



# Korvausilman esilämmityksen vaikutus energiatehokkuuteen viilunkuivauksessa

Leevi Kovanen

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka

**Kovanen, Leevi**

## **Korvausilman esilämmityksen vaikutus energiatehokkuuteen viilunkuivauksessa**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2022, 43 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Metsäteollisuus on erittäin energiantensiivinen ala ja energiatehokkuuden merkitys tuotannossa on kasvanut huomattavasti lainsäädännön ja taloudellisuuden kautta. Viilunkuivaus vie suurimman osan vanerinvalmistuksessa käytetystä energiasta ja kallistuvat energiakustannukset korostavat energiatehokkuutta parantavien kohteiden houkuttelevuutta investoinneille. Useimmilla metsäteollisuuden toimijoilla on käytössä energiatehokkuussopimuksen mukainen energiatehokkuusjärjestelmä, joka edellyttää käyttäjiltään toiminnan jatkuvaa kehitystä.

Tavoitteena oli selvittää kuivaajan käyttämän korvausilman määrä ja sen lämmittämiseen kuluvan energian määrä. Energiakustannusten lisäksi tutkittiin erilaisten lämmitysratkaisujen soveltuvuutta korvausilman esilämmitykseen. Tutkimuksen pohjana toimi kuivaajalla toteutettu ilmamäärämittaus ja sen tulokset. Näillä tiedoilla saatiin selville korvausilman lämmittämiseen kuluva energia nykytilanteessa. Tiedossa olevan energiamäärän avulla pystyttiin laskemaan saavutetut säästöt teoreettisella tasolla erilaisilla esilämmityksen lämpötilatasoilla.

Toteuttamistapana on kehittämistutkimus. Viitekehys muodostettiin aiempiin tutkimuksiin ja alan kirjallisuuteen pohjautuen. Tuloksena saatiin uutta tietoa kuivaajan korvausilman käytöstä ja energiakustannuksista vuoden aikana. Näitä tietoja voidaan hyödyntää tulevaisuuden jatkotutkimuksissa aiheen parissa. Kuivaaja käyttää tulosten mukaan lähes 400 MWh vuodessa korvausilman lämmitykseen, joten korvausilmassa on potentiaalia säästökohteena.

Lopputuloksina saatiin selville, että kuivaaja käyttää runsaasti energiaa korvausilman lämmittämiseksi kuivauslämpötilaan. Esilämmittämällä voidaan siis saavuttaa merkittäviä säästöjä tuotannon energiankulutuksessa vuositasolla. Esilämmityksen toteuttamistavoissa nousi erityisesti esille lauhdelämmön hyödyntäminen, mutta myös lämpöpumppujen hyödyntämisessä on potentiaalia.

### **Avainsanat (asiasanat)**

Viilunkuivaus, korvausilma, energiatehokkuus, lämmönvaihdin

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Liite 1 on salassa pidettävä ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkl 24§, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on 15 vuotta opinnäytetyön hyväksymispäivästä.

**Kovanen, Leevi**

### **Effect of replacement air preheating on energy efficiency in veneer drying**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2022, 43 pages.

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

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The forest industry is a very energy-intensive sector and the importance of energy efficiency in production has grown significantly through legislation and economic goals. Veneer drying consumes most of the energy used in plywood production, and rising energy costs emphasize the attractiveness of energy efficiency projects for investment. Most organizations in the forest industry have an energy efficiency system in place in accordance with the energy efficiency agreement, which requires their users to continuously develop and improve their operations.

The aim was to find out the amount of replacement air used by the veneer dryer and the amount of energy used to heat it. In addition to energy costs, the suitability of different heating solutions for replacement air preheating was studied. The study was based on an air volume measurement performed with a dryer and results attained from that measurement. This data revealed the energy required to heat the replacement air in the current situation. With the help of the known amount of energy, it was possible to calculate the achieved savings at the theoretical level at different preheating temperature levels.

The method of implementation is development research. The framework was developed based on previous studies and the literature in the field. As a result, new information was obtained on the use of replacement air in dryer and energy costs during the year. This information can be used in future for further research on the subject. According to the results, the dryer uses almost 400 MWh per year for heating the replacement air, so there is potential for savings in the replacement air.

As a result, the conclusion was that the dryer uses a lot of energy to heat the replacement air to the drying temperature. Thus, preheating can achieve significant savings in the energy consumption of production on an annual basis. In the implementation of preheating, the utilization of condensing heat came to the fore, but there is also potential in the utilization of heat pumps.

### **Keywords/tags (subjects)**

Veneer drying, replacement air, energy efficiency, heat exchanger

### **Miscellaneous (Confidential information)**

Attachment 1 is classified confidential and removed from public publication based on JulkL 24§. Time for the classification is 15 years beginning from the approval date of this study.

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Opinnäytetyön lähtökohdat ja tavoitteet .....</b>	<b>4</b>
2.1	Toimeksiantaja .....	4
2.2	Viilunkuivauslinja 2.....	4
2.3	Tavoitteet ja rajaukset .....	5
2.4	Toteutustavat ja tiedonhankinta.....	5
<b>3</b>	<b>Energiatehokkuus metsäteollisuudessa .....</b>	<b>7</b>
3.1	Energiatehokkuussopimukset .....	7
3.2	Energiatehokkuusjärjestelmät .....	8
<b>4</b>	<b>Tuotantoprosessit.....</b>	<b>9</b>
4.1	Vanerin valmistus.....	9
4.2	Kuivausprosessi .....	11
<b>5</b>	<b>Toteutus .....</b>	<b>17</b>
5.1	Siipisäätimien asentotiedot.....	18
5.2	Ilmavirtamittaukset .....	22
5.3	Energialaskenta .....	24
5.4	Esilämmityksen toteutus.....	26
5.4.1	Lämpöpumput .....	27
5.4.2	Lämmönvaihtimet.....	28
5.5	Yhteenvedo tuloksista.....	30
<b>6</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>32</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>35</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>38</b>
	Liite 1. Havuvaneritehtaan höyrykeittöön PI-kaavio (salassa pidettävä).....	38
	Liite 2. Mittaustulokset .....	39

## Kuviot

Kuvio 1.	Vanerin tuotantoprosessi (Koponen 1995, 28).....	11
Kuvio 2.	Puun solurakenne (Koponen 1995, 52).....	12
Kuvio 3.	Energiakustannusten ja kapasiteetin riippuvuus kuivausilman lämpötilasta ja kosteudesta (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 12).....	13
Kuvio 4.	Höyryn kiertokulku.....	14
Kuvio 5.	Telakuivaajan rakenne (Koponen 1995, 56) .....	14

Kuvio 6. Korvausilmaluukku .....	15
Kuvio 7. Kosteuskäyrät (Partonen 2017) .....	16
Kuvio 8. Kuivausolosuhteet kuivauksen aikana (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 22) .....	17
Kuvio 9. Korvausilmaluukkujen ja siipisäätimien sijainti .....	18
Kuvio 10. Alkupään asentokäyrä.....	19
Kuvio 11. Keskiosan asentokäyrä.....	20
Kuvio 12. Loppupään asentokäyrä.....	21
Kuvio 13. Ilmamäärämittaus .....	22
Kuvio 14. Lämpöpumppu .....	28
Kuvio 15. Yksinkertaistettu kuvio lämmönvaihtimen vesikierrosta .....	30

## **Taulukot**

Taulukko 1. Mittaussuunnitelma .....	21
Taulukko 2. Aritmeettinen painotettu keskiarvo ilmamäärille.....	24
Taulukko 3. Massavirta kuivaajaan. ....	24
Taulukko 4. Energialaskujen tuloksia.....	26

# 1 Johdanto

Suomi on Euroopan johtava vanerin valmistajamaa yli sadan vuoden historialla (Vanerikäsikirja 2009; Koponen 2000, 5). Vanerituotteiden kysyntä on ollut vakaassa kasvussa, ja puuelementit ovat lisänneet suosiotaan rakennusmateriaalina (Puurakentamisen suosio jatkaa kasvuaan 2019). Alan tuotanto on ajan saatossa keskittynyt suurimmille toimijoille, joihin kuuluvat Metsäliitto Osuuskunnan Metsä Wood, UPM Plywood ja Koskisen Oy (Vaneri 2020). Kasvavan kysynnän myötä myös tuotanto on pysynyt nousujohteisella tasolla viime vuosien ajan ja elinkeinoelämää sekä tuotantoteollisuutta koskevat säädökset energiatehokkuudesta tuovat uusia haasteita alan toimijoille. Energiatehokkuuslaki (1429/2014) ja energiatehokkuusdirektiivi (2012/27/EU) määrittelevät elinkeinoelämän toimijoille, kuten metsäteollisuudelle, toiminnan edellytykset, joita toimijoiden on noudatettava.

Viilunkuivaus käyttää 50 - 60 % vanerin valmistuksessa käytetystä energiasta (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 9). Siksi kuivausprosessi onkin potentiaalinen kohde energiatehokkuutta parantaville investoinneille ja antaa perustan tälle tutkimukselle. Tehokas viilunkuivaus edellyttää tasaista lämpötilaa ja ilmankosteutta kuivaajan sisällä. Kosteuden hallitsemiseksi viilunkuivauskoneisiin on tuotu korvausilmaventtiilit, jotka tuovat kuivaa ilmaa kuivaajaan. Korvausilman lämpötila on usein sama kuin ympäröivän tehdastilan sisäilman. Kuivauskone käyttää siis huomattavasti energiaa ilman lämmittämiseksi prosessin edellyttämälle tasolle.

Tämän opinnäytetyön tutkimuksen kohteena oli vaneritehtaan viilunkuivaaja ja sen energiatehokkuus. Toimeksiantaja tälle tutkimukselle oli Metsä Woodin Suolahden havuvaneritehdas, jolla on käytössään kolme viilunkuivaajaa vanerintuotannossa. Työssä tutkittiin 2-kuivaajaa ja sen korvausilman ominaisuuksia. 2-kuivaaja on ainoa, jossa käytetään korvausilmaluukkuja tällä hetkellä. Taivotteena oli selvittää kuivaajaan siirtyvän korvausilman määrä, kyseisen korvausilman lämmittämiseen kuluva energia, säästöpotentiaali ja mahdolliset toteutustavat. Tehtaalla toteutettiin ilmamäärämittaus, jossa selvitettiin 2-kuivaajaan siirtyvän korvausilman määrä. Näiden tietojen avulla laskettiin korvausilman lämmittämiseen kuluva energia ja pohdittiin lämmityksen kannattavuutta sekä toteutusmahdollisuuksia. Tulosten avulla toimeksiantaja voi vertailla korvausilman esilämmitystä muihin investointeihin.

Mekaanisessa metsäteollisuudessa on yleisesti käytössä samanlaista kuivaustekniikkaa vanerinvalmistuksessa ja ikääntyvä laitekanta tuo uusia odotuksia modernisointihankkeille. Tämän työn tulokset voivat auttaa alan toimijoita harkitsemaan vanhojen kuivaajien modernisoimisen ja uusien hankintojen kannattavuuden välillä.

## **2 Opinnäytetyön lähtökohdat ja tavoitteet**

### **2.1 Toimeksiantaja**

Toimeksiantaja tälle työlle on Suolahden havuvaneritehdas. Tehdas on osa Metsä Woodin Suolahden yksikköä, johon kuuluu myös samalla tehdasalueella sijaitseva koivuvaneritehdas. Tehtaiden pääasiallisia tuotteita ovat havu-, koivu- ja sekavanerit. Metsä Wood on osa Metsä Groupia, joka on kansainvälisesti toimiva metsänomistajien omistama metsäteollisuuskonserni. Konserniin kuuluvat vaneria ja LVL-tuotteita valmistavan Metsä Woodin lisäksi pehmopaperituotteita valmistava Metsä Tissue, sellua ja sahatavaraa valmistava Metsä Fibre, kartonkia valmistava Metsä Board, metsäpalveluja tarjoava Metsä Forest ja innovaatioyhtiö Metsä Spring. (Toimintajärjestelmä n.d.)

Suolahden havuvaneritehtaalla on kolme kuivaajaa havun kuivaamiseen. Korvausilmaluukut ovat käytössä vain tämän työn kohteena olevalla 2-kuivaajalla. Havuvaneritehtaan tiloissa ovat 1- ja 2-kuivaajat ja 5-kuivaaja sijaitsee koivuvaneritehtaan puolella. Taustatiedot tämän projektin toteuttamiseen saatiin aiemmasta työkokemuksesta kuivaajilla kesätöiden ja harjoittelun aikana.

### **2.2 Viilunkuivauslinja 2**

Kuivauksessa käytetään Rauten valmistamia viilunkuivauslaitteita. Viilunkuivauslinja 2 on saanut toimintansa aikana useita tuotantoa modernisoivia päivityksiä muihin linjoihin verrattuna. Laite on valmistettu vuonna 1995. Kuivaajan energianlähteenä toimii prosessihöyry, joka toimitetaan tehtaalle Kumpuniemen Voima Oy:n voimalaitokselta.

Höyryn avulla kuivaajan sisälämpötila nostetaan tuotannon aikana 160 - 190 °C ja syntynyt lauhde palautuu tehtaan kuumavesisäiliöön. Tämän säiliön vedellä lämmitetään tehtaan puristimet ja teoreettisesti myös kuivaajan korvausilman esilämmitys toteutettaisiin tämän säiliön energialla.

## 2.3 Tavoitteet ja rajaukset

Opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa ja laskea säästettävän energian määrä, jos korvausilma lämmitettäisiin 140°C:een. Tämän lisäksi mahdollinen toteutustapa lisättiin tehtaan höyrykeittiön PI-kaavioon ja pohdittiin projektin haasteita ja mahdollisuuksia niin toimeksiantajalle kuin koko toimialalle. Työlle laadittiin tutkimuskysymykset, joihin pyrittiin tässä työssä vastaamaan.

- Kuinka paljon energiaa säästettäisiin korvausilman esilämmityksellä ja mitä hyötyjä siitä olisi toimeksiantajalle ja koko toimialalle?
- Mikä olisi paras tapa toteuttaa esilämmitys ja kuinka kannattavaa se olisi?
- Mitä vaikutuksia esilämmityksellä olisi kuivauslaadulle?

Vastaavat energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet, kuten ilman ja veden esilämmitykset, ovat tutumpia paperiteollisuudesta, mutta eivät niin yleisiä mekaanisessa metsäteollisuudessa. Tätä aihetta ei ole aiemmin alalla tutkittu, joten työn tulosten merkitys koko toimialalle voi olla varteenotettava tulevia investointeja harkittaessa.

Metsä Group on konsernina sitoutunut tekemään töitä energiatehokkuuden eteen. Tästä kertovat tuotantolaitosten tehokkuutta parantaneet investoinnit ja ISO 50 001- energiatehokkuusjärjestelmän sertifiointi (Teemme lujasti töitä energiatehokkuuden eteen n.d.). Kuivauslinjat kuluttavat suurimman osan vaneritehtaiden energiasta, joten kaikki toimet energiatehokkuuden parantamiseksi ovat tärkeitä tuotannon tehostamiseksi.

Työ rajattiin käsittelemään säästettävän energian määrää korvausilmaa esilämmittämällä. Kuivaajalla suoritettiin samanaikaisesti tutkimus lisäveden esilämmityksen vaikutuksesta energiatehokkuuteen, joten tässä työssä keskityttiin korvausilmaan ja sen vaikutukseen kuivaajan toiminnassa. Lämmitysratkaisujen mitoitust ja kustannuslaskenta rajattiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Ratkaisut ja esilämmityksen toteuttamistavat esiteltiin periaatteellisina ehdotuksina työn laajuuden hillitsemiseksi ja tulevien jatkotutkimusten mahdollistamiseksi.

## 2.4 Toteutustavat ja tiedonhankinta

Tehdaskokonaisuuden hahmottaminen ja kuivaajan toimintaperiaatteisiin tutustuminen aiemman työkokemuksen ajalta mahdollistivat yksityiskohtaisen opinnäytetyö- ja mittaus suunnitelman laa-

timisen. Työkokemuksen lisäksi käytössä olivat siipisäätimien asentotiedot kuukauden ajalta, ilmamäärämittausten tulokset ja tehtaan höyrykeittiön PI-kaavio. Asentotiedot ja PI-kaavio ovat tehtaan järjestelmistä ja ilmamäärämittaus toteutettiin tehtaalla tutkimuksen aikana.

Työ toteutettiin kvantitatiivisena, eli määrällisenä tutkimuksena. Kvantitatiivisen tutkimuksen edellytyksenä on tutkittavan ilmiön tunteminen (Kananen 2011). Kananen (2011) mukaan ilmiöön vaikuttavien tekijöiden on oltava tiedossa ja mitattavissa määrällisessä tutkimuksessa. Tämän työn tulokset perustuvat kuivaajan energiankulutukseen ja siihen vaikuttavat tekijät ovat tiedossa ja mitattavissa. Tässä työssä tutkittava ilmiö perustuu suoraan termodynamiikan sääntöihin ja energiataseeseen, jota lähestytään ilmamäärän mittauksilla ja energialaskennalla. Tässä työssä on lisäksi kvalitatiivisen tutkimuksen piirteitä. Kananen (2011, 15) kertoo kvalitatiivisen tutkimuksen selittävän ilmiötä. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa käytetään induktiivista, eli aineistolähtöistä, tiedonhankinnan tapaa (Tuomivaara 2005). Tässä työssä selitettiin aineistolähtöisesti eri esilämmityksen toteutuksen tapoja ja muita kuivausprosessin ilmiöitä.

Kirjallisuuslähteitä tähän tutkimukseen hankittiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun, Jyväskylän yliopiston, Helsingin kaupungin ja Helsingin yliopiston kirjastoista. Kirjallisuuslähteet ovat pääosin metsätieteiden sekä puuteollisuuden osastoilta ja niiden kirjoittajilla on useampia julkaisuja samalta alalta. Tiedonhaussa käytettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun Janet-tietokantaa, Jyväskylän yliopiston JYKDOK-tietokantaa ja Google Scholaria. Lähdeaineistoon pyrittiin etsimään alkuperäisiä tutkimuksia viitekehyksen muodostamiseksi, mutta käytössä oli myös alan toimijoiden omia julkaisuja. Toimeksiantajan konsernin julkaisuja on käytetty vain toimeksiantajan, sen tuotteiden ja toimialan esittelyssä, joten lähteiden luotettavuus tässä yhteydessä on riittävä. Kaupallisten yritysten tuotteita on esitelty esimerkkeinä ja niissä käytettiin valmistajien omia julkaisuja. Viilunkuivauksen teorian lähdeaineisto on vanhempaa, mutta toimintaperiaate on pysynyt samana jo 1950-luvulta lähtien.

Työtä tehdessä sitouduttiin noudattamaan eettisiä periaatteita ja hyvää tieteellistä käytäntöä. Käytettyihin lähteisiin viitattiin asianmukaisesti ja raportin sisältö laadittiin tekijänoikeuksia kunnioittaen ja plagiointia välttämällä. Toimeksiantajan henkilötietoja ja liike- ja ammattisalaisuuksia on käsitelty luottamuksellisesti ja toimeksiantajan tietoturvan vaarantavat dokumentit on tässä työs-

sä salattu. Tutkimuksessa huomioitiin samaan prosessiin samanaikaisesti toteutetut tutkimukset ja työn rajaukset tehtiin näiden muiden tutkimuksien tavoitteita ja periaatteita kunnioittaen.

### **3 Energiatehokkuus metsäteollisuudessa**

Energiatehokkuudesta on tullut olennainen osa metsäteollisuuden toimintaa. Metsäteollisuuden osuus koko elinkeinoelämän energiansäästöistä vuonna 2017 - 2019 oli 54 prosenttia (Viisi faktaa metsäteollisuuden energiatehokkuudesta 2021). Energiatehokkuutta parantavat investoinnit ovat yleisiä toimialalla, ja lainsäädännön lisäksi tehostunut energiankäyttö kasvattaa yrityksen kustannuskilpailukykyä (Energiatehokkuus on metsäteollisuudessa arkipäivää 2021). Metsäteollisuus on erittäin energiantensiivinen ala, mutta energia on käytetty hyvin tehokkaasti ja tuotantomäärät ovat suuria. Yritysten energiatehokkuutta edistäviin investointeihin kannustavat oman kilpailukyvyn kasvun lisäksi myös lainsäädäntö.

Puutuoteteollisuus käyttää runsaasti energiaa tuotannossaan ja viilunkuivausprosessit käyttävätkin 50 - 70 % vanerin tuotannossa käytetystä energiasta (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 9; Koponen 1995, 57). Näin huomattava osuus energiankulutuksesta onkin varteenotettava tarkastelun kohde energiataloudelliselle kehitykselle metsäteollisuudessa. Vuonna 2018 Metsä Wood toteutti modernisointihankkeita Suolahden havuvaneritehtaalla, jossa parannettiin energiatehokkuuden lisäksi viilun laatua ja tuotantomääriä (Metsäteollisuus on energiatehokkaiden toimijoiden toimiala n.d.).

#### **3.1 Energiatehokkuussopimukset**

Euroopan Unioni ja kansainväliset sopimukset ovat asettaneet Suomelle useita velvoitteita energiatehokkuudesta, kuten EU:n energiatehokkuusdirektiivi (EED). Suomen keino vastata näihin velvoitteisiin on ollut energiatehokkuussopimukset. Energiatehokkuussopimukset ovat valtion ja eri toimialojen, kuten metsäteollisuuden, välisiä vapaaehtoisia sopimuksia, joissa sovitaan toimialan toimista energiatehokkuuden parantamiseksi. Valtio voi osallistua yritysten energiatehokkuusinvestointeihin, jos yritys on mukana energiatehokkuussopimuksessa (Energiatehokkuussopimukset, n.d.). Nykyinen sopimus kattaa vuodet 2017 - 2025. Myös Metsäteollisuus ry ja siihen kuuluva puutuoteteollisuus ovat mukana sopimuksessa, joten energiatehokkuutta parantavat ratkaisut ovat kaivattuja myös mekaanisessa metsäteollisuudessa.

### 3.2 Energiatehokkuusjärjestelmät

Energiatehokkuuslaki (1429/2014) velvoittaa kaikki suuret yritykset toteuttamaan pakollisia energiakatselmuksia neljän vuoden välein (Energiatehokkuuslaki (1429/2014)). Yritykset vapautuvat tästä velvoitteesta ottamalla käyttöön jonkun sertifioidun energianhallintajärjestelmän. Näitä järjestelmiä kutsutaan myös energiatehokkuusjärjestelmiksi. Lisäksi lähes kaikki metsäteollisuuden yritykset käyttämä energia kuuluu johonkin energiatehokkuussopimukseen (Energiatehokkuus on metsäteollisuudessa arkipäivää 2021). Energiatehokkuusjärjestelmät antavat yrityksille raamit, joiden puitteissa energia on käytettävä ja energiatehokkuutta tehostettava. Kaikki järjestelmät perustuvat jatkuvan parantamisen periaatteelle ja siihen kuuluu säästöpotentiaalien selvittäminen, johtamistavat, nykytilan kartoitukset ja tavoitteiden määrittäminen suunnittelussa ja hankinnoissa. Suomessa on käytössä kolme energiatehokkuusjärjestelmää, kansalliset ETJ ja ETJ+ sekä kansainvälinen ISO 50001 sertifiointi. (Energiatehokkuusjärjestelmät ETJ ja ETJ+ 2021.)

ETJ on kansallinen, yleisellä tasolla käytössä oleva energiatehokkuuden johtamisjärjestelmä, jonka avulla yritykset voivat parantaa energiatehokkuuttaan sekä vähentää energiankulutusta ja kustannuksia. ETJ on aluksi otettu käyttöön energiaintensiivisissä yrityksissä ja energiantuotantolaitoksissa, mutta se on yleisen luonteensa vuoksi sovellettavissa myös pk-yrityksissä. ETJ on integroitavissa yrityksen jo käytössä oleviin johtamisjärjestelmiin (Energiatehokkuusjärjestelmät ETJ ja ETJ+ 2021).

Motivan mukaan ETJ perustuu jatkuvan parantamisen periaatteeseen (Energiatehokkuusjärjestelmä:2014 2015). Energiatehokkuusjärjestelmä koostuu viidestä osa-alueesta:

1. Energiapolitiikka
2. Suunnittelu
3. Täytäntöönpano ja toteutus
4. Tarkkailut ja korjaavat toimenpiteet
5. Johdon katselmus

Suolahden havueneritehdas käytti ETJ:ää energiatehokkuuden parantamisen työkaluna vuoden 2009 lopussa. Jo silloin on tiedostettu kuivaajan olevan suurin lämmön- ja sähkökuluttaja tehtaalla ja jokaisella työntekijällä on mahdollisuus vaikuttaa tuotannon energiankulutukseen. Yllä mainittujen osa-alueiden mukaisesti Suolahden tehtaalla pyrittiin energiankäytön fossiilittomuuteen ja

energiankäytön vähentämiseen vuosittain, laitteiston modernisointiin ja kustannussäästöihin. (Toimintajärjestelmä n.d.)

ETJ:n seuraava iteraatio on ETJ+. ETJ+ sisältää ETJ:n sisältämät käytännöt ja sen lisäksi ISO 50001 standardista tutut energiakatselmukset. Yritykset täyttävät energiatehokkuuslain edellytykset, jos ne ovat mukana energiatehokkuussopimuksessa ja käyttävät sertifioitua ETJ+-järjestelmää (ETJ n.d.). Metsä Woodilla oli ETJ:n jälkeen käytössä ETJ+-johtamisjärjestelmä tuotannossa, mutta siirtyi Suolahdessa vuonna 2020 tehdyn selvityksen jälkeen ISO 50001 standardiin (Liukko 2020).

ISO 50001 on International Organisation for Standardization (ISO 50001 Energy Management System 2018) standardoimisjärjestön energianhallintajärjestelmä yksityisille ja julkisille toimijoille. Se on helposti integroitavissa muihin johtamisjärjestelmiin, kuten ympäristöjohtamisen ISO 14000:n ja laadunhallintajärjestelmään ISO 9001. ISO 50001 on monille yrityksille hyödyllinen sen tuomien etujen vuoksi. Se parantaa yrityksen brändiä ja parantaa energianhallinnan tehokkuutta ja kilpailukykyä. (ISO 50001 Energy Management System 2018.)

## 4 Tuotantoprosessit

### 4.1 Vanerin valmistus

Tuotantoprosessi alkaa tehtaan tukkikentältä, jonne tuodaan 22 rekallista tukkeja päivässä (Toimintajärjestelmä n.d.). Vuotuinen puunhankintamäärä on 320 000 m<sup>3</sup>. Kuviossa 1 on kuvattuna vanerin valmistusprosessi. Tukkikentällä tukinkäsittelylinja sahaa tukit oikeaan mittaan ja siirtää tukit haudonta-altaisiin. Tukit hautuvat altaan noin 50 asteisessa vedessä useita tunteja, yleensä yli vuorokauden, kunnes siirtyvät tehdastiloihin.

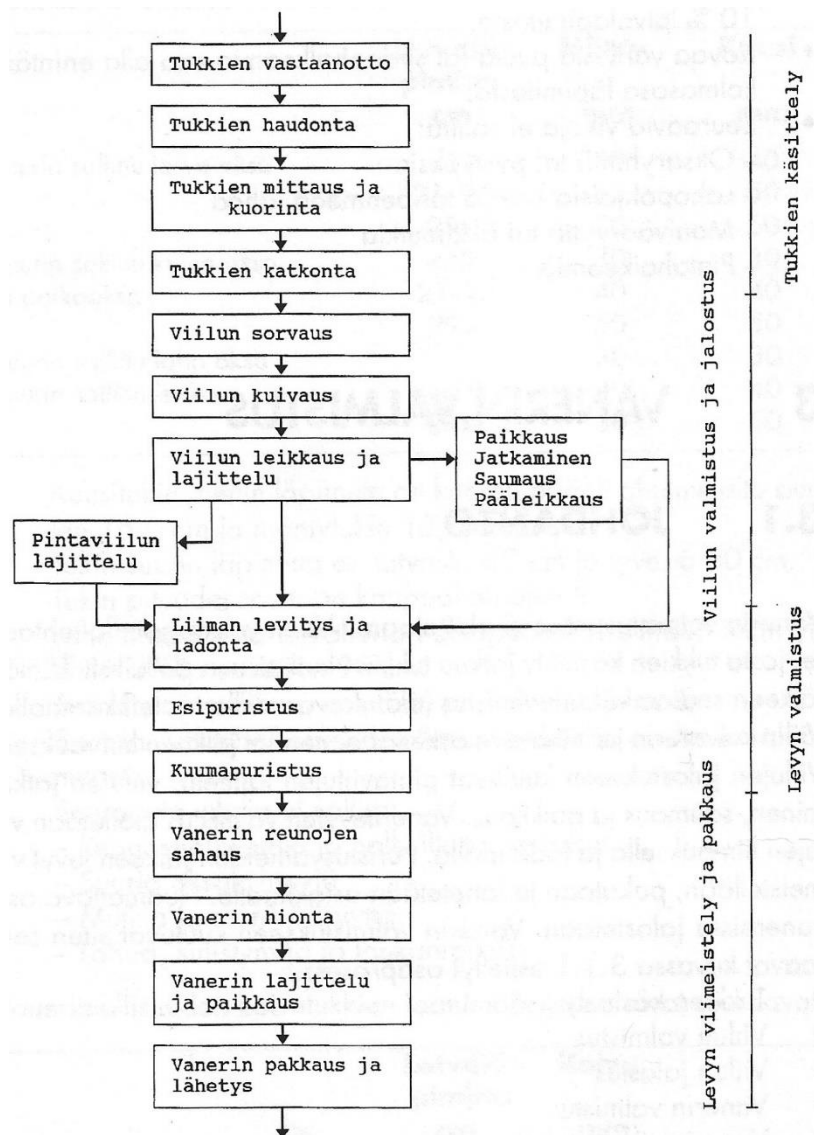
Ennen sorvausta tukit kuoritaan. Kuorihake ja muut vanerintuotannon sivuvirrat käytetään energiantuotantoon ja biopolttoaineiden valmistukseen. Tukkien kuorta on käytetty energianlähteenä lämmön- ja sähköntuotannossa jo 1950-luvulta lähtien (Koponen 2001) ja sama toiminta jatkuu nyt 2000-luvun tuotannossa. Tukit siirtyvät tehtaan sorville, joka sorvaa tukista yleensä 3,2 mm viilulevyä. Koposen (1995, 38 - 39) mukaan viilun laadulla on kaupallisia ja teknisiä vaatimuksia. Kaupallisiin vaatimuksiin kuuluvat viilun paksuus, pinnan eheys ja sileys. Teknisiin taas kuuluvat esimerkiksi viilun kestävyysominaisuudet, kuten poikittaisvetolujuus. Viilun saanto on havupuuta

sorvatessa 65 %. (Mts. 46 - 48.) Viilulevy leikataan arkeiksi ja lajitellaan kolmen kosteusluokan mukaan pinkkoihin. Tukin pintakerroksista syntyy yleensä kosteuspitoisinta viilua ja sydänpuusta taas kuivinta laatua.

Sorvauksesta viilupinkat siirtyvät tehtaan kuivaajille. Kuivausprosessi käydään tarkemmin läpi luvussa 4.2 Kuivausprosessi. Suolahdessa 1- ja 2-kuivaajat kuivaavat ”pitkän” viilun, eli puun syyt kulkevat arkin pitkän sivun mukaisesti. 5-kuivaajalla kuivataan ”lyhyt” viilu, jossa puun syyt kulkevat arkin lyhyen sivun mukaisesti. Kuivauslinjassa on kolme pääkomponenttia, eli syöttölaite, kuivausosa ja pinkkari. Kuivaaja on rakenteeltaan telakuivaaja, jossa on erikseen kuuma- ja jäähdytysosa. Kuuman osan lämpötila on kuivattavan viilun kosteuspitoisuudesta riippuen noin 160 - 190 °C. 2-kuivaajan logiikan automatiikan ja korvausilmaluukkujen ansiosta kuivaajan sisäkosteus on paremmin hallittavissa kuin 1-kuivaajan, joten kuivimmat kosteuslaadut kuivataan 2-kuivaajalla ja kostein viilu 1-kuivaajalla. Kuivaajassa ylimääräinen kosteus poistuu viilusta ja kuivaajasta poistuvan hyvälaatuisen viilun kosteusprosentti on 2 - 9 %. Vaneriteollisuudessa ohjearvo viilun kosteuksen keskiarvolle on 4 prosenttia (Koponen 1995, 51). Viilun pinta kuvataan ja pintakosteus mitataan, joiden perusteella viilut lajitellaan joko pintaviiluihin (II ja IIK), väliviiluihin (III ja V4), saumattaviin ja uudelleenkuivattaviin (mts. 60).

Kuivat viilupinkat siirtyvät ladontaan, jossa muodostuu vanerin rakenne. Viiluarkit kulkevat liimoittimen läpi, jonka jälkeen ”pitkät” ja ”lyhyet” arkit ladotaan päällekkäin poikkisyyden. Näin saadaan puulle ominaiset lujuusominaisuudet, erityisesti vetolujuus, joka on 10 - 20-kertainen syiden suuntaisena kuin syiden vastaisena (Siikanen 2008), hyödynnettyä vanerin pituus- ja leveyssuunnassa. Vaneripinkat siirtyvät suoraan esipuristimelle, jonka jälkeen vaneri kuumapuristetaan (Koponen 1995, 74).

Puristettu vaneri on viimeistelyä vaille valmis tuote. Vanerin reunat sahataan ja pinta hiotaan sekä tarvittaessa kitataan. Tilauksen mukaisesti vanerin pinta saatetaan käsitellä asianmukaisilla pintakäsittelyaineilla, joilla parannetaan homeen-, sään- ja tulenkestävyyttä. (Koponen 1995, 79 - 86.) Valmis tuote pakataan ja toimitetaan asiakkaille. Suolahden havuvaneritehtaan tuotantokapasiteetti on 160 000 m<sup>3</sup>, josta 80 % viedään ulkomaille (Toimintajärjestelmä n.d.).

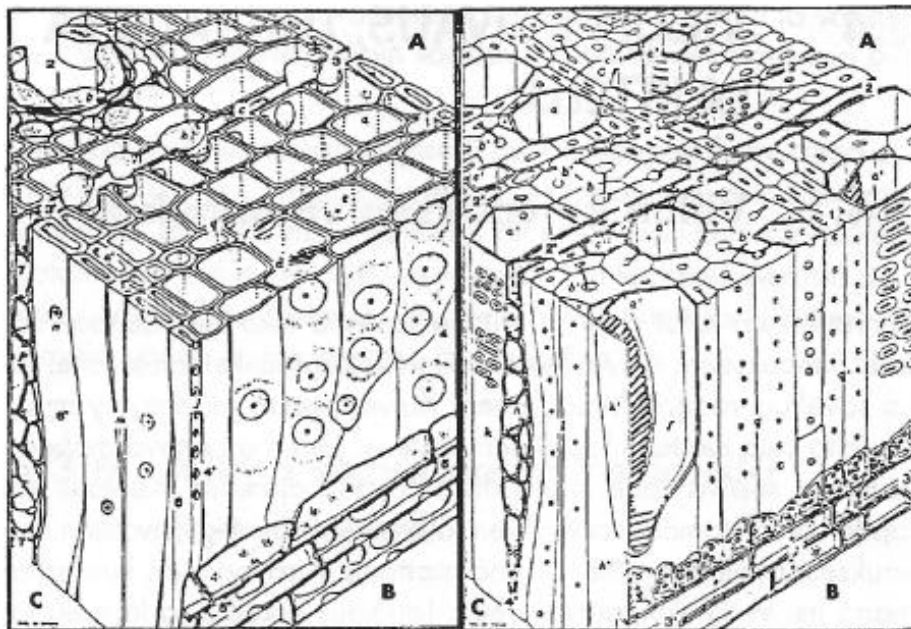


Kuvio 1. Vanerin tuotantoprosessi (Koponen 1995, 28)

## 4.2 Kuivausprosessi

Kuivaamaton viilu on liian kosteaa vanerin materiaaliksi (Koponen 1995, 51), joten viilut on kuivatava ennen ladontaa. Havupuulle tyypillistä on pinta- ja sydänpuun välinen kosteusero, joka ei päde taas esimerkiksi koivuun ja muihin lehtipuihin (Kärkkäinen 1985, 124). Pintapuun kosteus sorvauksen jälkeen on 90 - 120 % ja sydänpuun kosteus 30 - 50 % (Koponen 1995, 55). Puun kosteus ilmoitetaan kosteusprosenttina, eli veden massan ja kuivan puuaineksen massan suhteena (Siikainen 2008).

Siikasen (2008) ja Isomäen (1962, 15) mukaan puu kuivuu kyllä itsestäänkin hakeutuen tasapainotilaan ympäristön kosteuden kanssa, mutta erittäin hitaasti. Tämä johtuu puun hygroskooppisuudesta, eli ominaisuudesta hakeutua ympäristön lämpötilan ja suhteellisen kosteuden edellyttämään tasapainotilaan (Koponen 1995, 52; Isomäki 1962, 15). Vapaa vesi on kerääntynyt puun soluihin ja soluseinämiin, jotka ovat kuvattuna kuviossa 2. Vasemmalla on havupuun solurakenne ja oikealla lehtipuun solurakenne. Puun kuivumisaika lyhenee 90 % jo 160°C:een lämpötilassa (Kärkkäinen 1985, 120). Viilunkuivaajalla kuivaus voidaan suorittaa alle 15 minuutissa, joten tuotannon tehokkuuden kannalta on järkevää tuoda lämpöenergiaa kuivausprosessiin. Kuivumisaikaan vaikuttavia tekijöitä ovat viilun paksuus, alku- ja loppukosteus, kuivauslämpötila ja kuivaajan ilmankosteus. (Vanerikäsikirja 2006.)



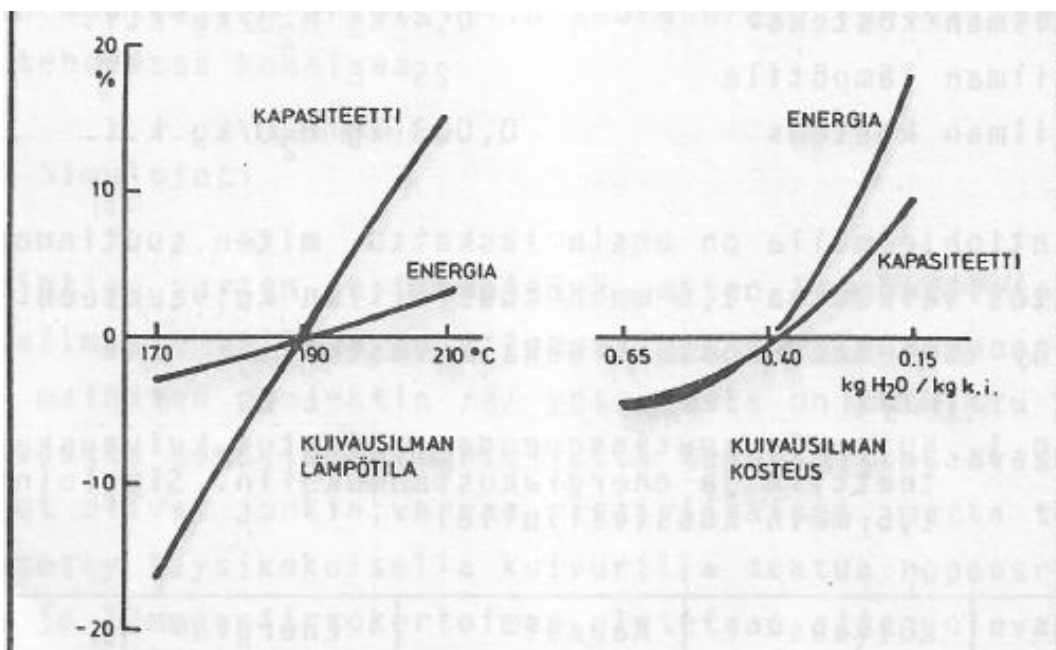
Kuvio 2. Puun solurakenne (Koponen 1995, 52)

Kuivausaika vaikuttaa olennaisesti kuivauslaatuun. Epätasainen kuivuminen tuo haasteita liimausvaiheessa, sillä viiluun jäänyt liikakosteus saattaa muodostaa höyryä puristusvaiheessa ja pilata vanerin (Pang 1997). Vastaavasti myös liian matala kosteuspitoisuus viilussa aiheuttaa viilun kaaantumista ja aaltoilua. Hyvälaatuinen viilu on tasaista, ehjää eikä viiluarkkien välinen kosteuspiitoisuus vaihtelee huomattavasti. Koposen (1995, 55) ja Siikasen (2008) mukaan kuivauslaatuun vaikuttavia tekijöitä ovat:

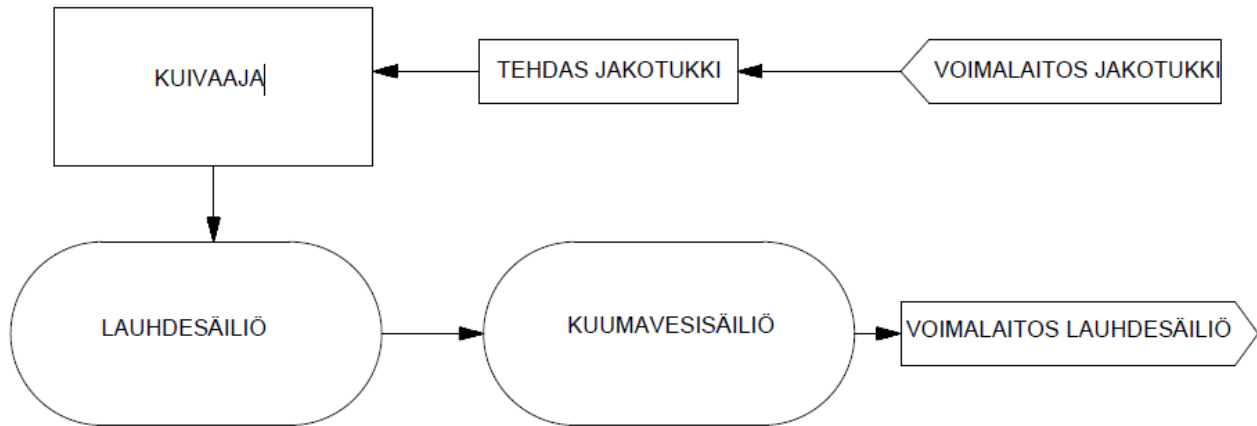
- puulaji
- puun sisäinen kosteusjakauma
- halkeamat, oksat, oksanreiät ja muut pintavauriot
- kuivaajan sisäkosteus
- kuivaajan lämpötila
- viilun pihkaisuus
- kuivaajan kuormitus

Viiluun saattaa syntyä värimuutoksia joko liian korkeasta kuivauslämpötilasta (Koponen 1995, 55) tai liian pitkästä kuivausajasta. Yli 100 °C lämpötilassa viilun pinta alkaa tummua pyrolyysin johdosta, eli näissä lämpötiloissa liekittömän palamisen vuoksi. Puumateriaalin pyrolyysi alkaa varsinaisesti vasta yli 200 °C lämpötilassa, jossa puun itsesyttyminenkin tapahtuu. (Siikanen 2008.)

Kuviossa 3 on kuvattuna kuivausilman lämpötilan ja kosteuden vaikutus käytettyyn energiaan ja kuivaajan kapasiteettiin. Kapasiteetilla tarkoitetaan tässä kuivaajan läpi kulkevan viilun määrää. Kuvaajista voi havaita kuivauslämpötilan noston lisäävän kuivaajan kapasiteettia huomattavasti verrattuna energiakustannusten maltilliseen nousuun. Oikeanpuoleisesta kuvaajasta voidaan taas havaita kuivausilman kosteuden vähentämisen lisäävän kuivaajan kapasiteettia. Tuomalla kuivaa ilmaa korvausilmaluukuilla kuivaajan keskiosiin voidaan siis parantaa kuivaajan suorituskykyä.



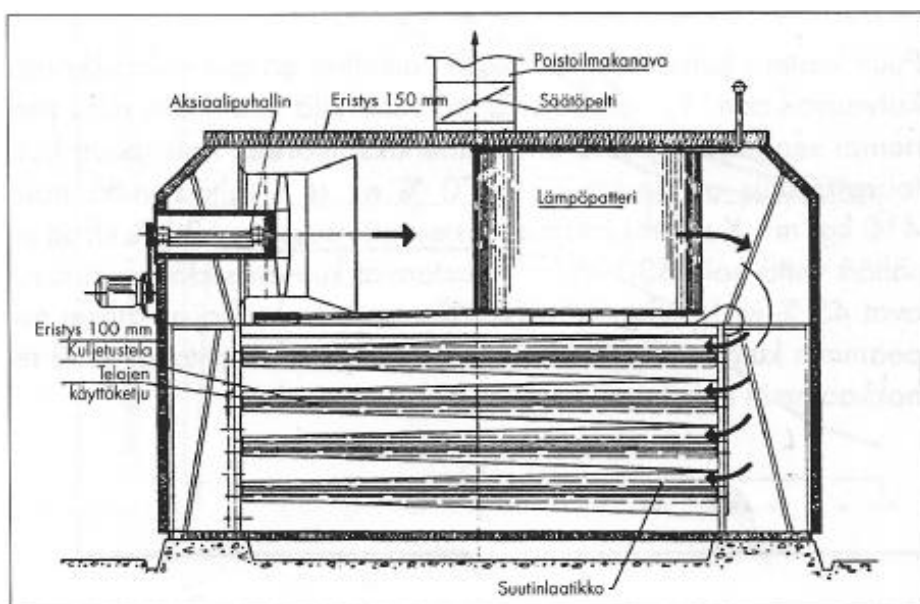
Kuvio 3. Energiakustannusten ja kapasiteetin riippuvuus kuivausilman lämpötilasta ja kosteudesta (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 12)



Kuvio 4. Höyryn kiertokulku

Kuvio 4 kuvaa höyrykiertoa kuivaajalla. Kuivaajan lämpötilaa hallitaan prosessihöyryllä. Tehtaan jakotukille saapuu voimalaitoksella tuotettua höyryä, joka siirretään jakotukilta tulistamattomana höyryputkistoa pitkin kuivaajalle. Kuivaajassa ei voida käyttää tulistettua höyryä, joten höyryn laadun seuranta on tärkeää. Höyry lämmittää kuivaajan kuumaosan telojen yläpuolella sijaitsevaa patteristoa. Puhaltimien avulla kuivaajan sisällä oleva ilma siirtyy patteriston läpi suihkutusputkiin ja sitä kautta viilujen pintaan. Prosessissa syntyvä lauhde poistetaan kuivaajasta lauhteenpoistimilla ja lauhde siirtyy tehtaan lauhdesäiliöön säiliöön, josta lauhdevesi siirretään kuumavesisäiliöön.

Kuviossa 5 on kuvattuna telakuivaajan rakenne.



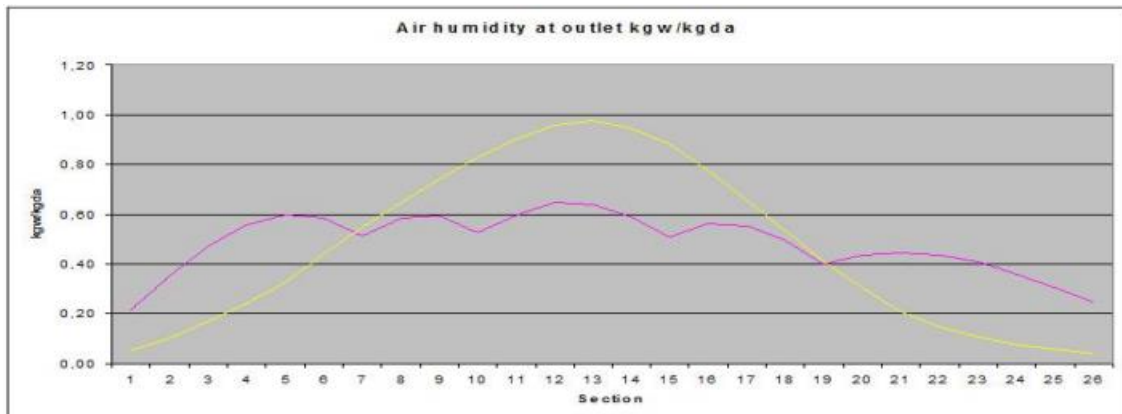
Kuvio 5. Telakuivaajan rakenne (Koponen 1995, 56)

Kuivaajan toimilaitte, eli viilunkuljetuslaitteisto kuivaajan sisällä, koostuu viiluja kuljettavista teloitista, suihkutuspötkistä ja käyttöketjuista. Kuljetustasoja on 2-kuivaajassa neljä ja ne jatkuvat läpi kuivaajan. Kuivaajan sisäolosuhteita kontrolloidaan kuivaajan yläosissa sijaitsevilla siipisäätimillä. Siipisäätimien kautta kuivaajasta poistuva ilma siirtyy LTO-torniin. Siipisäätimien asento määrittää myös kuivaajan korvausilmaluukkujen asennon kolminkertaisena. Siipisäätimen ollessa siis yli 33 % on korvausilmaluukku kokonaan auki.

Korvausilmaluukkujen (Kuvio 6) avulla pyritään kuivaajan sisäkosteuden parempaan hallintaan alueellisesti. Ilman korvausilmaluukkuja, kuten 1-kuivaajalla, ilma siirtyy kuivaajaan kuivaajan syötöpäästä myötävirtauksena ja purkupäästä vastavirtauksena. Keskiosan kosteusolosuhteet voivat olla siis todella poikkeavat kuivaajan päätyihin verrattuna. Keskiosan ilmankosteus onkin ilman ohjausta usein liian kosteaa ja päädyissä liian kuivaa. Kuviossa 7 on havainnollistettu ohjaamattoman ja ohjatun sisäkosteuden muutokset kuivaajan pituuden funktiona. Vaaka-akselilla on kuvattuna kuivaajan pituus ja pystyakselilla ilman kosteuspitoisuus. Ohjatulla tarkoitetaan tässä tilanteessa korvausilmaluukuilla varustettua kuivaajaa ja se nähdään kuvaajassa liilalla käyrällä. Verrattaessa ohjaamattomaan (keltainen) käyrään, voidaan huomata keskiosan kosteuden olevan huomattavasti korkeampi päätyihin verrattuna. Korvausilmaluukuilla pyritään siis ohjaamaan kuivaajan sisäistä kosteutta kohti päätyjä (Partonen 2017) ja tuomaan kuivaa ilmaa kuivaajan keskiosiin (Kuivaajan modernisointi 2018).



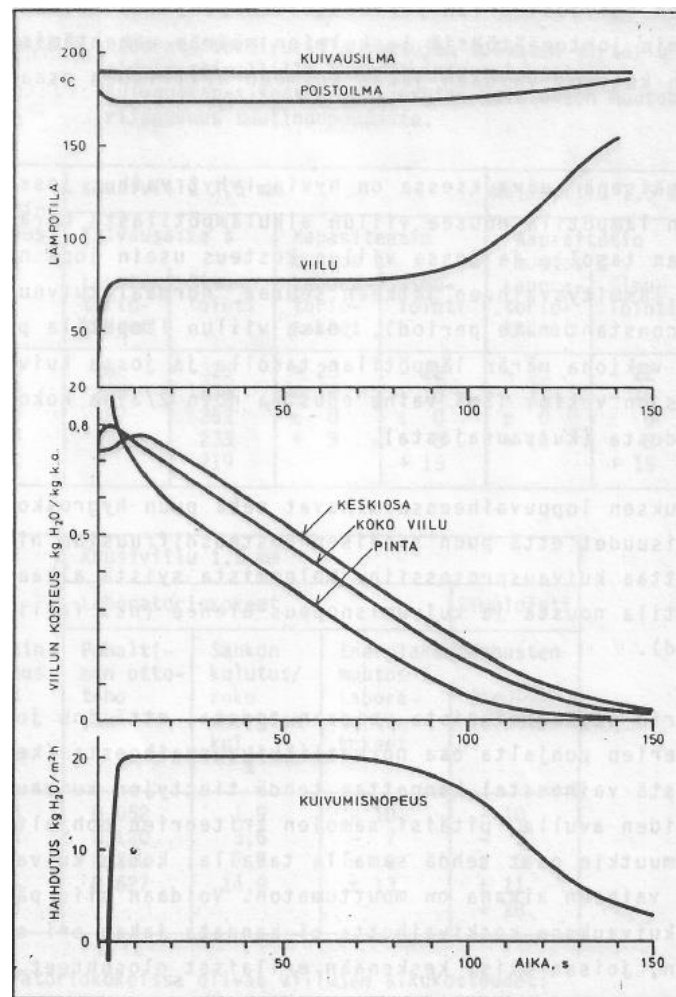
Kuvio 6. Korvausilmaluukku



Kuvio 7. Kosteuskäyrät (Partonen 2017)

Viilun kuivuminen voidaan jakaa kolmeen osaan (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 21). Ensimmäinen vaihe on lyhytkestoinen ja alkaa heti viilun siirtyessä kuivaajaan. Viilun lämpötila nousee nopeasti kuivauslämpötilaan ja alkaa varsinainen kuivumisvaihe, jossa viilun lämpötila suuren haihtumisen vuoksi asettuu lähelle veden kiehumispistettä. Puu saavuttaa kyllästyspisteensä, kun solu (kuvio 2) on tyhjentynyt vedestä ja soluseinämät alkavat kuivua. Tässä vaiheessa tapahtuu myös puun muodonmuutokset, eli tässä tapauksessa kutistuminen. Ensimmäisen vaiheen jälkeen viilun lämpötila ja kuivumisvauhti pysyvät vakiona ja tämä kestää kaksi kolmasosaa kuivumisajasta. Loppuvaiheessa viilun kosteuspitoisuuden lasku hidastuu ja viilun lämpötila nousee voimakkaasti. (Mts. 21.)

Kuviossa 8 on kuvattuna lämpötilan, kosteuden ja veden haihtumisen käyrät kuivauksen aikana. Ylimmästä käyrästä voi havaita viilun lämpötilan asettuvan vakioksi pian kuivauksen aloittamisen jälkeen ja nousevan nopeasti kuivauksen loppua kohti. Kaaviosta voi myös huomata viilun kuivumisen olevan nopeinta kuivauksen alussa. Veden haihtuvuus viilun pinnalta pysyy korkeana kuivauksen ensimmäisellä puoliskolla, joten kuivan ilman tuominen kuivaajan keskiosaan korvausilmaluukuilla on perusteltua tasaisen kuivauslaadun takaamiseksi.



Kuvio 8. Kuivausolosuhteet kuivauksen aikana (Söyriä, Siimes & Salin 1988, 22)

Kuivaajan kuumen osan jälkeen viilun pintalämpötilaa pyritään laskemaan mahdollisimman paljon jäähdytysosassa käsittelyyn sopivaksi (Koponen 1995, 54). Jäähdytysosan poistoilman lämpöenergia kerätään talteen LTO-laitteilla ja sitä hyödynnetään tehtaan haudutusaltaiden lämmityksessä. Jäähtyneet viilut siirtyvät kuljettimille ja ne valokuvataan konenäön avulla ja kosteus mitataan sähkövastusmittauksen avulla. Tietokone lajittelee viilut näiden tietojen perusteella laatujen mukaisesti pinkkoihin.

## 5 Toteutus

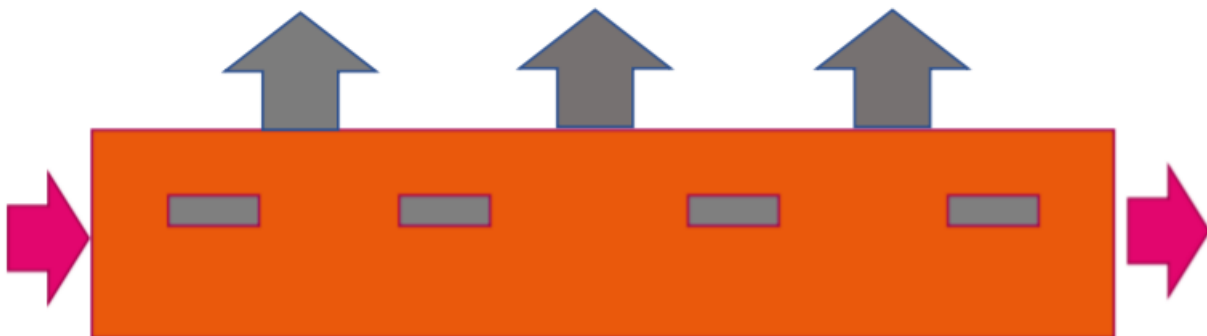
Yksi työn tavoitteista oli selvittää kuivaajan käyttämän energian määrä, joka kului korvausilman lämmittämiseen ja mahdollisen esilämmityksen säästöpotentiaali. Työssä hyödynnettiin kerättyä dataa tuotannonseurantajärjestelmästä, ilmamäärämittausten mittaustietoja ja tehtaan kaavioi-

ta. Raportissa käytetyt kaavat ovat suoraan tai johdettu Tekniikan taulukkokirjan kaavoista (Valtinen 2016).

## 5.1 Siipisäätimien asentotiedot

Ilman lämmitykseen kuluvan energian selvittämiseksi oli ensin selvitettävä kuivaajaan siirtyvän korvausilman määrä. Ilmamäärän mittauksien suunnittelua varten tarvittiin tiedot korvausilmaluukkujen asentotiedoista, jotta saadaan mahdollisimman todenmukaiset tiedot toteutuneista ilmamääristä. Korvausilmaluukkujen asentotieto on riippuvainen siipisäätimien asentotiedoista. Itse korvausilmaluukkujen asentoa ei tallenneta tuotannoseurantajärjestelmään, mutta siipisäätimien tiedot olivat saatavilla Excel-tiedostona.

Kuivaajassa on kolme siipisäädintä alku-, keski- ja loppuosassa. Alkuosan siipisäädin ohjaa ensimmäistä korvausilmaluukkuja ja loppuosan siipisäädin ohjaa neljättä korvausilmaluukkuja. Toinen ja kolmas korvausilmaluukku jakavat keskiosan siipisäätimen asentotiedon. Kuviossa 9 on havainnollistettu korvausilmaluukkujen ja siipisäätimien (harmaat nuolet) sijainti kuivaajassa viilujen kulkusuuntaan (punaiset nuolet) nähden.



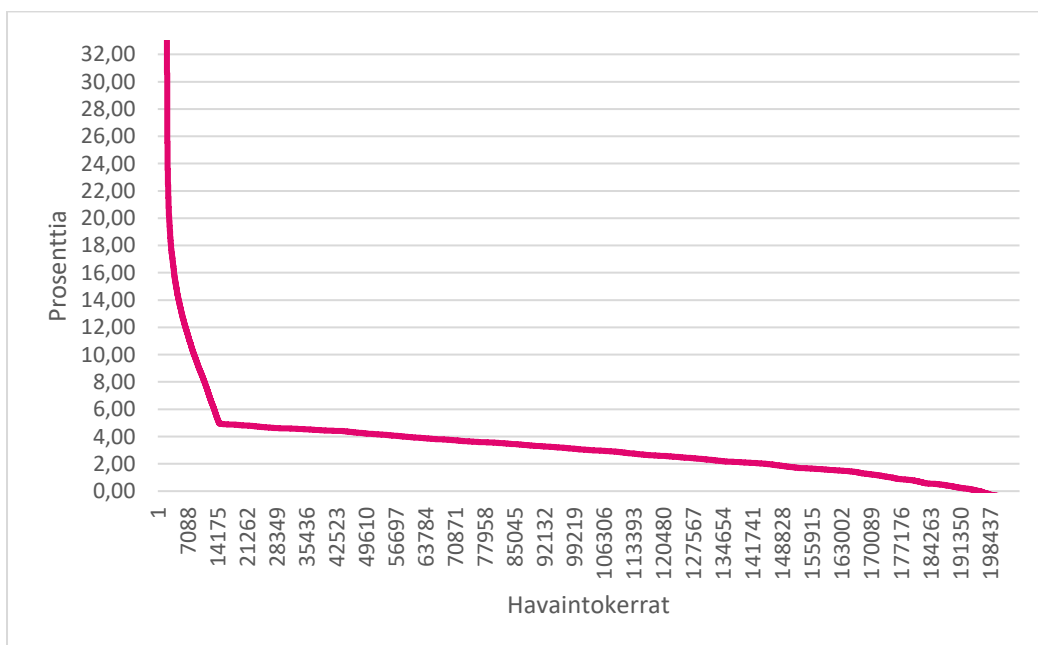
Kuvio 9. Korvausilmaluukkujen ja siipisäätimien sijainti

Siipisäätimet määrittävät korvausilmaluukkujen asennon kertoimella 3. Siipisäätimen ollessa siis yli 33 % auki, on korvausilmaluukku kokonaan (100 %) auki. Näiden tietojen avulla siipisäätimien asentodatasta lähdettiin etsimään sopivia asentoja ilmamäärämittausta varten. Tuotannoseuran-

tajärjestelmä tekee havainnon siipisäätimen asennosta noin kolmen sekunnin välein ja tallentaa arvon järjestelmään vuorokauden ympäri.

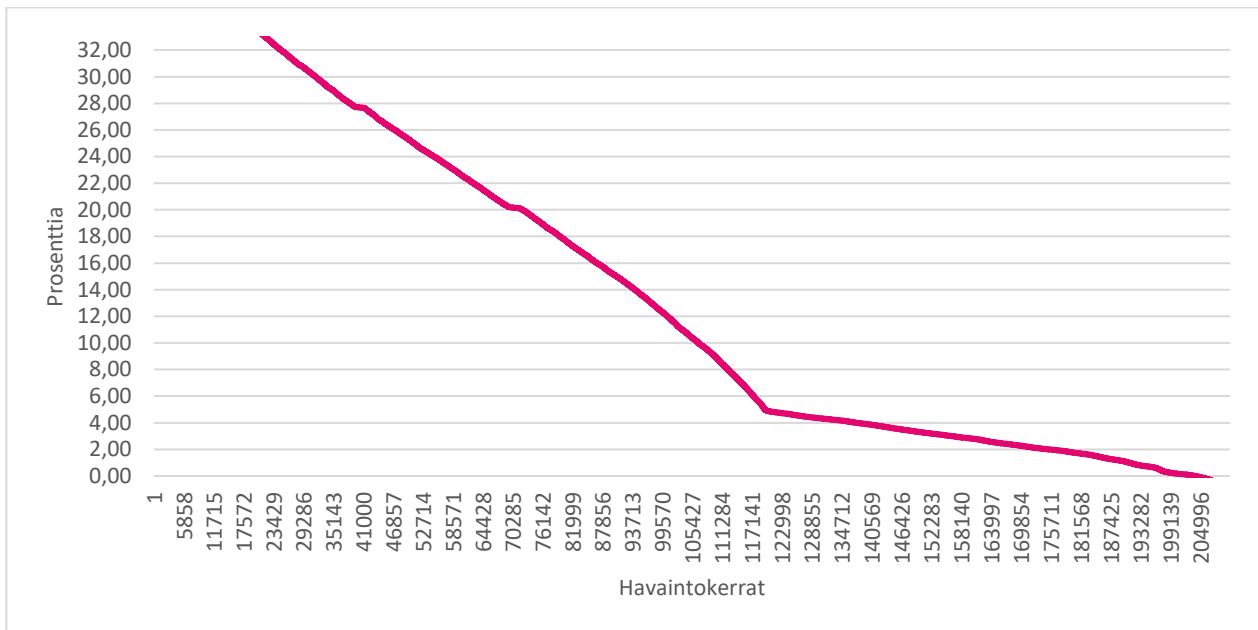
Siipisäätimien asentojen tutkittava ajanjakso oli 1.5.2021-31.5.2021. Ajankohta valittiin sillä perusteella, että tänä aikana ei kuivauksessa ollut huomattavia häiriöitä tai seisokkeja. Runsaan datamäärän vuoksi siipisäätimien asennon havainnollistamiseksi on laadittu asentokäyrät jokaiselle siipisäätimelle. Taulukoiden vasemmalla pystysarakkeella ovat säätimen asennot prosentteina ja vaakarivillä on havaintokerrat. Koska tavoitteena on tutkia korvausilmaluukkujen asentoa, on siipisäätimen asennot rajattu 33 prosenttiin.

Kuviosta 10 voi huomata siipisäätimen olevan suurimman osan ajasta, noin 90 prosenttia, alle 5 prosentin arvossa. Tästä voidaan päätellä tutkimuksen ja ilmamäärämittauksen kannalta kiinnostavien arvojen olevan alle 5 prosentin ja täysin auki (yli 33 prosenttia). Mittaussuunnitelmaan kirjatut arvot on merkitty taulukkoon 1. Käyrän muutokset on tulkittu kuvaajilta, mutta ottaen huomioon kaikki muut kuivaajan tuotantoon vaikuttavat tekijät, on tämä tarkkuus tähän tarkoitukseen hyväksyttyä.



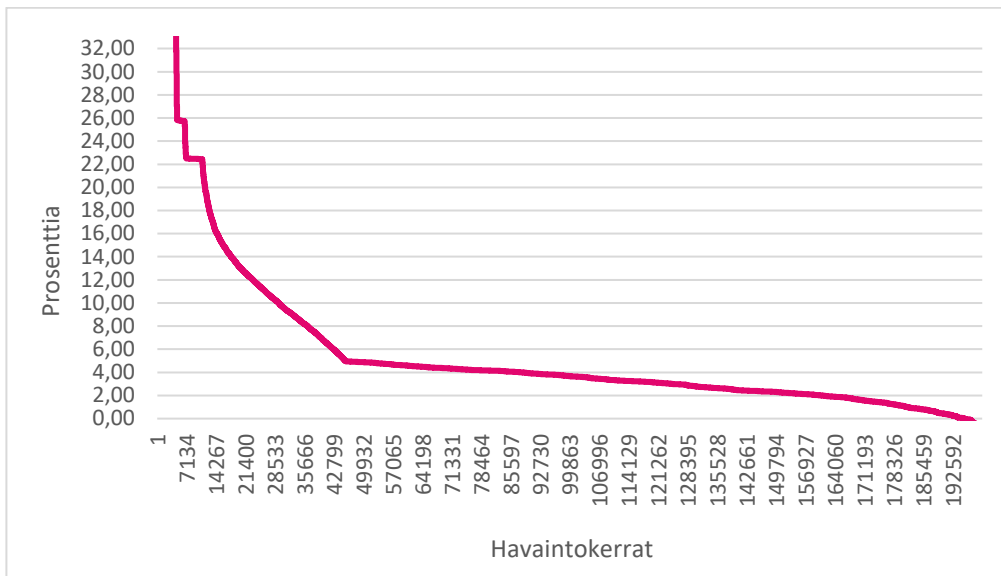
Kuvio 10. Alkupään asentokäyrä.

Keskiosan siipisäätimen asentotieto poikkeaa huomattavasti alku- ja loppupään siipisäätimen asennoista. Tämä poikkeavuus johtuu todennäköisimmin kuivaajan rakenteesta ja avoimista päädyistä. Pitkät ajanjaksot hyvin pienellä siipisäätimen avautumisella kertovat ilman siirtyvän kuivaajaan kuivaajan päädyistä, eli syöttölaitteelta ja purkurullastoilta. Keskiosan asentokäyrä on trendiltään muita vastaava, mutta siipisäädin on poikkeavasti alle 5 prosentin arvossa vain noin 42 prosenttia ajasta.



Kuvio 11. Keskiosan asentokäyrä.

Loppupään siipisäätimen käyrä on muodoltaan hyvin samankaltainen kuin ensimmäisen, mutta käyrältä erottuu kaksi asentoa, 22 % ja 25 %, jotka esiintyvät muita useammin. Tämä johtuu todennäköisimmin viulun kosteuspitoisuuden alhaisuudesta tässä vaiheessa kuivausta.



Kuvio 12. Loppupään asentokäyrä.

Taulukkoon 1 on määritetty mitattavat siipisäätimien asennot. Valinnat on tehty yllä olevien käyrien jyrkkyyden perusteella, eli mitä loivempi käyrä, sitä pienempi muutos siipisäätimen asennossa on tapahtunut. Näin saadaan tietoja eniten esiintyneiden asentojen ilmamääristä.

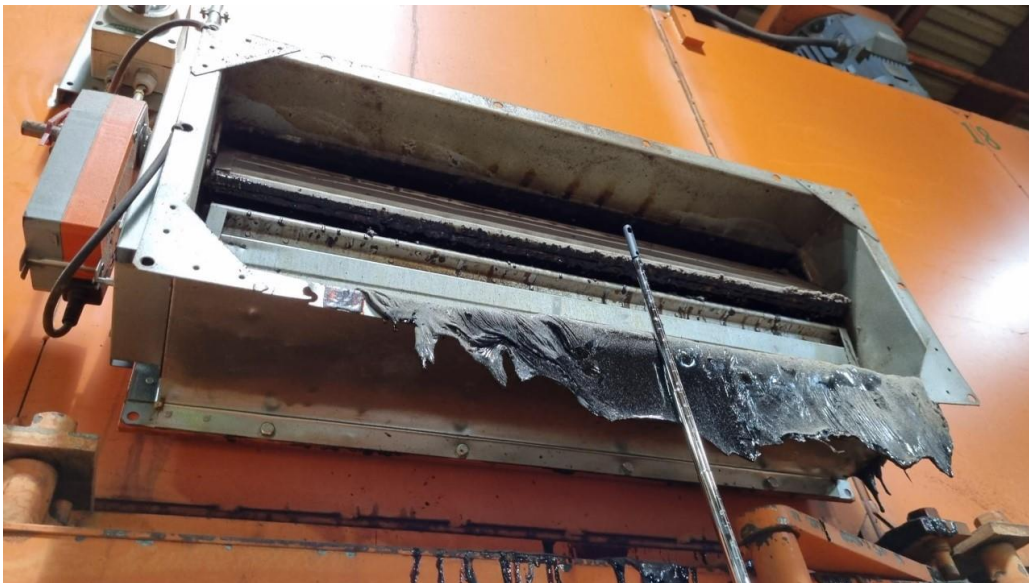
Taulukko 1. Mittaussuunnitelma

Asennot (%)	1. luokka	2. luokka	3. luokka	4. luokka
1 %				
3 %				
5 %				
10 %				
15 %				
20 %				
23 %				
25 %				
28 %				
30 %				
Kokonaan auki				

Tämän tutkimuksen kannalta merkittävää tietoa on asentojen esiintyvyys kuivaajan ajon aikana. Kuvaajien ja alkuperäisen datan perusteella määritetään painotettu keskiarvo siipisäätimen asennoille. Näin saadaan käyttökelpoinen arvo ilmamäärien laskentaan. Saatujen tietojen avulla lasketaan kuivaajan käyttämän korvausilman määrä vuoden aikana.

## 5.2 Ilmavirtamittaukset

Ilmavirtamittaus on tulosten luotettavuuden kannalta haasteellinen, sillä korvausilmaluukussa ei ole pitkiä ja suoria kanavaosuuksia. Luukkujen rakenteen vuoksi ilmavirran reitillä on useita mutkia ja epätasaisia pintoja, jotka aiheuttavat pyörteitä ja vaihtelevia ilmavirran nopeuksia. Kanavan rakentaminen korvausilmaluukkuun tätä mittausta varten olisi kuitenkin ollut liian laaja ja kallis toimenpide tutkimuksen laajuuteen nähden. Mittaus toteutettiin siis alla olevan kuvan mukaisella anturilla. Ilmavirtamittaus toteutettiin tehtaalla ulkopuolisen mittaushenkilön avustuksella. Mittaukset perustuivat mittaussuunnitelmaan (Taulukko 1) ja tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan.



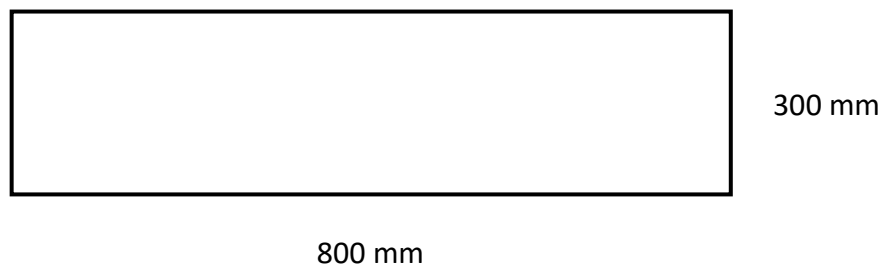
Kuvio 13. Ilmamäärämittaus

Korvausilmaluukun poikkipinta-ala voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$A = hw \quad (1)$$

missä,       $A$  = poikkipinta-ala  
                $h$  = luukun korkeus  
                $w$  = luukun leveys

Luukun leveys on 800 mm ja korkeus 300 mm. Luukussa olevat siivekerakenteet vievät luukun aukolta 50 mm tilan, joten luukun toiminnallinen korkeus on laskennassa 250 mm. Yllä olevan kaavan mukaisesti korvausilmaluukun toiminnallinen pinta-ala on 200 000 mm<sup>2</sup>, eli 0,2 m<sup>2</sup>.



Ilmamäärä voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$q_v = Av_i \quad (2)$$

missä,       $q_v$  = ilman tilavuusvirta  
                $A$  = kanavan poikkipinta-ala  
                $v_i$  = ilman nopeus kanavassa

Siipisäätimien asentotrendit eivät olleet lineaarisia tai symmetrisiä, joten tässä laskennassa hyödynnettiin painotettua keskiarvoa. Painotetussa keskiarvossa jokaisella arvolla, eli tässä tapauksessa ilmamäärällä, on oma "painonsa" joka perustuu mittauksen aikana olleen siipisäätimen asennon esiintyvyyteen tutkittavana aikana. Tutkittavilla siipisäätimen asennoilla oli siis oma prosenttiosuutensa kokonaisajasta ja tätä osuutta käytettiin laskennassa. Mittauksessa saatujen ilman nopeuksien, ilmamäärien ja siipisäätimien asentotietojen avulla pystyttiin laskemaan jokaiselle luukulle painotettu keskiarvo ilmamäärille.

Taulukko 2. Aritmeettinen painotettu keskiarvo ilmamäärille

Painotettu tilavuusvirran keskiarvo (l/s)			
Luokku 1	Luokku 2	Luokku 3	Luokku 4
26,74	187,98	35,96	31,79

Ilmaa siirtyy kuivaajaan yhteensä 282,5 l/s, eli 1016,9 m<sup>3</sup>/h. Energialaskennassa on luonnollisempaa käyttää tilavuusvirran sijaan massavirtaa, joka voidaan laskea kaavalla:

$$\dot{m} = q_v \rho \quad (3)$$

missä,      m = massavirta  
               q<sub>v</sub> = ilman tilavuusvirta  
               ρ = ilman tiheys

Ilman tiheys on 101,3 kPa paineessa 1,29 kg/m<sup>3</sup>. Yllä olevien tietojen avulla voidaan laskea seuraavat arvot:

Taulukko 3. Massavirta kuivaajaan

Massavirta kuivaajaan (kg/s)			
Luokku 1	Luokku 2	Luokku 3	Luokku 4
0,0345	0,2425	0,0464	0,0410

### 5.3 Energialaskenta

Tiedossa olevien keskimääräisten ilmamäärien avulla voidaan siirtyä energialaskentaan. Saatujen tulosten avulla pystytään laskemaan kuivaajaan siirtyvän korvausilman lämmittämiseen tarvittava energiamäärä. Ilmamäärien mittauksen aikana kirjattiin ylös myös kuivaajaan virtaavan ilman lämpötila ja tässä laskennassa käytetään lämpötilan keskiarvoa eli 27°C. Kuivaajassa 2 kuivataan pääasiassa viilulaatua, joten laskennassa käytetään kuivaajan sisälämpötilana 169°C.

Tiedossa olevien lämpötilojen ja massavirtojen avulla voidaan laskea korvausilman lämmitykseen tarvittavan energian määrä seuraavalla kaavalla:

$$Q = c_{ilma} \dot{m} * (T_s - T_u) * \frac{\Delta t}{1000} \quad (4)$$

missä,      Q = lämpöenergian tarve kWh  
               c = ilman ominaislämpökapasiteetti 1010 J/K\*kg  
               m = massavirta kg/s  
               T<sub>s</sub> = kuivaajan sisälämpötila 169° C  
               T<sub>u</sub> = ulkolämpötila 27° C  
               Δt/1000 = muunnos energiaksi kWh

Esilämmittimen tehontarve voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$Q = c_{ilma} \dot{m} * (T_s - T_u) \quad (5)$$

missä,      Q = lämpötehon tarve kW  
               c = ilman ominaislämpökapasiteetti 1010 J/K\*kg  
               m = massavirta kg/s  
               T<sub>s</sub> = kuivaajan sisälämpötila 169° C  
               T<sub>u</sub> = ulkolämpötila 27° C

Tässä tutkimuksessa oletetaan kuivaajan olevan käynnissä tehtaan työaikamuodon mukaisesti kuutena (6) päivänä viikossa, eli 624 tuntia kuukaudessa. Näiden tietojen perusteella voidaan laskea korvausilman lämmittämiseen tarvittavan energian määrän olevan 32,6 MWh kuukaudessa ja 391,3 MWh vuodessa. Energian hinnan ollessa 40 €/MWh, saadaan nykytilanteessa korvausilman lämmitykseen kuluvan energian osuudeksi energiakustannuksista 1304,4 €/kk, eli 15 652,8 € vuodessa.

Taulukossa 4 on listattuna eri lämpötilatasojen vaikutus energian määrään ja kustannuksiin korvausilman osalta. Aiemmin mainittujen kaavojen avulla on laskettu korvausilman lämmityksen energiantarve kuivaajassa, eli esilämmityksen jälkeen sekä esilämmittimen tehontarve. Energian ja

tehon vieressä on kustannus energiassa 40 €/MWh hinnalla ja säästö energiakustannuksissa verrattuna lämmittämättömään korvausilmaan, joka oli 1304 €/kk.

Taulukko 4. Energialaskujen tuloksia

Ilman lämpötila (C)	Korvausilman lämmityksen energiantarve (kWh)	Esilämmittimen lämpötehontarve (W)	Kustannus energiassa (€/kk)	Säästö energiassa(€/kk)
140	6660,06	41588,59	266,40	1038,05
120	11253,21	34227,77	450,13	854,33
100	15846,36	26866,96	633,85	670,60
80	20439,50	19506,15	817,58	486,87
60	25032,65	12145,34	1001,31	303,15
40	29625,80	4784,53	1185,03	119,42

## 5.4 Esilämmityksen toteutus

Toteutustapaa harkittaessa tärkeimmiksi kysymyksiksi nousi lämmitetyn korvausilman lämpötila ja lämmityksen toteuttavan laitteiston tyyppi. Lämpötilassa on otettava huomioon lämmityksen vaikutus kuivaajan sisäolosuhteisiin ja tätä kautta myös kuivauslaatuun. Korvausilmaluukkujen pääasiallinen käyttötarkoitus on kosteudenhallinta kuivaajassa, joten lämmityksen vaikutus kuivaajan sisäilman kosteuteen on otettava huomioon. Liian kuiva tai kuuma korvausilma saattaa lisätä lisäveden tarvetta kuivaajassa, joka vie pian esilämmityksen kannattavuudelta pohjan. Tätä olisi hyvä tutkia ennen toteutusta.

Korvausilman lämmityksen tavoitelämpötila vaikuttaa myös laitteiston valintaan. Tutkimuksen suunnittelun aikana esiin nousut 140° C lämpötila voidaan toteuttaa lämmönvaihtimilla ja energian ottamisella höyry-vesi-järjestelmästä sekä lämpöpumpuilla. Lämpöpumppu-ratkaisussa nousee esiin myös sähkönkulutuksen lisääntyminen, jota on tarkasteltava erikseen. Tuotantoprosesseissa syntyy kuitenkin hukkalämpöä useammasta lähteestä, joten sen hyödyntäminen voi tässä tapauksessa olla järkevintä.

### 5.4.1 Lämpöpumput

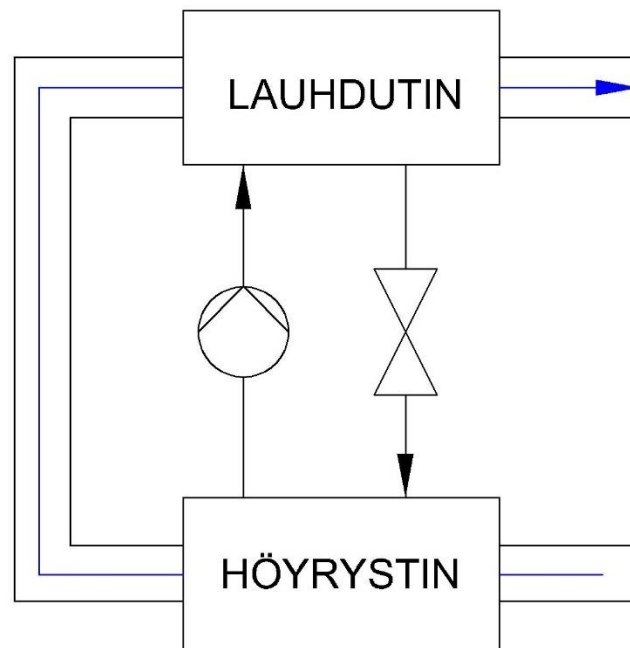
Lämpöpumppu on yksinkertaisimmillaan laite, jolla voidaan siirtää energiaa alemmasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan (Jääskeläinen, Turunen 2021, 23). Lämpöpumppujärjestelmässä lämpöenergia saadaan siirtymään ja kasvamaan työn avulla. Lämpöpumpun tehokkuuden mittana toimii lämpöenergiaa tuottaessa lämpökerroin, eli coefficient of performance (COP) (Mäkelä, Mäkelä & Siltanen 2013). Lämpökerroin kertoo, kuinka moninkertaisena prosessiin tuotu työ siirtyy lämpöenergiaksi.

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (6)$$

missä,      COP = lämpökerroin  
               Q = lämpöenergia kuumalle puolelle  
               W = käytetty työ tai teho

Teollisuusluokan lämpöpumppujen lämpökerroin riippuu käytetystä tekniikasta ja lämmönlähteistä. Lämpöpumppujen tuottaman lämpötehon lämpötilataso on noussut teknologian kehittyessä jo yli 100° C:een (Jääskeläinen, Turunen 2021, 6) ja esimerkiksi Finess Energy Oy:n lämpöpumpuilla voidaan saavuttaa jo 120° C:een lämpötila (Teollisuuslämpöpumput n.d.). Pumpujen suorituskyvyssä olisi siis potentiaalia korvausilman esilämmityksen energianlähteeksi. Suuritehoisilla pumpuilla päästään jopa 160° C:een lämpötiloihin (mts. 24). Lämpöpumpun mitoituksessa on otettava huomioon kiertävän nesteen ominaisuudet ja laitteen koko. Lisäksi uuden laitteiston tuomat vaatimukset kohteen sähköliittymille ja järjestelmille saattavat nostaa kustannuksia huomattavasti (mts. 24).

Lämpöpumppu käyttää siis sähköenergiaa lämmönlähteestä saadun lämpöenergian nostamiseksi korkeammalle lämpötilatasolle. Lämpöpumpun höyrystin kuivaa ilmaa kosteuden tiivistyessä höyrystimen pinnoille. Näiden ominaisuuksien yhdistelmällä saataisiin kuivaajalle lämmitettyä ja kuivaa ilmaa kuivausprosessin optimoimiseksi. Energiatehokkuuden parantamiseksi höyrystimessä jäähtynyttä ilmaa lämmitettäisiin tiheäripaisessa välikanavassa hallitilan ilman lämpöenergialla ennen lauhdutinta, joka lämmittäisi ilman haluttuun lämpötilaan.



Kuvio 14. Lämpöpumppu

#### 5.4.2 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihtimella voidaan hyödyntää lämpöenergiaa toisesta ainevirrasta ja siirtää sitä toiseen ainevirtaan (Lienhard 2011). Ainevirtojen lämpötilaeron olisi oltava myös suhteellisen suuri energiatehokkuuden takaamiseksi (Lee 2010). Lämmönvaihtimien tehokkuuteen vaikuttavat virtaavien aineiden ominaisuudet, lämpötilaerot ja lämmönvaihtimen likaisuus. Vaneritehtaan ilma on erittäin kosteuspitoista ja pölyistä, joka saattaa aiheuttaa ongelmia lian kertyessä lämmönvaihtimen pinnoille. Energiatehokas lämmönvaihdin vaatii hyvän suunnittelun ja säännöllisen puhdistamisen lisäksi puhtaat ainevirrat sekä oikean mitoituksen lämmitystarpeen mukaan. (Energiatehokas lämmönsiirto n.d.)

2-kuivaajalla kyse olisi kaasuneste-lämmönvaihtimesta, joka esilämmittäisi kuivaajan korvausilman. Toisen ainevirran ollessa kaasua, eli tässä tapauksessa ilmaa, on ilman matala konvektiokerroin otettava huomioon lämmönvaihtimen mitoituksessa (Pis'mennyi 2016, 1). Lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-ala kasvaa heikomman konvektion korvaamiseksi. Tähän tilanteeseen sopivin lämmönvaihtimen tyyppi olisi putkilämmönvaihdin.

Lämmönvaihtimen kautta siirtyvä lämpövirta voidaan laskea kaavalla:

$$\dot{q} = hA\Delta T \quad (7)$$

missä,  $h$  = lämmönsiirtokerroin  $W/m^2K$

$A$  = lämmönsiirtopinta-ala  $m^2$

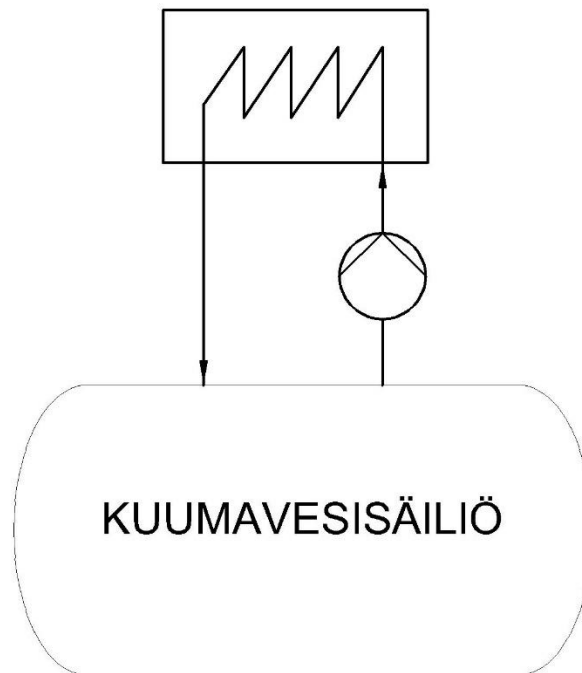
$\Delta T$  = lämpötilaero  $K$

Lämmönvaihdinta mitoittaessa on otettava huomioon kiertävien aineiden ominaisuudet, virtauksen laminaarisuus ja nopeus, lämmönsiirtopinta-alojen geometria ja vaihtimen malli (Kutz 2014). Suurin vaikutus lämmönvaihtimen hintaan on lämmönsiirtopinta-alalla. Tässä tutkimuksessa kuivaajalle tarvittaisiin 42 kilowatin lämmönvaihdin aiempiin tuloksiin perustuen.

Ilman lämmittämiseksi kaikki korvausilmaluukut olisi liitettävä esilämmitysjärjestelmään. Tämän voisi toteuttaa kanavoimalla kaikki luukut samaan ilmakehään, jonka päässä on valittu lämmitysratkaisu. Ilma virtaisi vapaasti kanavan läpi kuivaajaan asti. Lämmitysratkaisu olisi kulujen minimoimiseksi hyvä sijoittaa lähelle kuivaajaa. Kustannuksiin vaikuttavat laitteiden koko, niiden sähkönkulutus ja kanavien pituus.

Raportin liitteissä on tehtaan höyrykeittiön PI-kaavio (salassa pidettävä), johon on laadittu malliesimerkki esilämmityksen toteuttamisesta. Tässä ratkaisussa lämmitykseen käytettävä energia on otettu höyrykeittiön kuumavesisäiliöstä. Lämmönvaihtimessa kiertänyt vesi palasi takaisin kuumavesisäiliöön kuvion 15 mukaisesti. Höyrykeittiö on koko tehtaan energiankulutuksen keskus, ja tätä kautta kaikki prosessit saavat lämpöenergiansa. Voimalaitos tuottaa prosessihöyryä, joka tuodaan höyrykeittiön jakotukkiin. Jakotukilta siirretään tulistamaton höyry kuivaajien patteristoon, jossa lauhde kerätään ja siirretään höyrykeittiön lauhdesäiliöön. Lauhdevesisäiliöstä siirretään vettä viereiseen kuumavesisäiliöön, jonka sisältämällä vedellä lämmitetään tehtaan kuumapuristimet.

Tämän säiliön veden lämpötila on noin  $158^\circ C$  ja säiliössä on tällä hetkellä vapaa yhde, jota hyödynnetään tässä esimerkissä. Säiliössä olevan veden energiasisällön riittävyys sekä puristimille että esilämmitykseen on selvitettävä ennen ratkaisun toteuttamista. Kuumavesisäiliön vedessä on todennäköisesti hyödynnettävää energiaa myös korvausilman esilämmitykseen.



Kuvio 15. Yksinkertaistettu kuvio lämmönvaihtimen vesikierrosta

## 5.5 Yhteenveto tuloksista

Tutkimuksen tuloksina saatiin selville kuivaajaan siirtyvän korvausilman määrä, nykyinen energia-kustannus ilman lämmittämiseksi, säästömahdollisuudet ja pohdintaa esilämmityksen toteuttamiseksi. Tuloksien avulla voidaan harkita tulevien jatkotutkimusten kannattavuutta. Toteutustapojen esittely on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Korvausilman määrä perustui kuivaajalla toteutettuun ilmamäärämittaukseen. Mittauksessa saatiin selville jokaisen korvausilmaluukun läpi siirtyvän ilman tilavuusvirta, lämpötila ja nopeus. Näiden mittaustulosten ja korvausilmaluukkujen asentotietojen avulla pystyttiin laskemaan kuivaajaan virtaavalle korvausilmalle keskimääräinen arvo. Mittauksen luotettavuudessa oli otettava huomioon mittaustapa ja korvausilmaluukun siisteys. Luukuilla ei ollut kanavarakennetta, jota olisi voinut hyödyntää tarkassa mittauksessa. Mittaus toteutettiin vapaasta ilmapirrasta luukun edustalta. Luukulla oli myös runsaasti pölyä ja likaa mittaushetkellä. Luukkujen puhdistamisella saattaa siis olla vaikutus ilmamääriin.

Tiedossa olevan korvausilman määrän avulla laskettiin ilman lämmittämiseen kuluvan energian määrä. Energian hinnan avulla pystyttiin laskemaan korvausilman lämmittämisen vaikutus energiakustannuksiin. Energian määrä on huomattava vuositasolla ja 2-kuivaajalla kuluukin lähes 400 MWh:ia vuodessa korvausilman lämmittämiseen. Tiedossa olevan energiankulutuksen avulla pystyttiin laskemaan esilämmityksen tuomat suorat säästöt energiakustannuksissa eri lämpötilatasoilla.

Esilämmityksen toteutustavalla on suuri vaikutus ratkaisun tuomiin hyötyihin ja muihin vaikutuksiin. Aiemmin mainittu kanavaratkaisu korvausilmaluukkujen yhteydessä ehkäisisi tervan ja pihkan tiivistymistä luukkuihin, jota voi havaita tapahtuvan kuviossa 13. Luukkuihin kertyvä lika vaikuttaa luukkujen toimintavarmuuteen ja voi aiheuttaa häiriöitä luukun toiminnassa. Toimintavarmuuden lisäksi epäpuhtauksia siirtyisi vähemmän kuivausilmaan hallitiloista.

Tutkimuksessa tutustuttiin lämpöpumppujen toimintaperiaatteeseen ja energiankäyttöön. Todettiin, että lämpöpumpun tuottama lämpöteho olisi riittävä korvausilman esilämmitykseen. Kasvava sähkönkulutus veisi kuitenkin investoinnilta kannattavuutta varsinkin kallistuneiden sähkön hintojen myötä. Esimerkiksi vuoden 2021 sähkön hinnan keskiarvo oli 72 €/MWh (Day-ahead prices n.d.), joka on 80 %:ia enemmän kuin höyryenergian hinta 40 €/MWh.

Lämmönvaihdin on tähän ympäristöön potentiaalisin vaihtoehto helposti saatavilla olevan energianlähteen vuoksi. Tutkimuksessa perehdyttiin muihin tutkimuksiin lämmönkäytöstä teollisuudessa ja sovellettiin samoja periaatteita kohdeympäristöön kuivaajan ympärille. Suurimpia haasteita ratkaisussa on lämmönvaihtimen koko ja sen sijoitus tehtaalla. Esilämmityksen tehontarve ei ole tulosten mukaan poikkeuksellisen suuri, joten lauhteen mukana poistuva energia sopisi esilämmitykseen hyvin.

Tulosten perusteella korvausilman esilämmityksellä voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä energiakustannuksissa. Lämmitetty korvausilma vähentää kuivaajan käyttämän höyryn määrää kuivauksen aikana. Oikealla lämpöenergian lähteellä toteutettuna korvausilman esilämmitys säästää merkittävästi energiakustannuksissa. 2-kuivaajan energiankulutus on selvästi pienempi kuin viereisellä 1-kuivaajalla, jolla voitaisiin saavuttaa vielä suuremmat säästöt käytetyssä energiassa. Uuden

lämmityskanavan ja lämmönvaihtimien suunnittelu- ja rakennusvaiheiden investointikustannukset voivat nousta suuriksi saavutettuihin säästöihin nähden.

## 6 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää viilunkuivaajan käyttämän korvausilman määrä ja ilman lämmittämiseen kuluvan energian määrä. Energialaskennan lisäksi työssä pohdittiin mahdollisia toteutustapoja korvausilman esilämmitykselle ja lämmityksen tuomia säästömahdollisuuksia. Aihetta ei ole toimeksiantajan puolelta aiemmin tutkittu, joten tutkimuksessa syntyi uutta tietoa toimeksiantajan käytettäväksi.

Tuloksena saatiin vastaus ensimmäiseen tutkimuskysymykseen, eli kuinka paljon energiaa korvausilman esilämmityksellä säästettäisiin. Vuositason kustannukset olivat laskennan mukaan jopa yli 15 000 euroa, joten korvausilman esilämmityksessä on potentiaalia. Edellytyksenä tälle on hyödyntämiskelpoisen energian löytäminen prosessista ja sen tehokas hyödyntäminen. Kuivaajasta poistuva hyvin energiapitoinen lauhde olisi mahdollinen energianlähde esilämmitykselle. Samalla lauhteen lämpötilaa saataisiin laskettua ja tämä parantaisi voimalaitoksen energiantuotannon hyötysuhdetta. Huomattavan energiamäärän säästämällä olisi myös merkittävä vaikutus muiden mekaanisen metsäteollisuuden toimijoiden energiankulutukseen.

Toisessa tutkimuskysymyksessä pohdittiin esilämmityksen toteutusta. Esille nousi kuivaajasta poistuvan lauhteen hyödyntäminen, lämmönvaihtimet ja lämpöpumput. Lämpöpumppujen suorituskyky ja lämpöteho ovat kasvaneet viime vuosina huomattavasti ja niissä olisi potentiaalia esilämmityksen toteuttamiseen. Edullinen sähkö parantaisi ratkaisun kannattavuutta ja lyhentäisi takaisinmaksuaikaa reilusti. Todennäköisempi ratkaisu kuivaajalle olisi hyvin energiapitoisen lauhteen hyödyntäminen lämmönvaihtimilla. Kuivaajalta palannutta lauhdetta hyödynnetään tehtaan kuumapuristimilla ja voimalaitokselle palautuvassa lauhtedevedessä on edelleen hyödyntämiskelpoista energiaa, jota voidaan hyödyntää korvausilman lämmityksessä.

Kolmannessa tutkimuskysymyksessä tavoitteena oli selvittää esilämmityksen vaikutus viilun kuivauslaatuun. Ilma sitoo lämmitessään enemmän kosteutta, joka siirtyisi sitten kuivaajaan. Ottaen huomioon korvausilmaluukkujen käyttötarkoituksen, eli kuivan ilman tuomisen kuivaajaan, on tämä otettava huomioon esilämmitystä suunniteltaessa. Hallitilojen ilman kosteuspitoisuus on

suhteellisen korkea viulun varastointiin tarvittavan ilmankosteuden vuoksi. Lämpöpumpulla ilma pystyttäisiin kuivaamaan ennen lämpöenergian tuomista kuivausilmaan.

Työssä huomattiin korvausilman muodostavan huomattavan kustannuserän energiakustannuksissa. Höyrynkulutuksen osuus vaneritehtaan kustannusrakenteesta on noin 6 - 8 % (Kuusenmäki 2022). Yhdessä muiden kuivaajalle toteutettujen selvityksien kanssa 2-kuivaajalle voidaan muodostaa erittäin potentiaalisia energiansäästömahdollisuuksia. Esilämmittämisen toteuttamisen haasteina nousi esille lämmittämisen vaikutus prosessin toimintaan sekä kuivaajien ympäristön rajallinen vapaa tila. Toteutus vaatii tarkkaa suunnittelua ja jatkotutkimuksia lämmityksen vaikutusten osalta. Lisäksi lauhdekierron tasapainoa olisi tutkittava ja harkittava lämmönvaihtimelta palaavan lämmitysveden lopullista ohjausta. Palaako vesi kuumavesisäiliöön vai siirtyykö se suoraan voimalaitokselle palaavaan linjaan.

Työn tulosten avulla toimeksiantaja voi harkita jatkotutkimuksien kannattavuutta. Olisi hyvä tutkia korvausilman ja lisäveden lämmityksien vaikutusta toisiinsa sekä kuivauslaatuun. Lisäksi tässä työssä todettujen lämmitysratkaisujen mitoittamisella kohdeympäristöön päästäisiin tarkastelemaan investoinnin kustannuksia ja siten myös takaisinmaksuaikoja. Tämä työ toimii alustavana tutkimuksena ja pohjustuksena aiheeseen.

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin. Tutkimus toteutettiin hyvää tieteellistä käytäntöä ja eettisiä periaatteita noudattaen. Kuivaajan käyttämän korvausilman määrä saatiin selville ammattilaisen suorittamalla mittauksella. Mittauksesta saatuja tuloksia käsiteltiin ja analysoitiin huolellisesti sekä kriittisesti luotettavien laskujen takaamiseksi. Kirjallisuuskatsauksen avulla perusteltiin esille tuodut lämmitysratkaisut esilämmityksen toteuttamiseen. Tämän tutkimuksen avulla toimeksiantaja voi perehtyä tarkemmin kuivaajan energiankulutukseen vaikuttaviin tekijöihin ja ottaa ne huomioon tulevaisuissa investoinneissa ja energiankäytön kehityksessä.

Puuteollisuus ja vanerin valmistus jatkuu näillä näkymin Suomessa vahvana vahvojen tilauskantojen ja rakentamisen kehittymisen myötä. Muuttuva maailmantilanne voi kuitenkin tuoda yllättäviä vaikutuksia niin maailmantalouteen, raaka-aineiden saatavuuteen kuin energian hintoihinkin. Nousevat energian hinnat ja polttoaineen saatavuuden häiriöt korostavat energiatehokkuutta parantavien investointien tekemistä ja niiden kartoittamista. Lainsäädännön vaikutus teollisuuden

toimintaan tulee todennäköisesti kasvamaan ilmastonmuutoksen ja kansainvälisen energiapolitiikan muutosten tuoman paineen vuoksi.

## Lähteet

Energiatehokkuusdirektiivi 2012/27/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta. Annettu 25.10.2012. Viitattu 20.1.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1399375464230&uri=CELEX:32012L0027>.

Energiatehokkuusjärjestelmä:2014. 2015. Motivan verkkosivut. Viitattu 20.1.2022. [https://www.motiva.fi/files/10070/Energiatehokkuusjarjestelma\\_ETJ\\_.pdf](https://www.motiva.fi/files/10070/Energiatehokkuusjarjestelma_ETJ_.pdf).

Energiatehokkuusjärjestelmät ETJ ja ETJ+. N.d. Motivan verkkosivut. Viitattu 20.1.2022. [https://www.motiva.fi/yriytykset/energiatehokkuuden\\_johtaminen/energiatehokkuusjarjestelmat\\_etj\\_ja\\_etj](https://www.motiva.fi/yriytykset/energiatehokkuuden_johtaminen/energiatehokkuusjarjestelmat_etj_ja_etj).

Energiatehokkuuslaki 1429/2014. Laki elinkeinoelämän energiatehokkuudesta. Annettu 30.12.2014. Viitattu 20.1.2022. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141429>.

Energiatehokkuussopimukset. N.d. Motivan ylläpitämä energiatehokkuussopimuksia käsittelevä sivusto. Viitattu 5.2.2022. <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/sopimus/>.

Energiatehokas lämmönsiirto. N.d. Opas Motivan sivuilla. Viitattu 5.3.2022. [https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas\\_lammonsiirto\\_opas.pdf](https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf).

Day-ahead prices. N.d. Pörssisähkön hinnat Nordpoolin sivuilla. Viitattu 3.4.2022. <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Yearly/?view=table>.

ISO 50001 Energy Management System. 2018. ISO:n esite standardista. Viitattu 2.2.2022. <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100400.pdf>.

Isomäki, O. 1962. Puutavaran kuivaus ja puutavarakuivaamot. Vihti: Luoteis-Uusimaan Kirjapaino.

Jääskeläinen, J. & Turunen, T. 2021. Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutus energiatehokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen. Helsinki: Motiva.

Kananen, J. 2011. Kvantti: Kvantitatiivisen opinnäytetyön käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Koponen, H. 1995. Puulevytuotanto. Saarijärvi: Gummerus.

Koponen, H. 2001. Suomen vaneriteollisuus 1893 - 2000. Helsinki: Erweko Painotuote.

Kuivaajan modernisointi. 2018. Rauten dokumentti kuivaajan päivityksistä. Asiakirja Metsä Woodin sisäisessä järjestelmässä.

Kutz, M. 2014. Mechanical engineers' handbook: Energy and power (4. painos). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Kuusenmäki, A. 2022. Tuotanto-insinööri. Sähköpostikeskustelut ja tapaamiset.

Kärkkäinen, M. 1985. Puutiede. Hämeenlinna: Karisto.

Lee, H. 2010. Thermal design heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Lienhard, John Ha. Lienhard, John Hb. 2011. Heat Transfer Textbook (4. painos). Massachusetts: Dover Publications.

Liukko, T. 2020. Metsä Woodin siirtyminen ETJ+ -järjestelmästä ISO50001:2018. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ala, energia- ja ympäristötekniikka. Viitattu 25.3.2022. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202002172527>.

Metsäteollisuus on energiatehokkaiden toimijoiden toimiala. N.d. Uutinen Metsä Groupin sivuilla. Viitattu 15.2.2022. <https://www.metsagroup.com/fi/Media/Pages/Case-Metsateollisuus-on-energiatehokkaiden-toimijoiden-toimiala.aspx>.

Mäkelä, M., Mäkelä R. & Siltanen, O. 2013. Insinöörikoulutuksen fysiikka. Tampere: Tammertekniikka.

Nitsche, M. 2016. Heat exchanger design guide: a practical guide for planning, selecting and designing of shell and tube exchangers. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Pang, S., Riley, S. & Haslett, A. 1997. Simulation of Pinus radiata veneer drying: Moisture content and temperature profiles. Artikkeliksi metsätuotteista. Viitattu 14.2.2022. <https://www.proquest.com/docview/214631484/fulltextPDF/302E270C24F4679PQ/1?accountid=11773>.

Partonen, R. 2017. Viilunkuivaajien modernisointimoduleiden kehittäminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteet, konetekniikka. Viitattu 14.2.2022. [https://aalto.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/26166/master\\_Partonen\\_Riku\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aalto.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/26166/master_Partonen_Riku_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Pis'mennyi, E. 2016. Handbook for transversely finned tube heat exchanger design. Amsterdam: Academic Press.

Puurakentamisen suosio jatkaa kasvuaan. 2019. Artikkeliksi UPM:n sivuilla. Viitattu 20.2.2022. <https://www.upmtimber.com/fi/ajankohtaista/2019/09/Puurakentamisen-suosio-jatkaa-kasvuaan/>.

Söyrilä, P., Siimes, H. & Salin, J. 1988. Nykyisten viilunkuivausmenetelmien kehittäminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Helsinki: Rakennustieto.

Teemme lujasti töitä energiatehokkuuden eteen. N.d. Metsä Groupin verkkosivut. Viitattu 10.1.2022. <https://www.metsagroup.com/fi/Media/Pages/Metsa-Group-tekee-lujasti-toita-energiatehokkuuden-eteen-.aspx>.

Teollisuuslämpöpumput. N.d. Finess Energy Oy:n esite. Viitattu 30.3.2021. <https://finess.fi/wp-content/uploads/2022/02/lampopumppu-yleisesite-ver3.pdf>.

Toimintajärjestelmä. N.d. Metsä Woodin sisäinen järjestelmä.

Tuomivaara, T. 2005. Tieteellisen tutkimuksen perusteet. Viitattu 20.3.2022. <https://www.mv.helsinki.fi/home/ttuomiva/Y125luku6.pdf>.

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

Vaneri. 2020. Puuinfo Oy:n verkkosivu. Viitattu 9.1.2022. <https://puuinfo.fi/puutieto/puulevyt/vaneri/>.

Vanerikäsikirja. 2006. Lahti: Metsäteollisuus.

Viisi faktaa metsäteollisuuden energiatehokkuudesta. 2021. Metsäteollisuuden verkkosivut. Viitattu 20.1.2022. <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/viisi-faktaa-metsateollisuuden-energiatehokkuudesta>.

## **Liitteet**

**Liite 1. Havuvaneritehtaan höyrykeittien PI-kaavio (salassa pidettävä)**

## Liite 2. Mittaustulokset

<b>Luukku 1</b>				
<b>Siipisäädin auki</b>	<b>Ilmamäärä (l/s)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>Nopeus (m/s)</b>	<b>Korvausilmaluukun asetus (%)</b>
1 %	26,4	30,4	0,11	2
3 %	36	30,4	0,15	6
5 %	19,2	30,3	0,08	9
10 %				
15 %	26,4	30,5	0,11	34
20 %				
23 %				
25 %				
28 %				
30 %				
100 %	12	29,9	0,05	100
<b>Luukku 2</b>				
<b>Siipisäädin auki</b>	<b>Ilmamäärä (l/s)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>Nopeus (m/s)</b>	<b>Korvausilmaluukun asetus (%)</b>
1 %	48	31,8	0,2	3
3 %	LUUKKU EI ASETTUNUT ASE- MAAN!			
5 %	57,6	31,3	0,24	17
10 %	132	30,8	0,55	27
15 %				
20 %	297,6	30,1	1,24	58
23 %				
25 %				
28 %	280,8	29,8	1,17	82
30 %				
100 %	436,8	27,8	1,82	100
<b>Luukku 3</b>				
<b>Siipisäädin auki</b>	<b>Ilmamäärä (l/s)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>Nopeus (m/s)</b>	<b>Korvausilmaluukun asetus (%)</b>
1 %	40,8	29,4	0,17	2
3 %	26,4	28,1	0,11	8
5 %	33,6	26,2	0,14	12
10 %	40,8	25,5	0,17	26
15 %				
20 %	50,4	25,3	0,21	52
23 %				
25 %				
28 %	12	24,4	0,05	72
30 %				
100 %	67,2	24,4	0,28	100
<b>Luukku 4</b>				
<b>Siipisäädin auki</b>	<b>Ilmamäärä (l/s)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>Nopeus (m/s)</b>	<b>Korvausilmaluukun asetus (%)</b>

1 %	21,6	22,2	0,09	2
3 %	24	21,5	0,1	8
5 %	0	21,7	0	16
10 %	26,4	22,1	0,11	30
15 %	91,2	22,4	0,38	52
20 %				
23 %	76,8	22,5	0,32	73
25 %	79,2	22,2	0,33	74
28 %				
30 %				
100 %	76,8	21,5	0,32	100