



Karelia-ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka, insinööri (AMK)

Uimaharjun sahan kanavakuivaa- mojen lämmöntalteenoton nykyti- lanne ja järjestelmävaihtoehtojen kartoitus

Roope Ylimaula
Valtteri Pennanen

Opinnäytetyö, toukokuu 2024

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijät
Roope Ylimaula
Valtteri Pennanen

Nimeke
Uimaharjun sahan kanavakuivaamojen lämmöntalteenoton nykytilanne ja järjestelmä-
vaihtoehtojen kartoitus

Toimeksiantaja
Stora Enso Oyj

Tiivistelmä

Stora Enso Oyj:n Uimaharjun saha tarvitsi selvitystä kanavakuivaamojen lämmöntalteenottojärjestelmän nykytilanteesta ja sen parannusvaihtoehdoista. Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää kanavakuivainten lämmöntalteenottolaitteiston nykytilanne sekä tehdä mahdollisten parannusvaihtoehtojen kartoitus tutkimalla nykyisiä teknologioita, joita on saatavilla markkinoilla. Tietoperusta osiossa käsitellään pääasiassa puutavaran kosteuden, kuivaukseen ja lämmöntalteenoton teoriaa.

Kenttämittauksilla mitattiin ilmavirtoja ja kerättiin tietoa 14 kanavan lämmönvaihtimesta. Kanava valittiin sen suurimman tehon mukaan. Mittauksia suoritettiin kolmesta erikohdasta lämmönvaihdinta. Mitattavia arvoja olivat ilmavirrannopeus, lämpötila ja kosteus. Mittareina käytettiin Swema 3000md kuumalanka-anemometria ja Vaisalan MI70 kosteusmittaria. Kenttämittaukset ja niiden valmistelut sujuivat odotetusti yhteistyössä sahan henkilökunnan kanssa.

Kenttämittaustuloksista saatiin vertailukelpoisia lukuja, jotka vastasivat samankaltaisten laitteiden hyötysuhteita. Järjestelmän nykytilanteen perusteella ehdotettiin kolme erilaista skenaariota järjestelmän uudistamiseksi. Nämä olivat seuraavat: nykyisen järjestelmän tilalle hankitaan uusi järjestelmä, lämmöntalteenotossa hyödynnetään lämpöpumpputekniikoita tai järjestelmä pysyy samana. Selvästi parhaaksi vaihtoehdoksi osoitautui, että järjestelmä pysyisi samana, sillä muissa vaihtoehdoissa taloudellinen kannattavuus ei ollut millään lailla järkevää.

Kieli
suomi

Sivuja 45
Liitteet 4
Liitesivumäärä 6

Asiasanat
lämmöntalteenotto, lämmönvaihtimet, kanavakuivain, kosteus



THESIS
May 2024
Degree Programme in Energy and Environmental Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Authors
Roope Ylimaula
Valtteri Pennanen

Title
Current Status of Heat Recovery in Uimaharju Sawmill's Channel Dryers and Mapping of System Alternatives

Commissioned by
Stora Enso Oyj

Abstract

Stora Enso Oyj's Uimaharju sawmill needed an investigation into the current state of the heat recovery system for channel dryers and its improvement options. The objectives of the study were to determine the current situation of the heat recovery equipment for channel dryers and to survey potential improvement options by examining the existing technologies available on the market. The theoretical framework section primarily addresses the theory of timber moisture, drying and heat recovery.

Field measurements were conducted to measure airflows and gather information on the heat exchanger of channel 14. The channel was selected based on its highest power output. Measurements were taken from three different points on the heat exchanger. The measured values included air velocity, temperature, and humidity. Swema 3000md hot wire anemometry and Vaisala MI70 humidity meters were used as instruments. The field measurements and their preparations proceeded as expected in cooperation with the sawmill staff.

The field measurement results provided comparable figures that corresponded to the efficiencies of similar devices. Based on the current state of the system, three different scenarios for system renewal were proposed. These were as follows: a new system is acquired to replace the current one, heat pump technologies are utilized in heat recovery, or the system remains the same. Clearly, the best option was for the system to remain the same, as in the other options, the economic feasibility was not reasonable in any way.

Language
Finnish

Pages 45
Appendices 4
Pages of Appendices 6

Keywords
heat recovery, heat exchangers, channel dryer, moisture

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Opinnäytetyön tietoperusta	6
2.1	Yrityskuvaus	6
2.2	Puun kuivuminen fysikaalisena prosessina	6
2.3	Puun kosteus	7
2.4	Ilman suhteellinen ja absoluuttinen kosteus	7
2.5	Tasapainokosteus.....	8
2.6	Mollier-diagrammi	9
2.7	Kanavakuivaamo	10
2.8	Kamarikuivaamo	13
2.9	Lämmöntalteenotto ja lämmönvaihdin	14
2.10	Lämpöpumpputekniikat.....	16
3	Opinnäytetyössä käytetyt menetelmät	18
4	Työn toiminnallinen osuus	19
4.1	Mittausten valmistelut	19
4.2	Mittausten toteuttaminen	21
5	Nykyisen lämmöntalteenottolaitteiston mittaustulokset.....	25
5.1	Tulosten analysointi.....	26
6	Uudet järjestelmät ja tekniikat	33
7	Lämmöntalteenottolaitteiston skenaariot.....	34
7.1	Samaan teknologiaan perustuvan uuden lämmöntalteenottojärjestelmän hankkiminen	35
7.2	Lämpöpumpputekniikka lämmöntalteenotossa	37
7.3	Järjestelmä pysyy samana.....	39
8	Pohdinta.....	40
8.1	Skenaarioiden yhteenveto	40
8.2	Toteutuksen arviointi.....	41
8.3	Luotettavuus ja eettisyys	42
8.4	Jatkokehitysmahdollisuudet.....	42
	Lähteet.....	44

Liitteet

Liite 1	Swema 3000md sekä Vaisalan MI70 mittarin tulokset
Liite 2	Laskukaavoja ilmakehän koon mittaukseen sekä ideaalikaasun tilayhtälö
Liite 3	Taloudelliset laskut uuden järjestelmän hankkimisen kannattavuudesta Valutec Oy:n hintatietojen pohjalta
Liite 4	Taloudelliset laskut uuden järjestelmän hankkimisen kannattavuudesta lämpöpumpulla

1 Johdanto

Stora Enso Oyj:n saha Uimaharjussa esitti tarpeen selvittää sahan kanavakuivaamojen lämmöntalteenotto laitteiston nykytilannetta ja kartoittaa uusia järjestelmä vaihtoehtoja. Aihe oli kiinnostava ja liittyi suoraan energia- ja ympäristötekniikan koulutuksen sisältöihin. Tutkimus oli kokoluokaltaan sellainen, mikä sopi kahden kyseisen alan opiskelijan toteutettavaksi opinnäytetyöksi.

Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää kanavakuivainten lämmöntalteenotto laitteiston nykytilanne sekä mahdollisten parannusvaihtoehtojen kartoitus tutkimaan nykyisiä teknologioita, joita on saatavilla markkinoilla. Laskennallista teoriaa varten suoritimme kenttämittauksia sahalla, missä mittasimme ilmavirtoja lämmönvaihtimesta. Mitattavia suureita olivat tilavuusvirta, lämpötila ja kosteus. Riittävän datan keruun pohjalta lähdimme tutkimaan uusia laitteistoja lämmöntalteenottoon. Tiedustelimme lämmöntalteenottoon erikoistuneilta yrityksiltä uusia järjestelmiä vanhan uudistamista varten.

Aiheen rajauksena toimi kuivaamon toiminta, että lämmöntalteenotto sekä energiatehokkuuksien ja talousarvioiden laskenta. Tutkimuksen pohjalta loimme kolme eri skenaariota: tilalle hankitaan uusi järjestelmä, lämmöntalteenotossa hyödynnetään lämpöpumpputekniikoita tai järjestelmä pysyy samana. Uimaharjun saha hyödyntää skenaarioiden eri tuloksia miettiessä parannusvaihtoehtoja kanavakuivainten lämmöntalteenottojärjestelmään.

2 Opinnäytetyön tietoperusta

2.1 Yrityskuvaus

Stora Enso Oyj on maailmanlaajuinen metsäteollisuusyritys. Yritys perustettiin vuonna 1998, kun ruotsalainen Stora Kopparbergs Bergslags Aktiebolag ja suomalainen Enso Oyj yhdistyivät. (Storaenso 2024a.) Stora Enso työllistää noin 21 000 henkilöä ympäri maailmaa. Yrityksen liikevaihto oli 9,4 miljardia euroa vuonna 2023 ja se on listattu Helsingin sekä Tukholman pörsseihin. Stora Enso Oyj:llä on mittava kokemus puutuoteteollisuudessa, ja se on myös vahvasti mukana biomateriaali- ja pakkausteollisuudessa. Yritys on myös yksi suurimmista yksityisistä metsänomistajista maailmalla. (Storaenso 2024a.)

Uimaharjun saha on vuonna 1951 perustettu Stora Enso Oyj:n omistama saha. Sahalla työskentelee 52 henkilöä ja sen tuotantokapasiteetti on 240 000 m³ sahatavaraa vuodessa. Tuotettua sahatavaraa käytetään esimerkiksi rakennus- ja puuseppäteollisuudessa. (Storaenso 2024b.)

2.2 Puun kuivuminen fysikaalisena prosessina

Puun ollessa hygroskooppinen sen ominaisuutena on imeä vettä ilmasta. Vedden liikkumiselle puun sisällä on eri tapoja: höyrynä soluonteloiden kautta, molekylaarisena diffuusiona soluseinämän kautta tai kapilaarisesti soluonteloissa. Puun kuivaamista hankaloittaa kosteusvaihtelu, jota tapahtuu puun eri osien kesken. Puun ulko-osa, pintapuu on kosteampaa, kuin keskellä sijaitseva niin sanottu sydänpuu. Puun anisotrooppisuus aiheuttaa myös haasteita kuivausprosessissa, minkä seurauksena vuosirenkaiden välillä tapahtuu kutistumista ja laajentumista. Tämä johtaa herkemmin kieroutumisiin. Halkeamat ovat myös yleisiä. Yleisesti ottaen, mitä tiheämpi puu, sitä suuremmat kosteusmuutokset. (Varis 2017, 131.)

2.3 Puun kosteus

Kosteudella kuvataan veden tai vesihöyryn määrää toisessa aineessa. Kosteutta voidaan mitata eri tavoin, mutta yleisimpiä tapoja ovat suhteellisen ja absoluuttisen kosteuden mittaaminen. Puu on hygroskooppinen materiaali, mikä tarkoittaa sitä, että se kykenee imemään kosteutta ilmasta ja vapauttamaan sitä ympäristön kosteustason mukaan. Tämä ominaisuus mahdollistaa puun sopeutumisen ympäröivään ilmastoon ja kosteustasoon. Puu pyrkii aina saavuttamaan tasapainon ympäröivän ilmankosteuden kanssa. Kun kosteus vaihtelee, puun rakenne voi joustaa, jolloin se kutistuu tai turpoaa. Tämä voi johtaa puun haitallisiin muodonmuutoksiin ja esimerkiksi halkeiluun tai vääntymiseen. Puun kosteuseläminen voi olla vähäistä pitkäikäisyydessä, mutta merkittävää poikkeavuudessa, ja tämä on otettava huomioon puurakenteita suunniteltaessa. (Puuinfo 2020.)

Kun puu alkaa kuivua, ensin poistuu soluonteloissa oleva vapaa vesi. Tämän jälkeen alkaa soluseinämiin sitoutuneen veden poistuminen, mikä aiheuttaa puun kutistumista ja mahdollisia muodonmuutoksia. Puun kosteuspitoisuuden mentäessä alle 20 %, antaa se suojaa lahottajasieniltä ja muilta biologisilta tuholaisilta. Samalla sen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet paranevat, tämä perustuu siihen, että kosteus alittaa syiden kyllästymispisteen. Puulajeilla voi olla eroja kosteuskäyttäytymisessä. Esimerkiksi kuusi reagoi kosteuden vaihteluihin hitaammin, kuin mänty johtuen soluseinämien huokosten ominaisuuksista. Mänyssä kyllästysaineet voivat tunkeutua vain pintapuuhun, kun taas kuusi on vaikea painekyllästä. (Puuinfo 2020.)

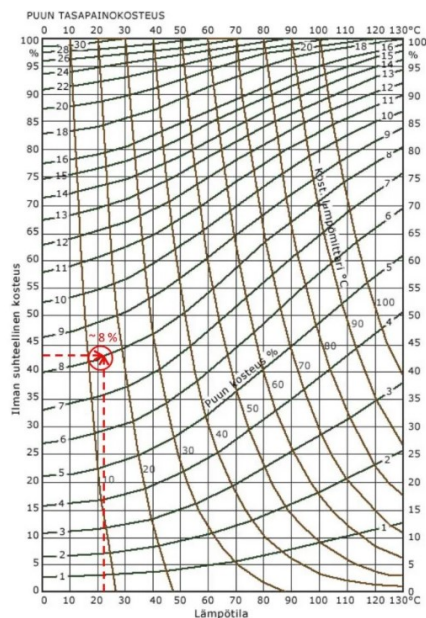
2.4 Ilman suhteellinen ja absoluuttinen kosteus

Yleisin tapa kuvata kosteutta on suhteellinen kosteus. Se ilmoitetaan prosentteina ja kertoo, kuinka paljon vesihöyryä ilmassa on suhteessa siihen määrään, jonka ilma voisi maksimissaan pitää vesihöyryä kyseisessä lämpötilassa. Absoluuttinen kosteus taas kertoo, kuinka monta grammaa vesihöyryä on

kuutiometrissä ilmaa ja yksikkönä toimii grammoja kuutiometrissä (g/m^3). (Ilmatieteenlaitos 2024.)

2.5 Tasapainokosteus

Ilman suhteellinen kosteus muuttaa puun kosteuspitoisuutta, joten se ei ole absoluuttinen arvo. Puutavara kuivuu kuivassa paikassa, kun taas kosteissa olosuhteissa se alkaa imeä kosteutta itseensä, tätä kutsutaan materiaalin tasapainokosteudeksi. Vuodenajalla sekä käyttökohteella on vaikutusta puutavaran kosteuteen. Tämän vuoksi on tärkeää tarkistaa, että puutavaran kosteuspitoisuus säilyy suositeltujen arvojen lähetyvillä varastoinnin sekä kuljetuksen aikana. (Puuinfo 2020.)



Kuvio 1. Tasapainokosteuskäyrä, vaaka-akselilla on lämpötila ja pystyakselilla ilman suhteellinen kosteus. Näiden raja-arvosta löytyy käyrä, joka ilmoittaa puunkosteuden (Kuva: Puuinfo).

Kun puhutaan puun kosteuspitoisuudesta "wet basis" -menetelmällä, sillä tarkoitetaan kosteuden määrää, joka on suhteessa koko puun kokonaisuuteen. Tämä tarkoittaa, että lasketaan puussa olevan veden massa suhteessa koko puun massaan. (Agrosphere-international 2023.)

Laskukaava määrittää puun märkäpitoisuuden (Agrosphere-international 2023).

$$MC_{wb} = \frac{\text{mass of water}}{\text{mass of moist substance}}$$

"Dry basis" -menetelmässä tarkastellaan kosteuden määrää suhteessa pelkästään puun omaan massaan ilman vettä. Tässä laskelmassa veden massa ei sisälly puun kokonaismassaan. (Agrosphere-international 2023.)

Laskukaava määrittää puun kuivapitoisuuden (Agrosphere-international 2023).

$$MC_{db} = \frac{\text{mass of water}}{\text{mass of dry solids}}$$

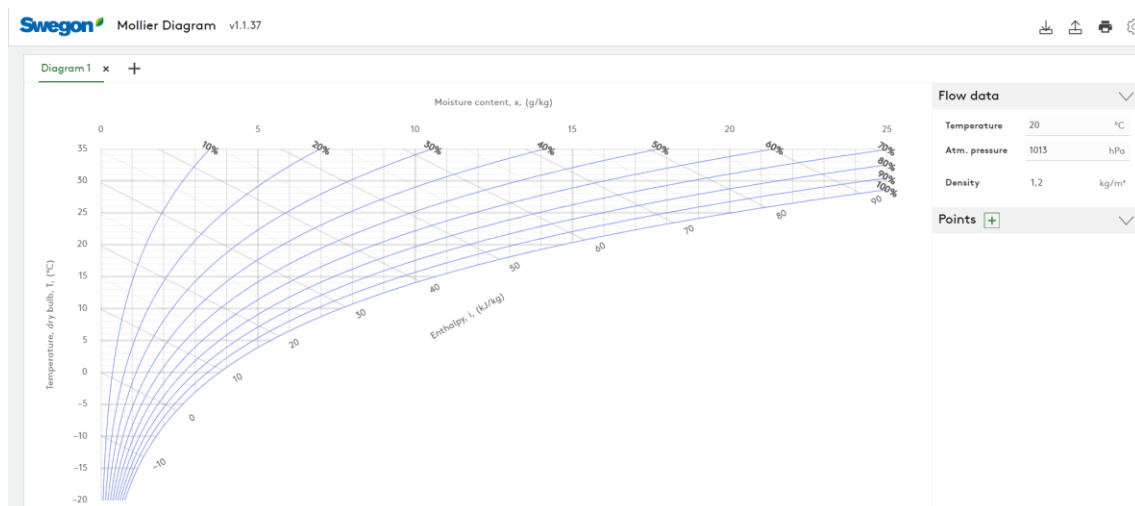
2.6 Mollier-diagrammi

Mollier-diagrammilla kuvataan kaasun ominaisuuksia. Jäähdytykselle, ilmalle ja höyrylle on olemassa omat mollier-diagrammit. Entalpia on yksi kaavion pääasteikoista. (Swegon 2024a.) Entalpialla kuvataan aineen sisäenergiaa eli lämpösisältöä vakioaineessa (Peda.net 2019). Kaavion avulla havainnollistetaan lämmitys-, jäähdytys- ja kostutusprosesseja (Swegon 2024a).

Mollier-diagrammi on työkalu, jota käytetään ilman lämpötilan, kosteuden ja muiden ominaisuuksien suhteiden tarkasteluun eri tilanteissa. Sen avulla voidaan esimerkiksi selvittää ilman absoluuttinen kosteus, kun tiedetään ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila. Lisäksi sitä voidaan hyödyntää arvioitaessa kuivausnopeutta erilaisissa olosuhteissa ja materiaaleissa, kuten ennustettaessa kuivausaikaa tietyille materiaalille ottaen huomioon ympäristön lämpötila ja kosteus. (Koneviesti 2024.)

Mollier-diagrammia voidaan hyödyntää myös laskiessa ilman vesipitoisuutta tunnetuilla lämpötila- ja suhteellisen kosteuden arvoilla. Näin voidaan selvittää esimerkiksi kuivausilman vesipitoisuus ja arvioida kuivauksen tehokkuutta. Lisäksi diagrammista voidaan saada tietoa tulevan ilman vesipitoisuudesta, kun tunnetaan kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä poistoilman

vesipitoisuus. Näiden tietojen avulla voidaan laskea poistuvan veden määrä ja arvioida kuivauksen onnistumista. (Koneviesti 2024.)



Kuvio 2. Kuvanruutukaappaus Swegonin Mollier Diagram -työkalusta. Diagrammilla voidaan esimerkiksi selvittää ilman sisältämän entalpiian tai ilman kosteus sisällön. (Kuva: Swegon.)

2.7 Kanavakuivaamo

Kanavakuivaus tunnetaan myös nimellä jatkuvatoiminen kuivaus, sillä siinä valmiiksi rimoitetut kuormat liikkuvat jatkuvasti uunin läpi, jonka sisällä tapahtuu olosuhteiden vaihtelua. Kanavakuivaamossa on märkä- sekä kuivapäätty. Märkästä päästä lastit siirretään uuniin ja siellä kosteusolosuhteet ovat korkeimmillaan. Kuormat liikkuvat kohti kuivaa päättyä. Uunin sisällä on puhaltimia, joiden avulla lämpöä ja kosteutta siirretään kuormien lävitse. Kanavakuivaamoilla kuivataan pääsääntöisesti sivulautoja, mutta teknologian kehittyessä, on mahdollista hyödyntää kuivaamotyyppiä myös isompien dimensioiden kuivaukseen. (Varis 2017, 134.)



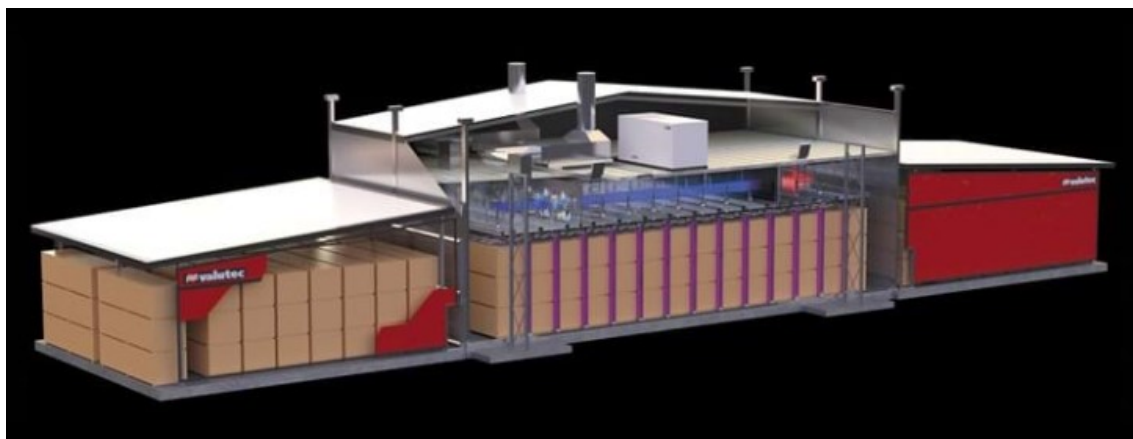
Kuvat 1 ja 2. Rimakuorma ja kanavakuivaimen sisällä olevat puhaltimet (Kuvat: Valtteri Pennanen).

Etukamarikuivaamoon verrattuna on parempi lämmöntalteenottojärjestelmien tehokkuus, joka johtaa juurensa kuivaamon vakaalämpöenergian tarve sekä ilmanpoiston taso. Kuivaamotyypin hyötynä on myös se, että uunin sisällä kuivan pään kuormat luovuttavat lämpöenergiaa, joka kondensoituu märältä puolelta tuleviin kuormiin. (Varis 2017, 134.)

Kanavakuivaamon heikkoutena on se, että uunin olosuhteita ei voida hallita yhtä hyvin kuin kamarikuivaamossa. Kuormien vedenhaihtuminen ilmaan muuttaa ilman olosuhteita ja tällöin lastin senhetkinen sijainti ratkaisee vaikutuksen ilmantasapainoon. Pitämällä materiaalivirran tasaisena kosteutta voidaan kontrolloida paremmin, ja samalla vältetään kosteushajonnasta syntyvistä haitoista, kuten halkeiluista sekä laadun heikkenemisestä. (Varis 2017, 134.)

Kanavakuivaamoita on kehitetty useita eri tyyppisiä. Sivulautojen taloudellisuutta huomioiden on kehitetty 1-vaihekanavakuivaamot. Kuivauksen prosessia kontrolloidaan kuormien kosteuden, ilmannopeuden sekä kuormanvaihtovälin yhdistelmällä. Uunin sisällä lämpöpattereille puhalletaan kiertoilmaa aksiaalipuhaltimien avulla. Ilma kulkee rimakuormiin syöttösuuntaa vasten. Märkä- ja kuivalämpötila pidetään pienenä ilman muuttuessa kosteammaksi syöttösuuntaan mentäessä. Tärkeää on, ettei sisään syötössä tapahdu liian suuria muutoksia,

mikä johtaa kuivausprosessin pysähtymiseen, märän- ja kuivanlämpötilan lähestyessä nollaa. (Varis 2017, 134–135.)



Kuva 3. Yksivaiheinen kanavakuivaamo, rimakuormat liikkuvat kiskojen päällä vasemmalta oikealle. Uunia lämmittävät patterit sekä puhaltimet ovat uunin yläosasta ja lämmöntalteenottolaitteet ullakolta. Uuni on jatkuvatoiminen. (Kuva: Valutec.)

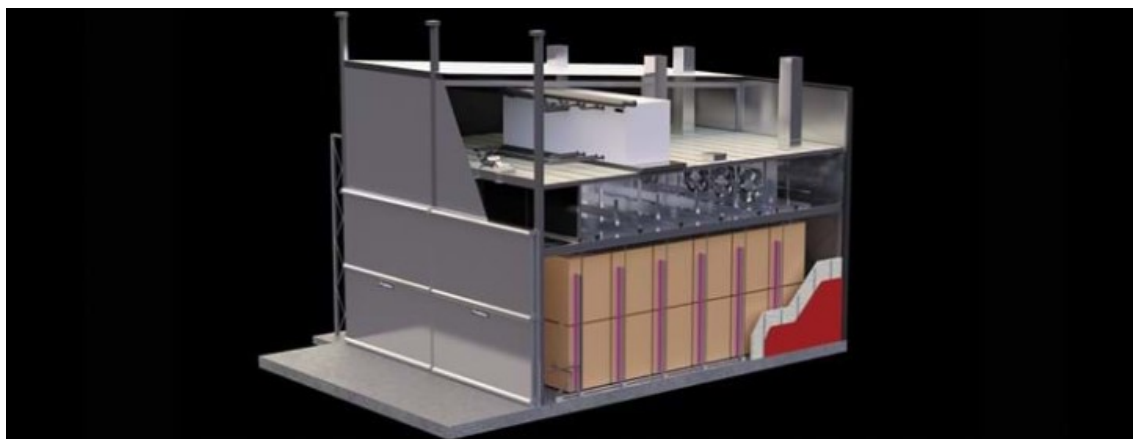
Kaksivaiheisen FeedBack-kanavakuivaimen toiminta perustuu kuivausprosessin jakamiseen kahteen eri vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on hyvin samanlainen kuin 1-vaiheisessa kanavakuivaimessa. Tavoitteena on kuivattaa nopeasti vapaa vesi pois kuormista. Toisessa vaiheessa prosessi keskittyy kuivattamaan sahatavaraa hitaasti vähentämällä kosteushajontaa, ja kosteustasoja kun lastit liikkuvat kohti ulosottopäätä. Toinen vaihe perustuu ilman kiertämiseen kuormien kulkusuunnassa, kun taas ensimmäisessä vaiheessa päinvastoin. Erona yksivaiheiseen kuivaamoon on sahatavaran kuivempi loppukosteus. Eroa on melkein 10 %. Kaksivaiheisen FeedBack-kanavakuivaimen toiminta on monipuolisempi, laajempi käytettävyys puun eri dimensioissa. Se tarjoaa myös suuremman kuivauskapasiteetin. On myös olemassa kaksivaiheinen OTC-kanava, jonka tarkoitus vastata kamarikuivaamon olosuhteita kuivauskaavoja hyödyntämällä. Ilmankulku on käänteinen toisen vaiheen välillä verrattuna FeedBack kanavaan. (Varis 2017, 135–136.)

2.8 Kamarikuivaamo

Kamarikuivaamot ovat monikäyttöisimpiä kaikista kuivaamoista, koska kuivaus voidaan mukauttaa melkein mihin tahansa puulajiin ja dimensioon. Ainoana heikkoutena on, että se ei sovellu juurikaan sivulautojen kuivaukseen. Suurin syy käyttää kamarikuivaamoja on kuivatessa paksua sahatavaraa, joka on herkkä halkeamiselle. Lautaerät uunin sisällä ovat pieniä, mutta olosuhteet ovat paljon kontrolloidummat kuin kanavakuivaamossa. Merkittävänä erona kanavakuivaamoon on myös ilman kiertäminen molempiin suuntiin muutaman tunnin välein. (Varis 2017, 132.)

Suurin etu on juuri yhden erän yksilöllinen kuivaus. Tämä perustuu siihen, että jokaiselle erälle syötetään valmiiksi luodut prosessikaavat, jotka määrittävät olosuhteet uunin sisällä. Oikean kaavan valinta on äärimmäisen tärkeää, kun halutaan ylläpitää hyvä kuivauskapasiteetti. (Varis 2017, 133.)

Kuivausprosessi kamarikuivaamossa etenee seuraavanlaisesti. Kostean ilman avulla kontrolloidaan kosteutta ja lämpöä. Ilman kierrätykseen käytetään moottoreita, jotka kuljettavat ilmaa kuormien lävitse. Kamarin sisällä on lämpöpattereita, joiden tehtävänä on haihduttaa kosteutta. Vesihöyrystä uunin sisällä päästään eroon ilmanvaihtokanavien avulla. Tietokoneohjelmiston avulla kamarin olosuhteita ohjataan eräkohtaisesti. Ohjaus perustuu pääasiassa märkä- ja kuivalämpötilaa mittaamalla. (Varis 2017, 133.)



Kuva 4. Kamarikuivaamo täytetään edestä trukin tai kiskotraverssin avulla. Lautojen kuivaus tapahtuu erissä. (Kuva: Valutec)

2.9 Lämmöntalteenotto ja lämmönvaihdin

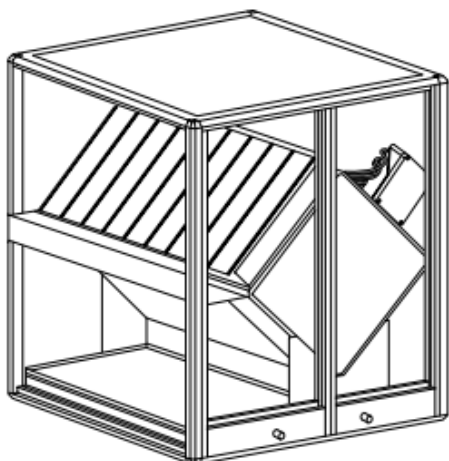
Lämmöntalteenotossa lämmenteestä tilasta tai nesteestä otetaan lämpöenergiaa talteen uudelleen käytettäväksi lämmönvaihtimilla (Vaillant 2024a). Tällä saavutetaan säästöjä energiankulutuksessa ja kustannuksissa sekä pienennetään hukkalämmön määrää (Aeris 2021). Lämmöntalteenottoa on kolmea erityyppiä: rekuperatiivinen, regeneratiivinen ja nestekiertoinen lämmöntalteenotto. (Vaillant 2024a.)

Lämmönvaihdin on laite, jolla otetaan talteen lämpöä sen uudelleenhyödyntämistä varten eli tehdään lämmöntalteenottoa. Lämmönvaihtimesta käytetään myös nimeä lämmönsiirrin. Lämmönvaihtimen toimintaperiaate on, että sillä siirretään lämpöä lähtevästä väliaineesta toiseen vastaanottavaan väliaineeseen. Väliaineet eivät sekoitu keskenään vaan, niiden välissä on lämpöä johdettava seinä. Tämä mahdollistaa sen, että väliaineiden olomuodot voivat olla erilaisia. (Vaillant 2024b.) Mitä suurempi lämpötilaero luovuttavan ja vastaanottavan virran välillä on, niin sitä tehokkaampaa lämmönsiirto on (Seppänen & Seppänen 2007, 188).

Lämmönvaihtimen tehon kertoo yleensä lämmönsiirtopinnan ala. Yleisesti tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman suuri lämmönsiirtopinta pienessä tilassa. (Seppänen & Seppänen 2007, 188.) Lämmönvaihtimella saadaan siis hyödynnettyä lämpöenergia, joka muussa tapauksessa menisi täysin hukkaan. Lämmitystekniikoissa, teollisuudessa, jäähdytys- ja ilmastointitekniikoissa käytetäänkin usein lämmönvaihtimia. (Vaillant 2024b.)

Seppäsen ja Seppäsen (2007) mukaan vastavirtaus on edullisin lämmönsiirtimien virtausgeometria. Myötävirtauksella ei saavuteta yhtä tehokasta lämmönsiirtymistä, koska lämpötilaerot ovat keskimääräistä pienemmät. Yleisin virtausgeometria on kuitenkin ristivirtaus käytännöllisistä syistä. (Seppänen & Seppänen 2007, 188.)

Rekuperatiivisessa lämmöntalteenotossa menopuolen väliaine ja poistupuolen väliaine kiertävät omissa kierroissaan (Vaillant 2024a). Menetelmässä käytetään yksinkertaista levylämmönvaihdinta (kuva 5). Levylämmönvaihtimissa ei ole liikkuvia osia ja se rakentuu kerroksittain olevista alumiinilevyistä. Poistoilma kulkee alumiiniseinämiä pitkin lämmittäen niitä, jonka kautta tuloilman lämpötila kasvaa. (Aeris 2021.) Rekuperatiivinen lämmöntalteenotto on lähes huoltovapaa ja hygieeninen tapa tehdä lämmöntalteenottoa (Vaillant 2024a). Kylmällä säällä levylämmönvaihtimien pinnoilla oleva kosteus voi huurtua ja laite myös tarvitsee viemärin kosteudesta muodostuneelle kondenssivedelle. Viemäri tulisi avata ja tarkistaa vuosittain. Lämmönvaihdin levyt tulisi myös pudistaa vuosittain tai tarvittaessa useamminkin. (Aeris 2021.)



Kuva 5. Ristivirtaukseen perustuva levylämmönsiirrin (Kuva: FläktGroup).

Regeneratiivisessa lämmöntalteenotossa lämpöä varastoidaan varaajaan (Vaillant 2024a). Lämpöä liikuttava väliaine kerää lämpöä vuorotellen lämmeten ja viilentyen ilmavirrassa (Seppänen & Seppänen 2007, 188). Pyörivä lämmönvaihdin on tyypillinen esimerkki regeneratiivisesta lämmöntalteenotosta (kuva 6). Pyörivässä kiekkolämmönvaihtimessa on suuri reiällinen kiekko, jonka läpi virtaavat poisto- ja tuloilma. Ilmavirrat ohjataan kulkemaan omia reittejään pitkin kiekon läpi, esimerkiksi poistoilma kiekon yläosan kautta ja tuloilma sen alakautta. Poistokanavassa oleva kiekon osa lämpenee poistoilman virratessa sen läpi. Lämmennyt kiekon osa sitten lämmittää tuloilmaa pyöriessään. (Aeris 2021.) Pyörivä lämmönvaihdin vaatii kuitenkin useammin huoltoa kuin esimerkiksi levylämmönvaihdin (Vaillant 2024a). Ongelmana järjestelmässä on

poistoilmasta tulevat epäpuhtaudet ja kosteus, mitkä sekoittuvat tuloilmaan. Tämän ratkaisemiseksi laitteissa on oma puhdistussektori, joka erottelee virtauksia. Säättämällä tuloilman paine poistoilmaa suuremmaksi auttaa myös ongelmassa. (Aeris 2021.)



Kuva 6. Pyörivä lämmönsiirrin (Kuva: FläktGroup).

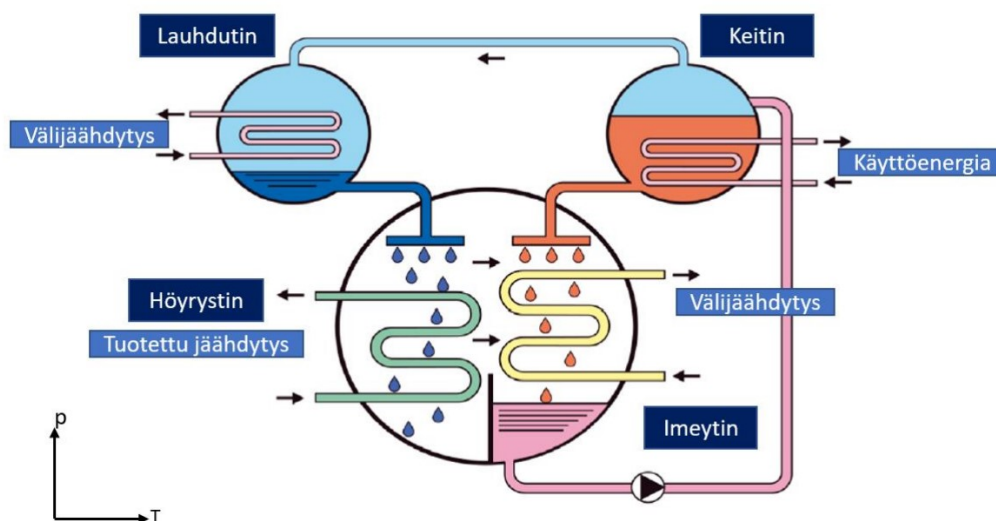
Nestekiertoisissa lämmönvaihtimissa on lamellipatterit, joiden sisällä kiertää vesi-glykoliseosta. Lamellipatterit sijoitetaan yleensä tulo- ja poistoilmavirtaan. (Aeris 2021.) Menetelmässä ei tarvitse sijoittaa suuria poisto- ja ulkoilmakanavia samaan paikkaan. Tehokkuus nestekiertoisessa lämmöntalteenotossa ei ole niin hyvä kuin esimerkiksi levylämmönvaihtimissa. (Seppänen & Seppänen 2007, 188.) Laitetta tulisi puhdistaa säännöllisesti (Aeris 2021).

2.10 Lämpöpumpputekniikat

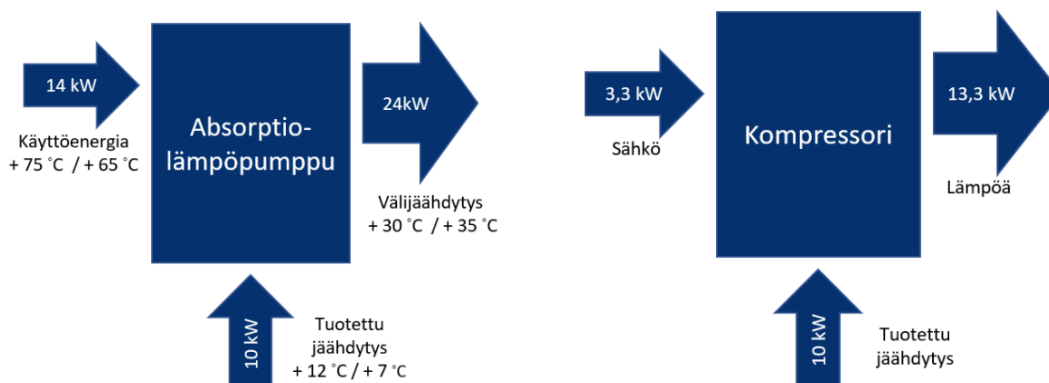
Lämpöpumpulla toteutettuun lämmöntalteenotto järjestelmään kuuluu paisunta-venttiili, kompressori, höyrystin ja lauhdutin. Höyrystin on sijoitettu poistoilmavirtaan, kun taas lauhdutin lämmönluovutuskohteeseen. Lauhdutin mahdollistaa tuloilman lämmittämisen tai lämmönsiirron vesivaraajaan, jossa lämmitetään muun muassa lämmintä käyttövetä. Veden lämpötila saadaan yli 50 asteiseksi lämpöpumpun avulla. Poistupuolen ilmavirta voidaan viilentää alhaisemmaksi, kun ulkoilman lämpötila. Tätä kautta hyötysuhde saadaan erittäin korkeaksi

ulkoilman lämpötilaan verrattuna. Laitetta tulisi puhdistaa säännöllisin väliajoin. (Aeris 2021.)

Absortiolämpöpumpun toimintaperiaatteena on tuottaa jäähdytystä lämpöenergian avulla. Prosessissa hyödynnetään työaineparia ja erityisesti niiden käyttäytymistä liuoksena. Painetta ja lämpötilaa muuttamalla saadaan aikaan muutoksia työaineparin tasapainossa. Absorptiojäähdytyksessä kylmäaine vuoroin liukenee liuottimeen ja vuoroin vapautuu siitä. Absorptio on yleensä lämpöä vapauttava reaktio, kun taas desorptio sitoo lämpöä. Absortiolämpöpumppu tarvitsee toimiakseen kolme elementtiä: kuumaa käyttöenergiaa, lauhdutukseen käytettävää välijäähdytysvirtaa ja jäähdytettävää virtaa, joka on se alue tai tila, jonka absorptiolämpöpumppu pyrkii viilentämään tai jäähdyttämään. (Ramboll 2022.) Absortiolämpöpumppuja voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi lämmöntalteenotossa. Pumput ovat yleisesti kestäviä, sillä niiden rakenteet ovat yksinkertaisia ja liikkuvia osia on vähän (Karelia-ammattikorkeakoulu 2023). Alla olevissa kuvissa on esitelty absorptiolämpöpumppua sekä sen toimintaeroa kompressoriin verrattuna.



Kuva 7. Absortiolämpöpumpun energiavirrat ja pääkomponentit (Kuva: Ramboll).



Kuva 8. Absorptiolämpöpumpun ja kompressorilämpöpumpun toimintaperiaatteet (Kuva: Ramboll).

3 Opinnäytetyössä käytetyt menetelmät

Opinnäytetyö alkoi tutustumalla kuivaamisen prosessiin ja lämmöntalteenoton teoriaan. Suoritimme käyntejä yrityksessä, jossa ensin tutustuimme lähtötilanteeseen sahalla. Lähtötilanneselvityksen jälkeen suoritimme mittauksia, joiden avulla lähdimme laskennallisesti selvittämään lämmöntalteenottolaitteiston energiatehokkuutta hyötysuhteen kautta.

Mittaustulosten laskennallisen määrittämisen jälkeen olimme yhteydessä lämmöntalteenotto teknologiaa tarjoaviin yrityksiin teknologiaselvityksen merkeissä. Yritysten asiantuntijoiden tiedusteluista ja haastatteluista saimme informaatiota, jotta pystyimme suunnittelemaan mahdollisia vaihtoehtoja lämmöntalteenoton vaihtoehtoiseen toteuttamiseen. Suoritimme taloudelliseen kannattavuuteen kohdistuvia laskuja mitattujen lähtötietojen ja yrityksiltä saatujen hinta tietojen avulla.

Esitimme tulokset kolmena eri tulevaisuuden skenaariona, jossa esitimme kirjallisesti ja laskennallisesti eri vaihtoehdot kanavakuivainten lämmöntalteenottolaitteiston tulevaisuudelle.

4 Työn toiminnallinen osuus

4.1 Mittausten valmistelut

Mittauksia varten jouduimme tekemään valmisteluita kuivaamolla. Vierailimme kuivaamolla yhteensä kolmena päivänä. Tutustuimme aluksi koko sahan toimintaan ja tämän jälkeen tarkemmin kuivaamon toimintaan tehtaan henkilökunnan johdolla. Mittauksia varten katsoimme mahdollisimman sopivat mittauspisteet lämmönvaihtimen eri ilmakehävaihtimista.

Kanavakuivaamoita oli yhteensä kymmenen kappaletta. Jos jokaisen kanavan lämmöntalteenottolaitteesta olisi alettu tekemään mittauksia olisi se laatinut todella paljon valmisteluja ja ylimääräisiä porauksia. Tämän seurauksena keskustelimme henkilökunnan kanssa ja päädyimme tekemään mittaukset kanavakuivaimesta numero 14:ta. Tämä kanavakuivain on kanavista tehokkain, joten se toimi hyvin malli esimerkkinä lämmöntalteenotolle, sillä tulosta voitiin monistaa muihin kanaviin. Järjestelmiä mitoittaessa pyritään aina hieman ylimitoittamaan erikoistilanteita varten, joten vaikka jotkut kanavat eivät ole yhtä tehokkaita, ei se tässä tapauksessa haitannut.

Suoritimme mittaukset kolmesta eri kohdasta lämmönvaihdinta. Kaikista mittauspisteistä teimme lämpötila, kosteus ja ilmanvirtausnopeus mittaukset. Otimme ylös myös kaikkien kanavien mitat. Mittasimme myös ulko- ja ullakon lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden. Mittareina toimivat koululta lainaan saatu Swema 3000md (kuva 9) ja tehtaalta lainaan saatu Vaisalan MI70 mittari (kuva 10). Sweman mittariin kiinnitimme kuumalanka-anemometrin, jolla pystyimme mittaamaan lämpötiloja sekä virtausnopeutta. Vaisalan mittarissa oli taas kosteutta mittaava anturi, joka myös mittasi lämpötiloja.

Mittausten alussa havaitsimme, että uunissa olevat olosuhteet vaihtuivat jatkuvasti, joka aiheutti herkästi eroja mittaustuloksiin. Erojen pienentämiseksi toteutimme mittaukset mahdollisimman pienen ajanjakson sisällä toisistaan, jotta saimme tuloksista mahdollisimman tarkkoja. Saimme selville, ettemme voineet

porata useita reikiä ilmavirtakanaviin, joka tarkoitti, että mittauksia ei voinut suorittaa tilavuusvirtamittausstandardien mukaan. Liikutimme mittarin anturia ilmakanan sisällä monessa eri kohtaa, jotta ilman keskivirtaamasta saataisiin mahdollisimman tarkkoja tuloksia.



Kuvat 9 ja 10. Vasemmalla Swema 3000md mittari ja oikealla Vaisalan MI70 kosteusmittari (Kuvat: Roope Ylimaula).



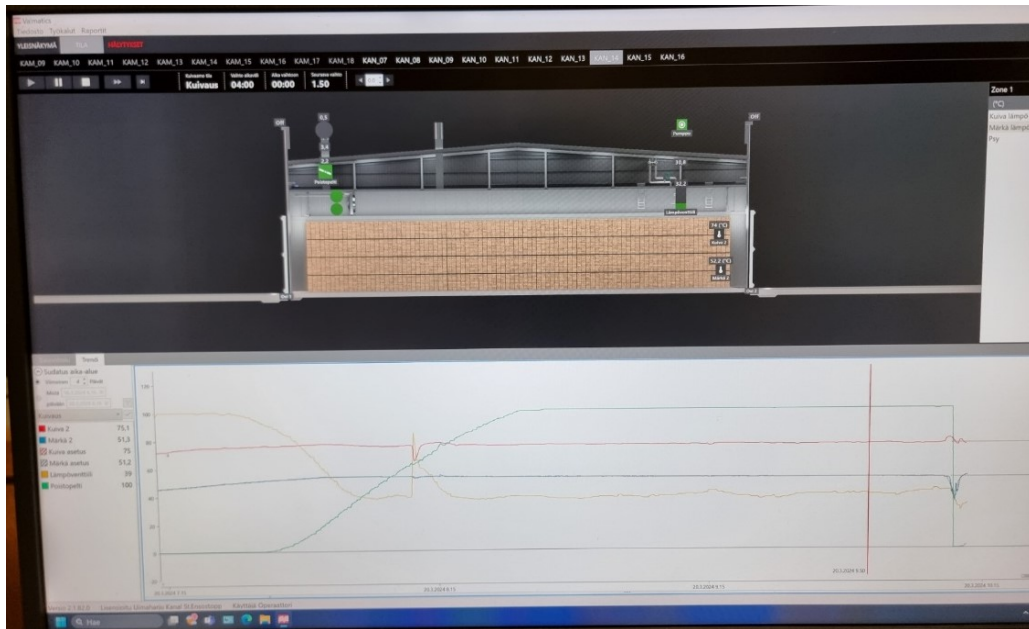
Kuva 11. Kuvassa lämmönvaihdivärjestelmä kuivaamon ullakolta (Kuva: Valtteri Pennanen).

4.2 Mittausten toteuttaminen

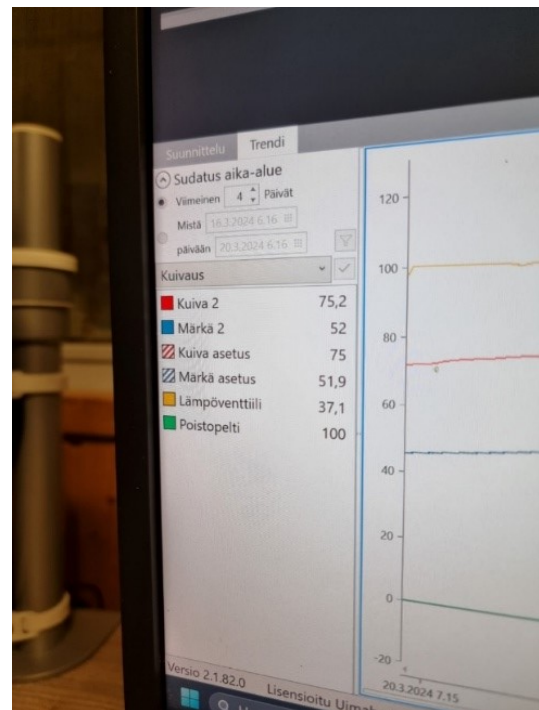
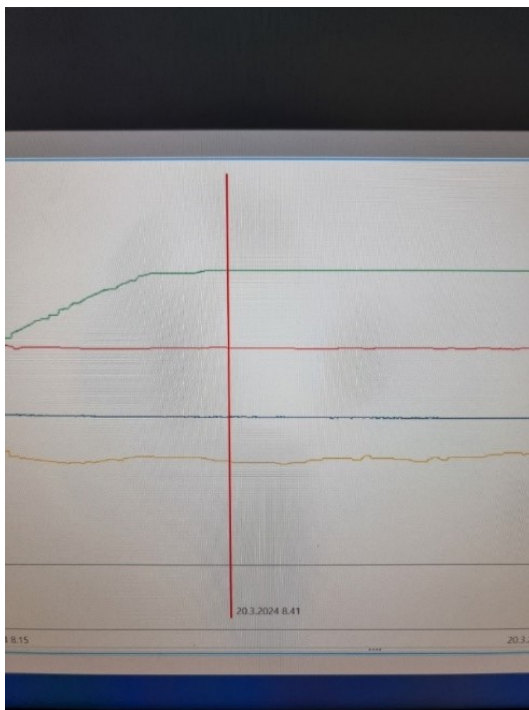
Mittausten aikana uunissa oli 13 rimalastia, jotka kaikki olivat 19 mm x 100 mm dimension mäntylautaa. Kyseinen uuni kuivattaa kyseistä dimensiota suurimman osan käyttöajastaan. Mittausten aikaan poistopelti oli 100 %:ssa eli täysin auki (kuva 16). Aloitimme mittaukset lämpötilan sekä kosteuden mittaamisella ulkoa kuivaamorakennuksen läheisyydestä (kuva 12). Mittaukset jatkuivat ullakolla olevalta imuritulällä (kuva 13). Mittasimme virtausnopeutta, lämpötilaa ja kosteutta. Suoritimme mittauksia kolmesta eri kohtaa ritilää ja laskimme saaduista tuloksista keskiarvon. Mittausaika ilmvirrannopeusmittauksissa oli 30 sekuntia ja kosteusmittauksissa 30 minuuttia. Kosteusmittauksien selvästi pidempi mittausaika johtuu kosteusmittarista, sillä se vaatii aikaa tasaantuakseen. Uunin kosteus arvot pysyvät pitempään samana, kun taas ilmvirrannopeudet vaihtuvat nopeaa uunin automaattisesti säätävän poistopellin vuoksi.



Kuvat 12 ja 13. Ulkoilman ja imuritulän mittaustilanne (Kuvat: Roope Ylimaula).



Kuva 14. Valmatics-ohjelma, jolla pystyimme seuraamaan kuivausprosessin etenemistä (Kuva: Roope Ylimaula).



Kuvat 15 ja 16. Uunissa vallinneet olosuhteet mittaushetkellä (Kuvat: Roope Ylimaula).

Ensimmäisenä mittauspisteenä lämmönvaihtimella oli kuivaimen uunista lämmönvaihtimeen menevä kanava (kuva 17). Kanava oli kaareva neliönmallinen komposiittiputki, johon tehtaan henkilökunta porasi halkaisijaltaan noin kahden senttimetrin kokoisen reiän. Kuumalanka-anemometrissä oli teleskooppivarsi,

joka mahdollisesti virtausnopeuksienmittaamisen monesta eri kohtaa ilmakanaavaa, jotta saimme mahdollisimman tarkkoja tuloksia. Mittauksien jälkeen reikä tukittiin tulpalla.



Kuva 17 ja 18. Uunista lämmönvaihtimeen menevän kanavan näytteenottopiste (Kuvat: Valtteri Pennanen).

Lämmönvaihtimesta ulos menevän ilman mittaukset jouduimme tekemään lämmönvaihtimen päällä olevasta komposiittiputkesta (kuva 19). Mittauspaikan ollessa korkealla, teimme ennakkoon yhdessä tehtaan henkilökunnan kanssa turvakaiteet mittauspaikan ympärille (kuva 21). Näin mittaukset saatiin suoritettua turvallisesti. Putkeen porattiin halkaisijaltaan noin kahden senttimetrin levyinen reikä porakoneella tehtaan henkilökunnan toimesta. Mittauksien jälkeen reikä tukittiin tulpalla.



Kuva 19 ja 20. Lämmönvaihtimesta ulos menevän ilman näytteenottopiste (Kuvat: Valtteri Pennanen)



Kuva 21. Mittauspaikalle rakennetut turvakaiteet (Kuva: Roope Ylimaula).

Lämmönvaihtimesta paluuna takaisin uuniin menevän ilman mittaukset teimme lämmönvaihtimen sivulla olevasta kanavasta (kuva 22). Alumiinista valmistettuun suorakulmion malliseen kanavaan porattiin halkaisijaltaan noin kahden senttimetrin levyinen reikä porakoneella tehtaan henkilökunnan toimesta. Mittauksien jälkeen reikä tukittiin tulpalla.



Kuva 22. Lämmönvaihtimelta takaisin uuniin menevän ilman näytteenottopiste (Kuva: Valtteri Pennanen).

5 Nykyisen lämmöntalteenottolaitteiston mittaustulokset

Siirsimme Swema 3000md mittarilla saadut tulokset Excel-ohjelmistoon, jonne lisättiin Vaisalan MI70 kosteusmittarilla mitatut kosteudet (liite 1). Teimme Excelin pohjalta taulukot tulosten havainnollistamiseksi. Kanavan aloihin ja tilavuusvirtalaskuihin käytetyt kaavat löytyvät liitteistä (liite 2).

Mittaus uunista lämmönvaihtimeen menevästä ilmasta:

Keskiarvo (ilmavirran-nopeus)	2.06	m/s
Keskilämpötila	53.68	°C
Kosteus (RH)	86.83	%
Kanavan ala	1	m ²
Tilavuusvirta	2.06	m ³ /s

Taulukko 1. Taulukossa uunista lämmönvaihtimeen menevän ilman tulokset.

Mittaus uuniin takaisin menevästä ilmasta:

Keskiarvo (ilmavirran-nopeus)	2.43	m/s
Keskilämpötila	39.2	°C
Kosteus	7.63	%
Kanavan ala	1	m ²
Tilavuusvirta	2.43	m ³ /s

Taulukko 2. Taulukossa uuniin takaisin menevän ilman tulokset.

Mittaus ulos menevästä ilmasta:

Keskiarvo (ilmavirran-nopeus)	5.98	m/s
Keskilämpötila	49.62	°C
Kosteus (RH)	100	%
Kanavan ala	0.79	m ²
Tilavuusvirta	4.70	m ³ /s

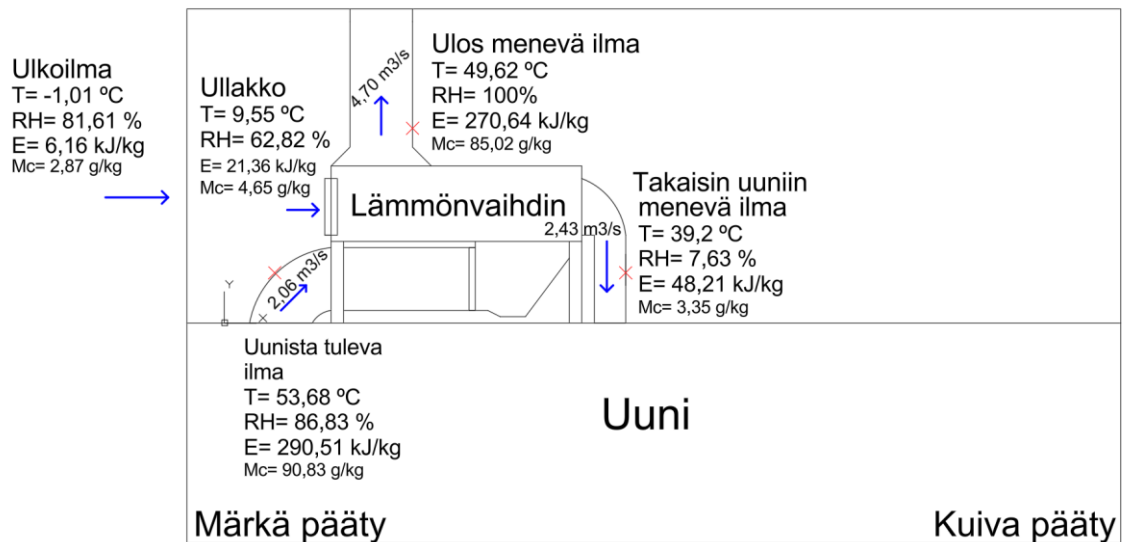
Taulukko 3. Taulukossa ulos menevän ilman tulokset.

5.1 Tulosten analysointi

Mittaustulosten pohjalta loimme Autocad-ohjelmistolla kuvan, joka auttaa hahmottamaan lämmönvaihtimen toimintaa sekä sen energiavirtoja (kuva 23). Selitteet kuvalle löytyy taulukosta 4.

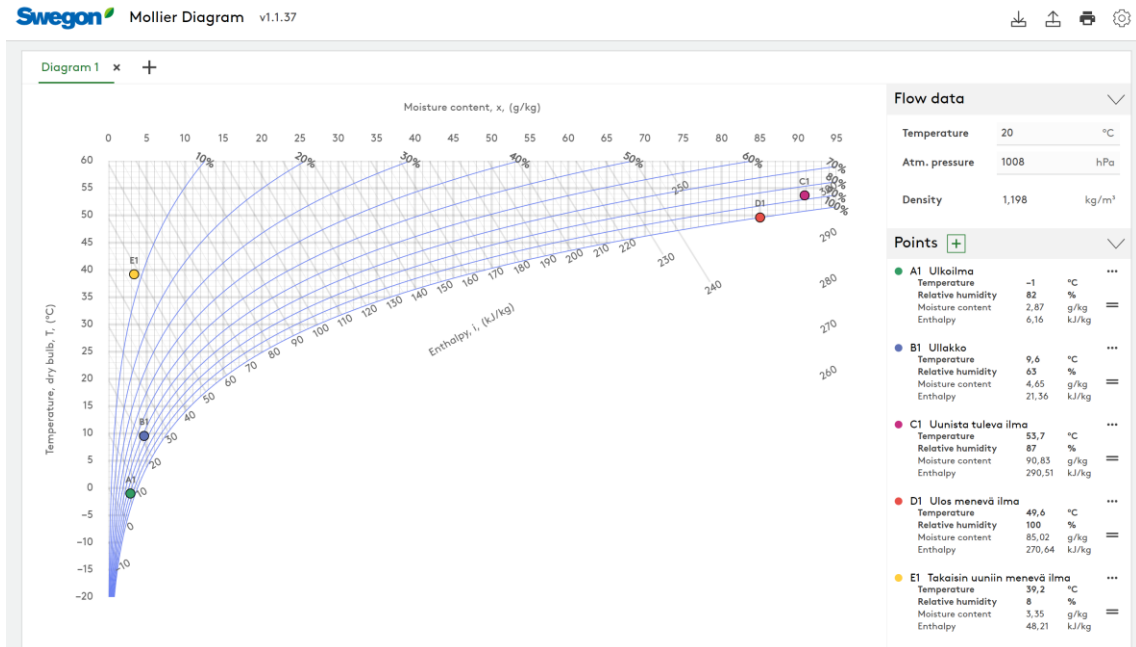
Kuvan selitteet	
T	Temperature (Lämpötila)
RH	Relative humidity (Suhteellinen kosteus)
E	Entalpy (Entalpia)
Mc	Moisture content (kosteuspitoisuus)
Siniset nuolet	Ilman kulkusuunta
Punaiset X	Mittauspaikat

Taulukko 4. Taulukossa on selitteet kuvan 23 lyhenteille.



Kuva 23. Autocadilla piirretty kuva lämmöntalteenottojärjestelmästä.

Entalpioiden laskuun käytimme apuna Swegon nettisivuilta löytyvää Mollier-diagrammityökalua, joka antoi entalpioiden sekä kosteuspitoisuuksien arvot suoraan (kuvio 3).



Kuvio 3. Swegonin Mollier Diagram -työkalu (Kuvio: Swegon).

Mittauksien sekä Swegon-työkalulla saatujen arvojen pohjalta laskimme lämmönvaihtimen energiatehokkuutta. Laskut auttavat havainnollistamaan nykyisen järjestelmän tehokkuutta ja onko nykyisellä tekniikalla vielä parantamisen varaa.

Aloitettiin selvittämällä ilmantiheys uudessa lämpötilassa:

Uunista tuleva ilma:

$$2,06 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t = 53,68 \text{ °C}$$

$$T = 273,15 + 53,68 = 326,83 \text{ K}$$

Vertailulämpötila:

$$\text{Tiheys } 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$t = 0 \text{ °C } T = 273,15 \text{ K}$$

$$P_2 = 100,8 \text{ kPa}$$

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä (liite 2) johdetulla kaavalla saatiin ilmantiheys:

$$\frac{T_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{\rho_1} = \rho_1 = \frac{\rho_2 T_2}{T_1} = \frac{1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 273,15 \text{ K}}{326,88 \text{ K}} = 1,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Lasketaan uunista tulevan poistoilman massavirta:

$$m = \rho V$$

$$q_m = \rho q_v \quad q_v = 2,06 \frac{m^3}{s}$$

$$q_m = 1,08 \frac{kg}{m^3} \times 2,06 \frac{m^3}{s} = 2,22577 \frac{kg}{s} = 2225 \text{ g/s}$$

Entalpiaero uunista tulevan ja ulos menevän ilman välillä:

$$290,51 \frac{kJ}{kg} - 270,64 \frac{kJ}{kg} = 19,87 \frac{kJ}{kg}$$

Ilmavirran energiamäärä uunista tullessa:

$$\Delta E \times q_m$$

$$19,87 \frac{kJ}{kg} \times 2,22577 \frac{kg}{s} = 44,226 \frac{kJ}{s} = 44,2 \text{ kW}$$

Entalpia ero uunista lämmönvaihtimelle tulevan ilman sekä lämmönvaihtimelta uuniin tulevan ilman välillä:

$$\Delta E = 48,2 \frac{kJ}{kg} - 21,36 \frac{kJ}{kg} = 26,85 \frac{kJ}{kg}$$

Uuniin takaisin tulevan ilmavirrannopeus:

$$q_v = 2,43 \text{ m}^3/\text{s}$$

Uunin takasin menevän ilmantiheys:

$$\frac{1,293 \frac{kg}{m^3} \times 273,15 \text{ K}}{(273,15 + 39,2) \text{ K}} = 1,13 \frac{kg}{m^3}$$

Uuniin takaisin menevän ilman massavirta:

$$q_m = 2,43 \frac{m^3}{s} \times 1,13 \frac{kg}{m^3} = 2,75 \frac{kg}{s}$$

Uuniin takaisin menevän ilman energiamäärä:

$$26,85 \frac{kJ}{kg} \times 2,75 \frac{kg}{s} = 73,84 \frac{kJ}{s} = 73,8 \text{ kW}$$

Laskuissa siis ilmeni, että talteen otettu energian määrä ylitti uunista tulevan ilman energiamäärän, mikä ei ole mahdollista. Tälle todennäköisimpänä syynä oli ilmavirtojen mittaukset. Tämä saattoi vääristää massavirtalaskujen tuloksia. Ilmavirtojen nopeusmittauksissa vääristymät ovat melko yleisiä, sillä niiden tarkkamittaus on hankalaa. Poikkeamaa mittauksissamme aiheutti myös se, että emme voineet mitata ilmavirtoja standardien mukaan. Kanavan sisäreunat voivat myös olla kuluneita ja niihin on voinut kertyä likaa, mikä vaikutti ilmavirtoihin.

Ilmavirroissa tapahtui myös paljon hetkittäisiä muutoksia uunin ja sen laitteiston olosuhteiden muuttuessa jatkuvasti. Uunissa oli pelti, joka sääteli ilman ulosottoa uunista, jolla kontrolloitiin olosuhteita. Pelti oli jatkuvassa muutoksessa, eikä se pysynyt pitkiä aikoja samassa tilassa. Suurimman virheen aiheuttaja oli luultavasti uunista lämmönvaihtimelle oleva mittauspiste (kuva 24). Ilmakanavasta oli näkyvillä vain sen kaareva osuus, eikä näin ollut mahdollisuutta mitata ilmanopeuksia putken suorilta osuudelta. Tämä aiheutti suurella todennäköisyydellä heittoa mittauspisteen tuloksessa, sillä ilmavirtaukset eivät olleet tasaisia tämän tyyppisessä kohdassa. Muut mittauskohdat pystyttiin suorittamaan lämmönvaihtimen ilmakanavien suorilta osuuksilta.



Kuva 24. Uunista tuleva kaareva ilmakanava lämmönvaihtimelle, josta mittaukset otettiin (Kuva: Valtteri Pennanen).

Lämmöntalteenotontarkastelu ilmavirtojen energiamäärien kautta ei onnistunut luotettavasti, joten laskettiin lämmöntalteenoton tehokkuus muita arvoja käyttäen. Laskettiin siis ensin teoreettinen maksimiteho lämmöntalteenotolle, jos ilma voitaisiin jäähdyttää ullakon ilma olosuhteisiin.

$$\Delta E = 290,51 \frac{kJ}{kg} - 21,36 \frac{kJ}{kg} = 269,15 kJ = 269,15 kW$$

Hyötysuhde määritettiin mitatun entalpiamuutoksen ja teoreettisen maksimimuutoksen avulla:

Tulevan ilman tiedot:

$$t = 53,68 \text{ °C}$$

$$RH = 86,83 \%$$

$$E = 290,51 \frac{kJ}{kg}$$

Poistuvan ilman tiedot:

Oletetaan, että poistuva ilma saatiin jäähdytettyä ullakon lämpötilaan. Entalpia määritettiin Swegonin Mollier -diagrammin avulla.

$$t = 9,55 \text{ °C}$$

$$RH = 100 \%$$

$$E = 28,29 \frac{kJ}{kg}$$

Teoreettinen ilmojen entalpia erotus, jos lämmönvaihdin toimisi 100 % hyötysuhteella:

$$\Delta E = 290,51 \frac{kJ}{kg} - 28,29 \frac{kJ}{kg} = 262,22 \frac{kJ}{kg}$$

Uunista lämmönvaihtimelle tulevan ilman sekä lämmönvaihtimelta ulos menevän ilman entalpioiden erotus:

$$\Delta E = 290,51 \frac{kJ}{kg} - 270,64 \frac{kJ}{kg} = 19,87 \frac{kJ}{kg}$$

Kun tiedettiin entalpioiden erotus 100 %:n hyötysuhteella sekä meidän mittauksien mukaan tapahtunut entalpioiden erotus, voitiin määrittää tämänhetkinen hyötysuhde lämmöntalteenottolaitteistolle:

$$\frac{19,87 \frac{kJ}{kg}}{262,2 \frac{kJ}{kg}} \times 100 \% = 7,57 \% = 7,6 \%$$

Seuraavaksi selvitettiin miten hyvä levylämmönvaihtimen hyötysuhde voi maksimissaan olla, jos sillä saataisiin lämmitettyä ullakolta tuleva ilma samaan olosuhteisiin kuin uunista tuleva ilma.

Ullakolta tuleva ilma ennen lämmitystä:

$$t = 9,55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$RH = 62,8 \%$$

$$E = 21,36 \frac{kJ}{kg}$$

$$Mc = 4,65 \frac{g}{kg}$$

Lämmityksen jälkeen ilman teoreettiset arvot, entalpia ja suhteellinen kosteus määritettiin Mollier-diagrammityökalulla:

$$t = 53,68 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Mc = 4,65 \frac{g}{kg}$$

$$RH = 5 \%$$

$$E = 66,31 \frac{kJ}{kg}$$

Teoreettinen maksimi lämmöntalteenotolle entalpioiden erotusta käyttämällä:

$$\Delta E = 66,31 \frac{kJ}{kg} - 21,36 \frac{kJ}{kg} = 44,95 \frac{kJ}{kg}$$

Tällä hetkellä tapahtuva entalpioiden erotus:

$$48,21 \frac{kJ}{kg} - 21,36 \frac{kJ}{kg} = 26,85 \frac{kJ}{kg}$$

Teoreettisen ja nykytilanteen arvojen avulla voitiin selvittää, paljon kyseisellä tekniikalla on mahdollista parantaa hyötysuhdetta:

$$44,95 \frac{kJ}{kg} - 26,85 \frac{kJ}{kg} = 18,1 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{18,1 \frac{kJ}{kg}}{26,85 \frac{kJ}{kg}} \times 100 \% = 67 \%$$

Lämmöntalteenoton maksimihyötysuhde nykyisellä järjestelmällä, kun tiedettiin nykyinen hyötysuhde ja kuinka paljon järjestelmässä olisi parantamisen varaa teoreettisesti:

$$7,6 \% \times 1,67 = 12,5 \%$$

Eli hyötysuhteen parantamisvaraksi nykyisellä lämmöntalteenottojärjestelmällä jäi vain:

$$12,5 \% - 7,6 \% = 4,9 \%$$

Tuloilmavirta ei ollut tarpeeksi suuri, jotta ilmaa voisi jäähdyttää nykyisellä järjestelmällä. Ilmavirtauksen pitäisi olla paljon suurempi, jos nykyisestä järjestelmästä haluttaisiin parempia hyötysuhteita.

6 Uudet järjestelmät ja tekniikat

Laitteiston ollessa vanha, uuden lämmöntalteenottojärjestelmän hankkiminen tulee kysymykseen. Markkinoilla on tarjolla rosterista valmistettuja samaan teknologiaan perustuvia levylämmönvaihtimia. Suomessa suurimpia puutavaran kuivauslaitteiden valmistajia ovat esimerkiksi Valutec Oy sekä Heinolan Saha-koneet Oy. Molempien yritysten laitteisto valikoimiin kuuluu myös lämmöntalteenottolaitteistot kanavakuivaimille. Olimme yhteydessä yrityksiin ja he lupailivat lämmöntalteenoton hyötysuhteen olevan 15–20 prosentin luokkaa uusilla

laitteilla. Omien mittaustemme mukaan hyötysuhteen maksimi voi kuitenkin olla vain 12,5 prosenttia.

Lämpöpumpputekniikka voisi olla lupaava vaihtoehto kyseiseen laitokseen. Tekniikan avulla saataisiin jäähdytettyä tehokkaasti uunista tulevaa kosteaa ja lämmintä ilmaa. Tämän jälkeen lämmintä ilmaa voitaisiin suoraan puhaltaa takaisin uuniin lämpöpattereille, jotka lämmittävät kuivuria. Kompressori lämpöpumput kuluttavat paljon sähköä, ja siksi kuivaamon tapauksessa lämpöenergian, eli höyrynkäyttö sähköä sijasta olisi kannattavampaa.

Absorptiolämpöpumpun energianlähteenä voidaan kuivaamon tapauksessa käyttää matalapainehöyryä, samaa höyryä, jolla lämmitetään valmiiksi jo uunin patteristoa. Tämä energia on myös kohteelle halpaa, sillä höyry syntyy sahan viereisen sellutehtaan voimalaitoksen sähköntuotannon ylijäämänä. Ylijäämä matalapainehöyryä pusketaan ulkoilmaan tai sitä hyötyä käytetään lämmityksessä, kuten sahalla tehdäänkin.

Absorptiolämpöpumppuja käytetäänkin jo teollisuuden mittakaavassa esimerkiksi Helsingin Vuosaarella Helen Oy:lla. Biovoimalaitokselle on rakennettu savukaasujen lauhdutusjärjestelmä absorptiolämpöpumpputekniikkaa käyttäen. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2023.) Kuivaamon tapauksessa tavoitteena olisi siis valjastaa prosessissa ulkoilmaan poistuva hukkalämpö mahdollisimman tehokkaasti takaisinkäyttöön.

7 Lämmöntalteenottolaitteiston skenaariot

Tulosten perusteella teimme seuraavat skenaariot. Ensimmäisenä skenaariona on uuden järjestelmän hankkiminen käyttäen samaa tekniikkaa. Toisena skenaariona on lämpöpumpputekniikoiden käyttäminen lämmöntalteenottojärjestelmässä. Kolmantena skenaariona on se, että nykyiselle järjestelmälle ei tehdä mitään vaan se pysyy samana. Uuden järjestelmän hankkimista varten otimme

yhteyttä yrityksiin, jotka voisivat tarjota järjestelmää kyseisen kokoluokan laitokseen.

7.1 Samaan teknologiaan perustuvan uuden lämmöntalteenottojärjestelmän hankkiminen

Kokonaan uuden lämmöntalteenottojärjestelmän hankkiminen voisi teoriassa kuulostaa kannattavalta vaihtoehdolta, koska nykyinen järjestelmä on jo vanha. Monet osat alkavat olla kuluneita ja lämmönvaihtimen kenno ei ole enää uudenveroinen. Laskelmiemme perusteella uuden järjestelmän hankkiminen ei voisi parantaa hyötysuhdetta kuin noin viisi prosenttiyksikköä. Tämä on niin pieni parannus verrattuna suureen investointiin, joka pitäisi tehdä uutta järjestelmää hankittaessa. Teimme myös asian varmistamiseksi laskelman.

Olimme yhteydessä Valutec Oy -laitevalmistajaan, joka voisi tarjota uutta lämmöntalteenottojärjestelmää. Järjestelmä olisi toiminnaltaan samanlainen, kun nykyinen järjestelmä eli levylämmönvaihdin tekniikalla toimiva lämmöntalteenottojärjestelmä. Valmistajan mukaan energiantalteenotto olisi uusilla laitteilla noin 15–20 prosentin luokkaa riippuen kuivatettavasta puutavarasta. Valittavana olisi myös kaksi eri kennokokoluokkaa.

Yhden lämmöntalteenottojärjestelmän hinnaksi saimme 85 000 € - 108 000 € riippuen lämmöntalteenottokennon koosta, hinta ei sisällä asennus kustannuksia. Tämä tarkoittaisi, että investointikustannus kaikille lämmöntalteenottojärjestelmille olisi noin 850 000 € - 1 080 000 € sekä vielä asennuksen hinta päälle.

Kun tiedetään uusien laitteiden hinta, voidaan arvioida, onko hankinta kannattavaa. Käytössä meillä on nykyisen järjestelmän energiahinnat, minkä avulla saadaan selville vuosittaiset säästöt, jos järjestelmä vaihtuisi uuteen. Uutena prosenttiyksikkönä olemme käyttäneet omaa määrittelemäämme teoreettista maksimihyötysuhdetta eli 12,5 %:a, mutta tähän tuskin voidaan päästä, niin oletetaan, että voitaisiin saavuttaa 90 %:a maksimihyötysuhteesta.

Lähtötiedot:

Sähköhinta: xx €/ kWh = xx snt/ kWh (Liite 3)

Höyrynhinta: xx €/ kWh = xx snt/ kWh (Liite 3)

Nykyisen järjestelmän hyötysuhde: 7,6 %

Nykyisen järjestelmän teoreettinen maksimi hyötysuhde: 12,5 %

Lämpöenergian määrä: 75404 MWh vuodessa (Vanninen 2015, 31)

Uunien lukumäärä: 28 kappaletta (Vanninen 2015, 31)

Toimivia kanavakuivaimia: 10 kappaletta

Jos olisi mahdollista päästä 90 %:n hyötysuhteeseen teoreettisesta maksimi-hyötysuhteesta, joka on 12,5 %.

$$0,90 \times 12,5 \% = 11,25 \%$$

Uuden ja vanhan hyötysuhteen erotus:

$$11,25 \% - 7,6 \% = 3,65 \%$$

Höyrynmäärää arvioidessa käytetään pohjatietona Vannisen (2015) tekemää opinnäytetyötutkimusta kuivaamon energiankulutuksesta (Vanninen 2015, 31).

Selvitetään yhden uunin lämpöenergiankulutus:

$$\frac{75404 \text{ MWh}}{28} = 2693 \text{ MWh} = 2693000 \text{ kWh}$$

Tässä energiankulutusmäärityksessä on ollut käytössä 15 kanavakuivaamaa, joita on nykyisin käytössä vain kymmenen. Tämä ei kuitenkaan vääristä laskuja, sillä yhden uunin energiankulutus pysyy lähes samana. Lämpöenergiankulutuksessa on myös sekaisin kanava- ja kamarikuivaimia, joissa on kulutuseroja. Laskut ovat siis karkea todennus antamaan informaatiota. Tarkempien laskujen tuottamiseen tarvittaisiin mitata jokaisen uunin yksittäinen lämpöenergiankulutus. Emme voi esittää energianhintoja salassapitosopimuksen mukaisesti, niin tarkemmat taloudelliset laskut löytyvät liitteestä kolme.

Investointikustannuksen ollessa miljoonan luokkaa ja tiedettäessä vuosittainen säästö määrä, mitä uusilla laitejärjestelmillä voitaisiin saavuttaa, pystytään

laskemaan takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuajasta tulisi aivan liian pitkä, noin 150 vuotta (liite 3).

7.2 Lämpöpumpputekniikka lämmöntalteenotossa

Käytännössä absorptiolämpöpumppu voisi olla hyvä vaihtoehto kuivaamon lämmöntalteenottoon. Uunista tulevaa kosteaa ja lämmintä ilmaa viilennettäisiin ennen ulkoilmaan pääsyä käyttämällä apuna matalapaineista höyryä, jota tuleekin jo kuivaamon käyttöön lämmitysenergiana. Viilennyksestä syntyvä lämpöenergia ohjattaisiin takaisin suoraan lämpöpattereille, tehden prosessista huomattavasti paljon energiatehokkaamman, säästämällä tarvittava höyrynmäärää.

Tutkimuksemme ja haastattelut alanasiantuntijan kanssa kuitenkin kertovat, ettei absorptiolämpöpumppu olisi soveltuva järjestelmä tähän käyttötarkoitukseen ja ympäristöön. Arviota järjestelmän käytettävyydestä saimme kyseistä teknologiaa edustavalta laitetoimittajalta, joka tarjosi meille tietoja sekä esimerkiksi aiemmasta hankkeesta, jossa 130 asteinen höyry ei riittänyt siihen, että absorptiolämpöpumppulaitteisto toimisi kunnolla.

Laitetoimittajan mukaan laiteita tarjoavat valmistajat odottavat, että käytettävissä oleva höyry olisi yli 150 celsiusastetta. Laitetoimittajan mukaan, jos vanha järjestelmä on toimintakuntoinen niin se kannattaisi pitää samana. (Haavisto 2024.) Kuivaamolle sellutehtaalta tuleva höyry on lämpötilaltaan noin 130 celsiusastetta, eli lämpötila ei riitä aivan laitetoimittajalta saatuihin lukemiin.



Kuva 25. Tehtaalta tuleva höyry (Kuva: Valtteri Pennanen)

Tässäkin skenaariossa tulee ottaa huomioon se, että laitteisto vaatisi suuria investointeja ja uunien sisäistä tekniikka pitäisi muuttaa. Kaiken tämän avulla voitaisiin toki alentaa höyrynkäyttöä ja tehdä prosessista energiatehokkaamman, mutta taloudellisesta näkökulmasta se ei tässä olisi kovinkaan järkevää. Varsinkin tilanteessa, missä lämpöenergian eli höyryn hinta on niin edullinen.

Kompressorilämpöpumpuilla voitaisiin myös toteuttaa lämmöntalteenottoa kivihiilivaamon käyttötarkoitusta varten. Absorptiolämpöpumppuun verrattuna järjestelmän energiana toimisi sähkö. Tilanteessa, missä sähkön kustannus on melkein yhdeksänkertainen höyryn hintaan verrattuna, voidaan ajatus kumota pois vaihtoehtoista. Teoriassa järjestelmä olisi kyllä mahdollinen ja energiasäästöä höyryn osalta saataisiin aikaan, mutta taloudellisesti tämä ei olisi kannattavaa.

Osoitimme seuraavan esimerkin avulla miten huono vaihtoehto sähköllä toimiva kompressorilämpöpumppu olisi. Emme voi esittää energianhintoja salassapitosopimuksen mukaisesti, niin tarkemmat laskut löytyvät liitteestä neljä.

Lähtötiedot:

Ullakon lämpötila: 9,55 °C

Uunista tulevan ilman lämpötila: 53,68 °C

Sähkönhinta: xx €/kWh (Liite 4)

Höyrynhinta xx €/kWh (Liite 4)

Muutetaan celsiusasteet kelvineiksi:

$$T_c = 273,15 + 9,55 = 282,7 \text{ K}$$

$$T_h = 273,15 + 53,68 = 326,83 \text{ K}$$

Ideaalisen lämpöpumpun lämpökerroin on:

$$\varepsilon_l = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

$$\varepsilon_l = \frac{326,83}{326,83 - 282,7} = 7,4$$

Jaetaan saatu lämpöpumpun lämpökerroin sähkönhinnalla:

$$\frac{xx}{7,4} = xx \text{ €/kWh (Liite 4)}$$

Sähkön- ja höyrynhinnan ero:

$$xx \text{ €/kWh} > xx \text{ €/kWh (Liite 4)}$$

Höyryn hinnan ollessa xx €/kWh (liite 4) huomasimme, että lämpöpumpun sähkönhinta jäisi kalliimmaksi. Tämäkin luku saavutettaisiin vain, jos lämpöpumput toimisivat ideaalisesti. Todellisella lämpöpumpulla suorituskyky on aina huonompi kuin ideaalisella lämpöpumpulla (Suvanto 2015, 481). Lisäksi mukaan tulisi lämpöpumppujen investointikustannukset. Tämä siis osoittaa, että vaihtoehto ei ole taloudellisesti kannattava.

7.3 Järjestelmä pysyy samana

Taloudellisesta näkökulmasta tämä on paras vaihtoehto. Tekemiemme laskujen perusteella parantamisvaraa ei ole teoreettisestikin kuin noin viisi

prosenttiyksikköä uudella järjestelmällä. Uusi laitteisto vaatisi isoja investointeja, mutta niistä saatu hyöty, tässä tapauksessa höyryn säästäminen, ei olisi kannattavaa.

Järjestelmä alkaa olemaan kuitenkin vanha, mikä tarkoittaa sitä, että laitteiston osat alkavat olla kuluneita. Joitain osia olisi mahdollista uusia ilman, että koko laitteistoa tarvitsisi vaihtaa. Kennonvaihto voisi olla yksi potentiaalinen vaihtoehto, sillä lämmönvaihtimessa käytetty alumiinikenno voi olla kulunut ajan saatossa kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa. Se, minkä verran osienvaihto auttaisi kasvattamaan lämmöntalteenottoa, on vaikea arvioida. Ongelmaksi muodostuu myös se, onko kyseiseen laitteistoon olemassa enää varaosia, sillä laitteisto on kuitenkin noin 50 vuotta vanha. Kanavakuivaimen lämmöntalteenotto-tekniikka ei ole muuttunut paljoa ja uudetkin samaan tekniikkaan perustuvat lämmönvaihtimet voivat muistuttaa rakenteeltaan nykyistä järjestelmää.

8 Pohdinta

8.1 Skenaarioiden yhteenveto

Järjestelmän jättäminen ennalleen on taloudellisesta näkökulmasta ehdottomasti paras vaihtoehto. Lämmöntalteenoton hyötysuhdetta ei pystytä nostamaan laskujemme mukaan uudellakaan järjestelmällä kuin noin viisi prosentti yksikköä. Laskuillamme saimme selville myös, että uudet lämmöntalteenottojärjestelmät ovat investoinneiltaan liian kalliita vaihtoehtoja niiden saamaan hyötyyn nähden. Takaisinmaksuajaksi tulee noin 150 vuotta, joka on aivan liian paljon. Samat investointikustannusongelmat tulevat vastaan myös absorptio- ja kompressorilämpöpumppujen kohdalla. Lisäksi kompressorilämpöpumput vaativat toimiakseen sähköä, jonka hinta on moninkertaisesti kalliimpaa, kuin sahalla käytössä olevan höyrynhinta.

8.2 Toteutuksen arviointi

Opinnäytetyön toteutus onnistui mielestämme tavoitteisiimme nähden hyvin. Saimme tehtyä lyhyessä ajassa kattavan tietoperustan sekä saimme realistisia lukuja, joilla pystyimme arvioimaan lämmöntalteenottojärjestelmän parannuksien kannattavuutta.

Ilmavirran mittaus aiheutti haasteita, koska sitä ei pystytty suorittamaan ilmakehän virtausmittauksen standardien mukaisesti, joka aiheutti hankaluuksia hyötysuhteen arvioimisessa. Normaalisti ilmavirran mittaukset tulisi toteuttaa ilmakehän suorilta osuudelta, useasta eri mittaus reiästä. Saimme kuitenkin tarpeeksi dataa kerättyä, että pääsimme lopputulokseen lämmönvaihtimen hyötysuhteesta laskemalla energiavirtoja entalpioiden avulla. Mittauksien avulla määritetty hyötysuhde vastaa kuitenkin hyötysuhdetta, jonka kyseisen kaltaisesta lämmöntalteenottolaitteesta voisi realistisesti saada.

Haasteena tutkimustehtävässä oli se, että kaikkea informaatiota ei ollut suoraan saatavilla. Mittauksia piti suorittaa paljon itse, koska järjestelmässä ei ollut omia mittareita. Tarvitsemiamme suureita, kuten lämpötilaa, ilmavirtojen nopeuksia tai kosteutta ei ollut tiedossa. Mittauspisteapaikat piti järjestää itse, koska niitä ei ollut valmiina laitteistossa. Olosuhteiden muutokset uunissa tekivät myös sen, että mittaukset piti suorittaa mahdollisimman lyhyellä aikataululla toisistaan. Mittaukset saatiin kuitenkin järjestettyä turvallisesti ja parhaamme mukaan olosuhteisiin nähden.

Yritys hyödyntää opinnäytetyön tuloksia arvioidessaan lämmöntalteenottojärjestelmän uudistamisen kannattavuutta. Opinnäytetyömme voisi toimia mallina, miten vastaavanlaisen tutkimuksen voisi järjestää jossain muussa kohteessa. Meille karttui myös kokemusta aihepiiristä, mikä mahdollistaisi tutkimuksen tekemisen jossain toisessa kohteessa tai kokemuksen hyödyntämisen työelämässä.

8.3 Luotettavuus ja eettisyys

Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys perustuu siihen, että työssä noudatettiin hyvän tieteellisen käytännön tapoja (HTK). HTK pohjana toimi luotettavuus, arvostus, rehellisyys ja vastuunkanto. Korkeakoulut ovat sitoutuneet noudattamaan näitä opinnoissa ja opinnäytetöissä. (Tenk 2023.)

Hyvän tieteellisen käytännön tapoihin kuuluu vahvasti luotettavuus. Tällä varmistetaan tieteellisen toiminnan laatu opinnäytetyön eri vaiheissa. (Tenk 2023.) Pyrimme opinnäytetyössä käyttämään mahdollisimman luotettavia lähteitä sekä netistä, että kirjallisuudesta sekä huomioimaan niiden julkaisuajankohdan. Opinnäytetyötä tehdessä toimimme rehellisesti sekä avoimesti ja arvostaen kaikkia mukana olevia osapuolia. Perustelimme myös saamamme tulokset sanallisesti, että laskennallisesti, mikä lisäsi työn luotettavuutta.

Ennen tutkimusaineiston keruuta, olimme hoitaneet kuntoon tarvittavat luvat ja suostumukset, jotta aineiston keruu onnistui eettisesti. Toiminnalla osoitettiin arvostusta tutkittavaa kohdetta, ympäristöä ja tutkimukseen osallistuvia ihmisiä kohtaan. Aineisto kerättiin turvallisella ja toimeksiantajan hyväksymällä tavalla.

Toimeksiantajan kanssa oli sovittu aineiston käytöstä, sekä sen julkistamisen rajaamisesta. Salassa pidettävistä asioista sovittiin toimeksiantosopimuksessa. Tutkimuksen edetessä aineiston käytön laajuutta voitiin tarkentaa. Tavoitteena oli kuitenkin käyttää aineistoa mahdollisimman laajasti ja edistää sen jatkokäyttöä ja avoimuutta sen, mukaan mikä oli mahdollista, rikkomatta kuitenkaan sopimuksia ja luottamusta työn osapuolten välillä.

8.4 Jatkokehitysmahdollisuudet

Kohteeseen voisi suorittaa uusia mittauksia ja lisälaskentoja. Tarkasteluun voisi ottaa mukaan höyrylinjan ja sen lämmönvaihtimen, joka tuottaa lämmintä vettä uuneissa oleville pattereille. Kanavakuivaimien lämmönvaihtimista syntyy havaintojemme mukaan kondenssivettä, noin yksi litra minuutissa tahdilla. Tässä

vedessä on jonkin verran lämpöenergiaa vielä jäljellä, mitä voisi tutkia olisiko sitä mahdollista hyödyntää lämmitys tai muun prosessin tehokkuuden lisäämistarkoitukseen. Vaikka hankintoja uusien lämmönvaihtimien osalta ei tehtäisi, niin nykyisen lämmöntalteenottojärjestelmän iän huomioiden, voisi suorittaa tarkastelun järjestelmän osien, kuten lämmöntalteenottokennon kunnosta. Muiden kanavien lämmöntalteenottolaitteistosta voisi suorittaa samankaltaisia mittauksia, jotta nähtäisiin, onko hyötysuhteet niissä samoja ja ovatko laitteet kunnossa.

Lähteet

- Aeris. 2021. Lämmöntalteenotto ja hyötysuhde. <https://www.tietosalkku.fi/lammontalteenotto-ja-hyotysuhde>. 24.2.2024.
- FläktGroup. 2023. Recuterm® eqrk– ristivirtalevyllämmönsiirrin asennus- ja huolto-ohje. <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/130028?analytics=0>. 1.3.2024.
- FläktGroup. 2024. Regasorp pyörivä lämmönsiirrin. <https://www.flaktgroup.com/fi/products/ilmankasittelykoneet/energia-antaltteenottoratkaisut/regasorp-pyoriva-lammonsiirrin/>. 1.3.2024.
- Haavisto, Ilkka. 2024. Condens heat recovery Oy, suullinen tiedonanto. 16.4.2024.
- Ilmatieteenlaitos. 2024. Ilman kosteus. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilman-kosteus>. 9.2.2024.
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2023. Lämpöpumpuilla hukkaenergiaa talteen ja energiantuotannon hyötysuhde kasvuun. <https://www.karelia.fi/2023/11/lampopumpuilla-hukkaenergiaa-talteen-ja-energian-tuotannon-hyotysuhde-kasvuun/>. 12.4.2024.
- Koneviesti. 2024. Mollierin diagrammi avuksi kuivausajan arviointiin. <https://www.koneviesti.fi/maatalous/95a2c869-3536-5f19-8e89-d38922b079af>. 27.2.2024.
- Peda.net. 2019. Reaktiot ja energia, KE3. [https://peda.net/sievi/sievin-lukio/op-piaineet2/kemia/ke3/tkapp/re2:file/download/5224b593cd90fcb478d32b25322e0988b39f9ede/Reaktiot ja energia KE3 LUKU 5.1 2019.pdf](https://peda.net/sievi/sievin-lukio/op-piaineet2/kemia/ke3/tkapp/re2:file/download/5224b593cd90fcb478d32b25322e0988b39f9ede/Reaktiot%20ja%20energia%20KE3%20LUKU%205.1%202019.pdf). 5.5.2024.
- Puuinfo. 2020. Kosteustekniset ominaisuudet. <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/puun-kosteustekniset-ominaisuudet/>. 8.2.2024.
- Ramboll. 2022. Prizztech – Hukkalämpöselvitys. https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/ramboll_hukkalampoeselvitys_loppuraportti.pdf. 12.4.2024.
- Seppänen, O ja Seppänen, M. 2007. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. 4. painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Storaenso. 2024a. Historia. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-storaenso/our-history>. 6.2.2024.
- Storaenso. 2024b. Uimaharjun saha. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-storaenso/stora-enso-locations/uimaharju-sawmill>. 6.2.2024.
- Suvanto, K. 2015. Tekniikan fysiikka 1. 6. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
- Swegon. 2024a. Mollier-diagrammi. <https://www.swegon.com/fi/op-paat/tekniikat/mollier-diagram/>. 1.3.2024.
- Swegon. 2024b. Mollier Diagram työkalu. <https://mollier.swegon.com/>. 10.4.2024.
- Tutkimuseettinen neuvottelukunta. 2023. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje_2023.pdf. 24.2.2024.
- Vaillant. 2024a. Mikä on lämmöntalteenotto? <https://www.vaillant.fi/asiakkaat/neuvoja-ja-tietoa/lammitys-sanasto/master-heat-recovery-1925014.html>. 24.2.2024.

- Vaillant. 2024b. Mikä on Lämmönvaihdin? <https://www.vaillant.fi/asiakkaat/neuvoja-ja-tietoa/lammityssanasto/master-heat-exchanger-1925012.html>. 24.2.2024.
- Valutec. 2024a. Kanavakuivaamo 1-vaiheinen. <https://www.valutec.fi/tuotteet/kanavakuivaamot/kanavakuivaamo-1-vaiheinen/>. 28.2.2024.
- Valutec. 2024b. Trukilla täytettävä kamarikuivaamo. <https://www.valutec.fi/tuotteet/kamarikuivaamot/trukilla-taeytettaevae-kamarikuivaamo/>. 28.2.2024.
- Varis, R. 2017. Sahateollisuus. Saarijärvi: Saarijärven offset Oy.
- Vanninen, Petri. 2015. Sahatavarakuivaamon lämpöenergian kulutuksen mittauksen kehittäminen. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95147/Vanninen_Petri.pdf?sequence=1. 24.4.2024.
- Wet vs Dry Basis Moisture Content Relationships. <https://rosphere-international.net/Documents/AdvanceAg/Wet-vs-Dry-Basis-Moisture-Relationships.pdf>. 27.2.2024.

Mittaukset:		Ullakolta imettävä ilma:	
Mittaus uunin takaisin menevästä ilmasta:		Mittaus ritilältä:	
Note 7 24-03-20 08:39:44		Note 10 24-03-20 08:48:29	
Swema 3000md S/N: 686649		Swema 3000md S/N: 686649	
SWA 31 S/N: 415249		SWA 31 S/N: 415249	
AS - Continuously		AS - Continuously	
Aikavakio	2 sek	Aikavakio	2 sek
Mittausaika	25 sek	Mittausaika	30 sek
Ilmapuntari	1008 hPa	Ilmapuntari	1008 hPa
Keskiarvo	2.43 m/s	Keskiarvo	1.34 m/s
Max	3.71 m/s	Max	1.57 m/s
Min	1.32 m/s	Min	1.11 m/s
Keskipoikkeama	0.47 m/s	Keskipoikkeama	0.06 m/s
Keskilämpötila	39.20 °C	Keskilämpötila	10.3 °C
Kanavan ala	1 m ²	Imu ala	2.39 m ²
Tilavuusvirta	2.43 m ³ /s	Tilavuusvirta	3.20 m ³ /s
Mittaus ulos menevästä ilmasta:		Mittaus ritilältä:	
Note 8 24-03-20 08:40:58		Note 11 24-03-20 08:49:17	
Swema 3000md S/N: 686649		Swema 3000md S/N: 686649	
SWA 31 S/N: 415249		SWA 31 S/N: 415249	
AS - Continuously		AS - Continuously	
Aikavakio	2 sek	Aikavakio	2 sek
Mittausaika	28 sek	Mittausaika	31 sek
Ilmapuntari	1008 hPa	Ilmapuntari	1008 hPa
Keskiarvo	5.98 m/s	Keskiarvo	1.31 m/s
Max	7.93 m/s	Max	1.53 m/s
Min	3.43 m/s	Min	0.67 m/s
Keskipoikkeama	0.76 m/s	Keskipoikkeama	0.08 m/s
Keskilämpötila	49.62 °C	Keskilämpötila	9.6 °C
Kanavan ala	0.79 m ²	Imu ala	2.39 m ²
Tilavuusvirta	4.70 m ³ /s	Tilavuusvirta	3.12 m ³ /s
Mittaus uunista lämmönvaihtimeen menevästä ilmasta:		Mittaus ritilältä:	
Note 9 24-03-20 08:42:32		Note 12 24-03-20 08:50:00	
Swema 3000md S/N: 686649		Swema 3000md S/N: 686649	
SWA 31 S/N: 415249		SWA 31 S/N: 415249	
AS - Continuously		AS - Continuously	
Aikavakio	2 sek	Aikavakio	2 sek
Mittausaika	32 sek	Mittausaika	30 sek
Ilmapuntari	1008 hPa	Ilmapuntari	1008 hPa
Keskiarvo	2.06 m/s	Keskiarvo	1.31 m/s
Max	6.06 m/s	Max	1.48 m/s
Min	0.18 m/s	Min	1.13 m/s
Keskipoikkeama	1.35 m/s	Keskipoikkeama	0.07 m/s
Keskilämpötila	53.68 °C	Keskilämpötila	9.4 °C
Kanavan ala	1 m ²	Imu ala	2.39 m ²
Tilavuusvirta	2.06 m ³ /s	Tilavuusvirta	3.12 m ³ /s
		Tilavuusvirta (KA)	3.15 m ³ /s
		Lämpötila (KA)	9.77

Kosteus mittauksia:		Kosteutta mitattiin 45min
Lämpötila ja kosteus ulkona:	RH:	81.61 %
	T:	-1.01 °C
Lämpötila ja kosteus ullakolla imu ritilän vieressä:	RH:	62.82 %
	T:	9.55 °C
Lämpötila ja kosteus lämmönvaihtimesta takaisin uuniin menevässä kanavassa:	RH:	7.63 %
	T:	39.2 °C
Lämpötila ja kosteus lämmönvaihtimesta ulos menevästä kanavasta:	RH:	100 %
	T:	49.62 °C
Lämpötila ja kosteus uunista lämmönvaihtimeen menevästä kanavasta:	RH:	86.83 %
	T:	53.68 °C

Kanavan ala (neliö) = pituus × leveys

Kanavan ala (ympyrä) = $\pi \times r^2$

Tilavuusvirta = $\frac{\text{Virtausnopeus}}{\text{Kanavan ala}}$

Ideaalikaasun tilanyhtälö:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$m = \rho V \rightarrow V = \frac{m}{\rho}$$

$$\frac{P_1 \frac{m_1}{\rho_1}}{T_1} = \frac{P_2 \frac{m_2}{\rho_2}}{T_2}$$

Piilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Piilotettu julkaistavasta versiosta.