

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SAHAKUIVAAMON HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN LÄMPÖPUMPPUTEKNIIKALLA

TEKIJÄ Hanssi Mustonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Hanssi Mustonen	
Työn nimi Sahakuivaamon hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpputekniikalla	
Päiväys	20.02.2024
Sivumäärä/Liitteet	40
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Stora Enso Oyj, Wood Products	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Suomen vuonna 2022 uudistunut ilmastolaki asettaa määrätietoisia tavoitteita siirtymässä kohti hiilineutraalia Suomea. Opinnäytetyön toimeksiantajalla, Stora Enso Varkauden puutuoteyksiköllä on suuri kiinnostus lämpöpumppujen hyödyntämiseen Varkauden sahan kanavakuivaamoiden ylijäämälämmön talteenotossa osana omaa vastuullisuusstrategiaansa Suomen ilmastotavoitteiden lisäksi. Suomen teollisuudessa on lukuisien selvitysten mukaan valtava määrä hyödyntämätöntä ylijäämälämpöä ja lähes puolet siitä on metsäteollisuudessa. Opinnäyte työssä selvitettiin esiselvitystyypisästi Varkauden sahan kuivaamon ylijäämälämmön talteenoton mahdollisuuksia erilaisilla lämpöpumppua hyödyntävillä ratkaisulla.</p> <p>Jotta lämpöpumppuratkaisuja voitiin paremmin tutkia, suoritettiin kuivauskanaviin virtausmittauksia pitot-putkella ja lautakuormiin kosteusmittauksia. Mittauksista saaduilla tiedoilla oli mahdollista laskea tarkemmin ylijäämälämmön määrä ja laatu sekä kartoittaa erilaisia ratkaisuja. Lisäksi kohteeseen tutustuttiin tekemällä vierailu ja haastattelemalla operaattoreita sekä tilaajan edustajaa. Tilaajan edustajalta saatiin runsaasti tarpeellisia, jo tiedossa olevia asioita, kuten olemassa oleva ratkaisuehdotus. Yhtenä tärkeimpänä menetelmänä eri laite- ja kokonaisratkaisujen toimittajiin oltiin yhteydessä. Laitetoimittajilta pyydettiin tarjoukset ja heitä myös haastateltiin. Lämpöpumpun käytön vaikutusta hiilidioksidipäästöihin laskettiin myös yleisellä tasolla.</p> <p>Kanavista saatava teho vaihteli pitot-mittauksissa 200 kW ja 1700 kW välillä keskiarvon ollessa 802 kW. Vastaavasti koepalatuloksissa lämmityspatterin tehontarve vaihteli 280 kW ja 1200 kW välillä keskiarvon ollessa 628 kW. Lämpönieluksi löytyi ja valittiin kolme vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on kanavien lämmityskierron paluuveden lämmitys. Toinen ratkaisu oli kanavien ilman esilämmitys. Kolmantena vaihtoehtona tarkasteltiin kondenssikuivausta. Kaikissa COP-luku asettui 2 ja 3 välille. Toimittajilta saatujen tarjouksien perusteella laskettiin lämpöpumppuinvestointille takaisinmaksuaika ja tarjoukset sekä muu oheismateriaali toimitettiin tilaajan edustajalle. Lämpöpumppuinvestointia vietäessä eteenpäin tulisi eri ratkaisujen rakenteelliset vaatimukset ja kustannukset tarkastella. Lisäksi lämpöpumppuratkaisun toteutuessa on hyvä tehdä perinpohjainen optimointi sekä lämpöpumppujärjestelmälle, että kuivauskanavien mittauksille ja ohjauksille sekä muille energiatehokkuuteen vaikuttaville tekijöille.</p>	
Avainsanat Lämpöpumppu, kanava, kuivaamo, sahatavara, ylijäämälämpö, hukkalämpö, COP	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Hanssi Mustonen	
Title of Thesis Waste Heat Utilization of Lumber Drying Kiln with Heat Pump Technology	
Date 20 February 2024	Pages/Appendices 40
Client Organisation /Partners Stora Enso Oyj, Wood Products	
<p>Abstract</p> <p>Finland’s renewed climate law that was created in 2022 sets ambitious and deterministic goals for moving forward to creating a carbon neutral Finland. Thesis client Stora Enso Varkaus Wood Products unit has a lot of interest towards using heat pumps to utilize waste heat generated at unit sawmill drying kilns. The goal of this thesis was to create a prefeasibility study for figuring out different possibilities of utilizing waste heat at Varkaus Wood Products unit sawmill drying kilns with different types of heat pump solutions.</p> <p>Measurements were conducted at drying kilns to better study different heat pump possibilities. These measurements included pitot-measurement of waste heat flow and the humidity of the lumber to be dried. Additionally on-site visits and operator interviews were made. The client’s representative was able to provide a lot of crucial background information about the process and one solution to the matter was already brought up. Different companies that provide either heat pumps or entire heat pump systems were contacted. Quotations were asked from these companies, and they were also asked for additional information about such systems when applicable. Also the effect of heat pumps on CO₂ emissions was calculated on general level.</p> <p>In pitot-measurements the amount of waste heat fluctuated between 200 kW and 1700 kW with an average of 802 kW. In contrast the humidity measurements gave results between 280 kW and 1200 kW with an average of 628 kW as the power demand of the heating element of a singular kiln. As a heat sink three different solutions were recognized and chosen. The first was the heating of the drying kiln’s heating circulation. The second solution was the preheating of the kiln’s intake air. Lastly condense drying was studied. In all cases the COP-value was between 2 and 3. Based on the quotations received from heat pump companies direct payback period was calculated and the quotations and any other additional material were delivered to the client. When moving forward with heat pump investment all the constructional limitations and expenses should be carefully evaluated. Additionally, it is advised to execute any repairs and optimization of the drying kilns that would affect the performance of the heat pump solution.</p>	
<p>Keywords</p> <p>Heat pump, drying, lumber, kiln, excess heat, waste heat, COP</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	KANAVAKUIVAAMO.....	7
3	HUKKALÄMPÖ	8
4	LÄMPÖPUMPUT	10
	4.1.1 COP-luku.....	11
	4.1.2 MVR.....	13
	4.1.3 TVR.....	13
	4.1.4 Absorptio ja lämmönvaihdin	13
	4.1.5 Mekaaninen kompressio	14
	4.2 Lämmönvaihtimet	14
	4.3 Lämpöpumpun valintakriteerit.....	15
5	STORA ENSON VARKAUDEN KUIVAAMO	17
6	MITTAUKSET	20
	6.1 Koepalojen kosteusmääritys.....	22
7	LÄMPÖPUMPPU KOHTEESSA	25
	7.1 Lämmityspatterien veden paluukierron lämmitys.....	26
	7.2 Ilman esilämmitys.....	27
	7.3 Kondenssikuivaus.....	28
	7.4 Lämpöpumpun vaikutus CO ₂ - päästöihin	29
8	LÄMPÖPUMPPURATKAISU KOHTEESEEN	31
	8.1.1 Toimittaja 1.....	31
	8.1.2 Toimittaja 2.....	32
	8.1.3 Toimittaja 3.....	32
	8.1.4 Toimittaja 4.....	33
	8.1.5 Toimittaja 5.....	33
	8.1.6 Toimittaja 6.....	34
	8.2 Suora takaisinmaksuaika	34
9	YHTEENVETO.....	36
10	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET	40

Kuva 1. Kanavakuivaamo (Sipi 2023.).....	7
Kuva 2. Ylijäämälämmön määritelmä (YIT et al. 2010.)	8
Kuva 3. Teollisuuden energiankäyttö. (Tilastokeskus 2020.).....	9
Kuva 4. Lämpöpumpun toiminta. (Happonen 2010.).....	11
Kuva 5. Uusia lämmöntalteenotto yksiköjä vintillä. (Mustonen 2023.)	17
Kuva 6. Sahan lämmönvaihtimen höyrynkulutus toukokuussa. (Stora Enso 2023.)	17
Kuva 7. Sahan lämmitysvesikierron prosessi (Mustonen 2023.)	18
Kuva 8. Mittauskohde. (Mustonen 2023.).....	20
Kuva 9. Kuivausprosessin h,x -diagrammi. (Mustonen 2023.).....	23
Kuva 10. Suunniteltu lämpöpumpputuotteen paikka. (Mustonen 2023.).....	26
Kuva 11. Lämpökertoimen riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta 105 °C tavoitelämpötilalla. (Mustonen 2023.).....	27
Kuva 12. Lämpökertoimen riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta 95 °C tavoitelämpötilalla. (Mustonen 2023.).....	28
Kuva 13. Lämpöpumpun vaikutus hiilidioksidipäästöihin kuivaamolla. (Mustonen 2023.)	30

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Stora Enso Varkauden puutuoteyksikön toimeksiannosta. Stora Enson puutuotedivisioona on hyvin kiinnostunut lämpöpumpputekniikan soveltamisesta yksiköiden hukkalämpöjen hyödyntämisessä mm. sen tuoman hyvän hyötysuhteen eli COP-arvon sekä polttoprosessien ja päästöjen vähentämisen mahdollisuuksien takia. Myös nykyiset energijärjestelmät ovat murroksen edessä ja fossiilisista polttoaineista siirrytään uusiutuvan energian käyttöön. Tämä johtaa siihen, että ratkaisuja haetaan myös liikenteen ja teollisuuden sähköistymisestä. Tilaajalla on tarkoitus pilotoida lämpöpumpputekniikkaa ja ottaa sitä mahdollisesti käyttöön eri yksiköissä ja prosesseissa tulevaisuudessa. Vastaavanlaisia toteutuksia on otettu käyttöön niin metsäteollisuudessa, kuin muuallakin teollisuudessa.

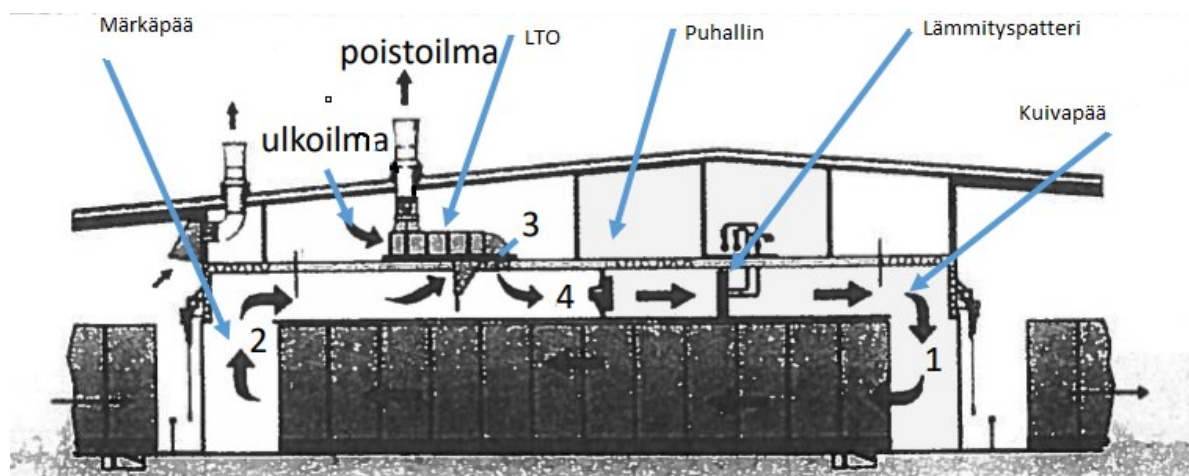
Opinnäytetyössä tavoitteena on toteutettavuuden ja eri ratkaisujen esiselvitys lämpöpumpputekniikan hyödyntämisestä Stora Enson Varkauden sahan kuivaamolla. Tarkastelun kohteena on Varkauden sahan kuivaamon ylijäämäenergian määrä ja laatu, joita tarkastellaan mittauksilla, eri lämpöpumpputekniikat, lämmitettävien kohteiden löytäminen ja tarkastelu, lämpöpumpun vaikutus hiilidioksidipäästöihin, yksinkertaiset investoinnin takaisinmaksuajat ja eri lämpöpumpputoimittajien kartoitus sekä tarjousten pyytäminen.

Sahateollisuudessa lämpöpumpun kannattavuuteen tehdasintegraateissa haasteita tuo tyypillisesti halpa lämpöenergia ja viime aikojen kallis sähkö, jolloin takaisinmaksuajat venyvät pitkiksi. Erityisesti menneisyudessa haasteita on tuottanut myös sahakuivaamoille tyypilliset, suhteellisen alhaiset ylijäämälämmön lämpötilat. Viime vuosina on kuitenkin tapahtunut paljon kehitystä lämpöpumpputeknologian saralla, mikä mahdollistaa yhä uusien ylijäämälämpövirtojen hyödyntämisen taloudellisesti kannattavasti.

2 KANAVAKUIVAAMO

Kanavakuivaamo on jatkuvatoiminen sahatavaran kuivausprosessi, jossa lautatavara kuivataan haluttuun kosteuteen. Sahatavaran tyyppillinen tavoitekosteus on 15–20 %. Kuivaus tapahtuu syöttämällä toisesta päästä rimoitettuja kuormia kuivauskanavaan ja purkamalla kuormia toisesta päästä. Kanavassa kiertää puhaltimilla synnytetty ilmavirta, joka höyrystää ja sitoo vettä sahatavarasta. Tyyppillistä kanavakuivaamoille on lämmöntalteenotto poistoilmasta ilma-ilma lämmönvaihtimilla. Kuivaamon rakenteeseen kuuluu viirat, joilla ilman kulku lautakuormien sivuista estetään ja rimoituksella lautakuormiin muodostetaan rakoja, joita pitkin ilma pääsee virtaamaan läpi.

Kanavakuivaamoja on pitkittäisellä ja poikittaisella ilmankierrolla toimivia. Pääasiassa nykyään suositaan pitkittäisellä ilmavirralla toimivia kanavakuivaaimia. Suosion syynä on paremmat ohjausmahdollisuudet ja vähäisempi vikaherkkyys, vaikkakin poikittaisella ilmavirralla toimivissa kuivaaimissa on parempi kuivausolosuhteiden säädettävyys. Pitkittäisen ilmavirran kanavassa ilma virtaa kuormiin sekä kanavaan nähden pituussuunnassa. Kuormat syötetään märästä päästä kuivaa päätä kohti ja ilmavirta on vastakkainen kuormien kulkusuuntaan nähden eli kuivasta päästä märkään päähän (kuva 1). Kuiva - ja märkä pää tarkoittavat nimensä mukaisesti kuivan ilman eli matalan ilmankosteuden päätä ja märän ilman eli korkea ilman kosteuden päätä. (Sipi 2002.)

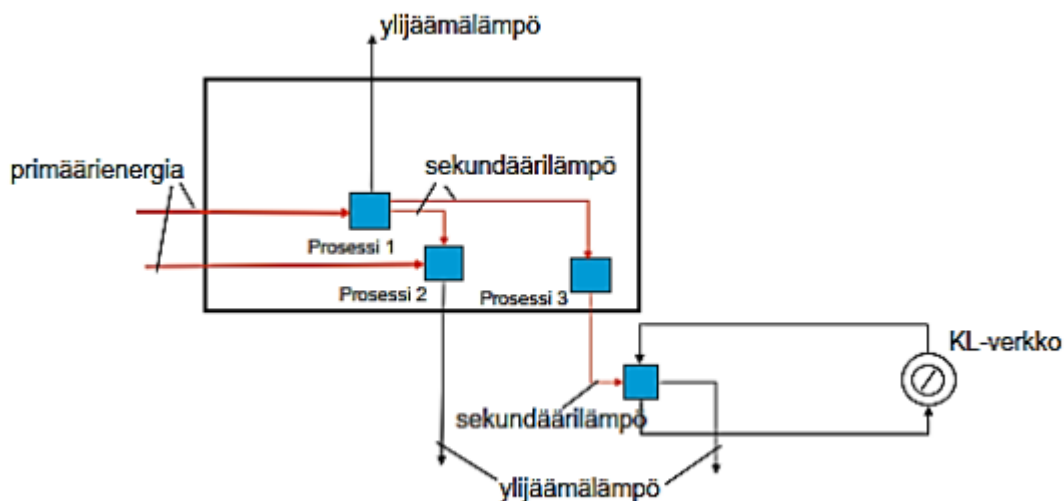


Kuva 1. Kanavakuivaamo (Sipi 2023.)

Nykyään käytetään myös OTC-kanavakuivaamoja (Optimized Two-stage Continuous) eli kaksiosaisia jatkuvatoimisia kuivaamoja. OTC-kuivaamossa on kaksi peräkkäistä, kuivausolosuhteiltaan erilaista vyöhykettä. Ensimmäisessä vyöhykkeessä ilmaa puhalletaan kuorman syöttösuuntaan ja toisessa vyöhykkeessä kuorman syöttösuuntaa vastaan (Valutec 2023). Ilmanvaihto toteutetaan poistopuhaltimella kuivavyöhykkeiden välissä (Sipi 2002).

3 HUKKALÄMPÖ

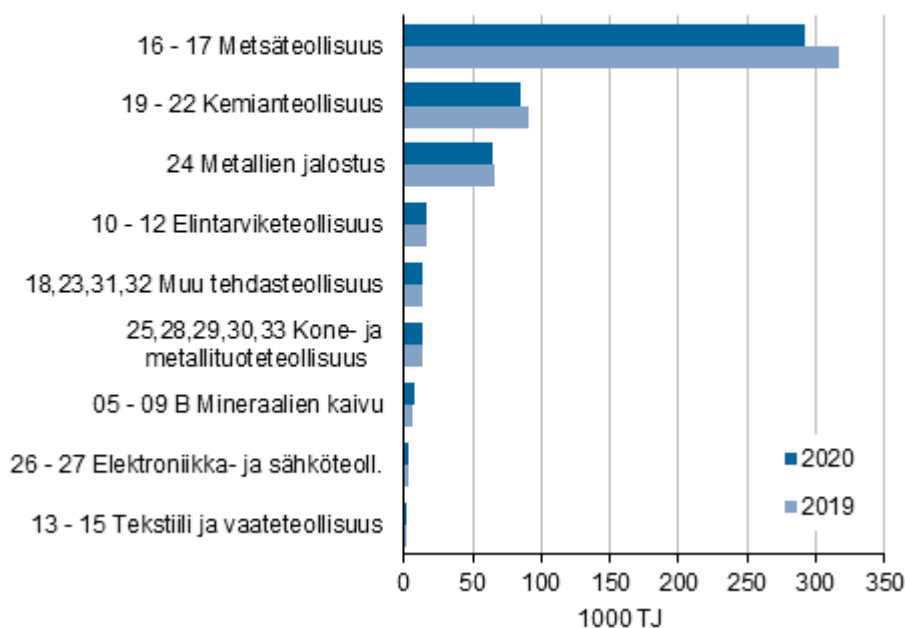
Hukkalämpö eli ylijäämälämpö on energiavirta, joka poistuu väistämättä prosessista esimerkiksi jäähdytysveden, poistoilman, savukaasujen tai jäteveden mukana. Primäärienergia on jalostamaton energia ja sekundäärienergia on jalostettua primäärienergiaa. Sekundäärienergiaa on siis esimerkiksi puuhaketta polttamalla tuotettu höyry. Teollisuudessa pyritään ensisijaisesti hyödyntämään prosesseista syntyvää sekundäärilämpöä muissa prosesseissa, jotta hukkalämpöä syntyisi mahdollisimman vähän. Kuvassa 2 on esitetty ylijäämälämmön määritelmä. (Motiva 2019.)



Kuva 2. Ylijäämälämmön määritelmä (YIT et al. 2010.)

Metsäteollisuus on teollisuusaloista suurin energian käyttäjä Suomessa (Tilastokeskus 2020). Työ- ja elinkeinoministeriön sivuilla vuonna 2023 Suomessa syntyvän hukkalämmön määräksi arvioidaan 130 TWh. Teknisesti vielä kohtuudella hyödynnettävää potentiaalia on käyttämättä noin 35 TWh. Vielä hyödyntämätöntä hukkalämpöä löytyy eniten lauhdelaitoksista ja teollisuudesta. Teollisuuslaitosten hyödynnettävän hukkalämmön määrän arvioidaan olevan noin 15 TWh. Kuvassa 3 on esitetty teollisuuden energiankäyttö toimialoittain vuonna 2020.

Liitekuvio 3. Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain



Kuva 3. Teollisuuden energiankäyttö. (Tilastokeskus 2020.)

Hukkalämpöä syntyy eniten paljon energiaa vaativissa teollisuuden haaroissa, kuten metsäteollisuudessa ja kemianteollisuudessa. Teollisuudessa hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää erilaisista prosessi- ja savukaasuista, jätevesistä sekä poistoilmasta ja poistohöyrystä. Teknisesti hyödynnettäväksi potentiaaliksi katsotaan lämpöenergiaa, joka on mahdollista hyödyntää olemassa olevalla teknikällä. Kaikki tekninen potentiaali ei kuitenkaan välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa hyödyntää. Iso osa ylijäämälämmöistä on alle 100 °C tai jopa alle 55 °C, jonka takia mekaaniset lämpöpumput ovat tehokkain tapa matalalämpöisen ylijäämälämmön hyödyntämisessä. Lisäksi kohtalaisen uusi kuuma- ja kylmävesiteknologia, joka tuottaa yli 100 °C lämpöistä lämpöenergiaa kohtalaisen hyvällä COP-arvolla, voi jatkossa mullistaa matalalämpöisen ylijäämälämmön hyödyntämisen. (Motiva 2019.)

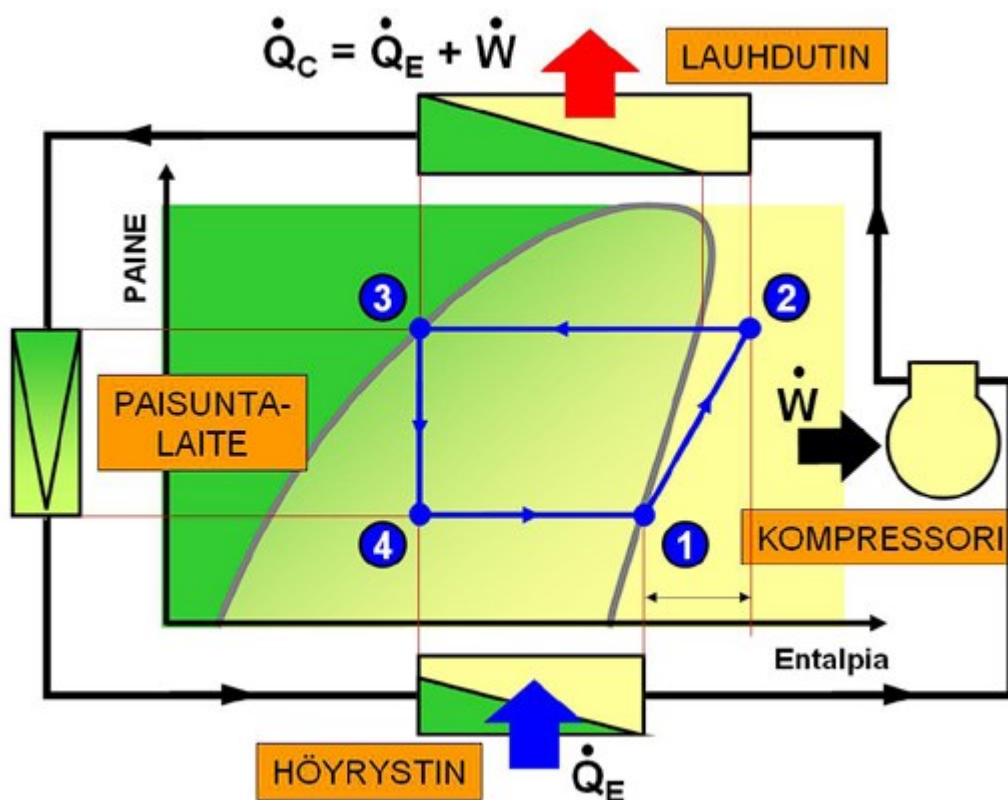
4 LÄMPÖPUMPUT

Lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan käyttäen systeemiin tuotua energiaa. Teollisuudessa lämpöpumppuja käytetään hyödyntämään matalalämpöistä hukkalämpöä. Hukkalämmön lämpötila nostetaan lämpöpumpulla tasolle, jolla sitä voidaan hyödyntää teollisuuden prosesseissa tai kaukolämmössä. Monesti näin voidaan korvata primäärienergiaa ja hallita päästöjä. (Motiva 2014.)

Lämpöpumput voidaan jakaa suljettuihin ja avoimiin järjestelmiin toimintaperiaatteen mukaan. Avoimet ja suljetut järjestelmät voidaan jakaa edelleen yhteensä neljään alakategoriaan: Mekaaniseen ja termiseen höyryn komprimointiin, kompressiolämpöpumppuihin ja absorptiolämpöpumppuihin. (Lähteenaro 2019.)

Yleensä lämpöpumpuista puhuttaessa tarkoitetaan suljetun systeemin kompressiolämpöpumppua. Kompressiolämpöpumppu on myös yleisin olemassa olevista lämpöpumpuista. Kompressiolämpöpumpussa järjestelmään tuotu työ tuotetaan sähkötoimisella moottorilla. Lämmönsiirto tapahtuu työaineen, myös kiertoaine tai kylmäaine, välityksellä. (Ratalahti 2019.)

Höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntaventtiili ovat lämpöpumpun pääkomponentit, joita ilman lämpöpumppu ei voi toimia. Lisäksi lämpöpumpuissa on lisäkomponentteja edistämässä säädettävyyttä, toimintaa ja hyötysuhdetta. Kuvassa 4 on esitetty lämpöpumpun toiminta ja kylmäaineen kierto log p , h -tilapiirroksessa. Matalan kiehumispisteen omaava väliaine kulkee höyrystimeen sitoen lämpöä ympäristöstä. Sitoessaan lämpöä nestemäinen väliaine höyrystyy ja sen entalpia kasvaa. Höyrystimeltä väliaine kulkee kompressorille. Kompressorilla väliaineen paine kasvaa ja lämpötila kohoaa halutulle tasolle. Seuraavaksi korkean paineen ja lämpötilan väliaine lauhtuu lauhduttimella muuttuen takaisin nesteeksi ja vapauttaen lämpöä ympäristöönsä. Viimeiseksi väliaine kulkeutuu paisuntalaitteelle, jossa se paisuu matalampaan lämpötilaan ja paineeseen. (Lähteenaro 2019.)



Kuva 4. Lämpöpumpun toiminta. (Happonen 2010.)

4.1.1 COP-luku

Lämpöpumpun hyötysuhdetta mitataan COP-arvolla. COP-luku ilmaisee siirretyn lämpöenergian suhteen lämpöpumpun tekemään työhön. Teollisuudessa käytettyjen lämpöpumppujen COP vaihtelee välillä 2.5–7. (Motiva 2014.)

Yksinkertaisuudessaan lämpöpumpun COP-luku eli Coefficient of performance kuvaa lämpöpumpun tuottamaa lämpömäärää suhteessa sen käyttämään sähköenergiaan. Esimerkiksi lämpöpumpun COP-luvun ollessa 3, tuottaa lämpöpumppu 3 kWh lämpöä 1 kWh käytettyä sähköä kohti.

Prosessin ideaalinen lämpökerroin on lauhduttimen luovuttaman lämmön ja vaaditun sähkötehon suhde

$$COP_c = \frac{\phi_L}{P} = \frac{\phi_L}{\phi_L - \phi_H} \quad (1)$$

missä ϕ_L on lauhduttimen lämpövirta ja ϕ_H on höyrystimen lämpövirta.

Koska lauhduttimen ja höyrystimen lämpövirrat ovat verrannollisia absoluuttisiin lauhtumis- ja höyrystymislämpötiloihin voidaan ideaalinen lämpökerroin esittää muodossa

$$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (2)$$

missä T_L kiertoaineen lämpötila lauhduttimessa kelvineinä ja T_H on kiertoaineen lämpötila höyrystimessä.

Todellisessa lämpökertoimessa tulee myös huomioida apulaitteiden tehot ja lämpövirrat

$$cOP = \frac{\Phi_s}{P_k + P_a} \quad (3)$$

missä Φ_s on hyödyksi saatu lämpö, P_k on kompressorin teho ja P_a on apulaitteiden teho.

Paremmiin lämpöpumpun todellista hyötysuhdetta kuvaakin Carnot-hyötysuhde η_C , joka kertoo lämpöpumpun todellisen COP-arvon suhteessa ideaaliseen COP-arvoon. Carnot-hyötysuhteeseen vaikuttavat tekniset ominaisuudet, kuten lämmönsiirto ja kiertoaine. (Penttilä 1988). Carnot-hyötysuhde voidaan katsoa olevan teollisuuden lämpöpumppusovelluksissa 50 % ja 75 % välillä (Luoranen 2019)

$$\eta_C = \frac{COP}{COP_{ideal}} \quad (4)$$

kaava voidaan edelleen kirjoittaa muotoon

$$COP_c = \frac{T_L}{T_L - T_H} * \eta_C \quad (5)$$

Lämpöpumpun taloudellisuutta arvioitaessa on huomioitava lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen vaihtelu vuodenajan mukaan. Tällöin käytetään keskimääräistä lämpökerrointa

$$\overline{COP} = \frac{Q_s}{w_k + \tau P_a} \quad (6)$$

missä Q_s on hyödyksi saatu lämpömäärä, w_k on vuotuinen kompressorin käyttämä energiamäärä, τ on apulaitteiden käyttöaika ja P_a on apulaitteiden teho. Vuoden keskimääräisestä lämpökertoimesta käytetään nimitystä SPF-kerroin eli Seasonal Performance Factor.

4.1.2 MVR

Yksi avoimen systeemin lämpöpumpuista on MVR eli mekaaninen komprimointi (Mechanical Vapour Recompression). Mekaanisessa komprimoinnissa höyryn lämpötilan ja paineen nostolla saadaan korkealämpoisempää höyryä. Kemian prosesseissa tuotettua höyryä voidaan käyttää höyrystämään alempipaineisen höyryn nestefaasia ja samalla lauhduttaa komprimoitu höyry. Noin 100 °C lämpötilat lämpötilan nousun ollessa korkeintaan 40 °C ovat mahdollisia yksivaiheisella komprimoinnilla. Nykyään voidaan päästä korkeampiinkin lämpötiloihin ja suuremmat lämpötilan nostot voivat olla mahdollisia. (Motiva 2014.)

Haihdutussarjoissa mekaanista komprimointia käytettäessä voidaan päästä jopa 90 % primäärienergian säästöön verrattuna suoraan tuotettuun lämpöön. Mekaanisen komprimoinnin COP on tavallisesti 3–30. Mekaaninen komprimointi sopii hyvin haihdutuksen sovelluksiin teollisuudessa pienten, noin 3–7 °C, lämmönvaihtimien asteisuuksien vuoksi. Hyvä sopivuus johtuu pienistä asteisuuksista johtuvasta matalasta paineen korotuksesta. (Motiva 2014.)

4.1.3 TVR

Toinen avoimen systeemin lämpöpumpusovellus on TVR eli termokompressori (Thermal Vapour Recompression). Toisin kuin mekaanisessa kompressiossa, termokompressiossa paineen ja lämmön nosto tehdään lämpöenergialla. Termokompressori perustuu suutinteoriaan. Korkeapaineisempi höyry ohjataan suuttimen läpi sekoitustilaan. Korkeapaineinen höyry painaa paisuessaan matalapaineista höyryä. Höyryt sekoittuvat koska sekoitustilan jälkeinen suutin ahdistaa virtausta. Kurkun jälkeen virtaus hidastuu ja paine kasvaa Bernoullin yhtälön mukaisesti. Lopputuloksena virtauksen paine on suurempi kuin sisään virranneen matalapaineisen höyryn paine. (Motiva 2014.)

Termokompressoreita käytetään yleensä prosesseissa, joissa syntyy matalapaineista kylläistä höyryä. Tällaisia teollisuuden aloja ovat esimerkiksi elintarvike-, kemian- ja metsäteollisuus. Termokompressoreilla COP on 1,5–5. Vaikka COP on alhaisempi, kuin mekaanisessa komprimoinnissa, ovat investointikustannukset matalampia. (Motiva 2014.)

4.1.4 Absorptio ja lämmönvaihdin

Absorptiolämpöpumput käyttävät kaksiosaista kiertoainetta. Kiehumispisteen noston ja lämmön absorptoitumisen periaatteita hyödyntämällä saavutetaan lämpötilan nosto absorptioprosessissa. Laitteisto koostuu neljästä lämmönsiirtimestä, jotka ovat höyrystin, liuoslämmönsiirrin, lauhdutin ja keitin. Absorptiolämpöpumppu käyttää käyttöenergianaan korkean lämpötilan höyryä tai polttoainetta, kuten nestekaasua. (U.S Department of Energy 2003.)

Yleensä absorptiolaitteita käytetään jäähdytykseen, mutta niillä on myös houkuttelevia mahdollisuuksia lämpöpumppukäytössä. Absorptiolämpöpumput ovat luotettavia ja lämpötilan nostokyky ja säädettävyys on portaaton 0 % ja 100 % välillä. COP absorptiolämpöpumpuilla on tyypillisesti 1,5–1,7. (Motiva 2014.)

4.1.5 Mekaaninen kompressio

Mekaanisen kompression lämpöpumput ovat tyypillisin käytetty lämpöpumppu. Yksi yleinen käyttökohde mekaanisille lämpöpumpuille on puutavaran kuivaus. Kompressorilämpöpumppujen COP on tyypillisesti välillä 2,5–7,5. Mekaanisen lämpöpumpun teoreettisen hyötysuhteen ollessa pumpun sisäisen kierron lauhtuttimen lämpötila jaettuna pumpun tuottaman sisäisen kierron lämpötilaerolla on hyötysuhde sitä parempi, mitä pienempi sisäinen lämpötilan nosto on. (Motiva 2014.)

4.2 Lämmönvaihtimet

Lämmönsiirrin eli lämmönvaihdin siirtää lämpöä kahden, eri lämpötiloissa olevan fluidin välillä. Yleensä fluidit ovat kiinteän seinämän erottamina niin, että ne eivät ole kosketuksissa toisiinsa. (Vepsäläinen et al. 2012.)

Lämmönvaihtimet luokitellaan virtaussuunnan tai rakennetyypin mukaan. Virtaussuunnaltaan lämmönvaihtimia on kolmenlaisia: myötävirtakytkentä, vastavirtakytkentä ja ristivirtakytkentä. Myötävirtakytkennässä kylmä ja kuuma fluidi liikkuvat samaan suuntaan. Vastavirtakytkennässä fluidit liikkuvat vastakkaisiin suuntiin ja ristivirtakytkennässä 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Eri rakennetyyppejä ovat sekoittunut virtaus, sekoittumaton virtaus, paljas putki, ripaputki, putki- ja vaippalämmönsiirrin sekä levylämmönsiirrin. (Vepsäläinen et al. 2012.)

Lämmönvaihtimen valinnassa on lukuisia vaikuttavia tekijöitä. Tärkeimpiä tekijöitä ovat fluidien ominaisuudet ja laatu, toimintalämpötila ja -paine, HEAT DUTY (paljonko tarvitsee siirtää ajassa x) ja hinta. Lisäksi tulee huomioida aineiden likaisuus, syövyttävyyden ja faasit. Valitun lämmönvaihtimen tulee vastata prosessin normaaleja käyttöolosuhteita sekä olla huollettavissa ja korjattavissa likaisten tai syövyttävien olosuhteiden varalta. Tavallisesti huollettavuus tarkoittaa mahdollisuuden lian poistoon tai osien, kuten tiivisteiden tai putkien vaihtoon niiden rikkoontuessa joko ikääntymisen tai epäedullisten olosuhteiden vuoksi. Huollettavuuden tärkeys voi myös asettaa rajoitteita lämmönvaihtimen valinnalle saavutettavuuden tai kuntotarkkailun osalta. (Thulukkanam, 2014.)

4.3 Lämpöpumpun valintakriteerit

Lämpöpumppua hyödyntävän prosessin ollessa yksinkertainen ei yleensä ole tarvetta kattavalle virtausanalyysille tai pinch-analyysille. Lämpöpumppua hyödyntävä prosessi on yksinkertainen silloin, kun lämmönlähde ja lämpönielu ovat selkeästi tiedossa. Tärkeät arvot lämpöpumpun valinnassa ovat tällöin lämmönlähteen sekä lämpönielun lämpötilat ja lämpökuormat sekä niiden sijainti. (Berntson ja Franck 1997.)

Eri lämpöpumpputekniikat toimivat niille ominaisten raja-arvojen sisällä. Taulukkoon 1 on koottu eri lämpöpumppujen ominaisuuksia ja toiminta-alueita.

TAULUKKO 1. Eri lämpöpumppujen ominaisuudet ja toiminta-arvot (Motiva 2014).

	Mekaaninen lämpöpumppu	Absorptio lämpöpumppu	Absorptio- l:n muunnin	Höyryn komprimointi	Termokompressori
Käyttöenergia	Sähkö	Kuuma vesi tai höyry	Lämpö	Sähkö	Höyry
Max. luovutuslämpötila	95 (120) °C	95 °C	150 °C	200 °C	180 °C
Lämpötilan nosto	20–90 °C	30–65 °C	30–50 °C	5–30 °C	5–20 °C
COP	2,6–7,5	1,5–1,7	0,4–0,5	3–30	1,5–5
Edut	Luotettava, nopea käynnistys	Luotettava, yksinkertainen, vähän ylläpitoa, kestävä ja säädettävyys	Luotettava, säädettävyys, kestävyys, vähän ylläpitoa	Pieni lämmönsiirtopinta-ala	Yksinkertainen, edullinen, ei liikkuvia osia, ei likaantumista
Haitat	Ei sovi korkeille lämpötiloille, säädettävyys vaikeissa olosuhteissa	Hidas käynnistys, tyhjiön varmistus keran viikossa, suuri sisäinen lämmönsiirtopinta-ala	Suuri sisäinen lämmönsiirtopinta-ala, hidas käynnistys, suuri tarvittava ylijäämlämpövirtaus	Pieni lämpötilan muutos, sopii vain tietyille höyryille	Pieni lämpötilan muutos, sopii vain tietyille höyryille
Yleisimmät sovellukset	Lämmitys ja kuivaus	Lämmön talteenotto	Erikoiskohteet	Höyrytisläus	Höyrytisläus ja tisläus

Lämpöpumpputekniikan valinta alkaa määrittelemällä prosessin vaatimukset ja tarvittava lämpötilanousu (Kiss ja Infante Ferreira 2016). Prosessin vaatimuksia voivat olla esimerkiksi lämpökuorman vaihtelu ja höyryn käyttö tai syntyminen.

Yleensä lämpöpumpun hankintaa suunniteltaessa tiedetään vain lämpönielun ja lämmönlähteen lämpötilat. Hankittaessa lämpöpumppu täytyy kuitenkin huomioida asteisuus, jota voidaan melko luotettavasti arvioida vähentämällä lämmönlähteen lämpötilasta 5 °C, jolloin saadaan höyrystimen lämpötila. Vastaavasti lauhduttimen lämpötila saadaan lisäämällä 10 °C lämpönielun lämpötilaan, mikäli toisiopuolella on ilmaa. Jos lämpöpumppu on kytketty nestevirtoihin, voidaan lämpöpumpun höyrystin- ja lauhdutinlämpötiloihin soveltaa lämmönsiirrinlaskentaa. Käytännössä ensiöpuolen ja toisiopuolen lämpötilaero saadaan laskettua lämpötehon, massavirran ja ominaislämpökapasiteetin avulla. Soveltaessa lämmönsiirrinlaskentaa tulee kuitenkin varmistaa, että riittävä asteisuus otetaan huomioon. (Luoranen 2017.)

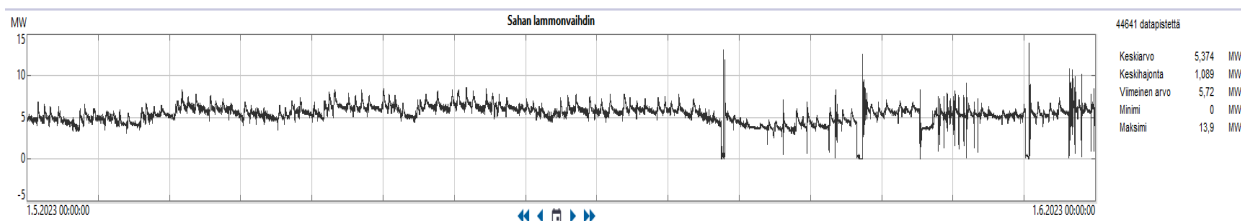
5 STORA ENSON VARKAUDEN KUIVAAMO

Stora Enso Varkauden sahan kuivaamo koostuu kymmenestä kanavakuivaamosta, joista kolme on OTC-kuivaamoja. Tavallisesti kanavia on tällä hetkellä kahdeksan käytössä ja ne on jaoteltu kuivat-tavan tuotteen mukaan. Kanaviin 1–4 on uusittu lämmönvaihtimet ja kanavissa 5–10 on vanhemmat lämmönvaihtimet. Nykyiset lämmöntalteenottoyksiköt sijaitsevat vinttilassa ulkokaton ja kana-vakuivaamoiden välissä kuvan 5 osoittamalla tavalla.



Kuva 5. Uusia lämmöntalteenotto yksiköjä vintillä. (Mustonen 2023.)

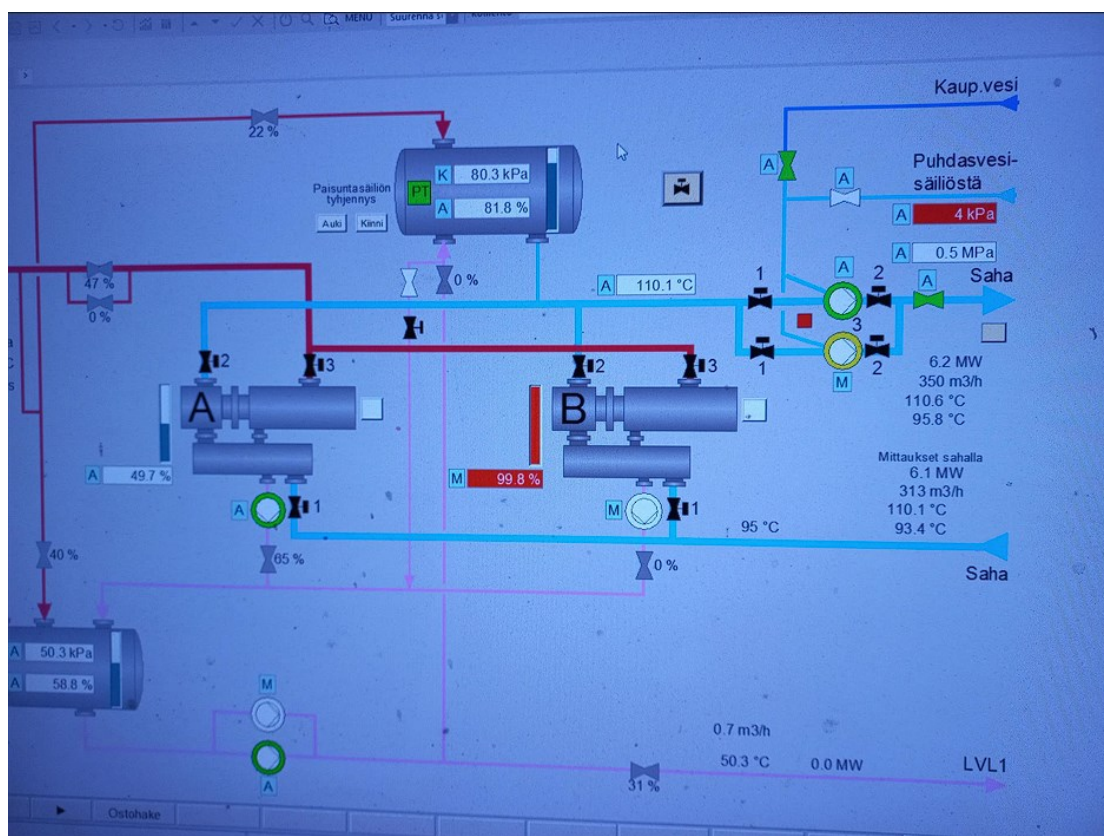
Työssä hyödynnettiin voimalaitoksella käytössä olevaa seurantaohjelmaa Wedgeä. Työkalusta luettiin sahan lämmönsiirtimen kuluttama energia historiatietona kokonaisen kuukauden osalta. Kuukau-deksi valittiin toukokuu, sen ollessa yhtenäinen käyntiajaltaan ilman seisakkeja ja koska toukokuun aikana suoritettiin myös mittaukset kanaviin. Kuvassa 6 näkyy toukokuun trendi sahan osalta.



Kuva 6. Sahan lämmönvaihtimen höyrynkulutus toukokuussa. (Stora Enso 2023.)

Kuvasta nähdään toukokuun keskiarvon olleen noin 5,4 MW ja keskihajonnan noin 1,1 MW. Sahan käyttämästä lämmöstä valtaosa kuluu kanavakuivaamoissa puutavaran kuivaukseen ja siksi nämä luvut kuvastavat melko hyvin kuivaamon lämpöenergian kulutusta.

Sahan kuivaamo saa lämpönsä tehdasintegraatin voimalaitokselta. Voimalaitokselta tuleva höyry lämmittää sahan lämmitysvesikiertoa höyrylämmönvaihtimella. Paluukierron 95 °C vesi lämmitetään 105–110 °C:seen. Vesikiertoa käytetään kuivaamon kuivausuunien lämmitykseen sekä rakennusten lämmitykseen. Käytetyn lämmön määrää mitataan ja voimalaitos laskuttaa käytetystä lämmöstä. Kuvassa 7 on esitetty sahan lämmönvaihtimen prosessikaavio.



Kuva 7. Sahan lämmitysvesikierron prosessi (Mustonen 2023.)

Kanavakuivaamoissa lämmöntalteenottoyksiköt esilämmittävät korvausilmaa. Lämmitys lopulliseen kuivaamoiden tarvitsemaan noin 70 °C kuivapään lämpötilaan tapahtuu lämmityspattereilla, joissa kiertää voimalaitoksen höyryllä lämmitetty 105–110 °C vesi.

Sahan kuivauskanavissa on rikkinäisiä mittauksia ja ajoittain ongelmia prosessin arvojen hallinnassa. Tarkistettaessa kanavien lämpötiloja kanavista 1, 2 ja 5 oli kanavassa 1 kuivapään lämpötilan pyyntö 61 °C mittauksen näyttäessä 83 °C. Lisäksi ylikuivauksen kanssa on välillä ongelmia. Mahdollisia vaikutuksia näistä heitoista pystyttiin kenties havaitsemaan suoritettaessa virtausmittauksia poistopu-

halluksiin. Myös kuivauksen tehontarpeen määrittämiseksi suoritettua sisään menevän ja ulos tulevan sahatavaran kosteusmittauksessa havaittiin yhdessä kuormassa 12 % loppukosteus.

6 MITTAUKSET

Virtausmittaukset suoritettiin kanaviin 1–4, jotka on esitetty kuvassa 8 ja kanaviin 6–9, jotka sijoittuvat kuvaajan taakse. Kanavat 5 ja 10 eivät olleet käytössä. Virtausmittaus suoritettiin pitot-putkella. Pitot-putki on laite, jolla mitataan kaasuvirran staattista ja dynaamista painetta asettamalla se kohtisuoraan virtaukseen nähden. Mittausta varten kuivaamon katolle varattiin pieni paineilmakompressori pitot-putken puhtaaksi puhaltamista varten kondensoituneesta vedestä. Mittauksien kesto oli noin 5 minuuttia kanavaa kohti ja mittauksia tehtiin kaksi tai kolme jokaiseen kanavaan riippuen saatujen tuloksien yhdenmukaisuudesta. Samalla mitattiin jokaisen kanavan ulospuhalluksen lämpötila.



Kuva 8. Mittauskohde. (Mustonen 2023.)

Mittaukset suoritettiin 1,5 m korkeudelta kanavissa 1–4. Muiden vanhemman lämmöntalteenoton kanavissa mittaukset suoritettiin 0,65 m korkeudelta. Isomman halkaisijan uusissa poistoputkissa suoritettiin mittaus neljässä pisteessä ja vanhempien lämmönvaihtimien kohdalla kolmessa pisteessä.

Mittaustuloksina saatiin kullekin kanavalle kostean kaasun tilavuusvirta kanavassa ja kostean kaasun tiheys kanavassa. Tilavuusvirran ja tiheyden avulla voidaan edelleen laskea massavirta kaavalla

$$q_m = q_v \cdot \rho$$

(7)

Jossa q_m on kanavan massavirta, q_v on kanavan tilavuusvirta ja ρ on kaasun tiheys kanavassa.

Tehon laskennassa ulospuhallus jäähdytettiin 40 °C, jotta lämpöpumpun höyrystimen lämpötila olisi mahdollisimman korkea optimaalisemman lämpöpumpun hyötysuhteen saavuttamiseksi.

Talteenoton jälkeisen lämpötilan ja mitatun lämpötilan erotuksen perusteella voitiin h,x – diagrammista lukea entalpian muutos. Massavirran ja lämpötilan kautta lämpötilan muutoksen ollessa tiedossa voidaan kanavien ulospuhalluksen teho laskea kaavalla

$$P = q_m \cdot \Delta h \quad (8)$$

jossa P on teho ja Δh on entalpian muutos.

Taulukossa 2 on esitetty kunkin kanavan massavirta, lämpötila ja teho.

TAULUKKO 2. Kanavien massavirta, lämpötila ja teho virtausmittauksilla.

	Massavirta, kg/s	Lämpötila, °C	Teho kW
Pitot1	14,60	51,5	1679
Pitot2	11,50	48,6	920
Pitot3	9,49	49,4	807
Pitot4	7,56	49,3	642
Pitot6	12,14	43,5	206
Pitot7	6,57	49,6	559
Pitot8	11,55	39	-
Pitot9	8,22	36	-

Mittauksissa esiintyi paljon epävarmuutta ja vaihtelua mittausolosuhteiden takia. Standardin mukainen, luotettava mittaus vaatii viisinkertaisen mittauskorkeuden mutkien tai puhaltimien jälkeen piipun halkaisijaan nähden.

Mittauksissa kanavista poistuvan kostean poistopuhallus ilman lämpötila vaihteli 36 °C ja 52 °C välillä. Valtaosassa kanavissa lämpötilat olivat hyvin lähellä 50 °C ja vain kahdessa kanavassa lämpötila alitti 40 °C. Ilma on lisäksi hyvin kosteaa, lähellä 100 % suhteellista ilmankosteutta.

Pitot-mittauksissa massavirta vaihteli 6 kg/s ja 15 kg/s välillä. Kanavista talteen otettavissa olevan lämpötehon määrittämiseksi valittiin lämpöpumpun lämmöntalteenottopatterien jälkeisen ilman lämpötilaksi 40 °C, jolloin 5 °C asteisuudella lämpöpumpun höyrystimelle menevä neste on 35 °C.

Lämpötehot pitot-mittauksissa vaihtelivat 200 kW ja 1700 kW välillä keskiarvon ollessa 802 kW. Vaihtelevat tulokset kertovat ensinnäkin mittausten epäluotettavuudesta, mutta myös osaltaan epäoptimaalisesta kuivausprosessista sekä kanavien eri kuivausprosessin vaiheiden aiheuttamasta hukkalämmön määrän vaihtelusta.

6.1 Koepalojen kosteusmääritys

Pitot-mittausten yhteydessä otettiin myös koepalat kolmeen eri kanavaan menevistä lautakuormista. Näytteet otettiin kanavista 3,6 ja 9. Koepalat numeroitiin ja säilöttiin muovipusseihin. Samalla kirjattiin ylös kanaviin menevien kuormien tilavuudet, kuorman sisäänmeno ja ulostulo ajat sekä kuormien määrä kanavassa. Kaikkien kuormien oletettiin olevan samanlaisia, jolloin saatiin tietoon kanavassa oleva puun kokonaistilavuus. Savonian laboratorioissa koepalat punnittiin märkinä ja kuivattiin 32 tunnin ajan 105 °C lämpötilassa. Kuivauksen jälkeen koepalat punnittiin uudelleen palojen kuivapainon määrittämiseksi. Märän puun kosteusprosentti voitiin määrittää kaavalla

$$\text{Kosteusprosentti} = \frac{m_m - m_k}{m_m \cdot 100} \quad (8)$$

Jossa m_m on puun märkäpaino ja m_k on puun kuivapaino.

Kosteusprosentista voidaan edelleen laskea veden osuus kilogrammoina kilogrammassa kuivaa puuta alussa ja lopussa kaavalla

$$\text{Alkukosteus} = \frac{\text{Märkäkosteus}\%}{100 - \text{Märkäkosteus}\%} \quad (9)$$

ja

$$\text{Loppukosteus} = \frac{\text{Kuivakosteus}\%}{100 - \text{Kuivakosteus}\%} \quad (10)$$

Syntyvän kuivan puun määrä sekunnissa laskettiin kaavalla

$$m_{kp} = \frac{\text{Kuormien tilavuus}}{\text{Kuorman läpimenoaika}} \cdot \frac{\rho_p}{3600} \quad (11)$$

jossa ρ_p on puun tiheys, keskimäärin 430 kg/m³ ja m_{kp} on syntyvän kuivan puun määrä sekunnissa.

Haihtuvan veden määrä saatiin edelleen laskettua kaavalla

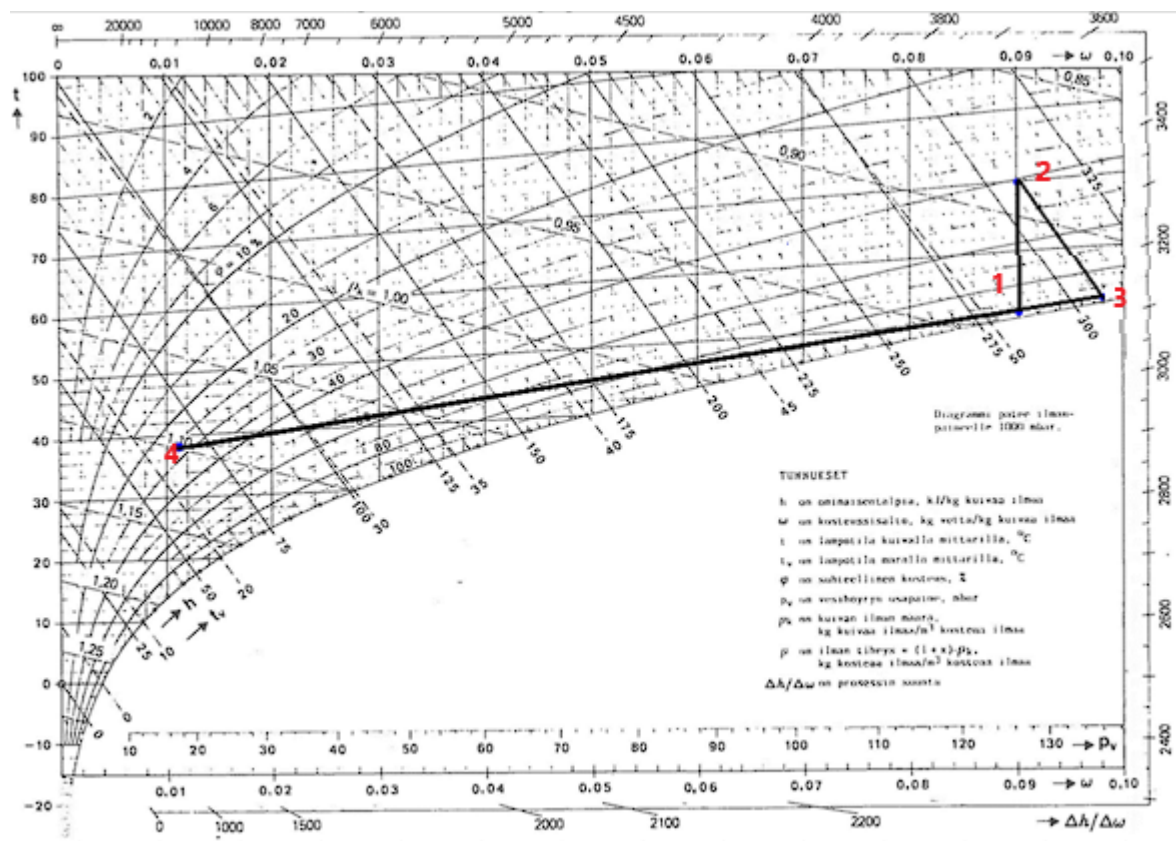
$$m_{H_2O} = m_{kP} \cdot \Delta v \quad (12)$$

jossa m_{H_2O} on haihtuvan veden määrä sekunnissa ja Δv on alku- ja loppukosteuden erotus.

Ilman kosteussisältö luettiin h,x -diagrammista prosessin arvoilla ja puun kuivaamiseen tarvittu il-mavirta voitiin laskea kaavalla

$$m_i = \frac{m_{H_2O}}{\Delta \omega} \quad (13)$$

jossa $\Delta \omega$ on ilman kosteussisällön muutos siirryttäessä märästä päästä kuivaan päähän. Pisteet on esitetty h,x -diagrammissa kuvassa 9. Piste 1 on ilma ennen lämmityspatteria ja piste 2 ilma läm-mityspatterin jälkeen kuivaamon kuivassa päässä. Piste 3 on kuivaamon märän pään ilma. Piste 4 taas on kanavaan esilämmitykseltä (LTO) tuleva ilman. Niinpä pisteen 1 ilma syntyy pisteen 3 ja 4 seok-sesta.



Kuva 9. Kuivausprosessin h,x -diagrammi. (Mustonen 2023.)

Ilman alkukosteuden, ilman loppukosteuden ja tarvitun kanavan ilmavirran avulla voitiin lopulta laskea lämmityspatterin tehon tarve kaavalla

$$\phi = m_i \cdot \Delta h \quad (14)$$

Jossa Δh on h,x -diagrammista luettu entalpian muutos.

Lämmityspatterin tehontarve vaihteli 280 kW ja 1200 kW välillä keskiarvon ollessa 628 kW. Kanavien 3 ja 6 kohdalla koepala- ja mittaustulokset olivat jokseenkin yhdenmukaiset. 9. kanavassa pitot-mittauksista ei saatu mitään järkevää mittaustulosta, joten vertailu ei ollut mahdollista.

7 LÄMPÖPUMPPU KOHTEESSA

Kanavakuivaamot sijaitsevat hallirakennuksessa, eivätkä ole tuotu valmiina moduulina paikalle, kuten esimerkiksi Valutec nykyään kuivaamoita toimittaa. Kuivaamoiden yläpuolella on ullakkotila, mikä rajoittaa lämpöpumpun sijoittelua. Tässä osiossa selvitetään hukkalämmön hyödyntämistä lämpöpumpuilla tavalla, jossa lämpöpumppumoduuli on sijoitettu noin 150 metrin päähän sisäpihalle. Sijoituspaikka on esitetty kuvassa 10. Ulospuhallusilman lämpö otetaan talteen nesteeseen erilliseen suljettuun kiertoon etäämmällä sijaitsevalle lämpöpumpulle.

Lisäksi tarkastellaan ratkaisuja, joissa lämpöpumppu sijoitettaisiin ulospuhalluksen ja kanavien yhteyteen, jolloin pitkän siirtoputkiston tarve poistuu kokonaan. Tämä voidaan toteuttaa kondenssi-kuivauksella tai esilämmittämällä ilmaa ennen nykyistä lämmityspatteria.

Eri kanavissa kuivataan eri dimensioita ja lautatavaralaatuja. Kanavan valinnassa lämpöpumpun toiminnan kannalta on hyvä kiinnittää huomiota muutamaan asiaan. Kanavan, jossa lämpöpumppua hyödynnetään, olisi hyvä olla käytössä mahdollisimman paljon. Toiseksi lautakuormien ja dimensioiden tulisi olla mahdollisimman tasalaatuisia ja kanavan käydä mahdollisimman korkealla kapasiteetilla eli mahdollisimman täynnä, jolloin lämpöpumpun tarvitsema säätö ja esimerkiksi epäoptimaalisen osakuorman käyttö olisi mahdollisimman vähäistä. Viimeiseksi kanavien puhaltimissa ja nykyisissä ilma-ilma LTO:ssa sekä lämmityspattereissa on tai voi tulla lisää eroavaisuuksia ja ideaalisinta on valita kanava, johon ei tarvitsisi lisätä esimerkiksi puhallintehoa tai vaihtaa olemassa olevia lämmityspattereita pois lukien olemassa olevat LTO:t.



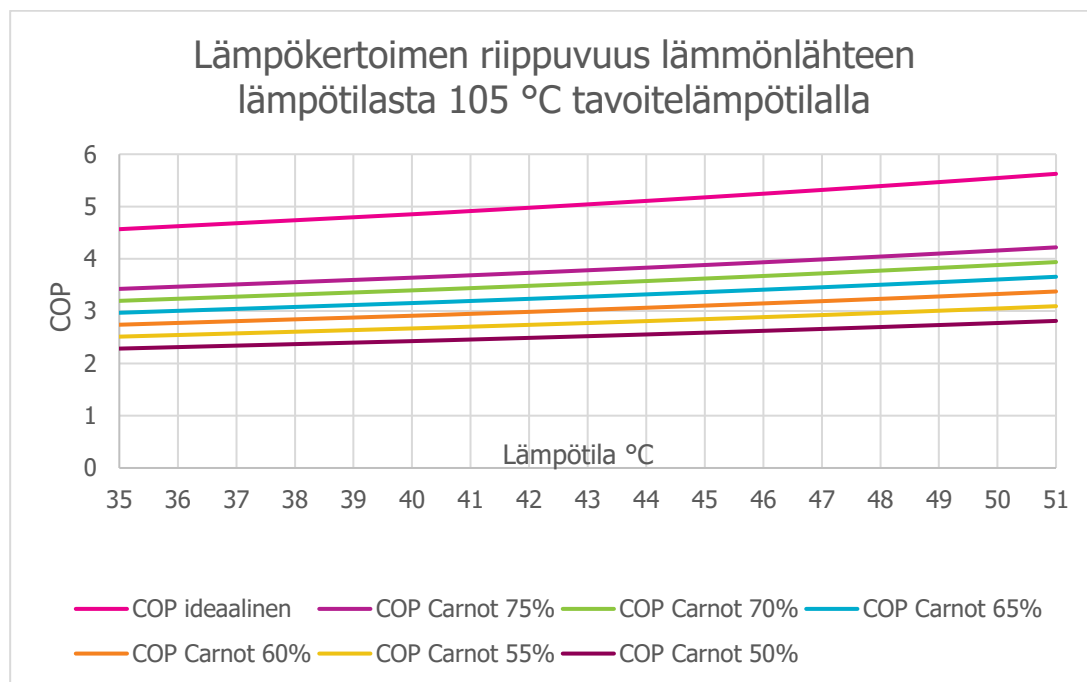
Kuva 10. Suunniteltu lämpöpumppumoduulin paikka. (Mustonen 2023.)

Kanavien korvausilma otetaan vinttitilasta, jossa ilma on ulkoilmaa lämpimämpi johtuen kanavista ja olemassa olevista LTO-kennoista johtuvasta lämmöstä. Vuodenajat aiheuttavat kuitenkin vaihtelua vintin ilman lämpötilaan. Kanavien sijainti Varkauden sahalla aiheuttaa myös haasteita lämpöpumpun sijoittelun kannalta. Optimaalisinta olisi, jos lämpöpumppu tai lämpöpumput voitaisiin sijoittaa kamarien välittömään läheisyyteen, kuten vintille. Työssä havaittujen ja Calefan huomioiden perusteella kuivaamon kanavien poistopuhallusten määrän ja lämpötilan vaihtelujen vuoksi lämmöntalteenottopattereita olisi hyvä asentaa ylimitoittaen, jotta tarvittava määrä lämpöä olisi saatavilla lämpöpumpulle jatkuvasti (Calefa 2023.)

7.1 Lämmityspatterien veden paluukierron lämmitys

Työssä tarkasteltiin erityisesti kahta eri vaihtoehtoa lämpönieluksi sekä kondenssikuivausta. Ensimmäinen vaihtoehto on kanavien lämmityspatterien lämmitysvesikierron paluueden lämmitys. Paluueden lämmitys on sijainniltaan edullinen, sillä putki kulkee vain metrien päässä suunnitellusta lämpöpumppumoduulin sijainnista. Tällöin tarvittaisiin vain yksi suljettu kierto kuivauskanaville ja säästöä syntäisi lämmönsiirron tehokkuudesta sekä putkilinjan pituudesta.

Kuva 11 havainnollistaa COP-arvon riippuvuutta lämmönlähteen lämpötilasta ideaalisella COP-arvolla (kaava 2) sekä eri Carnot-hyötysuhteilla (kaava 5) tavoitelämpötilan ollessa 105 °C. Lämmönsiirron varmistuminen huomioidaan vähentämällä 5 °C höyrystimen lämpötilasta ja lisäämällä 10 °C lauhduttimen lämpötilaan. Käytännössä COP on laskettu siis 115 °C lauhduttimen lämpötilalla ja 30 °C höyrystimen lämpötilalla, jotta riittävä lämmönsiirtyminen taataan.

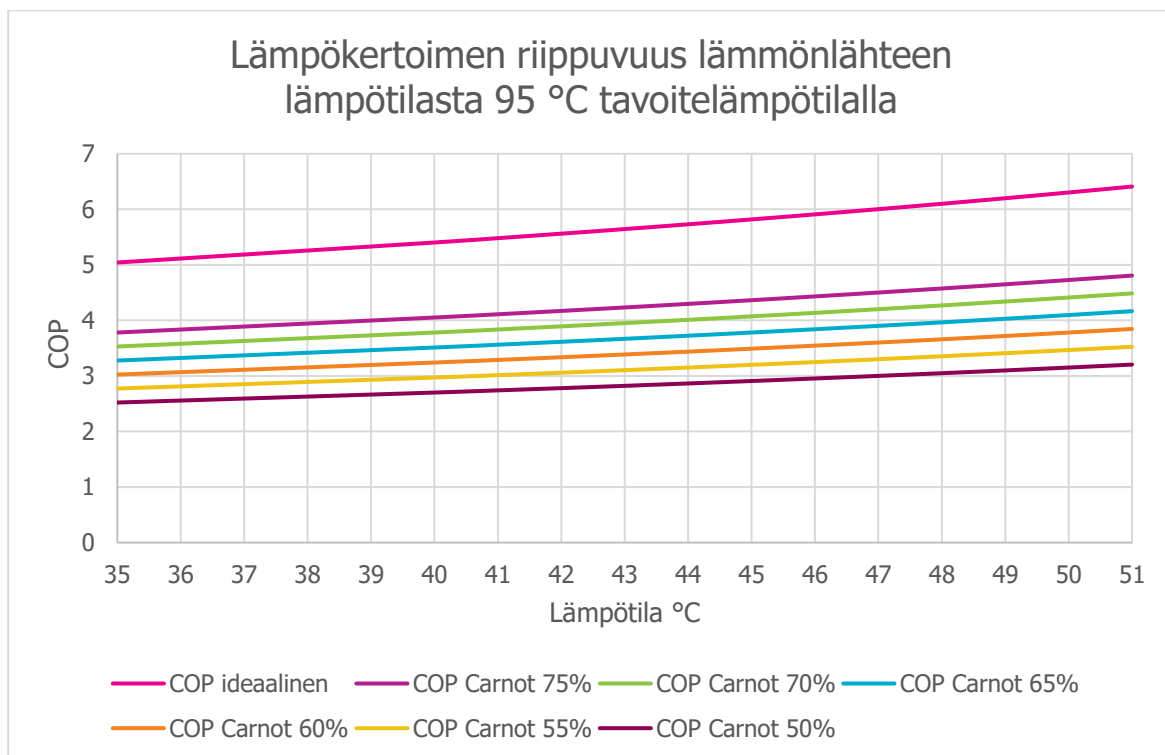


Kuva 11. Lämpökertoimen riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta 105 °C tavoitelämpötilalla. (Mustonen 2023.)

7.2 Ilman esilämmitys

Toinen vaihtoehto on esilämmittää kanavien ilmaa nykyisen LTO:n ja kanavan lämmityspatterin välissä. Kyseinen ratkaisu vaatisi toisen suljetun kierron ja pitkän putkilinjan kuivauskanaville. Vaihtoehtoisesti lämpöpumppu voisi olla sijoitettavissa kuivauskanavien läheisyyteen, esimerkiksi vinttitalaan, tätä varten tulisi tehdä kuitenkin rakenteellinen tarkastus ja mahdollisia muutoksia rakenteisiin.

Vaikka tässä vaihtoehdossa lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky on huonompi vesi-ilma lämmönsiirron takia, lämmönsiirto tarvitsee tehdä lauhduttimen puolella kerran vähemmän, kuin paluukierron lämmityksessä. Kuvassa 12 on esitetty COP:n riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta eri Carnot-hyötysuhteilla sekä ideaalisella COP-arvolla tavoitelämpötilan ollessa 95 °C. Lämmön siirtymisen huomioiminen ovat 5 °C höyrystimelle ja 10 °C lauhduttimelle.



Kuva 12. Lämpökertoimen riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta 95 °C tavoitelämpötilalla. (Mustonen 2023.)

Kuvaajista huomataan, että esimerkiksi ehdotetulla 35 °C höyrystimelle tulevan keruupiirin nesteen lämpötilalla 10 °C tavoitelämpötilan ero aiheuttaa noin 0.3 eron COP-arvoon. Kuvaajista huomataan myös Carnot-hyötysuhteen suuri vaikutus COP-arvoon, jolloin lämpöpumppujen välillä voi olla suuriakin eroja lämpökertoimen kannalta.

7.3 Kondenssikuivaus

Edellä mainittujen vaihtoehtojen lisäksi varsinkin Ruotsissa on kehitetty ja käytetty lämpöpumppua sahatavaran kuivauksessa. Menetelmä vaatii kuitenkin tilan, jossa on hyvä kosteuden- ja lämmöneristys ja ilmanvaihtoa ei tarvita. Menetelmää on käytetty lähinnä kamarikuivaamoissa, mutta muutamassa kuivaamossa Ruotsissa tekniikkaa on käytetty myös kanavakuivaamoissa ja ratkaisulla on päästy 3.5 COP arvoon. (Usenius 1991.)

Varkauden sahalla kyseinen ratkaisu kuitenkin laskisi olemassa olevien LTO-kennojen hyötyä tai tekisi niistä täysin tarpeettomat ilmanvaihdon tarpeen laskiessa tai poistuessa kokonaan. Lämpöpumput olisivat todennäköisesti myös kanavakohtaisia (Huhtinen 2023). Mahdolliset tarvittavat rakenteelliset muutokset ja rajoitukset tulisi tarkasti selvittää.

Teknisesti kondenssikuivaus on mahdollista kuitenkin toteuttaa kohteen prosessin ja lämpötilojen puolesta. Mahdollisten rakenteellisten rajoitteiden ja muutosten lisäksi ainoa rajoittava tekijä tekniselle toteutukselle on kanavan ilman virtausnopeus, joka tulisi olla alle 2 m/s kondensaatiosta syntyvän pisaroinnin erottumisen takaamiseksi ilmavirrasta. (Pesonen 2023).

Kondenssikuivauksen ratkaisussa kanavan märkääpään ilmaa jäähdytetään hieman lämpöpumpun höyrystimellä noin 60 °C:sta 56 °C:een ja lämmitetään sitten lämpöpumpun lauhduttimella haluttuun, noin 70 °C lämpötilaan. Tällöin lämpöpumppu poistaa kosteutta kuivaamon ilmasta ja vähentää korvausilman tarvetta tai poistaa tarpeen kokonaan. Huomioitavaa on, että suuren lämmönsiirto-pinta-alan lisäys kanavaan luo mahdollisesti tarpeen suuremmalle puhallusteholle, kun taas toisaalta poistopuhalluksen tarve poistuu tai vähenee huomattavasti.

7.4 Lämpöpumpun vaikutus CO₂- päästöihin

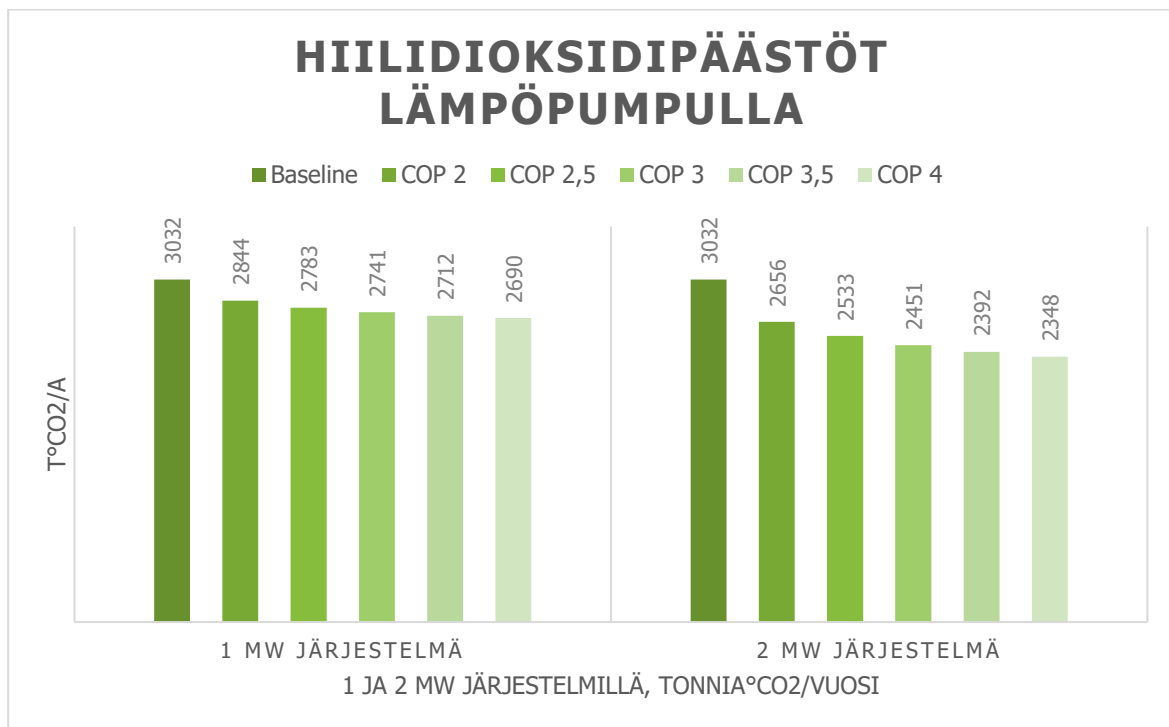
Kesällä 2022 voimaan astunut uusi ilmastolaki luo Suomessa pohjan kansalliselle ilmastotyölle. Uudistettu laki sisältää päästövähennystavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050. Laki edellyttää, että Suomen kasvihuonepäästöt vähenevät 60 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Ilmastolakiin on myös kirjattu tavoite hiilineutraaliudesta vuonna 2035. (Ilmasto-opas 2022). Lain, sekä Stora Enson asettamiin omiin tavoitteisiin pääseminen vaatii monialaisia toimenpiteitä mukaan lukien energiatehokkuuden parantamisen ja uusiutuvan energian käytön. Lämpöpumpun hankintaa ja ylijäämälämmön hyödyntämistä mietittäessä onkin syytä tarkastella myös sen vaikutusta päästöihin hiilijalanjälkeen.

Laskennassa käytettiin yleisiä, keskimääräisiä kertoimia ja laskenta tehtiin suoraviivaisesti scope 2 laajuudella. Laskennan voi suorittaa huomattavasti tarkemmin laitteistoratkaisujen tarkentuessa ja käytettäessä integraatin päästötietoja. Sähkön osalta käytettiin Tilastokeskuksen julkaisemaa keskimääräistä sähköntuotannon päästökerrointa. Näistä laskettu kolmen viimeisen tilastovuoden keskiarvo, jossa yhteistuotanto on jaettu energiamenetelmällä, on 77 kg CO₂/MWh. Vastaava luku teollisuushöyryn tuotannolle on 62 kg CO₂/MWh. (Tilastokeskus 2023).

Varkauden sahan kuivaamalla kulutettiin vuonna 2022 3950 MWh sähköä (Sippola 2023). Jos sahan kuivaamon keskimääräinen lämmön tarve on 5,5 MW ja huipunkäyttö aika 8000 h/a, niin sahan kuivaamo kuluttaa vuodessa 44000 MWh lämpöä. Tämä tarkoittaa, että vuodessa sahan kuivauksen tarvitsema energiantuotanto muodostaa 3032 tonnia hiilidioksidia.

Jos sahan kuivaamalla käytetään vuodessa 44000 MWh voimalaitoksen höyryä ja siitä korvataan 1–2 MW lämpöpumpulla huipunkäyttöajan ollessa 8000 h/a, niin vuositasona se tarkoittaa 8000–16000 MWh vähemmän voimalaitoksen höyryn käyttöä. CO₂- päästöjen muutos lämpöpumppua käyttäessä

voidaan laskea vähentämällä vuoden hiilidioksidin muodostumisesta lämmön tuotannossa säästynyt muodostuma ja lisäämällä siihen kompressorin käyttämän sähkön tuottamisen muodostama hiilidioksidi. Kuvassa 13 on esitetty CO₂- päästöjen vähenemä käytettäessä 1 MW ja 2 MW lämpöpumppujärjestelmiä eri COP-arvoilla.



Kuva 13. Lämpöpumpun vaikutus hiilidioksidipäästöihin kuivaamalla. (Mustonen 2023.)

8 LÄMPÖPUMPPURATKAISU KOHTEESEEN

Työssä oltiin yhteydessä useisiin lämpöpumppujen laitetoimittajiin ja kysyttiin laite- ja kokonaisratkaisuja. Saadut vastaukset ja tarjoukset on toimitettu tilaajan edustajalle ja tässä osiossa käsitellään saatuja vastauksia ja tarjouksia yleisellä tasolla. Vastauksia tuli viideltä toimittajalta, joista kahdelta saatiin myös tarjoukset. Lisäksi työssä hyödynnettiin jo olemassa olevaa tilaajan saamaa toimittajan tarjousta.

8.1.1 Toimittaja 1

Toimittaja 1 on kokenut ja tunnettu lämpöpumppujen kotimainen toimittaja. Heiltä saadut tarjoukset pohjautuvat alla oleviin lämpötiloihin ja tietoihin.

Ensimmäinen vaihtoehto on lämpöpumppu samaan tarkoitukseen, kuin toimittajan 2, eli lämmityspatterin paluukieron lämmitykseen. Höyrystimelle tulevan nesteen lämpötilaksi on valittu maltillisempi 35 °C ja lähtevän nesteen lämpötilaksi 25 °C – 30 °C. Lauhduttimelle tulevan veden lämpötilaksi annettiin 92 °C – 95 °C ja tavoitelämpötilaksi 105 °C. Tämän ratkaisun COP- luvuksi tuli 2,18. Kylmäaineena 1. vaiheessa toimii R450A ja 2. vaiheessa R1233zd(E).

Lisäksi pyydettiin tarjous lämpöpumpusta samoilla höyrystimen tiedoilla, mutta alemmalla, 100 °C tavoitelämpötilalla. Molemmat ensimmäisen vaihtoehdon ratkaisut ovat kaksivaiheisia ja ne on mitoitettu noin 1 MW järjestelmiksi ja ovat skaalattavissa 1 MW välein suuremmaksi lisäämällä lämpöpumppuja. COP- luku tässä ratkaisussa oli hieman parempi 2,34. Kiertoaineina toimii kaksi eri ainetta. Ensimmäisessä vaiheessa kiertoaineena käytetään R1234ze(E) ja toisessa vaiheessa käytetään R1233zd(E).

Toiseen vaihtoehtoon on tarjottu tiedoiksi samat höyrystimen lämpötilat, mutta matalammat lauhduttimen lämpötilat. Ajatuksena oli tarkastella kanavan ilman esilämmittämistä lämpöpumpulla. Lauhduttimelle tulevan veden lämpötilaksi on valittu 75 °C ja lähtevän veden lämpötilaksi 85 °C. Tämä ratkaisu käyttää yksivaiheista lämpöpumppua. Ratkaisun COP-luvuksi muodostui 1 MW järjestelmälle 2,61. Tarjous on saatu 1 MW järjestelmästä. Tässä ratkaisussa kylmäaineena käytetään R1234ze(E).

Kyseinen toimituslaajuus sisältää ainoastaan lämpöpumput.

8.1.2 Toimittaja 2

Toimittaja 2 on tehnyt useita erilaisia lämpöpumppuratkaisuja eri teollisuuden aloilla. Ratkaisussaan Stora Enson sahalle toimittaja ehdottaa lämmityspatterien veden paluukierron lämmittämistä 95 °C:sta lähemmäksi 115 °C tavoitetta. Heidän tarjouksensa on laskettu 57 °C ja Rh 100 % poistoilmalle sekä erillisen keruupiirin 45 °C paluulämpötilalle ja 35 °C menolämpötilalle. Järjestelmän koko on 2 MW.

Erillinen vesi-glykolipiiri ottaa lämmön talteen poistoilmasta lämmittäen keruupiirin paluukierron 45 °C:een. Lämpöpumpun höyrystin hyödyntää keruupiirin lämpöä 150 m päähän sijoitetulla moduulilla, joka sijaitsee hyvin lähellä lämmityspatterien paluukierron yhtymäkohtaa. Ratkaisu vaatii siis erillisen siirtoputkiston, jolle toimittaja on laskenut option.

Laskennassa käytetyillä arvoilla päästään COP-arvoon 3.

Kyseisen ratkaisun toimituslaajuus on hyvä ja tilaajan vastuulle jää rakennuslupa ja rakennustekniset työt, sähkönsyötöt lämpöpumpuille, nostotyöt ja putkistot, jos optiota ei haluta.

8.1.3 Toimittaja 3

Toimittaja 3 on tehnyt kondenssilämpöpumppuratkaisuja kamarikuivaamoihin ja heidän tarjouksensa perustuu kondenssilämpöpumpun käyttöön kanavakuivaamossa. Alustava tarjous on laskettu 45000 m³/h ilmamäärälle ja 1359 kW lämmitysteholle. Lämmönvaihtimia ratkaisussa on neljä, yksi höyrystin ja kolme lauhdutinta.

Höyrystin jäädyttää märkään ilman 60 °C:sta 56 °C:een samalla kondensoiden kosteutta kuivaamon ilmasta. Kompressoreita on kolme 453 kW yksikköä, joille jokaiselle on omat lauhduttimet, jotka lämmittävät kuivaamon ilman 70 °C:een. Kiertoaineena käytetään ympäristöystävällistä R600a eli isobutaania. Kyseisellä konfiguraatiolla kiertoaineen lauhtumislämpötila on 90 °C ja höyrystymislämpötila 15 °C.

Yksittäisen kompressorin 453 kW lämmitysteholla ja kompressorin viemällä 194 kW sähköteholla COP-luvuksi muodostuu 2,33 lämmityksen osalta. Yhden kompressorin paino on 1490 kg, joka täyttyy huomioida sijoittelun ollessa lähellä kanavan rakenteita.

Edellytyksenä ratkaisun toteutukselle on korkeintaan 2 m/s virtausnopeus jäädytys- ja kuivauspattereilla vesipisaroiden ilmavirtaan ajautumisen ehkäisemiseksi. Tarvittaessa patterien jälkeen voisi

olla hidastuskammio. Otsapinta-ala vaihtimilla on suurempi, 6000 mm x 2400 mm, kuin nykyiset karnavien lämpöpatterien otsapinta-alat.

Tämän ratkaisun osalta on tärkeää huomata alhainen höyrystimen lämpötila, joka johtuu höyrystinpuolen lämmönvaihtimen mitoituksesta. Jos ilman virtausnopeutta on mahdollista kasvattaa esimerkiksi edellä mainittua hidastuskammiota hyväksi käyttäen, voidaan joko lämmönsiirtimen kokoa pienentää tai lamelliväliä kasvattaa lähestulkoon suoraan suhteessa virtausnopeuden kasvuun (Pesonen 2023.) Vaihtoehtoisesti höyrystymislämpötilaa voidaan nostaa, jolloin voidaan päästä huomattavasti parempiin COP-lukuihin.

Toimitus tapahtuu avaimet-käteen ratkaisuna sovittuun rajapintaan saakka, esimerkiksi liitosvalmiiden moduulien toimittamiseen ja asentamiseen.

8.1.4 Toimittaja 4

Toimittaja 4 on suuri globaali lämpöpumppujen toimittaja. Vastauksessa ehdotettiin kaksivaiheista ratkaisua lämmityspatterin paluukierron lämmittämisen osalta. Tarjouksen osalta kehoitettiin ottamaan yhteyttä Suomessa toimivaan kumppaniin, mutta vastausta ei saatu.

Yhteydenotossa kysyttiin ehdotusta 40 °C – 65 °C ilmavirran hukkalämmön hyödyntämiseen lauhduttimen tavoitelämpötilan ollessa 110 °C. Ensimmäisessä vaiheessa käytettäisiin kiertoaineena R717 eli ammoniakkaa ja toisessa vaiheessa R600a eli isobutaania.

Saatujen esitteiden perusteella toisen vaiheen 1 MW järjestelmän kompressorin sähkönkulutus on 392 kW lämmöntuoton ollessa 1055 kW. Ensimmäisen vaiheen lämpöpumpun esitteestä ei käynyt ilmi kompressorin kuluttama sähköteho. Lämpötilojen perusteella sen voisi arvioida olevan noin 100kW, jolloin järjestelmän COP-arvo olisi 2,14. Esitteissä kuitenkin korostetaan, etteivät ne ole kaupallisia arvoja.

8.1.5 Toimittaja 5

Toimittajalta 5 ei saatu tarjousta, mutta muuta tietoa onnistuttiin saamaan. Toimittaja 5 on myös vain lämpöpumppujen toimittaja ja toimittaa halutun lämpöpumpun annettujen arvojen perusteella, kuten toimittaja 1. Kyseinen toimittaja tarjosin myös mahdollisen putkituksen ja lämmönvaihtimien toimituksen kolmannen toimijan kanssa, jonka kanssa heillä on ollut yhteistyötä ennenkin.

Lämpöpumppuja on saatavilla 2,5 MW asti ja ne ovat skaalattavissa. Toimituksen rajoina ovat höyrytin ja lauhdutin. Toimitukseen kuuluu lämpöpumpun toimitus kohteeseen, asennus, varaosat ja huolto.

8.1.6 Toimittaja 6

Toimittaja 6 on suuri maailmanlaajuinen absorptiolämpöpumppujen toimittaja. Heillä ei ollut toimittaa sopivaa lämpöpumppua kohteen käyttöön muutamasta syystä. Heidän ratkaisunsa hyödyntää lämmintä 75 °C – 80 °C vettä tai vaihtoehtoisesti 85 °C – 90 °C vesihöyryä ja siitä tuotetaan matalapaineista tai korkeapaineista höyryä. Lisäksi heidän projektikokonsa on 5 MW – 40 MW lämpöpumpuratkaisut. Budjettitarjoukseen liittyen vastauksessa oli kuitenkin karkea arvio ratkaisun tyyppillisestä hinnasta toteutuneiden projektin pohjalta yksikössä EUR/MW.

8.2 Suora takaisinmaksuaika

Suora takaisinmaksuaika on mittarina hyvä ja yksinkertainen energiatehokkuusinvestointien kannattavuuden tarkasteluun. Siinä ei kuitenkaan huomioida energian ja rahan arvon kehitystä eikä takaisinmaksuajan jälkeen saatavia tuottoja. (Motiva 2018.)

Saatujen tarjousten tietojen perusteella laskettiin takaisinmaksuajat investoinneille edesauttamaan ratkaisujen vertailua. Tilajalla on käytössään yrityksen omat, yksityiskohtaiset laskentataulukot. Sähkön ja lämmön hintana käytettiin tilajalta saatuja hintoja. Höyryn ja sähkön kulutuksen osalta käytettiin osion 2.7 mukaisia arvoja 44000 MWh höyrylle ja 3950 MWh sähkölle.

Laskennassa käytettiin Business Finlandin 20 % energiatukea. Tukea voidaan myöntää uusiutuvan energian käyttöä ja tuotantoa, energiansäästöä energian tuotannon tai käytön tehostamista tai muuten energiajärjestelmää vähähiilisemmäksi muokkaaviin yritysten ja yhteisöjen hankkeisiin. (Business Finland, 2023).

Suora takaisinmaksuaika voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$Takaisinmaksuaika = \frac{\text{Investoinnin hankintameno}}{\text{Vuotuinen nettotuotto}} \quad (15)$$

Jossa vuotoinen nettotuotto koostuu säästetyn ostolämmön ja kasvaneen ostosähkön kulutuksen summasta

Toimittajan 1 lämpöpumpuille saatiin takaisinmaksuajoiksi 1. vaihtoehdon 105 °C tavoitelämpötilan järjestelmälle 12,8 vuotta. 100 °C tavoitelämpötilan järjestelmälle takaisinmaksu aika oli 7,5 vuotta. Koska näitä skaalattaisiin 1 MW portaalla lisäämällä samanlaisia järjestelmiä, ei ratkaisun TMA muutu järjestelmän koon kasvaessa. 85 °C tavoitelämpötilan järjestelmän takaisinmaksuajaksi tuli 2,2 vuotta. Huomattavasti alhaisempaan takaisinmaksu aikaan jälkimmäisessä vaihtoehdossa vaikutti paitsi hiukan parempi COP, niin myös suurimmilta osin huomattavasti alhaisempi lämpöpumpun hinta.

Toimittajan 2 TMA on tilaajan tiedossa toimittajan jo laskemana.

Toimittajan 3 lämpöpumpulle takaisinmaksuajaksi tuli 1300 kW järjestelmällä 5,4 vuotta. On tärkeä huomata, että tähän sisältyy tarvittavat lämmönvaihtimet.

Tässä työssä lasketuissa takaisinmaksuajoissa ei ole huomioitu muita kuluja, kuin lämpöpumpun investointikustannuksia. Muita kuluja ovat esimerkiksi putkitukset ja rakenteelliset muutokset sekä lämmönvaihtimet mahdollisille erillisille keruupiireille. Tietoja ei ole saatavilla ja niitä on hyvin vaikea arvioida ennen tarkempaa toteutuksen suunnittelua. Ainoastaan 150 metrin putkituksen osalta oli saatavana yhden toimittajan hinta erikseen optiona.

9 YHTEENVETO

Kanavista saatava teho vaihteli pitot-mittauksissa 200 kW ja 1700 kW välillä keskiarvon ollessa 802 kW. Vastaavasti koepaloista saatu lämmityspatterin tehontarve vaihteli 280 kW ja 1200 kW välillä keskiarvon ollessa 628 kW. Kuivaamon lämmityspatterit ovat mitoitettu tällä hetkellä noin 550 kW. Ottaen huomioon, että suurin osa kanavan käyttämästä energiasta poistuu ulospuhallusilmassa lukuun ottamatta kuormiin sitoutunutta lämpöä ja rakenteiden läpi johtuvaa tai raoista karkaavaa lämpöä.

Työssä tarkasteltiin kolmea eri kokonaisratkaisua, jotka olivat lämmityspatterien paluukierron lämmitys, ilman esilämmitys ja kondenssiukuivaus. Paras COP tässä tarkastelussa oli toimittajan 2 kokonaisratkaisu, jossa lämmityspatterin paluukiertoa lämmitettäisiin lämpöpumpulla. Kyseinen laskelma oli kuitenkin toimittajan laatimilla arvioilla ja luvuilla. Toisen toimittajan vastaavanlaisilla arvoilla toimittamalle lämpöpumpulle tulisi COP-luvuksi 2,18. Työssä lasketuista COP-luvuista korkein luku oli ilman esilämmityksellä, jolle kysyttiin laitetta toimittajalta 1. Kyseinen COP-luku oli 2,48. Kuten luvussa 8.1.3 on kerrottu, on kuitenkin hyvä huomata kondenssilämpöpumpun laskennan suuri varovaisuus ja todennäköisesti COP-lukua voi nostaa mahdollisesti huomattavastikin. Tässä tarkastelussa kyseinen COP-luku oli 2,33.

Toimituslaajuuksissa oli paljon vaihtelua. Ääripäinä lämpöpumppuratkaisu toimitettiin toimivana avaimet-kätehen ratkaisuna tai pelkkänä lämpöpumppumoduulina, jossa rajoina toimivat höyrystin ja lauhdutin. Näiden välistä löytyi ratkaisuja, joissa mukana tuli lämmönvaihtimet samalta toimittajalta tai yhteistyökumppanilta. Kaikilla oli tarjota huolto ja varaosat. Toimituslaajuuden ja helppouden kannalta toimittajan 2 ratkaisu on houkuttelevin.

Paras takaisinmaksuaika, 2,2 vuotta, tuli ilman esilämmityksellä toimituksen laajuuden osalta, mikä sisälsi vain lämpöpumpun. Kondenssiukuivauksessa TMA oli 5,4 vuotta ja kuten osiossa 2.9 on mainittu, se sisälsi myös lämmönvaihtimet. Lisäksi on hyvä huomata, että COP-lukua voi olla mahdollista parantaa jopa huomattavasti. Toimittaja 2 oli laskenut takaisinmaksuajakseen hyvin kilpailukykyisen ajan, tosin laskenta oli suoritettu hieman eri arvoilla ja lähtökohdilla, kuin tässä työssä.

Kaiken kaikkiaan työssä tarkastelluista vaihtoehtoista kondenssiukuivaus vaikuttaisi houkuttelevimmalta vaihtoehdolta, jossa on eniten potentiaalia, sillä tarkastelu tehtiin hyvin varovaisilla arvoilla. Syynä tähän on korkea höyrystinpuolen lämpötila, joka on noin 57 °C verrattuna muihin vaihtoehtoihin, jossa höyrystinpuolen lämpötila on 35 °C – 45 °C tuntumassa. Tämä vaihtoehto hyötyisi siitä, että ratkaisu toteutettaisiin kanaviin, joissa nykyinen ilma-ilma- LTO on elinkaarensa loppupäässä, sillä ratkaisu tekisi nykyisestä LTO:sta turhan tai lähes turhan. Kuitenkin työssä saatujen lukujen perusteella ilman esilämmitys on houkuttelevin vaihtoehto takaisinmaksuajassa ja COP-luvussa. Toteutukseltaan se ei olisi valtavia rakenteellisia muutoksia vaativa, mikäli lämpöpumppu voidaan sijoittaa lämpönielun ja lämmönlähteen läheisyyteen, esimerkiksi vintille.

Kanavien valinnan suhteen on kannattavaa suosia kanavia, joita käytetään paljon, joissa on pääosin täydet kuormat ja kuormat ovat tasalaatuisia. Lisäksi kanavan tulisi olla yleiseltä energiatehokkuudeltaan hyvässä kunnossa sisältäen lämmityspatterin, puhaltimet, eristeet ja mittaus- sekä ohjausarvot. Jotta lämpöä riittäisi riittävästi lämpöpumpulle tai lämpöpumpuille vaihtelujen aikana, olisi alustavasti hyvä miettiä työn tulosten pohjalta käytettäväksi kahta kanavaa per 1 MW lämpöpumpun tuottamaa lämmitystehoa.

10 POHDINTA

Työ osoittautui lopulta laajemmaksi, kuin olin osannut odottaa ja vaikeuksia tuotti välillä pysyä rajoissa sekä hahmottaa rajat tarkkaviivaisesti. Koska työssä keskityttiin selvittämään kokonaisvaltaisesti lämpöpumpun soveltuvuutta kohteeseen, on työn aihepiirissä vara tutkia useita osa-alueita huomattavasti syvemmin. Sopivien toimittajien löytäminen ja vastauksien saaminen oli yllättävän haasteellista. Koen, että sain kuitenkin riittävän kattavan määrän vastauksia erilaisilta toimittajilta erilaisiin ratkaisuihin.

Epätarkkuudet mittauksissa olivat odotettavissa, mutta mielestäni tulokset olivat tarkoitukseen riittävät virtausmittausten ja koepalatulosten ollessa jotenkuten yhdensuuntaiset kanavien 3 ja 6 kohdalla ja virtausmittauksissa ollessa yhtenäisyyttä. Ajatuksena pitot-mittauksista heräsi pienemmän halkaisijan putken käyttö pitot-putken ympärillä laminaarisemman virtauksen aikaansaamiseksi, mikäli mittauksia vielä joskus tehdään.

Työn aikana esille nousi sahan kuivaamon omien mittausten epävarmuus ja kuivauksen ohjauksen toiminta operaattorien kertoman tiedon ja kuormien epätasalaatuisuuden vuoksi. Lämpöpumppu on investointina verrattain kallis. Mittaukset, eristys, lämmönsiirtimet ja kuivauksen optimointi ovat monesti pienempiä investointeja, joilla voi olla merkittäväkin vaikutus. Yleisen energiatehokkuuden parantaminen luo myös paremmat edellytykset lämpöpumpun toiminnalle kohteessa, kuten seuraavissa kappaleissa todetaan.

COP-luvut tarjotuilla ratkaisuilla jäivät 2,18–3,0 välille, mikä ei tullut yllätyksenä ehdotusten ollessa alustavia ja verrattuna siihen, mitä teoreettiset Carnot-hyötysuhde laskut antoivat tuloksiksi. COP-luvut ovat luultavasti hieman alakanttiin yksityiskohtaisen optimoinnin puuttuessa. Houkuttelevimpina vaihtoehtoina näen ratkaisut, joissa lämpöpumppu sijoitetaan kanavien ja siten sekä lämpönielun, että lämmönlähteen läheisyyteen. Näin vähennetään mahdollisesti lämmönsiirtimien määrää ja investointikustannuksia. Nykyisten vanhempien lämmöntalteenottoyksiköiden vanhentuuessa voisi miettiä lämmöntalteenottoa kyseiseen kanavaan lämpöpumpulla uuden ilma-ilma lämmöntalteenoton investoinnin sijaan. Tällöin hyödynnettävä ilmakein olisi hieman lämpimämpää johtaen noin 0,3 korkeampaan COP-lukuun ja hiukan pienempiin lämpöpumpun investointikustannuksiin. Kunkin ratkaisun paremmuus riippuu kuitenkin vahvasti siitä, millaisia rakenteellisia muutoksia ne kanaviin tai sen ympäristöön vaativat.

Teknistaloudellisen puolen lisäksi lämpöpumpun tuomat edut ympäristölle tulisi ottaa huomioon. Noin viidesosalla kuivaamon käyttämän lämmön tuottamisella lämpöpumpulla vähennetään hiilidioksidipäästöjä vajaa 10 %, jolloin esimerkiksi 4 MW järjestelmällä osuus olisi jo lähes 40 %.

Takaisinmaksuajoissa oli vaihtelua 2,2 ja 12,8 vuoden välillä. Ottaen huomioon, että lukuun ottamatta toimittajaa 3, laskelma sisälsi vain lämpöpumpun hinnan, eivät takaisinmaksuajat ole ainkaan osin kovin lupaavia. Laskennasta ja saaduista tarjouksista pystyi toteamaan, että lämpöpumpun toimintalämpötila vaikuttaa paitsi lämpöpumpun COP-lukuun, niin myös suuresti lämpöpumpun investointikustannuksiin. Lämpöpumpun kannattavuus on vahvasti sidoksissa myös sähkön ja lämmön hintaan, joten suurtakin vaihtelua voi tapahtua suhteellisen lyhyellä aikavälillä.

Mahdollisen hyötykäytön löytäminen lämpöpumpun jäähdytysteholle tekee siitä huomattavasti paremman investoinnin. Tähän yksi ratkaisu voisi olla yhteistyö tahon kanssa, jolla on käyttöä lämpöpumpun käytössä syntyvälle jäähdytykselle.

LÄHTEET

Berntson ja Franck 1997. Learning from experiences with Industrial Heat Pumps, CADDET.

Business Finland, 2023. *Businessfinland.fi verkkosivusto*. <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/etusivu>. Viitattu 4.11.2023

Calefa 2023. Varkauden sahakuivaamon selvitys.

Happonen, Taito 2010. Ilmalämpöpumpun toiminta ja asennus, kylmätekniiikan perusteista ilmalämpöpumppujen toiminnan ymmärtämiseen ja asennuksen toteutukseen. Koulutus- ja kehittämispalvelu Aducate, Itä-Suomen yliopisto. Saatavilla: https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/9634/urn_isbn_978-952-61-0044-9.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lähteenaro, Paavo 2019. *Kuumalämpöpumppujen sovelluskohteet ja potentiaali metsätaloudessa*. Energiatekniiikan diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub: <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159906/Kuumal%C3%A4mp%C3%B6pumpun%20sovelluskohteet%20mets%C3%A4teollisuudessa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Huhtinen, Markku 2023. Keskustelu.

Ilmasto-opas, 2022. *Ilmasto-opas.fi verkkosivusto*. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/suomen-ilmastopolitiikalla-pyritaan-saavuttamaan-ilmastotavoitteet>. Viitattu 20.10.2023.

Luoranen, Juho 2017. Teollisen kokoluokan lämpöpumppukoneikon tekniikka ja talous. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Insinööri-tieteiden korkeakoulu. Saatavilla: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25107/master_Luoranen_Juho_2017.pdf?sequence=2

Motiva 2019. *Motiva.fi verkkosivusto*. Esiselvitys ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf.

Motiva 2014. *Motiva.fi verkkosivusto*. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu_ ja_ORC-sovellukset.pdf#page=1.

Mustonen, Hanssi 2023.

Pesonen, Hannu 2023. Tehoilma. Sähköpostiviestit ja Teams palaveri.

Ratalahti, Henna 2019. *Lämpöpumpputekniiikan hyödyntäminen paperitehtaan energiavirtojen hallinnassa*. Energia- ja ympäristötekniikan opinnäytetyö, Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Theseus: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/167037/Opinn%C3%A4ytety%C3%B6.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

Savonia luentomateriaali, 2023. Teollisuuden energiategniikka. Viitattu 25.7.2023.

Stora Enso, 2023. Wedge -sovellus.

Sipi, Marketta 2002. Puutuoteteollisuus 5 – Sahatavaratuotanto.

Sippola, Jussi 2023. Stora Enso Wood Products. Energian kulutuksen seuranta.

Thulukkanam, 2014. Heat Exchanger Design Handbook – Second edition. <https://www.sli-deshare.net/vijayabhaskar83/heat-exchanger-design-handbook-42097614>.

Tilastokeskus 2020. Teollisuuden energiankäyttö [verkkójulkaisu]. ISSN=1798-775X. 2020, Liitekuvio 3. Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 1.12.2023].

Saantitapa: http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_kuv_003_fi.html

Tilastokeskus 2023. *Stat.fi verkkosivusto*. https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2022/html/suom0011.htm. Viitattu 20.10.2023

TEM 2023. Työ- ja elinkeinoministeriö. Hukkalämpö. Viitattu 1.12.2023. Saatavilla <https://tem.fi/hukkalampo>.

U.S Department of Energy, 2003. Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings: <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/industrial-heat-pumps-steam-and-fuel-savings>.

Usenius, Arto, Siimes, Heikki 1991. Tulevaisuuden puunkuivausmenetelmät. Espoo: VTT.

YIT, Energiateollisuus ry ja Työ- ja elinkeinoministeriö. (2010) Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä.

Valutec 2023. <https://www.valutec.fi/tuotteet/kanavakuivaamot/kanavakuivaamo-otc/>. Viitattu 20.7.2023.