen kohteeseen, minkä vuoksi niiden hyödyntäminen ei ole perusteltua.

Koeajotuloksia pystytään hyödyntämään tutkimuskohteena olleella paperikoneella, mutta laajentaminen muihin yhteyksiin tai koneisiin ei ole perusteltua. Jokainen paperikone on oma yksilönsä ja koneet koostuvat erilaisista osakomponenteista. Näiden yksittäisten laitteiden merkitys paperikoneen energiankulutukseen ja kustannustehokkuuteen vaihtelee, minkä vuoksi tulosten siirto toisaalle ei ole mielekästä. Todennäköisesti koeajoissa havaitut tekijät pätevät monessa muussakin ympäristössä, mutta tämän todentaminen ei ole tässä yhteydessä mahdollista. Tulosten yleistettävyyttä vaikeuttaa myös valmistettavien paperilaatujen erilaisuus. Vaikka yleisesti puhuttaisiin pehmopaperista, saattavat ne laadullisesti vaihdella suurestikin toisistaan.

Energiankulutukseen liittyen on tehty lukemattomia erilaisia tutkimuksia, mutta niiden yleistettävyys ja hyödynnettävyys on usein hankalaa. Monet tutkimuksista ovat vanhoja, minkä vuoksi kyseisten tulosten käyttäminen voi olla perusteetonta. Pääsääntöisesti nykyaikaiset laitteet ovat vanhoja laitteita tehokkaampia, minkä vuoksi tilastojen hyödyntäminen esim. 80-luvulta ei ole kovinkaan järkevää. Toisaalta niitä voi pitää vertailukohtana kehitykselle.

Tutkimuksen tekijä oli työsuhteessa kohdeyritykseen, mutta tutkimuksen tekijällä ei ollut itsellään intressiä vaikuttaa esim. koeajotuloksiin. Teemahaastattelun tuloksien luotettavuus voitaisiin kyseenalaistaa, koska tutkimuksen tekijä oli esimiesasemassa useaan haastateltavaan nähden. Tutkimuksen tekijä kuitenkin uskoo teemahaastattelun tuloksien olevan luotettavia. Haastatteluiden luotettavuuteen ja avoimuuteen panostettiin koko haastattelun ajan ja haastateltavat ymmärsivätkin hyvin teemahaastattelun perimmäisen tarkoituksen, mikä siis oli saada kattava kuva energiankulutukseen liittyvistä asioista.

Jatkotutkimuksen kannalta eri kuitujakeiden eroavaisuutta energian tuottavuuden näkökulmasta on syytä tutkia enemmän. Tämä antaa mahdollisuudet tulevaisuudessa valita energia- tehokkaimmat ratkaisut. Tämä on myös fossiilivapaan tuotannon kannalta tärkeä



toimenpide. Vaikka yksittäiset kuituvalinnat eivät teekään valmistusta fossiilivapaaksi, ovat ne kuitenkin askel oikeaan suuntaan vähentäessään valmistukseen liittyvää energian kulu- tusta. Seuraavissa koeajoissa on syytä seurata myös paperikoneen puristinosan toimintaa, jolloin esim. pitkän ja lyhyen kuidun eroavaisuudet energiankulutuksessa pystytään analy- soimaan tarkemmin.

Kohdeyrityksen on syytä panostaa ominaisenergiankulutuksen seurantaan ja tarkentaa se mahdollisimman yksityiskohtaisesti kuvaamaan esim. lajikohtaisia eroavaisuuksia. Jokai- selle paperilaadulle on syytä määrittää energiankulutuksen tavoitteet energijakeittain, jol- loin tehostamistoimet pystytään kohdentamaan tarkasti. Toisaalta kohdeyrityksen on hyvä miettiä keinoja, millä työntekijöiden kustannustietoisuutta voitaisiin parantaa. Suuri osa kus- tannuksista on luonnollisesti yrityksen toiminnan kannalta kriittistä informaatiota, jota ei voida jakaa vapaasti eteenpäin. Hyvä olisikin pohtia kustannustietoisuuden esittämistä esim. visualisoinnin keinoin.

Kohdeyrityksen on myös syytä tarkastella teemahaastatteluissa esiin noussutta jenkkisylin- terin ja kuivatushuuvan välistä suhdetta. Kuivatustapahtumaa pystytään ohjaamaan tapahtu- vaksi enemmän joko höyryllä tai kaasulla. Tämän tarkempi tutkiminen mahdollistaisi kus- tannustehokkaan tuotantomallin, jota työntekijät pystyisivät hyödyntämään päivittäisessä työssään.

## 9 Yhteenveto

Energiankulutus ja energian vaikutus valmistavan teollisuuden kustannuksiin kasvoivat oleellisesti vuoden 2022 aikana. Erityisesti noussut energianhinta näkyi sähkön hinnassa, mutta yleisesti ottaen myös muissa energiajakeissa hinnat nousivat oleellisesti. Sähkön pörssi-hinta oli vuoden 2019 tammikuussa hieman alle 56 €/MWh, kun vuoden 2022 lopussa hinta oli noin 246 €/MWh eli hinta oli yli nelinkertaistunut. Nousseet energiakustannukset näyt-televät suurta osaa erityisesti energiaintensiivisessä teollisuudessa kuten paperiteollisuudessa. Nousseiden kustannusten siirtäminen suoraan myyntihintaan on usein hankalaa, minkä vuoksi myös toiminnan kehittäminen esimerkiksi tuottavuutta parantamalla on tärkeää. Tutkimuksen tausta ja motiivi liittyivätkin oleellisesti nousseisiin energiakustannuksiin. Toisaalta Hämäläinen ja Hilmola (2017, s.819) ovat omassa paperiteollisuuden energi-ankulutukseen liittyvässä tutkimuksessaan suositelleet jatkotutkimukseksi kehittää keinoja energiankulutuksen ja kustannuksien hallintaan.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää energian tuottavuutta kustannustehokkaasti. Pelkkä energian tuottavuuden kehittäminen ei välttämättä ole kaikissa tapauksissa kustannusteho-kasta, minkä vuoksi tarkasteluun piti ottaa mukaan kustannusulottuvuus. Tutkimusten ai-kana tämä myös havaittiin käytännössä eli joissain tapauksissa kustannustehokkain vaihto-ehto on energian tuottavuuden kannalta heikoin. Energian tuottavuuden kehittämisessä oli myös ekologisen kestävyuden ulottuvuus, mutta se rajattiin pois tämän tutkimuksen koko-naisuudesta.

Tutkimuksen alussa määritettiin kaksi tutkimuskysymystä:

- Miten erilaiset kuitukoostumukset vaikuttavat energian tuottavuuteen kokonaiskus-tannukset huomioiden?
- Miten erilaiset tuotantotavat ja käytännöt vaikuttavat energian tuottavuuteen koko-naiskustannukset huomioiden?

Tutkimuskysymyksien valinta perustui tutkimuksen taustaan ja motiiviin. Kustannustehokas tuotanto ja energian tuottavuuden parantaminen ovat yrityksen toiminnan kannalta tärkeitä tekijöitä.

Tutkimus toteutettiin kokeellisena tutkimuksena, joka sisältää kirjallisuuskatsauksen sekä empiriaosuuden. Kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin mm. suorituskyvyn eri osa-alueita, suorituskyvyn johtamista ja mittaamista sekä suorituskyvyn analysointia. Suorituskyvyn osa-alueista tuottavuutta selvitettiin laaja-alaisimmin, koska tutkimus liittyy erityisesti yksittäisen osatuottavuuden kehittämiseen. Tutkimukseen kuuluvaa kustannustehokkuuspuolta tutkittiin kirjallisuudesta kartoittamalla mm. yrityksen kannattavuuteen liittyviä tekijöitä sekä yleisiä kustannuksiin liittyviä asioita. Tutkimukseen sisältyi myös tuottavuuden kehittämistä vaikeuttavien tekijöiden kartoitus kirjallisuuden avulla. Kirjallisuusosuus käsitti myös paperin valmistukseen liittyvän katsauksen. Samassa yhteydessä kuvattiin myös paperin valmistukseen kiinteästi liittyvää energiankulutusta.

Tutkimuksen kokeellinen osuus toteutettiin Metsä Tissuen Mäntän tehtaalla paperikone 10:llä. Kokeelliseen osuuteen sisältyi teemahaastattelu, kolme erillistä koeajoa sekä yksi analysointi tehtaan tietojärjestelmistä saatujen tietojen perusteella. Teemahaastatteluiden tavoitteena oli kartoittaa energiankulutukseen liittyviä yleisiä tekijöitä, jotta yleistilanteesta olisi saatu kattava kuva ennen koeajoja. Toisaalta teemahaastattelut haluttiin toteuttaa ennen koeajovaihetta, koska oli mahdollista, että haastatteluiden perusteella koeajo-ohjelmaa muutettaisiin. Näin ei kuitenkaan tapahtunut, vaan haastattelut vahvistivat käsitystä tarpeesta valituille koeajoille.

Paperikoneella toteutettiin kolme erillistä koeajoa. Ensimmäinen koeajo oli kuitukoostumus-koeajo, jossa selvitettiin kolmen eri kuitulaadun vaikutusta paperikoneen kuivatusenergian tarpeeseen sekä muodostuviin kustannuksiin. Toisessa koeajossa tutkittiin paperikoneen tuotantonopeuden vaikutusta energiankulutukseen ja muodostuviin kustannuksiin. Viimeinen koeajovaihe piti sisällään paperin loppukosteustestauksen, jolla selvitettiin loppukosteuden vaikutusta energiankulutukseen ja kustannuksiin. Tehdastietojärjestelmistä saaduilla tiedoilla tutkittiin paperikoneen lajinvaihtojen merkitystä energiankulutukseen.

Koeajotulosten perusteella optimaalisella kuituvalinnalla voidaan vaikuttaa positiivisesti energian tuottavuuteen. Tutkittuina kuitulaatuina olivat BCTMP, pitkä kuitu ja lyhyt kuitu. Energian tuottavuuden kannalta huonoin kuitulaatu oli BCTMP. Pitkän kuidun ja lyhyen kuidun ero ei ollut suuri, mutta koeajotulosten perusteella lyhyen kuidun vaatima kuivatusenergia on kuitenkin pienempi pitkään kuituun verrattuna. Kustannustehokkuutta analysoitaessa tilanne ei ole kuitenkaan niin yksinkertainen. Kustannustehokkuuden näkökulmasta parhaaksi valinnaksi osoittautui BCTMP, vaikka sen aiheuttamat energiakustannukset

ovat suurimmat. Pitkä kuitu osoittautui kustannuksien valossa heikoimmaksi vaihtoehdoksi. Tämä perustuu pitkän kuidun korkeaan hankintahintaan, mutta myös heikkoon energian tuottavuuteen.

Paperikoneen tuotantonopeuden nosto aiheutti ominaisenergiankulutuksessa nousua. Tämä nosti luonnollisesti energiakustannuksia valmistettua yksikköä kohden. Tuotantonopeuden nosto kuitenkin kompensoi tämän nousun, koska saatavalla lisätuotannolla pystyttiin kompensoimaan nousseet kustannukset, minkä ansiosta kokonaiskannattavuuden voitiin olettaa kehittyvän. Tuloksia ei kuitenkaan voi tulkita suoraan, koska optimaalisilla paperikoneen asetuksilla pystytään tehostamaan kuivatustapahtumaa. Parhaimmillaan ominaisenergiankulutus saattaisi pysyä vakiona tai jopa laskea tuotantonopeuden noustessa.

Paperin loppukosteuskoeajon tulosten perusteella energian säästöpotentiaali oli suurin alhaisilla (alle 5,0 %) kosteustasoilla. Tästä noustessa säästöpotentiaali laskee. Käytännössä energian tuottavuus kehittyi aina loppukosteuden noustessa, koska vaadittu kuivatusenergian määrä pieneni tuotettua yksikköä kohden. Huomattavaa oli myös, että loppukosteuden noustessa vaadittu kuitumäärä pieneni, minkä ansiosta myös materiaalin tuottavuus kehittyi. Tämän analysointi ei kuitenkaan ollut mukana tässä tutkimuksessa.

Paperikoneen lajinvaihtanalyysin perusteella energian tuottavuuden kehittäminen lajinvaihtoja vähentämällä ei välttämättä johda kovinkaan merkittäviin lopputuloksiin. Luonnollisesti lajinvaihtomäärän väheneminen parantaa tuottavuutta, mutta vaikuttavuudeltaan tämä ei ole merkittävä parannus. Haettaessa nopeita kehitysratkaisuja energian tuottavuudelle, on syytä keskittyä esim. edellä kuvattuihin tekijöihin. Lajinvaihtojen minimointi on usein pitkäkestoista, mutta toisaalta sillä myös päästään pitkävaikutteisiin parannuksiin.

Yksittäisen osatuottavuuden analysointi saattaa johtaa ei-toivottuun lopputulokseen. Analysointi on syytä koskea aina laajempaa kokonaisuutta, jotta osaoptimoinnin aiheuttamat riskit olisivat minimaaliset. Kokonaisuutta kehittämällä vaikutukset yrityksen kannattavuuteen ovat suurella todennäköisyydellä positiiviset. On kuitenkin tärkeää huomioida, että tuottavuuden ja kannattavuuden välillä ei ole olemassa selkeää yhteyttä.

## Lähteet

- Alasuutari, P. 2011. Laadullinen Tutkimus 2.0. Neljäs, uudistettu painos. Tampere: Vastapaino. 331 s. ISBN 978-951-768-385-2
- Alhola, K. & Lauslahti, S. 2000. Laskentatoimi Ja Kannattavuuden Hallinta. Porvoo: WSOY. 400 s. ISBN 951-0-23304-8
- Anderson, J. 2009. Determining manufacturing costs. *Chemical Engineering Progress* 105: pp. 27-33.
- Asimakopoulou, I., Samitas, A. & Papadogonas, T. 2009. Firm-specific and economy wide determinants of firm profitability: Greek evidence using panel data. *Managerial Finance* Vol. 35 No. 11: pp. 930-939.
- Bajpai, P. 2015. *Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry*. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-18744-0
- Bashir, H.A., Alzebedeh, K. & Al Riyami, A.M.A. 2014. Factor Analysis of Obstacles Restraining Productivity Improvement Programs in Manufacturing Enterprises in Oman. *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 2014, Article ID 195018.
- Baumol, W. 1984. On productivity growth in the long run. *Atlantic Economic Journal* 12: pp. 4–10.
- Beard, D.W. & Dess, G.G. 1981. Corporate-Level Strategy, Business-Level Strategy, and Firm Performance. *The Academy of Management Journal*, Vol. 24 No. 4: pp. 663-688.
- Berger, H., Shahri, N., Eisenhut, T. & Farghadan, M. 2021. Energy Efficiency in the Pulp and Paper Industry. *Sino-German Demonstration Project on Energy Efficiency in Industry*.
- Berghäll, E., Junka, T. & Kiander, J. 2006. T&K, Tuottavuus Ja Taloudellinen Kasvu. Helsinki: Valtion taloudellinen tutkimuskeskus.
- Bititci, U.S., Carrie, A.S. & McDevitt, L. 1997. Integrated performance measurement systems: a development guide. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 17 No 5: pp. 522-534.

- Chew, W. 1988. No-nonsense guide to measuring productivity. Harvard Business Review. Vol. 66 No. 1: pp. 110-118.
- Chow, C. W. & Van der Stede, W.A. 2006. The Use and Usefulness of Nonfinancial Performance Measures. Management accounting quarterly. Vol. 7 No. 3. pp. 1-8.
- Dawson, J. 2009. Thick Description. Encyclopedia of Case Study Research. Vol. 2: pp. 942-944.
- Dyer, W.G. & Wilkins, A.L. 1991. Better Stories, Not Better Constructs, to Generate Better Theory: A Rejoinder to Eisenhardt. The Academy of Management Review. Vol. 16 No 3: pp. 613-619.
- Energiategollisuus ry 2020. Kaukolämpötilasto 2019. Luettu 30.4.2023. Saatavissa: [https://energia.fi/files/5384/Kaukolampotilasto\\_2019.pdf](https://energia.fi/files/5384/Kaukolampotilasto_2019.pdf)
- Eriksson, P. & Koistinen, K. 2014. Monenlainen Tapaustutkimus. Helsinki: Kuluttajatutkimuskeskus. ISBN 978-951-698-283-3
- Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E. & Eichhammer, W. 2012. Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. Energy, Vol. 40 No 1: pp. 84-99
- Gaganis, C., Pasiouras, F. & Voulgari, F. 2019. Culture, business environment and SMEs' profitability: Evidence from European Countries. Economic Modelling 78: pp. 275-292.
- Ghosh, A.K. 2011. Fundamentals of Paper Drying -Theory and Application from Industrial Perspective. Evaporation, Condensation and Heat transfer. InTech. Viitattu 13.3.2023. Saatavissa: <https://www.intechopen.com/chapters/19429>
- Goddard, J., Tavakoli, M. & Wilson, J.O.S 2005. Determinants of profitability in European manufacturing and services: evidence from a dynamic panel model. Applied Financial Economics, 15:18. pp. 1269-1282.
- Gonsalves, P. & Eiler, R. 1996. Managing complexity through performance measurement. Management Accounting, Vol. 78 No 2: pp. 34-39.
- Hannula, M. 2002. Total productivity measurement based on partial productivity ratios. International Journal of Production Economics 78(1): pp. 57-67

- Harder, H. 2009. Explanatory Case Study. *Encyclopedia of Case Study Research* 1. pp. 370-371
- Harris, R. & Moffat, J. 2015. Plant-level determinants of total factor productivity in Great Britain, 1997-2008. *Journal of Productivity Analysis*. Vol. 44 No. 1: pp. 1-20.
- den Hartog, D. N., Boselie, P. & Paauwe, J. 2004. Performance Management: A Model and Research Agenda. *Applied psychology*. Vol. 53 No. 4: pp. 556–569.
- Heikkilä, T. 2014. *Tilastollinen Tutkimus*. 9. uudistettu painos. Helsinki: Edita. 297 s. ISBN 978-951-37-6495-1
- Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2007. *Tutki Ja Kirjoita*. 13 osin uudistettu painos. Helsinki: Tammi. 448 s. ISBN 951-26-5635-3
- Horngren, C.T. 1995. Management accounting: this century and beyond. *Management Accounting Research* 6(3): pp. 281-286
- Hägglom-Ahnger, U., Komulainen, P. & Seppälä, M.J. 2000. *Paperin Ja Kartongin Valmistus*. Helsinki: Opetushallitus. 280 s. ISBN 952-13-1280-7
- Hämäläinen, E. & Hilmola, O-P. 2017. Energy efficiency at the paper mill—dilemma of improvement. *Energy Efficiency* 2017, Vol 10 No 4: pp. 809-821.
- Joseph, R.E., Kanya, N., Bhaskar, K., Xavier, J.F., Sendilvelan, S., Prabhakar, M., Kanimozhi, N & Geetha, S. 2021. *Analysis on Productivity Improvement, using Lean Manufacturing Concept*. Elsevier Ltd: pp. 7176-7182.
- Jyväskylän yliopisto 2023a. Luettu 13.5.2023. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/kokeellinen-tutkimus>
- Jyväskylän yliopisto 2023b. Luettu 17.3.2023. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku>.
- Kaplan, R.S. 1984. Yesterday's accounting and today's economy. *Journal of Accountancy*. 158(5): pp. 141-152.
- Kee, R. 2008. The sufficiency of product and variable costs for production-related decisions when economies of scope are present. *International Journal of Production Economics* 114(2): pp. 682-696.

- Krochak, P. & Östlund, C. 2017. The Effect of Press Nip Geometry on Dryness, Density and Paper Properties. *Advances in Pulp and Paper Research*. Oxford: Pulp & Paper Fundamental Research Society, pp. 323-343.
- Krugman, P. 1997, *The age of diminished expectations: U.S. economic policy in the, 1990*. MIT Press, Cambridge, MA
- Kullander, J., Nilsson, L. & Barbier, C. 2012. Evaluation of furnishes for tissue manufacturing; wet pressing. *Nordic Pulp & Paper Research* 27(5): pp. 947-951.
- Laine, M., Bamberg, J. & Jokinen, P. 2007. *Tapaustutkimuksen Taito*. Helsinki: Gaudeamus. 300 s.
- Laitinen, E.K. 1989. *Yrityksen Talouden Mittarit*. Espoo: Weilin + Göös. 377 s. ISBN 951-35-4585-7
- Laitinen, E.K. 1998. *Yritystoiminnan Uudet Mittarit*. Helsinki: Yrityksen tietokirjat. 360 s. ISBN 952-14-0050-1
- 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): pp. 49-63.
- Lebas, M.J. 1995. Performance measurement and performance management. *International Journal of Production Economics* 41(1): pp. 23-35.
- Lindqvist, H., Salminen, K., Kataja-aho, J., Retulainen, E., Fardim, P. & Sundberg, A. 2012. The effect of fibre properties, fines content and surfactant addition on dewatering, wet and dry web properties. *Nordic Pulp & Paper Research* 27(1): pp. 104-111.
- Littré, E. 1883. *Dictionnaire de la Langue Française Contenant ... la Nomenclature ... la Grammaire ... la Signification des Mots ... la Partie Historique ... l'Étymologie*. Pariisi: Hachette & Cie
- Lönnqvist, A. 2004. *Measurement of Intangible Success Factors: Case Studies on the Design, Implementation and use of Measures*. Dissertation. Tampere University of Technology. ISBN 952-15-1387-X
- Metsä Group 2023. Luettu 9.2.2023. Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/tietoa-metsa-groupista/tietoa-meista/yritysrakenne/>.



Metsä Tissue 2023a. Luettu 13.3.2023. Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/about-us---fi/facts-and-figures/>

Metsä Tissue 2023b. Luettu 13.3.2023. Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/tuotanto/tuotanto-suomessa-mantta/>

Metsä Tissue 2023c. Luettu 13.3.2023. Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/about-us---fi/strategia-ja-arvot/>

Metsämuuronen, J. 2006. Laadullisen Tutkimuksen Käsikirja. 1. painos. Jyväskylä: Gummerus. 750 s. ISBN 952-5372-19-7

Mickovic, A. & Wouters, M. 2020. Energy costs information in manufacturing companies: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 254, 119927.

Mohamed, A.M. 1986. Productivity Measurement and Planning Models for Manufacturing Industries. Dissertation. The University of Manitoba

Moseng, B. & Rolstadås, A. 2001. Success factors in the productivity process. 10th World Productivity Congress.

Natural Resources Canada 2023. Luettu 6.5.2023. Saatavissa: <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/domestic-and-international-markets/current-lumber-pulp-panel-prices/13309#pulp>

Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2005. Johdon Laskentatoimi. 6.–13. painos. Helsinki: Edita. ISBN 978-951-37-4109-9

Nord Pool 2023. Luettu 2.2.2023. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?view=table>.

Norexeco 2023. Luettu 5.5.2023. Saatavissa: <https://norexeco.com/market-data-graphs/#1622192476715-f47f2b83-a6ec>

Novák, P. & Popesko, B. 2014. Cost variability and cost behavior in manufacturing enterprises. *Economics & Sociology* 7(4): pp. 89–103.

Osakeyhtiölaki 624/21.7.2006, 5§. Viitattu 13.3.2023 Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060624#a624-2006>.

- Pekkola, S. & Rantanen, H. 2014. Utilisation of performance measurement information in management: top manager perspective. *International Journal of Business Performance Management* 15(1): pp. 23-34.
- Rantanen, H. 1995. The Effects of Productivity on Profitability: A Case Study at Firm Level using an Activity-Based Costing Approach. Doctoral dissertation. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta. ISBN 978-952-214-798-1
- Rantanen, H. 2001a. Internal obstacles restraining productivity improvement in small Finnish industrial enterprises. *International Journal of Production Economics*, Vol. 69 No 1: pp. 85-91.
- Rantanen, H. 2001b. Suorituskyvyn Osa-Alueiden Mittaaminen Pkt-Yrityksissä. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lahden yksikkö.
- Rantanen, H. 2005. Tuottavuus Suorituskyvyn Analysoinnin Kentässä. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lahden yksikkö.
- Rantanen, H. & Holtari, J. 1999. Yrityksen Suorituskyvyn Analysointi. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- Rantanen, H., Rantala, T. & Pekkola, S. 2015. Tuottavuuden Kehittämisen Esteet - Suomi Eilen Ja Tänään. Tutkimusraportit – Research Reports no. 38. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Ravelomanantsoa, M.S., Ducq, Y. & Vallespir, B. 2019. A state of the art and comparison of approaches for performance measurement systems definition and design. *International Journal of Production Research* 57(15-16): pp. 5026-5046.
- Ryan, B., Scapens, R.W. & Theobald, M. 1992. *Research Method and Methodology in Finance and Accounting*. London: Academic Press.
- Saari, S. 2006. Tuottavuus: Teoria Ja Mittaaminen Liiketoiminnassa: Tuottavuuden Käsi-kirja. Espoo: Mido Oy. 273 s. ISBN 951-98067-3-3
- Saunila, M., Tikkamäki, K. & Ukko, J. 2015. Managing performance and learning through reflective practices. *Journal of Organizational effectiveness: People and Performance*. Vol 2, issue 4. pp. 370-380.

Singh, H., Motwani, J. & Kumar, A. 2000. A review and analysis of the state-of-the-art research on productivity measurement. *Industrial Management and Data Systems* 100(5): pp. 234-241.

Singh, J., Singh, H., & Singh, K. 2018. Productivity improvement using lean manufacturing in manufacturing industry of Northern India. *International Journal of Productivity and Performance Management*. Vol. 67 No. 8: pp. 1394-1415.

Sink, D.S. 1985. *Productivity Management: Planning, Measurement and Evaluation, Control and Improvement*. John Wiley & Sons, New York.

Smith, R.E. & Wright, W.F. 2004. Determinants of Customer Loyalty and Financial Performance. *Journal of Management Accounting Research* 16(1): pp. 183-205.

Steindel, C. & Stiroh, K.J. 2001. Productivity: What is it, and why do we care about it? *Business Economics (Cleveland, Ohio)* 36(4): pp. 13-31.

Syverson, C. 2011. What Determines Productivity? *Journal of Economic Literature* 49(2): pp. 326-365.

Tangen, S. 2005. Demystifying productivity and performance. *International Journal of Productivity and Performance Management* 54(1): pp. 34-46.

Tilastokeskus 2023. Luettu 30.4.2023. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ehi/stat-fin\\_ehi\\_pxt\\_12hf.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehi/stat-fin_ehi_pxt_12hf.px/table/tableViewLayout1/)

Nord Pool 2023. Luettu 2.2.2023. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?view=table>.

Töttö, P. 1999. Kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tuolle puolen? Metodipoliittinen puheenvuoro. *Sociologia* 36(4). pp. 280–292.

Ukko, J., Tenhunen, J. & Rantanen, H. 2007. Performance measurement impacts on management and leadership: Perspectives of management and employees. *International Journal of Production Economics*. Vol 110, No. 1-2. pp. 39-51.

Ukko, J., Karhu, J., Pekkola, S., Rantanen, H. & Tenhunen, J. 2007. *Suorituskyky Nousuun! Hyödynnä Henkilöstösi Osaaminen*. Helsinki: Työministeriö.

Ukko, J., Tenhunen, J. & Rantanen, H. 2008. The impacts of performance measurement on the quality of working life. *International Journal of Business Performance Management*. Vol. 10, No. 1. pp. 86-98.

Uusi-Rauva, E. 1994. *Ohjauksen Tunnusluvut Ja Suoritusten Mittaus*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Valmet Oyj 2023. Luettu 1.3.2023. Saatavissa: <https://www.valmet.com/media/image-gallery/businesses/>.

Vilka, H. 2015. *Tutki Ja Kehitä*. Jyväskylä: PS-kustannus. 240 s. ISBN 978-952-451-662-4

Liite 1: Työntekijöiden haastattelupohja

### **Energiankulutukseen vaikuttavat asiat**

Mitkä tekijät mielestäsi vaikuttavat eniten paperikoneen energiankulutukseen?

Onko energiankulutusta mahdollista vähentää operaattorin toimesta? Jos on, niin miten?

### **Energiankulutuksen seuranta**

Miten seuraat energian kulutusta paperin valmistuksen aikana?

Mahdollistavatko käytettävissä olevat työkalut energiankulutuksen seurannan? Jos kyllä, niin miten?

### **Työn merkitys kustannuksiin**

Onko operaattoreilla riittävästi tietoa kokonaiskustannusten muodostumisesta? Mitkä ovat mielestäsi tärkeimpiä tekijöitä?

### **Yleiset tekijät**

Pääsevätkö työntekijät osallistumaan riittävästi kehityshankkeisiin? Jos kyllä, niin miten?

Mitä näkemyksenne mukaan pitäisi tehdä/ kehittää energian kulutuksen ja kustannusten minimoimiseksi?

Liite 2: Asiantuntijoiden haastattelupohja

### **Energiankulutukseen vaikuttavat asiat**

Mitkä tekijät omasta mielestäsi vaikuttavat eniten paperikoneen energiankulutukseen?

Onko energiankulutusta mahdollista vähentää tuotanto-operaattorin toimesta? Jos on, niin miten?

### **Energiankulutuksen seuranta**

Miten operaattorit seuraavat energiankulutusta paperin valmistuksen aikana?

Mahdollistavatko käytettävissä olevat työkalut operaattoreiden tekemän energiankulutuksen seurannan? Jos kyllä, niin miten?

Onko esimiehillä riittävästi mahdollisuuksia vaikuttaa paperin valmistusprosessiin energian kulutuksen minimoimiseksi? Jos kyllä, niin miten?

### **Työn merkitys kustannuksiin**

Onko operaattoreilla riittävästi tietoa kokonaiskustannusten muodostumisesta?

### **Yleiset tekijät**

Pääsevätkö työntekijät osallistumaan kehityshankkeisiin? Jos kyllä, niin miten?

Mitä näkemyksenne mukaisesti pitäisi tehdä/ kehittää energiankulutuksen ja kustannusten minimoimiseksi?

Liite 3: Tehtaan johdon haastattelupohja

### **Energiankulutukseen vaikuttavat asiat**

Tukevatko olemassa olevat järjestelmät riittävästi energiankäytön optimointia?

Onko operaattoreilla ja vuorotyöjohdolla riittävästi valtuuksia tehdä muutoksia paperin valmistusprosessiin kustannusten minimoimiseksi?

### **Työn merkitys kustannuksiin**

Ovatko nykyiset järjestelmät riittäviä kustannusten minimoinnin näkökulmasta? Käytetäänkö järjestelmiä optimaalisesti?

### **Yleiset tekijät**

Mitä teidän näkemysten mukaisesti pitäisi tehdä/ kehittää energiankulutuksen ja kustannusten minimoimiseksi?

Liite 4: Kuitukoostumuskoeajojen energian indeksoidun ominaiskulutuksen tilastolliset tunnusluvut

<b>Kuitukoostumus 1</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,6101	0,1835	0,2064
Keskihajonta	0,0038	0,0003	0,0030
Mediaani	0,6103	0,1836	0,2068
Mittapisteiden lukumäärä	32	32	32

<b>Kuitukoostumus 2</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,5795	0,1826	0,1690
Keskihajonta	0,0071	0,0002	0,0046
Mediaani	0,5806	0,1828	0,1699
Mittapisteiden lukumäärä	32	32	32

<b>Kuitukoostumus 3</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,5643	0,1792	0,1832
Keskihajonta	0,0146	0,0032	0,0056
Mediaani	0,5683	0,1791	0,1848
Mittapisteiden lukumäärä	33	33	33

<b>Kuitukoostumus 4</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,5609	0,1792	0,1803
Keskihajonta	0,0055	0,0005	0,0017
Mediaani	0,5626	0,1791	0,1803
Mittapisteiden lukumäärä	31	31	31

<b>Kuitukoostumus 5</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,5722	0,1819	0,1813
Keskihajonta	0,0039	0,0002	0,0015
Mediaani	0,5714	0,1820	0,1813
Mittapisteiden lukumäärä	34	34	34



Liite 5: Kuitukoostumuskoeajan sähkön indeksoidun ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

### Descriptive Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Kuitu_1	32	0,183525	0,0002951	0,1832	0,1840
Kuitu_2	32	0,182663	0,0002181	0,1824	0,1832
Kuitu_3	33	0,179236	0,0032128	0,1624	0,1820
Kuitu_4	31	0,179190	0,0004922	0,1783	0,1799
Kuitu_5	34	0,181929	0,0002303	0,1816	0,1824

### Wilcoxon Signed Ranks Test

#### Ranks

		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Kuitu_2 - Kuitu_1	Negative Ranks	31 <sup>a</sup>	16,00	496,00
	Positive Ranks	0 <sup>b</sup>	0,00	0,00
	Ties	1 <sup>c</sup>		
	Total	32		
Kuitu_3 - Kuitu_2	Negative Ranks	32 <sup>d</sup>	16,50	528,00
	Positive Ranks	0 <sup>e</sup>	0,00	0,00
	Ties	0 <sup>f</sup>		
	Total	32		
Kuitu_4 - Kuitu_3	Negative Ranks	13 <sup>g</sup>	21,92	285,00
	Positive Ranks	16 <sup>h</sup>	9,38	150,00
	Ties	2 <sup>i</sup>		
	Total	31		
Kuitu_5 - Kuitu_4	Negative Ranks	0 <sup>j</sup>	0,00	0,00
	Positive Ranks	31 <sup>k</sup>	16,00	496,00
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	31		
Kuitu_5 - Kuitu_3	Negative Ranks	2 <sup>m</sup>	2,50	5,00

	Positive Ranks	31 <sup>n</sup>	17,94	556,00
	Ties	0 <sup>o</sup>		
	Total	33		

- a. Kuitu\_2 < Kuitu\_1
- b. Kuitu\_2 > Kuitu\_1
- c. Kuitu\_2 = Kuitu\_1
- d. Kuitu\_3 < Kuitu\_2
- e. Kuitu\_3 > Kuitu\_2
- f. Kuitu\_3 = Kuitu\_2
- g. Kuitu\_4 < Kuitu\_3
- h. Kuitu\_4 > Kuitu\_3
- i. Kuitu\_4 = Kuitu\_3
- j. Kuitu\_5 < Kuitu\_4
- k. Kuitu\_5 > Kuitu\_4
- l. Kuitu\_5 = Kuitu\_4
- m. Kuitu\_5 < Kuitu\_3
- n. Kuitu\_5 > Kuitu\_3
- o. Kuitu\_5 = Kuitu\_3

#### Test Statistics<sup>a</sup>

	Kuitu_2 - Kuitu_1	Kuitu_3 - Kuitu_2	Kuitu_4 - Kuitu_3	Kuitu_5 - Kuitu_4	Kuitu_5 - Kuitu_3
Z	-4,904 <sup>b</sup>	-4,971 <sup>b</sup>	-1,465 <sup>b</sup>	-4,938 <sup>c</sup>	-4,982 <sup>c</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,143	0,000	0,000

- a. Wilcoxon Signed Ranks Test
- b. Based on positive ranks.
- c. Based on negative ranks.

Liite 6: Kuitukoostumuskoeajon höyryn indeksoidun ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

### Descriptive Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Kuitu_1	32	0,610094	0,0037958	0,6030	0,6197
Kuitu_2	32	0,579550	0,0070850	0,5549	0,5916
Kuitu_3	33	0,564291	0,0146157	0,5100	0,5781
Kuitu_4	31	0,560948	0,0054651	0,5508	0,5695
Kuitu_5	34	0,572156	0,0039231	0,5679	0,5863

### Wilcoxon Signed Ranks Test

#### Ranks

		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Kuitu_2 - Kuitu_1	Negative Ranks	32 <sup>a</sup>	16,50	528,00
	Positive Ranks	0 <sup>b</sup>	0,00	0,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	32		
Kuitu_3 - Kuitu_2	Negative Ranks	27 <sup>d</sup>	18,48	499,00
	Positive Ranks	5 <sup>e</sup>	5,80	29,00
	Ties	0 <sup>f</sup>		
	Total	32		
Kuitu_4 - Kuitu_3	Negative Ranks	23 <sup>g</sup>	15,59	358,50
	Positive Ranks	7 <sup>h</sup>	15,21	106,50
	Ties	1 <sup>i</sup>		
	Total	31		
Kuitu_5 - Kuitu_4	Negative Ranks	2 <sup>j</sup>	1,50	3,00
	Positive Ranks	29 <sup>k</sup>	17,00	493,00
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	31		

Kuitu_5 - Kuitu_3	Negative Ranks	7 <sup>m</sup>	13,14	92,00
	Positive Ranks	25 <sup>n</sup>	17,44	436,00
	Ties	1 <sup>o</sup>		
	Total	33		

- a. Kuitu\_2 < Kuitu\_1
- b. Kuitu\_2 > Kuitu\_1
- c. Kuitu\_2 = Kuitu\_1
- d. Kuitu\_3 < Kuitu\_2
- e. Kuitu\_3 > Kuitu\_2
- f. Kuitu\_3 = Kuitu\_2
- g. Kuitu\_4 < Kuitu\_3
- h. Kuitu\_4 > Kuitu\_3
- i. Kuitu\_4 = Kuitu\_3
- j. Kuitu\_5 < Kuitu\_4
- k. Kuitu\_5 > Kuitu\_4
- l. Kuitu\_5 = Kuitu\_4
- m. Kuitu\_5 < Kuitu\_3
- n. Kuitu\_5 > Kuitu\_3
- o. Kuitu\_5 = Kuitu\_3

#### Test Statistics<sup>a</sup>

	Kuitu_2 - Kuitu_1	Kuitu_3 - Kuitu_2	Kuitu_4 - Kuitu_3	Kuitu_5 - Kuitu_4	Kuitu_5 - Kuitu_3
Z	-4,937 <sup>b</sup>	-4,394 <sup>b</sup>	-2,592 <sup>b</sup>	-4,802 <sup>c</sup>	-3,217 <sup>c</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,010	0,000	0,001

- a. Wilcoxon Signed Ranks Test
- b. Based on positive ranks.
- c. Based on negative ranks.

Liite 7: Kuitukoostumuskoeajon kaasun indeksoidun ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

**Descriptive Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Kuitu_1	32	0,206375	0,0029984	0,1979	0,2105
Kuitu_2	32	0,168984	0,0045555	0,1538	0,1742
Kuitu_3	33	0,183233	0,0055757	0,1628	0,1901
Kuitu_4	31	0,180294	0,0016957	0,1775	0,1832
Kuitu_5	34	0,181315	0,0015410	0,1783	0,1836

**Wilcoxon Signed Ranks Test**

**Ranks**

		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Kuitu_2 - Kuitu_1	Negative Ranks	32 <sup>a</sup>	16,50	528,00
	Positive Ranks	0 <sup>b</sup>	0,00	0,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	32		
Kuitu_3 - Kuitu_2	Negative Ranks	1 <sup>d</sup>	2,00	2,00
	Positive Ranks	31 <sup>e</sup>	16,97	526,00
	Ties	0 <sup>f</sup>		
	Total	32		
Kuitu_4 - Kuitu_3	Negative Ranks	22 <sup>g</sup>	15,82	348,00
	Positive Ranks	7 <sup>h</sup>	12,43	87,00
	Ties	2 <sup>i</sup>		
	Total	31		
Kuitu_5 - Kuitu_4	Negative Ranks	8 <sup>j</sup>	12,81	102,50
	Positive Ranks	23 <sup>k</sup>	17,11	393,50

	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	31		
Kuitu_5 - Kuitu_3	Negative Ranks	22 <sup>m</sup>	18,14	399,00
	Positive Ranks	11 <sup>n</sup>	14,73	162,00
	Ties	0 <sup>o</sup>		
	Total	33		

a. Kuitu\_2 < Kuitu\_1

b. Kuitu\_2 > Kuitu\_1

c. Kuitu\_2 = Kuitu\_1

d. Kuitu\_3 < Kuitu\_2

e. Kuitu\_3 > Kuitu\_2

f. Kuitu\_3 = Kuitu\_2

g. Kuitu\_4 < Kuitu\_3

h. Kuitu\_4 > Kuitu\_3

i. Kuitu\_4 = Kuitu\_3

j. Kuitu\_5 < Kuitu\_4

k. Kuitu\_5 > Kuitu\_4

l. Kuitu\_5 = Kuitu\_4

m. Kuitu\_5 < Kuitu\_3

n. Kuitu\_5 > Kuitu\_3

o. Kuitu\_5 = Kuitu\_3

#### Test Statistics<sup>a</sup>

	Kuitu_2 - Kuitu_1	Kuitu_3 - Kuitu_2	Kuitu_4 - Kuitu_3	Kuitu_5 - Kuitu_4	Kuitu_5 - Kuitu_3
Z	-4,937 <sup>b</sup>	-4,901 <sup>c</sup>	-2,823 <sup>b</sup>	-2,854 <sup>c</sup>	-2,118 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,005	0,004	0,034

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on positive ranks.

c. Based on negative ranks.

Liite 8: Nopeuskoeajon energian indeksoitujen ominaiskulutusten sekä tuotantomäärän tilastolliset tunnusluvut

<b>Nopeus 1300 m/min</b>	<b>Tuotantomäärä</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	1,000	0,619	0,205	0,175
Keskihajonta	0,001	0,008	0,001	0,002
Mediaani	1,000	0,618	0,206	0,175
Mittapisteiden lukumäärä	31	31	31	31
<b>Nopeus 1340 m/min</b>	<b>Tuotantomäärä</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	1,024	0,620	0,201	0,197
Keskihajonta	0,003	0,006	0,000	0,003
Mediaani	1,024	0,622	0,201	0,197
Mittapisteiden lukumäärä	33	33	33	33
<b>Nopeus 1380 m/min</b>	<b>Tuotantomäärä</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	1,057	0,619	0,201	0,212
Keskihajonta	0,001	0,003	0,000	0,003
Mediaani	1,057	0,619	0,201	0,212
Mittapisteiden lukumäärä	31	31	31	31
<b>Nopeus 1420 m/min</b>	<b>Tuotantomäärä</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	1,092	0,627	0,199	0,234
Keskihajonta	0,013	0,011	0,002	0,005
Mediaani	1,095	0,629	0,199	0,234
Mittapisteiden lukumäärä	36	36	36	36
<b>Nopeus 1460 m/min</b>	<b>Tuotantomäärä</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	1,109	0,635	0,198	0,255
Keskihajonta	0,022	0,013	0,004	0,006
Mediaani	1,118	0,635	0,198	0,255
Mittapisteiden lukumäärä	31	31	31	31
<b>Nopeus 1500 m/min</b>	<b>Tuotantomäärä</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	1,135	0,636	0,197	0,265
Keskihajonta	0,012	0,011	0,002	0,004
Mediaani	1,132	0,638	0,198	0,265
Mittapisteiden lukumäärä	37	37	37	37

Liite 9: Nopeuskoeajon sähköenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Descriptive Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Nopeus1300	31	0,205490	0,0011181	0,2036	0,2074
Nopeus1340	33	0,201433	0,0001915	0,2013	0,2017
Nopeus1380	31	0,201300	0,0000000	0,2013	0,2013
Nopeus1420	36	0,198875	0,0020363	0,1964	0,2025
Nopeus1460	31	0,197923	0,0042190	0,1777	0,2017
Nopeus1500	37	0,197314	0,0020076	0,1888	0,1987

**Wilcoxon Signed Ranks Test**

		Ranks		
		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Nopeus1340 - Nopeus1300	Negative Ranks	31 <sup>a</sup>	16,00	496,00
	Positive Ranks	0 <sup>b</sup>	0,00	0,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	31		
Nopeus1380 - Nopeus1340	Negative Ranks	9 <sup>d</sup>	5,00	45,00
	Positive Ranks	0 <sup>e</sup>	0,00	0,00
	Ties	22 <sup>f</sup>		
	Total	31		
Nopeus1420 - Nopeus1380	Negative Ranks	29 <sup>g</sup>	15,00	435,00
	Positive Ranks	0 <sup>h</sup>	0,00	0,00
	Ties	2 <sup>i</sup>		
	Total	31		
Nopeus1460 - Nopeus1420	Negative Ranks	21 <sup>j</sup>	11,48	241,00
	Positive Ranks	10 <sup>k</sup>	25,50	255,00
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	31		



Nopeus1500 - Nopeus1460	Negative Ranks	20 <sup>m</sup>	16,50	330,00
	Positive Ranks	11 <sup>n</sup>	15,09	166,00
	Ties	0 <sup>o</sup>		
	Total	31		

- a. Nopeus1340 < Nopeus1300
- b. Nopeus1340 > Nopeus1300
- c. Nopeus1340 = Nopeus1300
- d. Nopeus1380 < Nopeus1340
- e. Nopeus1380 > Nopeus1340
- f. Nopeus1380 = Nopeus1340
- g. Nopeus1420 < Nopeus1380
- h. Nopeus1420 > Nopeus1380
- i. Nopeus1420 = Nopeus1380
- j. Nopeus1460 < Nopeus1420
- k. Nopeus1460 > Nopeus1420
- l. Nopeus1460 = Nopeus1420
- m. Nopeus1500 < Nopeus1460
- n. Nopeus1500 > Nopeus1460
- o. Nopeus1500 = Nopeus1460

Test Statistics<sup>a</sup>

	No-peus1340 - No-peus1300	Nopeus1380 - No-peus1340	No-peus1420 - No-peus1380	No-peus1460 - No-peus1420	No-peus1500 - No-peus1460
Z	-4,868 <sup>b</sup>	-3,000 <sup>b</sup>	-4,716 <sup>b</sup>	-,137 <sup>c</sup>	-1,613 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,000	0,003	0,000	0,891	0,107

- a. Wilcoxon Signed Ranks Test
- b. Based on positive ranks.
- c. Based on negative ranks.

Liite 10: Nopeuskoeajon höyryenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Descriptive Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	
nopeus1300	31	0,6191	0,00847	0,61	0,64	
nopeus1340	33	0,6198	0,00567	0,61	0,63	
nopeus1380	31	0,6190	0,00295	0,61	0,62	
nopeus1420	36	0,6273	0,01057	0,57	0,64	
nopeus1460	31	0,6354	0,01339	0,57	0,65	
nopeus1500	37	0,6361	0,01081	0,60	0,65	

**Wilcoxon Signed Ranks Test**

		Ranks		
		N	Mean Rank	Sum of Ranks
nopeus1340 - nopeus1300	Negative Ranks	13 <sup>a</sup>	14,35	186,50
	Positive Ranks	18 <sup>b</sup>	17,19	309,50
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	31		
nopeus1380 - nopeus1340	Negative Ranks	18 <sup>d</sup>	15,81	284,50
	Positive Ranks	11 <sup>e</sup>	13,68	150,50
	Ties	2 <sup>f</sup>		
	Total	31		
nopeus1420 - nopeus1380	Negative Ranks	1 <sup>g</sup>	30,00	30,00
	Positive Ranks	29 <sup>h</sup>	15,00	435,00
	Ties	1 <sup>i</sup>		
	Total	31		
nopeus1460 - nopeus1420	Negative Ranks	4 <sup>j</sup>	17,00	68,00
	Positive Ranks	27 <sup>k</sup>	15,85	428,00
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	31		
nopeus1500 - nopeus1460	Negative Ranks	16 <sup>m</sup>	14,44	231,00
	Positive Ranks	15 <sup>n</sup>	17,67	265,00
	Ties	0 <sup>o</sup>		
	Total	31		

a. nopeus1340 &lt; nopeus1300

b. nopeus1340 &gt; nopeus1300

c. nopeus1340 = nopeus1300

d. nopeus1380 &lt; nopeus1340

e. nopeus1380 &gt; nopeus1340

f. nopeus1380 = nopeus1340

g. nopeus1420 &lt; nopeus1380

h. nopeus1420 &gt; nopeus1380

i. nopeus1420 = nopeus1380

- j. nopeus1460 < nopeus1420
- k. nopeus1460 > nopeus1420
- l. nopeus1460 = nopeus1420
- m. nopeus1500 < nopeus1460
- n. nopeus1500 > nopeus1460
- o. nopeus1500 = nopeus1460

Test Statistics <sup>a</sup>					
	nopeus1340 - no- peus1300	nopeus1380 - no- peus1340	no- peus1420 - no- peus1380	no- peus1460 - no- peus1420	no- peus1500 - no- peus1460
Z	-1,205 <sup>b</sup>	-1,449 <sup>c</sup>	-4,166 <sup>b</sup>	-3,528 <sup>b</sup>	-,333 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2- tailed)	0,228	0,147	0,000	0,000	0,739

- a. Wilcoxon Signed Ranks Test
- b. Based on negative ranks.
- c. Based on positive ranks.

Liite 11: Nopeuskoeajon kaasuenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Descriptive Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Nopeus1300	31	0,175458	0,0020027	0,1720	0,1785
Nopeus1340	33	0,196878	0,0029987	0,1903	0,2013
Nopeus1380	31	0,211954	0,0027091	0,2063	0,2162
Nopeus1420	36	0,234047	0,0047111	0,2174	0,2414
Nopeus1460	31	0,255388	0,0056293	0,2322	0,2631
Nopeus1500	37	0,264916	0,0037423	0,2532	0,2723

### Wilcoxon Signed Ranks Test

Ranks				
		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Nopeus1340 - Nopeus1300	Negative Ranks	0 <sup>a</sup>	0,00	0,00
	Positive Ranks	31 <sup>b</sup>	16,00	496,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	31		
Nopeus1380 - Nopeus1340	Negative Ranks	0 <sup>d</sup>	0,00	0,00
	Positive Ranks	31 <sup>e</sup>	16,00	496,00
	Ties	0 <sup>f</sup>		
	Total	31		
Nopeus1420 - Nopeus1380	Negative Ranks	0 <sup>g</sup>	0,00	0,00
	Positive Ranks	31 <sup>h</sup>	16,00	496,00
	Ties	0 <sup>i</sup>		
	Total	31		
Nopeus1460 - Nopeus1420	Negative Ranks	1 <sup>j</sup>	1,00	1,00
	Positive Ranks	30 <sup>k</sup>	16,50	495,00
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	31		

Nopeus1500 - Nopeus1460	Negative Ranks	0 <sup>m</sup>	0,00	0,00
	Positive Ranks	30 <sup>n</sup>	15,50	465,00
	Ties	1 <sup>o</sup>		
	Total	31		

- a. Nopeus1340 < Nopeus1300
- b. Nopeus1340 > Nopeus1300
- c. Nopeus1340 = Nopeus1300
- d. Nopeus1380 < Nopeus1340
- e. Nopeus1380 > Nopeus1340
- f. Nopeus1380 = Nopeus1340
- g. Nopeus1420 < Nopeus1380
- h. Nopeus1420 > Nopeus1380
- i. Nopeus1420 = Nopeus1380
- j. Nopeus1460 < Nopeus1420
- k. Nopeus1460 > Nopeus1420
- l. Nopeus1460 = Nopeus1420
- m. Nopeus1500 < Nopeus1460
- n. Nopeus1500 > Nopeus1460
- o. Nopeus1500 = Nopeus1460

Test Statistics<sup>a</sup>

	No-peus1340 - No-peus1300	Nopeus1380 - No-peus1340	No-peus1420 - No-peus1380	No-peus1460 - No-peus1420	No-peus1500 - No-peus1460
Z	-4,863 <sup>b</sup>	-4,875 <sup>b</sup>	-4,860 <sup>b</sup>	-4,843 <sup>b</sup>	-4,783 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

- a. Wilcoxon Signed Ranks Test
- b. Based on negative ranks.

Liite 12: Kosteuskoeajon energian indeksoitujen ominaiskulutusten tilastolliset tunnusluvut

<b>Kosteus 4,0 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,600	0,171	0,229
Keskihajonta	0,010	0,003	0,004
Mediaani	0,601	0,172	0,229
Mittapisteiden lukumäärä	30	30	30

<b>Kosteus 4,4 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,591	0,169	0,214
Keskihajonta	0,009	0,000	0,003
Mediaani	0,592	0,169	0,214
Mittapisteiden lukumäärä	33	33	33

<b>Kosteus 4,8 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,584	0,170	0,201
Keskihajonta	0,003	0,000	0,002
Mediaani	0,583	0,170	0,201
Mittapisteiden lukumäärä	32	32	32

<b>Kosteus 5,2 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,574	0,169	0,197
Keskihajonta	0,007	0,001	0,003
Mediaani	0,576	0,169	0,197
Mittapisteiden lukumäärä	35	35	35

<b>Kosteus 5,6 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,570	0,170	0,195
Keskihajonta	0,012	0,000	0,005
Mediaani	0,573	0,170	0,196
Mittapisteiden lukumäärä	32	32	32

<b>Kosteus 6,0 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,565	0,168	0,192
Keskihajonta	0,004	0,000	0,003
Mediaani	0,564	0,169	0,192
Mittapisteiden lukumäärä	40	40	40

<b>Kosteus 6,4 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,557	0,170	0,187
Keskihajonta	0,009	0,000	0,005
Mediaani	0,559	0,170	0,187
Mittapisteiden lukumäärä	40	40	40

<b>Kosteus 6,8 %</b>	<b>Höyry</b>	<b>Sähkö</b>	<b>Kaasu</b>
Keskiarvo	0,551	0,169	0,188
Keskihajonta	0,008	0,001	0,004
Mediaani	0,550	0,169	0,189
Mittapisteiden lukumäärä	35	35	35

Liite 13: Kosteuskoeajon sähköenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Descriptive Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Kosteus_4.0	30	0,171310	0,0031284	0,1548	0,1723
Kosteus_4.4	33	0,169506	0,0003824	0,1693	0,1704
Kosteus_4.8	32	0,169581	0,0000738	0,1693	0,1696
Kosteus_5.2	35	0,169246	0,0005181	0,1689	0,1700
Kosteus_5.6	32	0,169563	0,0001008	0,1693	0,1696
Kosteus_6.0	40	0,168340	0,0001985	0,1681	0,1685
Kosteus_6.4	40	0,169865	0,0003820	0,1693	0,1708
Kosteus_6.8	35	0,168946	0,0008655	0,1674	0,1700

**Wilcoxon Signed Ranks Test****Ranks**

		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Kosteus_4.4 - Kosteus_4.0	Negative Ranks	29 <sup>a</sup>	15,00	435,00
	Positive Ranks	1 <sup>b</sup>	30,00	30,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	30		
Kosteus_4.8 - Kosteus_4.4	Negative Ranks	8 <sup>d</sup>	28,50	228,00
	Positive Ranks	24 <sup>e</sup>	12,50	300,00
	Ties	0 <sup>f</sup>		
	Total	32		
Kosteus_5.2 - Kosteus_4.8	Negative Ranks	24 <sup>g</sup>	20,17	484,00
	Positive Ranks	8 <sup>h</sup>	5,50	44,00
	Ties	0 <sup>i</sup>		
	Total	32		

Kosteus_5.6 - Kosteus_5.2	Negative Ranks	8 <sup>j</sup>	6,50	52,00
	Positive Ranks	24 <sup>k</sup>	19,83	476,00
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	32		
Kosteus_6.0 - Kosteus_5.6	Negative Ranks	32 <sup>m</sup>	16,50	528,00
	Positive Ranks	0 <sup>n</sup>	0,00	0,00
	Ties	0 <sup>o</sup>		
	Total	32		
Kosteus_6.4 - Kosteus_6.0	Negative Ranks	0 <sup>p</sup>	0,00	0,00
	Positive Ranks	40 <sup>q</sup>	20,50	820,00
	Ties	0 <sup>r</sup>		
	Total	40		
Kosteus_6.8 - Kosteus_6.4	Negative Ranks	20 <sup>s</sup>	12,65	253,00
	Positive Ranks	3 <sup>t</sup>	7,67	23,00
	Ties	12 <sup>u</sup>		
	Total	35		

- a. Kosteus\_4.4 < Kosteus\_4.0  
b. Kosteus\_4.4 > Kosteus\_4.0  
c. Kosteus\_4.4 = Kosteus\_4.0  
d. Kosteus\_4.8 < Kosteus\_4.4  
e. Kosteus\_4.8 > Kosteus\_4.4  
f. Kosteus\_4.8 = Kosteus\_4.4  
g. Kosteus\_5.2 < Kosteus\_4.8  
h. Kosteus\_5.2 > Kosteus\_4.8  
i. Kosteus\_5.2 = Kosteus\_4.8  
j. Kosteus\_5.6 < Kosteus\_5.2  
k. Kosteus\_5.6 > Kosteus\_5.2  
l. Kosteus\_5.6 = Kosteus\_5.2  
m. Kosteus\_6.0 < Kosteus\_5.6  
n. Kosteus\_6.0 > Kosteus\_5.6  
o. Kosteus\_6.0 = Kosteus\_5.6  
p. Kosteus\_6.4 < Kosteus\_6.0  
q. Kosteus\_6.4 > Kosteus\_6.0  
r. Kosteus\_6.4 = Kosteus\_6.0



s.  $Kosteus\_6.8 < Kosteus\_6.4$

t.  $Kosteus\_6.8 > Kosteus\_6.4$

u.  $Kosteus\_6.8 = Kosteus\_6.4$

Test Statistics <sup>a</sup>							
	Kos- teus_4.4 - Kos- teus 4.0	Kos- teus_4.8 - Kos- teus_4.4	Kos- teus_5.2 - Kos- teus 4.8	Kos- teus_5.6 - Kos- teus 5.2	Kos- teus_6.0 - Kos- teus 5.6	Kos- teus_6.4 - Kos- teus 6.0	Kos- teus_6.8 - Kos- teus 6.4
Z	-4,233 <sup>b</sup>	-,710 <sup>c</sup>	-4,300 <sup>b</sup>	-4,112 <sup>c</sup>	-5,040 <sup>b</sup>	-5,815 <sup>c</sup>	-3,508 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2-tai- led)	0,000	0,478	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on positive ranks.

c. Based on negative ranks.

Liite 14: Kosteuskoeajon höyryenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Descriptive Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Kosteus_4.0	30	0,600030	0,0102426	0,5474	0,6073
Kosteus_4.4	33	0,591079	0,0090870	0,5543	0,6062
Kosteus_4.8	63	0,388671	0,1997363	0,1777	0,5920
Kosteus_5.2	35	0,574351	0,0066302	0,5413	0,5821
Kosteus_5.6	32	0,570416	0,0115988	0,5093	0,5768
Kosteus_6.0	40	0,564638	0,0038931	0,5581	0,5715
Kosteus_6.4	40	0,557350	0,0089034	0,5055	0,5665
Kosteus_6.8	35	0,550529	0,0078283	0,5173	0,5608

**Wilcoxon Signed Ranks Test**

Ranks				
		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Kosteus_4.4 - Kosteus_4.0	Negative Ranks	26 <sup>a</sup>	16,38	426,00
	Positive Ranks	4 <sup>b</sup>	9,75	39,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	30		
Kosteus_4.8 - Kosteus_4.4	Negative Ranks	24 <sup>d</sup>	18,42	442,00
	Positive Ranks	7 <sup>e</sup>	7,71	54,00
	Ties	1 <sup>f</sup>		
	Total	32		
Kosteus_5.2 - Kosteus_4.8	Negative Ranks	31 <sup>g</sup>	16,00	496,00
	Positive Ranks	0 <sup>h</sup>	0,00	0,00
	Ties	1 <sup>i</sup>		
	Total	32		
Kosteus_5.6 - Kosteus_5.2	Negative Ranks	24 <sup>j</sup>	16,02	384,50
	Positive Ranks	7 <sup>k</sup>	15,93	111,50
	Ties	1 <sup>l</sup>		
	Total	32		
Kosteus_6.0 - Kosteus_5.6	Negative Ranks	26 <sup>m</sup>	17,81	463,00
	Positive Ranks	6 <sup>n</sup>	10,83	65,00
	Ties	0 <sup>o</sup>		

	Total	32		
Kosteus_6.4 - Kosteus_6.0	Negative Ranks	36 <sup>p</sup>	21,69	781,00
	Positive Ranks	4 <sup>q</sup>	9,75	39,00
	Ties	0 <sup>r</sup>		
	Total	40		
Kosteus_6.8 - Kosteus_6.4	Negative Ranks	30 <sup>s</sup>	19,75	592,50
	Positive Ranks	5 <sup>t</sup>	7,50	37,50
	Ties	0 <sup>u</sup>		
	Total	35		

- a. Kosteus\_4.4 < Kosteus\_4.0  
b. Kosteus\_4.4 > Kosteus\_4.0  
c. Kosteus\_4.4 = Kosteus\_4.0  
d. Kosteus\_4.8 < Kosteus\_4.4  
e. Kosteus\_4.8 > Kosteus\_4.4  
f. Kosteus\_4.8 = Kosteus\_4.4  
g. Kosteus\_5.2 < Kosteus\_4.8  
h. Kosteus\_5.2 > Kosteus\_4.8  
i. Kosteus\_5.2 = Kosteus\_4.8  
j. Kosteus\_5.6 < Kosteus\_5.2  
k. Kosteus\_5.6 > Kosteus\_5.2  
l. Kosteus\_5.6 = Kosteus\_5.2  
m. Kosteus\_6.0 < Kosteus\_5.6  
n. Kosteus\_6.0 > Kosteus\_5.6  
o. Kosteus\_6.0 = Kosteus\_5.6  
p. Kosteus\_6.4 < Kosteus\_6.0  
q. Kosteus\_6.4 > Kosteus\_6.0  
r. Kosteus\_6.4 = Kosteus\_6.0  
s. Kosteus\_6.8 < Kosteus\_6.4  
t. Kosteus\_6.8 > Kosteus\_6.4  
u. Kosteus\_6.8 = Kosteus\_6.4

Test Statistics<sup>a</sup>

	Kosteus_4.4 - Kosteus_4.0	Kosteus_4.8 - Kosteus_4.4	Kosteus_5.2 - Kosteus_4.8	Kosteus_5.6 - Kosteus_5.2	Kosteus_6.0 - Kosteus_5.6	Kosteus_6.4 - Kosteus_6.0	Kosteus_6.8 - Kosteus_6.4
Z	-3,980 <sup>b</sup>	-3,802 <sup>b</sup>	-4,861 <sup>b</sup>	-2,675 <sup>b</sup>	-3,723 <sup>b</sup>	-4,988 <sup>b</sup>	-4,546 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000

- a. Wilcoxon Signed Ranks Test  
b. Based on positive ranks.

Liite 15: Kosteuskoeajon kaasunenergian ominaiskulutuksen tilastollinen tarkastelu

Descriptive Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Kosteus_4.0	30	0,228657	0,0040770	0,2104	0,2329
Kosteus_4.4	33	0,213885	0,0027182	0,2028	0,2177
Kosteus_4.8	63	0,194441	0,0077226	0,1777	0,2047
Kosteus_5.2	35	0,196637	0,0031498	0,1868	0,2021
Kosteus_5.6	32	0,194925	0,0047705	0,1723	0,2005
Kosteus_6.0	40	0,191595	0,0033367	0,1860	0,1967
Kosteus_6.4	40	0,187480	0,0045486	0,1723	0,1956
Kosteus_6.8	35	0,187520	0,0039596	0,1777	0,1925

### Wilcoxon Signed Ranks Test

		Ranks		
		N	Mean Rank	Sum of Ranks
Kosteus_4.4 - Kosteus_4.0	Negative Ranks	29 <sup>a</sup>	16,00	464,00
	Positive Ranks	1 <sup>b</sup>	1,00	1,00
	Ties	0 <sup>c</sup>		
	Total	30		
Kosteus_4.8 - Kosteus_4.4	Negative Ranks	32 <sup>d</sup>	16,50	528,00
	Positive Ranks	0 <sup>e</sup>	0,00	0,00
	Ties	0 <sup>f</sup>		
	Total	32		
Kosteus_5.2 -	Negative Ranks	26 <sup>g</sup>	18,06	469,50

Kos-teus_4.8	Positive Ranks	5 <sup>h</sup>	5,30	26,50
	Ties	1 <sup>i</sup>		
	Total	32		
Kos-teus_5.6 - Kos-teus_5.2	Negative Ranks	19 <sup>j</sup>	20,18	383,50
	Positive Ranks	13 <sup>k</sup>	11,12	144,50
	Ties	0 <sup>l</sup>		
	Total	32		
Kos-teus_6.0 - Kos-teus_5.6	Negative Ranks	23 <sup>m</sup>	18,72	430,50
	Positive Ranks	9 <sup>n</sup>	10,83	97,50
	Ties	0 <sup>o</sup>		
	Total	32		
Kos-teus_6.4 - Kos-teus_6.0	Negative Ranks	24 <sup>p</sup>	26,92	646,00
	Positive Ranks	15 <sup>q</sup>	8,93	134,00
	Ties	1 <sup>r</sup>		
	Total	40		
Kos-teus_6.8 - Kos-teus_6.4	Negative Ranks	14 <sup>s</sup>	20,43	286,00
	Positive Ranks	21 <sup>t</sup>	16,38	344,00
	Ties	0 <sup>u</sup>		
	Total	35		

- a. Kosteus\_4.4 < Kosteus\_4.0  
b. Kosteus\_4.4 > Kosteus\_4.0  
c. Kosteus\_4.4 = Kosteus\_4.0  
d. Kosteus\_4.8 < Kosteus\_4.4  
e. Kosteus\_4.8 > Kosteus\_4.4  
f. Kosteus\_4.8 = Kosteus\_4.4  
g. Kosteus\_5.2 < Kosteus\_4.8  
h. Kosteus\_5.2 > Kosteus\_4.8  
i. Kosteus\_5.2 = Kosteus\_4.8  
j. Kosteus\_5.6 < Kosteus\_5.2  
k. Kosteus\_5.6 > Kosteus\_5.2  
l. Kosteus\_5.6 = Kosteus\_5.2  
m. Kosteus\_6.0 < Kosteus\_5.6  
n. Kosteus\_6.0 > Kosteus\_5.6

- o.  $Kosteus_{6.0} = Kosteus_{5.6}$
- p.  $Kosteus_{6.4} < Kosteus_{6.0}$
- q.  $Kosteus_{6.4} > Kosteus_{6.0}$
- r.  $Kosteus_{6.4} = Kosteus_{6.0}$
- s.  $Kosteus_{6.8} < Kosteus_{6.4}$
- t.  $Kosteus_{6.8} > Kosteus_{6.4}$
- u.  $Kosteus_{6.8} = Kosteus_{6.4}$

Test Statistics <sup>a</sup>							
	Kos- teus_4.4 - Kos- teus_4.0	Kos- teus_4.8 - Kos- teus_4.4	Kos- teus_5.2 - Kos- teus_4.8	Kos- teus_5.6 - Kos- teus_5.2	Kos- teus_6.0 - Kos- teus_5.6	Kos- teus_6.4 - Kos- teus_6.0	Kos- teus_6.8 - Kos- teus_6.4
Z	-4,764 <sup>b</sup>	-4,937 <sup>b</sup>	-4,342 <sup>b</sup>	-2,236 <sup>b</sup>	-3,114 <sup>b</sup>	-3,574 <sup>b</sup>	-,475 <sup>c</sup>
Asymp. Sig. (2-tai- led)	0,000	0,000	0,000	0,025	0,002	0,000	0,635

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on positive ranks.

c. Based on negative ranks.