



Energiatehokkuuden parantaminen va- neritehtaassa vähentämällä lämpö- ja sähköenergian tarvetta

Saku Kokkonen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2023

Tekniikan ala

Insinööri AMK, energia- ja ympäristötekniikka

Kokkonen, Saku

Energiatehokkuuden parantaminen vaneritehtaassa vähentämällä lämpö- ja sähköenergian tarvetta

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Toukokuu 2023**, 48 sivua.

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

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Energiatehokkuuden parantaminen on keskeinen osa EU:n ilmastopolitiikkaa. EU:n jäsenmaat ovat sitoutuneet Pariisin ilmastopöytäkirjaan, jonka tavoitteena on rajoittaa ilmaston lämpeneminen 2°C. Tavoitteiden saavuttamiseksi Suomen valtio on ottanut käyttöön sopimuksia, joilla pyritään tehostamaan energiankulutusta ja vähentämään hiilidioksidipäästöjä. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää ja laskea Metsä Wood Punkaharjun koivuvaneritehtaan viilunkuivauskoneen 1 energiahukkaa. Tulosten pohjalta pohdittiin myös ratkaisuja, joilla laskettuja energiahukkaa voidaan vähentää. Opinnäytetyössä keskityttiin kolmeen energiahukan kohteeseen: viilunkuivauskoneen lämpötilan automatisaatioon, viilunkuivauskoneen ovien vuotojen laskemiseen ja viilunkuivauskoneen sähkömoottoreiden päivittämiseen.

Työn aihealueiden aineistona käytettiin viilunkuivauskoneelta ja voimalaitokselta saatuja lämpö- ja kosteusarvoja sekä höyrymääriä. Lisäksi viilunkuivauskoneelta mitatut vuotoilman ja lämmön määrät mitattiin kalibroidulla ilmavirtausmittarilla ja lämpökameralla. Aineistona käytettiin myös operaattoreiden haastatteluja ja valmistajilta saatuja esitteitä.

Työn tuloksena saatiin laskettua viilunkuivauskoneen vuotoilmasta ja lämmöstä johtuva hukkaenergian määrä, sekä viilunkuivauskoneen sisäisen lämmön laskemisesta ja sähkömoottoreiden päivityksestä saatava energiansäästö. Sähkömoottoreiden päivitykselle laskettiin lisäksi takaisinmaksuajat, jonka mukaan moottoreiden päivittäminen uusiin on kannattavaa.

Säästölaskujen sekä automaatiotestien pohjalta nousi esiin viilunkuivauskoneelle 1 tehtävät korjaukset. Viilunkuivauskoneen ovien tiivisteet tulee vaihtaa vuotoilman vähentämiseksi ja ovet korjata tai vaihtaa uusiin, jos ne ovat väänntyneet pysyvästi lämpölaajenemisen tai törmäyksen seurauksena. Lisäksi viilunkuivauskoneelle on kehitettävä lisäkosteutusjärjestelmä, jolla sen korkeita lämpötilapiikkejä voidaan kuivauskoneen pysähtyessä vähentää. Tämän lisäksi viilunkuivauskoneelle tulevan tulohöyryventtiili voisi vaihtaa reduktioventtiiliksi, joka mahdollistaisi höyryn säädön paineen avulla, vähentäen höyryn määrän vaihtelua.

Avainsanat (asiasanat)

Energiatehokkuus, viilunkuivauskone, ilmavuodot, sähkömoottorit

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liite 3 on salassa pidettävä ja on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 29.5.2028

Kokkonen, Saku

Improving energy efficiency in a plywood factory by reducing the demand for heat and electricity usage

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 48 pages.

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

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Improving energy efficiency is a key part of the EU's climate change policy. The EU member states are committed to the Paris Climate Agreement, which aims to limit global warming to 2°C. To achieve this goal the Finnish government has introduced agreements aimed at increasing energy efficiency and reducing carbon dioxide emissions. The goal of the thesis was to find out and calculate the energy loss of a veneer dryer at Metsä Wood Punkaharju birch plywood plant. Different solutions to reduce the calculated energy losses were also considered based on the results. The thesis focused on three areas of possible energy losses: automating the temperature of the veneer drying machine, calculating the leaks of the veneer dryer doors, and updating the veneer dryer's electric motors.

The heat, humidity, and steam values obtained from the veneer drying machine and the power plant were used as data for the topics of the thesis. In addition, the air leakage and heat loss were measured from the veneer dryer were measured with a calibrated air flow meter and a thermal camera. Interviews with operators and brochures received from manufacturers were also used as material in the thesis.

Results of the study indicate, huge losses as wasted heat energy from air leakages, convection, and old electric motors. Results also show how much energy can be saved by lowering the drying temperature to more ideal temperature. A payback period and energy saving for the updated electric motors was also calculated.

The calculations and automation tests indicated necessary repairs and modifications for the veneer dryer. The seals on the doors of the dryer should be replaced to reduce air leakage. If they are permanently warped because of thermal expansion or a collision, the doors should be replaced. An additional moisturizing system should also be developed for the dryer, which could be used to reduce the high temperature peaks inside the dryer. In addition to this, the inlet steam valve for the dryer could be changed to a reduction valve. This would enable the adjustment of the steam by means of pressure, reducing the fluctuation of steam usage.

Keywords/tags (subjects)

Energy efficiency, veneer dryer, air leaks, electric motors

Miscellaneous (Confidential information)

Attachment 3 is confidential material and has been removed from the public version. The reason for secrecy is the Openness Act 621/1999 24§, 17, company trade secrets. Time of secrecy is five (5) years. Time of secrecy ends in 29.5.2028

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Hiilineutraalius	3
1.1.1	Energiatehokkuus metsäteollisuudessa	3
1.1.2	Metsä Groupin kestävä kehityksen tavoitteet	4
1.2	Yritysesittely	4
2	Tutkimusasetelma	6
2.1	Työn rajaus	6
2.2	Tutkimustyyppi	7
2.3	Eettisyys ja luotettavuus	7
3	Koivuviilun valmistusprosessi	8
4	Viilun kuivaus- ja lajittelulinja	12
4.1	Vaneritehtaan viilunkuivauskone 1	12
4.2	Viilun kuivausprosessi	13
4.3	Kuivauskoneen energiahäviöt	15
5	PID-säädin	17
6	Kuivauskoneen energiatehokkuuden parantaminen	19
6.1	Lämpötilasäädön automaatio	19
6.2	Automaattinen säätö	20
6.2.1	Lähtöasetelmat	20
6.2.2	Alustavat testit	21
6.2.3	Pidennetyt testit	22
6.2.4	Automaation energiansäästö	24
6.3	Kuivauskoneen eristeet/tiivisteet	25
6.3.1	Alustava tutkimus	25
6.3.2	Vuotoilman laskut	28
6.3.3	Konvektio laskut	31
6.4	Moottorit	33
7	Pohdinta	39
	Lähteet	42
	Liitteet	46
	Liite 1. Kylläisen veden ominaisuudet (Cengel & Ghajar 2015 Appendix 1, 8)	46
	Liite 2. Haastattelulomake kuivauskoneen operaattoreille	47
	Liite 3. Sähkömoottoreiden takaisinmaksuaikojen laskut (salassa pidettävä)	48

Kuviot

Kuvio 1. Vanerin valmistuksen työvaiheet.....	9
Kuvio 2. Viilunkuivaajan rakenne sivusta (Kauttonen 2014, muokattu).....	12
Kuvio 3. Telakuivaajan toimintaperiaate (Kurtti 2018, 11, muokattu).....	14
Kuvio 4. PID-lohkokaavio (What is PID Controller: Working, Types & Its Applications 2022)....	17
Kuvio 5. Aaltoileva PID-säätö (Åström & Wittenmark 2008, 11).....	18
Kuvio 6. Toimivat PID-säädöt (Åström & Wittenmark 2008, 11).....	19
Kuvio 7. Viilunkuivauskoneen rikkiäinen tiiviste.....	26
Kuvio 8. Viilunkuivauskoneen 1 oven reunan lämpötila.....	26
Kuvio 9. Viilunkuivauskoneen 2 oven reunan lämpötila.....	27
Kuvio 10. Lämpökamerakuva viilunkuivauskoneen 1 ovista	28

Taulukot

Taulukko 1. Energiahäviön ilman osuus.....	30
Taulukko 2. Energiahäviön veden osuus.....	30
Taulukko 3. Reunusten pinta-alat	32
Taulukko 4. Reunusten lämpöhäviöt	33
Taulukko 5. Moottoreiden hyötysuhteet.....	36
Taulukko 6. Moottoreiden säätö	37

1 Johdanto

1.1 Hiilineutraalius

IPCC:n (2018) ilmastoraportin mukaan yli 1,5°C lämpötilan nousu esiteollisesta ajasta kiihdyttää huomattavasti eläinten sukupuuttoon kuolemista sekä kasvattaa ilmasto katastrofien määrää ja vaarallisuutta. Ilmastonmuutos vaikuttaa myös ruoan ja makean veden saatavuuteen varsinkin vähemmän kehittyneillä alueilla. IPCC:n (2018) ilmastoraportin mukaan ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan kaikkiin maapallolla asuviin elämänmuotoihin ja ainoa keino hidastaa ja pysäyttää ilmastonmuutos on tehdä laajaa yhteistyötä maiden välillä vähentääkseen energian kulutusta sekä päästöjä. (Masson-Delmotte, Zhai, Pörtner, Roberts, Skea, Shukla, Pirani, Moufouma-Okia, Péan, Pidcock, Connors, Matthews, Chen, Zhou, Gomis, Lonnoy, Maycock, Tignor & Waterfield 2018.)

Osana Euroopan Unionin jäsenmaita Suomi on allekirjoittanut Pariisin ilmastosopimuksen, jonka tavoitteena on pysäyttää ilmaston lämpeneminen alle 2°C. Euroopan unioni on asettanut sen jäsenmaidensa tavoitteeksi ilmastoneutraaliuden saavuttamisen vuoteen 2050 mennessä (2050 long-term strategy n.d.). Marinin hallitus on asettanut Suomen hiilineutraaliudelle omaksi tavoitteeksi vuoden 2035. Hallitus on päivittänyt ilmastolakia, jossa on määritelty uudet päästövähennystavoitteet vuoteen 2050 saakka. Hallitus on määrännyt myös uuden ilmasto- ja energiapoliittisen ministeriöryhmän, joka seuraa ja ohjaa hiilineutraaliustavoitteen toteutumista. Tapoihin, joilla hallitus yrittää päästä hiilineutraalisuuden tavoitteeseen, kuuluvat esimerkiksi seuraavat: päästötön lämpö- ja sähköenergian tuotanto, kiertotalouden edistäminen, hiilinielujen määrän kasvattaminen, turpeen ja muiden fossiilisten polttoaineiden polton lakkauttaminen, älykkäiden sähköverkkojen ja kaukolämpöverkkojen parantaminen ja asumisen ja rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen. (Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi 2019.)

1.1.1 Energiatehokkuus metsäteollisuudessa

Metsäteollisuus ry on sitoutunut energiavaltaisen teollisuuden toimenpideohjelmaan, jonka tavoitteena on tehostaa eri toimialojen energiankäyttöä vuosien 2017–2025 välillä. Toimenpideohjelman yhteinen energiansäästötavoite on vähentää energiankäyttöä aktiivisilla toimenpiteillä 7,5 % vuoteen 2025 mennessä. Punkaharjun Metsä Wood on osana Metsäteollisuus ry:tä sitoutunut noudattamaan kyseistä toimenpideohjelmaa. Osana toimenpideohjelmaa jäsenyritysten on sitouduttava ottamaan käyttöön ETJ+ tai ISO 50001 energianhallintajärjestelmän tai jatkamaan ETJ

energiatehokkuus järjestelmän käyttöä. Jäsenyritykset sitoutuvat myös vuosittain raportoimaan seurantajärjestelmään tehtaan lämpö-, sähkö- ja polttoaineiden energiankäytöstä sekä toimista, joita yritys on tehnyt tuotantoyksiköiden energiatehokkuuden parantamiseksi. Raportissa jäsenyritys voi kertoa myös uusia kehittämisehdotuksia, joilla voidaan parantaa tuotantoyksiköiden energiatehokkuutta. (Energiavaltaisen teollisuuden toimenpideohjelma 2016.)

1.1.2 Metsä Groupin kestävän kehityksen tavoitteet

Metsä Group on asettanut vuoden 2030 tavoitteiksi saada kaikki tehtaot fossiilittomiksi poistamalla käytöstä turpeen sekä muut fossiiliset polttoaineet. Tehtaot tulevat tulevaisuudessa hyödyntämään 100 % sivuvirroista kuten sahanpurusta, puun kuorista sekä viallisista tuotteista. Sivuvirroista tulevia raaka-aineita käytetään uudestaan esimerkiksi voimalaitosten energianlähteenä ja sellun raaka-aineena. Metsä Groupin tavoitteena on myös parantaa talousmetsien monimuotoisuutta lisäämällä säästöpuun- sekä lahoppuun määrää hakkuiden yhteydessä. (Metsä Groupin strategisen kestävän kehityksen 2030-tavoitteet 2023.)

Metsä Woodin omat tavoitteet kohdistuvat parantamaan tuotannon energia- ja materiaalitehokkuutta, sivuvirtojen 100-prosenttista hyödyntämistä sekä melu- ja ilmapäästöjen vähentämistä. Prosessien mittareina käytetään sähkö- ja lämpöenergian ominaiskulutuksen seuranta (kWh/m³) energiatehokkuustoimenpiteiden €-tavoitteita ja prosessien käyttösuhdetta. (Ympäristöjohtaminen n.d.) Näihin tavoitteisiin pyritään myös Punkaharjun Metsä Woodin tehtailla. Punkaharjun Metsä Wood oli asettanut opinnäytetyölle tavoitteeksi löytää keinoja vähentää vaneritehtaan kokonaisenergian kulutusta sekä lämpöenergian, että sähköenergian kannalta.

1.2 Yritysesittely

Metsä Group

Metsä Group on suomalainen metsäteollisuus konserni, joka tuottaa ja vie metsäteollisuustuotteita Suomen lisäksi myös useisiin muihin maihin Euroopassa, Aasiassa, Pohjois-Amerikassa ja Etelä-Amerikassa. Toimintaa Metsä Groupilla on yhteensä 28 eri maassa ja tuotantoyksiköitä 8 eri maassa. Metsä Groupiin kuuluu:

- Metsäliitto Osuuskunta.
- Metsä Forest, joka tarjoaa metsäpalveluita.
- Metsä Wood, joka valmistaa vaneri- ja kertopuutuotteita.
- Metsä Board Oyj, joka valmistaa kartonkia.
- Metsä Fibre Oy, joka valmistaa sellu ja sahatavaraa.
- Metsä Tissue Oyj, joka valmistaa pehmo- ja tiivispaperia.
- Metsä Spring, joka on innovaatioyritys.

Yhteensä vuonna 2021 Metsä Groupin liikevaihto oli 6,98 miljardia euroa ja yhtiö työllisti noin 9600 työntekijää. Lisäksi Metsäliitto Osuuskuntaan kuuluu lähes 92 000 metsänomistajaa. (Metsä Group Tilinpäätöstiedote 2022)

Metsä Wood

Metsä Wood tarjoaa vaneri- ja kertopuutuotteita teollisuus-, rakennus- ja jakeluasiakkaiden tarpeisiin. Tuotteisiin kuuluu Kerto® LVL- tuotteet sekä koivu- ja havuvaneri. Metsä Woodin liikevaihto on 0.6 miljardia euroa ja työllistää 1700 työntekijää 14 eri maassa. Metsä Woodin tuotantoyksiköitä on kahdeksan kappaletta. Suomessa tuotantoyksiköitä on Punkaharjulla, Lohjalla, Äänekoskella, Suolahdessa. Yhdistyneissä Kuningaskunnissa tuotantoyksiköitä on Bostonissa, Widenessissä sekä King's Lynnissä. Virossa yksittäinen tuotantoyksikkö sijaitsee Pärnussa. (Metsä Wood Punkaharjun tehtaot 2023.)

Punkaharjun Metsä Wood

Punkaharjulla Metsä Wood omistaa Kerto- ja vaneritehtaan sekä voimalaitoksen, joka tarjoaa sähkö- ja lämpöenergiaa molemmille tehtaille sekä kaukolämpöä lähialueelle. Metsä Wood Punkaharju työllistää kertotehtaalla 200 työntekijää ja koivuvaneritehtaalla 230 työntekijää. Punkaharjun vaneritehtaan rakentaminen on alun perin aloitettu 1962 Oy Faner AB nimen alla ja tehdas on valmistunut vuonna 1964. Tehtaan alkuperäinen tuotantokapasiteetti oli 7000 m³ vaneria vuodessa. Vaneritehdasta on kuitenkin päivitetty vuosien varrella useamman kerran ja sen tuotantokapasiteetti on kasvanut 55 000 m³ koivuvaneria vuodessa. Punkaharjulla oleva kertopuutehdas on valmistunut vuonna 2001, jonka jälkeen sitä on laajennettu vuosina 2006 ja 2019 uusilla tuotantolinjoilla. Päivitykset ovat nostaneet havusta tehtävän kertopuun tuotannon noin 175 000 m³

vuodessa. Tehtaat tuottavat sivutuotteena myös yhteensä 180 000 m³ selluhaketta sekä 190 000 m³ bioenergiaksi käytettävää energiajätettä vuodessa. (Metsä Wood Punkaharjun tehtaat 2023.)

2 Tutkimusasetelma

2.1 Työn rajaus

Opinnäytetyön tavoitteeksi valittiin vaneritehtaan viilunkuivauskoneen 1 energiatehokkuuden parantaminen. Energiatehokkuuden kohteeksi valittiin vaneritehtaan viilunkuivauskone 1 sillä se on suurin yksittäinen energiankuluttaja vaneritehtaassa. Viilunkuivauskone 1 on rakennettu alun perin 1974 ja näin ollen ennen kuin monia energiatehokkuutta parantavia ominaisuuksia oli kehitelty viilunkuivauskoneisiin. Viilunkuivauskonetta 1 on kuitenkin päivitetty vuosien myötä modernimmaksi, mutta moni parannuksista on koskenut tuotannon kasvattamista eikä energiatehokkuuden parantamista.

Opinnäytetyössä tehdään myös alustavat kannattavuuslaskelmat energiatehokkuuden parantamisen ratkaisuille. Kannattavuuslaskelmissa lasketaan ratkaisujen energiansäästö, vuotuinen rahan säästö sekä takaisinmaksuaika. Opinnäytetyölle asetettiin seuraavat kysymykset ratkaisujen löytämiseksi:

- Millä ratkaisuilla viilunkuivauskoneen 1 energiankulutusta voidaan vähentää?
- Mitkä ehdotetuista ratkaisuista olisi realistisesti toteutettavissa?
- Miten ratkaisut toteutetaan?
- Kuinka paljon ratkaisujen kustannukset ja energiansäästöt olisivat?

Opinnäytetyön energiatehokkuuden ratkaisuihin rajattiin viilunkuivauskoneen 1 lämpötilan automaattiajon säätö, viilunkuivauskoneen lämpö- ja ilmapuotojen energiahäviöiden laskeminen sekä viilunkuivauskonetta pyörittävien sähkömoottoreiden päivittäminen energiatehokkaammiksi. Jokaisesta aiheesta tehtiin kannattavuuslaskelmat, joissa laskettiin ratkaisujen energiansäästö, vuotuinen rahan säästö sekä takaisinmaksuaika. Opinnäytetyön ratkaisujen rajauksessa painotettiin vaihtoehtoja, jotka ovat mahdollista toteuttaa mahdollisimman pienillä investointikustannuksilla.

2.2 Tutkimustyyppi

Opinnäytetyö oli tutkimuksellinen kehitystyö, jonka tavoitteena oli parantaa Metsä Wood Punkaharjun vaneritehtaan energiatehokkuutta. Kanasen (2015, 33–34) mukaan kehittämistutkimuksella ei ole yksinäistä tapaa tai metodologiaa, vaan kehittämistyön tapoja ja menetelmiä on monenlaisia. Kehittämistutkimusta voidaan sopeuttaa kehittämiskohteen, tutkimusongelman tai tilanteen mukaan eri tavalla. Tämä mahdollistaa myös kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tutkimusmenetelmien käytön kehittämistutkimuksen mukaan. Tätä kutsutaan myös monimenetelmälliseksi tutkimukseksi. (Kananen 2015, 33–34.)

Työssä käytettiin sekä kvalitatiivista, että kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Kvalitatiivinen tutkimusmenetelmä koostuu primääri- ja sekundääriaineistosta. Primääriaineistoon kuuluu erilaiset havainnoinnit sekä haastattelut, kun taas sekundääriaineistoon kuuluu erilaiset kuvat, tallenteet sekä tallenteet. (Kananen 2015, 76.) Kvantitatiiviseen tutkimusmenetelmään koostuu taas numeerisista tuloksista ja niiden selittämisestä, vertailuista luokitteluista sekä syy- seuraussuhteista (Määrällinen tutkimus 2015).

Kvantitatiivisella eli määrällisellä tutkimuksella kerättiin opinnäytetyössä tuloksia numeerisesti. Tutkimuksissa saadut tulokset kerättiin talteen taulukoihin, josta niitä pystyttiin käyttämään laskuja tehdessä. Taulukoiden ja laskujen pohjalta tuloksia oli myöhemmin helpompi analysoida.

Kvalitatiivisena tutkimusmenetelmänä käytettiin haastattelua. Opinnäytetyön aikana haastateltiin useaa eri alaan asiantuntijaa sekä viilunkuivauskoneen operaattoreita. Alan asiantuntijoilta kysyttiin haastatteluissa vaneritehtaan toiminnasta sekä viilunkuivauskoneen energiatehokkuuden parannus kohteista. Vastaavasti kuivauskoneen operaattoreilta kysyttiin haastattelussa kuivauskoneen operoinnista sekä operoinnin aikana ilmenevistä poikkeustilanteista.

2.3 Eettisyys ja luotettavuus

Opinnäytetyössä noudatetaan hyviä eettisiä periaatteita ja hyvää tieteellistä käytäntöä. Opinnäytetyössä käytettyjä laskuja ja menetelmiä haluttiin tehdä yleispäteviä, jotta niitä voidaan soveltaa myös muilla Metsä Groupin tehtailla. Tarvittavien mittaustietojen kerääminen tapahtuu yleisesti kalibroiduilla mittalaitteilla, tekemällä mittaukset itse tai käyttämällä Punkaharjun Metsä

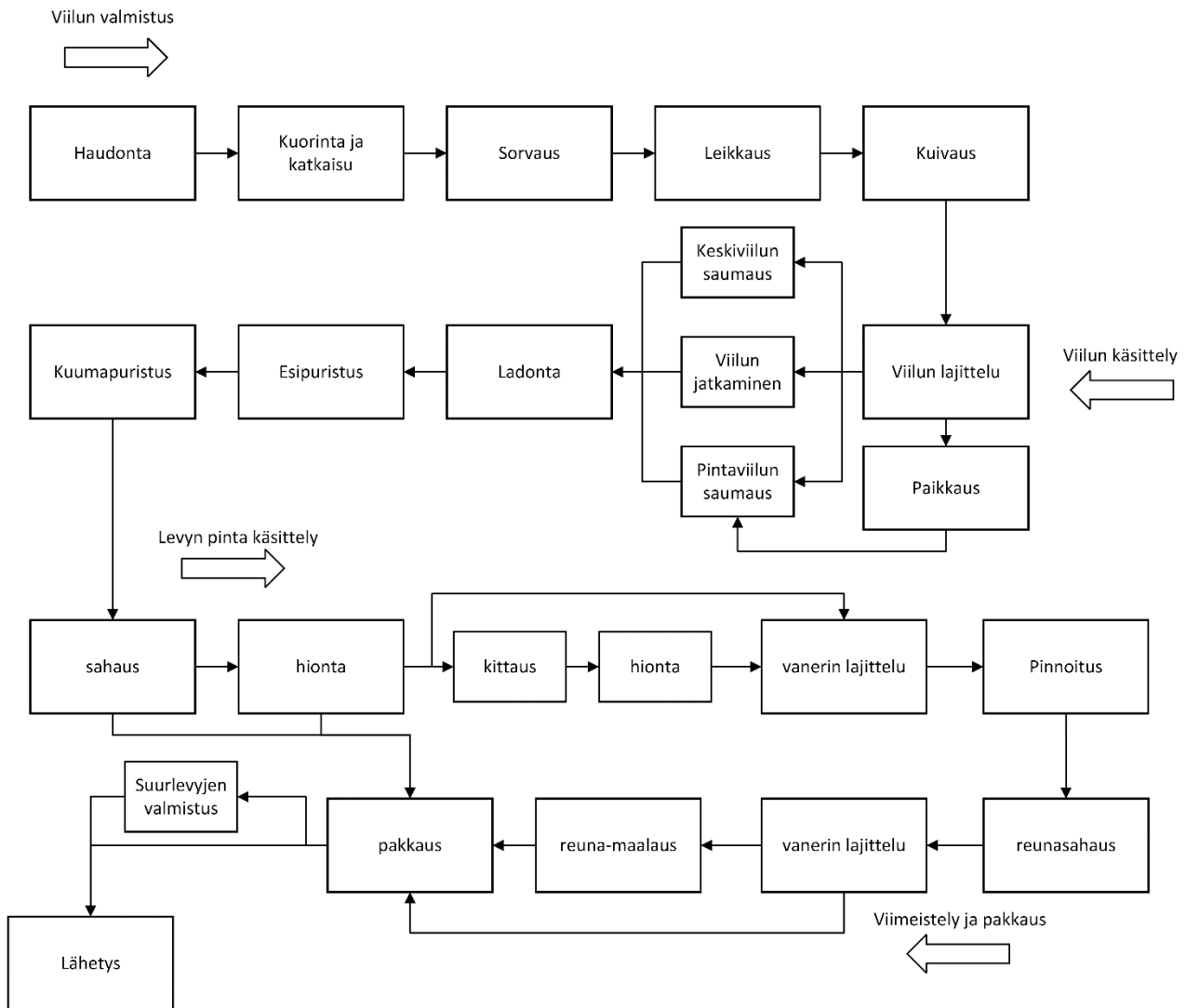
Woodin aiempien mittausten tuloksia. Kaikissa arvoissa voi olla pieniä eriävyyksiä mittauslaitteiden tarkkuudesta-, laitteiston kunnosta- tai laitevalmistajan antamien tietojen johdosta. Tämän takia yritetään tehdä useampi mittaus, jotta pystytään varmistamaan mittaustulosten tarkkuus. Muita opinnäytetyössä käytettäviä aineistoja tarkastellaan kriittisesti, joista valitaan vain luotettavimmat ja uusimmat. Käytetyt laskut on tarkastettu alan asiantuntevalla henkilöllä, joka on hyväksynyt käytettävät laskut ja laskujen tulokset. Osasta aiheista on kirjoitettu toimeksiantajan ja opinnäytetyön tekijän välinen salassapitosopimus, joka estää tiettyjen laskujen julkaisemisen. Tämän takia opinnäytetyössä käytetään osassa laskuista muunneltuja arvoja.

Työn luotettavuuteen vaikuttaa eniten parametrien mittaukset, joita ei voitu tehdä tarkasti. Opinnäytetyössä tehdyissä ilmavirta laskuissa ei ole tiedetty kaikkia parametreja ja tämän takia laskut on kerrottu olevan suuntaa antavia. Testit ja mittaukset kuitenkin arvioitiin kriittisesti ja todennettiin päteviksi. Lisäksi testeissä, jossa opinnäytetyön tekijä ei ollut valvomassa testejä tai mittauksia, laadittiin ulkopuoliselle työntekijälle ohjeet testien ajaksi. Tämä takasi testien samanlaatuisuuden vahtivasta henkilöstä huolimatta.

Opinnäytetyö kirjoitettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun opinnäytetyön kirjoittamisohjeen mukaisesti. Opinnäytetyössä käytetyt lähteet seuraavat hyvän lähdevalintojen periaatteita ja ne on kirjoitettu opinnäytetyön lähdeluetteloon Jyväskylän ammattikorkeakoulun ohjeiden mukaisesti. Lähteinä on käytetty materiaalia, joita on kirjoittanut alan asiantuntijat ja jotka toistuvat useissa vastaavissa alan lähteissä.

3 Koivuviilun valmistusprosessi

Koivuviilusta valmistetaan koivuvaneria, jota voidaan käyttää kuljetusvälineiteollisuudessa, neste-kaasutankkereiden eristyksessä, rakennusteollisuudessa sekä betonivalumuoteissa (Metsä Wood Punkaharjun tehtaat 2023). Kuviossa 1 on kuvattu Punkaharjun vaneritehtaan tuotannon tärkeimmät työvaiheet ja puutavaran kulku työvaiheesta toiseen.



Kuvio 1. Vanerin valmistuksen työvaiheet.

Tukin käsittely

Viilun tuotanto prosessi alkaa, kun koivu tukkeja tuodaan rekalla tai junalla Punkaharjun Metsä Woodin tehtaille. Kuormat puretaan purkupaikalle joko rekan omalla nosturilla tai kuormurilla. Tämän jälkeen tukit niputetaan sidosketjulla ja siirretään haudonta-altaaseen, jossa koivutukit altistuvat 35–45 asteiselle vedelle, johon on sekoitettu, alumiinisulfaattia, polymeeriä ja lipeää. Koivutukit kelluvat 22 tunnin ajan hautomon vedessä, jonka aikana ne kostuvat läpikotaisin. Hautomisen tarkoitus on pehmentää puuta, jotta sitä on mahdollista sorvata viiluksi. Haudonnasta tukkeja juoksetetaan peräkkäin haudonta-altaan syöttöpäästä poistopäähän, mistä operaattori poistaa si-

dosketjun ja nostaa tukit sorville vieville syöttöpöydälle. (Silvennoinen 2020a.) Kuljettimilla koivutukit kulkeutuvat automaattisen roottorikuorintalaitteen läpi, joka poistaa tukin pinnassa olevan kuoren. Tämän jälkeen kuoritut tukit kulkeutuvat katkaisusahalle. Katkaisusahalla tukit mitataan joko 1620 mm tai 1320 mm mittaan ja leikataan pyörösahalla useaan eri osaan. (Silvennoinen 2012) Leikatut tukit jatkavat matkaansa kahdelle eri sorville liukuhihnaa pitkin. Sorveissa tukista otetaan karoilla sen keskipisteestä kiinni ja sitä pyöritetään terää vasten. Terä leikkaa tukista 1,4 mm paksua viilumattoa, joka leikataan neljään eri mittaan viilun automaattileikkurissa.

- laatu 1. 1620 x 1620
- Laatu 2. 1620 x 1320
- Laatu3. 1320 x 1320
- Laatu4. 1320 x 1620

Leikkurin jälkeen viilut liikkuvat pinkkarille jossa viilut jaetaan koon mukaan neljään eri pinkkaan. (Tynkkynen 2023)

Märkä viilu

Pinkkarilta viilupinkat tippuvat alas traverssille, joka siirtää märät viiluniput poistorullastolle. Kuivausoperaattori siirtää märät viilupinkat sähköisellä haarukkavaunulla kuivauskoneiden vierellä oleville välivarastointi paikoille, josta ne voidaan myöhemmin siirtää kuivaimen alkupäässä olevalle pinkansyöttökuljettimelle. Punkaharjun vaneritehtaalla on kaksi viilunkuivauskonetta, joilla voidaan kuivata sorvilta tulevien märkäviilujen lisäksi myös kerran kuivattua mutta liian märäksi jäänyttä viilua. (Silvennoinen 2020b.) Operaattori seuraa kuivauskoneen alkupäässä viilun laatua ja sen kulkeutumista kuivauskoneen sisälle, jossa märkäviilu kuivataan puhaltamalla kuumaa ja kosteaa ilmaa viilun pintaa vasten. Kuivauskoneesta ulos tullessa viilut lajitellaan visuaalisesti kamerajärjestelmän- sekä kosteusantureiden avulla kahdeksaan eri viilulajiin, viilut lajitellaan eri pinta ja keskiviilu lajeihin sekä märkä viiluksi, jotka kuivataan uudelleen. (Toimintaselostus 1995.)

Viilun käsittely

Kuivatun viilun laadusta riippuen viilut lajitellaan saumattaviksi tai jatkettaviksi. Viilut kuljetetaan trukeilla joko paikkaukseen, pintaviilusaumaukseen, keskiviilunsaumaukseen tai viilun jatkamiseen. Pintaviilut voivat käydä kahdessa eri prosessissa. Ensin pintaviilu kulkee paikkauksen läpi, jossa viilusta paikataan oksanreiät ja muut virheet, jonka jälkeen pintaviilu kuljetetaan saumattavaksi. Saumauksen tarkoitus on sahata viilut oikeaan mittaan, leikata viilusta huonot kohdat pois ja kiinnittää viilun hyvät osat yhteen liimaamalla sauma viilupalojen pintaan. Viilun jatkamisella taas saadaan viiluarkeista pidempiä liimaamalla 2–4 viilua yhteen. (Tynkkynen 2023.)

Vanerilevyn teko

Ladontavalmiit viilupinkat kuljetetaan välivarastoon, josta ne myöhemmin voidaan valita ladottaviksi. Halutun vanerilaadun mukaan oikeat viilulajit valitaan ja tuodaan välivarastosta joko robottiladontaan tai käsiladontaan. Ladonnassa viilut nostetaan linjalle, jossa ne saavat tasaisen liimakerroksen viilun yläpintaan. Liimakerroksen saatua viilut ladotaan päällekkäin halutun levylaadun rakenteen mukaan. Ladonnan jälkeen vaneriaihiot siirretään rullaradan tai traverssin avulla esipuristukseen, jossa viilulevyjä puristetaan suurella paineella. Esipuristuksessa viilut kiinnittyvät alustavasti toisiinsa ennen kuumapuristusta. Esipuristuksen jälkeen vaneriaihiot kuljetetaan kuumapuristukseen, jossa viilut altistuvat kovalle paineelle sekä lämmölle kovettaen liiman lopullisesti. (Tynkkynen 2023.) Kuumapuristuksen jälkeen vanerilevyt siirretään traverssille tai trukilla sahaukseen, jossa vanerilevy sahataan ahiomittaan tai asiakasmittaan. Asiakasmittaan sahatut tuotteet viedään hionnan kautta pakattaviksi, kun taas ahiomittaan sahatut tuotteet kuljetetaan hionnan jälkeen kittaukseen. (Hakkarainen 2023.) Kittaus tapahtuu robottikittaus laitteella, joka kuvaa vanerilevyn pinnassa olevat virheet ja kittaa virheet automaattisesti. Robottikittilaite kittaa levyt yksi puoli kerrallaan, joten levyt käännetään ympäri tähti kääntäjän avulla, jotta niiden pinnan virheet voidaan kitata molemmilta puolilta (Tynkkynen 2023). Kittauksen jälkeen ahiomittaiset levyt hioetaan uudelleen tasoittaakseen levyn pinnan tasaiseksi ennen lajitteluun vientiä (Hakkarainen 2023). Lajittelussa vanerilevyt lajitellaan pinnan laadun mukaan pinnoitukseen- tai jatkokäsittelyyn meneviksi.

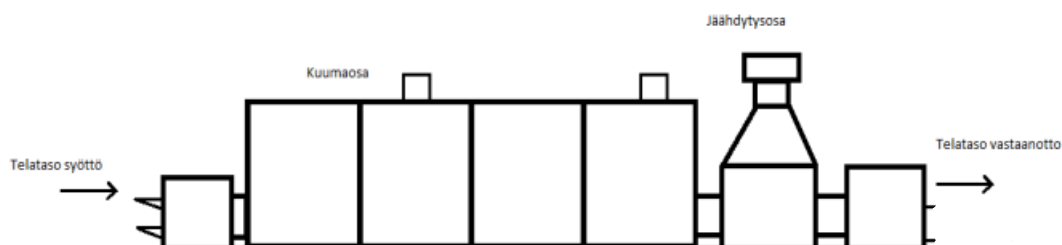
Pinnoitus ja pakkaus

Aihiomittaiset levyt siirretään pinnoituskoneelle, jossa vanerin pintaan liimataan tilauksen mukaan yksi tai useampi kerros erilaisia filmipinnoitteita. Pinnoitus kovetetaan kuumapuristimella levyn pintaan ennen reunasahaukseen menoa, jossa ahiomittaisin levyjen reunat leikataan haluttuun loppumittaan. Reunasahauksen jälkeen vanerilevyt lajitellaan tilausten mukaan reunamaalattaviksi tai suoraan pakattaviksi. Reunamaalauksessa vanerilevyn reunat maalataan vanerilevyn reunasuojaukseksi, jos tilaus näin vaatii. Pakkauksessa valmiit levyt pakataan tilauksen mukaan joko läpinäkyvään tai valkoiseen muoviin, jonka jälkeen valmiit paketit siirretään varastoon odottamaan lähetystä. (Hakkarainen 2023.)

4 Viilun kuivaus- ja lajittelulinja

4.1 Vaneritehtaan viilunkuivauskone 1

Punkaharjun Metsä Woodin ensimmäisen kuivauskoneen on suunnitellut silloinen Lahden Rautateollisuus Oy vuonna 1975. Vaneritehtaan toisen kuivauskoneen on suunnitellut silloinen Raute Oy 1995 (Toimintaselostus 1995). Alun perin ensimmäisellä kuivauskoneella on kuivattu mänty- ja koivuviilua, mutta nykyään kuivauskoneella kuivataan vain koivuviilua. Kuivauskoneet koostuvat viilun syötöstä, viilunkuivaajasta, viilun jäähdyttimestä, viilun poistorullastosta, antureista sekä viilunpin- kaajasta (ks. kuvio 2) (Toimintaselostus 1995).



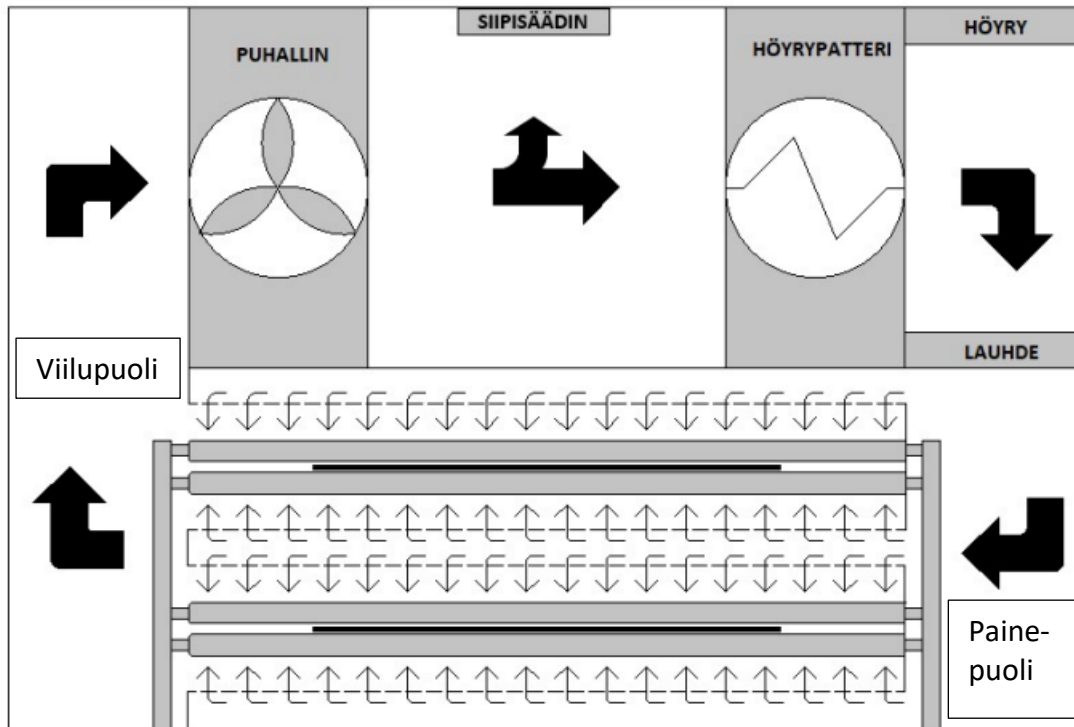
Kuvio 2. Viilunkuivaajan rakenne sivusta (Kauttonen 2014, muokattu)

4.2 Viilun kuivausprosessi

Sorvilta tuleva märkä koivuviilu kuljetetaan joko välivaraston kautta tai suoraan sorvin viilunpinkkaajalta sähköisellä haarukkavaunulla kuivauskoneen pinkansyöttökuljettimelle. Pinkansyöttökuljetin siirtää viiluniput rullakuljettimen avulla nostolavalle. Viilut nostetaan hydraulisella nostolavalla viilunsyöttökoneen korkeudelle, josta paineilma toimiset imulaatikot nostavat viiluarkit pyörivää telaa vasten siirtäen viiluja eteenpäin. Viilut kulkeutuvat viilukuivaajan syöttörullastoille, jotka kuljettavat viiluarkit viilunkuivauskoneen sisään. Viilupinkan loppuessa aluslevy siirretään aluslevyjen poistolaitteelle, joka siirtää aluslevyt rullaston avulla linjaston sivuun, josta ne voidaan kerätä talteen ja käyttää uudelleen. (Toimintaselostus 1995.)

Punkaharjun vaneritehtaalla on kaksi viilunkuivauskonetta. Viilunkuivauskoneella 1 on kaksi viilunsyöttöä, joita kumpaakin vahtii yksi operaattori. Tämä tarkoittaa, että viilua syötetään yhteensä neljään kerrokseen viilukuivauskoneen sisälle. Kuivauskoneella 2 on yksi operaattori, joka vahtii neljään tasoon jakautuvaa viilunsyöttölaitteistoa.

Vaneritehtaan molemmat viilunkuivauskoneet ovat suutinpuhalluksella toimivia telakuivaajia. Kuivauskoneessa on kaksi osiota: kuivausosa, jossa viilut kuivataan kostealla ja kuumalla ilmalla sekä jäähdytysosa, jossa viilut jäähdytetään kuivauksen jälkeen. Viilut kulkevat pyörivien rullien avulla syöttörullastolta kuivauskoneen sisälle neljään eri kerrokseen. Viiluarkit kulkevat kuivauskoneen sisällä telarullastojen avulla eteenpäin. Viiluarkit kuivuvat kuivauskoneen sisällä kiertävän kuumen ja kostean ilman vaikutuksesta. Kiertoilmapuhaltimet puhaltavat höyrypattereilla lämmitettyä ilmaa kovalla nopeudella suutinlaatikoiden läpi viilun ylä- ja alapintaa vasten. Kosteaa ilmaa kierrätetään kuivaimen sisällä uudestaan, mutta osa kosteasta ilmasta johdetaan siipisäätimien avulla kuivaajan katossa oleviin poistokanaviin (ks. kuvio 3). Poistoilman tilalle otetaan korvausilmaa passiivisesti hallin ilmasta. (Toimintaselostus 1995.)



Kuvio 3. Telakuivaajan toimintaperiaate (Kurtti 2018, 11, muokattu)

Kiertoilma kuumennetaan hörypatterilla, jotka sijoittuvat kuivausosan yläosaan kuivausratojen yläpuolelle. Jokaisessa kennossa on yksi hörypatteri, jotka on valmistettu hitsatuista ripaputkireihteistä. Pattereille tulee paineistettua ja kuumaa höyryä voimalaitokselta höyryputkia pitkin. Höyry jakautuu tasaisesti hörypattereille höyrytukin ja jakoputkia pitkin, luovuttaen konvektiolla lämpöenergiaa ripaputkien välissä kulkevaan viileämpään ilmaan. Hörypatterilta tuleva lauhde johdetaan lauhteenpoistimien kautta lauhdetukkiin, joka kulkeutuu jatkoprosesseihin. (Toimintaselostus 1995.)

Kuivausosan jälkeen viilut kulkevat jäähdytysosaan, jossa 25 asteista ilmaa puhalletaan suutinlaatikoiden läpi viulun pintaa vasten. Jäähdytysilma ilma poistuu poistoilmapuhaltimelle jäähdyttimeltä telojen ja suutinlaatikoiden välissä olevien kanavien kautta (Toimintaselostus 1995). Viilujen jäähdytymisen lisäksi viilunjäähdytysosassa viiluarkit lopettavat soluseinämiin sitoutuneen veden haihuttamisen (Mitä puun kuivauksessa tapahtuu). Viilut kulkevat jäähdytyksen jälkeen neljässä kerroksessa purkukuljettimelle, jossa viilut lajitellaan kameran ja kosteusanturin avulla automaattisesti eri visuaalisiin ja kosteus luokkiin. (Toimintaselostus 1995.)

Kuivatut viilut kulkevat antureiden jälkeen rullakuljettimen avulla viilupinkaajalle, jossa kuivattuja viiluja pinotaan kosteuden sekä visuaalisen kunnon mukaan kahdeksaan eri laatuun. Viiluarkit nostetaan alipaineella toimivilla imulaatikoilla sen alapinnassa olevia hihnoja vasten, jonka mukana viilut kulkeutuvat eteenpäin. Jokaisen viilupinkan yläpuolella on paineilmatoiminen painin, jolla viilu irrotetaan hihnoista ja painetaan nostolavalle. Nostolava laskeutuu jokaisen viilun jälkeen, että viilupinkan yläpinta pysyy vakiokorkeudella. Vakio korkeutta valvotaan valokennojen avulla, joka laskee nostolavaa automaattisesti valokennon laser säteen rikkoutuessa. Kun nostolavalle on tippunut tarpeeksi viiluja, lasketaan nostinlava operaattorin toimesta ala-asentoon, josta viilupinka valuu pinkan poistorullastolle. (Toimintaselostus 1997.)

4.3 Kuivauskoneen energiahäviöt

Vaneritehtaassa käytettävät prosessit käyttävät suuria määriä energiaa. Prosessilaitteet ovat isoja ja näin ollen vie paljon sähkö- ja lämpöenergiaa linjastojen pyörittämiseen. Energiaa säästäessä on hyvä löytää prosessin suurimmat energiasyöpöt, sillä niissä on yleensä myös potentiaalisesti isoimmat energiasäästöt. Energy tiedejournalissa (2022) julkaistussa tutkimuksessa mainitaan viilunkuivauskoneen olevan vaneritehtaalla suurin yksittäinen energiaa kuluttava laite. Viilunkuivauskone käyttää tutkimuksen mukaan jopa 70 % koko tehtaan energiankulutuksesta. (Gradov, Yusuf, Ojalainen, Suuronen, Eskola, Roininen & Koiranen 2022.) Punkaharjun vaneritehtaalla kahden kuivauskoneen arvioitu energiankulutus nousee lähemmäs 80 %. Tämä johtuu kuivauskoneiden vanhasta iästä ja näin ollen suuremmasta energiankulutuksesta.

Kuivauskone altistuu myös monenlaisille sähkö- ja lämpöenergian häviöille. Kuivauskoneen suuren koon takia energiahäviö määrät ovat myös määrältään suuria. Kuivauskone kuluttaa suuren määrän energiaa, koska veden haihdutus viilusta on energiakallisprosessi. Tyypillisesti veden haihdutus viilusta tarvitsee n. 600–1000 kWh/m³ energiaa. Tarvittava energian määrä riippuu kuivattavan viilun paksuudesta ja tyypistä. (Lamrani, Kuznik, Ajbar & Bouamza 2021.) Pohjois-Amerikan Raute Oyj:n puheenjohtaja Dronskyn (n.d.) mukaan vanhat kuivauskoneet näyttävät tehottomuuttaan monella tavalla. Tämä johtuu sekä vaneriteollisuuden pitkästä eliniästä sekä investointien puutteesta. Eristeiden puute sekä niiden huononeminen on Dronskyn (n.d.) mukaan yksi syy vanhojen kuivauskoneiden hyötysuhteen heikkenemiselle. Vanhat eristeet voivat tippua ja hajota ajan myötä, kun kuivauskoneen sisäinen kosteus vuotaa eristeiden ja rakenteiden väliin. Eristeiden ja

tiivisteiden hajoaminen mahdollistaa lämmön karkaamisen kuivauskoneen sisältä tehdashallin ilmaan. Lämpö siirtyy ilmaan kuumien rakenteiden kautta konvention avulla tai vuodoista, joista kuivauskoneen sisällä oleva kuuma ilma pääsee vuotamaan ulos. On mahdollista myös, että alun perin kuivauskonetta ei ole eristetty tarpeeksi hyvin ja esim. pohja eristys on jätetty kokonaan asentamatta. Kuuma ilma rasittaa myös kuivauskoneen rakenteita ja mahdollistaa ilmavuotojen syntymisen lämpölaajenemisen takia. (Dronsky n.d.)

Lämpö karkaa kuumasta kuivauskoneesta viileämpään tehdasilmaan termodynamiikan toisesta laista johtuen. Termodynamiikan toisen lain mukaan lämpö pyrkii aina siirtymään kuumasta viileään. (Cengel & Ghajar 2015, 2). Tämän takia kuivauskone pitää eristää vähentääkseen lämmön siirtymistä kuivauskoneen sisältä ulos.

Toinen Patrick Dronskyn (n.d.) mainitsema energiahäviö kohdistuu manuaalisen lämpötilan ja kosteuden säätöön, joka on ollut vanhoissa koneissa normaalia. Manuaalisäädöllä ollessa kuivauskoneen operaattorin pitää seurata ja säätää kuivauskoneen lämpötilaa, kosteutta ja rullaston nopeutta haluttuihin asetusarvoihin. Koska jokainen operaattori käyttää hieman erilaisia säätöjä myös kuivauskoneen sisäinen lämpötila ja kosteus vaihtelee, joka johtaa kuivatun viilun laadun vaihteluun. Kuivauskoneen lämpötilan ja kosteuden automaattille säätäminen tasoittaa viilun laadun tasaisuutta ja tasoittaa kuivauskoneen optimilämpötilaan. (Dronsky n.d.)

Moottorit

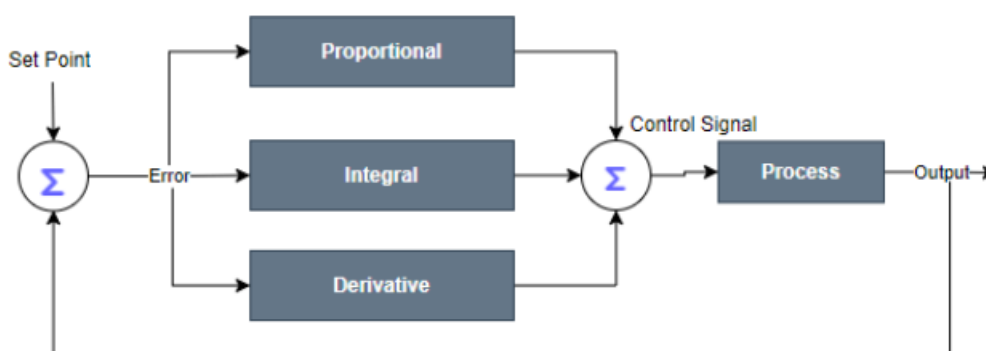
Sähkömoottorit ovat yksi suurimmista kuluttajista maailmassa. Sähkömoottoreita käytetään lähes jokaisella teollisuuden- ja energiantuotannon alalla sekä useissa muissakin laitteissa kuten ilmastoinnissa, tuulettimissa, hisseissä ja pumpeissa (Waide & Brunner 2011, 18). Koska moottoreita käytetään useassa eri laitteessa ja koneessa on sähkömoottoreiden määrä kasvanut suureksi. Euroopan komission (Electric motors and variable speed drives n.d.) artikkelissa mainitaan EU-maissa olevan noin 8 miljardia sähkömoottoria, jotka kuluttavat yhteensä lähes 50 % EU-maiden tuottamasta sähköstä. Tätä tukee myös IEA:n raportti (Waide & Brunner 2011, 11), jonka mukaan sähkömoottorit ja sähkömoottorijärjestelmät kuluttavat arviolta 43–46 % koko maailman sähköntuotannosta. Sähkömoottoreilla hyötysuhde ei ole 100 % joten ne tulevat myös menettämään osan energiasta hukkaenergiana. Eri teholuokituksien mukaan IE1-IE4 sähkömoottoreiden vaatimat

hyötysuhteet ovat 31–96,7 % (IEC 60034-30-1 standard... 2018). Tämänhetkisen EU:n asetuksen mukaan myytävien sähkömoottoreiden hyötysuhdeluokitus tulee olla joko IE2 0,12-0,75 kW tehoisille moottoreille tai IE3 sitä suurempi tehoisille moottoreille. 2023 kesällä tulevan uuden EU:n direktiivin mukaan kaikilla uusilla 75-200KW moottoreilla pitää olla IE4 hyötysuhdeluokitus. (Electric motors and variable speed drives n.d.)

International Energy Agency:n julkaiseman raportin (Waide & Brunner 2011, 11) mukaan ilman toimintatapojen muutosta vuoteen 2030 mennessä elektromagneettisten moottorien energian käyttö tulee nousemaan 13 360 TWh:iin vuodessa ja hiilidioksidin määrä 8570 tonniin vuodessa. Suurten energiamäärien takia jopa pieni moottorien hyötysuhteen parantaminen tulee säästämään suuren määrän energiaa.

5 PID-säädin

PID- ja PI säätimet ovat yleisin tapa säätää laitetta automaattisesti algoritmin avulla maailmassa. Åströmin (2002) mukaan 95 % kaikista säätöpiireistä käyttää jonkinlaista PID-säädintä prosessin ohjauksessa. PID-säädin koostuu P- (suhde), I- (integroivasta) ja D (derivoivasta) osasta. Ohjaimen P, I ja D osan toiminnan ohjaus perustuu nykyhetkeen, menneisyyteen sekä tulevaisuuteen. PID-säädin toimii saamalla sensorilta sen mitattaman suureen ja säätämällä säätimen asetettujen parametrien mukaan suureen asetettuun asetusarvoon. Algoritmi laskee suhde-, integraali- sekä derivaatta osan avulla tuloksen, jolla ohjelma säätää sen ohjaamaa laitetta. (Åström 2002, 216–217.) Kuvio 4 kuvaa yksinkertaisen PID-säätimen toimintaperiaatetta, jossa vasemmalta tuleva tilatiieto menee P, I ja D säätimen läpi joiden yhteenlasketusta summasta tulee PID-säätimen lähtö.



Kuvio 4. PID-lohkokaavio (What is PID Controller: Working, Types & Its Applications 2022)

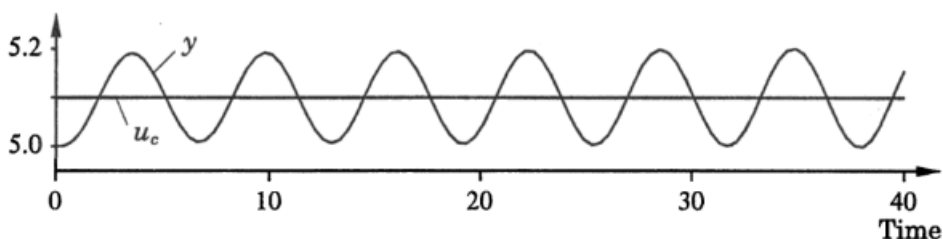
PID-säätimen kyky kattaa laaja valikoima ohjausongelmia on vaikuttanut sen maailmanlaajuiseen suosioon. Nykyään PID-säätimet toimivat mikrosirulla, joka on antanut kätevän tavan adaptiivisten järjestelmien toteuttamiselle. PID-säätimiä käytetään sekä yksittäisten laitteiden säädössä, että isojen prosessikonaisuuksien prosessiohjausjärjestelmänä. PID-säätimiä käytetään useissa eri käyttötarkoituksissa esimerkiksi lentokoneen autopiloteissa, liiketunnistimissa, teollisuusrobo-teissa, moottorin ohjauksissa, sulatusuuneissa ja ilmastoinnissa. (Åström & Wittenmark 2008, 500.)

Åströmin ja Wittenmarkin (2008) mukaan PID-säätimiä, joita ohjataan parametreilla, voidaan virit-tää manuaalisesti, jos niillä ei ole liikaa vuorovaikutusta toisiinsa. Pienemmissä säätöpiireissä, joissa on yhdestä kolmeen parametria, on tämä mahdollista. Monimutkaisemmissa säätimissä ma-nuaalinen viritys ei ole mahdollista. Tällöin käännytään yleensä automaattisen virituksen puoleen, jossa PID-säädin kytketään päälle ja sen annetaan mukautua niin pitkään, kunnes haluttu suoritus-kyky saavutetaan. Tämän jälkeen mukautuva säädin irrotetaan ja PID-säädin jätetään toimimaan kiinteillä säädinparametreilla. (Åström & Wittenmark 2008, 501.)

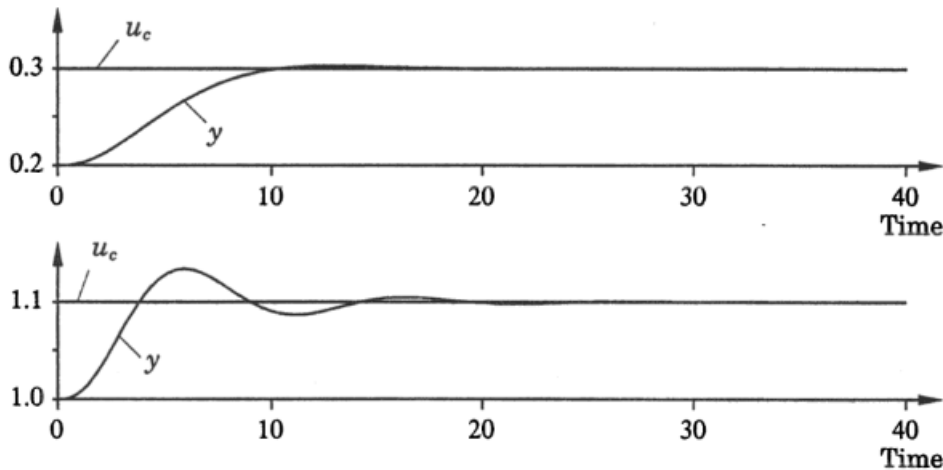
PID-säädintä säätäessä haluttu suure yritetään säätää haluttuun tavoitearvoon ja välttää aaltoile-mista tai ylivoimennettua säätöä. Säädintä viritetään siten, että yli- ja aliampuminen jäisi mahdolli-sen vähäiseksi ja liika vaimennusta ei tapahtuisi. Kuviossa 5 nähdään PID-säätimen aaltoilua, jossa suureen ohjaus ei tasoitu haluttuun tavoitearvoon vaan jatkaa yli- ja aliampumista ja kuviossa 6 nähdään kaksi onnistunutta PID-säätimen säätöä.

U_e = suureen tavoitearvo

y = suureen todellinen arvo



Kuvio 5. Aaltoileva PID-säätö (Åström & Wittenmark 2008, 11)



Kuvio 6. Toimivat PID-säädöt (Åström & Wittenmark 2008, 11)

6 Kuivauskoneen energiatehokkuuden parantaminen

6.1 Lämpötilasäädön automaatio

Ensimmäiseksi energiansäästö kohteeksi kohdistui viilunkuivauskoneen 1 lämpötilan säätö PID-säätimen avulla. Kuivauskoneen lämpötilaa ohjataan manuaalisesti säätämällä tietokoneen käyttöliittymässä olevaa höyryn säädintä. Höyryn säätö ohjaa kuivauskoneelle olevaa päähöyryventtiiliä, jota suljettiin tai avattiin lämmöntarpeen mukaan. Operaattori valvoo kuivauskoneen lämpötilaa ja höyrymäärää tietokoneella olevan käyttöliittymän avulla ja saa näin ollen tiedon kuivauskoneen sisäisestä lämmöstä ja kosteudesta. Operaattorin näytössä näkyy kuivauskoneen lämpötila, kosteusarvot, siipisäätimien asennot, höyrymäärän sekä päähöyryventtiilin asento.

Lämpötilasäädön muuttaminen automaatille vähentää energiatarpeen määrää optimoimalla höyryntarpeen määrää kuivauskoneella. Operaattoreiden haastattelussa tuli ilmi, että jokaisella kuivauskoneen operaattorilla on oma lämpötila, jossa he kuivaavat märkäviilua. Operaattorit kertoivat pitävänsä kuivauskonetta n. 3–5°C kuumempina kuin mikä optimi viilunkuivauslämpötila on. Haastatteluissa tuli myös ilmi korkeita kuivauskoneen lämpötilan heittelyitä ja niiden syitä. Yksi syistä kuivauskoneen hetkelliselle lämpötilan nousulle kuivauskoneen sisällä oli rullastojen pysähtykset alku- tai loppupäässä. Rullastojen pysähtyttyä märkäviilu hidastaa kosteuden luovutusta kuivauskoneen sisällä, joka nostaa kuivauskoneen sisäistä lämpötilaa. Vastaavasti kun kuivausko-

neen rullasto jatkaa pyörimistä ja uutta märkäviilua syötetään kuivauskoneen sisälle, nousee kuivauskoneen sisäinen kosteus samalla viemällä ilmasta lämpöenergiaa ja laskemalla kuivauskoneen sisäistä lämpötilaa.

Lämpötilan automatisoiminen PID-säätimen avulla vähentäisi kuivausoperaattorin jatkuvaa höyryventtiilin asennon muuttamista. Tämä vähentäisi tilanteita, jolloin operaattori ei huomaa kuivauskoneen lämpötilan nousua tarpeeksi ajoissa, jolloin kuivauskoneen lämpötila nousee lähelle viilun syttymislämpötilaa. PID-säätimen avulla pystytään myös pitämään kuivauskoneen sisäinen lämpötila lähempänä haluttua asetuslämpötilaa. Operaattoreiden ei pidä kuitenkaan luottaa sokeasti PID-säätimen lämpötilasäätöön, vaan on heidän vahdittava lämpötilaa käyttöliittymästä poikkeusten varalta.

6.2 Automaattinen säätö

6.2.1 Lähtöasetelmat

Viilunkuivauskoneen 1 lämpösäätöjen automaattiajon testaus suoritettiin 8.2 – 27.4.2023 välisenä aikana. Alussa kartoitettiin viilunkuivauskoneen 1 normaali operointi tilanne haastattelemalla kuivauskoneen operaattoreilta heidän käyttämiä asetuksia. Haastattelussa tiedusteltiin kuivauskoneen ajolämpötiloja sekä tilanteita, jotka vaikuttavat kuivauskoneen lämpötilan vaihteluun. Haastattelussa kysyttiin operaattoreilta myös kuivauskoneella tapahtuvien poikkeustilojen vaikutusta kuivauskoneen lämpötilaan sekä kuivausilman kosteuden määrään. Lämpötilan manuaalisäätö toteutetaan tietokoneella olevalla käyttöliittymän avulla suurentamalla tai pienentämällä kuivauskoneelle tulevan päänhöyryventtiilin asentoa. Päänhöyryventtiili säätelee kuivauskoneelle tulevan tulistetun höyryn määrää, joka vastaavasti lämmittää kuivauskoneessa olevaa ilmaa ripaputkisten höyrypattereiden avulla.

Manuaalisäädöllä operaattorit kuivasivat koivuviilua normaalisti 175–185°C lämpötilassa. Korkeat kuivauslämpötilat johtivat ylikuivaan viiluun, jolloin kosteusanturi näytti viilun kosteusprosentiksi n. 2 %. Tyypillisesti kuivauskoneen loppulämpötila oli asetettu 178–182-asteeseen, joka on 2–6°C korkeampi kuin ideaali viilunkuivauslämpötila viilunkuivaimessa 1. Rullaston pysähtyessä kuivauskone koki myös lämpöpiikkejä, joissa kuivauskoneen sisäinen lämpötila nousi tyypillisesti yli 185°C.

Automaatti asetusten tarkoituksena oli säätää viilunkuivauslämpötilaksi 176°C ja vähentää korkeiden lämpötilapiikkien määrää kuivauskone rullastojen pysähtyessä.

6.2.2 Alustavat testit

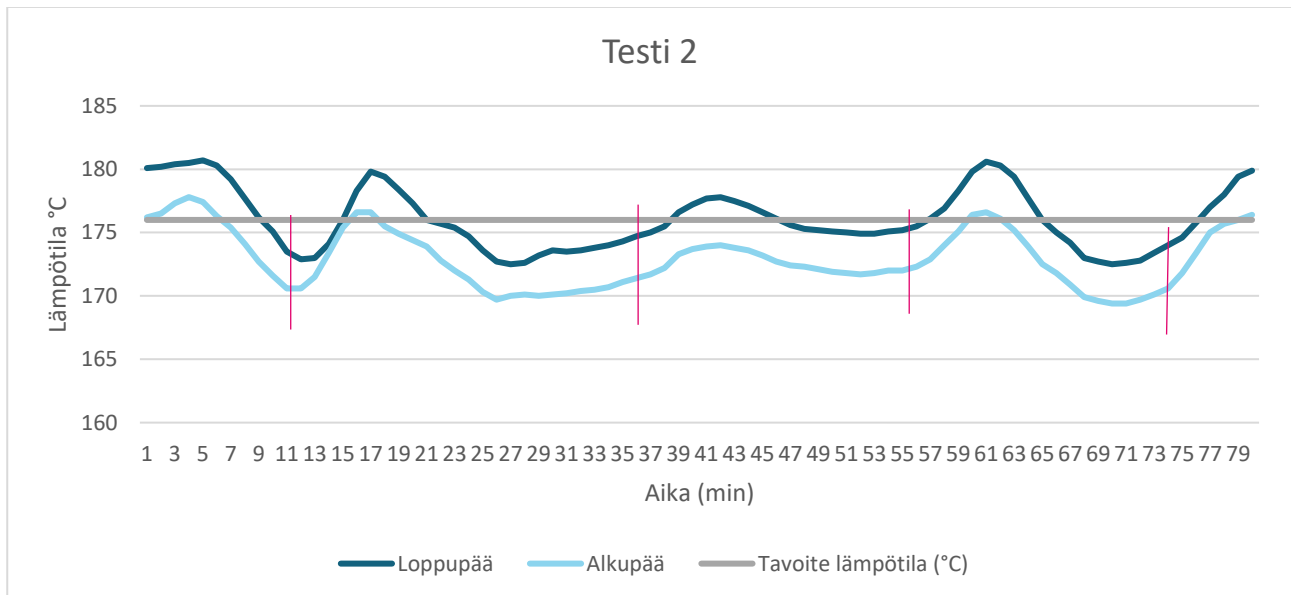
Kuivauskoneella 1 alettiin testaamaan lämpötilan automaattiajaja 8. helmikuuta 2023. Alustavia testejä tehtiin eri PID säädöillä yhteensä 11 kappaletta. PID säätimen lämpötilan automaatio testeissä muutettiin kerralla vain yhtä parametria saadakseen paremman ymmärryksen muutoksen vaikutuksesta kuivauskoneen lämpötilavaihteluun. Alustavissa testeistä kirjattiin ylös minuutin välein kuivauskoneen kuumaosan alku- ja loppupään lämpötila, kuivauskoneeseen syötettävän märkäviilun laatu, sekä kuivauskoneen loppu- ja alkupään rullaston pysäytykset. Alustavat testit kestivät noin 1–1,5 h, jonka aikana saatiin lämpötilakuvaajan avulla seurattua PID säädön aiheuttamaa lämpötilavaihtelua. Alustavien testien aikana seurattiin myös kuivatun viilun kosteus-% ja uudelleen kuivattavien viilujen määrää. Testien aikana kuitenkin huomattiin, että lämpötilan alentaminen 176-asteeseen ei kasvattanut märkien viilujen määrää.

Onnistuneissa testeissä kuivauskoneen lämpötila ei muuttunut ajon aikana asetustilasta enempää kuin $\pm 5^{\circ}\text{C}$ asetustilasta eikä tulohöyryn määrä muuttunut radikaalisti. Testien tulokset riippuivat kuitenkin suurimmalta osin kuivauskoneen keskeyttämättömästä ajosta. Myöhemmin parhaan alustavan testin säädöstä tehtiin pidempi 24 h mittainen testi, joka kuvaa paremmin kuivauskoneen päivittäisen kuorman aiheuttamaa lämpötilan ja höyrymäärän vaihtelua. 24 h testeistä ei kuitenkaan saada kuivauskoneen lämpötilan tietoa, joten tarkkailussa käytetään voimallaitokselta saatavaa höyryn kulutuksen vaihtelua sekä operaattoreiden huomioita testin onnistumisen määrittelyssä.

Ensimmäinen testi aloitettiin kuivauskoneen PID-säätimessä olevilla alkuperäiskertoimilla, josta lähdettiin tulosten perusteella muuttamaan P-, I- ja D-arvoja. Ensimmäisessä testissä huomattiin PID-säätimen hidas reagointi kuivauskoneen sisäisen lämpötilan vaihteluun, joka aiheutti kuivauskoneen suuret lämpötilan nousut ja laskut ennen kuin PID säädin ehti reagoida lämpötilan muutokseen. Tämän johdosta seuraavissa testeissä alettiin nopeuttamaan PID-säätimen integrointiaikaa I alkuperäisestä 40 sekunnista ensin 30 sekuntiin ja myöhemmin 20 sekuntiin. Integrointiajan huomattiin nopeuttavan PID-säätimen reagointia kuivauskoneen korkeisiin lämpötilan nousuihin ja vähentävän lämpötilapiikkien kestoja. Tämän lisäksi PID-säätimen huomattiin alkavan säätämään

höyryventtiilin asentoa toiseen suuntaan vasta kuivauskoneen lämpötilan ohitettua asetettu tavoitelämpötila. Tämä johti esim. lämpötilan laskemiseen reilusti tavoitearvon alle korkean lämpötilapiikin jälkeen. Tämän johdosta PID-säätimen derivaattaa eli ennakointia kasvatettiin 2 sekunnista 5 sekuntiin. Kuudennessa testissä testattiin myös P-arvon eli suhteen kasvattamista 0,1 yksiköllä, kasvattaaksemme höyryventtiilin asennon muutoksen nopeutta. P-arvon säätö kuitenkin palautettiin takaisin sillä se kasvatti epätoivottua höyrymäärän vaihtelua.

Kaaviossa 1 näkyy testistä 2 tehty lämpötilakuvaaja. Kuvaajassa nähdään lämpötilan vaihtelu kuivauskoneen sisällä alku- ja loppupäässä. Kuvaajassa huomataan myös, kuinka kuivauskoneen rullastojen pysäytykset, jotka on kuvattu pystyviivoilla vaikuttavat kuivauskoneen lämpötilan nousuun.



Kaavio 1. Lämpötilan automaattiajon testi 2.

6.2.3 Pidennetyt testit

Ensimmäinen viilunkuivauskoneen 1 24 h lämpötilan automaattiotesti tehtiin 23.2–24.2. Testin aikana ei kirjattu ylös kuivauskoneen lämpötiloja, mutta voimalaitokselta saatiin kerättyä höyrynkulutuskaavio. Testin aikana huomattiin höyryn tarpeen alitoilua, joka viittaa myös kuivauskoneen lämpötilan alitoilemiseen. Höyryn alitoilemista tapahtui lähes koko testin ajan. Testi jouduttiin

myös keskeyttämään seitsemäksi tunniksi alatasen rullan hajoamisen takia. Testiä jatkettiin myöhemmin ajamalla kuivauskonetta pelkästään ylätasolla testin viimeiset 4 h. Yhtä tasoa ajettaessa höyrynkulutus sekä kuivauskoneen lämpötila pysyi tasaisena. 24 h testin tuloksia tutkittiin myöhemmin tarkemmin ja löydettiin yhteys kuivauskoneen pysäytyksille ja kuivauskoneen höyrymäärän vaihteluille.

Seuraavat pidennetyt testit tehtiin 17–20.4 välisenä aikana. Automaatio testejä ei voitu tehdä maaliskuun aikana, sillä kuivauskoneen tulohöyryventtiilille ilmeni höyrynsäätöongelmia. Ongelmat estivät automaatiotestien tekemisen, mutta ne saatiin korjattua huhtikuun aikana. Huhtikuun pidennetyt testit olivat 6 h mittaisia, jotta kuivauskoneen lämpötiloja sekä höyrymääriä voitiin seurata paikan päällä. Testejä tehtiin yhteensä 4 joiden välillä PID-säätimen asetuksia ei muunneltu. Ennen testiä PID-säätimen kertoimia kuitenkin muokattiin edellisen 24 h testin tulosten pohjalta. PID-säätimeen ohjelmoitiin myös höyryventtiilin min.- ja max. asennoiksi 20 % ja 80 %. Ohjelmoinnilla pyrittiin estämään PID-säätimen liika tulohöyryventtiilin avaaminen tai sulkeminen. Min.- ja max. asennoiksi valittiin arvot, joilla kuivauskone pystyy jäähtymään ja lämpenemään, mutta estetään PID-säätimen ajamasta tulohöyryventtiiliä täysin kiinni tai auki.

6 h mittaisissa testeissä oli samanlaisia ongelmia kuin aiemmissa testeissä. Vaikka kuivauskoneen sisäinen lämpötila pysyi testien aikaan noin $\pm 4^{\circ}\text{C}$ asetusarvosta, oli testissä enemmän ongelmia kuivauskoneen höyrymäärän vaihtelussa. Hetkellisesti höyrymäärät voivat pysyä tasaisina, mutta kuivauskoneen rullaston pysähtyessä poikkeustilanteissa, kerkeää kuivauskoneessa kosteus laskea ja kuivauskoneen lämpötila nousta. PID-säätimellä kestää korjata lämpötilan muutos takaisin asetusarvoon n. 10min, jolloin yleensä tapahtuu seuraava rullaston pysähdys. Pysäytykset johtuvat yleensä kuivauskoneen poistorullastolla tapahtuvasta tilanteesta, jolloin esim. kuivattu viilu jää juumiin rullastolle tai kuivauskoneen syöttöpäässä tapahtuvasta pysäytyksestä. Rullastojen pysäytykset kestävät yleensä n. 1-5min.

Kuivauskoneen lämpötilan automaatiota PID-säätimen avulla ei saatu vietyä opinnäytetyön aikana loppuun. Ongelmaksi syntyi kuivauskoneen höyrymäärän liika vaihtelu ajon aikana. Höyrymäärän vaihtelun vähentämiseksi nostetut ehdotukset olivat: asentaa lisäkosteutus kuivauskoneen sisälle, jolla estetään kosteuden pakenemista kuivauskoneen sisältä tuomalla lisää kosteutta kuivauskoneen sisälle ja samalla estämällä kuivauskoneen sisäisen lämpötilan nousu rullaston pysähtyessä.

Tämä vähentäisi PID-säätimen tekemää höyryventtiilin asennon muutosta, sillä kuivauskoneen sisäinen lämpötila ei nouse niin korkealle. Lisäksi ehdotettiin ideaa laskea voimalaitokselta tulevaa höyryn lämpötilaa n. 200-asteista 180-asteeseen, jolloin kuivauskoneelle tuleva höyry olisi lähempänä kuivauskoneen asetuslämpötilaa. Kuivauskoneen lämpötilaa voitaisiin ohjata reduktioventtiilin kautta muuttamalla kuivauskoneelle tulevan höyryn painetta.

6.2.4 Automaation energiansäästö

Automaatiosta syntyvä energiansäästö laskettiin kuivauskoneen lämpötilan alentamisesta johtuvasta kokonaishöyrymäärän vähenemisestä. Kuivauskoneelta tarkasteltiin normaalissa ajossa käytettävä höyrymäärä, kun kuivauskone on 180-asteen- sekä 176-asteen lämpötilassa. Höyrymäärä vaihtelee riippuen kuivauskoneen sisällä olevasta kuormasta, mutta höyrymäärän ero lämpötilojen välillä pysyy samana. Tarkastelussa tarvittava höyrymäärä 180°C ylläpitämiseen oli 8,08 t/h ja 176°C ylläpitämiseen oli 7,54 t/h. Energiamäärän säästö lasketaan kaavalla 1,

$$E = m * (h_1 - h_2) \quad (1)$$

Jossa E= Energiamäärä

m= Höyryn määrä (kg/a)

h_1 = Höyryn entalpia (200°C ja 15,549 bar)

h_2 = Höyryn entalpia (150°C ja 4,76 bar)

Ensin höyryn määrästä lasketaan lämpötiloihin vaadittavan höyryn käytön erotuksesta syntyvä massa, joka kerrotaan kuivauskoneen käyttötunneilla, saadaksemme vuotuisen höyryn määrän. Laskuissa käytetään kuivauskoneiden suunniteltua vuotuista käyttötuntimäärä eli 5720 tuntia. Höyrymäärät saatiin tarkastelemalla viilunkuivauskoneella 1 normaalin operoinnin aikana vaadittavaa höyrymäärää ylläpitääkseen viilunkuivauskoneen loppupään lämpötilana 180°C ja 176°C. On kuitenkin huomioitava, että kuorman muuttuessa myös tarvittavan höyryn määrä tulee muuttumaan.

$$(8,08 \text{ t/h} - 7,54 \text{ t/h}) * 5720 \text{ h} = 3088800 \text{ kg/a}$$

Höyryn entalpia saadaan termodynamiikan taulukosta katsomalla kylläisen höyryn entalpia lämpötilassa 200°C ja vähentämällä se lauhdeveden lämpötilassa 150°C.

$$3088800 \frac{\text{kg}}{\text{a}} * \left(2792 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 632,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1853,1 \text{ MWh/a}$$

Kuivauskoneen lämpötilan laskeminen 4-asteella, toi huomattavat energiansäästöt vuodessa.

Tämä johtuu vähennetyn höyryn määrän tarpeesta pienemmällä lämpötilalla. Käyttäen vaneritehtaan muunneltua 45 €/MWh höyryn hintaa, vuotuiset rahalliset säästöt höyrymäärän laskemisella ovat 83391 €, joten saatavat säästöt viilunkuivauskoneen 1 lämpötilan alentamisella ovat huomattavat. Laskuissa oli oletettu viilunkuivauskoneen 1 operoivan manuaaliohjauksella 180°C lämpötilassa. Operaattorien haastatteluissa kuitenkin tuli ilmi, että kuivauskoneen ajolämpötila liikkui 176–182-asteen välillä, lämpötilaa ohjaavasta operaattorista riippuen. Tämän takia laskuista saattua lämpöenergian säästöä voidaan pitää vain suuntaa antavana.

6.3 Kuivauskoneen eristeet/tiivisteet

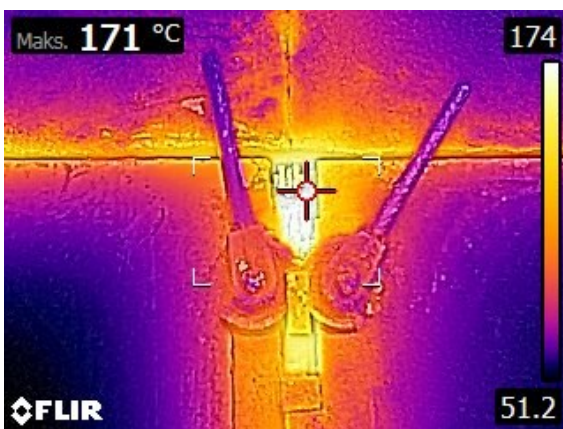
6.3.1 Alustava tutkimus

Kuivauskonetta 1 tarkemmin tutkiessa havaittiin kuivauskoneen ovien tiivisteiden lämmön- ja ilman vuotaminen halli-ilmaan. Kuivauskoneen 1 lähiympäristön havaittiin olevan merkittävästi lämpimämpi kuin uudemmalla kuivauskoneella 2. Molemmilla kuivauskoneilla kuivataan märkää koivuviilua samalla lämpötilalla, joten kuivauskoneen sisäinen lämpötilaero poistettiin syynä. Visuaalisesti tutkimalla huomattiin monen oven ympärillä olevien tiivisteiden huono kunto, joten kohdistimme tarkemman tarkastelun kuivauskoneen ovien ilman- ja lämmönvuotoon. Kuviossa 7 nähdään esimerkki joidenkin tiivisteiden huonosta kunnosta.

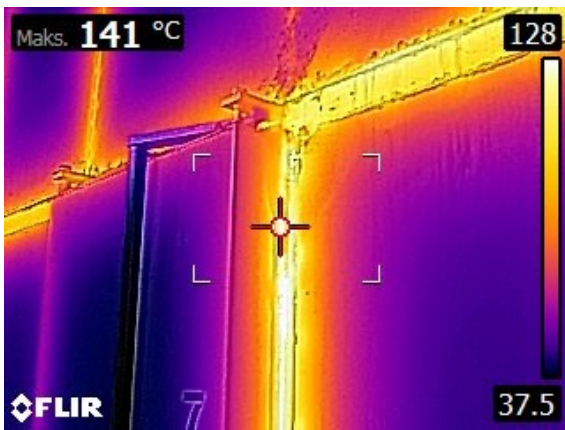


Kuvio 7. Viilunkuivauskoneen rikkinäinen tiiviste

Lämpökameralla tutkimalla selvisi kuivauskoneen 1 ovien ympäryksien olevan selvästi kuumempia kuin kuivauskoneen 2. Kuviossa 8 nähdään kuivauskoneelta 1 otetun kuumimman oven reunan lämmön määrä. Verrattuna kuvioon 9, joka on otettu kuivauskoneen 2 kuumimmasta oven reunasta. Kuvioita vertaamalla voimme huomata selvän lämpötilaeron. Keskiarvoltaan kuivauskoneen 1 ovien ympäryks oli n. 20°C kuumempi kuin kuivauskoneella 2. Kuivauskoneen 1 ovien reunojen korkeat lämpötilat selittyvät sillä, että niitä ei ole eristetty ollenkaan kuivauskoneen sisäilmasta. Reunat ovat rakenteellisia osia, jotka ovat paljaina kuivauskoneen sisäpuolella sekä ulkopuolella.



Kuvio 8. Viilunkuivauskoneen 1 oven reunan lämpötila



Kuvio 9. Viilunkuivauskoneen 2 oven reunan lämpötila

Kuivauskoneen 1 painepuolella sijaitsevien ovien reunat olivat keskiarvoltaan kuumemmat kuin viilupuolella olevien ovien reunat, mutta lämpötilaerot kuivauskoneiden välillä silti pysyivät. Ovien reunoissa näkyi myös kertynyttä purua, jotka liikkuvat ilmavirrassa viitaten selvästi kuivauskoneen sisältä tulevaan vuotoilmaan. Ilmavuotojen havainnoinnin jälkeen Ilmavuodot kartoitettiin alustavasti vahvistamalla ilmavirtauksen suunta ja määrä paperilapun avulla, jonka jälkeen kuivauskoneen ovista mitattiin ilmavirtamittauksen määrä Testo 410–1 ilmavirtausmittarin avulla, jonka mittausalue on 0,4–20 m/s ja sen tarkkuus on 0,1 m/s. Ilmavirtausmittarin korkea mittausalueen alaraja estää saamasta tarkkoja mitta-arvoja lievästi vuotavista kohdista. Vuotoilman testauksessa ei voitu eristää yhtä ovea kerralla, joten mittaus tehtiin liikuttamalla ilmavirtausmittaria oven reunaa pitkin. Molemmat syyt estävät tarkkojen mittaustulosten saamisen, joten vuotoilmasta laskettavien energiahäviöiden määrää pidetään vain suuntaa antavana. Vuotoilman mittaukset tehtiin vain kuivauskoneen painepuolella oleville oville, sillä kuivauskoneen viilupuolelta ei voitu saada tarpeeksi tarkkoja mittaustuloksia. Viilupuolen ovien mallit estivät ilmavirtausmittarilla vuotoilman mittauksen, joten vuotoilman energiahäviö laskut koskevat vain kuivauskoneen 1 painepuolen ovia. Mitattuja ovia oli yhteensä 44, joista jokainen vuoti eri määrän ilmaa. Mittauksen aikana ilmavirtausmittaria siirrettiin ovien reunoja pitkin tasaisella nopeudella, jolloin jokaisesta ovesta saatiin mitattua Testo 410–1 ilmavirtausmittarilla vuotoilman keskimääräinen nopeus sekä maksimi nopeus. Kuviossa 10 näkyy osa kuivauskoneen 1 ovista, jossa lämpövuotojen kohdat on merkitty keltaisella värillä. Ovien väleistä mitattiin myös ilmavuotojen määriä.



Kuvio 10. Lämpökamerakuva viilunkuivasukoneen 1 ovista

6.3.2 Vuotoilman laskut

Testo 410–1 ilmapvirtausmittari mittaa vain ilmapvirtauksen nopeuden, joten vuotoilman määrän saamiseksi kerrottiin jokaisesta ovista saatavan vuotoilman nopeus oven reunan pinta-alalla. Oven reunan pinta-ala mitattiin kaavalla 2, jossa oletettiin oven raon leveydeksi 1 mm, koska todellista rakoa ei ollut mahdollista mitata.

$$A = p * l \quad (2)$$

Jossa A = Oven raon pinta-ala

p = Oven reunan piiri

l = Oven raon leveys

Yhden oven raon pinta-alaksi tuli $0,00608 \text{ mm}^2$. Seuraavaksi laskettiin ovien vuotoilman keskimääräiset ilmannopeudet yhteen ja kerrottiin oven reunan pinta-alalla. Laskusta saadaan tulokseksi kaikkien painepuolella olevien ovien kokonaisilmapirta sekunnissa.

$$(0,3 + 0,3 + \dots 0,7) \text{ m/s} * 0,00608 \text{ mm}^2 = 0,047424 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tämän jälkeen kokonaisilmavirtauksesta laskettiin kuivauskoneen vuotoilman määrä vuodessa.

$$0,047424 \text{ m}^3/\text{s} * 3600\text{s} * 5720\text{h} = 976555 \text{ m}^3/\text{a}$$

Vuotoilman määrä vuodessa muunnetaan kuutiosta kiloiksi kertomalla vuotoilman määrä ilman tiheydellä 176-asteessa. Ilman tiheys tarvittavissa lämpötiloissa saadaan käyttämällä ilman tiheys laskuria (Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure, 2003).

$$976555 \text{ m}^3/\text{a} * 0,785 \text{ kg}/\text{m}^3 = 766596 \text{ kg}/\text{a}$$

Viilunkuivauskoneessa oletettiin kosteudeksi 400 g/kg. Tämä tarkoittaa, että jokaisessa kilossa ilmaa on 400 g vettä haihtuneena, joka vastaa 40 %. Vuotoilma laskuissa piti ottaa huomioon veden määrä ilmassa ja laskea erikseen veden ja ilman hukkaenergia. Vuotoilmasta ilman osuuden kokonaisenergiämäärä laskettiin kaavalla 3, taulukkoon 1. Vuotoilman kokonaisenergiämäärässä laskettiin, kuinka paljon energiaa tarvitaan lämmittämään vastaava määrä ilmaa takaisin kuivauskoneen operointilämpötilaan.

$$Q = m * c_p * (T1 - T2) \quad (3)$$

Jossa Q = Energian määrä (kJ/a)

m = Ilman massa vuotoilmassa (kg/a)

c_p = Ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/(kg*°C))

$T1$ = Kuivauskoneen sisäinen lämpötila (°C)

$T2$ = Halli-ilman lämpötila (°C)

Energiahäviö		
ilman tiheys (176 C)	0,785	
Cp	1,005	kJ/kg, K
Kokonais ilman määrä	976555	m ³ /a
Ilman määrä (60 %)	459957	kg/a
Lämpötila		
Kuivauskone	176	°C
Halli-ilma	35	°C
Energian kulutus	65178264,61	kJ/a
Höyryn hinta (2022)	45	€/MWh
Häviö	18	MWh/a
Häviö	815	€/a

Taulukko 1. Energiahäviön ilman osuus

Vuotoilman veden kokonaisenergian osuus laskettiin kaavalla 4, taulukkoon 2.

$$Q = m * (h_1 - h_2) \quad (4)$$

Jossa Q = Energian määrä (kJ/a)

m = Veden massa vuotoilmassa (kg/a)

h₁ = Haihtuneen veden entalpia (100°C ja 1 bar)

h₂ = Nestemäisen veden entalpia (35°C ja 0,06 bar)

Energiahäviö		
ilman tiheys (176 C)	0,785	
Cp	1,005	kJ/kg, K
Kokonais ilman määrä	976555	m ³ /a
Veden määrä (40%)	306638	kg/a
Entalpiat		
Haihtunut vesi 100°C	2256,4	kJ/kg
Vesi 35°C	146,64	kJ/kg
Energian kulutus	650167827,6	kJ/a
Höyryn hinta (2022)	45	€/MWh
Häviö	180,6	MWh/a
Häviö	8127	€/a

Taulukko 2. Energiahäviön veden osuus

Viilunkuivauskoneen 1 vuotoilman määrä on huomattava. Kokonaisuudessa kuivauskone menettää vuodenaikana vuotoilman kautta halli-ilmaan 199 MWh lämpöenergiaa. Suurin osa energiasta karkaa viilunkuivauskoneen kosteuden mukana, sillä veden lämmön nostaminen on energia vaativampi prosessi, kuin ilman lämmön nostaminen operointi lämpötilaan. Laskemalla muokatulla, mutta realistisella 45 €/MWh höyryn hinnalla rahallinen säästö vuotokohtien paikkauksilla olisi vuodessa 8942 €. Pienen rahallisen säästön takia ei ole kannattavaa korjata kaikkia vuotavia ovia, vaan paikata suurimmat vuotokohtat. Ilmavirtauksia tehdessä huomattiin tiettyjen ovien vuotavan selvästi enemmän ilmaa halliin kuin toiset. Suurin yksittäinen mitattu vuoto oli 4,6 m/s, joka vuoti n. 10 cm alueella oven alaosassa. Vaikka vuoto kohdistui vain pienelle alueelle, se vastasi suuren osan oven vuotoilman keskiarvosta. Tämän takia kannattavinta on paikata ovet, joissa on yksittäisiä isoja vuotokohtia, jotka vastaavat eniten vuotoilman kokonaismäärästä. On myös huomioitava se, että kuivauskoneen vuotoilmaa ei mene kuitenkaan täysin hukkaan sillä sitä käytetään epäsuorasti halli-ilman lämmittämiseen talvella.

Ensimmäinen ja halvin keino vähentää vuotoilman määrää on vaihtaa huonosti tiivistäviä tiivisteitä uusilla. Tämä ei kuitenkaan toimi aina sillä kuivauskoneen ovi voi olla vääntynyt pysyvästi iskun tai lämpölaajenemisen takia. Näissä tilanteissa on mietittävä, onko oven korjaaminen tai vaihtaminen kannattavaa vuotoilma määrän vähentämiseksi.

6.3.3 Konvektio laskut

Viilunkuivauskoneen 1 ovien ympärystä laskettiin konvektiolla karkaavan lämpöenergian määrä vuodessa. Ovia ei otettu laskuihin mukaan sillä lämpökamerakuvista nähtiin viilunkuivauskoneen 1 ovien olevan saman lämpöiset kuin uudemman viilunkuivauskoneen 2. Molempien kuivauskoneiden ovien lämpötilat olivat n. 40°C eli vain hieman enemmän kuin kuivauskoneen ympärillä olevan halli-ilman lämpötila.

Viilunkuivauskoneen 1 lämpöhäviöitä alettiin laskemaan ensin mittaamalla ovien väleissä olevien rakenteiden mitat ja laskemalla lämpötilan vuotojen alueen pinta-ala kaavalla 5. Ovia oli kahta erityyppistä, joten molemmista laskettiin oven välisten rakenteiden pinta-ala erikseen.

$$A = A_1 - A_2 \quad (5)$$

Jossa A = Oven ympäryksen pinta-ala

A_1 = Oven ympäryksen kokonaispinta-ala ovi mukaan lukien

A_2 = Oven pinta-ala

Taulukossa 3 on laskettu ovien reunusten rakenteiden pinta-alat.

Ovien tyypit	Ovi 1	Ovi 2	
Pinta-ala	0,344	0,339	m ²
Ovien määrä	12	76	kpl
Pinta-ala yhteensä	4,1	25,8	m ²

Taulukko 3. Reunusten pinta-alat

Pinta-alojen avulla voidaan laskea erikseen kuivauskoneen lämpöhäviöt pinnasta kaavan 6 avulla. Kaavalla lasketaan ensin lämpöhäviöt tällä hetkellä ja lämpöhäviöt jälkeen, jotta voidaan laskea ovien reunusten ympäryksen eristämisestä syntyvä säästö. Laskut lämpöhäviöistä tehdään molemmista ovista erikseen ja niiden tulokset yhdistetään kokonaissäästön laskemisessa yhteen.

$$Q = \alpha * A * \Delta T * t / 1000000 \quad (6)$$

Jossa Q = Häviöt kuivauskoneen pinnasta (MWh/a)

α = Lämmönsiirtokerroin pinnasta ilmaan

A = Oven ympäryksen pinta-ala

ΔT = Lämpötilaero pinnasta ilmaan

t = Käyttöaika

Ovien ympäröityksen lämpötilat vaihtelivat 132–171°C välissä, mutta yleisimmin ympäröityksen lämpötila oli n. 160°C. Tämän takia laskuissa käytettiin jokaiselle oven ympäröitykselle lämpötilaa 160°C. Lisäksi α arvona käytettiin 10 W/m², °C, joka on lämmönsiirtokerroin pinnasta ilmaan esineelle luonnonkierrossa. Luonnonkierrossa ilman ja kuivauskoneen pinnan välinen lämpötilaero aiheuttaa ilmavirtauksen (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto). Taulukossa 4 on laskettu molempien ovien ympäröitysten lämpöhäviöt sekä säästöt käyttämällä höyryn hintana 45 €/MWh.

Ovien tyypit	Ovi 1	Ovi 2
Kuivauskoneen pintalämpötila		
Tällä hetkellä (°C)	160	160
Jälkeen (arvio °C)	120	120
Hallin lämpötila (°C)	35	35
Lämpötilaero		
Tällä hetkellä (°C)	125	125
Jälkeen (°C)	85	85
Lämmönsiirtokerroin (W/m ² , °C)	10	10
Pinta-ala (m ²)	4,12	25,76
Käyttöaika (h)	5720	5720
Häviöt ennen (MWh/a)	29,5	184,2
Häviöt jälkeen (MWh/a)	20,0	125,2
Höyryn hinta (€/MWh)	45	45
Säästö (MWh/a)	9,4	58,9
Säästö (€/a)	424,5	2652,0

Taulukko 4. Reunusten lämpöhäviöt

Yhteensä energiansäästöä syntyy 68,4 MWh/a ja 3076,5 €/a, jos ovien ympäröityksen lämpöhäviöt alennettaisiin vaneritehtaan viilunkuivauskoneen 2 tasolle. Ainoa tapa vähentää lämpöhäviöitä on eristää reunat, jotta lämpö ei pääsisi siirtymään halli-ilmaan. Rakenteiden eristäminen jälkeensä voi olla kuitenkin vaikeaa ja kallista toteuttaa.

6.4 Moottorit

Kuivauskoneella 1 käytetään useita erikokoisia sähkömoottoreita, jotka pyörittävät kuivauskonetta sekä sen alku- ja loppupään rullastoja. Sähkömoottoreiden nimellistehot ovat 1,5 kW ja 30 kW välillä riippuen niiden käyttötarkoituksesta. Alemman teholuokan moottorit pyörittävät kuivauskoneen sekä oheislaitteiden rullastoja, kun taas isot 30 kW ja 15 kW sähkömoottorit pyörittävät kuivauskoneen sisällä olevia kiertoilmahuoltimia. Punkaharjun vaneritehtaalla olevat moottorit ovat

tämänhetkisen IE3 hyötysuhde luokituksen tai huonompien IE2 tai IE1 hyötysuhde luokitusten mukaisia. Opinnäytetyössä keskitytään viilunkuivauskoneen 1 moottoreihin ja niiden päivittämisestä johtuvan säästön laskemisesta.

IEC 60034-30-1 (2018) standardin mukaan IE4 hyötysuhteellisilla sähkömoottoreilla on noin 1,5 prosenttiyksikköä parempi hyötysuhde kuin IE3 luokituksen moottoreilla, joten huomattava vuotuinen sähköenergian säästö oli odotettavissa. Esimerkiksi kuumailmapuhaltimia pyörittävien 4 napaisen 30kW tehoisten sähkömoottoreiden hyötysuhde paransi 1,3 prosenttiyksikköä vaihtamalla vanha IE3 luokituksen moottori uuteen IE4 luokituksen moottoriin. Hyötysuhde-erot kasvavat suuremmiksi mitä huonompi hyötysuhdeluokitus käytetyissä moottoreissa on.

Vaneritehtaalla käytetään kuivauskoneen kiertoilmapuhaltimina 19 kpl 30 kW tehoisia sähkömoottoreita ja 3 kpl 15 kW tehoisia sähkömoottoreita. Lisäksi kuivauskoneen sisällä olevia rullastoja pyörittää kaksi 15 kW sähkömoottoria sekä kuivauskoneen rullastoja ja oheislaitteita pyörittää 4 kpl 1,5 kW, 6 kpl 2,2 kW, 2 kpl 3 kW, 2 kpl 5,5 kW ja 4 kpl 7,5 kW moottoreita. Kaikkiin rullastoja pyörittäviin moottoreihin on asennettu taajuusmuuttajat, jotka säätelevät moottoreiden nopeutta ja näin ollen säästää myös sähköä sillä moottoreiden ei tarvitse pyöriä koko aikaa täyстeholla. Laskeissa ei oteta huomioon taajuusmuuttajien aiheuttamaa tehon vaihtelua, vaan kaikki laskut laskeaan moottoreiden nimellistehon mukaan.

Kaikki vaneritehtaalla käytettävät moottorit ovat 4 napaisia sähkömoottoreita, jotka kiertävät 1500 kierrosta minuutissa. Viilunkuivauskoneella 1 käytetään kuumailmapuhaltimien, rullastojen ja oheislaitteiden pyörittämiseen eritehoisia moottoreita, joiden hyötysuhteet muuttuvat teholuokituksen mukaan. IEC/EN 60034-30-1:2014 (2018) standardia tutkimalla voidaan selvittää sähkömoottoreiden minimi hyötysuhteet, jos niissä on IE1, IE2, IE3 tai IE4 hyötysuhdeluokitus. Tutkimalla standardia voidaan nähdä, että vaneritehtaalla käytettyjen IE3 luokituksen moottorit ylittivät hieman standardin määrittämän minimi hyötysuhteen, kun taas vanhemmissa moottoreissa, joissa ei hyötysuhde luokitusta ole merkattu kilpeen, eivät moottorit yltäneet edes IE1 hyötysuhde luokituksen määrittämää minimi hyötysuhdetta.

Hyötysuhdelaskut

Kuivauskoneen 1 moottorien hyötysuhdelaskut jaettiin kahteen osioon. Ensin laskettiin kiertoilmapuhaltimien pyörittämiseen käytettyjä 30- ja 15 kW moottoreiden hyötysuhde- ja kannattavuuslaskelmat, jonka jälkeen laskettiin rullastojen pyörittämiseen käytettävien pienempien moottoreiden hyötysuhde- ja kannattavuuslaskelmat. Erottelu tehtiin siksi, että kuivauskoneen kiertoilmapuhaltimia pyörittävissä moottoreissa ei ole taajuusmuuttajia ja näin ollen saadaan laskettua tarkka säästö nimellistehon avulla, toisin kuin rullastoja pyörittävistä moottoreista, joissa on taajuusmuuttajat, jotka muuttavat moottoreiden hetkellistä tehoa kuorman mukaan. Lisäksi kuivauskoneen kuumailmapuhaltimia pyörittävät moottorit ovat eri teholuokassa kuin pienempitehoiset rullastoja pyörittävät moottorit.

Kolmivaihemoottoreiden hyötysuhteet lasketaan ABB:n teknisen oppaan mukaan. Oppaassa kolmivaihemoottorin hyötysuhde lasketaan kaavan 7 mukaan. (Sähkökäytön mitoitus)

$$\eta_n = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{syöttö}}} = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U_n * I_n * \cos(\varphi_n)} \quad (7)$$

Jossa η_n = Hyötysuhde (%)

P_n = Nimellisteho (W)

U_n = Nimellisjännite (V)

I_n = Nimellisvirta (A)

$\cos \phi$ = Tehokerroin

Moottoreiden hyötysuhteet laskettiin Excelin avulla. Alla olevassa taulukoissa 5 laskettiin kiertoilmapuhaltimia pyörittävien moottoreiden hyötysuhteet, mutta vastaavat hyötysuhdelaskut laskettiin myös kuivauskonetta pyörittävien rullastojen moottoreille.

Hyötysuhteet kiertoilmapuhaltimien moottorit					
Malli	Siemens 1LE16031DB434FB 4-Z	ABB M3BP160M LB4	Vem K11R 160 L4	Oy Strömberg Ab HXUR 405G2 B3	Siemens 1LE16032AB534A B4
Nimellisjännite (V)	400	400	400	380	400
Nimellisvirta (A)	28,5	27,6	28,5	60	55
Nimellisteho (W)	15000	15000	15000	30000	30000
Tehokerroin $\cos \phi$	0,82	0,84	0,86	0,85	0,84
Laskettu hyötysuhde (%)	92,6	93,4	88,3	89,4	93,7
Nimellishyötysuhde	92,1	93,1	-	-	93,6

Taulukko 5. Moottoreiden hyötysuhteet

Taulukoissa on ilmoitettu sekä laskettu hyötysuhde sekä moottoreiden kilvissä oleva nimellishyötysuhde. Jos moottorin kilvessä on mainittu sen nimellishyötysuhde, käytettiin sitä lasketun hyötysuhteen sijaan energiansäästö ja kannattavuuslaskelmissa. Nimellishyötysuhde on moottorivalmistajan mittaama ja laskema hyötysuhde, joka kuvaa tarkemmin moottorin todellista hyötysuhdetta. Vertaamalla nimellishyötysuhteisiin laskettu hyötysuhde kaava pääsee 0,5 prosenttiyksikön päähän moottorivalmistajien merkitsemästä nimellishyötysuhteesta. 0,5 prosenttiyksikön ero hyötysuhdelaskuissa on tarpeeksi tarkka opinnäytetyössä laskettavien energiansäästö ja kannattavuuslaskelmien käyttöön.

Käyttämällä vanhojen ja uusien moottoreiden hyötysuhteita, voitiin laskea sähkömoottoreiden vuosittainen sähkönkulutuksen säästö kaavalla 8.

$$Säästö = \left(\frac{P - (P * \eta_1)}{\eta_2} \right) * \frac{t}{1000} \quad (8)$$

Jossa P = Nimellisteho

η_1 = Vanha hyötysuhde

η_2 = Uusi hyötysuhde

t = Käyntiaika

Moottoreiden energiansäästö laskettiin Excelissä. Taulukossa 6 on laskettu kiertoilmapuhaltimia pyörittävien moottoreiden säästö vuodessa.

Energiansäästö kiertoilmapuhaltimien moottorit					
Malli	Siemens 1LE16031DB434F B4-Z	ABB M3BP160M LB4	Vem K11R 160 L4	Oy Strömberg Ab HXUR 405G2 B3	Siemens 1LE16032AB534 AB4
Hyötysuhde ennen (%)	92,6	93,4	88,3	89,4	93,7
Hyötysuhde uusi (%)	93,9	93,9	93,9	94,9	94,9
Moottorin nimellisteho (kW)	15	15	15	30	30
Käyttötunnit vuodessa (h)	5720	5720	5720	5720	5720
Moottoreiden määrä	1	1	1	13	6
Säästö per moottori (MWh/a)	1,1	0,5	5,1	10,0	2,1
Säästö kokonaisuudessa (MWh/a)	1,1	0,5	5,1	129,9	12,7

Taulukko 6. Moottoreiden säästö

Kieroilmapuhaltimia pyörittävien moottoreiden päivittämisestä saatava säästö olisi kokonaisuudessa 149,4 MWh/a. Käyttäen Suomen 2022 aluehinnan keskiarvoa, voitiin laskea kieroilmapuhaltimia pyörittävien moottoreiden vuotuinen kokonaissäästö euroissa. Energiaviraston (Suomalaisten kotitalouksien sähkölasku kallistui keskimäärin noin 50 prosenttia vuonna 2022 2023) mukaan Suomen aluehinnan keskiarvo vuonna 2022 oli 154 €/MWh.

$$149,4 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} * 154 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 23007,6 \text{ €/a}$$

Kun samat laskut tehtiin kuivauskoneen rullastoja pyörittäville moottoreille saatiin sähkömoottoreiden kokonaissäästöksi 31,7 MWh/a. Käyttäen samaa sähkönhintaa voitiin laskea rullastoja pyörittävien moottoreiden vuotuinen sähkönkulutus euroissa.

$$31,7 \frac{MWh}{a} * 154 \frac{€}{MWh} = 4881,8 €/a$$

Yhteensä kaikkien moottoreiden päivittäminen energiatehokkaampiin IE4 moottoreihin säästäisi 181,1 MWh/a ja niiden taloudellinen säästö olisi 27 889,4 €/a.

Moottoreiden takaisinmaksuajat laskettiin kaavalla 9. Takaisinmaksuajat laskettiin ensin käyttämällä investointikustannuksena uuden IE4 hyötysuhdeluokan moottoria, jonka jälkeen laskettiin uudet takaisinmaksuajat käyttämällä investointikustannuksena moottoreiden hintaeroa.

$$\frac{\text{Investointikustannus}}{\text{Säästö vuodessa}} = \text{Takaisinmaksuaika} \quad (9)$$

Moottoreiden takaisinmaksuaika laskettiin kahdella tavalla. Ensimmäisellä tavalla katsottiin, paljon moottoreiden takaisinmaksuaika on, jos moottori päivitetään uudella vanhan hajotessa. Tällöin investointikustannukseksi jää uuden IE3 hyötysuhdeluokan ja uuden IE4 hyötysuhdeluokan moottoreiden hinnan erotus. Tämä vähentää huomattavasti investointikustannuksia, sillä laskennassa katsotaan vain kuinka paljon kalliimpi IE4 moottori on verrattuna IE3 moottoriin. Takaisinmaksuajat olivat tällä menettelyllä moottorista riippuen 0,1–1,6 vuotta. Toisessa tavassa laskettiin, kuinka pitkä takaisinmaksuaika on, jos kuivauskoneen moottorit päivitetäisiin heti. Tällöin investointikustannuksena käytettiin pelkästään IE4 hyötysuhdeluokituksen moottorin hintaa. Tällä tavalla laskiessa moottoreiden takaisinmaksuaika kohdistui 1,4–18 vuoden välille. Lyhyimmät takaisinmaksuajat olivat vanhoilla moottoreilla, jossa on huono hyötysuhde ja pisimmät moottoreilla, joilla oli hyvä hyötysuhde.

Moottoreiden päivittämistä uusiin IE4 hyötysuhdeluokituksen moottoreihin on tutkittava moottori kohtaisesti. Moottoreilla, joilla on huono hyötysuhde tai pieni takaisinmaksuaika, on kannattava vaihtaa ne heti uusiin. Vastaavasti moottoreissa, joissa on pitkä takaisinmaksuaika, on viisainta päivittää moottorit uusiin vasta vanhojen moottoreiden hajotessa.

7 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia tapoja parantaa viilunkuivauskoneen energiatehokkuutta ja laskea energiahäviöitä löydetyistä ratkaisuista. Ratkaisujen oli vähennettävä vaneritehtaan energiankulutusta samalla tukemalla Metsä Groupin kestävä kehityksen tavoitteita.

Opinnäytetyössä keskityttiin kolmeen viilunkuivauskoneen energiatehokkuuden parannuskeinoon. Ensimmäinen parannuskeino keskittyi viilunkuivauskoneen lämpötilan automaattisen säätöön PID-säätimen avulla. PID-säätimellä ohjattiin viilunkuivauskoneelle tulevaa tulohöyryventtiiliä, jonka avulla pystyttiin säätämään kuivauskoneen sisäistä lämpötilaa automaattisesti. PID-säätimen virityksen aikana tehtiin useita lyhyitä sekä pitkiä testiajoja, joista saatiin kerättyä tietoa viilunkuivauskoneen lämpötilan vaihteluista. Automaatiotestejä ei kuitenkaan saatu vietyä loppuun viilunkuivauskoneen tulohöyryventtiilin ongelmien vuoksi sekä viilunkuivauskoneen höyrymäärän vaihtelun vuoksi. Lämpötilan ohjaus palautettiin takaisin manuaaliohjaukselle, mutta viilunkuivauskoneen automaation kehitystä kuitenkin jatketaan toimeksiantajan toimesta.

Automaatioon liittyvissä energiatehokkuuslaskuissa laskettiin, kuinka paljon energia säästetään laskemalla tämänhetkisen manuaaliajon lämpötilasta automaattijossa käytettävään lämpötilaan. Laskuissa kävi ilmi viilunkuivauskoneen lämpötilan laskemisesta johtuvia suuria energiansäästöjä. Energiansäästöt eivät johdu kuitenkaan suoraan automaattisäädöstä vaan tulohöyryn tarpeen vähenemisestä matalammassa lämpötilassa. Lämpötilan tasaisuus sekä seuranta kuitenkin onnistuisi paremmin viilunkuivauskoneen lämpötilan säädön automaatiolla. Yhteensä lämpötilan laskeminen uuteen ajolämpötilaan säästäisi arviolta 1853 MWh/a. Tämä vastaa noin 83000 € säästöjä.

Viilunkuivauskoneesta laskettiin myös ilma- ja lämpövuotojen aiheuttamia energiahäviöitä. Opinnäytetyössä keskityttiin viilunkuivauskoneen ovien rakojen vuotoilman laskemiseen sekä ovien ympärillä olevien rakenteiden vuotolämmön määrän laskemiseen. Laskennassa kävi ilmi, erityisesti vuotoilman suuri määrä ja sen suuri energiahukka. Vuotoilman vuotuinen energiahukka on 199 MWh, joka vastaa 8942 euroa. Energiahukan vähentämiseksi on järkevää paikallistaa ovet, jotka vuotavat eniten ja vaihtaa kuluneet tiivisteet uusiin. Osassa ovista pelkkä tiivisteiden vaihtaminen ei toimi sillä osa ovista on voinut taipua pysyvästi lämpölaajenemisen seurauksena. Näiden ovien kanssa on tutkittava voiko esimerkiksi vääntyneen oven reunan korjata ilman, että ovea tarvitsee uusia kokonaan. Ovien vaihtamista on kuitenkin pidettävä viimeisenä vaihtoehtona, jos vuotoa ei

saada pysähtymään muilla keinoilla. Lämpöhäviöiden määrä konvektiossa oli 68 MWh/a, joka vastaa 3077 €/a. Lämpöhäviöiden määrä on suhteellisen pieni ja ei välttämättä vaadi välittömiä toimenpiteitä.

Viimeisenä tutkittiin viilunkuivauskoneella käytettävien moottoreiden päivittämisellä saatavaa sähköenergian säästöä. Viilunkuivauskoneella käytetään monia eritehoisia sähkömoottoreita pyörittääkseen kuivauskoneen kuumailmapuhaltimia, rullastoja ja oheislaitteita. Moni moottoreista oli hyötysuhdeluokitukseltaan IE3 tasoisia tai huonompia. Laskuissa laskettiin, kuinka paljon säästöä syntyy, jos moottorit vaihdettaisiin IE4 hyötysuhdeluokituksen moottoreihin sekä niiden päivittämisestä johtuvaa takaisinmaksuaika. Laskuissa kävi ilmi suuret energiansäästöt nykyisiin moottoreihin verrattuna sekä pienet takaisinmaksuajat moottorin mallin mukaan. Yhteensä päivittämällä kuumailmapuhaltimia pyörittävät moottorit uusiin, voidaan säästää vuoden aikana 149 MWh ja 23008 €. Vastaavasti rullastoja pyörittävien moottoreiden päivitys säästää vuodessa 32 MWh ja 4882 €. Kaikkien moottorimallien takaisinmaksuajat olivat alle kaksi vuotta, jos ne päivitetäisiin edellisten moottorien hajotessa. Jos moottorit päätetään päivittää uusilla heti, nousevat takaisinmaksuajat mallista riippuen 1,4–18 vuoteen. Jos moottorin takaisinmaksuaika jää alle kahden vuoden on kannattavaa päivittää moottori saman tien. Muulloin moottori on paras päivittää vasta vanhan moottorin hajotessa, jolloin investointikustannukset uudelle moottorille ovat paljon pienemmät.

Tutkimustulosten luotettavuuteen vaikutti sekä ilmavirtaus määrän mittausten tulokset, että lämpötilan automaatiassa puuttuvat mittausturrit. Ilmavirtausmittaukset tehtiin kalibroidulla ilmavirtamittarilla, jolla saatiin tarpeeksi tarkkoja tuloksia. Vaikka mittausten aikana ei voitu eristää josta ovia erikseen pystyttiin ne silti tekemään siirtämällä ilmavirtamittaria tasaisella nopeudella viilunkuivauskoneen ovien reunoja pitkin. Lisäksi laskuissa oletettiin ovien raoksi 1 mm, sillä oven rakoa ei ollut mahdollista mitata. Tämän takia ilmavirtausmittauksissa tehtyjä laskuja pidetään vain suuntaa antavina.

Lämpötilan automaatiotestien datan keruussa oli myös epätarkkuutta. Viilunkuivauskoneella, jolle automaatiotestejä tehtiin, puuttui lämpötilan, kosteuden sekä muiden tietojen keruu kokonaan. Tämän takia viilunkuivauskoneen lämpötilan datan kerääminen tapahtui manuaalisesti. Tämä ra-

joitti datan keräämisen vain sille aikavälille, jolloin testin tekijä oli paikan päällä. Lisäksi kuivauskoneelta ei saatu kerättyä jälkeenkäynnin yksittäisen kuivauskoneen tulohöyryn määrää, joten höyryn vaihtelun seurannassa käytettiin vaneritehtaan kokonaishöyrynmäärää.

Opinnäytetyössä saatuja tuloksia ja laskuja voidaan kuitenkin hyödyntää muissakin vaneri- ja LVL-tehtaissa, joissa käytetään viilunkuivauskoneita. Lämpö- ja ilmavuotojen määrää voidaan laskea myös muissa viilunkuivauskoneissa, joissa huomataan suuria vuotoja ovien reunoista. Lisäksi opinnäytetyössä laskettuja moottoreiden päivittämisestä johtuvia energiasäästöjä voidaan hyödyntää suoraan muissakin käyttökohteissa, joissa käytetään moottoreita, kuten pumpeissa, kuljettimissa ja autoissa.

Opinnäytetyö oli ensimmäinen vaihe energiatehokkuus toimenpiteissä, jossa löydettiin energiahäviöitä ja laskettiin niiden määriä. Jatkotoimenpiteinä Metsä Wood Punkaharju analysoi opinnäytetyössä saadut tulokset ja päättää kohteet joihin energiansäästön toimenpiteet kohdennetaan. Automaatiotestien teko jatkuu myös opinnäytetyön jälkeen. Testien tulokset vaikuttivat lupaaville, mutta toivat esille ongelmia, joita nykyisessä järjestelmässä on.

Lähteet

2050 long-term strategy. N.d. Euroopan komissio. Viitattu 11.1.2023. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en

Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure. 2003. Engineering ToolBox. Viitattu 17.4.2023. https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html

Cengel Y. & Ghajar A. 2015. Heat and Mass Transfer. Fundamentals & Applications. 5. painos. New York: Mcgraw-Hill Education. Viitattu 14.3.2023.

Dronsky, P. N.d. Cut and Dried: Tips on Increasing Veneer Dryer Energy Efficiency. Engineered Wood Journal. s. 1–3. Viitattu 17.3.2023. <https://www.engineeredwood.org/Data/Sites/3/documents/publications--news/techforum/CUT%20AND%20DRIE1.pdf>

Electric motors and variable speed drives. N.d. Euroopan komissio. Viitattu 20.3.2023. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/energy-efficient-products/electric-motors-and-variable-speed-drives_en

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 20.1.2023. <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/wp-content/uploads/2016/10/Energiavaltainen-teollisuus-Metsa%CC%88teollisuus-ry.pdf>

Gradov, D., Yusuf, Y., Ojalainen, J., Suuronen, J., Eskola, R., Roininen, L & Koiranen, T. 2022. Modeling of a continuous veneer drying unit of industrial scale and model-based ANOVA of the energy efficiency. Energy, 244, A. Viitattu 17.3.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221029224>

Hakkarainen, M. 2023. Vuoromestari. Metsä Wood Punkaharju. Haastattelu 8.3.2023.

Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. 2019. Valtioneuvosto. Viitattu 24.1.2023. <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>

IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors. 2018. ABB:n tekninen dokumentti. Viitattu 20.3.2023. https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas: Miten kirjoitan kehittämistutkimuksen vaihe vaiheelta. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 10.5.2023.

Kauttonen, A. 2014. Viilunkuivaajan kuivausprosessin optimointi. Opinnäytetyö, AMK. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, puutekniikan koulutusohjelma. Viitattu 3.4.2023. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73630/Kauttonen_Antti.pdf.pdf?sequence=1

Kokoonpano. 1974. Tekninen piirustus. Raute Oy:n tekniset piirustukset. Viitattu 17.1.2023.

Kurtti, I. 2018. Koivuvaneritehtaan viilunkuivaajien höyryjärjestelmän dokumentointi. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 3.4.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/158221/liikka%20Kurtti.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Lamrani, B., Kuznik, F., Ajbar, A. & Bouamza, M. 2021. Energy analysis and economic feasibility of wood dryers integrated with heat recovery unit and solar air heaters in cold and hot climates. Energy, 228. Viitattu 17.3.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221008471>

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. & Waterfield, T. 2018. Global warming of 1.5°C. IPCC:n julkaisema ilmastoraportti maapallon keskilämmön noususta johtuvista seurauksista. Viitattu 11.1.2023. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Metsä Groupin strategisen kestävä kehityksen 2030-tavoitteet. 2023. Dokumentti. Metsä Groupin henkilöstön intranet. Pääsy vain Metsä Groupin tunnuksilla. Viitattu 11.1.2023.

Metsä Group Tilinpäätöstiedote 2022. 2023. Metsä Groupin tilinpäätöstiedote vuodelle 2022. Viitattu 24.3.2023. <https://www.metsagroup.com/globalassets/metsa-group/documents/investors/financial-reporting/osavuositiedotet/metsa-group-tilinpaatostiedote-20222.pdf>

Metsä Wood Punkaharjun tehtaat. 2023. Metsä Groupin tuotantolaitosesittely. Metsä Groupin henkilöstön intranet. Pääsy vain Metsä Groupin tunnuksilla. Viitattu. 24.1.2023.

Mäenpää, L. 2020. Mitä puun kuivauksessa tapahtuu. Metsä Groupin info dokumentti puun kuivatamisesta. Metsä Groupin henkilöstön intranet. Pääsy vain Metsä Groupin tunnuksilla. Viitattu 23.1.2023.

Määrällinen tutkimus. 2015. Oppimateriaali Jyväskylän yliopiston Kopan verkkosivuilla. Viitattu 10.5.2023. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus>

Silvennoinen, K. 2012. Kuorinta ja katkaisu. Punkaharjun Metsä Woodin sisäinen kuorinta ja katkaisu ohje. Viitattu 17.1.2023.

Silvennoinen, K. 2020. a. Tukkien haudonta. Punkaharjun Metsä Woodin sisäinen haudonta ohje. Viitattu 17.1.2023.

Silvennoinen, K. 2020. b. Viilun kuivaus: kuivauskoneenhoitajan tehtävät. Punkaharjun Metsä Woodin sisäinen kuivauskone operaattorin toimintatapa ohje. Viitattu 17.1.2023.

Suomalaisten kotitalouksien sähkölasku kallistui keskimäärin noin 50 prosenttia vuonna 2022. 2023. Artikkelit Energiaviraston verkkosivuilla. Viitattu 6.4.2023. <https://energiavirasto.fi/-/suomalaisten-kotalouksien-sahkolasku-kallistui-keskimaarin-noin-50-prosenttia-vuonna-2022>

Sähkökäytön mitoitus. 2001. ABB:n tekninen opas nro 7. Viitattu 22.3.2023. https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf

Säästövaikutusten laskenta ja dokumentointi. 2017. Energiatehokkuussopimuksen yleisiä pelisääntöjä. Viitattu 6.4.2023. <http://www.energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/wp-content/uploads/S%C3%A4%C3%A4st%C3%B6jen-laskenta-ja-dokumentointi.pdf>

Toimintaselostus. 1995. Tekninen asiakirja. Raute Oy:n tekniset asiapaperit. Viitattu 29.1.2023.

Toimintaselostus. 1997. Tekninen asiakirja. Raute Oy:n tekniset asiapaperit. Viitattu 25.1.2023.

Tynkkynen, E. 2023. Vuoromestari. Metsä Wood Punkaharju. Haastattelu 15.2.2023.

Virtaustekniikka ja lämmönsiirto. N.d. Aalto -yliopiston kurssin CHEM-A1120 luennon opintomateriaali. Viitattu 24.4.2023. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/880888/mod_folder/content/0/Luento%208/Vil%C3%A4%20luento%208.pdf?forcedownload=1

Ympäristöjohtaminen. N.d. Artikkeliksi Metsä Groupin sisäisistä tavoitteista materiaali- ja energiätehokkuuden parantamisessa. Metsä Groupin henkilöstön intranet. Pääsy vain Metsä Groupin tunnuksilla. Viitattu 28.2.2023.

Waide, P. & Brunner, C. 2011. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency. Viitattu 20.3.2023. https://iea.blob.core.windows.net/assets/d69b2a76-feb9-4a74-a921-2490a8fefcdf/EE_for_ElectricSystems.pdf

What is PID Controller: Working, Types & Its Applications. 2022. WatElectronics verkkosivun artikkeli PID-säätimistä. Viitattu 11.4.2023. <https://www.watelectronics.com/pid-controller/>

Åström, K. 2002. Control System Design Lecture notes for ME 155A. Santa Barbara: University of California. Viitattu 25.3.2023.

Åström, K. & Wittenmark, B. 2008. Adaptive Control. 2. painos. New York: Dover Publications Inc. Viitattu 21.3.2023.

Liitteet

Liite 1. Kylläisen veden ominaisuudet (Cengel & 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, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$		
		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 kuivauskoneen operaattoreille

Haastattelu kysymykset 1KK operaattoreille

1. Millä lämpötilalla kuivaat manuaaliajossa?
2. Milloin kuivauskoneen höryventtiilin asentoa säädetään?
3. Paljon höryventtiilin asentoa säädetään kerralla (%)?
4. Mitkä ovat korkeimmat ja alimmat lämpötilat mitä normaalin manuaaliajon aikana kuivauskoneen loppupäässä nähdään?
5. Mistä kyseiset lämpötilat johtuvat?
6. Milloin ja miksi kuivauskonetta pysäytetään?
7. Miten pitkään pysäytykset yleensä kestävät?
8. Paljon kuivauskoneen kosteus yleensä on ja mistä sen vaihtelu johtuu?

Liite 3. Sähkömoottoreiden takaisinmaksuaikojen laskut (salassa pidettävä)