



# Lisäveden esilämmityksen vaikutus viilunkuivaajan energiatehokkuuteen

Hilma Toivonen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri AMK, energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Toivonen, Hilma

### Lisäveden esilämmityksen vaikutus viilunkuivaajan energiatehokkuuteen

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2022, 39 sivua

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

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### Tiivistelmä

Energiatehokkuuden kehittäminen on keskeinen osa EU:n energia- ja ilmastopolitiikkaa. Energiatehokkuuden parantamiseksi metsäteollisuudessa on otettu käyttöön sopimuksia, joilla pyritään valvomaan ja tehostamaan energiankäyttöä. Energiatehokkuustoimilla voidaan usein saada aikaan merkittäviä kustannussäästöjä tuotantoyksiköissä. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää Metsä Wood Suolahden havuvaneri-tehtaan 2-viilunkuivaajan lisäveden esilämmityksen vaikutusta prosessin energiatehokkuuteen. Tavoitteena oli laskea kylmän lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho ja verrata saatuja tuloksia esilämmitettyyn 90°C-asteiseen lisävedeen. Lisävetä käytetään ylläpitämään kuivaajan sisäilman suhteellista kosteutta, mikä on viilun laadun kannalta tärkeää. Liian kuiva viilu rikkoutuu helposti, mikä vaikeuttaa käsittelyä seuraavissa prosessivaiheissa.

Tutkimuksen aineistona käytettiin lisäveden lämpötila- ja virtausmittauksia, joiden pohjalta saatiin laskettua lisäveden höyrystämiseen tarvittavat lämpötehot viilun eri kosteusluokilla. Aineistonkeruumenetelmänä käytettiin lisäksi teemahaastatteluja. Työn teoreettinen viitekehys koostui viilupuutuotteiden valmistusprosessista, energiatehokkuussopimuksista ja puuaineksen ominaisuuksista. Opinnäytetyö oli kehittämistutkimus, jossa käytettiin kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusmenetelmää.

Työn tuloksena saatiin kustannuslaskelmat, joista selviää lisäveden höyrystämiseen tarvittavien lämpötehojen vuosittainen energiansäästöpotentiaali. Esilämmitysjärjestelmälle laskettiin takaisinmaksuaika, jonka mukaan investointi olisi kannattava. Laitteistosta suunniteltiin alustava PI-kaavio. Lisäksi laadittiin ehdotus esilämmitysjärjestelmän sijainnista.

Jatkokehitysideana esiin nousi esilämmitysjärjestelmän lämmönvaihtimen mitoitus ja laitteiston tekninen suunnittelu. Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää pohjatietoina lisäveden esilämmitysjärjestelmän suunnittelussa.

### Avainsanat (asiasanat)

vaneri, viilu, energiatehokkuus, kuivaus

### Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

**Toivonen, Hilma**

### **The effect of preheating additional water on the energy efficiency of the veneer dryer**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2022, 39 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**

Developing energy efficiency is a key part of EU energy and climate policy. To improve energy efficiency, contracts have been introduced to control and enhance energy usage in the forest industry. Energy efficiency measures can often lead to significant cost savings in the production units. The aim of the study was to investigate the effect of preheating additional water on the energy efficiency of the veneer dryer number 2 in the Metsä Wood Suolahti plywood factory. The purpose was to calculate the thermal power required to evaporate the cold additional water and compare the results with the preheated 90 °C additional water. The additional water is used to maintain the relative humidity of the air inside the veneer dryer, which is important for the quality of the veneer. If the veneer is too dry, it breaks easily which causes difficulties in handling the veneer in the subsequent processes.

The temperature and flow measurements of the additional water were used as the material of the study. The thermal powers required to evaporate the additional water in different veneer moisture categories were calculated using the temperature and flow measurements. Thematic interviews were also used as a data collection method. The theoretical framework of the study consisted of the production of the plywood, energy efficiency contracts and the qualities of the wood. The thesis was a development study, in which the quantitative research method was used.

As a result of the study, cost estimates for the thermal powers required to evaporate the additional water were calculated. The calculations also show the annual energy saving potential for the thermal powers. The payback period of the preheating system was calculated, according to which the investment would be profitable. A preliminary piping and instrumentation diagram was designed for the equipment. In addition, a suggestion for the location of the preheating system was planned.

A proposal for the further development is dimensioning the heat exchanger of the preheating system and the technical designing of the equipment. The results of the study can be used as initial data in the design of the preheating system for the additional water.

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

plywood, veneer, energy efficiency, drying

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

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>6</b>
1.1	Opinnäytetyön lähtökohdat .....	6
1.2	Toimeksiantaja .....	7
1.3	Energiatehokkuus.....	8
1.3.1	Energiatehokkuus Suomessa .....	8
1.3.2	Energiatehokkuus metsäteollisuudessa .....	8
<b>2</b>	<b>Tutkimusasetelma .....</b>	<b>9</b>
2.1	Tavoite, tutkimuskysymykset ja aiheen rajausta .....	9
2.2	Tutkimustyyppi, -menetelmät, aineisto ja tietoperusta .....	9
2.3	Eettisyys ja luotettavuus .....	11
2.4	Käytetyt ohjelmistot.....	12
<b>3</b>	<b>Viilupuutuotteiden valmistusprosessi .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Energiatehokkuus viilupuutuotteiden valmistusprosessissa.....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Puuaineen ominaisuudet .....</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Viilunkuivausprosessi.....</b>	<b>19</b>
6.1	Viilunkuivaajan rakenne ja toimintaperiaate .....	19
6.2	Kuivaajan sisäilman suhteellinen kosteus ja lisävesi.....	21
<b>7</b>	<b>Tutkimuksen toteutus.....</b>	<b>22</b>
7.1	Lisäveden lämpötila- ja virtausmittaukset .....	22
7.2	Lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho .....	24
7.3	Esilämmitetyn lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho .....	25
7.4	Kustannuslaskelmat .....	26
<b>8</b>	<b>Kuivaajan operaattoreiden haastattelut.....</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>Lisäveden esilämmitysjärjestelmä .....</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>33</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>35</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>38</b>
	Liite 1. Kylläisen veden ominaisuudet (Appendix 1, 8) .....	38
	Liite 2. Haastattelulomake .....	39

## Kuviot

Kuvio 1. Vanerin valmistuksen tärkeimmät työvaiheet. (Koponen 2002, 28, muokattu) .....	13
Kuvio 2. Vanerin rakenne (Puuproffa. N.d.).....	15
Kuvio 3. Puun osat. (Puuinfo N.d.).....	18
Kuvio 4. Viilunkuivaajan rakenne sivusta (Kauttonen 2014, 16, muokattu).....	19
Kuvio 5. Telakuivaajan toimintaperiaate (Kurtti 2018, 11).....	20
Kuvio 6. PI-kaavio lisäveden esilämmitysjärjestelmästä.....	30
Kuvio 7. PI-kaavion laitesymbolien selitykset .....	31
Kuvio 8. Ehdotus esilämmitysjärjestelmän sijainnista.....	32

## Taulukot

Taulukko 1. Lisävesimittaukset 2- kuivaajalla 11.3.2022 .....	22
Taulukko 2. Lisäveden esilämmitysjärjestelmän kustannuslaskelmat .....	27

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Opinnäytetyön toimeksianto saatiin Metsä Woodilta, Suolahden havuvaneritehtaalta. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia havuvaneritehtaan viilunkuivauskoneen lisäveden höyrystämiseen tarvittavaa energiamäärää ja laskea, millainen vaikutus lisäveden esilämmityksellä olisi kuivausprosessissa kulutettuun energiaan. Lisävettä eli kostutusvettä käytetään viilunkuivausprosessissa pitämään kuivaajan sisäilman suhteellista kosteutta riittävän korkealla. Tällöin kuivattavien viiluarkkien laatu pysyy hyvänä, koska ne eivät kuivu liian nopeasti prosessissa. Liian nopea viilun kuivuminen aiheuttaa viiluun jännitteitä, joista syntyy halkeamia. Huonolaatuista viilua on haastavaa käsitellä vanerinvalmistuksen seuraavissa vaiheissa, sillä viilut hajoavat käsittelyssä herkästi. Hajonneet viilut heitetään tuotantolinjoilta pois, jolloin syntyy raaka-ainehävikkiä. Kuivausprosessilla ja sen toimivuudella on siis suuri vaikutus viilun laatuun ja sitä kautta vanerintuotantokapasiteettiin.

Tällä hetkellä kuivausprosessissa käytettävä lisävesi on kylmää, puhdistettua järvivettä. Kuivaajan sisäinen lämpötila on noin 175°C, joten kylmä vesi höyrystyy kuivauskoneen sisällä. Tämä kuluttaa paljon lämpöenergiaa. Vanerin valmistusprosesseista kuivaus kuluttaa selvästi eniten energiaa tehtaalla, joten kuivaajan energiataseisiin on syytä keskittyä tarkemmin ja selvittää lisäveden merkitystä prosessissa. Kuivauksen osuus tehtaalla käytetystä lämpöenergiasta on jopa 60–70 prosenttia. (Koponen 2002, 55). Teollisuusprosessien energiatehokkuuteen on viime vuosikymmenenä kiinnitetty erityistä huomiota, sillä energiatehokkuuden parantaminen on osa Suomen ja EU:n ilmastopolitiikkaa (Energiatehokkuussopimukset 2017–2025 2021.) Havuvaneritehtaan viilunkuivaajat on otettu käyttöön vuonna 1995, joten energiatehokkuutta ei olla huomioitu prosessin suunnittelussa yhtä perusteellisesti kuin uudemmissa laitteissa ja tehtaissa. Viilun kuivaamiseen tarvittava höyry tuotetaan tehdasalueella sijaitsevassa Kumpuniemen Voima Oy:n voimalaitoksessa. Lisäveden esilämmityksellä höyryn kulutus vähenisi, mikä heijastuisi suoraan kuivaajan tuotantokapasiteettiin.

## 1.2 Toimeksiantaja

### Metsä Group

Metsä Group on suomalainen metsäteollisuuskonserni, jonka päämarkkina-alueet ovat Eurooppa ja Aasia. Metsä Group muodostuu Metsäliitto Osuuskunnasta, johon kuuluvat myös Metsä Forest ja Metsä Wood. Osuuskunnan tytäryhtiöitä ovat Metsä Tissue, Metsä Board ja Metsä Fibre. Lisäksi Metsä Groupiin kuuluu innovaatioyhtiö Metsä Spring. Metsäliitto Osuuskunnan jäsenenä toimii noin 100 000 metsänomistajaa. Metsä Groupin tehtaissa valmistetaan puutuotteita, sellua, kartonkia, sahatavaraa sekä pehmo- ja tiivispaperia. Vuonna 2021 Metsä Group työllisti noin 9500 henkilöä ja konsernin liikevaihto oli kuusi miljardia euroa. Metsä Groupilla on toimintaa kolmessakymmenessä maassa, joista kahdeksassa on tuotantoa. (Metsästä maailmalle N.d.)

### Metsä Wood

Metsä Woodin päätuotteita ovat puuviiluista valmistettavat koivu- ja havuvanerit sekä Kerto® LVL, joita käytetään rakentamisessa ja teollisuudessa. Yhtiö kuuluu johtaviin viilupuutuotteiden valmistajiin Euroopassa. Metsä Woodilla on kuusi tuotantoyksikköä, jotka sijaitsevat Punkaharjulla, Lohjalla, Pärnussa, Suolahdella ja Äänekoskella. Vuonna 2021 Metsä Woodin liikevaihto oli 0,6 miljardia euroa ja yhtiö työllisti noin 1700 henkilöä. (Metsä Wood lyhyesti N.d.)

### Suolahden vaneritehtaat

Suolahden tehtailla valmistetaan sekä koivu- että havuvaneria. Vaneritehtailla on yhteensä henkilöstöä noin 460 ja tehtaat on perustettu vuonna 1920. Tehtailla valmistetaan vuodessa 55 000 m<sup>3</sup> koivuvaneria ja 150 000 m<sup>3</sup> havuvaneria. Tehdasalueella toimii myös Kumpuniemen Voima Oy:n voimalaitos, joka hyödyntää vaneritehtaiden tuotannossa syntyvää puuhaketta kaukolämmön tuotannossa ja tuottaa viilun kuivaamiseen tarvittavaa höyryä. Puuhaketta ja kuorta käytetään myös sellun ja bioenergian tuotantoon. (Metsä Wood Suolahti N.d.)

## 1.3 Energiatehokkuus

### 1.3.1 Energiatehokkuus Suomessa

EU:n energia- ja ilmastopolitiikan tavoitteena on vähentää hiilidioksidipäästöjä ja energiankulu- tusta. Energiankäytön tehostamisella on suuri vaikutus ilmastomuutoksen hillitsemisessä, joten eri toimialat ovat sitoutuneet vapaaehtoiisiin energiatehokkuussopimuksiin ja energiakatselmuk- siin. Energiatehokkuutta parantamalla saadaan myös kustannussäästöjä. Suomessa energiatehok- kuuteen liittyviä asioita ohjaa Energiavirasto, joka kuuluu työ- ja elinkeinoministeriön hallinnon- alaan. (Energiatehokkuus N.d.). Energiatehokkuussopimukseen liittyneellä yrityksellä on mahdollisuus hakea valtiolta tukea sellaisiin investointeihin, joiden tarkoituksena on edistää ener- giansäästöä, energian käytön tehostamista tai uusiutuvan energian käyttöä (Investointituet N.d.).

### 1.3.2 Energiatehokkuus metsäteollisuudessa

Metsäteollisuus ry on liittynyt energiavaltaisen teollisuuden toimenpideohjelmaan, jonka tavoit- teena on valvoa ja tehostaa energian käyttöä tuotantoyksiköissä. Toimenpideohjelman energian- säästötavoite vuoden 2025 loppuun mennessä on 7,5 prosenttia metsäteollisuuden energiankäy- töstä. Metsä Wood kuuluu Metsäteollisuus ry:n, joten sovitut energiansäästötavoitteet koskevat myös Suolahden vaneritehtaita. Energiavaltaisen teollisuuden toimenpideohjelma velvoittaa yri- tyksiä sitoutumaan energiatehokkuuden parantamiseen ottamalla käyttöön Energiatehokkuusjär- jestelmän ETJ tai vaihtoehtoisesti energianhallintajärjestelmän ETJ+ tai ISO50001. Yritysten tulee raportoida vuosittain energiankäyttöään ja sitä koskevia tehostamistoimia. Metsäteollisuusyrityk- set pyrkivät lisäksi laatimaan kehitysehdotuksia, jotka parantaisivat laitteiden tai järjestelmien energiatehokkuutta. (Energiavaltaisen teollisuuden toimenpideohjelma 2016). Merkittävimpiä energiatehokkuustoimia metsäteollisuudessa ovat tuotantoprosessien ja energiantuotannon te- hostaminen sekä höyryn käytön tehostaminen esimerkiksi lämmön talteenotolla ja sekundääri- höyryä hyödyntämällä. Yksittäisten tuotantoprosessien energiatehokkuutta voidaan kehittää esi- merkiksi automaatiojärjestelmien avulla tai tehostamalla lämmönsiirtoa. Metsäteollisuuden osuus koko elinkeinoelämän energiansäästöistä on yli puolet, joten useita energiatehokkuustoimia on tehty eri tuotantoyksiköissä. Metsäteollisuuden tuotantoprosessit kuluttavat paljon energiaa, minkä vuoksi energiatehokkuus on tehtaille tärkeä kilpailuetu. Energiatehokkaat investoinnit ovat yleensä pitkäikäisiä ja niillä saadaan aikaan merkittäviä säästöjä. (Viisi faktaa metsäteollisuuden energiatehokkuudesta 2021).

## 2 Tutkimusasetelma

### 2.1 Tavoite, tutkimuskysymykset ja aiheen rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kylmän lisäveden höyrystämiseen tarvittava energiamäärä 2-kuivaajalla ja verrata tuloksia lämmönvaihtimella esilämmitettyyn lisäveeseen. Tulosten perusteella laadittiin kustannuslaskelmat, joista selviää esilämmitysjärjestelmän tuomat säästöt kuivausprosessiin. Esilämmitysjärjestelmästä tehtiin lisäksi alustava PI-kaavio ja suunnitelma laitteiston sijainnille. Opinnäytetyölle asetettiin tavoitteiden saavuttamiseksi seuraavat tutkimuskysymykset:

- Kuinka suuri on lisäveden tarve viilun eri kosteusluokilla?
- Kuinka paljon energiaa tarvitaan höyrystämään kuivaajan lisävesi viilun eri kosteusluokilla?
- Miten lisäveden esilämmitys vaikuttaisi kuivaajan energiankulutukseen?
- Kuinka paljon kustannuksia saadaan alennettua lisäveden esilämmitysjärjestelmällä?

Opinnäytetyössä keskityttiin vain kuivauskoneen 2 toimintaan, joten tehtaan muut kuivauskoneet rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Kuivauskoneella 2 kuivataan keskikostea ja kuivaa viilua, jolloin lisäveden tarve on suurempi kuin esimerkiksi kuivauskoneella 1, jossa kuivataan kosteuspitoisempaa viilua. Tämän vuoksi tutkittavaksi kohteeksi valittiin kuivauskone 2. Opinnäytetyössä käsiteltiin ainoastaan lisäveden merkitystä kuivausprosessin energiatehokkuuden kannalta, eli muita energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ei työssä huomioitu. Aiheen rajauksella pyrittiin saamaan opinnäytetyön tavoitteiden kannalta mahdollisimman hyödyllistä tietoa. Vaneritehtaan viilunkuivaajille on ennenkin tehty opinnäytetöitä, mutta niissä ei olla käsitelty lisäveden käyttöä. Keväällä 2022 havuvaneritehtaan 2-kuivaajalle valmistui toinenkin opinnäytetyö, jossa selvitettiin korvausilman esilämmituksen vaikutusta kuivaajan energiatehokkuuteen.

### 2.2 Tutkimustyyppi, -menetelmät, aineisto ja tietoperusta

#### Tutkimuksellinen kehitystyö

Opinnäytetyö oli tutkimuksellinen kehitystyö, jonka tavoitteena oli tehostaa tutkittavan kohteen eli viilunkuivausprosessin toimintaa. Tutkimukselliselle kehitystyölle tyypillisiä piirteitä ovat työelämän kehittämiseen perustuva konkreettinen tavoite, kerätyn aineiston analysointi ja erilaisten tut-

kimusmenetelmien soveltaminen. Kehittämistoiminnalla pyritään ratkaisemaan nykytilanteen ongelmia toimintatapoja parantamalla. (Toikko & Rantanen 2009, 14–17). Opinnäytetyön tuloksista olisi merkittävää hyötyä paitsi toimeksiantajalle, myös muille viilupuutuoteteollisuuden tuotantoyksiköille. Viilunkuivaajien rakenteessa ja toimintaperiaatteessa ei ole merkittäviä eroja, sillä Suomessa käytettävillä viilunkuivaajilla on yhteinen valmistaja Raute Oyj. Opinnäytetyön tuloksia voidaan siis soveltaa myös muihin viilunkuivaajiin, eli opinnäytetyön aiheen tutkiminen hyödyttäisi toimialaa laajemminkin.

### **Kvantitatiivinen tutkimus**

Opinnäytetyön aineistona käytettävät lisävesimittaukset ovat kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusta, sillä kerättävä havaintoaineisto koostuu numeerisista arvoista. Kvantitatiiviselle tutkimukselle on tyypillistä aineistonkeruun suunnitelmat ja aineiston tilastollinen analysointi. Kvantitatiivista tutkimusta sovelletaan eniten sosiaali- ja yhteiskuntatieteissä sekä luonnontieteissä. (Hirsijärvi, Remes & Sajavaara 2007, 135–136). Opinnäytetyössä käytetyn aineiston keräämiseksi laadittiin mittaussuunnitelma, mikä on kvantitatiivisessa tutkimuksessa keskeistä. Lisävesimittauksen tulokset ja niiden pohjalta lasketut lämpötehojen arvot esitettiin taulukkomuodossa. Mittausaineistoa käsiteltiin Microsoft Excel- taulukkolaskentaohjelmalla.

### **Haastattelu**

Tiedonhankinnan menetelmänä haastattelu on joustava ja helposti sovellettavissa eri tarkoituksiin, minkä vuoksi se on suosittu tapa kerätä tietoa. Haastattelun avulla voidaan syventyä tutkittavaan aiheeseen perusteellisesti ja selventää jo saatuja tuloksia. Tutkimushaastattelut voidaan jakaa kolmeen ryhmään: strukturoituun haastatteluun eli lomakehaastatteluun, teemahaastatteluun ja avoimeen haastatteluun. Näistä vaihtoehtoista menetelmäksi valittiin teemahaastattelu, jossa kysymysten järjestys ja tarkka sanamuoto voi vaihdella. Teemahaastattelun aihepiirit eli teema-alueet ovat kuitenkin tiedossa. (Hirsijärvi & Hurme 2001, 11; Hirsijärvi ym. 2007, 203). Opinnäytetyön yhdeksi aineistonkeruun menetelmäksi valittiin haastattelu, sillä tarkoituksena on kerätä kuivauslinjan operaattoreilta tietoa ja mielipiteitä esilämmitysjärjestelmästä ja lisävedestä. Opinnäytetyön tekijä ei ole itse työskennellyt kuivaajalla, joten operaattorihaastatteluista pyrittiin saamaan uutta tietoa kuivaajan toiminnasta ja lisävedestä. Haastateltavien operaattoreiden määrä oli pieni ja

haastattelun aihe suppea, joten aineistoa ei voi yleistää tilastollisesti (Hirsijärvi & Hurme 2001, 58). Lisä- eli kostutusveden merkitystä viilunkuivausprosessissa ei olla tutkittu aiemmin, joten tietoa aiheesta ei ollut valmiiksi saatavilla. Haastattelu oli siis tiedonkeruumenetelmänä tarkoitukseen hyvin soveltuva.

## **Tietoperusta**

Opinnäytetyön teoreettisena viitekehyksenä käytettiin puulevyteollisuudesta ja puun teknisistä ominaisuuksista kertovia oppikirjoja. Lisäksi tietoperustana käytettiin Metsä Groupin, Metsä Woodin ja Energiaviraston verkkosivuja sekä vaneritehtaille aiemmin tehtyjä viilunkuivausprosessiin liittyviä opinnäytetöitä. Tietoa kostutusveden käytöstä viilunkuivausprosessissa kerättiin operaattoreiden lisäksi myös havuvaneritehtaan tuotantoinsinööritä.

## **2.3 Eettisyys ja luotettavuus**

Opinnäytetyön jokaisessa vaiheessa noudatettiin tutkimuksen eettisiä periaatteita ja hyvää tieteellistä käytäntöä. Tietoperustan lähdeviitteet ja -luettelo laadittiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun ohjeistusten mukaisesti. Opinnäytetyössä käytetyt kirjallisuuslähteet olivat kokeneiden asiantuntijoiden kirjoittamia ja niitä on yleisesti hyödynnetty erilaisten tutkimusten ja opinnäytetöiden lähteinä. Opinnäytetyön aineistona käytettiin teemahaastatteluja, jotka toteutettiin siten, ettei yksittäistä työntekijää voi tunnistaa vastausten perusteella.

Työn luotettavuuteen vaikutti eniten lisävesimittausten toteutus, joten mittausohjeet täytyi laatia huolellisesti. Mittaukset teetettiin ulkopuolisella työntekijällä, joka suoritti mittaukset laadittujen ohjeiden mukaisesti. Opinnäytetyössä tehdyn tutkimuksen kaikkia vaiheita arvioitiin kriittisesti, esimerkiksi kuivaajan lisävesimittausten olosuhteista ja mittaustuloksiin vaikuttavista tekijöistä laadittiin tarkka selostus.

## 2.4 Käytetyt ohjelmistot

### PI-kaavio

PI-kaavio eli putki- ja instrumentointikaavio antaa perustietoa prosessista ja siihen kuuluvista laitteistoista. PI-kaaviossa on esitetty prosessin laitteiden, putkien, instrumenttien ja muiden komponenttien sijainti sekä putkistoissa virtaavat aineet ja niiden virtaussuunnat. Prosessille laadittu PI-kaavio toimii pohjana laitteistojen jatkosuunnittelulle, kuten putki-, sähkö-, instrumentointi- ja asennustöille. PI-kaavioissa käytetään standardoituja piirrossymboleja ja -merkkejä. PI-kaavio auttaa käyttöhenkilöstöä ja kunnossapitoasentajia perehtymään prosessiin ja toimii tärkeänä dokumenttina esimerkiksi viranomaistarkastuksissa, investointien kustannusarvioissa ja työturvallisuusmääräysten laadinnassa. (PSK 3603 2012).

### AutoCAD-suunnitteluohjelma

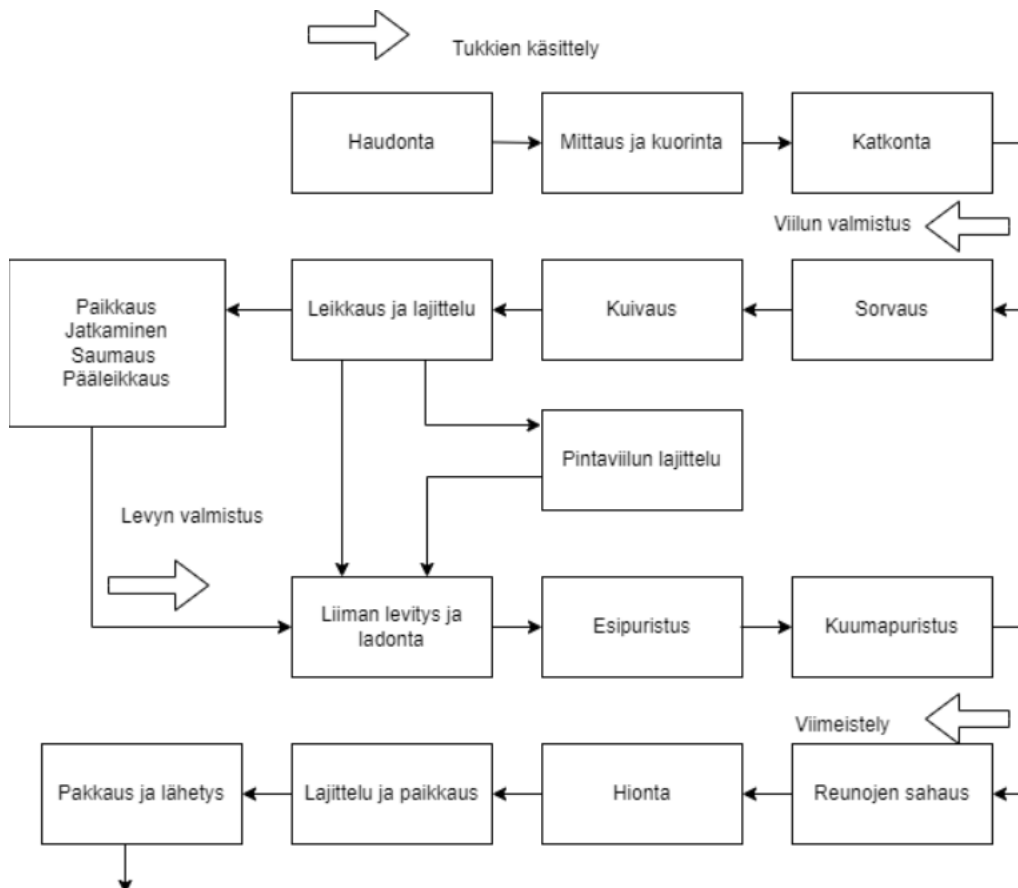
Lisäveden esilämmitysjärjestelmän PI-kaavion piirtämiseen käytettiin Autodeskin AutoCAD Plant 3D-suunnitteluohjelmaa. AutoCAD on tietokoneavusteinen yleissuunnitteluohjelmisto, joka julkaistiin vuonna 1982 Yhdysvalloissa. AutoCAD-ohjelmaa käytetään 2D- ja 3D-piirustusten suunnitteluun insinööri- ja arkkitehtitoimistoissa. Autodesk on kehittänyt AutoCAD:ille toimialakohtaisia lisäosia esimerkiksi mekaniikka- ja sähkösuunnitteluun. (AutoCAD N.d.)

AutoCAD Plant 3D on AutoCAD:ille tehty lisäosa, joka on tarkoitettu laitossuunnitteluun. AutoCAD Plant 3D-ohjelmalla voidaan laatia PI-kaavioita ja kolmiulotteisia putkistojärjestelmiä. Suunnitteluohjelma sopii projektitöihin, sillä tiimit voivat työskennellä samanaikaisesti yhteisessä pilvipalvelussa. Plant 3D-työkalussa on saatavilla standardien mukaiset vakiosymbolit. (Plant-työkalujen ominaisuudet N.d.)

## 3 Viilupuutuotteiden valmistusprosessi

Viilupuutuotteilla tarkoitetaan koivu- ja havuvaneria sekä kertopuuta eli LVL-tuotteita. Vaneria käytetään puu- ja betonirakentamisessa, kuljetusvälineiteollisuudessa, lattiamateriaalina ja huonekaluissa (Akkanen, Jännes, Kekki, Kiiski, Kortelainen, Lind-Kohvakka, Liski, Mäkinen, Pajujoja, Rainio,

Räsänen, Silventoinen, Tarvainen, Tornainen & Tynkkynen 2007, 149–159). Kertopuun pääasiallisena käyttökohteena ovat erilaiset rakenteet, kuten palkit, pilarit ja ristikot (Kerto LVL N.d.) Koivu- ja havuvanerin sekä kertopuun tuotantoprosessit eivät juurikaan poikkea toisistaan. Kuviossa 1 on esitetty vanerin valmistusprosessin tärkeimmät työvaiheet.



Kuvio 1. Vanerin valmistuksen tärkeimmät työvaiheet. (Koponen 2002, 28, muokattu)

### Tukinkäsittely ja sorvaus

Viilupuutuotteiden tuotantoprosessin ensimmäinen vaihe on tukkien vastaanotto ja lajittelu. Tukki-kuormat kuljetetaan tehtaalle autoilla, joista ne puretaan tukkilajittelulinjalle. Tukkien vastaan-

otossa seurataan tukkien kappalemääriä, laatua, tilavuutta ja keskikokoa mittarien avulla. Lajittelinjalla tukit lokeroidaan, minkä jälkeen ne varastoidaan tukkikentälle. (Akkanen ym. 2007, 49). Tukkikentän tarkoituksena on toimia tehtaan välivarastona, jotta tukin saanti olisi turvattu häiriötilanteissa eikä tuotantoa tarvitsisi keskeyttää. Tukkiin toimitus tehtaallesi voi viivästyä esimerkiksi kelirikon vuoksi. (Koponen 2002, 29). Lajitellut tukit niputetaan ja ne siirretään hautomoaltaaseen. Haudonnassa tukkeja lämmitetään 40–55°C-asteisessa vedessä, jolloin puuaines pehmenee ja sen kosteus, elastisuus ja lujuus kasvaa. Haudonta-aika on tyyppillisesti noin yksi vuorokausi, jonka jälkeen tukit kuoritaan. Kuorinnassa tukit kuoritaan jälsikerrokseen asti, jolloin puun pinnalla olevat epäpuhtaudet, kuten hiekka ja kivet, poistuvat. Kuoritut tukit katkotaan haluttuun pölliäpituuteen ja kuljetetaan sorvauslinjalle. (Akkanen ym. 2007, 50–54).

Sorvauksen alussa puupölliä keskitetään sorvin karoihin automaattisesti, mikä parantaa viilun saantoa ja raaka-ainekäyttöä. Sorviliinjalla pölliä pyöritetään karoissa terää vasten samalla kun tukilaite pitää pölliä paikallaan. Viilumatto sorvataan leikkaavan terän ja vastaterän läpi spiraalimaisesti. Sorvauksen jälkeen viilumatto katkaistaan viiluarkeiksi konenäön mitatessa kosteutta ja laatua. Sorvatut viilut jaetaan ennen kuivausprosessia nippuihin kosteusluokan mukaan. Kosteusluokat ovat märkä, keskikosteaa ja kuiva viilu. (Akkanen ym. 2007, 55–59). Sorvausprosessissa valmistettavan viiluarkin tulee täyttää sille asetetut standardien mukaiset vaatimukset, joita ovat esimerkiksi haluttu paksuus, leveys ja lujuus sekä pinnan sileys. Viilun tulee olla riittävän lujaa, jotta se kestäisi käsittelyn seuraavissa tuotantoprosessin vaiheissa. (Koponen 2002, 37).

### **Kuivaus, lajittelu ja saumaus**

Sorvattujen viiluarkkien kosteus on liian korkea liimaukseen, minkä vuoksi ne kuivataan viilunkuivauskoneilla noin 7–8 prosentin tavoitekosteuteen lämmön avulla. Liian kostea viilu vaikeuttaa liimausta ja kuumapuristusta, koska tällöin liima ei tartu viiluun kunnolla eikä kovetu puristuksessa. Kuumapuristimessa viiluarkkien kosteus haihtuu höyryksi, mikä aiheuttaa puulevyyn onttoja rakenteita. Toisaalta ylikuivunut viilu on laadullisesti heikkoa eikä sen vuoksi kestä jatkokäsittelyä kunnolla. Viilun tasainen tavoitekosteus on siis edellytys seuraavien tuotantoprosessien sujuvuudelle sekä hyvälle lopputuotteen laadulle. Viilunkuivauskoneessa viiluarkit kuivataan noin 175°C-asteen lämpötilassa viilun kosteusluokasta riippuen 3–15 minuutin ajan. Kuivausprosessin jälkeen

viiluarkit lajitellaan laadun ja kosteuden perusteella pinksioihin. Lajittelussa hyödynnetään kokenäköjärjestelmää, joka analysoi viulun pintavikoja. (Akkanen ym. 2017, 63–67.)

Leikattavat eli ladontaan sellaisenaan kelpaamattomat viilut viedään saumauslinjalle, missä huonolaatuiset kohdat leikataan virheleikkurilla pois ja ehjistä viilunkappaleista kootaan liimalankojen avulla väliviiluja. Saumauksen jälkeen katkaisusaha leikkaa arkit leveysmittaan. Saumausprosessin tarkoituksena on hyödyntää viiluaines mahdollisimman tarkasti. Valmiit väliviilut tuodaan ladontalinjalle. (Koponen 2002, 60–61).

### **Ladonta ja kuumapuristus**

Varsinainen puuviilulevyn valmistus tapahtuu ladontalinjalla. Ladontalinjalla viilut kulkeutuvat valmistettavan reseptin mukaisessa järjestyksessä liimoittimen läpi fenoliformaldehydihartsiliiman levittyessä tasaisesti viilun päälle. Viilut ladotaan päällekkäin nipuksi siten, että niiden syysuunnat ovat ristikkäin toisiinsa nähden. Näin puulevyn rakenteesta tulee luja ja kestävä. Valmis ladelma siirtyy kuljettimella esipuristimeen, jossa se puristetaan levyiksi. Esipuristus tasoittaa viilujen kosteuseroa ja helpottaa kuumapuristusta, sillä puulevyjä voidaan syöttää puristinhissiin erikseen. Kuumapuristimessa liima kovettuu korkeassa paineessa ja lämpötilassa, jolloin puutuote saavuttaa toivotut lujuusominaisuudet. Havuvanerin puristusaine on yleisesti 1,0–1,5 bar ja puristuslämpötila 150 °C. (Akkanen ym. 2017, 80–88.) Vanerilevyn rakennetta on havainnollistettu kuviossa 2.



Kuvio 2. Vanerin rakenne (Puuproffa. N.d.)

## Sahaus, hionta, pinnoitus ja pakkaus

Kuumapuristimelta tulevista levyistä sahataan ladonnassa vaadittu työvara pois. Levy voidaan sahata vakio-, määrä- tai karsintamittaan. Levyaihiot syötetään sahauslinjan kuljettimille yksitellen. Tyypillinen sahausvara on noin 40–100 millimetriä. Seuraavaksi sahattujen levyjen paksuus kalibroidaan ja pinta hiotaan sileäksi. Hiomakonelinjoilla käytetään leveänauhahiomakoneita, joissa on kolme tai neljä hiontayksikköä. Levyt hiotaan sekä ylä- että alapuolelta tasaiseksi laatuvaatimusten mukaisesti. Osa tuotteista pintakäsitellään asiakkaan tilaamalla tavalla esimerkiksi home-, kosteus- tai palosuoja-aineella. Lopuksi valmiit levyt pakataan muovikääreisiin paaliksi, johon kiinnitetään levyjen CE-merkinnällä varustettu tarra. CE-merkinnästä käy ilmi tuotteen paksuus, valmistaja, sertifioijan tunnus, tuotteen standardi ja käyttöluokka sekä liiman formaldehydiluokka. Valmiit levyt kuljetetaan eteenpäin asiakkaalle. (Akkanen ym. 2017, 90–99).

## 4 Energiatehokkuus viilupuutuotteiden valmistusprosessissa

Vaneri- ja LVL-tuotteiden valmistuksessa käytetään lämpö- ja sähköenergiaa. Lämpöenergian käyttökohteita ovat tukkien haudonta, viilun kuivaus, kuuma- ja pinnoituspuristimet, ilmanvaihto ja rakennusten lämmitys. Lämmön ominaiskulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat puun käyttösuhte, sekundäärienergian hyödyntäminen prosesseissa, viilun loppukosteus kuivauksen jälkeen, kuivauskoneiden tyyppi ja ikä sekä ilmanvaihdon ratkaisut. Eniten sähköenergiaa kuluu tukinkäsittelyssä, sorvauksessa, kuivauskoneilla, kuumapuristimilla ja hiomakoneilla. Kuivausprosessissa syntyvistä poistokaasuista otetaan pesureilla talteen lämpöä, jota käytetään tukkien haudonta-altaiden lämmitykseen. Sekundäärienergian käyttö onkin merkittävä keino tehtaan energiatehokkuuden parantamiseksi. Muita tehokkaita energiatehokkuustoimia ovat höyryverkon ulospuhallushäviöiden minimointi ja viilun loppukosteuden nostaminen.

Sähkön käytön tehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi laskemalla paineilmaverkon painetasoa, minimoimalla pneumaattiset materiaalsiirrot, säätämällä pyörimisnopeuksia taajuusmuuttajalla ja välttämällä tyhjäkäyntiä hiomakoneiden purunpoistossa. (Akkanen ym. 2007, 108–110). Viilupuutuotteiden valmistusprosesseista kuivaus ja kuumapuristus käyttävät tuorehöyryä tai kuumaa vettä, jolloin putkistojen eristysten kunnolla on suuri vaikutus prosessien energiatehokkuuteen. Huonosti eristetyistä putkista aiheutuu lämpöhäviöitä, mikä nostaa prosessin lisälämmön tarvetta.

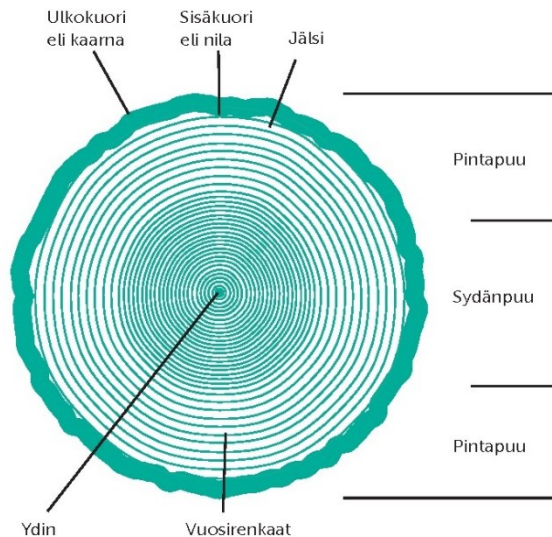
Merkittävin viilupuutuoteteollisuuden sivutuotteiden käyttökohde on sellun valmistus, joten siihen kelpaava puhdas puujäte pyritään hakettamaan ja kuljettamaan edelleen sellutehtaille. Muut sivutuotteet, kuten kuori, pöllinpäät, sahajauho, hiontapöly, sahauksen reunajätteet sekä saumauksessa ja kuivauksessa syntyvä viilujäte käytetään tehtaiden yhteydessä sijaitsevalla voimalaitoksella polttoaineena. (Koponen 2002, 83.) Sivutuotteiden tehokas hyödyntäminen parantaa tehtaiden energiatehokkuutta, kun raaka-aineita ei heitetä hukkaan.

Voimalaitos tuottaa tehtaiden käyttöön prosessihöyryä, lämpöä ja sähköä. Ylimääräinen lämpö myydään kaukolämpöverkkoon kaupungin tai kunnan käyttöön. Energian paikallinen tuotanto on kannattavaa, sillä tehtaiden sivutuotteet pystytään hyödyntämään prosesseissa käytettävänä energiana eikä ulkoistetuille vaihtoehdoille ole näin ollen tarvetta. Tehdasintegraatin etuna on myös kiinteät laitoksen käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Yksi integraatiomahdollisuuksia rajoittava tekijä on höyryn siirtomatka, sillä höyryn siirtolinjojen pituus on tyypillisesti vain muutamia satoja metrejä. Pidemmät siirtolinjat eivät olisi käytännöllisiä tai taloudellisesti kannattavia. (Akkanen ym. 2007, 113).

## **5 Puuaineen ominaisuudet**

### **Havupuun rakenne**

Havupuun rungon kerroksia ovat kaarna, nila, jälsi ja ydin. Ulkokuori eli kaarna koostuu useammasta kerroksesta. Nilakerroksen ja puuosan välissä sijaitseva jakautumiskykyinen jälsisolukko muodostaa puun ydintä kohti sekundaarista puuta ja ulospäin sekundaarista nilaa. Nilan siiviläsolukon tehtävä on kuljettaa ravintoaineita ja yhteyttämistuotteita puun sisäkuoressa. Puun ydin on tärkkelyksestä koostuvaa parenkyymisolukkoa, joka varastoi ravintoa. (Kärkkäinen 2007, 89–92). Metsäteollisuudessa hyödynnetään pääosin vain kuorittua puuainesta. Kuviossa 3 on esitetty puun rungon osat.



Kuvio 3. Puun osat. (Puuinfo N.d.)

### Puuaineen kosteus

Puu on hygroskooppista eli vettä imevää ainetta, joka pystyy sitomaan itseensä ilman vesihöyryä. Puun sisällä oleva vesi voi liikkua molekylaarisena diffuusiona soluseinämän kautta tai soluonteloiden kautta kapillaarisesti tai höyrynä. Nestemäinen, vapaa vesi sijaitsee puun soluonteloissa ja sidottu vesi puun soluseinämissä. Vesihöyryä esiintyy sekä puun soluseinämissä että onteloissa. (Kärkkäinen 2007, 177.) Havupuun eri kerrosten välinen kosteusero on merkittävä. Sydänpuun kosteus alenee voimakkaasti verrattuna pintapuuhun. Ilmiötä ei esiinny koivujen tai muiden lehtipuiden rungoissa. Männyllä tyypillinen pintapuun kosteussuhde on 120–150 % ja sydänpuun 32–37 %. (Kärkkäinen 2007, 132). Kosteussuhteella tarkoitetaan puun sisältämän veden painon suhdetta puun absoluuttiseen kuivapainoon. Puun kosteus on riippuvainen ilman suhteellisesta kosteudesta. (Kärkkäinen 2007, 195).

### Puun kuivuminen

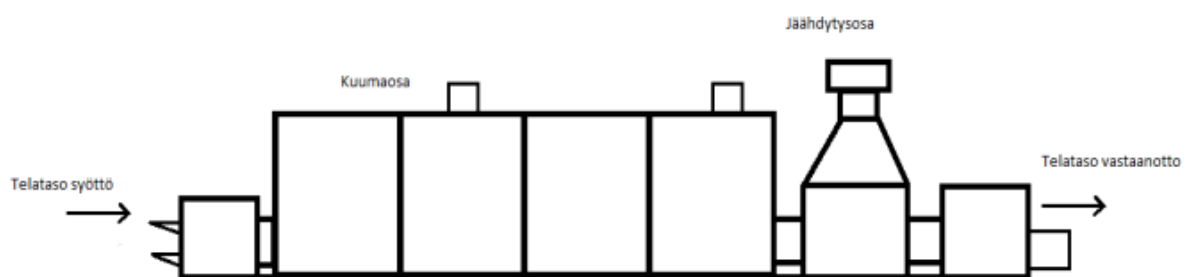
Puun kuivussa soluonteloissa oleva vapaa vesi haihtuu ensimmäisenä. Puun syiden kyllästymispisteellä tarkoitetaan tilannetta, jossa soluseinämissä esiintyy vielä vettä, mutta soluonteloiden vesi on haihtunut. Puu alkaa kutistua, kun puun kosteus laskee alle kyllästymispisteen. Vastaavasti kuivan puun kostuessa sen laajeneminen pysähtyy kyllästymispisteeseen. Puu on ominaisuuksiltaan

anisotrooppista eli sen kutistuminen tai laajeneminen tapahtuu eri tavoin pituussuunnassa ja tangentin sekä säteen suunnassa. Kuivuksessaan puu kutistuu pituussuunnassa vain 0,2–0,4 prosenttia, tangentin suunnassa noin kahdeksan prosenttia ja säteen suunnassa neljä prosenttia. Esimerkiksi havupuusta sorvattu viilu kutistuu kuivausprosessissa eniten paksuus- ja leveyssuunnassa. Pituus- eli syysuuntainen kutistuminen on vähäistä, joten sitä ei tarvitse ottaa tuotantoprosesseissa huomioon. Puu saavuttaa kutistuessaan paremmat jäykkyys- ja lujuusominaisuudet. (Akkanen ym. 2007, 64; Kärkkäinen 2007, 195). Kuivausprosessin ensimmäisessä vaiheessa viilu lämmitetään, minkä jälkeen soluonteloissa oleva vapaa vesi haihtuu. Puu on tällöin saavuttanut puun syiden kylästympisteen, mikä käynnistää soluseinämissä sijaitsevan sidotun veden haihtumisen. Soluseinämien vesi haihtuu hitaammin kuin vapaa vesi, koska soluseinämien vesi on sitoutunut puuhun tiukemmin. (Akkanen ym. 2007, 65).

## 6 Viilunkuivausprosessi

### 6.1 Viilunkuivaajan rakenne ja toimintaperiaate

Suolahden havuvaneritehtaan 2-kuivaaja on Raute Oyj:n valmistama telakuivaaja, jota käytetään kuivan ja keskikostean viilun kuivaamiseen. Telakuivaajaan syötettävät viiluarkit on leikattu ja lajiteltu sorvauksen jälkeen. Kuivaaja koostuu syöttöpäästä, kuumaosasta ja jäähdytysosasta. Kuviossa 4 on esitetty telakuivaajan rakenne sivustapäin katsottuna.

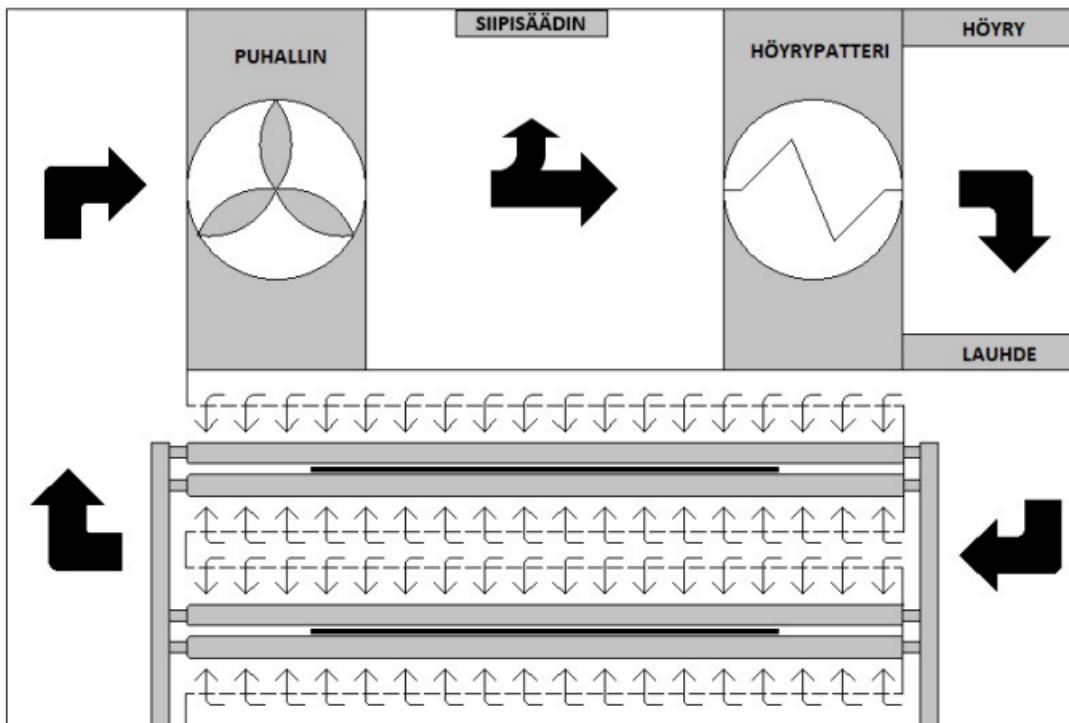


Kuvio 4. Viilunkuivaajan rakenne sivusta (Kauttonen 2014, 16, muokattu)

Viilunkuivausprosessissa käytetään lämmönsiirron väliaineena kylläistä höyryä. Kumpuniemen Voima Oy:n voimalaitoksella tuotetaan tulistettua höyryä, joka tuodaan havutehtaan höyrynjakotukille. Tulistettu höyry muunnetaan höyrykeittiössä kylläiseksi höyryksi, jonka lämpötila on 175°C

astetta ja paine kahdeksan baaria. Höyry tuodaan kuivaajan sisällä sijaitsevalle jakotukille, josta höyry jaetaan kennoihin. Kuivaajan kuumaosan kennot koostuvat ylä- ja alaosamoduulista. Yläosamoduuliin kuuluvat telaparit, suutinlaatikot ja huolto-ovet. Kennon alaosamoduulissa sijaitsevat puhallin ja ripaputkipatterit. (Vepsäläinen 2016, 9–10).

Kuivauskone poistaa viiluarkkien sisältämää vettä höyryn ja radiaalipuhaltimien kierrättämän kuuman ilman avulla. Kuivaajan kuumaosassa sijaitsevat ripaputkista valmistetut höyrypatterit lämmittävät kiertoilmaa. Lämmintä ilmaa puhalletaan kuivaajan suutinlaatikoista tasaisesti viilun ylä- ja alapuolelle kohtisuoraan. Ilma palaa takaisin radiaalipuhaltimelle telaparien ja suutinlaatikoiden välistä. Kuivauksessa syntyvä lauhde johdetaan kennojen lauhteenpoistimiin ja edelleen lauhdetukille. (Vepsäläinen 2016, 10). Ylimääräinen kostea ilma poistetaan kuivaajan katossa olevien siipisäädin kautta. Kuivaajan korvausilma otetaan tehdashallista. Telakuivaajan toimintaperiaate on esitetty kuviossa 5.



Kuvio 5. Telakuivaajan toimintaperiaate (Kurtti 2018, 11)

Kuumaosan jälkeen viilut jäädytetään ulkoilman avulla. Jäädytysosassa ilmaa kierrätetään aksiaalipuhaltimilla viilun molemmille pinnoille suutinlaatikoiden läpi. (Vepsäläinen 2016, 11). Viilut lajitellaan kuivauksen jälkeen seuraaviin laatuluokkiin parhaimmasta huonoimpaan: 2-laatu, 3-laatu, 3K-laatu, V4-laatu, leikattavat ja uudelleen kuivattavat. Kolmea ensimmäistä laatuluokkaa käytetään ladonnassa vanerilevyn ylä- ja alapintoina. V4-laadun viiluissa on jonkin verran pintavikoja, minkä vuoksi niitä käytetään väliviiluinä. Leikattavat viilut kuljetetaan saumauslinjalle, jossa niistä valmistetaan lyhyitä väliviiluja ladontaan. Uudelleen kuivattava viilu ei ole saavuttanut vielä tavoitekosteutta, joten ne kuivataan uudestaan muutaman päivän jälkeen.

Kuivatulle viilulle on asetettu laatuvaatimuksia, joiden saavuttamiseksi kuivausprosessi tulee säätää jokaiselle viilun kosteusluokalle ja paksuudelle sopivaksi (Koponen 2002, 57). Kosteuserojen vuoksi puun eri osista sorvatut viilut kuivataan viilunkuivauskoneessa erikseen. Märkää viilua kuivataan yleensä noin 15 minuuttia, keskikosteaa 8 minuuttia ja kuivaa 3–4 minuuttia.

## **6.2 Kuivaajan sisäilman suhteellinen kosteus ja lisävesi**

Viilunkuivausprosessissa viilun sisältämä vesi haihtuu kuivaajan sisälle. Kuivaajan sisäilman suhteellisen kosteuden tulee olla prosessissa riittävällä tasolla, jottei viilun laatu kärsi. Viilun tasaiseen kosteuteen ja tekniseen laatuun pystytään vaikuttamaan sisäilman kosteutta säätämällä. Kuivausprosessissa laadun kannalta kriittisin vaihe on heti kuivauksen alussa, sillä veden liian nopea haihtuminen muodostaa viiluarkkeihin jännitteitä. Jännitteet aiheuttavat viiluun halkeamia, minkä vuoksi viilun laatu heikkenee. Huonolaatuisesta viilusta aiheutuu tuotannonkeskeytyksiä, kun rikkoutuneita viiluja heitetään tuotantolinjoilta pois. Korkea kuivaajan sisäilman suhteellinen kosteus ehkäisee myös tulipalon riskiä.

Kuivaajan sisäilman suhteellista kosteutta pidetään yllä lisäveden eli kostutusveden avulla. Kosteuspitoisimman viilun kuivausprosessissa viilusta haihtuu runsaasti vettä kuivaajan sisälle, mutta kuivemmilla kosteusluokilla lisäveden tarve kasvaa. Lisävetenä käytetään kiintoaineista puhdistettua järvivettä. Lisäveden virtaus kuivauskoneen sisälle tapahtuu automaattisesti. Operaattori voi kuitenkin lisätä vettä manuaalisesti, jos kuivaajan sisäinen lämpötila nousee liian korkeaksi.

## 7 Tutkimuksen toteutus

### 7.1 Lisäveden lämpötila- ja virtausmittaukset

Lisäveden eli kostutusveden virtaus- ja lämpötilamittaukset toteutettiin havuvaneritehtaan 2-kuivaajalla 11. maaliskuuta 2022. Alussa lisävesiputken pintalämpötila mitattiin IR-mittarilla, jolloin tulokseksi saatiin kahdeksan astetta. Veden massavirran mittaamiseen käytettiin ultraäänimittaria. Mittaukset toteutettiin siten, että jokaista kolmea viulun kosteusluokkaa kuivattiin noin yhden tunnin ajan. Normaalisti 2-kuivaajalla ajetaan vain kuivaa ja keskikostea viilua, mutta mittaustilanteessa kuivattiin myös märkää viilua, jotta eri kosteusluokkien lisäveden tarvetta pystyttiin vertailemaan.

Mittauksissa lisäveden virtaamasta otettiin kaksi otosta tietyllä ajanhetkellä. Otosten ajankohdat valittiin toisistaan erilleen, jotta saataisiin mittaustiedot mahdollisimman normaalista ajotilanteesta. Otokset otettiin sellaisissa tilanteissa, joissa viulun kosteusluokka ei ole juuri vaihtunut, sillä se olisi vääristänyt mittaustuloksia. 2-kuivaajalla ajettiin ensimmäisenä II-kosteusluokan viilua aikavälillä 9.04–9.59. Kuivaajaan ei syötetty ollenkaan viilua 9.00–9.20 välisenä aikana, mikä nosti lisäveden tarvetta ja vaikutti siten mittaustuloksiin. Seuraavaksi kuivattiin III-kosteusluokan märkää viilua aikavälillä 10.18–11.17 ja viimeiseksi I-kosteusluokan kuivaa viilua aikavälillä 11.41–12.40. Mittaustilanteesta laadittu pöytäkirja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Lisävesimittaukset 2-kuivaajalla 11.3.2022

Kostutusvesien mittaus 2-kuivaajalla 11.3.2022						
Viulun kosteusluokka	Mittauksen aloitus (aika)	Flow rate (l/min)	Total (l)	Mittauksen lopetus (aika)	Flow rate (l/min)	Total (l)
II (keskikostea)	9.04	44,62	543	9.59	43,53	3791
III (märkä)	10.18	37,24	34	11.17	45,05	2521
I (kuiva)	11.41	44,08	3604	12.40	44,84	6641

Mittauspöytäkirjassa flow rate (l/min) kuvaa lisäveden virtaamaa otosten ajanhetkellä. Jokaiselle viulun kosteusluokalle saadaan laskettua massavirta (l/min) käyttämällä kaavaa 1. Lämpötehon määrittämiseksi massavirta muutettiin muotoon kg/s jakamalla saatu tulos 60:lla.

$$\left(\frac{\text{lisäveden määrä mittauksen ajalta (l)}}{\text{mittausaika/60}}\right)/60 \text{ min} \quad (1)$$

### **Kuiva viilun kosteusluokka (I)**

I-kosteusluokan mittaustulosten perusteella lisäveden määräksi saatiin laskettua 3037 litraa (6641 l – 3604 l). Mittausaika oli 59 minuuttia.

$$\left(\frac{6641 \text{ l} - 3604 \text{ l}}{59/60}\right)/60 \text{ min} = 51,47 \text{ l/min} = 0,86 \text{ kg/s}$$

### **Keskikostea viilun kosteusluokka (II)**

II- kosteusluokkaa ajettaessa lisäveden määräksi laskettiin 3 248 litraa (3 791 l – 543 l). Mittausaika oli 55 minuuttia.

$$\left(\frac{3\,791 \text{ l} - 543 \text{ l}}{55/60}\right)/60 \text{ min} = 59,05 \text{ l/min} = 0,984 \text{ kg/s}$$

### **Märkä viilun kosteusluokka (III)**

III- kosteusluokalla lisäveden määräksi laskettiin 2 487 litraa (2 521 l – 34 l). Mittausaika oli 59 minuuttia.

$$\left(\frac{2\,521 \text{ l} - 34 \text{ l}}{59/60}\right)/60 \text{ min} = 42,15 \text{ l/min} = 0,703 \text{ kg/s}$$

Lisäveden massavirtoja tarkastellessa havaittiin, että lisäveden määrä II-kosteusluokan viilua ajettaessa oli suurempi kuin I- kosteusluokan viiluja kuivatessa, vaikka kuivaa viilua ajettaessa kostusvettä tarvitaan todellisuudessa eniten. Tulosten vertailtavuuteen vaikutti kahdenkymmenen minuutin tauko viilun syötössä II-kosteusluokan mittaustilanteessa, sillä viilun syötön keskeytyessä

lisävettä virtaa kuivaajan sisälle enemmän kuin ajon aikana. Lisävesimittausten aikana viilun syötössä oli neljä kestoltaan maksimissaan kymmenen minuutin taukoa, jotka jakautuivat tasaisesti eri kosteusluokkien mittaussajoille. Tuotannon lyhyet keskeytykset eivät merkittävästi vaikuttaneet lisävesimittausten vertailukelpoisuuteen, joten niihin ei kiinnitetty tulosten tarkastelussa huomiota. Viilun kuivauksessa lyhyet tauot viilun syötössä ovat tyyppillisiä, minkä vuoksi mittaustulokset edustavat normaalia ajotilannetta kuivaajalla. Eri viilun kosteusluokkien vertailun luotettavuuden vuoksi II-kosteusluokalle arvoitiin uusi, tarkempi lisäveden massavirta lineaarisesti I- ja III-kosteusluokkien väliltä käyttämällä kaavaa 2.

$$\frac{I\text{-kosteusluokan massavirta} + III\text{-kosteusluokan massavirta}}{2} \quad (2)$$

### Keskikostea viilun kosteusluokka (II)

$$\frac{(51,47 - 42,15) \text{ l/min}}{2} = 46,81 \text{ l/min} = 0,78 \text{ kg/s}$$

## 7.2 Lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho

Lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho saatiin laskettua kaavojen 3 ja 4 avulla. Kaava 4 on johdettu kaavasta 3.

$$\dot{Q} = \Delta h * \dot{m} \quad (3)$$

missä  $\Delta h$  = entalpian muutos

$\dot{m}$  = massavirta

$$\dot{Q} = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi}}) * \dot{m} \quad (4)$$

missä  $h_{\text{höyry}} = 2\,772,7 \text{ kJ/kg}$ , joka on kylläisen höyryn entalpia arvoilla  $175 \text{ °C}$  ja  $8 \text{ bar}$

$h_{\text{lisävesi}} = 33,621 \text{ kJ/kg}$ , joka on kylläisen veden entalpia lämpötilassa  $8 \text{ °C}$

$\dot{m}$  = lisäveden massavirta

Jokaiselle viulun kosteusluokalle laskettiin lämpöteho käyttämällä aiemmin laskettuja massavirtoja ja kaavassa 4 mainittuja entalpian arvoja.

### **Kuiva viulun kosteusluokka (I)**

$$\dot{Q}_1 = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi}}) * \dot{m}_1$$

$$\dot{Q}_1 = (2\,772,7 - 33,621) \text{ kJ/kg} * 0,86 \text{ kg/s} = 2,35 \text{ MW}$$

### **Keskikostea viulun kosteusluokka (II)**

$$\dot{Q}_2 = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi}}) * \dot{m}_2$$

$$\dot{Q}_2 = (2\,772,7 - 33,621) \text{ kJ/kg} * 0,78 \text{ kg/s} = 2,14 \text{ MW}$$

### **Märkä viulun kosteusluokka (III)**

$$\dot{Q}_3 = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi}}) * \dot{m}_3$$

$$\dot{Q}_3 = (2\,772,7 - 33,621) \text{ kJ/kg} * 0,703 \text{ kg/s} = 1,92 \text{ MW}$$

## **7.3 Esilämmitetyn lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho**

Esilämmitysjärjestelmällä kylmä lisävesi voitaisiin lämmittää esimerkiksi  $90 \text{ °C}$ -asteiseksi. Esilämmitetyn lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho laskettiin kaavan 5 mukaisesti. Jokaiselle viulun kosteusluokalle laskettiin lämpöteho käyttämällä jälleen kappaleessa 6.1 laskettuja kostutusveden massavirran arvoja.

$$\dot{Q} = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi, esilämmitetty}}) * \dot{m} \quad (5)$$

missä  $h_{\text{höyry}} = 2\,772,7$  kJ/kg, joka on kylläisen höyryn entalpia arvoilla 175 °C ja 8 bar

$h_{\text{lisävesi, esilämmitetty}} = 377,04$  kJ/kg, joka on kylläisen veden entalpia lämpötilassa 90 °C

$\dot{m}$  = lisäveden massavirta

### Kuiva viilun kosteusluokka (I)

$$\dot{Q}_1 = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi, esilämmitetty}}) * \dot{m}_1$$

$$\dot{Q}_1 = (2\,772,7 - 377,04) \text{ kJ/kg} * 0,86 \text{ kg/s} = 2,06 \text{ MW}$$

### Keskikostea viilun kosteusluokka (II)

$$\dot{Q}_2 = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi, esilämmitetty}}) * \dot{m}_2$$

$$\dot{Q}_2 = (2\,772,7 - 377,04) \text{ kJ/kg} * 0,78 \text{ kg/s} = 1,87 \text{ MW}$$

### Märkä viilun kosteusluokka (III)

$$\dot{Q}_3 = (h_{\text{höyry}} - h_{\text{lisävesi, esilämmitetty}}) * \dot{m}_3$$

$$\dot{Q}_3 = (2\,772,7 - 377,04) \text{ kJ/kg} * 0,703 \text{ kg/s} = 1,68 \text{ MW}$$

## 7.4 Kustannuslaskelmat

Kostutusveden höyryttämiseen tarvittavan lämpöenergian kustannukset laskettiin käyttämällä lämpöenergian hintana 40 €/MWh. Suolahden havuvaneritehtaalla on käytössä työaikamuoto TAM 36, eli tehdas on käynnissä kuutena päivänä viikossa. 2- kuivaajan vuosittaisiksi käyttötunneiksi arvioitiin 5 500 tuntia, kun huomioitiin juhlapyhien seisokit, huoltoseisokit ja sunnuntait, jolloin tehdas ajetaan alas aamuvuoron aikana. 2- kuivaajalla ajetaan kuivaa viilua noin 70 % ajasta ja

keskikostea viilua 30 % ajasta. (Kuusenmäki 2022). 2-kuivaajalla ei kuivata normaalisti märkää viilua, joten laskelmissa on huomioitu vain kuivan ja keskikostean viilun lämpötehot ja säästöpotentiaalit. Kustannuslaskelmat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Lisäveden esilämmitysjärjestelmän kustannuslaskelmat

	Kuiva viilu (I-kosteusluokka)	Keskikostea viilu (II-kosteusluokka)
arvio vuosittaisista käyttötunneista (h/a)	3 850	1 650
lisäveden höyryttämiseen tarvittava lämpöteho (MW)	2,35	2,14
energiankulutus vuodessa (MWh/a)	9 048	3 531
esilämmitetyn lisäveden höyryttämiseen tarvittava lämpöteho (MW)	2,06	1,87
lämmön säästöpotentiaali (MW)	0,29	0,27
energiasäästöpotentiaali (MWh/a)	1 117	446
lämpöenergian hinta (€/MWh)	40	
höyryn säästöpotentiaali (€/a)	44 660 €	17 820 €
höyryn säästöpotentiaali yhteensä (€/a)	62 480 €	

Toimeksiantajan arvio lisäveden esilämmitysjärjestelmän investointihinnasta oli 60 000 €. Esilämmitysjärjestelmän takaisinmaksuaika laskettiin kaavan 6 mukaisesti.

$$takaisinmaksuaika = \frac{\text{investointimeno}}{\text{vuotuiset säästöt}} \quad (6)$$

missä investointimeno= 60 000 €

vuotuiset säästöt = 62 480 €

$$\text{takaisinmaksuaika} = \frac{60\,000\ \text{€}}{62\,480\ \text{€}} = 0,96\ \text{a} \cong 11,5\ \text{kuukautta}$$

Kustannuslaskelmissa ei huomioitu lisäveden esilämmitykseen tarvittavan energian hintaa, vaan laskelmissa on esitetty voimalaitokselta ostettavan höyryn säästöpotentiaali. Näin ollen investoinnin todellinen takaisinmaksuaika on pidempi. Takaisinmaksuaika on arvioitu karkeasti, sillä investoinnin tarkka hinta ei ollut vielä tiedossa. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää suuntaa antavina ja hyvänä pohjana jatkotarkastelua varten. Laskelmista selviää, että lisäveden höyrystämiseen kuluu paljon energiaa, mistä aiheutuu vaneritehtaalle runsaasti kustannuksia.

Havuvaneritehtaalla on käytössä yhteensä kolme viilunkuivaajaa, eli lisäveden esilämmitys olisi energiatehokkuustoimena merkittävä viilunkuivausprosessin kannalta. Tehtaan lämpöenergiankulutus laskisi investoinnin myötä huomattavasti ja säästetty lämpöenergia tehostaisi kuivausprosessia. Metsä Wood Suolahden koivuvaneritehtaalla on myös kolme viilunkuivaajaa, joille investointi olisi todennäköisesti yhtä kannattava.

## 8 Kuivaajan operaattoreiden haastattelut

Kuivaajan operaattoreita haastateltiin, jotta saatiin hankittua yksityiskohtaisempaa tietoa kostutusveden käytöstä ja vaikutuksista 2-kuivaajan toimintaan. Tarkoituksena oli lisäksi kartoittaa lisäveden esilämmitysjärjestelmän mahdollisia haasteita. Haastattelut toteutettiin vaneritehtaalla kuivaajan valvomossa. Tutkimusta varten haastateltiin kuutta kuivaajan operaattoria. Kerätty haastatteluaineisto analysoitiin teemoittain, eli vastausten perusteella esiin nousi eri teemoja aiheeseen liittyen. Haastattelulomakkeen kysymykset ovat liitteessä 2.

### Lisäveden merkitys operaattorin työssä

Lisä- eli kostutusvesi virtaa kuivaajan kuumaosaan automaattisesti, joten operaattorin ei tarvitse normaalitilanteessa säätää veden määrää. Kuivaajan alasajotilanteissa kostutusvettä saatetaan lisätä manuaalisesti, jotta kuivaaja jäähtyisi nopeammin. Operaattorin tehtävänä on seurata valvomosta kuivaajan sisäilman suhteellista kosteutta, jottei se pääse laskemaan liian alhaiseksi.

## **Lisäveden vaikutukset viilun laatuun**

Eri kosteusluokan viilut tulisi aina ajaa kuivaajalla erikseen, sillä kosteuspitoisimpien viilujen ajonopeus on hitaampi kuin kuivemmilla viiluilla. Kaikille viilun kosteusluokille on laadittu omat ajo-ohjelmat ja ajoparametrit, jotta viilun laatu ei kärsisi. 2-kuivaajalla ajettiin kuitenkin hetkellisesti I- ja II-kosteusluokan viiluja sekaisin samaan aikaan, jolloin kuivaajan ajonopeus vaihdettiin II-kosteusluokan mukaiseksi. Tällöin I-kosteusluokan viilua kuivataan pidempään kuin olisi tarvetta, mikä aiheuttaa viilun ylikuivumista ja laadun heikkenemistä. Edellä mainittu tilanne oli kuitenkin harvinainen, eli normaalitilanteessa eri kosteusluokkien viiluja ei sekoiteta keskenään.

## **Tulipalon riski**

Lisävettä käytetään kuivaajan sisäilman suhteellisen kosteuden ylläpitämiseen, mikä ehkäisee myös tulipalon riskiä. Esimerkiksi viilusta irtoava pihka tai puupöly saattaa aiheuttaa kipinää kuivaajan kuumaosassa, jolloin tulipalon mahdollisuus kasvaa. Kuivaajan sisäinen lämpötila on normaalisti noin 175 °C. Jos lämpötila kasvaa liian suureksi, kostutusvettä voidaan lisätä kuivaajaan valvomosta käsin.

## **Tuotannon keskeytykset kuivaajalla**

Tyypillisimpiä tuotannon lyhyiden keskeytysten syitä ovat valoverhojen laukeminen, viilujen kääntyminen linjalla, ruuhka eli viilujen kasautuminen linjalla päällekkäin, ruuhkanpurku ja viilun huono laatu. Kun viilun syöttö kuivaajaan keskeytyy, kuivaajan sisälle ei haihdu kosteutta viiluista, jolloin sisäilman suhteellinen kosteus laskee. Tällöin kuivaajan sisäistä lämpötilaa täytyy vahtia, jottei se nouse liian korkeaksi.

## **Viilun kosteusluokan vaihto**

2-kuivaajalla ajetaan normaalisti I- ja II-kosteusluokan viilua sekä uudelleenkuivattavaa viilua. Uudelleen kuivattava viilu ei ole ensimmäisellä kuivauskerralla saavuttanut tavoiteltua loppukosteutta, minkä vuoksi se kuivataan uudestaan. Kosteusluokan vaihtuessa syöttöpään operaattori

ilmoittaa vaihdosta tekstiviestitse kuivaajan valvomon operaattorille, joka vaihtaa kuivaajan ajo-ohjelman. Ajonopeus muuttuu kosteusluokan vaihtuessa, mikä vaikuttaa myös lisäveden tarpeeseen.

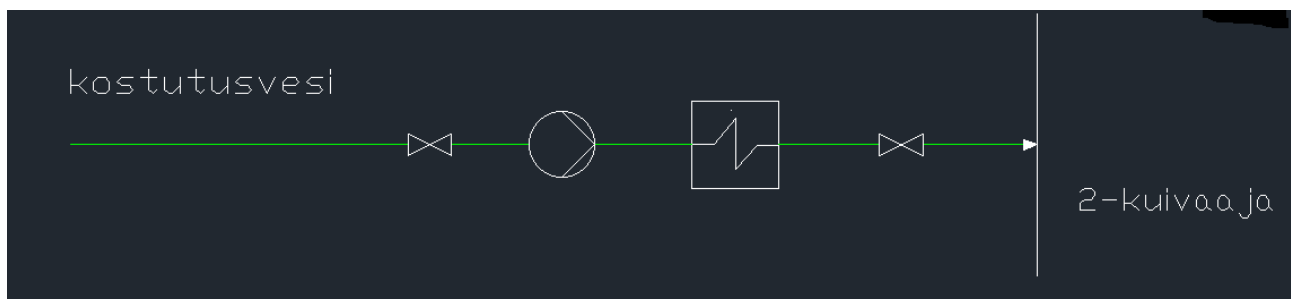
### Lisäveden esilämmitysjärjestelmän mahdolliset haasteet

Operaattoreilta kysyttiin mielipiteitä lisäveden esilämmitysjärjestelmästä ja mahdollisista haasteista siihen liittyen. Esille nousi pohdintaa laitteiston sijainnista, työturvallisuuteen liittyvistä asioista sekä järjestelmän vaikutuksista kuivaajan ajoparametreihin ja kuivaajan sisäiseen lämpötilaan. Esilämmitysjärjestelmän sijaintia suunnitellessa täytyy huomioida työntekijöiden esteetön kulku kuivaajien ympäristössä. Laitteiston kuumat pinnat ja putket ovat työturvallisuudessa huomioon otettava seikka. Lisäksi esilämmitysjärjestelmän mahdolliset vaikutukset kuivaajan ajoparametreihin ja lämpötilaan tulisi ottaa huomioon.

## 9 Lisäveden esilämmitysjärjestelmä

### PI-kaavio

Esilämmitysjärjestelmästä laadittiin alustava PI-kaavio, joka on esitetty kuviossa 6. PI-kaaviossa käytettyjen laitesymbolien selitykset on kerrottu kuviossa 7.



Kuvio 6. PI-kaavio lisäveden esilämmitysjärjestelmästä



venttiili



pumppu



lämmönvaihdin

Kuvio 7. PI-kaavion laitesymbolien selitykset

### Lämmönvaihdin

Lisäveden esilämmitysjärjestelmälle soveltuva lämmönvaihdin voisi olla prosessiteollisuudessa yleisesti käytetty putkilämmönsiirrin tai neste-neste-levylämmönvaihdin. Putkilämmönsiirrin olisi ratkaisuna edullinen, mutta riittävän lämmönsiirtopinta-alan saavuttamiseksi laitteisto veisi liikaa tilaa. Neste-neste-levylämmönvaihdin olisi tarkoitukseen parhaiten sopiva, sillä se on suunniteltu prosessiveden lämmitykseen.

Havutehtaan kuumavesisäiliöstä saatavaa lämpöä voitaisiin käyttää esilämmitysjärjestelmässä lisäveden lämmittämiseen. Kuumavesisäiliöön kerätään viilunkuivaajilta tulevaa lauhdetta, jota käytetään vanerilevyjen puristuksessa. Puristinkierron jälkeen vesi palautetaan kuumavesisäiliöön. Kuumavesisäiliön lämmön hyödyntäminen lisäveden esilämmityksessä olisi järkevää ja energiatehokasta.

## Esilämmitysjärjestelmän sijainti

Esilämmityslaitteisto sijoitettaisiin 1- ja 2-kuivaajien väliin, jossa tila on rajallinen. Kuivaajan operaattoreita haastatellessa esille nousi pohdintaa laitteiston sijainnista, eli kuivaajien väliin täytyy jättää riittävästi tilaa esimerkiksi kulkemista ja kunnossapitoa varten. Ehdotus laitteiston sijainnista on esitetty kuviossa 8. Kuvassa oikealla puolella on havuvaneritehtaan 2-kuivaaja ja vasemmalla puolella 1-kuivaaja.



Kuvio 8. Ehdotus esilämmitysjärjestelmän sijainnista.

## 10 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lisäveden esilämmityksen vaikutusta viilunkuivaajan energiatehokkuuteen selvittämällä kylmän lisäveden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho ja vertaamalla tuloksia esilämmitettyyn lisäveeseen. Laskettujen lämpötehojen perusteella laadittiin kustannuslaskelmat, joista selvisi esilämmitysjärjestelmän säästöpotentiaali. Lisäveden esilämmitysjärjestelmälle laskettiin arvio takaisinmaksuajasta, jonka perusteella investointi olisi kannattava. Esilämmitysjärjestelmä ei olisi investointina suuri, mutta se toisi vuosittain merkittäviä säästöjä vaneritehtaalle. Opinnäytetyössä saatiin selvitettyä vastaukset alussa asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

Lisävedellä on tärkeä rooli kuivaajan sisäilman suhteellisen kosteuden ylläpitämisessä ja säätelyssä. Jos lisävetenä käytettäisiin kylmän veden sijaan lämmönvaihtimella esilämmitettyä vettä, viilunkuivausprosessin energiatehokkuus paransi huomattavasti. Lämpöenergiaa ei tällöin tarvitsi tuhjata lisäveden höyrystämiseen, vaan se voitaisiin käyttää viilun kuivaamiseen. Viilunkuivaajan tuotantokapasiteetti siis paransi, jos lisävesi esilämmitettäisiin.

Tutkimustulosten luotettavuuteen vaikutti etenkin lisävesimittausten toteutus, sillä lämpötehojen ja kustannusten laskenta perustui mitattuihin arvoihin. Mittaukset toteutettiin mahdollisimman normaalissa kuivaajan ajotilanteessa, joten mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Toisaalta II-kosteusluokan viilua ajettaessa viilun syötön pidemmät tauot vaikuttivat osaltaan virtausmittausten vertailtavuuteen, minkä vuoksi kyseiselle kosteusluokalle arvioitiin lineaarisesti uusi lisäveden massavirta. Lisäveden tarvetta jokaiselle viilun kosteusluokalle mitattiin yhden tunnin ajan. Pidemmällä mittausajalla olisi voinut parantaa tulosten luotettavuutta otannan ollessa suurempi. Yhden tunnin mittausaika oli kuitenkin tämän tutkimuksen puitteissa riittävä. Lisäveden esilämmitysjärjestelmän kustannuslaskelmissa ei otettu huomioon veden esilämmitykseen tarvittavaa energiaa, joten takaisinmaksuaikaa ja säästöpotentiaalia ei voida pitää sellaisinaan täysin luotettavina. Kustannuslaskelmissa huomioitiin ainoastaan säästetyn prosessihöyryn määrä 2-kuivaajalla. Laskelmia voidaan kuitenkin käyttää esitietoina jatkotoimenpiteitä suunniteltaessa.

Opinnäytetyön toimeksianto oli selkeä, joten aihetta oli helppo alkaa tutkimaan. Myös omasta työkokemuksesta vaneritehtaan tuotannon tehtävistä oli paljon hyötyä opinnäytetyöprosessin aikana.

Jonkin verran haasteita ilmeni tiedonkeruussa, sillä kostutusveden merkityksestä viilunkuivausprosessissa ei löytynyt kirjallista tietoa. Kostutusvettä ei mainittu viilupuutuotteiden tuotannosta ker-  
tovissa oppikirjoissa ollenkaan, joten aiheen tutkiminen oli perusteltua. Kuivaajan operaattoreiden  
haastatteluista saatiin kerättyä tutkimuksen kannalta arvokasta tietoa lisävedestä. Aineistona käy-  
tettyjen lisäveden lämpötila- ja virtausmittausten ajankohta viivästyi hieman alkuperäisestä aika-  
taulusta, sillä vaneritehtaan talvilomat ja ulkopuolisen mittausyrityksen omat aikataulut vaikeutti-  
vat mittauspäivän sopimista. Pieni viivästyminen ei kuitenkaan juuri haitannut työn etenemistä,  
vaan opinnäytetyö valmistui ajallaan.

Havuvaneritehtaan 2-kuivaajalle valmistui kevään aikana myös toinen opinnäytetyö, jossa tutkit-  
tiin korvausilman esilämmityksen vaikutusta energiatehokkuuteen viilunkuivausprosessissa. Sekä  
korvausilman että lisäveden esilämmityksellä voitaisiin tehostaa 2-kuivaajan energiatehokkuutta  
merkittävästi. Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista nähdä, millainen vaikutus kyseisillä energiate-  
hokkuustoimilla olisi käytännössä, jos ne toteutettaisiin. Myös korvausilman ja lisäveden esilämmi-  
tyksen vaikutusta toisiinsa kannattaisi tutkia. Koska korvausilmaa käsittelevä opinnäytetyö valmis-  
tui lähes samaan aikaan, siinä selvitettyjä tuloksia ei voitu huomioida tarkemmin tässä  
opinnäytetyössä.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan käyttää pohjatietoina lisäveden esilämmitysjärjestelmän suunnit-  
telussa. Esilämmitysjärjestelmän lämmönvaihtimen mitoitus rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle,  
joten se voisi olla aihe esimerkiksi tulevalle opinnäytetyölle. Lisäksi esilämmitysjärjestelmän ener-  
giansyönteistä tulisi selvittää, jotta investoinnin kannattavuudesta saataisiin parempaa tietoa. Ha-  
vuvaneritehtaan kuumavesisäiliön lämmön hyödyntämismahdollisuuksia lisäveden esilämmityk-  
sessä voisi myös kartoittaa tarkemmin. Tutkimustulosten perusteella voidaan laatia lisäveden  
esilämmitysjärjestelmän kannattavuuslaskelmat myös muille viilunkuivauskoneille.

## Lähteet

Akkanen, I., Jännes, T., Kekki, M., Kiiski, T., Kortelainen, V-M., Lind-Kohvakka S., Liski, K., Mäkinen, T., Pajuoja, H., Rainio, J., Räsänen, T., Silventoinen, I., Tarvainen, I., Torniainen, P. & Tynkkynen, T. 2017. Puulevyteollisuus. Porvoo: Bookwell

AutoCAD. N.d. AutoCAD-suunnitteluohjelmiston esittely Autodeskin verkkosivuilla. Viitattu 28.3.2022.

<https://www.autodesk.fi/products/autocad/overview?source=footer&term=1-YEAR&tab=subscription>

Cengel Y. & Ghajar A. 2015. Heat and Mass Transfer. Fundamentals & Applications. 5 p. New York: Mcgraw-Hill Education.

Energiatehokkuus. N.d. Energiatehokkuuden toimialakuvaus Energiaviraston verkkosivuilla. Viitattu 17.2.2022.

<https://energiavirasto.fi/energiatehokkuus>

Energiatehokkuussopimukset 2017–2025. 2021. Sopimus Energiaviraston verkkosivuilla. Viitattu 23.1.2022.

<https://energiavirasto.fi/energiatehokkuussopimukset>.

Energiavaltaisen teollisuuden toimenpideohjelma – Metsäteollisuus ry. 2016. Työ- ja elinkeinoministeriön, Energiaviraston, Metsäteollisuus ry:n, Elinkeinoelämän keskusliitto Oy:n ja sen toimialaliittojen välinen sopimus energiankäytön tehostamisesta. Viitattu 16.2.2022.

<https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/wp-content/uploads/2016/10/Energiavaltaisen-teollisuus-Metsa%CC%88teollisuus-ry.pdf>.

Hirsijärvi S. & Hurme H. 2001. Tutkimushaastattelu: temahaastattelun teoria ja käytäntö. Helsinki: Yliopistopaino

Hirsijärvi S., Remes P., Sajavaara P. 2007. Tutki ja kirjoita. 13.p. Helsinki: Tammi

Investointituet. N.d. Työ- ja elinkeinoministeriön linjaus energiatukien hakemiseen Motiva Oy:n verkkosivuilla. Viitattu 17.2.2022.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tem\\_n\\_tukemat\\_energiakatselmukset/katselmus- ja\\_investointituet/investointituet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/katselmus- ja_investointituet/investointituet)

Kauttonen, A. 2014. Viilunkuivaajan kuivausprosessin optimointi. Opinnäytetyö, AMK. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, puutekniikan koulutusohjelma. Viitattu 5.4.2022.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73630/Kauttonen\\_Antti.pdf.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73630/Kauttonen_Antti.pdf.pdf?sequence=1)

Kerto LVL. N.d. Tuotokuvaus Metsä Woodin verkkosivuilla. Viitattu 1.2.2022.

<https://www.metsawood.com/fi/tuotteet/kerto/Pages/Kerto.aspx>

Koponen, H. 2002. Puutuoteteollisuus 4: Puulevytuotanto. 3.p. Helsinki: Edita

Kurtti, I. 2018. Koivuvaneritehtaan viilunkuivaajien höyryjärjestelmän dokumentointi. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 12.4.2022.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/158221/likka%20Kurtti.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kuusenmäki, A. 2022. Tuotantoinsinööri. Metsä Wood Suolahti, havuvaneritehdas. Sähköpostiviesti 29.3.2022.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Hämeenlinna: Karisto

Metsästä maailmalle. N.d. Konserniesittely Metsä Groupin verkkosivuilla. Viitattu 27.1.2022.

<https://www.metsagroup.com/fi/yhtio/Pages/default.aspx>.

Metsä Wood lyhyesti. N.d. Yritysesittely Metsä Woodin verkkosivuilla. Viitattu 27.1.2022.

<https://www.metsawood.com/fi/yritys/Pages/Yritys.aspx#Mets-Wood-lyhyesti>.

Metsä Wood Suolahti. N.d. Suolahden vaneritehtaiden intran etusivu. Viitattu 27.1.2022.

<https://mgubc.sharepoint.com/sites/IntranetFIUnitsMetsaWoodSuolahti>.

Plant-työkalujen ominaisuudet. N.d. Plant 3D- suunnitteluohjelmiston esittely Autodeskin verkkosivuilla. Viitattu 28.3.2022.

<https://www.autodesk.fi/products/autocad/included-toolsets/autocad-plant-3d>

PSK 3603. PI-kaavion esitystapa ja merkitsemisohje. 2012. 1 p. PSK Standardisointiyhdistys ry.

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. 3 p. Tampere: Juvenes Print.

Vanerit. N.d. Tuotekuvaus Metsä Woodin verkkosivuilla. Viitattu 1.2.2022.

<https://www.metsawood.com/fi/tuotteet/vanerit/Pages/Vanerit.aspx>

Vepsäläinen, J. 2016. Viilunkuivaimen kuivausilman lämpötilan nostaminen. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 12.4.2022

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/116310/Opinnaytetyov1.0%20Jarno%20Vepsalainen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Viisi faktaa metsäteollisuuden energiatehokkuudesta. 2021. Artikkelit Metsäteollisuuden verkkosivuilla. Viitattu 21.3.2022.

<https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/viisi-faktaa-metsateollisuuden-energiatehokkuudesta>

## Liitteet

## Liite 1. Kylläisen veden ominaisuudet (Cengel &amp; Ghajar 2015 Appendix 1, 8)

914

PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., $T$ °C	Sat. press., $P_{sat}$ kPa	Specific volume, $m^3/kg$		Internal energy, $kJ/kg$			Enthalpy, $kJ/kg$			Entropy, $kJ/kg\cdot K$		
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Sat. vapor, $u_g$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. vapor, $h_g$	Sat. liquid, $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Sat. vapor, $s_g$
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

## **Liite 2. Haastattelulomake**

Lisä- eli kostutusveden käyttö havuvaneritehtaan 2-kuivaajalla

Haastattelulomake

**Miten lisä- eli kostutusvesi vaikuttaa viilunkuivaajan toimintaan?**

**Millainen merkitys lisävedellä on operaattorin työssä?**

**Miten tuotannon keskeytykset kuivaajalla vaikuttavat lisäveden tarpeeseen?**

**Millaisia haasteita lisäveden esilämmitysjärjestelmä voisi aiheuttaa kuivaajan toimintaan?**