Tampereen yliopisto

Tommi Sarkkinen

# PURISTINHUOVAN VIIMEISTYSKONEEN ENERGIATEHOKKUUS

## Energiankäyttö ja energiatehokkuuden parantamisen arviointi

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Yliopisto-opettaja Aleksi Sivonen
Apulaisprofessori Henrik Tolvanen
Kesäkuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Tommi Sarkkinen: Puristinhuovan viimeistyskoneen energiatehokkuus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka
Kesäkuu 2025

---

Teollisuus vastaa suuresta osasta kaikkea loppuenergiankäyttöä. Merkittävä osa tästä vapautuu kuitenkin hukkalämpönä ympäristöön. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tähtäävissä toimissa hukkalämmön määrää on vähennettävä sitä hyödyntämällä ja energiatehokkuutta parantamalla.

Tämän työn tarkoituksena on kartoittaa Valmet Technologies Oy:n puristinhuopatuotannon viimeistyskoneen energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksia. Taustalla on Valmetin tälle vuosikymmenelle asettama tavoite päästöjen vähentämisestä omissa toiminnoissaan. Viimeistyskoneen energiatehokkuuden parantamista arvioitiin mittaustutkimukseen perustuen. Mittauksia suoritettiin viimeistysprosessin osaprosesseista, joita ovat kuumatelojen lämmitys ja jäähdytys, prosessivettä käyttävä pesujärjestelmä sekä prosessi-ilmanvaihto. Lisäksi mitattiin koneen sähkönkulutusta. Mittaustulosten avulla muodostettiin viimeistyskoneelle energiataseprofiili ominaisenergiankulutuksen muodossa. Koneen toimintaan perehtymisen ja mittausdatan avulla luokiteltiin viimeistysprosessiin liittyvät energiavirrat alan kirjallisuudesta löytyvää menetelmää hyödyntäen ja arvioitiin mahdollisuuksia hukkalämmön talteenottoon sekä osaprosessien optimointiin. Arviossa painotettiin energiavirtojen termodynaamisia ominaisuuksia sekä lämmönlähteiden aikaprofiileja.

Viimeistyskoneen energiavirrat luokitellaan prosessilämpöön, sekundäärivirtoihin ja poistovirtoihin eli hukkalämpöön. Prosessilämpö on pohjimmiltaan sekundäärienergiaa. Jäähdytysvedet luokitellaan sekundäärivirraksi, ja hukkalämpöä ovat prosessi-ilmanvaihdon poistoilmavirrat sekä pesujärjestelmän imuvirta. Prosessi-ilmanvaihdon huuvan poistoilmaa lukuunottamatta kaikille energiavirroille on ominaista prosessin mukainen jaksollisuus. Prosessilämmön tarve yhtä huopatonnia kohti on 2,1 MWh, josta suurin osa on kuumatelojen lämmityksen vaatimaa lämpöenergiaa. Lämpötilaltaan virtaukset ovat matalan ja keskilämpötilan virtauksia.

Potentiaalisimmaksi lämmöntalteenottokohteeksi osoittautui huuvan poistoilma. Jatkuvan toiminnan ja lämpönielun olemassaolon perusteella tätä on syytä selvittää tarkemmin. Varsinkin kustannukset ja asennettava järjestelmä vaativat lisäselvitystä. Tuloilman lämmitykseen soveltuvia lämmöntalteenottojärjestelmiä ovat nestekiertoinen lämmönsiirtopiiri, suora lämmönsiirto lämmönvaihtimella tai lämpöpumppu. Lämmöntalteenoton arvioitu laskennallinen tehopotentiaali on 200 kW ja sen avulla voidaan vähentää primäärienergian käyttöä. Poistoilman likaisuus rajoittaa hieman lämmön hyödyntämistä ja vaatii ilman suodatuksen tai lämmönvaihtimien säännöllisen puhdistuksen. Lämpöpumppu tarjoaa suuremman potentiaalin vuoden ajanjaksolla monipuolisuutensa ansiosta, mutta on huomattavasti kalliimpi kuin nestekiertoinen järjestelmä.

Lämmöntalteenoton lisäksi energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa kytkentämuutoksilla ja reseptiohjausta päivittämällä. Jäähdytysvesien käyttöä voidaan tehostaa asetusarvon muutoksella tai uudelleenkierrätyksellä. Reseptiohjauksella prosessi-ilmanvaihdon toimintaa voidaan optimoida turhaa käyntiä vähentämällä. Samalla tuloilman lämmitystarve pienenee lämmityskaudella. Kokonaisuudessaan tutkimuksen pohjalta voidaan toteuttaa energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä ja lähteä selvittämään tarkemmin lämmöntalteenottojärjestelmän ominaisuuksia ja kustannusarviota.

Avainsanat: energiatehokkuus, hukkalämpö, lämmöntalteenotto, lämmönsiirto, mittalaitteet, ominaisenergiankulutus.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Tommi Sarkkinen: Energy efficiency of a press felt finishing machine
Master's Thesis
Tampere University
Environmental and Energy Engineering
June 2025

---

The industrial sector accounts for a significant share of total end-use of energy. However, a considerable portion of this energy is lost as waste heat to the environment. To mitigate climate change, it is essential to reduce waste heat through recovery and by improving the energy efficiency of industrial processes.

This study investigates opportunities to improve the energy efficiency of a press felt finishing machine at Valmet Technologies Oy. It is driven by Valmet's climate goals to reduce emissions from its operations during this decade. The energy efficiency of the finishing machine was evaluated through a measurement study. Measurements were carried out on the machine's key subprocesses which include the heating and cooling of hot rolls, the finishing system which uses process water and process ventilation. Electricity consumption was also measured. Based on the measurement data, an energy balance was created for the machine in terms of specific energy consumption. Using the measurement data and by familiarizing with the machine's operation, the energy flows related to the process were classified using a method found in the field's literature. Then the possibilities for waste heat recovery and optimization of subprocesses were evaluated. The analysis highlighted the thermodynamic properties of the energy flows and time profiles of heat sources.

The energy flows are categorized into process heat, secondary flows and exhaust flows. The process heat is essentially secondary energy. Cooling waters are classified as secondary flows while waste heat sources include the exhaust air of the process ventilation and the suction flow of the finishing system. Process heat consumption for one ton of press felt produced is 2.1 MWh which is primarily the heat energy required to heat the hot rolls. Except for the exhaust air of the process ventilation hood, all energy flows are characterized by the periodicity of the process. The temperature levels of these flows range from low to medium.

The most potential area of waste heat recovery was found to be the exhaust air of the hood. Due to its continuous flow and the availability of a heat sink, this should be further investigated especially in terms of the installed system and costs. Suitable recovery systems for preheating the supply air of the property include a run-around system, direct heat transfer or a heat pump. The estimated heat recovery potential is 200 kW, which could significantly reduce primary energy consumption. The impurity of the exhaust air slightly limits the heat recovery potential and requires air filtration and regular cleaning. A heat pump offers greater annual heat recovery potential due to its versatility but is significantly more expensive than a run-around system.

In addition to heat recovery, energy efficiency can be improved through system modifications and recipe-based control. The use of cooling water can be optimized by changing the setpoint of water temperature or by implementing water recirculation. Altered recipe control can optimize the use of process ventilation fans, reducing unnecessary usage and lowering heating demand of supply air. Based on this study, measures can be taken to improve the energy efficiency of the finishing machine and to further assess the economic feasibility of heat recovery.

Keywords: energy efficiency, waste heat, heat recovery, heat transfer, measurement instruments, specific energy consumption.

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Microsoft Copilot

Käyttötarkoitus: Tiivistelmän käännöksessä apuna käyttäminen. Kirjallisuuskatsauksen aihekokonaisuuksien rajaaminen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tiivistelmä sekä luvut 2 ja 3.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Valmet Technologies Oy:n Yrittäjänkadun toimipisteessä Tampereella. Haluan kiittää Jouni Jyväsjärveä ja Petri Naskalia ohjauksesta työn aikana. Kiitän myös A-Insinöörejä yhteistyöstä.

Kiitos yliopisto-opettaja Aleksi Sivoselle työn ohjaamisesta yliopiston puolelta. Jo kandityön aikana antamasi neuvot ovat kantaneet pitkälle. Kiitos myös apulaisprofessori Henrik Tolvaselle toisena tarkastajana toimimisesta sekä laadukkaista energiatekniikan kursseista.

Yliopistotaipaleen aikana kavereiden tuki ja railakkaat hetket opiskelijaelämää viettäen tekivät tästä ajanjaksosta ikimuistoisen. Suuri kiitos perheelleni jatkuvasta tuesta opintojen aikana.

Tampereella, 11.6.2025

Tommi Sarkkinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO ..... 1
2. TEOLLISUUDEN HUKKALÄMMÖT ..... 3
2.1 Hukkalämmön määrittely ..... 3
2.2 Teollisuuden energiankäyttö ja hukkalämmön luokittelu ..... 5
2.3 Hukkalämmön hyödyntämisen periaatteet ..... 8
2.4 Hukkalämmön tekniset hyödyntämismahdollisuudet ..... 14
2.5 Lämmönvaihtimet ..... 15
2.6 Nestekiertoiset lämmönsiirtojärjestelmät ..... 18
2.7 Lämpöpumput ..... 19
2.8 Lämpövarastot ..... 21
3. ENERGIATEHOKKUUS ..... 22
3.1 Määritelmä ..... 22
3.2 Direktiivit ja sopimukset ..... 23
3.3 Energiakatselmukset ..... 24
3.4 Energiatehokkuuden edistämistä ajavat ja rajoittavat tekijät ..... 26
3.5 Automaatio energiatehokkuuden osatekijänä ..... 27
3.6 Energiatehokkuuden mittaaminen ..... 28
4. AINEISTO JA MENETELMÄT ..... 33
4.1 Tutkimusstrategia ..... 33
4.2 Tutkimuskohde ..... 34
4.3 Kuumatelojen lämmitys ja jäähdytys ..... 35
4.4 Pesujärjestelmä ..... 37
4.5 Polymeerikäsittelyjärjestelmä ..... 38
4.6 Prosessi-ilmanvaihtojärjestelmä ..... 39
4.7 Mittaustutkimus ..... 40
4.8 Energiataseen muodostaminen ..... 43
4.9 Säästö- ja talteenottopotentiaalin arviointimenetelmät ..... 49
5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU ..... 53
5.1 Prosessi-ilmanvaihdon mittaustulokset ..... 53
5.2 Jäähdytysvesien mittaustulokset ..... 58
5.3 Prosessiveden mittaustulokset ..... 61
5.4 Sähkömittausten tulokset ..... 63
5.5 Viimeistyskoneen energiankulutus ja energiatase ..... 64
5.6 Energiavirtojen luokittelu ja lämmöntalteenoton arviointi ..... 70
5.7 Lämmöntalteenoton tekniset toteuttamismahdollisuudet ..... 71

5.8 Energiatehokkuuden parantaminen ohjausmuutoksilla ..... 75
5.9 Kytkentämuutosten mahdollisuudet ..... 78
5.10 Tulosten arviointi ja jatkotoimenpide-ehdotukset..... 80
6. JOHTOPÄÄTÖKSET ..... 84
LÄHTEET..... 87

# 1. JOHDANTO

Energiatehokkuudella ja hukkalämpöjen hyödyntämisellä on edelleen kasvava rooli ilmastonmuutoksen torjunnassa. Maailmanlaajuisesti teollisuus vastaa noin neljänneksestä kaikista $CO_2$ päästöistä ja fossiilisten polttoaineiden käyttö hallitsee yhä teollisuuden energiankulutusta (IEA 2023). Ilmastotavoitteiden saavuttaminen vaatii voimakkaampia toimia jokaisella yhteiskunnan osa-alueella.

Energiatehokkuus on suurin yksittäinen tekijä energian kysynnän hillitsemisessä vuoden 2050 nollanettotavoitteessa (IEA 2024). Euroopan unioni on asettanut energian loppukäytön osalta tavoitteeksi sen vähentämisen 11,7 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuonna 2020 tehtyihin energian loppukäytön ennusteisiin. Tällä tavoitteella on suuri merkitys energiamurroksessa, energiaomavaraisuuden kasvattamisessa sekä EU:n talouden kestävässä kasvussa. (Euroopan komissio 2023)

Hukkalämpö on lämpöenergiaa, joka päätyy hyödyntämättömänä ympäristöön. Sitä muodostuu lähes kaikilla teollisuuden aloilla. Työ- ja elinkeinoministeriön (2023) arvion mukaan Suomessa hukkalämpöä syntyy kaikki energian loppukäyttö ja toimialat huomioiden arviolta 130 TWh vuodessa. Tästä lämmöstä kaukolämpönä hyödynnetään noin 3 TWh ja kohtuullisesti hyödynnettävissä olevan hukkalämpöpotentiaalin arvioidaan olevan noin 35 TWh. Hukkalämmön määrä on taloudellisesti ja myös energiatehokkuuden kannalta merkittävä, sillä teollisuuden kokonaisenergiankulutuksesta arviolta noin 17 % karkaa hukkalämpönä ympäristöön. (Miró et al. 2015)

Tämän työn tavoitteena on selvittää toimeksiantajayrityksen, Valmet Technologies Oy:n, puristinhuovan viimeistyskoneen energiankäyttöä ja arvioida mahdollisuuksia koneen energiatehokkuuden parantamiseksi sekä hukkalämmön talteenottamiseksi. Kestävä kehitys on Valmetin strategian ja toimintojen ydin. Valmetin ilmasto-ohjelmassa on asetettu tavoitteet koko arvoketjun, sisältäen toimitusketjun ja omat toiminnot, päästöjen vähentämiseksi. Vuoteen 2030 mennessä tavoitteena on vähentää omissa toiminnoissa syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä 80 %. Valmetin toimipisteissä pääkeinoja tavoitteen saavuttamiseksi ovat fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla energiamuodoilla, hiilivapaan sähkön ja kaukolämmön ostaminen sekä energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden käyttöönotto. (Valmet 2021)

Työssä tehtävän selvityksen perustana on mittaustutkimus, jonka avulla lasketaan koneen energiatase ja tunnistetaan tehostamista vaativat energiankäytön osa-alueet. Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Mitkä ovat teollisuuden hukkalämmön hyödyntämiseen ja energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä?

2. Missä muodossa viimeistyskone käyttää energiaa?

Tutkimustehtävä: Viimeistyskoneen energiataseen muodostaminen mittaustutkimuksen perusteella.

3. Millaisia energiankäyttöön liittyviä säätöjä ja asetuksia koneen automaatiojärjestelmä sisältää?

4. Miten energiatehokkuutta voisi parantaa energiavirtoja hyödyntämällä?

Luvussa 2 tarkastellaan teollisuuden hukkalämmön luokittelua ja esitellään menetelmiä hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksien arviointiin. Lisäksi tuodaan esille teknisiä ratkaisuja hukkalämmön hyödyntämiseen. Luvussa 3 käsitellään energiatehokkuutta, siihen liittyviä säännöksiä ja energiatehokkuuden selvittämisessä hyödyllisiä mittausinstrumentteja. Luvuissa 2 ja 3 vastataan tutkimuskysymykseen 1. Tutkimuksessa käytetyt aineistot, tutkimuskohde ja tutkimusmenetelmät kuvataan tarkemmin luvussa 4. Tässä luvussa vastataan viimeistyskoneen toiminnan kuvaamisen myötä osittain tutkimuskysymyksiin 2 ja 3. Luvussa 5 esitellään aluksi mittaustutkimuksen tulokset ja vastataan lopullisesti tutkimuskysymykseen 2 energiavirtojen luokittelun myötä. Mittaustulosten perusteella laskettu viimeistyskoneen energiatase esitetään myös tässä luvussa täyttäen tutkimustehtävän tavoitteen. Luvun 5 lopussa tarkastellaan mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseksi koneen automaatiojärjestelmän ohjauksia muuttamalla, jolloin saadaan vastaus tutkimuskysymykseen 3. Tulokset-luvun lopussa esitellään teknisiä mahdollisuuksia hukkalämmön hyödyntämiseksi vastaten tutkimuskysymykseen 4. Ennen johtopäätöksiä muodostetaan koostetut jatkotoimenpide-ehdotukset tutkimuksen pohjalta tehtyjen havaintojen täydentämiseksi ja viimeistyskoneen energiatehokkuuden parantamiseksi.

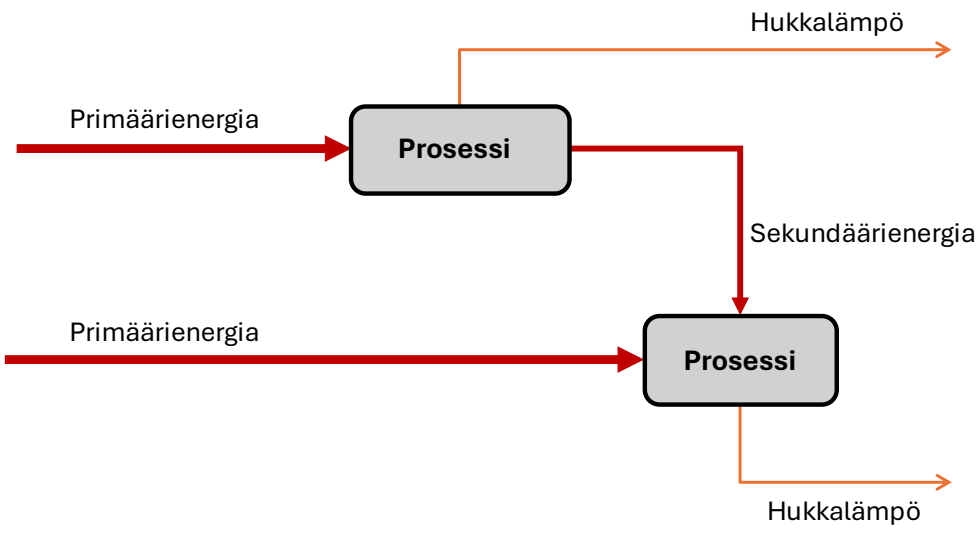
# 2. TEOLLISUUDEN HUKKALÄMMÖT

Tässä luvussa perehdytään teollisuuden hukkalämpöihin kirjallisuuskatsauksen muodossa. Aluksi esitellään hukkalämmön määritelmä, josta edetään kohti hukkalämpövirtojen luokittelun ja hyödyntämisen arvioinnin periaatteita. Lopuksi esitellään hukkalämmön talteenotossa käytettäviä teknologioita.

## 2.1 Hukkalämmön määrittely

Hukkalämpö on hyvin yleinen termi, jolla ei ole muodollista määritelmää. Yleisesti hukkalämmöllä tai ylijäämälämmöllä tarkoitetaan prosessista ulostulevien virtausten sisältämää energiaa, jota ei saada käytännöllisesti hyödynnettyä. Se voi olla vältettävissä olevaa hukkalämpöä, joka on peräisin optimoimattomasta prosessista tai välttämätöntä ylijäämää optimoiduista prosesseista. (Motiva 2019) Hukkalämpöä lähellä olevia termejä ovat matalalaatuinen lämpö ja energia- tai lämpöhäviöt, joista hukkalämpö on usein osa jälkimmäisenä mainittua (Turek et al. 2024).

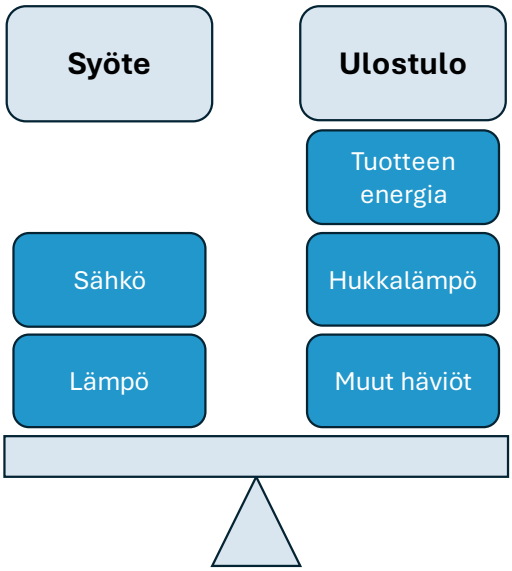
Teollisessa tuotannossa muodostuvasta lämmöstä osa on mahdollista hyödyntää tai ottaa talteen. Usein hukkalämpöä ei hyödynnetä ja se johdetaan jäähdytysvesien tai poistoilman mukana ympäristöön. Ylijäämälämmön muodostumista energiavirtojen ja prosessien ketjussa on esitetty kuvassa 2.1.




***Kuva 2.1.*** *Yksinkertainen kuvaus hukkalämmön muodostumisesta prosessitasolla. Perustuu lähteeseen (Motiva 2019).*

Primäärienergia on jalostamatonta energiaa, kuten esimerkiksi hiili ja vesivoima. Tästä energiasta jalostuu erilaisissa prosesseissa sekundäärienergiaa, kuten sähköä. Sekundäärienergia on teollisuudessa usein myös prosesseista talteenotettua lämpöä, jota hyödynnetään jatkoprosesseissa. Ylijäämälämpöä muodostuu etenkin prosessiteollisuudessa sekä energiateollisuudessa primääri- ja sekundäärienergiasta hyödyntämättä jäävänä osuutena, jota syntyy väistämättä. Oleellisia hukkalämpöön liittyviä ominaisuuksia ovat lämmön lähde, määrä sekä hyödynnettävyys. Hyödynnettävyydessä täytyy huomioida lämmönlähteeseen liittyvät rajoitteet ja vaatimukset. (Heikkilä & Kiuru 2014)

Yksikköprosessitarkastelu mahdollistaa teollisuuden prosessien energiankäytön yksityiskohtaisen arvioinnin. Yksikköprosessit voidaan ajatella varsinaisen tuotantoprosessin osiksi, joissa kussakin on energiaa kuluttavia komponentteja ja poistovirtoja. (Fresner et al. 2017) Prosessin energiataseen yksinkertainen malli on esitetty kuvassa 2.2.

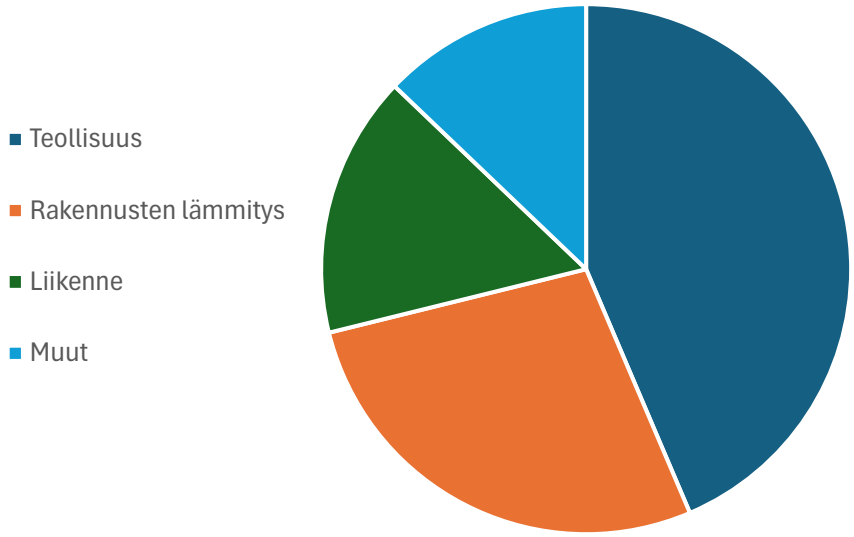



***Kuva 2.2.*** *Yksikköprosessin yksinkertainen energiatasemalli, jossa huomioidaan energiankäyttö ja poistovirrat. Muokattu lähteestä (Fresner et al. 2017).*

Yksittäisen prosessin energiataseen määrittäminen on tärkeää hukkalämpöjen tunnistamisessa. Kun prosessin ja siinä toimivien komponenttien kuluttama energia sekä käyntitunnit ovat tiedossa, voidaan analysoida primäärienergian jakaantumista sekundäärienergiaksi ja energiahäviöiksi.

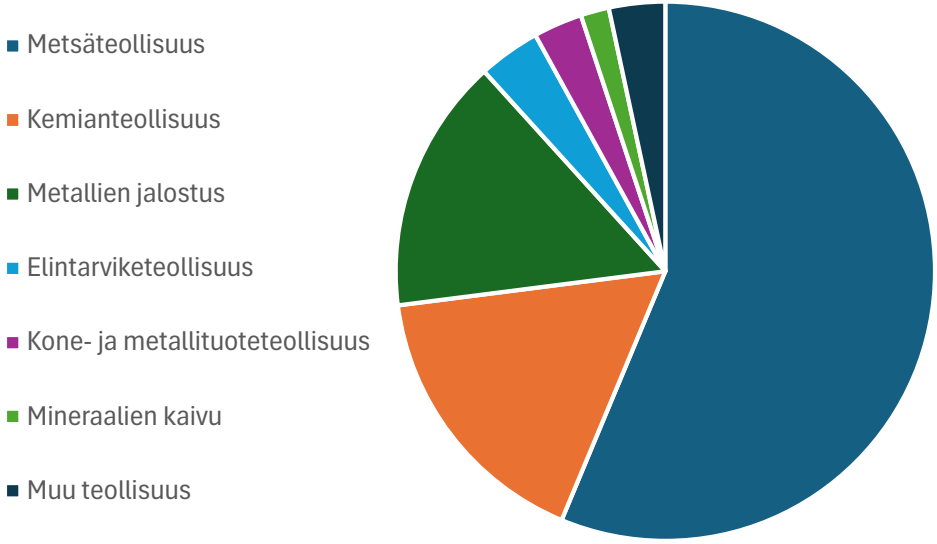
## 2.2 Teollisuuden energiankäyttö ja hukkalämmön luokittelu

Energian loppukäyttö oli vuonna 2023 yhteensä 280,3 TWh. Loppukäyttö tarkoittaa energiaa, joka jää yritysten, kotitalouksien ja muiden kuluttajien käyttöön siirto- ja muuntohäviöiden jälkeen. Se sisältää sähkön, kaukolämmön, lämmityspolttoaineiden, liikennepolttoaineiden sekä teollisuuden prosessipolttoaineiden kulutuksen. (Tilastokeskus 2024) Eri sektoreiden energian loppukulutusten osuudet on esitetty kuvassa 2.3.




***Kuva 2.3.*** *Suomen energian loppukulutus sektoreittain vuonna 2023. Tiedot lähteestä (Tilastokeskus 2024).*

Kuten kuvasta 2.3 nähdään, teollisuuden osuus energian loppukulutuksesta on selvästi suurin, noin 44 %. Osuus vastaa 122,3 TWh energian kulutusta. Myös rakennusten lämmitykseen kuluu merkittävä osuus, noin 28 % energian loppukulutuksesta. Teollisuuden toimialoista suurimmat energiankäyttäjät ovat energiaintensiiviset ja suuria tuotantolaitoksia sekä useita prosesseja vaativat alat. Energiankäytön jakaantuminen teollisuudessa toimialoittain on esitetty kuvassa 2.4.




***Kuva 2.4.*** *Suomen teollisuuden energiankäyttö toimialoittain vuonna 2023. Tiedot lähteestä (Tilastokeskus 2024).*

Metsäteollisuus vastaa suurimmasta osasta Suomen teollisuuden energiankäytöstä. Seuraavaksi suurimmat energiankäyttäjät ovat kemianteollisuus ja metallien jalostus. Kaikki kolme edellä mainittua toimialaa hyödyntävät korkean lämpötilan prosesseja, jotka käyttävät paljon primäärienergiaa. Kuvan 2.4 muun teollisuuden kokonaisuuteen sisältyy tekstiili- ja vaateteollisuus, elektroniikka- ja sähköteollisuus sekä muu tehdasteollisuus.

Hukkalämpöjen talteenotto parantaa tuotantolaitoksen tai -koneen energiatehokkuutta sekä vähentää prosessien kasvihuonekaasupäästöjä. Teollisuudessa hyödynnettävissä olevaa lämpöä on löydettävissä prosesseihin liittyvissä vesi- ja ilmavirroissa. (Motiva 2019) Ylijäämälämpö jaetaan matalalämpöiseen, keskilämpöiseen ja korkealämpöiseen hukkalämpöön taulukon 2.1 mukaisesti.

***Taulukko 2.1.*** *Ylijäämälämmön jaottelu lämpötilatasoittain. Perustuu lähteeseen (Motiva 2019).*

| Lämpötilataso | | Lämmön lähteet |
|---|---|---|
| <50°C | Matalalämpöinen | - Prosessien jäähdytysvedet<br>- Prosessien poistoilmat<br>- Koneellisen jäähdytyksen poistoilma |
| 50-100°C | Keskilämpöinen | - Prosessien jäähdytysvedet<br>- Öljyvoideltujen kompressorien jäähdytys |
| >100 °C | Korkealämpöinen | - Savukaasut<br>- Prosessiuunien poistokaasut |

Eri lämpötilatasoihin jaottelusta löytyy kirjallisuudesta hieman vaihtelevuutta. Esimerkiksi Forman *et al.* (2016) jaottelevat hukkalämmön seuraavalla tavalla: alle 100 °C, 100–299 °C ja yli 300 °C. Norjalainen valtionyhtiö Enova puolestaan jaottelee lämpötilatasot tutkimuksessaan tiheämmin, ja Law *et al.* (2013) määrittelevät matalalämpöisen hukkalämmön olevan ympäristön lämpötilan ja 230 °C lämpötilan välillä. Pehnt *et al.* (2011) muodostivat teollisuuden hukkalämpöjä ja energiatehokkuutta tutkiessaan Motivan esiselvitystä vastaavan luokittelun. Edellä mainitut tutkimukset ovat keskittyneet hieman eri toimialojen tarkasteluun, ja toimialojen erityispiirteet sekä hukkalämmön laatu vaikuttavat jaottelun muodostamiseen.

Hukkalämpöjen osuus eri lämpötilatasoilla vaihtelee teollisuudenalasta ja kirjallisuuslähteestä riippuen. Firth *et al.* (2019) analyysin mukaan maailmanlaajuisesti kaikesta käytetystä primäärienergiasta 49–53 % vapautuu hukkalämpönä ja teollisuus kokonaisuudessaan vastaa noin 15 % tästä määrästä. Kokonaismäärästä termodynaamisesti hyödynnettävissä on arvioitu olevan 10–12 % johtuen lämpötilatasoista ja Carnot-hyötysuhteen mukaisesta rajallisesta hyödynnettävyydestä. Saman analyysin mukaan noin 65 % vapautuvasta hukkalämmöstä on alle 100 °C matalalämpöistä hukkalämpöä, ja tästä osuudesta vain pieni osa sisältyy hyödynnettävissä olevaan potentiaaliin. Suurin osa hyödynnettävissä olevasta ylijäämälämmöstä on prosesseissa, joiden lämpötilaväli on 100–300 °C. Keski- ja korkealämpötilainen hukkalämpö on enemmän keskittynyttä ja täten käytännöllisemmin hyödynnettävissä.

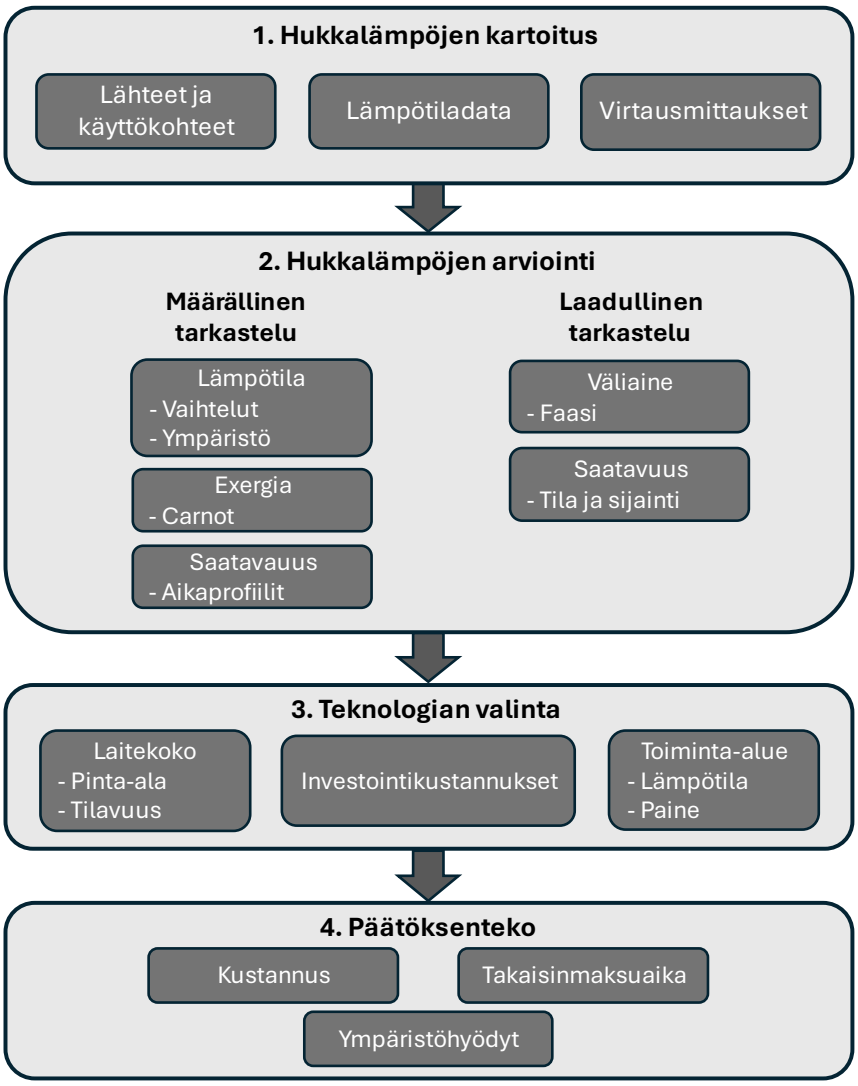
Kirjallisuudessa on arvioitu Euroopan valtioiden teollisuuden hukkalämmön määriä. Papapetrou *et al.* (2018) tutkivat Yhdistyneiden kuningaskuntien teollisuuden energiankäyttöä ja hukkalämpöjen määrää ja muodostivat vuosien 2000–2003

tilastotiedon perusteella skaalatun arvion vuoden 2015 maakohtaisesta energiankäytöstä. Tämän arvion mukaan Euroopan teollisuudessa syntyi hukkalämpöä noin 304 TWh vuodessa, mikä on 9,5 % teollisuuden kokonaisenergiankulutuksesta. Tästä energiasta noin kolmannes sisältyy lämpötilavälille 100–200 °C ja neljännes lämpötilavälille 200–500 °C. Erittäin korkean lämpötilan, yli 500 °C hukkalämpöä on energiamäärällisesti eniten, ja sitä syntyy pääasiassa teräs- ja kemianteollisuudessa. Tämän lämpötilavälin suuri hukkalämpö selittyy suurella lämpötilaerolla prosessin ja ympäristön välillä, mikä aiheuttaa suuria lämpöhäviöitä. Lisäksi itse tuotteisiin sitoutuu paljon lämpöä, joka vapautuu ympäristöön tuotteiden jäähtyessä. Erittäin korkeassa lämpötilassa olevan hukkalämmön hyödyntäminen on kuitenkin haastavaa. Merkittävästi erilaiseen osuusjaotteluun on päädytty muissa tutkimuksissa. Pehnt *et al.* (2011) esittivät, että 51 % Euroopan teollisuuden hukkalämmöistä kuuluu alle 100 °C lämpötilaan ja Bianchi *et al.* (2019) arvion mukaan jopa 82 % sisältyy alle 60 °C lämpötilatasolle. Suuri osa arvioista perustuu energiankäytön lukemiin ja tietyin painotuksin muodostettuihin ennustemalleihin, mikä aiheuttaa tuloksissa vaihtelua.

Johdannossa mainitusta Suomen teollisuuden hukkalämmön määrästä on löydettävissä hieman poikkeavia arvoja. Miró *et al.* (2015) arvion mukaan Suomen teollisuudessa hukkalämmöksi menee noin 16 % teollisuuden energian loppukäytöstä. Vaikka tutkimus on suoritettu vuonna 2015, voidaan tämänhetkistä osuutta pitää lähes yhtä suurena. Kokonaisuudessaan arvioitua hukkalämpöpotentiaalia ei kuitenkaan voida täysin hyödyntää, ja hyödynnettävissä oleva potentiaali on merkittävästi alhaisempi.

## 2.3 Hukkalämmön hyödyntämisen periaatteet

Teollisuuden hukkalämpömäärien ollessa merkittäviä, täytyy hyödyntämisen periaatteet tunnistaa ja arvioida. Hyödyntämisen arvioinnille ja päätöksenteolle on määritetty kirjallisuudessa johdonmukaisia vaiheita, joista yksi kokonaisuus on esitetty kuvassa 2.5.




***Kuva 2.5.*** *Hukkalämpöjen kartoituksen menetelmä vaiheittain. Muokattu lähteestä (Woolley et al. 2018).*

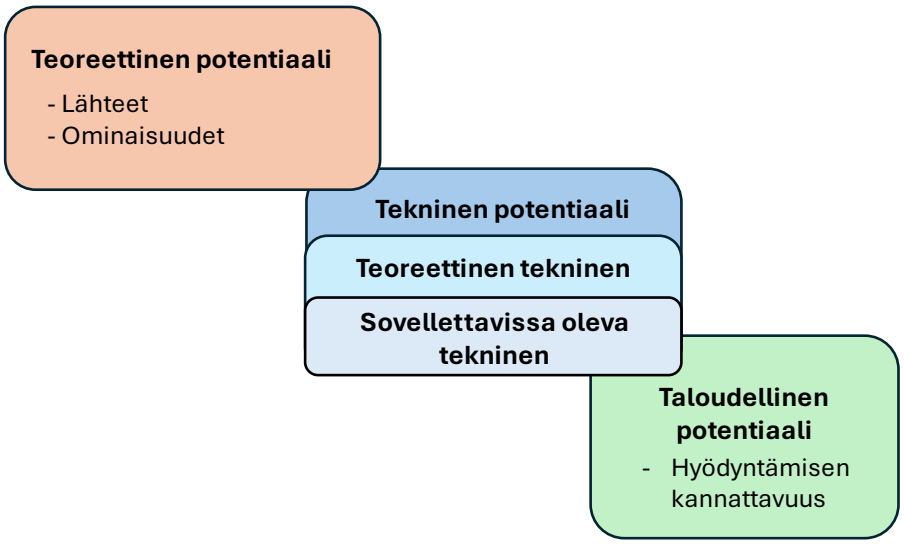
Päätöksenteon kaava etenee kartoituksen yhteydessä suoritettavista mittauksista ja datan keräämisestä hukkalämpöjen laadulliseen ja määrälliseen arviointiin, minkä perusteella voidaan valita käyttötarkoitukseen sopiva teknologia. Lopussa itse päätöksenteko tapahtuu teknologian valinnan jälkeen kustannustarkastelun ja ympäristöhyötyjen, kuten päästövähennyksen, arvioinnin avulla.

Hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuudet riippuvat useista eri fysikaalisista ominaisuuksista. Näitä ovat lämmönlähteen lämpötilataso, lämpöteho, hukkalämpövirran väliaine ja sen kemialliset ominaisuudet sekä puhtaus. Väliaineessa on huomioitava sen faasi, eli se onko lämpöenergia sisältyneenä nesteeseen vai kaasuun. Myös lämmönsiirron muodolla on suuri vaikutus hukkalämmön hyödynnettävyyteen. Lämmönsiirron muotoja ovat johtuminen, konvektio ja säteily. Jokainen edellä mainituista tekijöistä on tunnistettava, jotta saadaan arvioitua

lämpökohteen käytännön hyödyntämismahdollisuus sekä kannattavuus. Arviointi täytyy suorittaa jokaiselle ylijäämälämpökohteelle erikseen. (Heikkilä & Kiuru 2014)

Kvantitatiivinen hukkalämmön tarkastelu sisältää termodynaamisen, tehokkuusperustaisen ja kertoimiin perustuvan menetelmän. Termodynaamisen analyysin tuloksena saadaan tiettyjen lämpövirtojen entalpiat. Tehokkuusperustainen analyysi selvittää teknologioiden ja prosessien keskimääräisiä hyötysuhteita ja arvioi mahdolliset energiasäästöt päivitettäessä eri teknologiaan. Kertoimiin perustuvassa analyysissä muodostetaan helposti mitattavia kertoimia, joilla prosessien tai osaprosessien hukkalämpöä verrataan esimerkiksi energian kokonaiskäyttöön tai hiilidioksidipäästöihin. (Woolley et al. 2018)

Fysikaalisten ominaisuuksien lisäksi hyödyntämisen arvioinnissa on huomioitava tekninen potentiaali ja taloudellisen kannattavuuden potentiaali (Bianchi et al. 2019). Eri hukkalämpöjen hyödyntämisen arvioinnin osa-alueet on esitetty kuvassa 2.6.




***Kuva 2.6.*** *Hukkalämmön hyödyntämisen potentiaalit. Perustuu lähteeseen (Bianchi et al. 2019).*

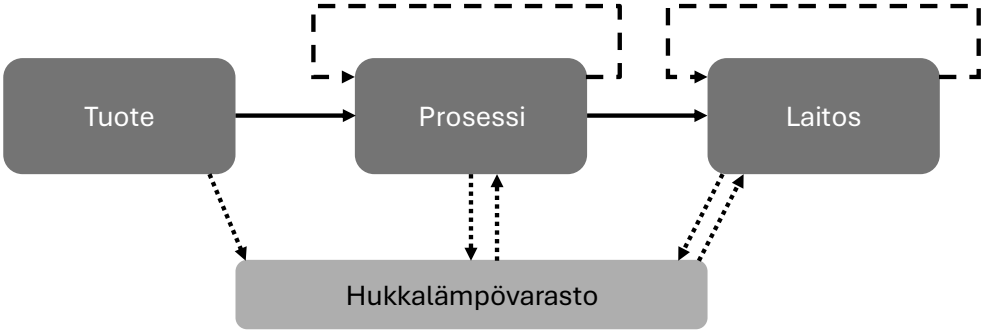
Arvioinnin osa-alueet muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden. Teoreettinen potentiaali huomioi lämmönlähteen edellä mainitut fysikaaliset ominaisuudet ja kertoo termodynaamisesti hyödynnettävissä olevan hukkalämmön. Lämmönlähteen ominaisuuksilla on rajoitteita. Ylijäämälämmönlähteen lämpötilan on oltava lämpönielun lämpötilaa korkeampi. Yleisesti matalamman lämpötilan hukkalämpöä on vaikeampi hyödyntää teknisesti. Teoreettiseen potentiaaliin liittyy myös lämmönlähteiden tunnistaminen ja niiden lämpötehojen sekä aikasarjan selvittäminen. (Bianchi et al. 2019)

Tekninen hyödyntämispotentiaali kuvaa hukkalämmön teknisen talteenoton kannattavuutta ja sen arvioinnissa osa-alueita ovat olemassa olevat teknologiat sekä teknologioihin sisältyvät rajoitteet. Käytettävän teknologian rajaamisessa olennaista on tarkastella sen soveltuvuutta käyttökohteeseen. Mikäli teoreettinen ja tekninen potentiaali on tunnistettu, hyödyntämisen arvioinnin viimeisenä vaiheena on lämmön hyödyntämisen taloudellisen kannattavuuden ja lämmön hyödyntämisestä saatavien hyötyjen arviointi. Tähän sisältyy energian hintojen vertailu ja kustannussäästöt sekä teknologian investointikustannusten laskeminen. (Brückner et al. 2015) Taloudellisella tekijällä on hukkalämpöjen hyödyntämisasteeseen suurin vaikutus, ja kustannusten takia kokonaisvaltainen teoreettinen tai tekninenkin potentiaali jää yleensä hyödyntämättä (Firth et al. 2019).

Mikäli ylijäämälämpövirroista tunnistetaan hyödyntämispotentiaalia mutta sen hyödyntäminen todetaan teknisesti tai taloudellisesti kannattamattomaksi, on järkevää selvittää mahdollisuus prosessimuutoksiin. Pienetkin lämpötilatasoihin liittyvät prosessimuutokset voivat parantaa kannattavuutta ja vähentää toiminnan kustannuksia. Hukkalämmön lämpötilatason nosto prosessikytkentämuutoksen avulla saattaa jopa muuttaa sen hyödyntämisen taloudellisesti kannattavaksi. (Heikkilä & Kiuru 2014)

Toiminnoissa syntynyttä hukkalämpöä voidaan hyödyntää eri tavoin ja sen hyödyntäminen vaatii sopivien käyttökohteiden löytämistä. Käyttökohteita kannattaa etsiä tuotantolaitoksen pää- tai sivuprosesseista siten, että ylijäämälämpöä hyödynnetään mahdollisimman lähellä syntypaikkaansa. Tämä takaa hukkalämmön kohdistamisen tehokkaasti toimijan omien tuotteiden valmistukseen kohtuullisin investointikustannuksin. (Motiva 2019)

Potentiaalisia hukkalämpönieluja selvitettäessä tuotteen, prosessin ja tuotantolaitoksen muodostama kolmen tekijän malli on hyödyllinen näkökulma. Tässä näkökulmassa etsitään hukkalämmön käyttökohteita ja lämpövirtoja tasoittain ja arvioidaan tasokohtaisesti mahdollisuuksia hyödyntää lämpövirtoja. (Woolley et al. 2018) Kolmen tekijän periaate on havainnollistettu kuvassa 2.7.




***Kuva 2.7.*** *Kolmen osatekijän malli hukkälämpöjen hallinnan suunnitteluun. Muokattu lähteestä (Woolley et al. 2018).*

Kaavion mukaisella menetelmällä otetaan huomioon tuotteesta saatavan lämmön potentiaali, prosessien hukkalämmöt ja niiden käyttäminen prosesseissa. Laitoksen tasolla arvioidaan aiempien tasojen synnyttämien hukkalämpöjen hyödyntäminen koko toiminta-alueella. Menetelmässä huomioidaan myös laitostoiminnoissa syntyvä ylijäämälämpö. Lisäksi jokaisella tasolla tavoitellaan lämmön varastointia, jolloin se on myöhemmin hyödynnettävissä koko toiminnan varsinaisella valmistavalla tasolla. (Woolley et al. 2018)

Lämmön lähteen ja kulutuksen aikaprofiilit ovat hyödyntämismahdollisuuksien perusta. Hukkalämpöpotentiaalien, lämpövirtojen ja niiden laadun arvioinnista saatavalla tiedolla voidaan muodostaa lähteen ja hyödyntämiskohteen lämpötila- ja aikaprofiilit. Näiden selvittämiseksi tarvitaan ymmärrys prosessin toiminnasta, prosessien kokonaisuudesta ja lämpötilatasoista. (Law et al. 2013)

Aikasarjan muodostaminen seuraa osittain kuvassa 2.7 esiteltyä kolmen tekijän mallia. Prosessin tasolla tarkastelun ajallinen tarkkuus on minuuttien tai tuntien luokkaa, kun taas laitoskokonaisuus tarvitsee vuositasoisen tarkastelun. Lähteen ja kulutuksen aikasarjojen vertailusta saadaan helposti tietoa näiden yhteensopivuudesta ja siitä, vaatiiko järjestelmä lämmön varastointia. Lisäksi lämpötilan profiilikuvaajista voidaan tunnistaa yhteneväisiä lämpötilatasoja ja näin valita alustavasti kohteeseen sopivaa teknologiaa hukkalämpöjen hyödyntämiseen. (Pehnt et al. 2011)

Hyödyntämiskohteet jaotellaan tyypillisesti taloudellisen kannattavuuden ja teknisten mahdollisuuksien huomioimassa järjestyksessä. Yleinen hyödyntämiskohteiden hierarkia on teollisuuskohteen sisäiset hyödyntämiskohteet sekundäärienergiana, kohteen ulkopuoliset hyödyntämismahdollisuudet sekä lämmön muuttaminen sähköksi. (Motiva 2019)

Teollisuuskohteen sisäisen hukkalämmön hyödyntämisen tavoitteena on vähentää tai korvata primäärienergian käyttöä. Käytännön mahdollisuudet kohteen sisäiseen hyödyntämiseen riippuvat ylijäämälämpövirtojen määrästä, tehosta ja muista aiemmin tässä luvussa mainituista ominaisuuksista. Sisäinen hukkalämpöjen hyödyntäminen on kannattavaa, kun primäärienergian hinta on korkea, käyttöaika on pitkä ja investointikustannus pieni. (Motiva 2019)

Ylijäämälämpöä voidaan hyödyntää kohteen sisäisesti tuotantoprosesseissa. Tämä vaatii teknisiä ratkaisuja. Yksinkertaisin tapa on kytkentämuutos ja muita ratkaisuja ovat lämpöpumput, termokompressorit ja komprimointi. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää teollisuuskohteen prosesseissa myös raaka-aineen tai polttoaineen kuivattamiseen. Yleisesti sisäisen hyödyntämisen kohdistaminen prosesseihin takaa pisimmän hyödyntämisajan sekä parhaimman ajallisen vasteen. (Motiva 2019)

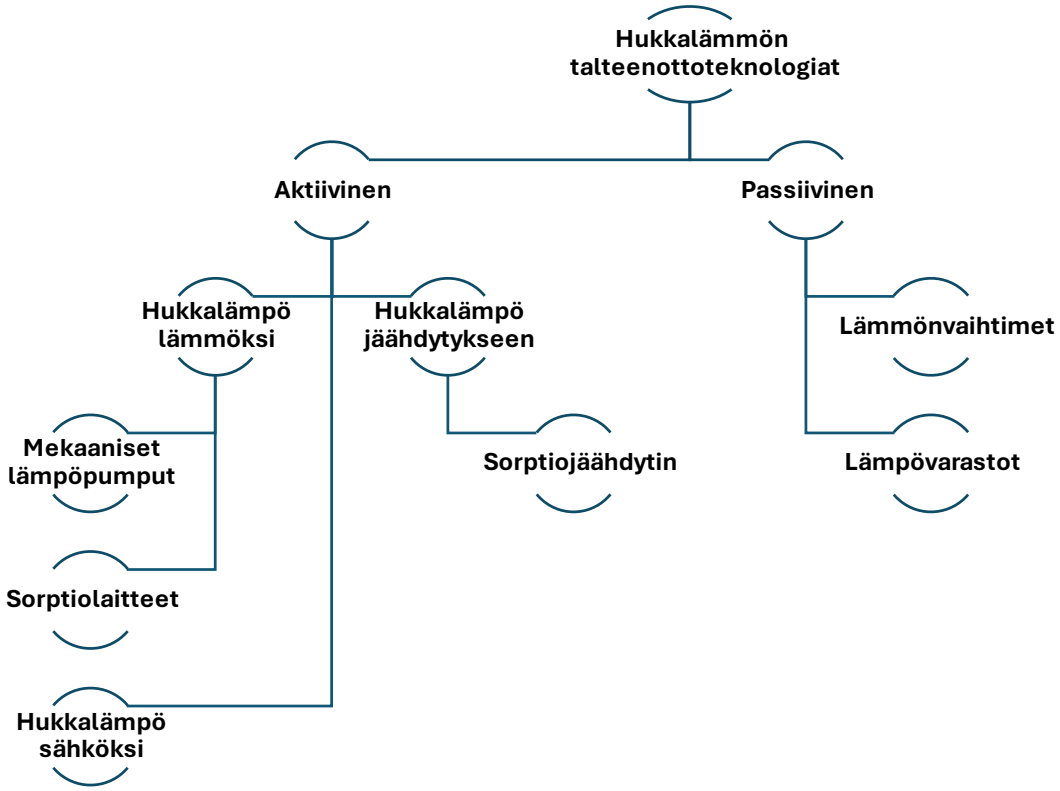
Toinen kohteen sisäisen hyödyntämisen kohde hukkalämmöille on kiinteistön lämmitys. Tämä tapahtuu yleisesti nestekiertoisen järjestelmän avulla. Hukkalämmön siirtäminen lämmitysverkkoon tapahtuu lämpötilatasosta riippuen lämmönvaihtimien ja lämpöpumppujen avulla suoraan virtauksesta toiseen. Lämpöpumppu mahdollistaa lämpötilatason nostamisen hyödyntämiskohteen vaatimalle tasolle. Ilman lämpöpumppua tapahtuvassa suorassa hukkalämmön hyödyntämisessä lämmön käyttökohteen täytyy olla alemmassa lämpötilatasossa. Kiinteistön lämmitys hukkalämmön avulla on helppo toteuttaa, mutta ulkolämpötilariippuvuus rajoittaa hyödyntämisaikaa lämmityskauteen. Lämmityksen lisäksi hukkalämpöjä voidaan hyödyntää kiinteistön sisäisiin jäähdytystarpeisiin. (Motiva 2019)

Kohteen ulkopuolisiin hyödyntämismahdollisuuksiin lukeutuu lämmön myynti paikalliselle energiayhtiölle kaukolämpönä tai lähialueen yrityksille. Tällainen on yleisempää suurissa teollisuuspuistoissa ja -keskittymissä. Esimerkiksi prosessikaasuja voidaan myydä toiselle toimijalle energiantuotantotarkoitukseen tai prosessien käyttöön. Ulkopuoliseen myyntiin liittyviä haasteita ovat myyvän osapuolen lämmönlähteiden huipputeho, pysyvyys sekä toimitusvarmuus ja ostajan vastaanottokyky, lämmöntarve ja prosessien vaatimukset pysyvyyden ja lämpötilan suhteen. Teollisuuskohteissa, joissa hukkalämpövirtojen lämpöteho on pieni ja vaihtelevuus suurta, ei ulkopuolelle myyminen ole yleensä vaihtoehto. (Maaskola & Kataikko 2014)

## 2.4 Hukkalämmön tekniset hyödyntämismahdollisuudet

Osa hukkalämmön teknisen potentiaalin tarkastelua ja hyödyntämisen päätöksentekoa on teknologioiden arviointi. Talteenottoteknologioiden tarkoituksena on vähentää energiankäyttöä sekä tuottaa hyödyllistä energiaa. Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämisteknologiat jaotellaan aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. Jaottelu perustuu lämmön käyttöön. Passiivisen menetelmän teknologiat kierrättävät lämpöä samalla tai alemmalla lämpötilatasolla. Aktiiviset menetelmät joko nostavat hukkalämmön lämpötilaa tai muuttavat lämpöenergian eri energiamuodossa hyödynnettäväksi ja samalla kuluttavat energiaa. (Jouhara et al. 2018)

Hukkalämmön hyödyntämisessä käytettävät teknologiat voidaan jaotella passiivisten ja aktiivisten menetelmien lisäksi hukkalämmön hyödyntämiseen lämpönä lämmönsiirtoteknologioilla sekä lämmön hyödyntämiseen sähköntuotannossa. Lämpönä hyödyntämiseen soveltuvia teknologioita ovat lämmönvaihtimet ja lämpöpumput, sähköä voidaan tuottaa termodynaamisilla sykleillä. (Pehnt et al. 2011) Eri lämmön talteenottoteknologiat on koostettu kuvassa 2.8.




***Kuva 2.8.*** *Hukkalämmön hyödyntämisessä käytettävien teknologioiden jaottelu. Perustuu lähteeseen (Brückner et al. 2015).*

Teknologian valintakriteereitä ovat aiemmin esitellyt lämmönlähteen ominaisuudet, kuten lämmönsiirron väliaine ja lämpötilatasot. Jos lämpötilatasolle soveltuu useampi teknologia, niiden vertailu tapahtuu soveltuvuuden ja investointikustannusten pohjalta. Yleisesti talteenotto- tai hyödyntämisjärjestelmän takaisinmaksuajan on oltava alle viisi vuotta. (Law et al. 2016)

Tässä luvussa syvennytään matalan ja keskitason hukkalämpöjen hyödyntämisen mahdollisuuksiin. Alle 50 °C lämpötilassa olevien lämpövirtojen hyödyntämiseen soveltuu lämmönvaihtimilla tapahtuva lämmön siirto sekä mekaaniset lämpöpumput. Yli 50 °C ja alle 100 °C lämpötiloihin sopiva tekniikka on lämmönvaihtimien ja mekaanisten lämpöpumppujen lisäksi absorptiolämpöpumput. (Heikkilä & Kiuru 2014)

## 2.5 Lämmönvaihtimet

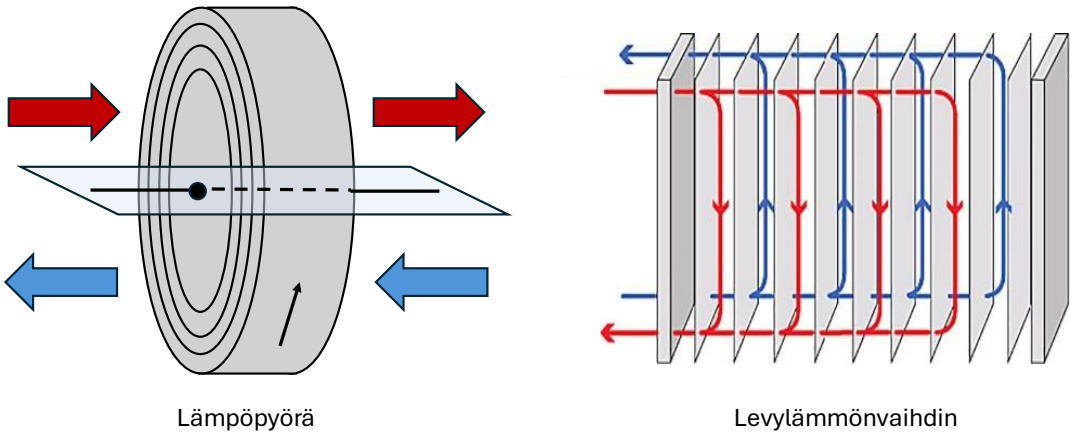
Yksi yleisimmistä hukkalämmön hyödyntämisessä käytetyistä teknologioista ovat lämmönvaihtimet. Lämmönvaihdin on laite, jossa lämpöenergiaa siirtyy kahden eri lämpötilassa olevan fluidivirtauksen välillä. Lämmönvaihtimilla lämpöä voidaan siirtää suoraan prosessin sisäisesti tai esimerkiksi kiinteistön lämmitystarpeisiin. Tämä tapa on passiivinen ja soveltuu monipuolisesti erityyppisiin kohteisiin. Lisäksi lämmönvaihtimet ovat hyvin laajasti kaupallisesti saatavilla olevaa teknologiaa. Lämmönvaihdintyyppejä on erilaisia ja ne soveltuvat eri faaseille sekä eri toimintalämpötiloihin.

Lämmönvaihtimet voidaan luokitella rakenteen, lämmönsiirtomekanismien ja virtausgeometrian mukaan. Lämmönsiirtoon osallistuvat fluidit ovat yleensä lämmönvaihtimessa yhtä aikaa kierrossa väliseinällä erotettuna, jolloin puhutaan rekuperatiivisesta vaihtimesta. Regeneroivassa vaihtimessa lämmönsiirtopintoina käytetään väliseinämien sijaan lämpöä varaavia komponentteja. Virtausgeometrian mukaan lämmönvaihtimet voidaan jaotella vasta- ja myötävirtalämmönvaihtimiin. (Kakac & Liu 2002)

Yksinkertaisin lämmönvaihdin on kaksoisputkivaihdin. Se koostuu kahdesta sisäkkäisestä putkesta, joissa toinen fluidi kulkee sisemmässä putkessa ja toinen kahden putken välisessä tilassa. Lämpö siirtyy fluidista toiseen sisemmän putken seinämän läpi. Vastakkaisilla virtaussuunnilla saavutetaan tehokkaampi lämmönsiirto. (Shah & Sekulic 2003)

Kaasu-kaasu lämmönvaihtimet hyödyntävät tuntuvaa lämpöä ja latenttilämpöä. Ne soveltuvat esimerkiksi kuivauskäyttöön, kun savukaasuilla tai poistoilmavirralla lämmitetään kuivausilmaa. Kaasufaasivirtauksiin sopii lämpöpyörä tai levylämmönvaihdin. Lämpöpyörä eli pyörivä regeneraattori on tyypillinen ratkaisu

voimalaitosten palamisilman esilämmityksessä ja siinä kaksi virtausta kulkee hitaasti pyörivän huokoisen levyn läpi. Se sopii hyvin myös ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon, jolloin poistoilmalla lämmitetään tuloilmaa (Mardiana-Idayu & Riffat 2012). Ilmanvaihdon sovelluksiin pyörivä levy sopii vain, jos ilmavirtojen sekoittuminen on sallittua. Pyörivä levy vastaanottaa lämpöä kuumemmasta virrasta ja luovuttaa lämpöä kylmempään virtaukseen pyöriessään. Tässä vaihdintyypissä tapahtuu virtojen välistä vuotoa, mikä vaikuttaa vaihdintyypin valintaan tietyissä prosesseissa. (Law et al. 2016) Pyörivän regeneratiivisen lämmönvaihtimen lämmönsiirron hyötysuhde on korkea, jopa 80 % (Mardiana-Idayu & Riffat 2012). Lämpöpyörän rakenne on havainnollistettu kuvassa 2.9.




***Kuva 2.9.*** *Lämpöpyörän ja levylämmönvaihtimen toimintaperiaate. Perustuu lähteisiin Mardiana & Riffat (2012) ja Jouhara et al. (2018).*

Levylämmönvaihtimet voivat olla sekä myötä- että vastavirtaa hyödyntäviä ja ne ovat yleisiä prosessiteollisuudessa kohteissa, joissa fluidivirtausten sekoittuminen ei ole sallittua. Ne soveltuvat myös ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmiin ja likaisille poistoilmavirroille (Mardiana-Idayu & Riffat 2012). Levylämmönvaihdin koostuu useista ohuista metallilevyistä, jotka on pinottu, juotettu tai hitsattu yhtenäiseksi rakenteeksi. Metallilevyihin on painettu kuviointi turbulenssin virtauksen aikaansaamiseksi ja lämmönsiirron tehostamiseksi. Kuuma ja kylmä fluidivirtaus kulkevat levylämmönvaihtimessa eri levyväleissä kuvan 2.9 mukaisesti. Lämpö siirtyy levyjen välityksellä. Levyvaihtimissa on korkea lämmönsiirtokerroin, suuri lämmönsiirtopinta-ala yksikkökokoa kohti sekä mahdollisuus kapasiteetin muuttamiseen levyjen määrää muuttamalla pinotussa levylämmönvaihtimessa. (Jouhara et al. 2018) Levylämmönvaihtimilla saavutetaan suhteellisen korkea lämmönsiirron hyötysuhde, noin 50–80 % (Farhat et al. 2022).

Kaasu-nestevaihtimet soveltuvat nesteiden lämmitykseen jäteilmavirtojen avulla. Yleinen kaasu- ja nestevirtauksia käyttävä lämmönvaihdin on ekonomaiser, jotka ovat laajasti käytössä voimalaitoksissa sekä teollisuudessa. Ekonomaiserin käyttöä rajoittaa savukaasujen koostumus, sillä happamien komponenttien lauhtuminen aiheuttaa korroosiota. Ekonomaiserin takaisinmaksuaika on tyyppillisesti hyvin lyhyt. Kaasun lämmönsiirtokerroin on pienempi kuin nesteen, mikä vaikuttaa lämmönvaihtimen kokoluokkaan tarvittavan lämmönsiirtopinta-alan ollessa suurempi. (Law et al. 2013) (Shah & Sekulic 2003)

Vaippaputkilämmönvaihdin on yleisesti käytetty kahden nestevirtauksen lämmönsiirtoon. Ne ovat yleisiä kaikkialla teollisuudessa. Vaippaputkilämmönvaihdin koostuu sylinterimäisestä vaipasta, jonka sisällä on putkia. Putket voivat olla suoria tai U-muotoisia. Vaippaputkivaihtimet soveltuvat suuren paine-eron sovelluksiin. (Hall 2012)

Lämmönvaihtimien käyttöä rajoittaa fluidivirtausten sisältämien epäpuhtauksien aiheuttama likaantuminen. Likakerros lämmönsiirtopinnoilla pienentää lämmönsiirtokerrointa sekä kasvattaa virtausvastusta, jolloin lämmönsiirto heikkenee ja painehäviö kasvaa. Kokonaisuudessaan seurauksena on lämmönsiirtojärjestelmän energiatehokkuuden heikkeneminen. Yleisin likaantumisen tyyppi lämmönvaihtimissa on hiukkaslikaantuminen. Se aiheutuu virtaavan aineen mukana kulkevien partikkelien kertymisestä lämpöpinnoille. Partikkelit voivat olla nokihiukkasia, savi- ja mineraalihiukkasia tai esimerkiksi prosessien poistoilmassa olevia öljyjäämiä. Muita yleisiä likaantumisen muotoja ovat saostuminen, kemiallinen likaantuminen ja korroosiolikaantuminen. (Motiva 2016)

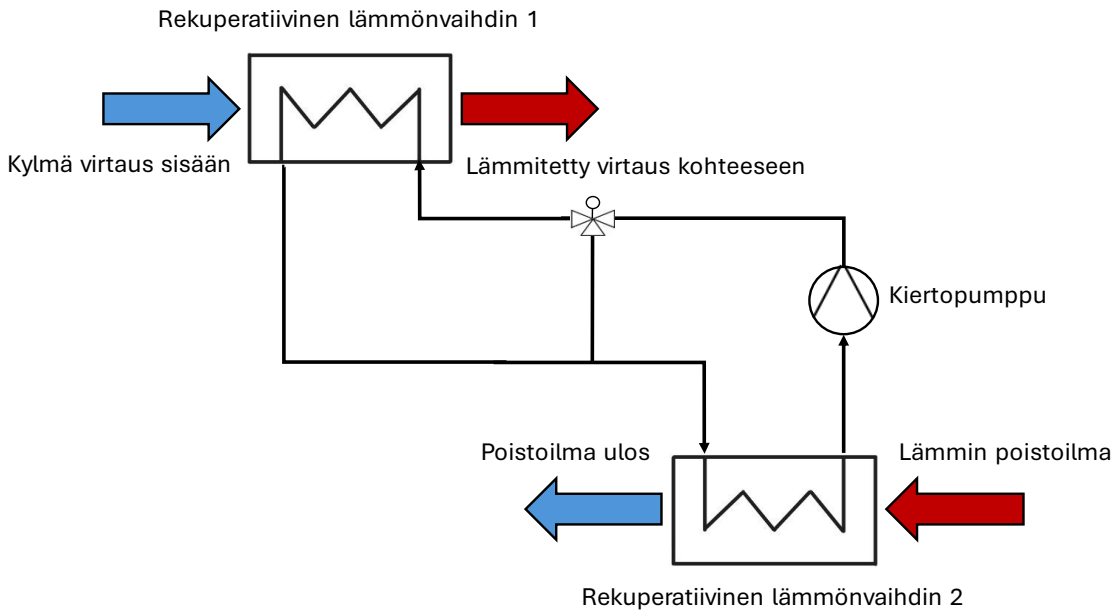
Likaantuneita lämmönsiirtopintoja voidaan puhdistaa ja likaantumista ennaltaehkäistä lämmönvaihtimien käytön aikana. Tähän soveltuvia menetelmiä ovat virtaavan aineen mekaaninen suodattaminen ylimääräisten partikkelien poistamiseksi, nuohous sekä turbulenssin lisääminen. Suodattaminen soveltuu laajasti eri käyttötarkoituksiin. Nuohous voidaan toteuttaa paineilman tai korkeapaineisen höyryn avulla. Se on yleinen menetelmä voimalaitoskattiloissa mutta soveltuu myös lämmönvaihtimiin yleisesti. (Motiva 2016)

Virtausten suodatukseen on olemassa eri tekniikoihin perustuvia ratkaisuja. Syklonisuodattimilla saadaan suodatettua suuremmat hiukkaskoot. Kanavasuodatuksessa epäpuhtaudet suodatetaan pakottamalla virtaus kapeiden kanavien tai siivistön läpi, jolloin tiheämmät partikkelit ja esimerkiksi nestepisarat kerääntyvät siivistön tai kanaviston mutkiin. Yksinkertaiset verkkosuodattimet sopivat monen erityyppisen epäpuhtauden poistamiseen virtauksesta. Verkkosuodatin koostuu

useammasta kerroksesta tiheää, langoista kudottua verkkorakennetta. Langat voivat olla metallia, lasikuitua tai polyesteriä. (Yang et al. 2023)

## 2.6 Nestekiertoiset lämmönsiirtojärjestelmät

Mikäli lämmön lähde ja nielu eivät ole toistensa välittömässä läheisyydessä, lämmön suora siirto lämmönvaihtimilla ei ole mahdollista. Tällöin voidaan hyödyntää nestekiertoista järjestelmää. Nestekiertoista välillistä järjestelmää joudutaan käyttämään myös kohteissa, joissa fluidivirtaukset eivät saa sekoittua keskenään. Esimerkki nestekiertoisen järjestelmän käytöstä on poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmä tilanteessa, jossa poistoilma on hyvin likaista eikä saa sekoittua tuloilmaan tai kun tulo- ja poistoilmakanavat ovat kaukana toisistaan erillispoistojen takia. (Mardiana-Idayu & Riffat 2012) Kuvassa 2.10 on esimerkkikaavio nestekiertoisesta järjestelmästä, jonka säätö on toteutettu kolmitieventtiilillä.




***Kuva 2.10.*** *Periaatekuva nestekiertoisesta lämmöntalteenottojärjestelmästä. Perustuu lähteeseen (Li et al. 2022).*

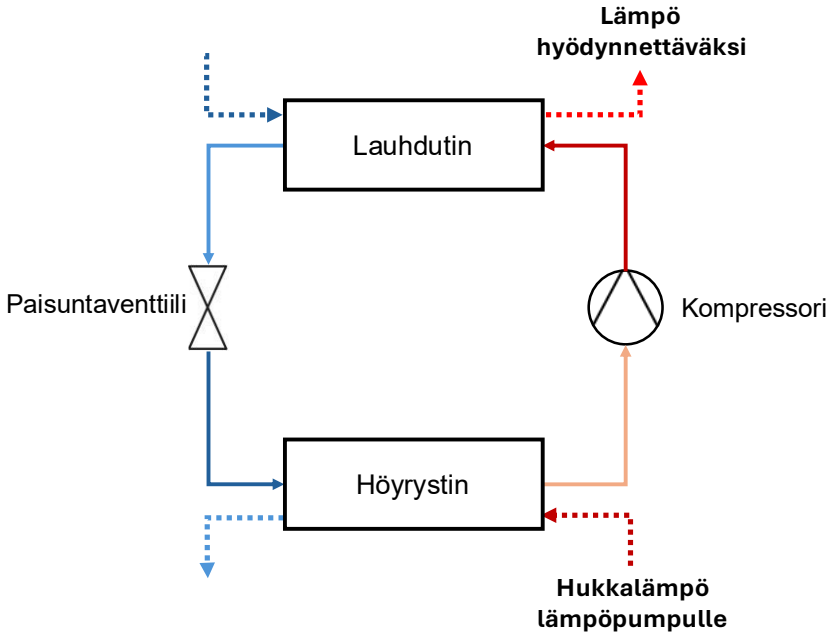
Nestekiertoinen talteenottojärjestelmä koostuu kahdesta lämmönvaihtimesta tai lämmönvaihdinkokonaisuudesta, nestekierron putkistosta, kiertopumpusta sekä tarvittaessa säätöventtiilistä (Li et al. 2022). Lämmönlähteen lämpöä siirretään vaihtimessa lämmönsiirtonesteeseen, joka pumpataan lämpönielun lämmönvaihtimelle. Lämpönielun vaihtimessa kiertoneste siirtää lämpöä lämmitettävään virtaukseen. Lämmönsiirtonesteenä voidaan käyttää esimerkiksi vettä, vesi-glykoliseosta tai

bioetanolia. Nestekiertoisen järjestelmän lämmönsiirron hyötysuhde on alhaisempi kuin suorassa siirrossa lämmönvaihtimilla, yleensä 45–65 %. (Mardiana-Idayu & Riffat, 2012)

## 2.7 Lämpöpumput

Lämpöpumppu on termodynaaminen laite, joka ottaa lämpöä lämmönlähteestä ja siirtää sen kohteeseen. Lämpöä voidaan ottaa ilmasta, vedestä tai maaperästä. Lämpöpumppuja käytetään lämmitykseen ja jäähdytykseen etenkin asuinrakennuksissa. Teollisuudessa lämpöpumppu on yksi tehokkaimmista vaihtoehdoista matalan lämpötilan hukkalämpöjen hyödyntämiseen. Matalan lämpötilan sovelluksiin lämpöpumput sopivat hyvin, sillä sen avulla lämpötila saadaan nostettua käyttötarkoitukseen sopivaksi. (Ji et al. 2024)

Lämpöpumput voidaan jaotella toteutustekniikan tai lämpöenergian ottotavan mukaan. Ottotavan mukaisesti jaoteltuna lämpöpumput voivat olla vesi-vesi-, ilma-vesi-, poistoilma- tai maalämpöpumppuja. Yleinen toteutustekninen jaottelu on suljetun kierron ja avoimen kierron lämpöpumput. Suljetun kierron lämpöpumput jaotellaan absorptiolämpöpumppuihin ja mekaanisiin lämpöpumppuihin. Mekaanisen lämpöpumpun periaatekaavio on esitetty kuvassa 2.11. Avoimia lämpöpumppukiertoja ovat termokompressorit ja mekaaniset höyryn komprimointilaitteet. Kaikille lämpöpumppuprosesseille yhteistä on viileän lämmön hyödyntäminen, lämmön lämpötilatason nostaminen sekä lämmön luovuttaminen lämmitettävään kohteeseen alkulämpötilaa korkeammassa lämpötilassa. (Maaskola & Kataikko 2014)




***Kuva 2.11.*** *Mekaanisen lämpöpumpun periaatekaavio. Perustuu lähteeseen (Jouhara et al. 2018).*

Mekaaniset lämpöpumput koostuvat höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta sekä paisuntaventtiilistä kuvan 2.11 mukaisesti. Hukkalämpöä hyödynnettäessä lämpöpumpun nestemäinen kiertoaine höyrystyy höyrystimessä. Kompressorilla nostetaan kiertoaineen painetta ja lämpötilaa sähkö- tai kaasumoottorikäyttöisesti. Kuuma höyry lauhtuu lauhduttimessa, jolloin saadaan hukkalämmönlähteen lämpö hyödynnettäväksi. Lauhduttimen jälkeen nestemäinen kylmäaine kuristetaan höyrystimen painetasolle. (Mateu-Royo et al. 2018) Kiertoaineena toimii kylmäaine, yleensä jokin hiilivety, halogenoitu hiilivety, ammoniakki tai hiilidioksidi. Mekaaniset lämpöpumput soveltuvat jopa alle 10 °C lämpötilojen hyödyntämiseen ja niiden hyötysuhde on hyvä. (Maaskola & Kataikko 2014)

Absorptiolaitteet puolestaan soveltuvat paremmin korkeampiin lämpötiloihin, tyypillisesti lämpötilavälille 60–200 °C. Niitä käytetään pääsääntöisesti aina korkean lämpötilan hyödyntämisessä. Ne ovat luotettavia ja toimivat hyvin osakuormalla. Olennainen ero mekaaniseen lämpöpumppuun verrattuna on absorptiolämpöpumpun käyttöenergian lähde. Sähkön sijaan absorptiolaitteessa käyttöenergiana toimii korkean lämpötilan lämmönlähde. Lisäksi kiertoaineena toimii kylmäaineen sijasta absorbentti-kylmäaine-seos. Absorptiolämpöpumpun hyötysuhde on hieman mekaanista lämpöpumppua alhaisempi. (Chua et al. 2010)

Hukkalämmön talteenotossa lämpöpumput ovat yleinen ratkaisu. Esimerkiksi poistoilmojen lämmöntalteenotossa poistoilmalämpöpumpun avulla saadaan lämpöä talteen korkeammalla hyötysuhteella kuin nestekiertoisella järjestelmällä. Lämpötilatason nostokyvyn seurauksena poistoilmavirtojen lämpöä voidaan hyödyntää monipuolisemmin sekä tuloilman että veden lämmitykseen. (Mardiana-Idayu & Riffat 2012)

Tässä luvussa esitellyt hukkalämpöjen hyödyntämiseen sopivat lämmön siirto- ja talteenottoteknologiat soveltuvat sekä matalan että keskitason lämpötilojen hyödyntämiseen. Yksinkertaisin ja investointikustannuksiltaan halvin teknologia on lämmön suora käyttö lämmönvaihtimia hyödyntäen. Tässä haasteena on lämmön kysynnän ja ylijäämälämmönlähteen tarjonnan kohtaamattomuus. Mekaaniset lämpöpumput ovat kaupallista ja luotettavaa tekniikkaa. Niiden avulla hukkalämpö saadaan hyödynnettyä tehokkaasti ja kyky nostaa lämpötilaa laajentaa sen käyttömahdollisuuksia. Lämpöpumppujen käyttämisen haasteita ovat korkeat investointikustannukset ja riittävän tasaista lämpöä tuottavan hukkalämmönlähteen löytäminen. Absorptiolaitteiden etuna on niiden soveltuvuus sekä jäähdytys- että lämmitystarpeisiin. Ne ovat mekaanisia lämpöpumppuja yksinkertaisempia, hyvin

säädettäviä sekä kuluttavat hyvin vähän sähköä. Haittana absorptiolaitteissa on suuri investointikustannus hyötyihin nähden.

## 2.8 Lämpövarastot

Lämpövarastot tarjoavat mahdollisuuden tasapainottaa lämmönlähteen ja käyttökohteen kulutuksen vaihtelua. Niillä on suuri rooli matalan lämpötilan hukkalämmön hyödyntämisessä, sillä ne tarjoavat kuormien ja lähteiden tehokkaan hallinnan (Manente et al. 2022). Oikeanlaisen lämpövaraston valinta edellyttää lämmönlähteen ominaisuuksien tuntemista virtausmäärien ja lämpötilatasojen osalta (Ji et al. 2024).

Lämpövarastot voidaan jaotella tuntuvan lämmön ja latenttilämmön varastoihin sekä termokemiallisiin varastoihin. Tuntuvan lämmön varastoissa lämpöenergiaa varastoidaan ominaislämpökapasiteetin avulla. Yleinen varastointiaine on vesi tai öljy. Tuntuvan lämmön varastossa ei tapahdu olomuodonmuutoksia. (Alva et al. 2018)

Vesi on lämmön varastointiin edullinen väliaine. Sitä on helppo kierrättää, ja etuna on korkea ominaislämpökapasiteetti sekä käyttöturvallisuus. Rajoittava tekijä veden käytössä on lämpötila sekä suhteellisen korkea painetaso. Korkeille lämpötilaeroille varastointiväliaineeksi soveltuu kuumaöljy. Sen toimintalämpötila on 12–400 °C ja käytön etuna on matala varastointipaine. (Alva et al. 2018)

# 3. ENERGIATEHOKKUUS

Tässä luvussa käsitellään hukkalämpöihin ja teollisuuden energiankäyttöön oleellisesti liittyvää käsitettä, energiatehokkuutta. Tarkastelu alkaa käsitteen määritelmällä edeten kohti energiatehokkuutta ohjaavien säädösten esittelyä. Lopuksi tarkastellaan energiatehokkuuden ajureita ja esteitä, siihen vaikuttavia osatekijöitä sekä keinoja seurata energiankäyttöä yksityiskohtaisemmin mittauksiin perustuen.

## 3.1 Määritelmä

Energiatehokkuus on laajasti käytetty käsite. Sen määritteleminen ei ole yksinkertaista, ja eri teollisuudenalojen vertailu energiatehokkuuden osalta on vaikeaa. Yleisesti energiatehokkuus määritellään hyödyllisten poistovirtausten ja energiankäytön suhteena. Hyödylliset poistovirtaukset voivat olla energian lisäksi esimerkiksi tonni valmistettua tuotetta. (Patterson 1996) Euroopan Unionin energiatehokkuusdirektiivissä käsite määritellään suoritteen, palvelun, tavaran tai energian tuotoksen ja energiapanoksen välisenä suhteena (*Direktiivi (EU)2023/1791* 2023).

Yleisen määritelmän lisäksi energiatehokkuus määritellään saman tuotantomäärän saavuttamisella alhaisemmalla energiankulutuksella tai suuremman tuotantomäärän saavuttamisella samalla kulutuksella. Tähän määritelmään yhdistyy tehokas energiankäyttö, missä oleellista on käytetyn energian optimointi suhteessa prosessin energiatarpeeseen. Siihen voidaan vaikuttaa suunnittelun, käytön ja kunnossapidon tasolla. Teollisuuden prosesseissa tehottomuutta aiheuttaa laitteiden turha käyttö, tarpeettoman korkeat lämpötilat sekä energian varastoinnin puute. (Heikkilä et al. 2008)

Energiatehokkuuden mittareina voidaan käyttää termodynamiikkaan, taloudellisiin tunnuslukuihin ja näiden yhdistelmään perustuvia mittareita. Termodynamiikkaan pohjautuvan energiatehokkuustarkastelun lähtökohtana ovat mittaukset. Mittauksista voidaan johtaa suhteisiin perustuvia tunnuslukuja tai energiatehokkuutta voidaan arvioida tarkempia menetelmiä käyttäen. Menetelmät perustuvat termodynamiikan pääsääntöihin, joista ensimmäiseen perustuu entalpiamenetelmä. Siinä energiatehokkuuden arviointi suoritetaan energiavirtojen lämpösisällön avulla. Se ei huomioi energian laatua eli sitä, käyttääkö tarkasteltu kohde sähköä, tiettyjä polttoaineita vai sekundäärienergiaa. Toisen pääsäännön mukainen tehokkuusanalyysi, exergia-analyysi, tarkastelee energiavirtojen hyödynnettävissä olevaa työtä ja täten ottaa myös huomioon prosessien termodynaamisen laadun. (Patterson 1996)

Tyypillisesti teollisuudessa suhteutetaan käytetyn energian määrä tuotannon määrään. Näin saadaan tuotannon ominaisenergiankulutus, SEC (Specific Energy Consumption), joka voidaan esittää yksityiskohtaisemmin eri energiamuodoille sekä tuotteille. Yksinkertaisesti ominaisenergiankulutus voidaan ilmaista muodossa

$$SEC = \frac{energiankäyttö}{tuotantomäärä}, \tag{3.1}$$

jonka yksikkönä käytetään energiamäärää suhteessa tonniin tuotetta, joko muodossa $GJ/t$ tai $kWh/t$. Ominaisenergiankulutus kuuluu fysikaalis-termodynaamisiin energiatehokkuuden mittareihin. (Heikkilä et al. 2008)

Taloudellis-termodynaamisessa mittarissa ulosvirta eli saatu hyöty mitataan markkinahinnan avulla ja energiankäyttö edelleen termodynaamisessa mielessä. Näitä mittareita käytetään tyypillisesti kansallisen ja sektoritason energiatehokkuuden arviointiin. Kansallisella tasolla tarkastellaan energiankäytön suhdetta bruttokansantuotteeseen ja sektoritasolla energiankäyttöä verrataan saadun hyödyn taloudelliseen arvoon. Nämä energiatehokkuuden mittarit eivät huomioi teknistä energiatehokkuutta. (Patterson 1996)

Puhtaasti taloudellinen energiatehokkuuden mittari tarkastelee energiatehokkuutta pelkästään markkinahintojen perusteella. Se ottaa huomioon energian hinnan verraten sitä bruttokansantuotteeseen. Taloudellinen mittari kuvastaa suhteellisen tarkasti energian taloudellista tuottavuutta ja se vaihtelee energian hinnan mukaan, toisin kuin vakiona pysyviin termodynamiikan suureisiin perustuvat energiatehokkuuden tunnusluvut. (Patterson 1996)

## 3.2 Direktiivit ja sopimukset

Energiatehokkuutta ja siihen liittyviä tavoitteita ohjataan EU:n energiatehokkuusdirektiivillä sekä kansallisella tasolla energiatehokkuussopimuksilla. Energiatehokkuusdirektiivin tarkoitus on vahvistaa yhteinen kehys energiatehokkuuden edistämistä koskeville toimenpiteille, tavoitteiden saavuttamiselle sekä mahdollistaa lisäparannuksia. Säädetyt vaatimukset ovat vähimmäisvaatimuksia jäsenvaltioille. (*Direktiivi (EU)2023/1791* 2023)

Energiatehokkuus on määritelty direktiivissä keskeisenä toiminta-alana, jota ilman talouden täydellistä hiilestä irtautumista ei voida saavuttaa. Tavoitteeksi on asetettu energiatehokkuuden parantaminen 32,5 % verrattuna ennustettuun vuoden 2030 energiankäyttöön. Sen saavuttamisen myötä on arvioitu energian hinnan laskevan, uuden sähköntuotantokapasiteetin tarpeen vähenevän sekä EU:n jäsenvaltioiden

huoltovarmuuden kehittyvän polttoaineen tuonnin vähenemisen myötä. Lisäksi energiatehokkuudesta seuraa ympäristöhyötyjä, ilmanlaadun paranemista ja yleistä kilpailukyvyn kasvua. (*Direktiivi (EU)2023/1791* 2023)

Suomen lainsäädännössä on säädetty energiaa myyviä tai jakelevia yrityksiä, datakeskuksia sekä suuria yrityksiä koskeva energiatehokkuuslaki. Laissa säädetään energiatehokkuuden edistämisestä, energiakatselmuksista sekä sähkön ja lämmön yhteistuotannon ja ylijäämälämmön hyödyntämisen edistämiseksi tehtävistä analyyseistä. (*Energiatehokkuuslaki 2014/1429* 2014)

Energiatehokkuussopimukset ovat valtion ja toimialojen keino täyttää kansainväliset, EU:n direktiivissä asetetut energiatehokkuustavoitteet ilman uutta lainsäädäntöä. Energiatehokkuussopimukset ovat vapaaehtoisia ja näiden sopimusten tavoitteena on tehostaa energiankäyttöä teollisuudessa sekä energia-, kiinteistö- ja kunta-alalla. Sopimukset ovat jo pitkään olleet ensisijainen keino energiatehokkuuden edistämiseksi. (Energiatehokkuussopimukset 2025)

## 3.3 Energiakatselmukset

Energiakatselmus on järjestelmällinen menettely, jonka tarkoituksena on antaa tietoa rakennuksen, laitoksen tai teollisen toiminnan energiankulutusprofiilista. Sen tavoitteena on analysoida ja ymmärtää tarkasteltavan kohteen energiankäyttöä, selvittää energiansäästöpotentiaali sekä esittää kustannustehokkaita toimenpide-ehdotuksia. (Motiva 2024) Katselmukset ovat joko energiatehokkuuslain velvoittamia tai vapaaehtoisia. Energiakatselmukset ovat pakollisia suurille yrityksille, joiden keskimääräinen vuotuinen energiankulutus on yli 10 TJ ja jotka eivät käytä energianhallintajärjestelmää. Katselmukset on tässä tapauksessa suoritettava neljän vuoden välein. Energiatehokkuuslaissa määritellään lakivelvoite yrityksille, joiden työntekijämäärä on yli 250 tai liikevaihto on yli 50 M€. (*Energiatehokkuuslaki 2014/1429* 2014)

Energiakatselmuksille on asetettu vähimmäisvaatimuksia. Niiden on perustuttava ajan tasalla oleviin ja mitattuihin operatiivisiin tietoihin energiankulutuksesta ja sähkön kuormitusjakaumista. Katselmusten on sisällettävä yksityiskohtainen katsaus rakennusten, teollisuustoiminnan tai teollisuuslaitoksen energiankulutuksen rakenteesta ja sen on yksilöitävä energiatehokkuustoimenpiteitä energiankulutuksen vähentämiseksi. Investointien osalta katselmuksissa tulisi kiinnittää huomiota elinkaarikustannusten analyysiin pelkän takaisinmaksuajan sijasta. Lisäksi energiakatselmusten on oltava riittävän edustavia luotettavan energiatehokkuuden

kokonaiskuvan muodostamiseksi ja niiden on mahdollistettava yksityiskohtaisten laskelmien tekeminen ehdotetuille toimille, jotta säästöistä saadaan selkeää tietoa. (*Energiatehokkuuslaki 2014/1429* 2014)

Energiatehokkuuden parantamisessa energiakatselmukset ovat yksi kustannustehokkaimmista keinoista. Niiden avulla saadaan selville energiavirrat yrityksessä suuremmassa mittakaavassa sekä myös yksittäisten prosessien osalta. Auditointien suorittamisen vaiheet ja periaatteet on määritelty standardissa ISO 50002, joka on osa energiahallinnan standardia ISO 50001. Tämän lisäksi voidaan suorittaa katselmusten tapaisia energia-analyysejä, jotka eivät rajoitu tiukkoihin ohjeistuksiin. Energia-analyyseissä tarkastellaan jonkin huomattavan tuotantolaitoksen energiankäyttäjän energiankulutusta yksityiskohtaisemmin ja kulutus ilmaistaan numeerisesti ominaisenergiankulutuksena. (Trianni et al. 2014) Numeerisen esityksen lisäksi energiankulutus esitetään graafisesti esimerkiksi Sankey-diagrammin avulla, josta selviää primääri- ja sekundäärienergiavirrat eri prosessien ja osaprosessien välillä. (Kluczek & Olszewski 2017)

Energiakatselmusten avulla on mahdollista saavuttaa erilaisia hyötyjä. Ilmeisimpiä ovat energiasäästöt parantuneen energiatehokkuuden myötä. Tähän päästään yksittäisten prosessien kulutuksen vähentämisellä sekä tehokkaampia komponentteja käyttämällä. Katselmusten avulla tunnistetaan hyödynnettävissä olevat hukkalämpövirrat ja saadaan toimenpide-ehdotuksia näiden hyödyntämiseksi. Pienentynyt energiankulutus vähentää teollisen toiminnan päästöjä sähkönkulutuksen ja polttoaineiden käytön vähenemisen sekä lämmön optimoinnin myötä. Kustannussäästöt ovat seurausta energiankulutuksen vähenemisestä ja ovat suuruudeltaan energian hinnan ja säästetyn energian mukaisia. Kustannussäästöt ovat oleellinen osa energiakatselmusten jälkeistä päätöksentekoa. Sen perusteella saadaan arvio mahdollisten investointien takaisinmaksuajoista. (Kluczek & Olszewski 2017) (Kamal et al. 2019)

Muita mahdollisia hyötyjä katselmustoiminnasta ovat komponenttien käyttöiän pidentyminen, teollisen toiminnan tuottavuuden kasvu sekä työskentelyolojen kehittyminen. Työskentelyolot voivat parantua tuotantotilojen lämpötilan alenemisen tai jäähdytyksen tehostumisen seurauksena, kun prosessien hukkalämpöjä otetaan talteen. (Kamal et al. 2019)

## 3.4 Energiatehokkuuden edistämistä ajavat ja rajoittavat tekijät

Energiatehokkuutta parantavia keinoja tarkasteltaessa on oleellista arvioida kysymyksiä energiatehokkuuden merkityksellisyydestä, toteutettavissa olevien projektien selkeydestä ja konkreettisuudesta, toimenpiteiden kannattavuudesta, teknisestä luotettavuudesta sekä yrityksen mahdollisten asiakkaiden arvostuksesta. (Aflaki et al. 2013)

Energiatehokkuutta edistävien toimien ajurina on usein taloudelliset tekijät. Tehokkuuden parantaminen tuo energiasäästöjä pitkällä aikavälillä. Myös energian hinnan nousujen uhka ja verotuksen kiristyminen ajavat teollisuuden energiatehokkuuden edistämistä. (Thollander et al. 2013)

Merkittävä tekijä energiatehokkuuden edistämisessä on kestävyys ja vihreät arvot sekä näiden kytkeytyminen yritysten strategiaan. Osa energiatehokkuusprojekteista tähtääkin energiasäästöjen sijaan brändin ja imagon edistämiseen. Tämän tyyppiset projektit ovat usein julkisesti esiteltyjä. Merkittävää energiasäästöä hakevien energiatehokkuusprojektien ajavana tekijänä ovat tuottavuuden ja kustannustehokkuuden parantuminen. Oleellisena osana tällaisissa projekteissa on käytetyn teknologian päivittäminen sekä prosessien optimointi. (Aflaki et al. 2013)

Tuottavuuden, energiasäästöjen, kustannustehokkuuden sekä yrityksen maineen lisäksi energiatehokkuustoimien ajureiksi voidaan lukea ympäristölliset tekijät, kuten päästöjen ja jätteiden vähentyminen. (Trianni et al. 2014) Myös energiakatselmukset osaltaan ajavat kehitystä positiiviseen suuntaan. Katselmusten tulokset lisäävät tietoisuutta menetelmistä ja toimista, joiden avulla muutos kohti energiatehokkaampaa toimintaa voidaan toteuttaa. (Thollander et al. 2013)

Ajavien tekijöiden ohella energiatehokkuuden edistämiseen liittyy myös esteitä. Ajureiden tavoin myös esteet jaotellaan tyypillisesti eri tasoille. Näitä tasoja ovat sisäiset ja ulkoiset tekijät. Sisäisiin tekijöihin kuuluu yrityksen talouteen, tietoon, käyttäytymiseen ja organisatorisiin piirteisiin liittyvät asiat. Ulkoisiin tekijöihin kuuluvat markkina, rahoittajat ja tekniset palvelut sekä politiikka. (Cagno et al. 2013)

Sisäiset taloudelliset tekijät voivat olla merkittävä rajoite toimenpiteiden toteuttamisen kannalta. Pääoman puute, projektien eri vaiheisiin liittyvät piilokustannukset sekä investointeihin liittyvät taloudelliset riskit osaltaan estävät tai hidastavat energiatehokkuuden edistämistä. Energiatehokkuuteen liittyvissä projekteissa yleisiä piilokustannuksia ovat selvitysvaiheeseen ja tiedon keräämiseen liittyvät kustannukset, joihin kuuluu esimerkiksi energiakatselmuksista aiheutuvat kulut. (Cagno et al. 2013)

Takaisinmaksuaika on energiatehokkuuden toteuttamisessa sekä ajava tekijä että rajoite. Se ohjaa energiatehokkuusprojekteihin liittyvää päätöksentekoa ja määrittelee hyvin pitkälle niiden toteutettavuuden. Korkeat alustavat kustannukset ja pitkä takaisinmaksuaika estävät investointien toteuttamista. (Trianni et al. 2014)

Käyttäytymiseen liittyvät ja organisatoriset tekijät kytkeytyvät lähekkäin toisiinsa. Yrityksen sisällä kiinnostuksen ja arvostuksen puute energiatehokkuutta kohtaan johtaa sen puutteelliseen hallintaan. Monimutkainen päätöksentekoketju sekä osaajien ja tiedon puute johtavat samaan lopputulokseen. Näiden yhteisvaikutuksena yrityksen sisällä syntyy inertiaa muutosta kohtaan, jolloin asiat etenevät tavoitteita hitaammin. (Cagno et al. 2013)

Ulkopuolisiin rajoittaviin tekijöihin kuuluu markkinan osalta energian hintojen vääristymä, teknologian ja tiedon hidas diffuusio, markkinariski sekä tietotaidon saatavuus. Teknologian diffuusio tarkoittaa uudenlaisen teknologian leviämistä. Usein energiatehokkaaseen teknologiaan liittyy innovatiivisuutta, ja teknologian elinkaaren alkupuolella sen leviäminen on hidasta ja saatavuus heikkoa. Tiedon diffuusio tarkoittaa energiatehokkuuden yhteydessä energiatehokkaisiin teknologioihin liittyvän tiedon leviämistä. Asiantuntijoiden mahdollisesti vaikea saatavuus yhdessä hitaan tiedon diffuusion kanssa rajoittaa energiatehokkuuden edistämistä. (Cagno et al. 2013)

Politiikka ja sääntely voivat rajoittaa energiatehokkuuden kehittymistä. Sääntely ja standardit ohjaavat yrityksiä käyttämään energiatehokasta teknologiaa ja käytäntöjä. Mikäli sääntely on puutteellista tai epäselvää, johtaa se niiden tehottomuuteen ja tällöin yritysten ulkopuolelta tuleva ohjaus puuttuu. (Cagno et al. 2013) Tässä luvussa aiemmin käsitellyt direktiivit, energiatehokkuussopimukset, standardit ja energiakatselmukset osaltaan purkavat politiikkaan ja yritysten ulkopuolisiin tekijöihin liittyviä esteitä ja edistävät teollisuuden energiatehokkuutta.

## 3.5 Automaatio energiatehokkuuden osatekijänä

Prosessiautomaatio jaotellaan hierarkkisesti viiteen eri tasoon. Näitä ovat ylimmältä tasolta alkaen liiketoiminnan suunnittelu ja logisitiikka yhtiötasolla, tuotannon toiminnot ja ohjaus, prosessitason valvonta ja ohjaus, toimilaitteiden ohjaus ja toiminta sekä alimmalla tasolla itse arvoa tuottava valmistusprosessi. (Körner et al. 2019) Hierarkian kolme alinta tasoa kuuluvat yleisesti automaatio- ja kenttätasoon. Nämä tasot ovat energiatehokkuuden kannalta merkityksellisiä, sillä niillä suoritetaan energiaa käyttävän prosessin toiminta ja ohjaus. (Wagner et al. 2010)

Automaation yleisiä hyötyjä ja tavoitteita ovat tuottavuuden lisääminen, tuotantokustannusten pienentäminen, kunnossapidon edistäminen, laadun parantaminen sekä prosessien tehokas ohjaus. (Gupta et al. 2023) Osa näistä liittyy myös energiatehokkuuden hallintaan ja edistämiseen.

Automaatio- ja kenttätasoon sisältyy prosessien ohjauksessa käytettävä ohjelmoitava logiikka, kenttäväylät sekä prosesseja ohjaavat toimilaitteet (Wagner et al. 2010). Toimilaitteita ovat pumput, kompressorit, puhaltimet, säätöventtiilit ja sähkömoottorit. Toimilaitteiden oikealla mitoituksella ja valinnalla on suuri merkitys osaprosessien energiatehokkuuteen. (Gupta et al. 2023)

Automaatio on teollisuuden energiankäytön oleellinen osatekijä. Prosessien energiankulutusta ohjataan automaatiojärjestelmän ohjauksilla ja asetusarvoilla. Automaatiojärjestelmän mittauksista saadaan tarkkaa tietoa prosessista, jota voidaan hyödyntää energiankäytön arvioinnissa. Automatisoitujen prosessien tuottavuus on korkea, mikä jo itsessään edistää energiatehokkuutta. Energiankäyttöön asetetut ohjaukset, toimilaitteiden tarkka toiminta ja korkea tuottavuus ovat suoria automatisaation seurauksena saatavia vaikutuksia energiatehokkuuteen. (Sharma 2011)

## 3.6 Energiatehokkuuden mittaaminen

Energiatehokkuuden arvioinnissa mittalaitteet ovat tärkeitä työvälineitä. Niiden avulla saadaan tarkkaa tietoa erityyppisiä virtauksia sisältävien prosessien toiminnasta, mikä on perusta energiakatselmusten laskelmille. Mittaustietojen perusteella voidaan paikantaa hukkalämmön lähteitä ja saada tietoa niiden ajallisesta vaihtelusta. Näistä on hyötyä kuvassa 2.5 esitetyssä hukkalämpöjen kartoituksessa. Mittalaitteet kuuluvat myös olennaisesti automaatiojärjestelmään, jolla ohjataan teollisuuden prosesseja.

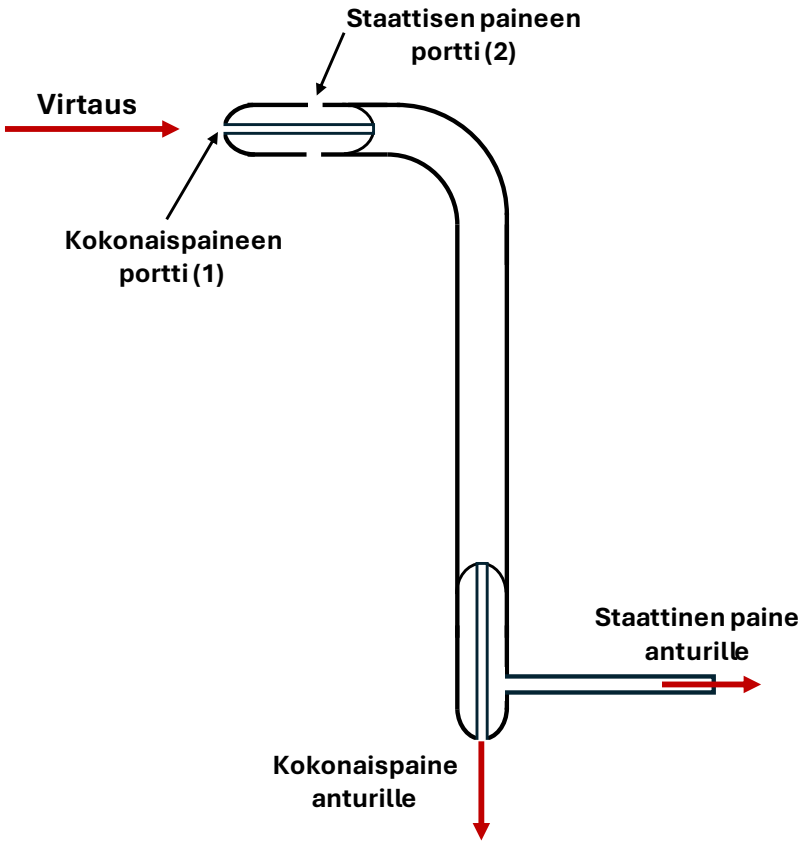
Fluidivirtauksia voidaan mitata erityyppisillä instrumenteilla. Ne voivat perustua paine-eron mittaamiseen, sähkömagneettiseen induktioon, lämpösäteilyyn, ultraääneen sekä turbulenssiin. Mitattavia suureita ovat yleensä virtausnopeus ja lämpötila, joiden avulla saadaan selville tilavuus- tai massavirta ja tiheys. Mittalaitteet voivat olla kiinteästi asennettavia tai tilapäisesti esimerkiksi putkeen kiinnitettäviä. (Wheeler & Ganji 2010)

Paine-eron mittaamiseen perustuvia välineitä ovat reikälevy, venturiputket, pitot-putki sekä eri tyyppiset anemometrit (Klopfenstein Jr 1998). Nämä mittalaitteet soveltuvat virtausnopeuden ja virtausmäärien mittaamiseen. Reikälevyn avulla tapahtuva mittaus perustuu kuristuksen aiheuttaman painehäviön määrittämiseen. Painehäviö tapahtuu fluidin kulkiessa putken halkaisijaa pienemmän aukon läpi. Levyn molemmin puolin

mitatun paineen avulla saadaan paine-ero, jonka perusteella voidaan laskea tilavuusvirta Bernoullin yhtälöllä. Reikälevyyn perustuva mittausmenetelmä soveltuu huonosti kenttämittauksiin sen aiheuttaman painehäviön takia. (Rønneseth et al. 2019)

Pitot-putki on paine-eroon perustuva mittalaite, jonka avulla voidaan mitata fluidin virtausnopeutta. Se mittaa staattista painetta ja virtauksen putkeen törmäämisen aiheuttamaa painetta, stagnaatiopainetta. Kokonaispaine on staattisen paineen ja stagnaatiopaineen summa. Pitot-putkessa kokonaispaineelle ja staattiselle paineelle on omat mittausportit. Paine-ero saadaan kokonaispaineen ja staattisen paineen erotuksena. (Wheeler & Ganji 2010)

Pitot-putkessa täytyy olla sopiva painemittari, esimerkiksi nesteellä täytetty manometri tai paineanturi. Paineanturit antavat tarkempia paine-eron mittauksia etenkin alhaisilla paineen arvoilla. Lisäksi antureiden mittaustieto saadaan helposti sähköisenä signaalina jatkoanalyysiä varten. (Klopfenstein Jr 1998) Pitot putken rakenne on esitetty kuvassa 3.1.




***Kuva 3.1.*** *Pitot-putken rakenne. Muokattu lähteestä (Wheeler & Ganji 2010).*

Putken rakennekuvasta nähdään eri portit staattisen paineen ja kokonaispaineen mittaamiselle. Mitatun paine-eron avulla saadaan laskettua fluidin virtausnopeus, jonka pitot-putkeen asennetut mittarit ilmoittavat yleensä suoraan. Mikäli virtauskanavan mitat ovat tiedossa, voidaan edelleen laskea tilavuusvirta kanavan pinta-alan ja virtausnopeuden avulla. Virtausnopeus kytkeytyy paineeseen Bernoullin yhtälössä

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2, \tag{3.2}$$

missä $p$ on paine, $\rho$ fluidin tiheys, $v$ virtausnopeus, $h$ korkeus ja $g$ putoamiskiihtyvyys kuvan 3.1. mukaisesti numeroituna. Yhtälön mukaan nopeuden muutos fluidivirtauksessa tapahtuu paineen muutoksen kanssa samanaikaisesti. Bernoullin yhtälöstä virtausnopeus saadaan laskettua kaavalla

$$V = K \cdot \sqrt{\frac{2[(p_1 + \rho g z_1) - (p_2 + \rho g z_2)]}{\rho}}, \tag{3.3}$$

missä $K$ on pitot-putkelle määritettävä kalibrointivakio. Kaasuvirtauksille korkeustermi voidaan arvioida merkityksettömäksi, jolloin virtausnopeuden yhtälö 3.3 yksinkertaistuu sisältäen ainoastaan painetermit, tiheyden ja kalibrointivakion. (Wheeler & Ganji 2010)

Käytännössä virtausnopeuden mittaus pitot-putkella suoritetaan asettamalla putki reiän kautta kanavaan putken avoin mittauspää virtausta kohti, mahdollisimman yhdensuuntaisesti virtauksen kanssa. Suuntausvirhe aiheuttaa mittavirhettä ja sen ollessa yli 15° on mittausvirhe merkittävä. Pitot-putkella saadaan hetkellisiä ja paikallisia mittauksia. Useasta pisteestä suoritettujen pitot-putkimittausten avulla saadaan mittaustuloksia epälineaarisen virtausprofiilin eri kohdista. Mittalaitteena pitot-putki on helppo asentaa ja käyttää eikä se aiheuta juurikaan painehäviötä. Täten se sopii hyvin ilmavirran kenttämittauksiin esimerkiksi ilmanvaihtokanavista. Pitot-mittaus vaatii kuitenkin tasaiset virtausolosuhteet ja riittävän suuren virtausnopeuden, jotta mittausherkkyys on riittävä. (Wheeler & Ganji 2010)

Ultraäänimittalaitteet soveltuvat sekä neste- että kaasuvirtausten mittaamiseen. Ne perustuvat virtaavan fluidin vaikutukseen ultraäänipulssiin. Korkeataajuuksiset, satojen kilohertsien tai megahertsien pulssit läpäisevät putken pinnan ja kulkevat virtaavan fluidin läpi. Toimintaperustan osalta ultraäänimittarit voidaan jaotella kahden perusperiaatteen mukaan: ne voivat perustua Doppler-ilmiöön tai kulkuajan mittaamiseen. (Lynnworth & Liu 2006)

Kulkuajan mittaamiseen perustuvassa menetelmässä kaksi ultraäänisensoria on asetettu putken pintaan. Toinen sensoreista lähettää ultraäänipulssin ja toinen

vastaanottaa sen. Pulssi lähetetään putken vastakkaiseen seinämään, josta se heijastuu kohti toista sensoria. Lähettämisen ja vastaanottamisen välinen aika mitataan, jolloin saadaan pulssin kulkuaika. Sensorit voivat olla myös putken vastakkaisilla puolilla. Pulssin kulkuaika riippuu virtausnopeudesta, joka saadaan pulssin kulkuajan, äänennopeuden ja pulssin kulkeman matkan avulla. Edelleen tilavuusvirta saadaan putken poikkipinta-alan ja virtausnopeuden avulla. (Mileiko et al. 2021)

Doppler-ilmiöön perustuvassa menetelmässä partikkeleiden nopeutta mitataan taajuuseron perusteella. Ultraäänilähetin lähettää joko jatkuvaa ultraääniaaltoa tai pulssimaista aaltoa. Lähetetty aalto kohtaa fluidissa olevia partikkeleita. Partikkelit toimivat toisena ultraäänilähteenä hajottaen aallot ja toinen mittalaitteen lähettimistä vastaanottaa ne. Dopplerin siirtymä lasketaan lähetetyn ja vastaanotetun taajuuden perusteella ja virtausnopeus lasketaan taajuussiirtymän, äänennopeuden, lähetetyn aallon taajuuden sekä lähtevän aallon kulman avulla. (Tan et al. 2021)

Ultraäänimittauksen etuna on mittareiden helppo asennus ja käytettävyys. Virtausprofiilin epätasaisuudesta huolimatta ultraäänellä saadaan tarkkoja tuloksia. Se sopii sekä yksi- että monifaasifluideille ja monelle eri putkikoolle. Virtausnopeuden lisäksi ultraäänellä voidaan mitata yhtä lisäsuuretta, kuten fluidin lämpötilaa tai tiheyttä. (Lynnworth & Liu 2006)

Muita virtausmäärien mittaamiseen yleisesti käytettäviä laitteita ovat Coriolis-mittari, vortexmittari ja termiset virtausnopeusmittarit. Coriolis-mittarin toiminta perustuu virtauksen aiheuttamaan putken värähtelyyn ja tämän värähtelyn mittaamiseen. Taivutettuun putkeen luodaan värähtelyä, joka kohdistaa virtaavaan fluidiin voimia. Nämä aiheuttavat Coriolis-voiman. Vortex-mittari on vaihtoehtoinen tapa paine-eroon perustuville mittareille. Se perustuu virtaukseen asetetun esteen aiheuttamaan turbulenssiin. Esteen synnyttämien pyörteiden taajuus on verrannollinen fluidin virtausnopeuteen. (Morris & Langari 2016)

Terminen virtausmittari, kuten kuumalanka-anemometri, mittaa virtausnopeutta lämpöelementin ja fluidin välisen konvektiivisen lämmönsiirron perusteella. Kuumalankamittarissa lämpöelementtinä toimii ohut kuumalanka. Lankaan syötetty sähköteho on yhtä suuri kuin konvektiolla langasta virtaukseen poistuva lämpö, kun säteily ja johtuminen jätetään huomioimatta. Mikäli langan resistanssi ja lämpötila pysyvät vakiona, jännite langan yli on virtausnopeuden funktio. (Wheeler & Ganji 2010)

Lämpötilaa voidaan mitata termoparilla, termistorilla ja pyrometrillä. Termoparin toiminta perustuu termosähköiseen ilmiöön. Se koostuu kahdesta erilaisesta metallista ja niiden liitoksesta. Käytetyt metallit ovat jalometalleja ja epäjalometalleja. Kahden eri metallin

liitoksessa syntyy lämpötilasta riippuva jännite, jonka avulla kohteen lämpötila saadaan mitattua. Termistorit ovat mittalaitteita, joissa on lämpötilasta riippuva resistanssi. Resistanssi muuttuu lämpötilan mukaan, ja yleisimmissä termistoreissa lämpötilan nousu saa aikaan resistanssin pienenemisen. Resistanssia seuraamalla saadaan lämpötila selville. Termistorit sopivat yleensä alle 100 °C lämpötiloille. Pyrometrin avulla voidaan suorittaa kosketukseton lämpötilamittaus. Sen toiminta perustuu mitattavasta kappaleesta heijastuneeseen lämpösäteilyyn. Lämpösäteilyn voimakkuus on kääntäen verrannollinen säteilyn aallonpituuteen. (Wheeler & Ganji 2010)

# 4. AINEISTO JA MENETELMÄT

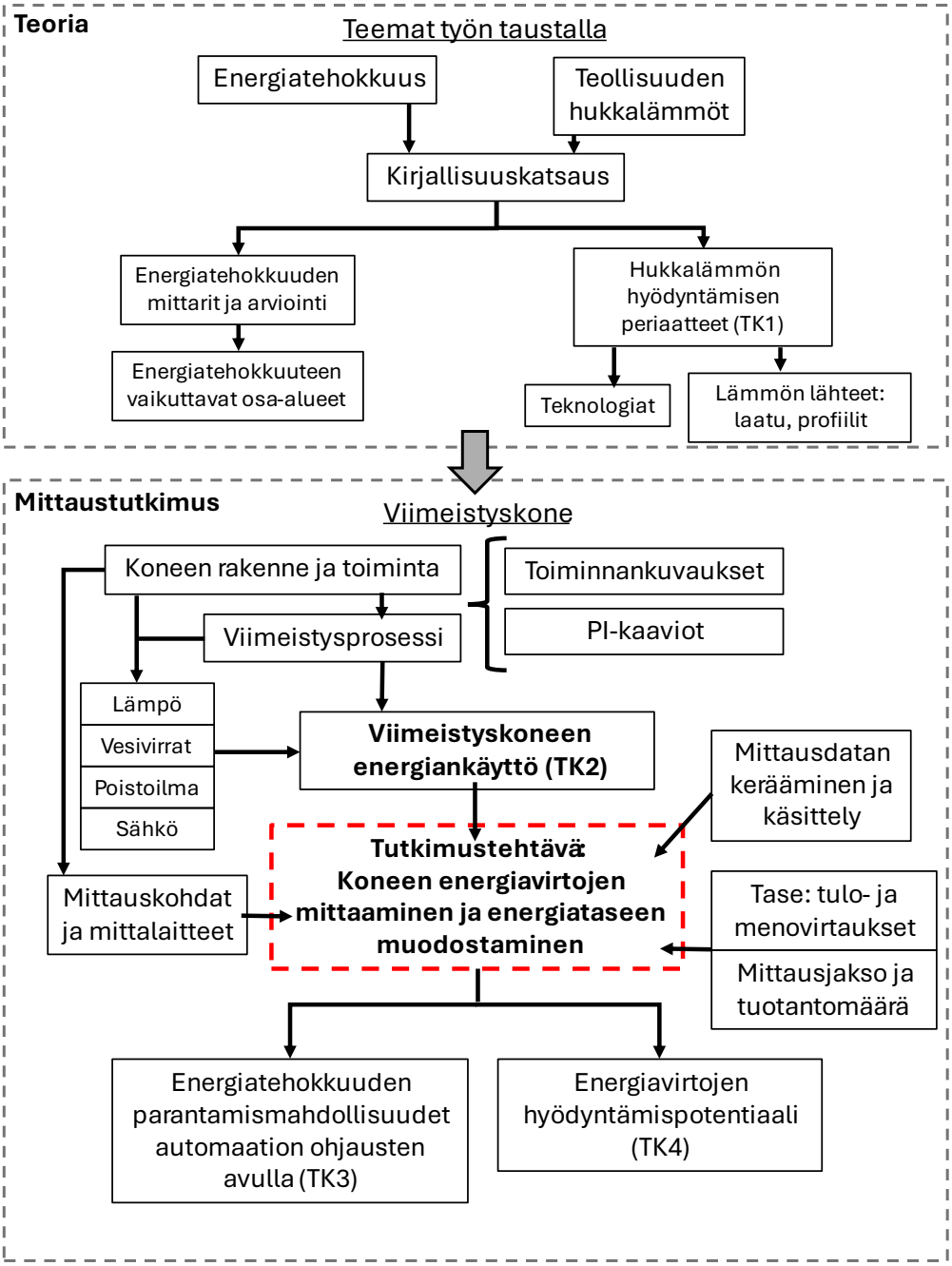
Tässä luvussa esitellään aluksi tutkimusstrategia ja tutkimuksen päävaiheet. Sen jälkeen perehdytään tutkimuskohteena olleen puristinhuovan viimeistyskoneen rakenteeseen, toimintaperiaatteeseen ja osaprosesseihin. Lopuksi esitetään mittaustutkimuksen osa-alueet, koneen energiankäytön laskennan vaiheet ja energiatehokkuuden parantamisen arvioinnin menetelmät.

## 4.1 Tutkimusstrategia

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Valmet Technologies Oy:n puristinhuopatehtaan viimeistyskoneen energiankäyttöä sekä tutkia energiankäytön tehostamismahdollisuuksia. Tutkimus jakautui kahteen osaan, joita olivat kuvan 4.1 mukaisesti kirjallisuuskatsaus ja mittaustutkimus sisältäen mittausdataan perustuvan laskentaosion. Tutkimustavoitteiden ja -kysymysten asettamisen jälkeen tutkimus alkoi kirjallisuuskatsauksella ja tiedonkeruulla. Kirjallisuuskatsausta varten teollisuuden hukkalämpöön ja energiatehokkuuteen liittyvää aineistoa kerättiin tiedejulkaisuista. Aiheista löytyi paljon eri teollisuuden aloilla tehtyjä tutkimuksia ja raportteja pitkältä aikaväliltä. Kirjallisuuskatsauksen ohessa tutkimus suuntautui viimeistyskoneen toimintaan perehtymiseen. Tässä tiedonlähteenä toimi koneen osaprosessien PI-kaaviot, automaatiojärjestelmän toiminnankuvaukset sekä tehtaan teknisen ryhmän henkilöstön haastattelut ja koneen toiminnan seuraaminen tuotannossa.

Tutkimuksen tärkein vaihe oli mittaustutkimus. Koneen rakenteen ja toiminnan selvittämisen jälkeen mittaukset suoritettiin yhteistyössä kolmannen osapuolen kanssa. Mittausdatan pohjalta laskettiin viimeistyskoneen energiatase ja ominaiskulutus. Näiden perusteella tunnistettiin energiankäytöstä tehostamattomia osa-alueita ja hukkalämmön lähteitä.

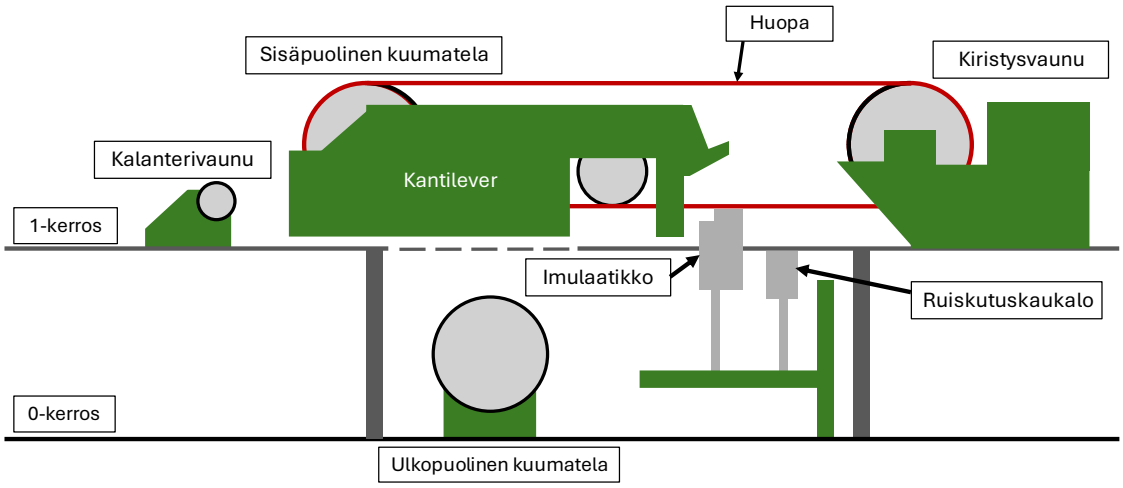
Energiataseen muodostamisen jälkeen tutkimus painottui koneen automaatiojärjestelmän asetuksiin ja ohjauksiin energiankulutuksen näkökulmasta. Viimeisessä tutkimusvaiheessa arvioitiin kirjallisuuskatsauksen, mittaustulosten ja automaatiojärjestelmän tietojen perusteella mahdollisuuksia tehostaa koneen energiankäyttöä ja lämmöntalteenottomahdollisuuksia.




***Kuva 4.1.*** *Työn tutkimusstrategia.*

## 4.2 Tutkimuskohde

Viimeistyskone 38 (jatkossa VK38) on puristinhuovan viimeistysvaiheessa käytettävä lämpökäsittelykone. Kyseisen koneen osuus huovan viimeistysvaiheen tuotannosta on merkittävä. Vuonna 2024 VK38 käsitteli 60 % koko viimeistämön tuotannosta. Viimeistyskäsittely sisältää pesun, lämpökäsittelyn, kalanteroinnin ja tietyillä tuotteilla myös polymeerikäsittelyn. Koneen rakenne on esitetty kuvassa 4.2.



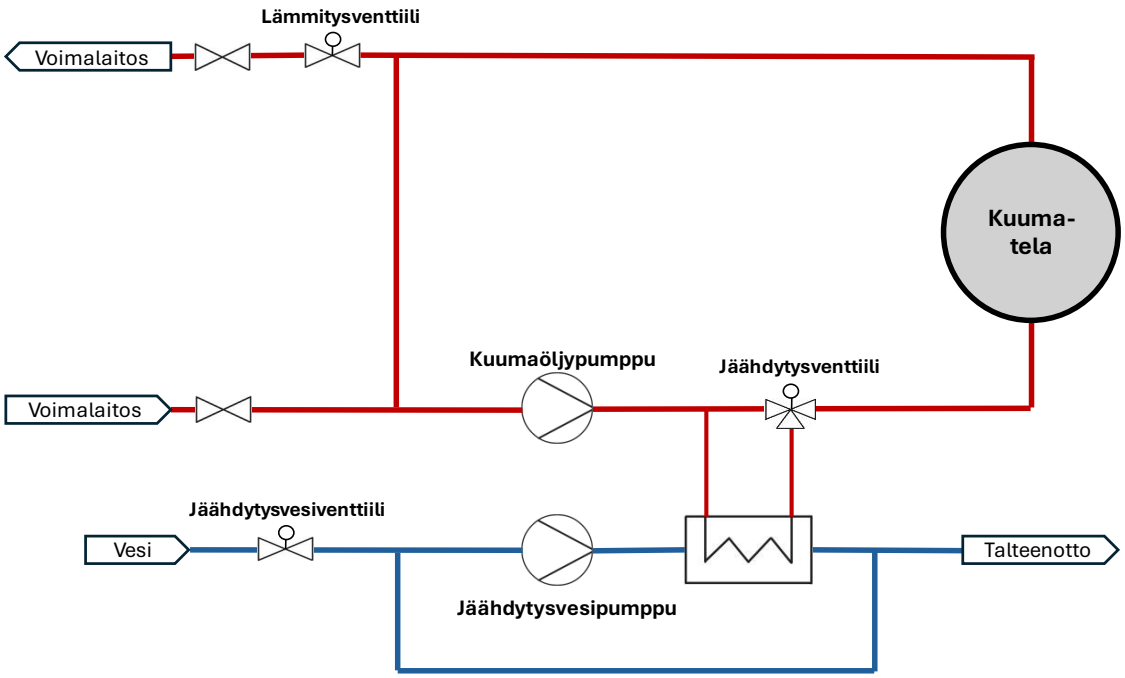

***Kuva 4.2.*** *VK38:n rakenne.*

Kone koostuu kantileveristä, kiristysvaunusta, kahdesta kuumatelasta, kalanterivaunusta sekä osaprosesseihin liittyvistä putkistoista, ruiskutuskaukalosta, imujärjestelmästä ja kemikaalisäiliöistä. Käsiteltävä huopa kulkee kuvan 4.2 mukaisesti sisäpuolisen kuumatelan ja kiristystelan kautta lenkkinä ja kiristysvaunua liikuttamalla huopa kiristetään haluttuun kireyteen. Kuumateloja käytetään huovan lämmitykseen. Kalanterivaunussa olevaa telaa painetaan kalanterointivaiheessa paineilmapalkeiden avulla huopaa vasten, jolloin saadaan simuloitua huovan toimintaolosuhdetta paperikoneessa. Konetta ohjataan valvomosta kahden teollisuus-PC:n avulla. Lisäksi telojen pyöritystä voidaan ohjata kaukosäätimellä. Ohjaukset on toteutettu ohjelmoitavalla logiikalla.

Itse koneen ajaminen ohjautuu reseptien mukaan. Reseptit haetaan ERP-järjestelmästä. Reseptissä jokainen viimeistyskäsittelyvaiheen toiminto on omalla rivillään ja vaiheesta toiseen siirrytään toiminnoille asetettujen ehtojen täytyttyä. Telojen lämmitys, kalanteroinnin paine, huovan jännitys, ruiskutusvaiheet sekä prosessi-ilmanvaihdon toiminta on reseptillä ohjattua.

## 4.3 Kuumatelojen lämmitys ja jäähdytys

Huovan viimeistyskäsittelyssä huopaa lämmitetään sen ominaisuuksien tasoittamiseksi. Lämmityksellä saadaan huopa haluttuun pituuteen ja leveyteen sekä minimoidaan näiden muuttuminen käytön aikana. Lämpökäsittely toteutetaan kahden kuumatelan avulla. Sisäpuolisella kuumatelalla lämmitetään huovan sisäpuolta ja ulkopuolisen telan avulla huovan ulkopuolta eli paperipuolta. Lämmityksen periaatekaavio sisältäen järjestelmän tärkeimmät komponentit on esitetty kuvassa 4.3.




***Kuva 4.3.*** *Kuumatelojen lämmityksen periaatekaavio. Punaisella kuumaöljykierto ja sinisellä jäähdytyskierto.*

Teloja lämmitetään voimalaitoksella maakaasukäyttöisellä kattilalla lämmitetyn lämmönsiirtonesteen, Shell Heat Transfer Oil S2 -kuumaöljyn, avulla. Kuumaöljyverkon lämpötila on 190–220 °C. Verkosta tulevaa kuumaöljyä kierrätetään telojen sisällä kuumaöljypumpun avulla. Lämmitystä ohjataan reseptin mukaan koneen valvomosta.

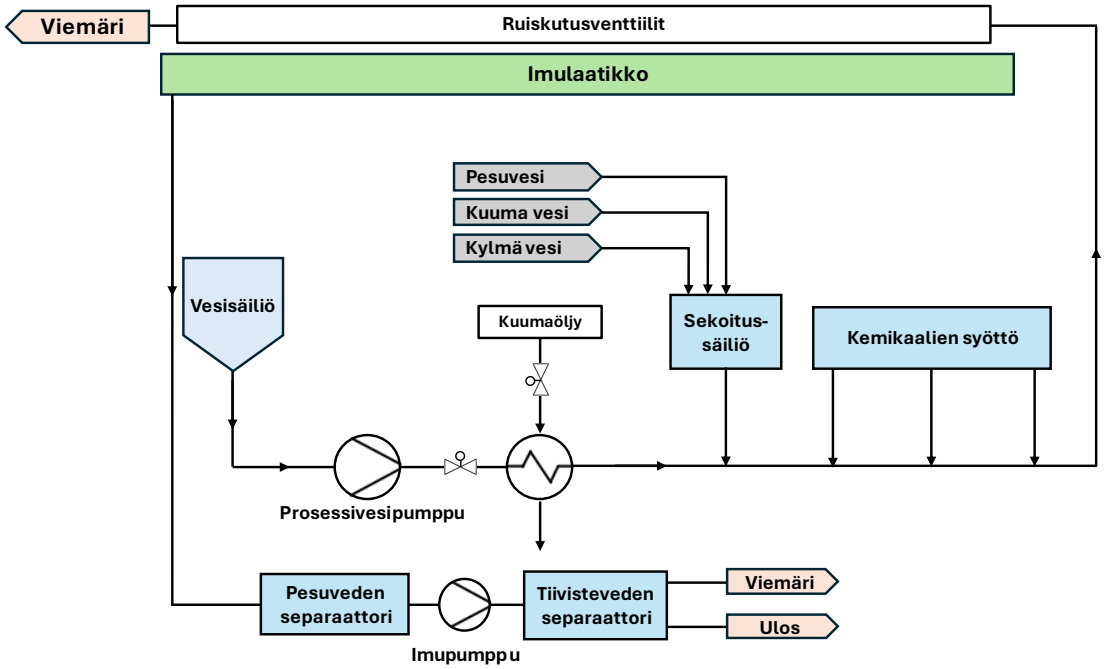
Telan lämpötilaa säädetään PID-säätimellä ohjatulla lämmitysventtiilillä. Lämpötilalle annetaan reseptin kautta tai valvomosta asetusarvo, jota lähestytään ennalta määritettyjen ramppien mukaisesti. Rampitusaika on määritetty logiikkaohjelmassa ja rampituksen lämpötilan nousun arvo on muutettavissa. Nykyisellään asetusarvon rampitukselle on määritetty arvo 8 °C/s. Reseptiajon jälkeen ulkopuolista telaa pidetään 90 °C lämpötilassa ja sisäpuolista telaa 55 °C lämpötilassa. Tällöin öljyä kierrätetään suljetussa kierrossa ja välillä säätimen ohjauksen mukaan otetaan runkolinjasta lämpimämpää öljyä tilalle.

Teloja jäähdytetään veden avulla, joka otetaan tehtaan läheisestä järvestä. Jäähdytystä ohjataan jäähdytysventtiilillä, joka on kolmitieventtiili. Jäähdytysvaiheessa tämä venttiili ohjaa kuumaöljyn lämmönvaihtimen kautta kuumatelalle. Tällöin lämmitysventtiili on kiinni ja öljyä kierrätetään suljetussa piirissä telan ja lämmönvaihtimen läpi, kunnes telalta lähtevän öljyn lämpötilan asetusarvo on saavutettu. Jäähdytykselle on asetettu sama rampitusarvo kuin telan lämmitysnopeudelle. Jäähdytyksen aikana tämä arvo määrittelee kuumateloille menevän öljyn jäähdytysnopeuden. Lämmönvaihtimelta lähtevän veden lämpötilalle on asetettu PID-säätimelle asetusarvoksi 60 °C, kun öljyn

lämpötila on yli 100 °C. Lämmönvaihtimelta lähtevä jäähdytysvesi ohjataan jäähdytysvesien talteenottosäiliöön, johon kerätään viimeistyskoneiden jäähdytysvedet myöhempää käyttöä varten. Talteenottoa säädellään lämpötilan mukaan siten, että yli 35 °C jäähdytysvesi ohjataan talteenottoon, mikäli säiliössä on tilaa ja muuten jäähdytysvesi ohjataan viemäriin.

## 4.4 Pesujärjestelmä

Pesujärjestelmä on viimeistyskoneen olennaisimpia toimintoja. Järjestelmällä tehdään huovalle pesun lisäksi kemikaalikäsittelyitä. Pesujärjestelmää ohjataan logiikalla reseptin pohjalta. Järjestelmän periaatekaavio on esitetty kuvassa 4.4.




***Kuva 4.4.*** *Pesujärjestelmän periaatekaavio.*

Pesujärjestelmä koostuu viimeistysvesisäiliöstä, taajuusmuuttajaohjatusta keskipakopumpusta, lämmönvaihtimesta, sekoitussäiliöstä, kemikaalisäiliöistä, ruiskutuslinjasta sekä imujärjestelmästä. Sekoitussäiliön ja kemikaalisäiliöiden kokonaisuuteen kuuluu taajuusmuuttajaohjatut vakiovirtauspumput sekä venttiilit. Imujärjestelmään kuuluu imulaatikko, pesuveden separaattori, imupumppu ja tiivisteveden separaattori.

Pesujärjestelmän käyttämä prosessivesi pumpataan viimeistysvesisäiliöstä lämmönvaihtimen kautta vakiopaineella pesusuuttimille, joilla se ruiskutetaan huopaan. Prosessivetenä käytetään talteenotettuja kuumatelojen jäähdytysvesiä. Viimeistysvesisäiliön pinnankorkeutta seurataan ja tarvittaessa vettä otetaan lisäksi

kaupungin verkosta. Vesi lämmitetään kuumaöljyllä lämpötilan asetusarvoon, joka on 60 °C. Lämmitystä ohjataan lämmönvaihtimen jälkeisen lämpötilamittauksen perusteella PID-säätimellä, joka ohjaa kuumaöljyn virtausta lämmönvaihtimelle.

Prosessivesivirtaukseen annostellaan sekoitusputkessa pesuaine ja kemikaaleja vakiovirtauspumpuilla. Sekoitussäiliöstä annostellaan erillinen kemikaaliliemi vesivirtaukseen. Käytettävät kemikaalit määräytyvät tuotekohtaisesti reseptin mukaan ja annostelu tehdään prosessiveden virtausmittaukseen perustuen. Kemikaalien annostelun jälkeen seos ruiskutetaan vakiopaineessa pesusuuttimien kautta huopaan huovan yläpuolelta. Samaan aikaan imulaatikon kautta imetään imupumpun muodostaman imupaineen avulla ylimääräinen vesi separaattoreihin, jossa imuvirtauksen sekaan syötetään tiivistevettä. Imupumpun käyntinopeutta ohjataan reseptillä tuotekohtaisesti. Tiivisteveden separaattorissa erotellaan ilma ja tiivistevesi. Ilma puhalletaan ulos katolle ja tiivistevesi pumpataan viemäriin. Viimeisen kemikaalikäsittelyn jälkeen putkiston lävitse ajetaan puhdasta vettä viemäriin kemikaalijäämien huuhtelemiseksi.

## 4.5 Polymeerikäsittelyjärjestelmä

Polymeerikäsittelyjärjestelmää käytetään tiettyjen huopien viimeistyskäsittelyssä polyuretaaniruiskutukseen. Järjestelmän toimintaa ohjataan edellä esiteltyjen järjestelmien tavoin reseptin kautta. Polymeerikäsittelyjärjestelmässä vettä käytetään suutintestiin, ruiskutukseen ja pesuun. Suutintestissä tarkistetaan ruiskutussuutinten toimivuus ennen kuin huopa on laitettu koneeseen. Testissä ajetaan pesuvettä ensin kierron läpi ja sen jälkeen ruiskutusventtiilejä avataan yksitellen.

Ruiskutusvaiheen jälkeen suoritetaan ruiskutuslaitteiston pesu. Tällöin vesi ajetaan ensin suutinpalkin kautta sekoitussäiliöön, kunnes sekoitussäiliön vaa’an lukema on saavuttanut halutun arvon. Sen jälkeen pestään suuttimet ja ajetaan sekoitussäiliö tyhjäksi alajätekonttiin. Seuraavaksi pestään suutinputket, jolloin vesi virtaa putkiston läpi päätyen sekoitussäiliöön tai viemäriin ja myöhemmässä pesuvaiheessa pelkästään viemäriin. Putket pestään useammassa vaiheessa, jolloin vesi virtaa eri suuntaan. Suutinputkien pesun jälkeen putkisto täytetään vedellä. Lopuksi pestään sekoitussäiliö, ja säiliöön jätetään vettä seuraavaa suutintestiä varten.

## 4.6 Prosessi-ilmanvaihtojärjestelmä

Viimeistyskoneen prosessi-ilmanvaihtoon kuuluu kolme poistoilmapuhallinta. Suurin osa ilmanvaihdosta tapahtuu huuvan poistoilmakanavan kautta. Tämän lisäksi on kaksi poistokanavaa kärynpoistoa varten. Kärynpoistoja tarvitaan huovan lämpökäsittelyssä syntyvien käryjen poistamiseksi, jotta sisäilman laatu pysyy riittävän hyvänä. Kaikkien poistoilmapuhaltimien toimintaa ohjataan VK38:n valvomosta tai reseptin avulla.

Huuvan poistoilmakanava sijaitsee suoraan viimeistyskoneen kantileverin yläpuolella. Puhallin on radiaalipuhallin ja se on mitoitettu 10 $m^3/s$ ilmamäärälle. Puhallinta ohjataan taajuusmuuttajalla ja viimeistyskoneen valvomosta puhaltimen tehostusasetusta voidaan muuttaa. Tehostamismahdollisuus on ± 30 % perusasetuksesta, joka on tällä hetkellä asetettu arvoon 60 % puhaltimen maksimikierrosnopeudesta. Puhaltimen käyntiä on siis mahdollista ohjata välillä 30–90 % maksimikierrosnopeudesta. Tehostuksen arvoa ei ohjata reseptillä ja käyttö vaihtelee koneenhoitajakohtaisesti. VK38:n alueen kahden tuloilmakoneen käyntinopeus seuraa huuvan poistoilmapuhaltimen tehostuksen asetusta siten, että alhaisemmalla huuvan tehostuksen arvolla myös tuloilmakoneet käyvät alhaisemmalla kierrosnopeudella.

Kärynpoistoista toinen sijaitsee kantilever-rakenteen sisällä. Tämä poisto toimii siten, että kantileveriin puhalletaan halli-ilmaa, joka poistetaan poistoilmapuhaltimella ulos katolle. Kantileveriin puhallettavalle ilmalle on asennettu lämmöntalteenotto poistoilmakanavasta. Kantileverin poistoilmapuhallin ei ole taajuusmuuttajaohjattu ja se on mitoitettu ilmamäärälle 1,7 $m^3/s$. Tuloilmapuhallin ja poistoilmapuhallin on asetettu menemään päälle, kun sisäpuolisen tai ulkopuolisen kuumatelan lämpötila on yli 90 °C tai kun puhaltimien käynti on asetettu reseptin askeleessa menemään päälle. Puhaltimet menevät pois päältä, kun kummankin kuumatelan lämpötilat ovat alle 80 astetta tai kun ne ohjataan reseptillä pois päältä. Nykyisellään asetuksessa ei huomioida ulkopuolisen telan asentoa, eli vaikka tela olisi laskettuna kotiasemaan lämpötilan ollessa yli 80 °C toimii puhallin edelleen. Tähän on jo suunnitteilla muutos siten, että ulkopuolisen telan sijainti huomioidaan.

Lisäkärynpoiston kautta puhalletaan poistoilma sivuseinältä suoraan ulos. Tämän kanavan aksiaalipuhallin toimii ON/OFF periaatteella ja sen tarkoitus on poistaa käsittelyn aikana syntyviä käryjä. Lisäkärynpoisto on asetettu menemään päälle sisäpuolisen kuumatelan lämpötilan tai reseptin mukaan. Puhallin menee päälle telan lämpötilan ylittäessä 90 °C ja pois päältä lämpötilan alittaessa 85 °C.

## 4.7 Mittaustutkimus

Mittaustutkimuksen tavoitteena oli kerätä edustavaa tietoa VK38:n energiankäytöstä. Tutkimus suoritettiin yhteistyössä kolmannen osapuolen kanssa, joka tarjosi mittalaitteiston ja osaamista tutkimuksen käyttöön. Mittausdata oli tärkeässä osassa työssä muodostettavan viimeistyskoneen energiataseen ja kehitysehdotusten kannalta.

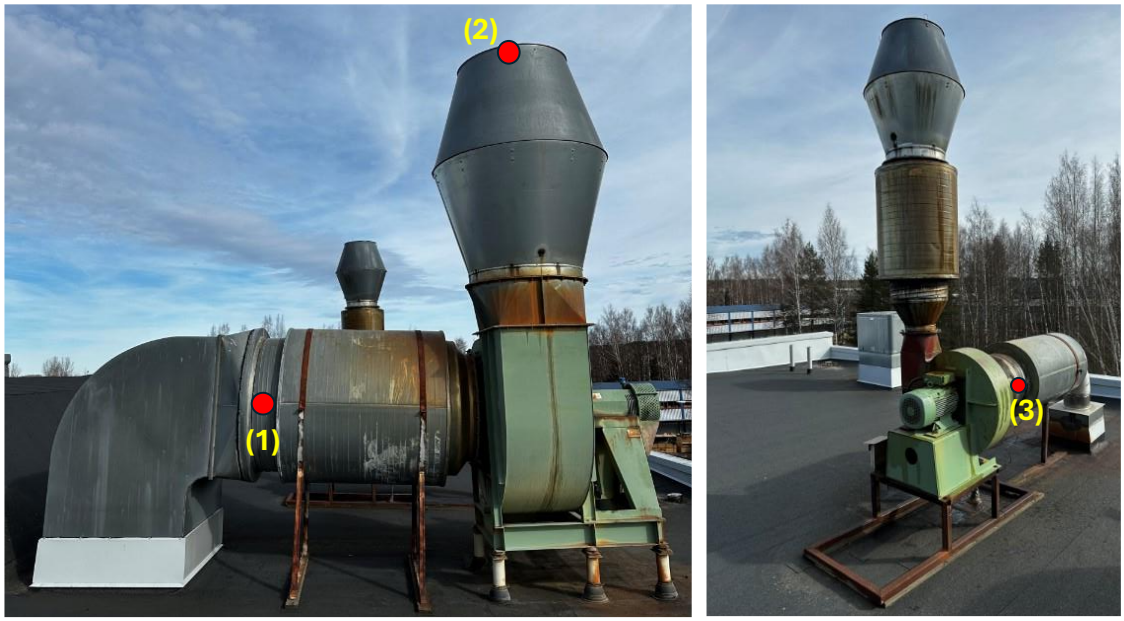
Mittauskohteita oli useita ja mittaukset suoritettiin kahdessa osassa. Lisäksi suoritettiin täydennysmittaus. Mitattavia virtoja olivat pesujärjestelmän käyttämä prosessivesi, kuumatelojen jäähdytysvesi ja prosessi-ilmanvaihdon poistoilmat. Sähkönkulutus mitattiin eri laitteilta. Polymeerikäsittelyjärjestelmän osalta mittauksia ei tehty, koska sen osuus VK38:n kokonaisenergiankulutuksesta on pieni johtuen polymeerikäsiteltävien huopien pienemmästä määrästä. Kuumatelojen kuumaöljykierrosta ei tehty mittauksia, sillä osa laskennassa tarvittavista suureista saatiin koneen järjestelmän trenditiedoista ja virtausmittausta ei ollut mahdollista tehdä.

Poistoilmavirrat mitattiin huuvan poistoilmapuhaltimelta, kantileverin kärynpoiston kanavasta sekä lisäkärynpoistosta. Kantileverin kärynpoistopuhaltimen virtausnopeuden mittaus suoritettiin äänenvaimentimen jälkeen ennen puhallinta kuvaan 4.5 merkatusta kohdasta 3. Virtausnopeus mitattiin kahdella eri kokoisella pitot-putkella hetkellisenä mittauksena puhaltimen ollessa päällä. Lämpötila ja ilman kosteus mitattiin jatkuvana mittauksena viikon ajanjaksolta dataloggeriin kytketyllä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden yhdistelmämittarilla. Yhdistelmämittarissa lämpötilaa mitataan termistorianturilla ja suhteellista kosteutta kapasitiivisella kosteusanturilla. Lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin myöhemmin uudelleen täydennysmittauksissa.

Lisäkärynpoiston poistoilman virtausnopeus mitattiin pitot-putkella hetkellisenä mittauksena yhden kanavaan poratun reiän kautta. Samaan kohtaan asetettiin lämpötila- ja kosteusmittaus viikon mittausjaksolle. Tilavuusvirta saatiin myös kanavan kahteen haaraan asennettujen IRIS mittaus- ja säätölaitteiden avulla. IRIS-pelti on paine-eron mittaamiseen perustuva laite, joka on yksi reikälevymittauksen sovellus.

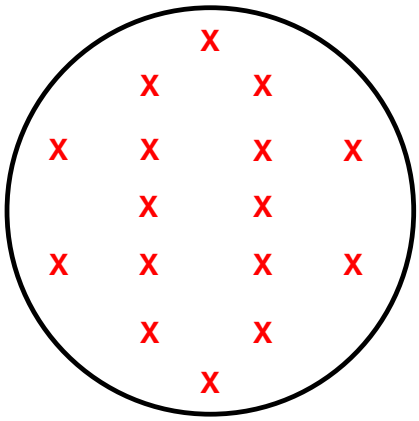
Huuvan poistoilmasta mitattiin virtausnopeus, lämpötila ja suhteellinen kosteus. Mittauskohtia oli kaksi; kanavan mutkan jälkeen ennen äänenvaimenninta ja puhaltimen jälkeen suppilon päältä. Käytettyjä mittalaitteita olivat pitot-putki, kuumalanka-anemometri, DPM-anemometri sekä dataloggeriin kytketty lämpötilan ja kosteuden yhdistelmämittari. Lämpötila ja kosteus mitattiin kuvaan 4.5 merkatuista pisteistä 1 ja 2. Lisämittaus suoritettiin lämpötilalle ja kosteudelle mittauskohdasta 1. Virtausnopeutta mitattiin hetkellisesti kuumalangalla, pitot-putkella sekä DPM-anemometrillä. DPM-

anemometrimittaus suoritettiin kuvaan 4.5 merkatusta kohdasta 2 suppilon päältä. Muita virtausnopeuden mittareita käytettiin kohdasta 1 tehtyihin mittauksiin.




***Kuva 4.5.*** *Huuvan poistoilmapuhallin (vasemmalla) ja kantileverin kärynpoiston poistoilmapuhallin sekä mittauskohdat numeroituna.*

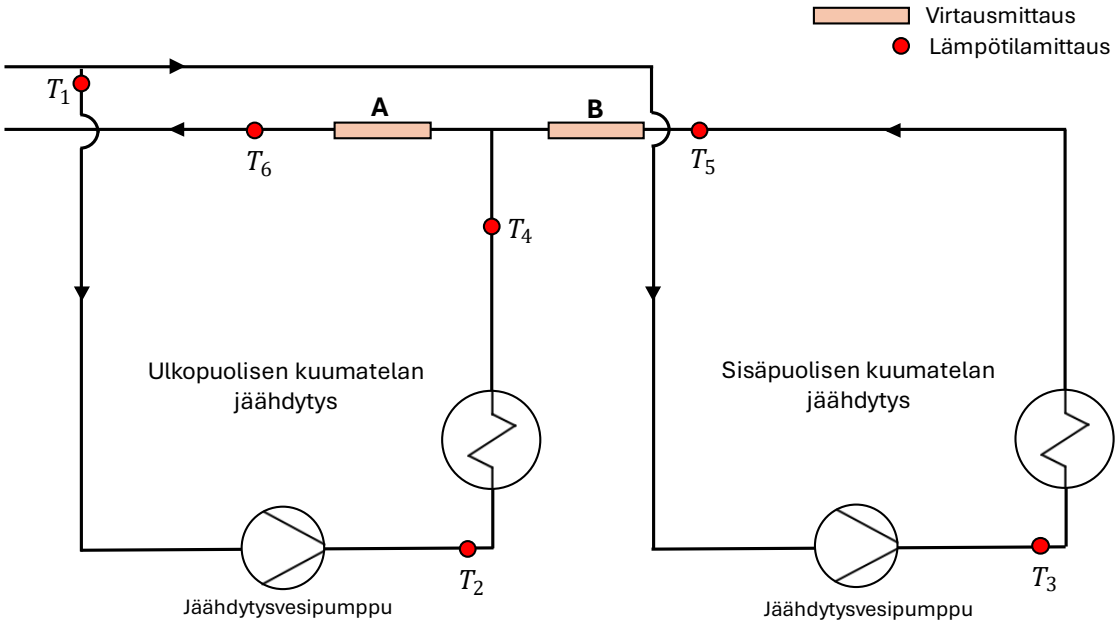
Huuvan poistoilman virtausnopeus mitattiin puhaltimen eri käyntinopeuksilla. Kaikilla kolmella tehostuksen arvolla mitattiin ainoastaan pisteestä 2. Tarkat mittauskohdat pisteestä 2 suoritetuille mittauksille on esitetty kuvassa 4.6.



***Kuva 4.6.*** *Huuvan poistoilman virtausnopeuden mittauskohdat sijoitettuna mittauskohdan 2 poikkileikkaukseen.*

Kuumatelojen jäähdytysvesien osalta mitattavat suureet olivat tilavuusvirta ja lämpötila. Sekä virtaus-, että lämpötilamittaus toteutettiin samanaikaisesti viikon mittausjaksolla. Jäähdytysveden tilavuusvirta mitattiin kahdesta kohdasta ultraäänimittarilla. Mittauskohdat valittiin siten, että kuvaan 4.7 merkattu mittari B mittasi sisäpuolisen

kuumatelan jäähdytysveden tilavuusvirtaa ja mittari A kummankin kuumatelan jäähdytysveden tilavuusvirtaa. Jäähdytysveden lämpötilaa mitattiin dataloggereihin kytketyillä termopariantureilla, jotka asetettiin eristepalan alle putken pintaan. Kaikki jäähdytysvesien mittauskohdat on esitetty kuvassa 4.7.




***Kuva 4.7.*** *Jäähdytysvesipiirin mittauskohdat.*

Prosessiveden osalta mitattiin viimeistysprosessiin menevän veden lämpötilaa lämmönvaihtimen yli jatkuvana mittauksena. Mittalaitteina käytettiin kahta dataloggeriin kytkettyä termoparianturia ja tämä mittaus suoritettiin toisessa viikon kestäneessä mittausjaksossa. Veden tilavuusvirta saatiin automaatiojärjestelmän prosessiveden virtausmittauksen trenditiedoista. Prosessiveden lämpötilan mittauskohdat on esitetty kuvassa 4.8.

***Kuva 4.8.*** *Prosessiveden lämmityksen lämmönvaihdin. Prosessiveden lämpötilan mittauskohdat osoitettu nuolilla.*

Sähkömittausten avulla selvitettiin tärkeimpien yksittäisten toimilaitteiden sähkövirtaa. VK38:n telojen pyörityksen ja mekaanisten liikkeiden aikaansaamien komponenttien sekä imupumpun kulutus mitattiin pääsyötöstä ja muiden toimilaitteiden kulutus kunkin toimilaitteen lähdöstä. Yksittäisiä mitattuja toimilaitteita olivat huuvan poistoilmapuhallin, kantileverin ja lisäkärynpoiston poistoilmapuhaltimet, jäähdytysvesipumput, kuumaöljypumput ja prosessivesipumppu. Täydennysmittauksessa mitattiin huuvan ja kantileverin kärynpoiston puhaltimien sähkönkulutus uudelleen, jotta saatiin tarkempi käsitys puhaltimien käynnistä laskentaa varten.

## 4.8 Energiataseen muodostaminen

Mittausdatan perusteella laskettiin VK38:n energiatase. Taseessa huomioitiin koneen sähkönkulutus, prosessilämpö, prosessivesi sekä poistovirrat prosessi-ilmanvaihdon poistoilman lämpösisältöön ja jäähdytysvesiin jaoteltuna. Prosessilämpöön kuuluu sisä- ja ulkopuoliselle kuumatelalle kuumaöljyllä tuotu sekä prosessiveden lämmitykseen käytetty lämpöenergia. Paineilma päätettiin rajata tutkimuksen ulkopuolelle ja riittävä

tarkastelu sen osalta olisi vaatinut kompressorin sähkönkulutuksen mittaamista sekä paineilmavuotojen kartoittamista.

Yleisesti virtaavan fluidin lämpöteho lasketaan kaavalla

$$\dot{Q} = \dot{m}c_pT = \dot{m}h, \tag{4.1}$$

missä $\dot{m}$ on fluidin massavirta, $c_p$ fluidin ominaislämpökapasiteetti, $T$ fluidin lämpötila ja $h$ entalpia. Prosessiveteen tuotu lämpöteho laskettiin lämpötilamittauksia ja koneen järjestelmästä saatuja virtausmäärän trenditietoja käyttäen kaavalla

$$\dot{Q} = \dot{m}c_{p,w}(T_2 - T_1), \tag{4.2}$$

missä $\dot{m}$ on veden massavirta, $c_{p,w}$ veden ominaislämpökapasiteetti, $T_1$ prosessiveden lämpötila ennen lämmönvaihdinta ja $T_2$ prosessiveden lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen. Massavirran sijaan tilavuusvirtaa käytettäessä lämpöteho laskettiin kaavalla

$$\dot{Q} = \rho_w\dot{V}c_{p,w}(T_2 - T_1), \tag{4.3}$$

missä $\rho_w$ on veden tiheys ja $\dot{V}$ prosessiveden tilavuusvirta. (Jouhara et al. 2018) Lämpöenergia laskettiin kertomalla kaavan 4.3 avulla laskettu lämpöteho käyntiajalla. Laskenta suoritettiin aika-askeleittain minuutin aikaväleillä, sillä suurin osa mittausdatasta oli minuutin aikaresoluutiolla. Koneen automaatiojärjestelmän trenditiedoista noudettu data oli sekunnin tai viiden sekunnin aikaresoluutiolla, joten data käsiteltiin minuutin aikaresoluutiolle keskiarvottamalla. Minuutin aika-askeleilla lämpöenergia laskettiin yksikössä kWh jakamalla laskettu lämpöteho aika-askeleen kestolla tunneissa eli luvulla 60.

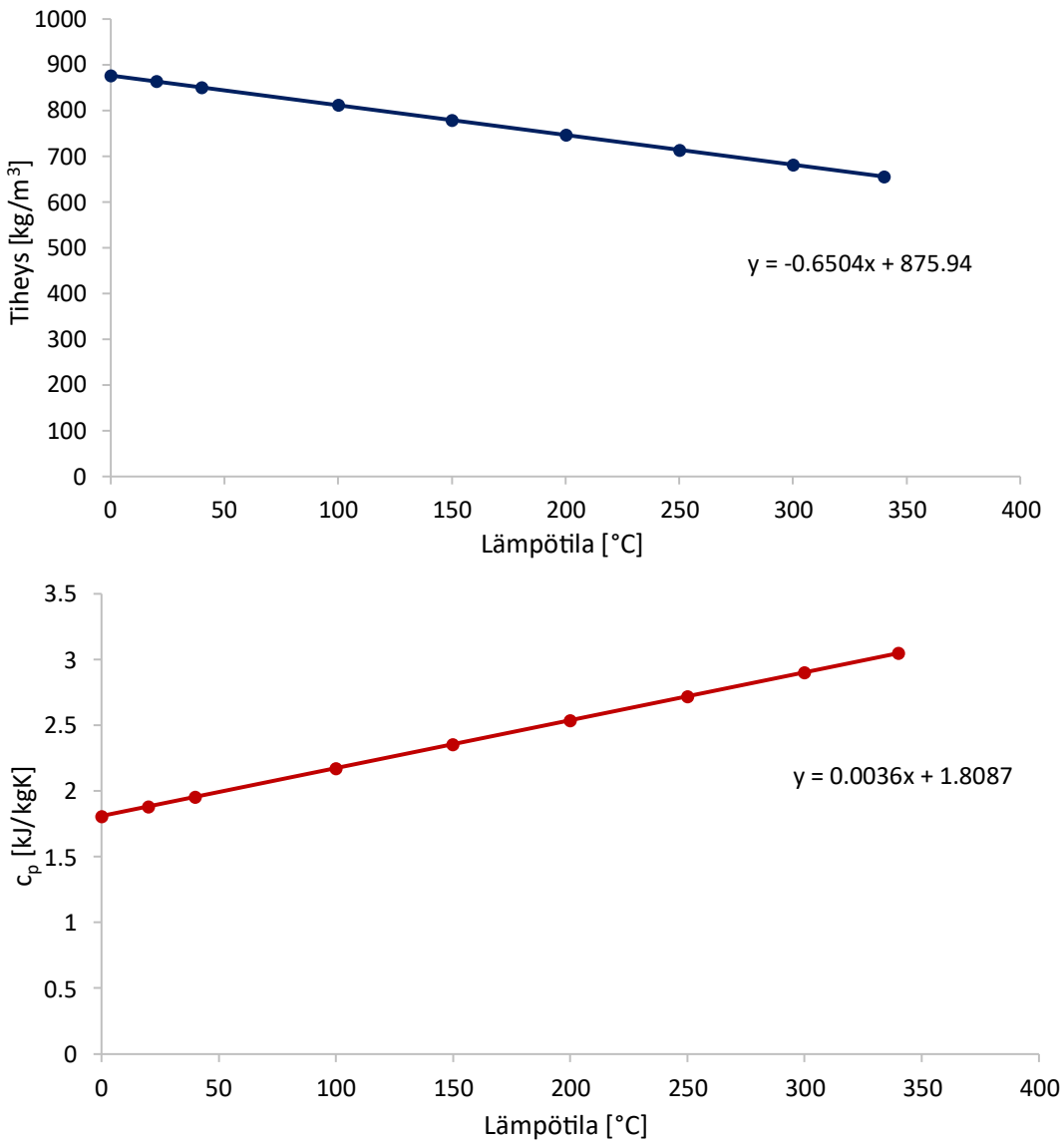
Jäähdytysveden lämpöteho ja lämpöenergia laskettiin samoja kaavoja käyttäen kuin edellä kuvatussa prosessiveden laskennassa. Laskenta suoritettiin erikseen kummallekin kuumatelalle ja ennen varsinaista laskentaa virtausmittauksen tuloksia käsiteltiin siten, että kuvaan 4.7 merkatun mittarin A tuloksista vähennettiin mittarin B mittaustulos. Virtausmittari A mittasi kummankin kuumatelan jäähdytysveden tilavuusvirtaa ja mittari B sisäpuolisen telan jäähdytysveden tilavuusvirtaa, jolloin erotuksen tuloksena saatiin ulkopuolisen telan jäähdytysveden tilavuusvirta. Mikäli mittarin B datan mukaan sisäpuolista telaa ei jäähdytetty, asetettiin näille aika-askeleille ulkopuolisen telan jäähdytysveden tilavuusvirraksi mittarin A lukema. Laskennassa käytetyt lämpötilat valittiin eri kohdista mitattuja lämpötiloja arvioimalla. Kummankin telan laskennassa lämmönvaihtimelle menevän veden lämpötilan arvona päädyttiin käyttämään kuvaan 4.7 merkityn mittarin $T_1$ tuloksia. Lämmönvaihtimelta lähtevän veden lämpötilan arvoina käytettiin sisäpuolisen kuumatelan laskennassa mittarin $T_5$ tuloksia ja

ulkopuolisen telan osalta mittarin $T_6$ tuloksia. Jäähdytysprosessin tasetarkastelua varten käytettiin kaavaa 4.1 vaihtimelle menevän ja vaihtimelta lähtevän veden hetkellisen lämpötehon ja energian laskemiseen. Kaavaa 4.3 käytettiin kuumatelojen lämmityspiirissä kiertävästä kuumaöljystä veteen siirtyvän lämpötehon laskentaan. Laskennassa hyödynnettiin jäähdytysvesipumppujen sähkömittausten tuloksia, jolloin veden tilavuusvirrat saatiin suodatettua pumppujen käynnin mukaan. Lämpötehosta laskettiin lämpöenergia aika-askeleen keston avulla samoin kuin prosessiveden laskennassa.

Kuumaöljyllä kuumateloille tuotu prosessilämpö arvioitiin koneen ohjausjärjestelmän trenditietoja, kuumaöljypumppujen sähkömittausten tuloksia ja pumppujen käyrästöjä hyödyntäen. Arviointi tehtiin kummallekin kuumatelalle erikseen. Tavoitteena oli saada riittävän hyvä arvio kuumaöljyn tilavuusvirrasta, sillä virtausmittausta ei voinut tehdä eikä sitä ole koneen järjestelmässä kiinteänä mittauksena. Kuumaöljypumpun kilvessä ilmoitettu tilavuusvirta ei myöskään ole järjestelmän todellinen arvo johtuen piirin painehäviöistä.

Pumpun tuottokäyrän ja sähkötehon avulla arvioitiin pumpun tuottama kuumaöljyn tilavuusvirta. Sähköteho kerrottiin hyötysuhteella, joka pumpun kilpeen merkatulla nostokorkeudella on noin 80 %. Hyötysuhteella kerrottua sähkötehon arvoa käytettiin tuottokäyrästä muodostettuun sovitekäyrään, jonka avulla saatiin arvio tilavuusvirralle. Laskennassa käytettiin kuumaöljyn tiheydelle ja ominaislämpökapasiteetille lämpötilariippuvaisia sovitteita, jotka muodostettiin kuumaöljyn aineominaisuustaulukoiden avulla. Tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin sovitteet lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 4.9. Lämpötilariippuvuus huomioitiin, koska kuumaöljyn lämpötila vaihtelee prosessissa laajalla lämpötilavälillä. Kuumaöljyn tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin laskennassa käytettiin teloille menevän ja teloilta lähtevän öljyn lämpötilojen keskiarvoa.

VK38:n ohjausjärjestelmän trenditiedoista haettiin kuumaöljypumppujen sähkömittausten ajalta kuumaöljyn lämpötilat ennen ja jälkeen kuumatelan. Prosessilämmön arvioinnissa huomioitiin ainoastaan telojen lämmitysvaihe, jolloin telalle menevän kuumaöljyn lämpötila on telalta poistuvan öljyn lämpötilaa korkeampi. Jäähdytysvaiheessa telalle menevän öljyn lämpötila on telalta poistuvaa alhaisempi. Myös kuumatelojen prosessilämmön laskennassa käytettiin yhden minuutin aikaresoluutiota. Prosessilämpöteho laskettiin kutakin aika-askelta kohti kuumaöljyn aineominaisuuksia, edellä kuvatulla menetelmällä arvioitua tilavuusvirtaa ja telan yli olevaa lämpötilaeroa käyttäen kaavalla 4.3.




***Kuva 4.9.*** *Kuumaöljyn tiheys ja ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona. Pisteet ovat kuumaöljyn toimittajan ilmoittamia arvoja.*

Prosessi-ilmanvaihdon poistoilmavirtojen laskennassa käytettiin mitattujen virtausnopeuksien avulla arvioitua ilman tilavuusvirtaa sekä lämpötila- ja kosteusmittausten ja puhaltimien sähkömittausten tuloksia. Poistoilman tilavuusvirta $q_v$ laskettiin huuvan poistoilmalle kaavalla

$$q_v = VA, \tag{4.4}$$

missä $V$ on virtausnopeus ja $A$ kanavan pinta-ala. Laskennassa käytettiin DPM-anemometrillä mittauspisteestä 2 saaduista virtausnopeuden tuloksista keskiarvotettua nopeuden arvoa. Kanavan pinta-ala laskettiin kuvaan 4.5 merkatusta pisteestä 2 mitatun kanavan säteen avulla ympyrän pinta-alan kaavalla. Kantileverin kärynpoiston

ilmamääränä päädyttiin lopulta käyttämään puhaltimen mitoitettua ilmamäärää 1,7 $m^3/s$. Lisäkärynpoiston ilmamäärä laskettiin pitot-mittauksesta saatua virtausnopeuden arvoa käyttäen kaavalla 4.4 sekä vaihtoehtoisesti IRIS -mittaus- ja säätölaitteiden lukemien avulla kaavalla

$$q = k\sqrt{\Delta p}, \tag{4.5}$$

missä $\Delta p$ on laitteesta luettu paine-ero ja $k$ on laitteen valmistajan taulukoista saatu virtauskerroin (Wydrych et al. 2025). Kahden mittalaitteen tiedoilla lasketut poistoilman tilavuusvirrat laskettiin yhteen lisäkärynpoiston kokonaisilmamäärän saamiseksi. Lopulta laskennassa käytettiin pitot-mittaukseen perustuvan tilavuusvirran sekä mittaus- ja säätölaitteen lukemien avulla kaavalla 4.5 lasketun tilavuusvirran keskiarvoa.

Kostean poistoilmavirran lämpöenergiaa laskettaessa kokonaisentalpia laskettiin kaavalla

$$h_{tot} = c_{p,ilma}T + \omega\left(h_{L,w} + c_{p,vesihöyry}T\right), \tag{4.6}$$

missä $h_{tot}$ on kostean poistoilman kokonaisentalpia, $c_{p,ilma}$ on kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti, $\omega$ kostean ilman absoluuttinen kosteus, $h_{L,w}$ veden höyrystymislämpö, $c_{p,vesihöyry}$ vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti ja $T$ mitattu poistoilman lämpötila (Arora 2012). Mittaustutkimuksessa mitattiin poistoilman suhteellinen kosteus. Kaavassa 4.6 käytetty absoluuttinen kosteus eli vesihöyryn ja kuivan ilman massojen suhde laskettiin kaavalla

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_{kuiva\ ilma}}, \tag{4.7}$$

mikä voidaan esittää veden ja ilman moolimassojen suhteen, suhteellisen kosteuden $RH$, poistoilmavirran kokonaispaineen $p_{tot}$ ja vesihöyryn saturaatiopaineen $p_{sat}$ avulla muodossa

$$\omega = 0.622\frac{p_{H_2O}}{p_{ilma}} = \frac{0.622\left(\frac{RH}{100}\right)p_{sat}}{p_{tot} - \left(\frac{RH}{100}\right)p_{sat}}. \tag{4.8}$$

Ilman kokonaispaineen arvona käytettiin arvoa 101,3 kPa. Saturaatiopaine arvioitiin kaavalla

$$p_{sat} = p_0 e^{\left(11.78\frac{T-372.79}{T-43.15}\right)}, \tag{4.9}$$

missä $p_0 = 10^5$ Pa ja $T$ on ilman lämpötila Kelvineinä. (Arora 2012)

Poistoilman tiheys arvioitiin ideaalikaasun tilanyhtälöä käyttäen huomioimalla ilman kosteus ja lämpötila. Ilmassa olevan vesihöyryn osapaine laskettiin suhteellisen kosteuden avulla kaavalla

$$p_{H_2O} = \varphi p_{sat,} \tag{4.10}$$

missä $\varphi$ on ilman suhteellinen kosteus ja $p_{sat}$ vesihöyryn saturaatiopaine. Ilmassa olevan veden tiheys laskettiin käyttäen vesihöyryn osapainetta, veden moolimassaa sekä mitattua ilman lämpötilaa. Kuivan ilman tiheys laskettiin kuivan ilman osapaineen, kuivan ilman moolimassan ja lämpötilan avulla. Kuivan ilman osapaine saatiin kokonaispaineen ja vesihöyryn osapaineen erotuksena. Kokonaispaineeksi oletettiin normaali ilmanpaine, 101,3 kPa. Tiheydet laskettiin kaavalla

$$\rho = \frac{p_i M_i}{R T_{ilma}}, \tag{4.11}$$

missä $p_i$ on laskettavan komponentin osapaine, $M_i$ laskettavan komponentin moolimassa, $R$ ideaalikaasuvakio ja $T_{ilma}$ mitattu ilman lämpötila. Kaikissa huuvan poistoilman laskentavaiheissa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvona käytettiin mittauspisteestä 1 mitattuja arvoja.

Poistoilmavirtojen laskennassa hyödynnettiin puhaltimien sähkömittauksia. Sähkömittauksista saatiin selville puhaltimien käynti, minkä mukaan virtausmäärät saatiin sovitettua oikeille aika-askeleille. Huuvan poistoilmapuhaltimen tehostuksen asetukset saatiin myös selville sähkömittauksista. Huuvan poistoilman tilavuusvirta sovitettiin laskennan aika-askeleille ehtolauseella, jolla saatiin kohdistettua mittauksien avulla lasketut tilavuusvirran arvot täsmällisesti. Laskenta suoritettiin aika-askeleittain minuutin aika-askeleella. Mittauksiin perustuvassa laskennassa käytetyt alkuarvot on esitetty taulukossa 4.1.

***Taulukko 4.1.*** *Energiataseen muodostamisen eri laskentavaiheissa käytetyt alkuarvot ja vakiot.*

| Suure | Vesi | Vesihöyry | Kuiva ilma | Yksikkö |
|---|---|---|---|---|
| Ominaislämpökapasiteetti, $c_p$ | 4,19 | 1,86 | 1,005 | kJ/kgK |
| Tiheys, $\rho$ | 1000 | - | 1,293 | kg/m$^3$ |
| Höyrystymislämpö, $h_L$ | 2501 | - | - | kJ/kg |
| Moolimassa, $M$ | 0,018 | 0,018 | 0,029 | kg/mol |

Sähkömittausten tuloksena saaduista sähkövirran arvoista laskettiin mittauskohteiden hetkelliset sähkötehon arvot sekä niiden kuluttama sähköenergia. Sähköteho laskettiin kolmivaihejärjestelmän tapauksessa kaavalla

$$P = \sqrt{3}\, UI, \tag{4.12}$$

missä $U$ on jännite, jonka suuruus on 400 V ja $I$ on mitattu sähkövirta. Sähkövirran arvot mitattiin 30 sekunnin välein. Sähkötehon avulla laskettiin mittauksen kohteena olleiden komponenttien sähkönkulutus kertomalla yksittäisen aika-askeleen sähkötehon arvo aika-askeleen kestolla tunneissa eli luvulla 1/120 ja summaamalla aika-askeleiden tulokset koko mittausjakson ajalta.

Viimeistyskoneen energiankulutus laskettiin kaikkien energiavirtojen osalta luvussa 3 esitellyn kaavan 3.1 mukaisesti ominaisenergiankulutuksena. Sen muodostamista varten tuotannonohjausjärjestelmästä haettiin VK38:n tuotantomäärät kunkin mittausjakson ajalta. Edellä kuvatuilla menetelmillä lasketut meno- ja poistovirtojen energiat jaettiin tuotantomäärällä, jolloin tuloksena saatiin energiavirroittain jaoteltu energiankulutus viimeisteltyä huopatonnia kohti yksikössä $kWh/t$.

## 4.9 Säästö- ja talteenottopotentiaalin arviointimenetelmät

Viimeistyskoneen hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien arvioinnissa käytettiin luvussa 2 kuvattuja menetelmiä. Energiavirtojen hyödyntämispotentiaalia arvioitiin kuvan 2.6 mukaisella luokittelulla. Tarkempaan arviointiin käytettiin mittaus- ja laskentatuloksia sekä kuvan 2.5 mukaisia arvioinnin vaiheita. Mittaustuloksiin pohjautuvasta laskennasta saatiin selville energiavirtojen lämpötilatasot, virtausmäärät sekä aikaprofiilit. Lämmönlähteiden ominaisuuksien perusteella rajattiin mahdolliset lämmöntalteenoton teknologiat luvussa 2 esitettyjen teknologioiden joukosta. Näin selvitettiin sekä termodynaaminen että tekninen potentiaali.

Soveltuvaa teknistä potentiaalia arvioitiin tunnistettujen lämmönkäytön kohteiden avulla sekä viimeistyskoneen osaprosessien muodostamaa kokonaisuutta arvioimalla. Kohteeseen sopivia teknisiä ratkaisuja ja niiden vaatimuksia selvitettiin alan yrityksille kohdistetuilla sähköpostitiedusteluilla, jotka keskittyivät kohteeseen sopivan lämmönvaihdintyypin, talteenottojärjestelmän yleisten vaatimusten sekä poistoilman likaisuuden aiheuttamien haasteiden selvittämiseen. Tiedustelun kohteena olevia yrityksiä olivat Retermia, Mastervent, Kesair sekä Finess Energy. Saatujen vastausten pohjalta koostettiin vaihtoehdot huuvan poistoilman lämmöntalteenottoratkaisulle.

Poistoilman lämmöntalteenottopotentiaalia arvioitiin myös laskennallisesti kaavaa 4.3 käyttäen. Arviossa huomioitiin ainoastaan kuivan ilman tuntuva entalpia ja tiheys

käyttäen taulukossa 4.1 esiteltyjä kuivan ilman aineominaisuuksia. Talteenottojärjestelmän osalta tehtiin oletus, että poistoilman lämpötila talteenoton jälkeen on 8 °C. Poistoilman tilavuusvirran arvona käytettiin mittaustuloksista laskettuja tilavuusvirtoja. Laskenta suoritettiin suoralle rekuperatiiviselle lämmönsiirrolle ja nestekiertoiselle järjestelmälle kahdella eri huuvan poistoilmapuhaltimen käyttötavalla. Lämmönsiirron hyötysuhteen arvoina käytettiin luvuissa 2.5 ja 2.6 esiteltyjä kyseisten lämmönsiirtoteknologioiden hyötysuhteiden arvoja. Laskennan lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.2.

***Taulukko 4.2.*** *Poistoilman lämmöntalteenottopotentiaalin ja tuloilman lämmitystarpeen arvioinnissa käytetyt laskennan alkuarvot sekä toteutuneet keskimääräiset energian hinnat.*

| **Suure** | | **Poistoilma** | **Tuloilma** |
|---|---|---|---|
| Lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen [°C] | | 8,0 | 18,0 |
| Ilman tilavuusvirta [$m^3/s$] | Huuvan tehostus: 0 % | Mittaustuloksista | 7,5 |
| | Huuvan tehostus: +30 % | | 8,9 |
| Hyötysuhde | Rekuperatiivinen suora lämmönsiirto | 0,7 | |
| | Nestekiertoinen järjestelmä | 0,6 | |
| | | **Maakaasu** | **Sähkö** |
| Energian hinta [€/MWh] | | 85 | 73 |

Lämmöntalteenottopotentiaalin tarkastelussa oleellista oli huomioida lämmön käyttökohteen kuluttama lämpöteho. Arviointi suoritettiin VK38:n alueen kahden tuloilmakoneen tuloilman lämmitystarpeelle. Hetkellinen kuivan tuloilman lämmitysteho laskettiin kaavalla 4.3. Laskennassa käytettiin lähtötietoina Tampereen vuoden 2024 kuukausittaisia keskilämpötiloja, jotka etsittiin Ilmatieteen laitoksen tietokannasta. Lisäksi käytettiin tuloilman mitattua ilmamäärää ja oletettiin tuotantotiloihin puhallettavalle tuloilmalle vakiona pysyvä lämpötila. Kaavassa 4.3 käytettävä lämpötilaero saatiin ulkoilman lämpötilan ja tuloilman lopullisen lämpötilan avulla. Tuloilman tilavuusvirta mitattiin erillisenä tutkimuksena tämän työn aikana kahdella eri tuloilmakoneen käyntinopeudella. Tuloilman lämmitystarpeen laskenta suoritettiin lämmityskauden ajalle ja lämmityskauden rajaksi asetettiin 15 °C ulkolämpötila.

Tuloilman lämmitystarpeen arvioinnissa käytetyt laskennan lähtötiedot ja toteutuneet vuoden 2024 keskimääräiset energian hinnat on esitetty taulukossa 4.2.

Koska tuloilman määrä säätyy huuvan poistoilmapuhaltimen käynnin mukaan, suoritettiin sekä lämmöntalteenottopotentiaalin että tuloilman lämmitystarpeen laskenta kahdella eri huuvan tehostuksen käyttötavalla. Toisessa huuva käy koko lämmityskauden ajan +30 % tehostuksella ja toisessa se käy 95 % lämmityskaudesta tehostuksen arvolla 0 % ja loput lämmityskaudesta tehostuksen arvolla +30 %. Ilmatieteen laitoksen ilmoittamat kuukauden keskilämpötilat Tampereen Härmälän mittausasemalta vuodelta 2024 on esitetty taulukossa 4.3.

***Taulukko 4.3.*** *Vuoden 2024 kuukausittaiset keskilämpötilat Tampereella. Tiedot lähteestä (Ilmatieteen laitos 2024).*

| Kuukausi | Kuukauden keskilämpötila |
|---|---|
| Tammikuu | -9,6 |
| Helmikuu | -4,9 |
| Maaliskuu | -0,3 |
| Huhtikuu | 2,7 |
| Toukokuu | 14 |
| Kesäkuu | 16,7 |
| Heinäkuu | 18,1 |
| Elokuu | 16,8 |
| Syyskuu | 13,2 |
| Lokakuu | 6,9 |
| Marraskuu | 2,4 |
| Joulukuu | -1,5 |

Huuvan poistoilman lämmöntalteenotolla saavutettavaa kustannussäästöä arvioitiin olettamalla järjestelmän maksimitehoksi 120 kW. Oletus perustuu aiemmin laskettuun kuivan poistoilman keskimääräiseen talteenottotehoon nestekiertoisella järjestelmällä. Tuloilman lämmitystehontarpeen ollessa alle talteenottojärjestelmän maksimitehon, koko tuloilman lämmitystarpeen oletettiin täyttyvän lämmöntalteenotolla. Näin saatiin

talteenotosta käytettävä teho tuloilman lämmitykseen. Käyntiajaksi oletettiin lämmityskauden kaikki tunnit.

Kustannussäästö arvioitiin taulukossa 4.2 esitetyn maakaasun hinnan ja tuloilman lämmitykseen käytetyn, huuvan poistosta talteenotetun, lämpöenergian avulla. Säästölaskennassa lämmöntalteenottoa verrattiin tuloilman lämmityksen nykytilaan. Laskennassa huomioitiin tuloilman lämmitykseen käytettävän veden lämmittämisen hyötysuhde tulitorvikattilassa. Kattilan lämmöntuotannon hyötysuhteena käytettiin arvoa 0,9. Hyötysuhteen ja lämmöntalteenoton lämpöenergian avulla laskettiin poltetun maakaasun lämpöenergia ja tästä edelleen maakaasun kustannus. Lämmöntalteenotolla oletettiin saavutettavan tämän kustannuksen suuruinen säästö vuodessa.

Kahdella eri tuloilmamäärällä laskettujen lämmitystarpeiden avulla arvioitiin myös huuvan käynnin ohjausmuutoksella saavutettavia hyötyjä. Lämmitystarpeen pienenemisen myötä säästetty lämmityskustannus laskettiin kahden eri tuloilmamäärän lämmitykseen vaadittujen lämpöenergioiden erotuksena. Näin saatiin säästetty lämpöenergia, joka kerrottiin maakaasun hinnalla. Myös tässä arviossa hyödynnettiin oletusta tulitorvikattilan hyötysuhteesta.

Huuvan poistoilmapuhaltimen käyntimuutoksen myötä saavutettava säästö sähkönkulutuksessa arvioitiin sähkömittaukseen perustuen. Säästö laskettiin vertailemalla kahta aiemmin kuvattua huuvan eri käyttötapaa. Käyntiasetusta vastaavat sähkötehot saatiin mittaustuloksien avulla ja käyntiajat laskettiin vuoden tuntien pohjalta. Kummassakin käyntitavassa huuvan oletettiin käyvän lämmityskauden ulkopuolisen ajan +30 % tehostuksella. Kustannussäästö laskettiin kertomalla kahden eri käyntitavan sähkönkulutuksen erotus vuoden 2024 toteutuneella sähkön keskimääräisellä hinnalla.

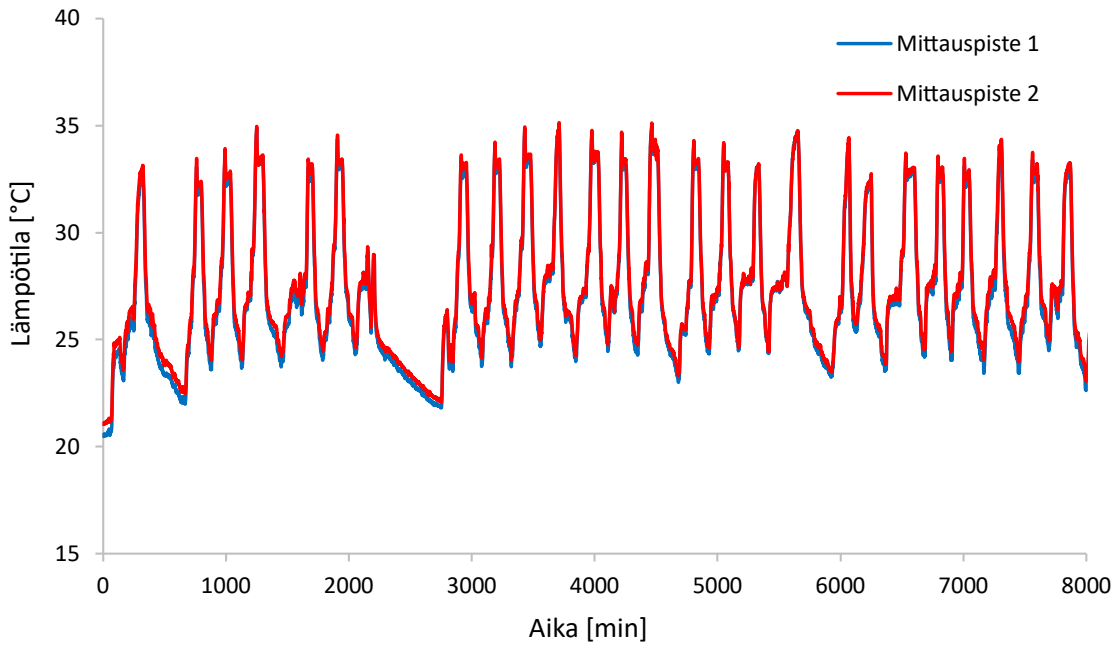
Talteenotetun ja prosessivetenä käytettävän jäähdytysveden keskilämpötilan nostamisella saatava kustannushyöty laskettiin mittaustuloksiin perustuen. Aiemmin suoritettuun prosessiveden laskentaan lämmönvaihtimelle menevän veden lämpötilaksi asetettiin kaksi lämpötilaa; 45 °C ja 50 °C. Energiasäästö laskettiin alkuperäisen laskentatuloksen ja uuden veden keskilämpötilan avulla lasketun prosessilämmön tarpeen erotuksena. Kustannussäästö laskettiin kertomalla saatu energiasäästö maakaasun hinnalla.

# 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitellään ja arvioidaan työssä tehdyn mittaustutkimuksen tulokset. Sen jälkeen muodostetaan mittaustulosten pohjalta työssä aiemmin esitetyillä laskentamenetelmillä arvioitu viimeistyskoneen energiatase. Lopuksi tarkastellaan mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseen automaation ohjausmuutosten ja lämmöntalteenoton avulla sekä muodostetaan jatkotoimenpide-ehdotuksia koneen energiatehokkuuden edistämiseksi.

## 5.1 Prosessi-ilmanvaihdon mittaustulokset

Edellisessä luvussa kuvatun mittaustutkimuksen tuloksena saatiin mittausdataa kahdessa eri ajanjaksossa. Ensimmäisen, noin kahdeksan vuorokautta kestäneen mittausjakson aikana mitattu huuvan poistoilman lämpötila kahdesta mittauspisteestä on esitetty kuvassa 5.1.




***Kuva 5.1.*** *Huuvan poistoilman lämpötilamittausten tulos.*

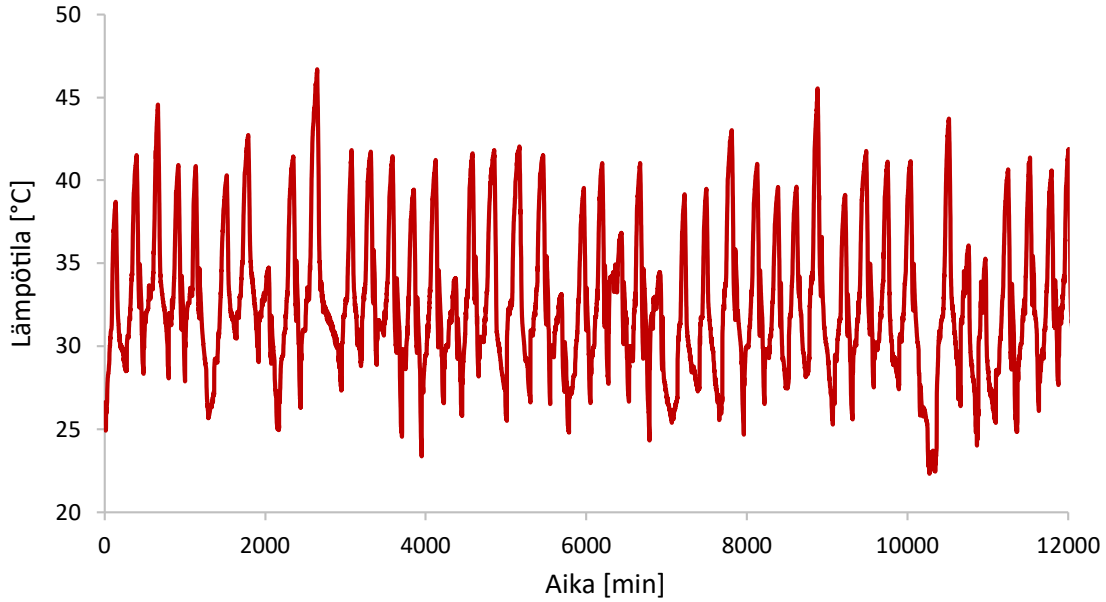
Lämpötilamittauksista on selvästi huomattavissa jaksottaisuus. Poistoilman lämpötila nousee VK38:n tuotannon mukaisesti siten, että korkeimman lämpötilan huiput osuvat juuri ajankohtiin, jolloin viimeistysreseptissä on lämpökäsittelyvaihe käynnissä. Mittausjakson alkupuolella tapahtunut lyhyt tuotantokatkos näkyy lämpötilamittauksissa.

Huuvan poistoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden (RH) keskiarvo ja vaihteluväli sekä ensimmäisen mittausjakson että lisämittauksen osalta on esitetty taulukossa 5.1.

***Taulukko 5.1.*** *Huuvan poistoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluvälit.*

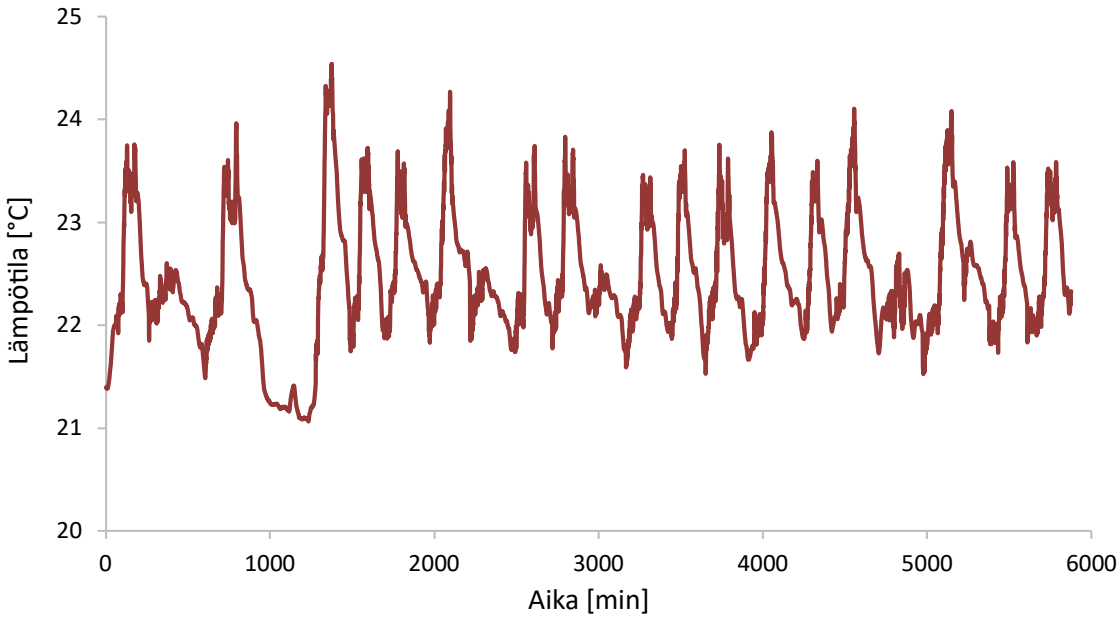
| | **Huuva piste 1** | | **Huuva piste 2** | | **Huuva piste 1 lisämittaus** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **T [°C]** | **RH [%]** | **T [°C]** | **RH [%]** | **T [°C]** | **RH [%]** |
| maksimi | 35,0 | 61,6 | 35,1 | 57,9 | 34,9 | 62,3 |
| minimi | 20,4 | 15,3 | 21,0 | 10,8 | 21,7 | 9,0 |
| keskiarvo | 26,6 | 25,7 | 27,1 | 21,8 | 26,8 | 20,7 |

Kuvan 5.1 ja taulukon 5.1 tietojen perusteella kahdesta eri kohtaa mitattujen lämpötilojen arvot vastaavat hyvin toisiaan keskiarvon sekä minimi- ja maksimiarvojen osalta. Myös eri aikana mitatut lämpötilat vastaavat toisiaan. Poistoilman lämpötilan minimiarvo vastaa lähes tuotantotilojen sisäilman lämpötilaa. Lämpökäsittelyn aikana telalämpöjen ollessa korkealla, nousee poistoilman lämpötila kohti maksimiarvoa. Käsittelyn aikana telojen korkea lämpötila ei nosta poistoilman lämpötilaa niin korkeaksi kuin voisi olettaa, sillä huuvan ollessa suhteellisen korkealla sekoittuu poistoilmaan tuotantotilan ilmaa. Tämä tasoittaa lämpötilan nousua. Kantileverin kärynpoiston lämpötilamittauksen tulos on esitetty kuvassa 5.2.




***Kuva 5.2.*** *Kantileverin kärynpoiston poistoilman lämpötila.*

Myös kantileverin kärynpoiston lämpötilamittauksen tuloksista on huomattavissa selkeää lämpötilavaihtelua tuotantoprosessin mukaan. Yleisesti lämpötilatasot ovat huuvan poistoilman lämpötiloja korkeammalla, sillä kärynpoiston poistoilma puhalletaan ulos sisäpuolisen kuumatelan takaa kohdistetusti läheltä lämmönlähdettä. Lisäkärynpoiston lämpötilamittauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.3.



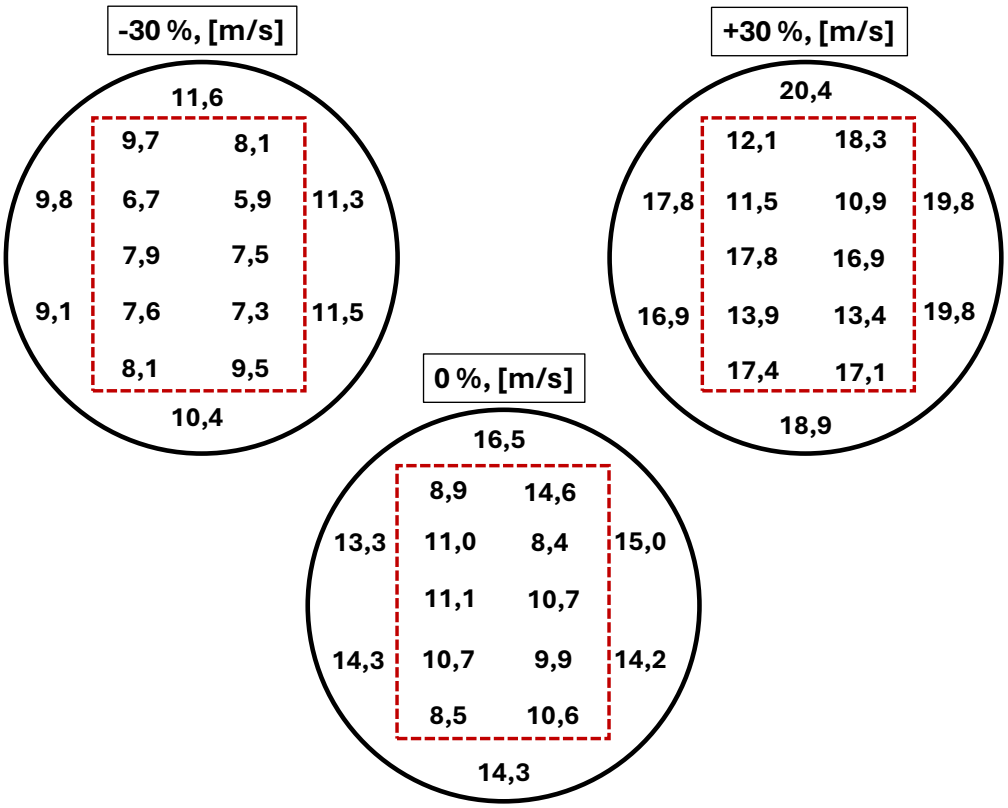

***Kuva 5.3.*** *Lisäkärynpoiston poistoilman lämpötilamittauksen tulos.*

Lisäkärynpoiston poistoilman lämpötila vaihtelee pienemmällä lämpötila-alueella kuin huuvan ja kantileverin poistoilmojen lämpötilat. Tämä johtuu lisäkärynpoiston sijainnista suhteessa viimeistyskoneeseen, sillä lisäkärynpoiston kanava on suhteellisen kaukana ja korkealla koneesta. Myös tästä lämpötilamittauksesta on huomattavissa viimeistysprosessin telalämpöjen käyttö. Kärynpoistojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluvälit keskiarvoineen on esitetty taulukossa 5.2.

***Taulukko 5.2.*** *Kärynpoistojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluvälit.*

| | **Kantilever kärynpoisto** | | **Lisäkärynpoisto** | |
|---|---|---|---|---|
| | **T [°C]** | **RH [%]** | **T [°C]** | **RH [%]** |
| maksimi | 46,7 | 82,3 | 24,5 | 52,2 |
| minimi | 22,3 | 11,0 | 21,1 | 11,1 |
| keskiarvo | 32,5 | 23,8 | 22,5 | 21,2 |

Eri huuvan poistoilmapuhaltimen käyntinopeuksilla mitatuissa virtausnopeuden arvoissa oli huomattavia eroja kahden mittauspisteen välillä. Mittauspiste 1 sijaitsi kanavan mutkan jälkeen, jolloin poistoilmavirtauksessa on pyörteisyyttä. Pyörteisyys vaikuttaa pitot-mittauksiin huomattavasti. Mittaustulosten arvioinnin jälkeen laskennassa päädyttiin käyttämään pisteestä 2 DPM-anemometrilla mitattuja virtausnopeuden arvoja. Kolmella puhaltimen tehostuksen arvolla pisteestä 2 mitatut virtausnopeudet on esitetty kuvassa 5.4.



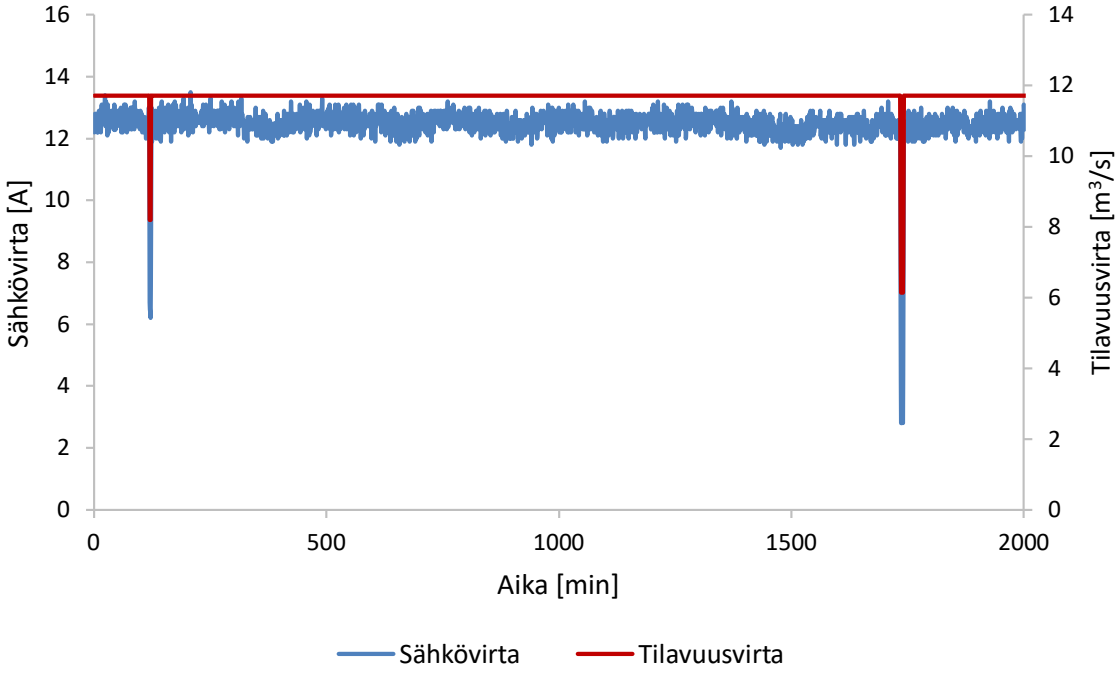

***Kuva 5.4.*** *Mitatut huuvan poistoilman virtausnopeuden arvot sijoitettuna mittauskohdan poikkileikkaukseen. Keskiarvotukseen käytetyt arvot rajattu punaisella.*

Kuvan virtausnopeuden arvot on sijoitettu todellisiin mittauskohtiin kanavan poikkileikkaukseen. Eri puhaltimen käyntinopeuksilla mitatut virtausnopeudet ovat järkeviä, sillä puhaltimen käydessä +30 % käyntinopeuden tehostuksen arvolla ovat virtausnopeudet selvästi suurempia ja kunkin tehostusarvon välillä on havaittavissa yhtenevä nopeuden kasvu. Mitatuista virtausnopeuden arvoista otettiin keskiarvo kuvaan 5.4 merkatuilta alueilta, jota käyttäen laskettiin huuvan poistoilman tilavuusvirta. Keskiarvotuksen tuloksena saadut poistoilman virtausnopeuden arvot ja lasketut poistoilman tilavuusvirrat on esitetty taulukossa 5.3.

***Taulukko 5.3.*** *Huuvan poistoilman keskiarvotetut virtausnopeuden arvot sekä virtausnopeuden avulla lasketut poistoilman tilavuusvirrat eri tehostuksen asetuksilla.*

| Mitattu suure | Tehostus: - 30 % | Tehostus: 0 % | Tehostus: + 30 % |
|---|---|---|---|
| Virtausnopeus [m/s] | 7,8 | 10,4 | 14,9 |
| Tilavuusvirta [$m^3$/s] | 6,1 | 8,2 | 11,7 |

Huuvan poistoilman tilavuusvirta sovitettiin sähkömittauksen avulla hetkellisestä mittauksesta jatkuvaksi. Kuvassa 5.5 on esitetty lisämittausjakson sähkövirran mittaustulos ajan funktiona. Lisäksi kuvassa on esitetty taulukon 5.3 tilavuusvirran arvot sähkömittauksen avulla sovitettuna.




***Kuva 5.5.*** *Huuvan sähkömittauksen tulos lisämittausjakson ajalta sekä sähkömittauksen avulla mittausjaksolle sovitettu poistoilman tilavuusvirta.*

Sähkömittauksen perusteella huuvan poistoilman puhallin käy lähes koko ajan suurimmalla tehostuksen arvolla. Kuvaajasta on havaittavissa piikit kahden muun tehostusasetuksen käynnin ajalta. Tällöin puhaltimen tehostus asetettiin tarkoituksella 0 % ja -30 % arvoille, jotta mittausdataan saatiin puhaltimen käyntiä kaikilla tehostuksen arvoilla. Ensimmäisen mittausjakson aikana huuvan puhallin kävi noin puolet ajasta 0 % tehostusasetuksella. Muuten se kävi suurimmalla tehostuksen arvolla. Tehostusasetuksen käyttö vaihtelee siis hieman, ja kentällä käytyjen keskusteluiden perusteella tehostuksen käyttö on vahvasti koneenhoitajasta riippuvaa.

Kantileverin kärynpoiston virtausnopeus mitattiin äänenvaimentimen ja puhaltimen välistä. Mittauskohta osoittautui vaikeaksi, sillä nopeusmittauksen aikana virtausnopeuden arvot vaihtelivat paljon ilmavirran pyörteisyyden takia. Järkevää virtausnopeuden arvoa ei saatu tästä kohteesta mitattua. Lisäkärynpoiston virtausnopeudelle saatiin arvot kahden eri mittaustavan avulla, kuten luvussa 4.7 kerrottiin. Tämän mittauksen tulokset on esitetty taulukossa 5.4.

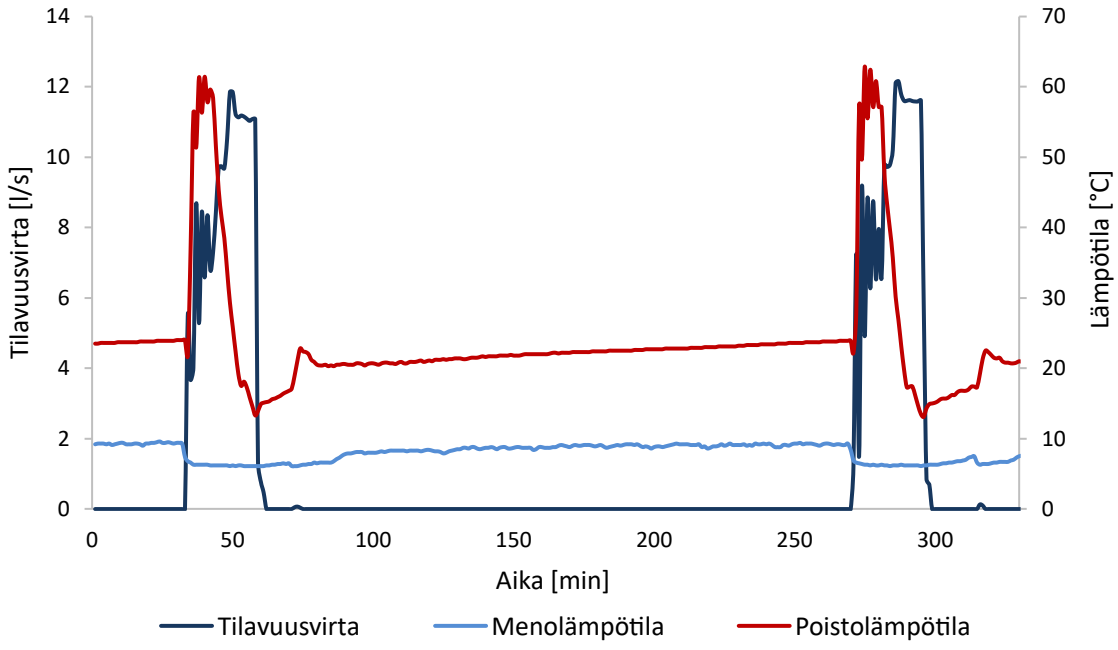
***Taulukko 5.4.*** *Lisäkärynpoiston virtausnopeuden mittaustulos sekä lasketut virtausmäärät.*

| Mitattu suure | Pitot-mittaus | Mittaus- ja säätölaite |
|---|---|---|
| Virtausnopeus [m/s] | 15,3 | - |
| Tilavuusvirta [$m^3$/s] | 3,0 | 2,4 |
| Tilavuusvirran mittausten keskiarvo [$m^3$/s] | 2,7 | |

Kokonaisuudessaan prosessi-ilmanvaihdon mittaustutkimuksen tuloksena saatiin järkeviä ja luotettavia tuloksia. Sähkömittausten avulla ilman tilavuusvirrat saatiin täsmällisesti sovitettua hetkellisestä mittauksesta jatkuvaksi virtausprofiiliksi. Näiden tulosten perusteella laskettiin mittausjaksoittain poistoilman mukana poistunut lämpöenergia.

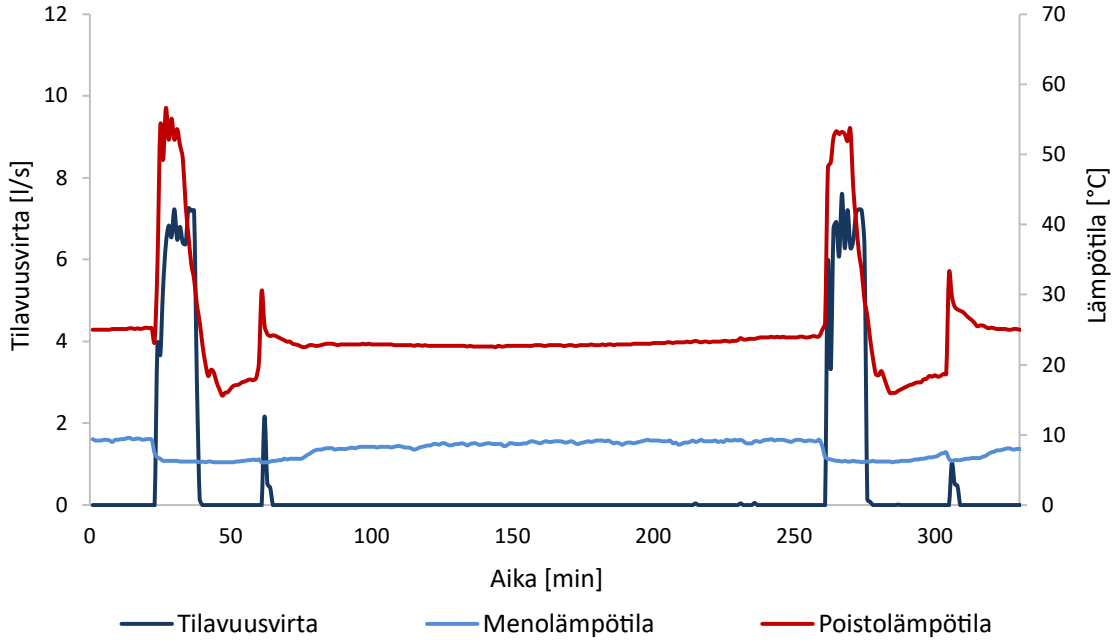
## 5.2 Jäähdytysvesien mittaustulokset

Kuumatelojen jäähdytyspiiristä mitattiin jäähdytysveden virtausmäärä ja lämpötilat. Virtausmittauksen tuloksena saatiin veden tilavuusvirran arvot minuutin välein yhden viikon ajalta. Sisäpuolisen kuumatelan jäähdytysveden tilavuusvirta sekä lämmönvaihtimelle menevän veden ja lähtevän veden lämpötila on esitetty rajatulta ajanjaksolta kuvassa 5.6.




***Kuva 5.6.*** *Sisäpuolisen kuumatelan jäähdytyspiirin mittaustulokset.*

Sisäpuolisen kuumatelan jäähdytysvesien mittaustulosten kuvaajasta nähdään telan jäähdytyksen jaksottainen käyttö. Jäähdytysvaiheen lopussa veden tilavuusvirta on mittausten perusteella korkea ja samalla lähtevän veden lämpötila on alhainen. Tämän perusteella jäähdytysveden käyttö ei ole sisäpuolisen kuumatelan osalta optimaalista. Ulkopuolisen kuumatelan jäähdytysvesien mittaustulokset on esitetty vastaavasti kuvassa 5.7.




***Kuva 5.7.*** *Ulkopuolisen kuumatelan jäähdytyspiirin mittaustulokset.*

Jäähdytysveden kuvaajista huomataan myös ero sisäpuolisen ja ulkopuolisen kuumatelan jäähdytysasteesta. Sisäpuolinen tela jäähdytetään alhaisempaan lämpötilaan kuin ulkopuolinen kuumatela. Tästä seuraa jäähdytysveden tilavuusvirran korkeammat piikit jäähdytyksen lopussa ja pidempi jäähdytysvaiheen kesto. Ulkopuolisen telan jäähdytysveden tilavuusvirta ei nouse jäähdytyksen loppuvaiheessa yhtä korkeaksi, sillä PID-säätimen tavoitearvo veden lämpötilalle kattaa lähes koko jäähdytysvaiheen ja telaa ei jäähdytetä yhtä matalaan lämpötilaan. Kummankin telan osalta jäähdytyksen alku vaikuttaa optimaaliselta, sillä lämmönvaihtimelta lähtevän jäähdytysveden lämpötila on välillä 50–60 °C.

Useasta kohdasta tehtyjen jäähdytysveden lämpötilamittausten tulokset on esitetty lämmönvaihtimelle menevän jäähdytysveden osalta taulukossa 5.5. Kuvaan 4.7 merkattu lämpötilamittari $T_4$ antoi huonoja mittaustuloksia, joten sen tallentamia arvoja ei käytetä tässä tutkimuksessa. Taulukossa esitetyt mitattujen lämpötilojen arvot on suodatettu virtauksen mukaan siten, että vain virtauksen aikaiset lämpötilat on huomioitu.

***Taulukko 5.5.*** *Jäähdytysveden menolämpötilan mittaustulokset.*

| | **$T_1$ [°C]** | **$T_2$ [°C]** | **$T_3$ [°C]** |
|---|---|---|---|
| maksimi | 7,2 | 51,8 | 38,6 |
| minimi | 5,9 | 12,2 | 10,0 |
| keskiarvo | 6,4 | 29,1 | 18,9 |

Mitatuissa lämpötilan arvoissa on suodatuksen jälkeenkin eroja. Menolinjasta, kauempaa lämmönvaihtimesta mitattu lämpötila on sekä vaihteluväliltään että keskiarvoltaan selvästi alhaisempi ja kuvaa paremmin käytettävän jäähdytysveden todellista lämpötilaa. Lämmönvaihtimen läheltä mitatut lämpötilan arvot ovat korkeampia. Tämä johtuu todennäköisesti lämmön johtumisesta putkimateriaalia pitkin, sillä lämpötilamittarit asennettiin teräsputken pintaan lähelle lämmönvaihdinta. Jäähdytyslämmönvaihtimelta lähtevän veden lämpötilamittauksen tulokset on esitetty taulukossa 5.6.

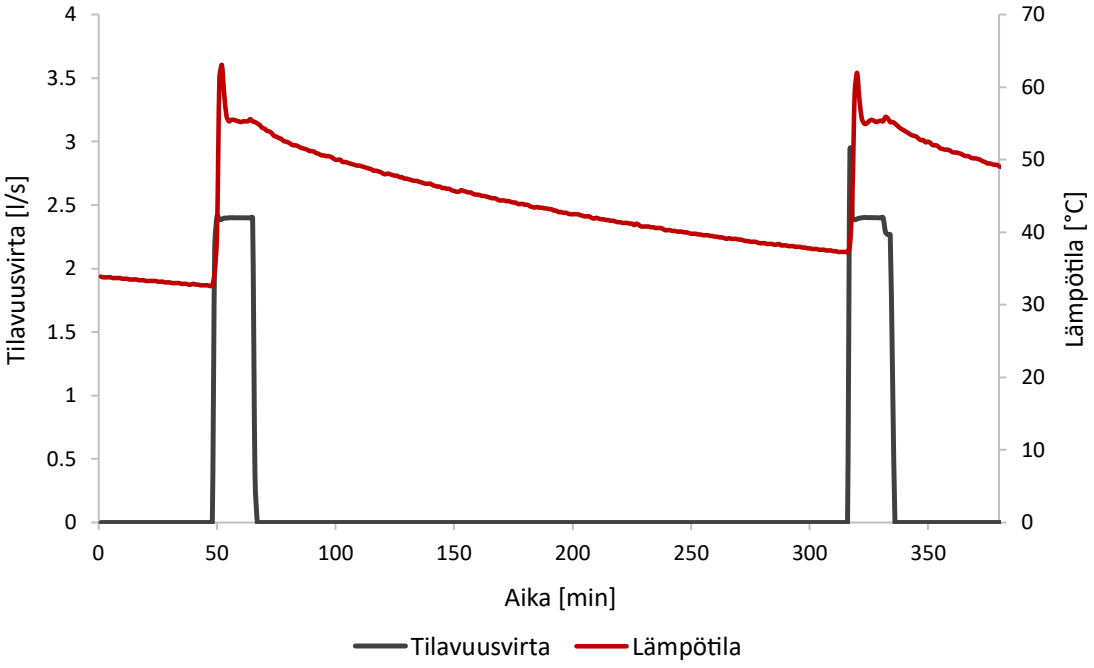
***Taulukko 5.6.*** *Jäähdytysveden lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen.*

| | $T_5$ [°C] | $T_6$ [°C] | $T_{aut}$ [°C] | |
|---|---|---|---|---|
| | | | **Sisäpuolinen kuumatela** | **Ulkopuolinen kuumatela** |
| maksimi | 62,4 | 58,0 | 65,2 | 66,8 |
| minimi | 9,1 | 11,3 | 7,6 | 17,6 |
| keskiarvo | 30,3 | 38,4 | 32,5 | 44,5 |

Lähtevän jäähdytysveden lämpötilat ovat keskenään vastaavia riippumatta mittauskohdasta. Automaation trendidatasta on huomattavissa aiemmin todettu sisäpuolisen ja ulkopuolisen kuumatelan ero, sillä sisäpuolisen telan lämmönvaihtimelta lähtevän jäähdytysveden minimi- ja keskiarvolämpötilat ovat alhaisempia. Suurempi veden tilavuusvirta sisäpuolisen kuumatelan jäähdytysvaiheen lopussa laskee kyseisiä lämpötilan arvoja. Mittaustutkimuksessa mitatut jäähdytysveden lämpötilat vastaavat hyvin kiinteän ja jatkuvan mittauksen arvoja. Kokonaisuudessaan jäähdytysveden mittaustulokset ovat järkeviä ja soveltuvat laskennan alkuarvoiksi sekä jatkotarkasteluihin hyvin.

## 5.3 Prosessiveden mittaustulokset

Prosessiveden lämpötila mitattiin kahdesta kohdasta, kuten luvussa 4.7 kuvattiin. Koneen järjestelmän trenditiedoista noudetut prosessiveden tilavuusvirran arvot ja lämmönvaihtimen jälkeen mitattu lämpötila on esitetty kuvassa 5.8.




***Kuva 5.8.*** *Prosessiveden lämpötilan mittaustulos ja tilavuusvirta.*

Myös prosessiveden mittaustulosten kuvaajasta on selkeästi nähtävissä prosessiveden käytön jaksottaisuus. Pesuvaiheiden kesto on huovan pituudesta riippuvaista ja kestää yleensä 15–25 minuuttia. Vaiheet toistuvat normaalilla tuotantotahdilla noin neljän tunnin välein. Mitattujen lämpötilojen maksimiarvo, minimiarvo ja keskiarvo on esitetty taulukossa 5.7. Alkuperäiset mittaustulokset on suodatettu virtausmäärän mukaan siten, että taulukossa esitetyt arvot on laskettu hetkiltä, jolloin prosessivesipumppu on päällä.

***Taulukko 5.7.*** *Prosessiveden lämpötilamittauksen tulokset.*

| | $T_{vaihtimelle}$ [°C] | $T_{prosessiin}$ [°C] | $T_{aut}$ [°C] |
|---|---|---|---|
| maksimi | 48,1 | 72,2 | 68,7 |
| minimi | 30,2 | 36,6 | 29,7 |
| keskiarvo | 34,6 | 54,9 | 57,6 |

Mittaustutkimuksessa suoritettu prosessiveden lämpötilamittaus lämmönvaihtimen jälkeen antoi keskiarvoltaan järkevät tulokset suhteessa trenditiedoista saatuun kiinteään mittaukseen. Eroa aiheuttaa jälleen kerran mittaustapa, sillä mittaus suoritettiin putken pinnalta. Mitatuilla arvoilla saadaan prosessilämmön laskentaa varten riittävän tarkka arvo prosessiveden lämpötilaerolle lämmönvaihtimen yli.

## 5.4 Sähkömittausten tulokset

VK38:n sähkömittausten tulokset on esitetty taulukossa 5.8. Mitatut sähkövirran arvot on keskiarvotettu toimilaitteiden käynnin mukaan ja maksimiarvot on etsitty koko mittausjaksolta. Taulukossa on esitetty myös kunkin mittauskohteen kuluttama sähköenergia ominaiskulutuksen muodossa yksikössä $kWh/t$, eli lasketut mittausjakson sähköenergian kulutukset on jaettu mittausjakson tuotantomäärällä.

***Taulukko 5.8.*** *Sähkömittausten tuloksena saadut sähkövirran arvot sekä niiden avulla lasketut sähkötehot mittauskohteittain jaoteltuna.*

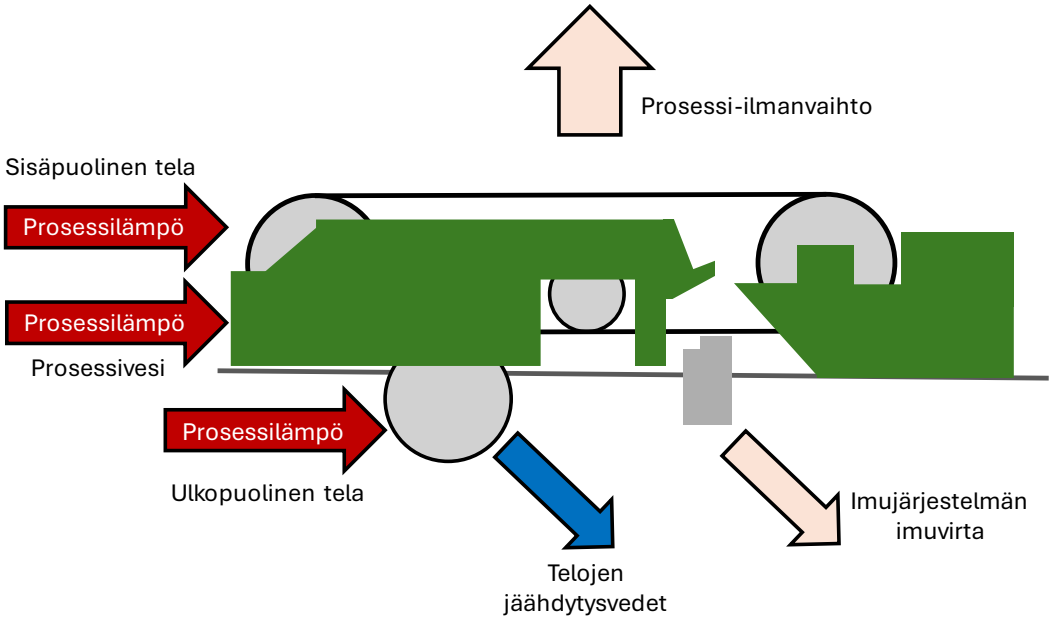
| | **Sähkövirta [A]** | | **Teho [kW]** | | **Energia [kWh/t]** |
|---|---|---|---|---|---|
| | keskiarvo | maksimi | keskiarvo | maksimi | |
| VK38 syöttö | 20,1 | 90,7 | 13,9 | 62,8 | 181,4 |
| Kuumaöljypumput | | | | | |
| P-37 | 65,1 | 72,4 | 45,1 | 49,6 | 362,9 |
| P-39 | 62,9 | 70,5 | 43,8 | 48,3 | 426,7 |
| Jäähdytysvesipumput | | | | | |
| P-38 | 7,3 | 7,9 | 5,0 | 5,5 | 6,7 |
| P-40 | 8,9 | 17,1 | 6,0 | 6,1 | 4,8 |
| Prosessivesipumppu | 2,6 | 3,2 | 1,8 | 2,2 | 1,6 |
| Huuvan puhallin | 12,5 | 13,5 | 8,6 | 9,4 | 90,9 |
| Kantileverin kärynpoistopuhallin | 8,5 | 13,6 | 5,9 | 9,4 | 63,3 |
| Lisäkärynpoiston puhallin | 1,9 | 2,0 | 1,3 | 1,4 | 7,5 |

Yksittäisistä toimilaitteista eniten sähköä kuluttavat huuvan poistoilmapuhallin ja kuumaöljypumput. Huuvan puhallin käy jatkuvasti ja kuumaöljypumppujen käyntiajat ovat pumpuista selvästi suurimmat. Imupumppu kuluttaa käynnistyessään eniten sähkövirtaa, mikä on nähtävissä VK38:n syötön sähkövirran maksimiarvosta. Sähkömittausten tuloksia sekä muita esiteltyjä mittaustuloksia ja niiden luotettavuutta arvioidaan tämän luvun lopussa.

## 5.5 Viimeistyskoneen energiankulutus ja energiatase

VK38:n energiataseen muodostaminen oli tämän työn tutkimustehtävä. Taseen laskennat perustuvat edellä esitettyihin mittaustuloksiin ja laskennat suoritettiin luvussa 4.8 kuvatuilla menetelmillä. Mittaukset suoritettiin useassa eri jaksossa, joten koneen energiankulutusta päädyttiin tarkastelemaan tuotantomäärään suhteutettuna. Näin eri mittausjakson tuloksiin pohjautuvat laskentatulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

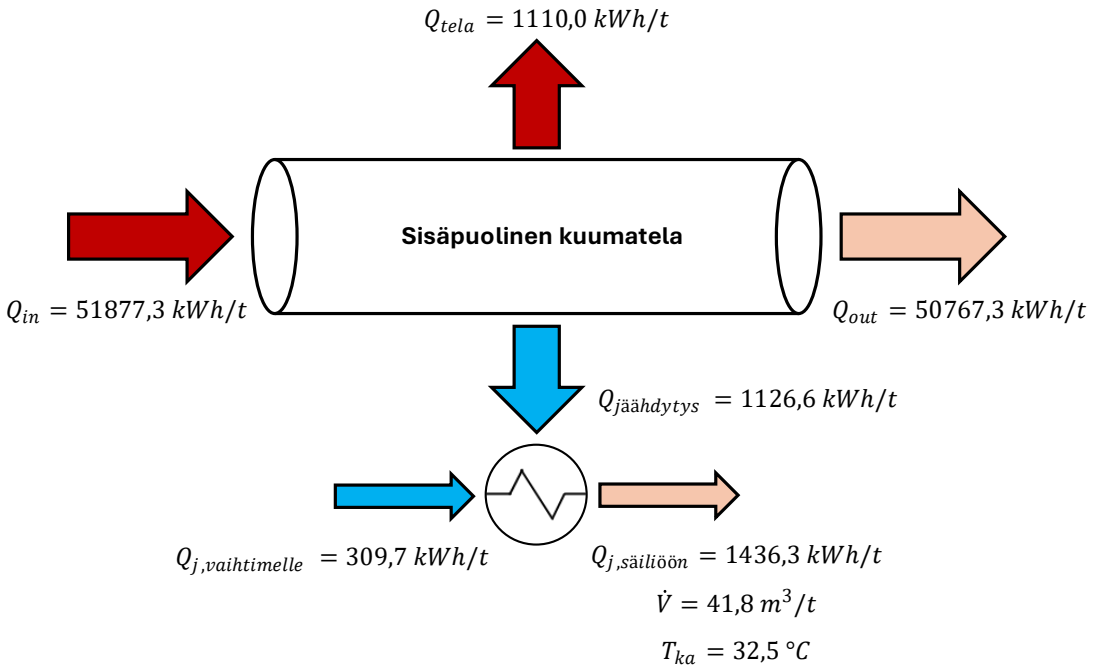
Viimeistyskoneen energiankulutus jaotellaan prosessilämpöön ja sähköenergiaan. Prosessilämpö muodostuu kuumaöljyllä kuumateloille ja prosessiveteen tuodusta lämpöenergiasta. Sähköenergiaa käytetään järjestelmän ylläpitoon, telojen pyöritykseen sekä viimeistysprosessin vaatimien toimilaitteiden käyttöön. Yksinkertainen kaavio VK38:n käyttämistä energiavirroista on esitetty kuvassa 5.9.




***Kuva 5.9.*** *VK38:n viimeistysprosessiin liittyvät energiavirrat.*

Karkealla tasolla kuvattuna sisäänmeneviä energiavirtoja ovat prosessilämpö kummallekin kuumatelalle sekä prosessiveteen. Poistovirtoja ovat prosessi-ilmanvaihdon poistoilmat ja imujärjestelmästä viemäriin johdettava imuvirta. Kuumatelojen jäähdytysvedet voidaan lukea sekundäärivirraksi niiden jatkokäytön perusteella.

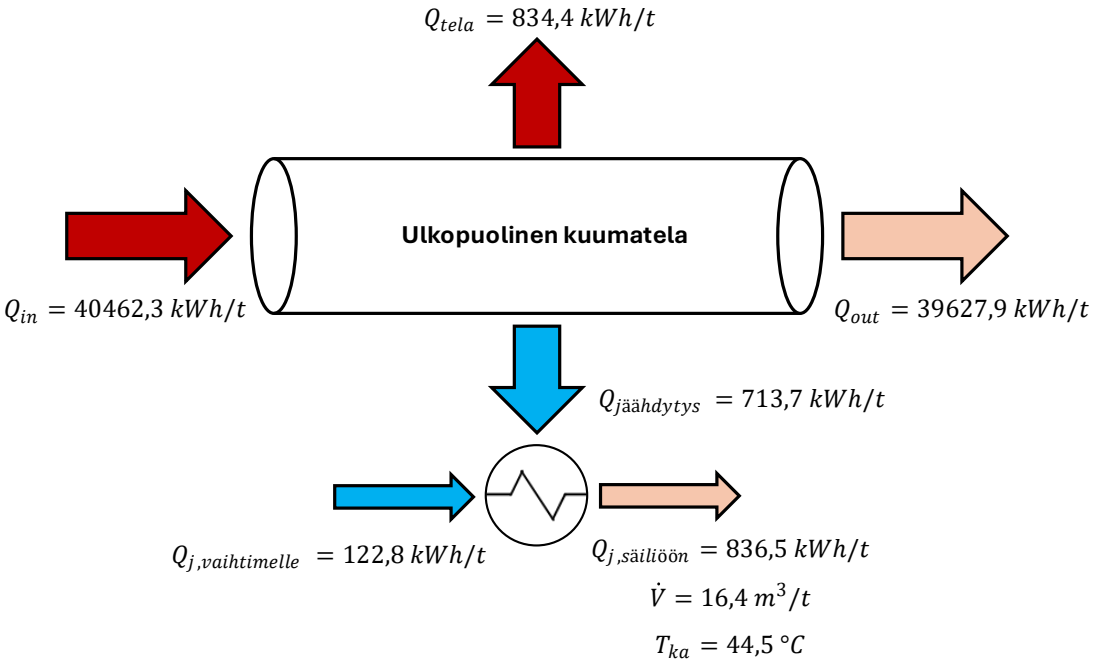
Sisäpuolisen kuumatelan lämmityspiirin energiataselaskennan tulokset on esitetty kuvassa 5.10. Prosessilämpö ja jäähdytysveden lämpöenergia sekä vedenkulutus on esitetty ominaisenergiankulutuksen muodossa yhtä tuotettua puristinhuopatonnia kohti. Laskentatulos perustuu mittausjakson aikana kerättyyn mittausdataan ja mittausjakson aikaiseen tuotantomäärään.




***Kuva 5.10.*** *Sisäpuolisen kuumatelan energiatase.*

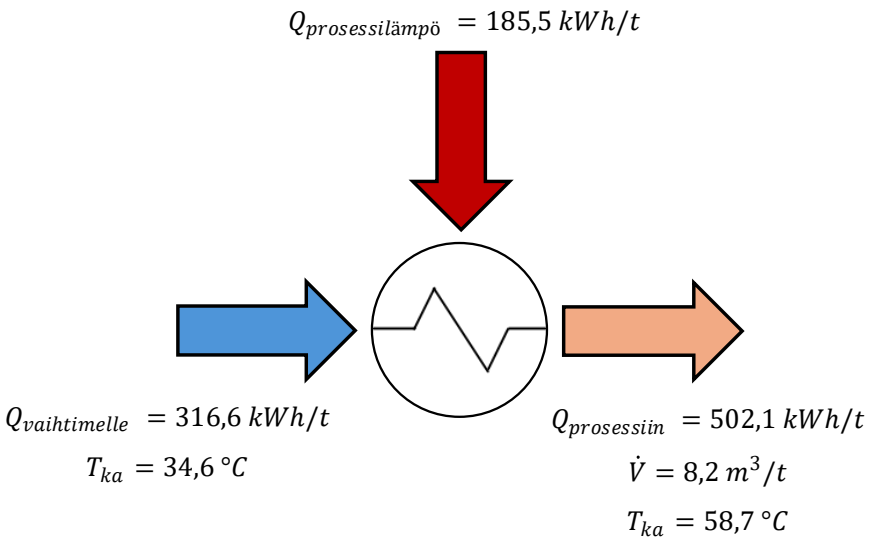
Telan varsinainen prosessilämpöenergia on telalta saatava lämpöenergia. Telan lämmitysteho perustuu kuumaöljyn lämpötilaeroon telan yli. Hetkelliseksi sisäpuolisen kuumatelan maksimilämpötehoksi saatiin 970 kW. Maksimitehon tarve ajoittuu hetkiin, jolloin telalämpöä aletaan nostamaan heti lämpökäsittelyn alussa ja kalanteroinnin alkaessa. Keskimääräinen sisäpuolisen kuumatelan lämpöteho tarkastelujakson aikana oli 168 kW.

Taseessa telalta saatavan lämpöenergian määrä on kuvan 5.10 mukaisesti hieman alhaisempi kuin jäähdytyspiiriin kuumaöljystä siirtyvä lämpöenergia. Ero johtuu laskentatavasta, sillä jäähdytysvesien laskenta perustui täysin mittausdataan, kun taas kuumaöljypiiri laskettiin arvioimalla kuumaöljyn virtausmäärää pumppukäyrästöön perustuen. Tällöin tehtiin myös oletuksia. Kokonaisuudessaan sisäpuolisen telan tase vaikuttaa järkevältä. Vastaavanlaiset energiankulutuksen tulokset saatiin ulkopuoliselle kuumatelalle, jotka on esitetty kuvassa 5.11. Ulkopuolisen kuumatelan taseessa telalta saatava lämpöenergia on jäähdytysvesiin siirtyvää lämpöä suurempi, joten tulos vaikuttaa järkevältä.




***Kuva 5.11.*** *Ulkopuolisen kuumatelan energiatase.*

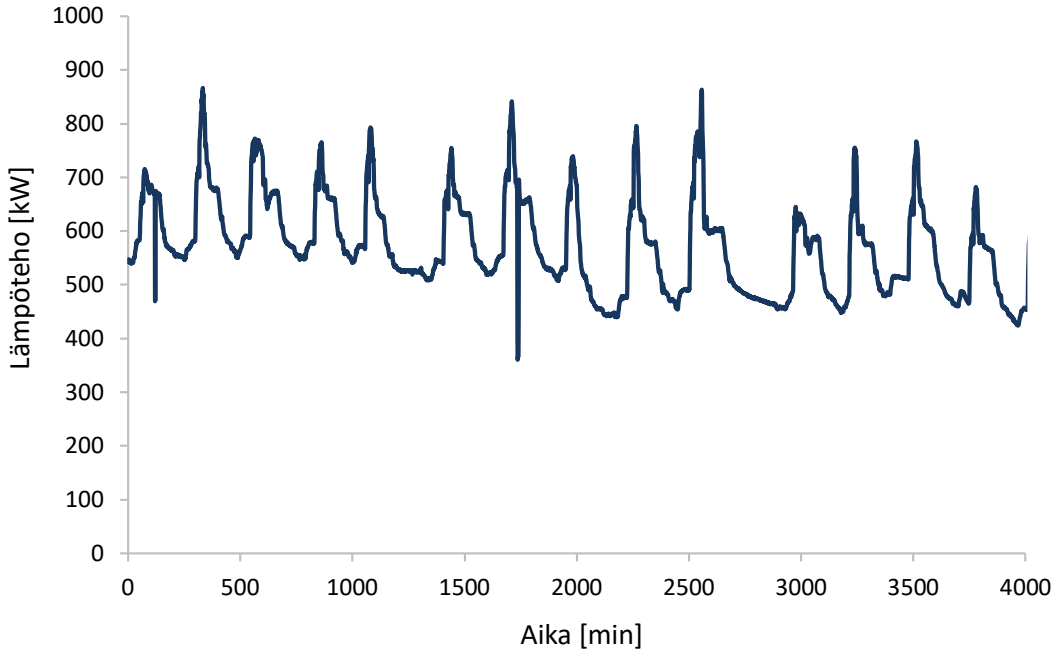
Ulkopuolisen telan hetkelliseksi maksimilämpötehoksi saatiin 1120 kW, mikä on hieman suurempi kuin sisäpuolisella telalla. Kummankin kuumatelan lämpötehon maksimiarvot sijoittuvat hetkiin, jolloin telalämpöjä aletaan nostamaan. Keskimäärin lämpökäsittelyn aikainen ulkopuolisen kuumatelan lämpöteho oli 172 kW. Jäähdytysvesien lämpösisältö on kummaltakin kuumatelalta yhteensä 1,84 MWh/t. Prosessiveden lämpöenergiatase on esitetty ominaiskulutuksen muodossa kuvassa 5.12.




***Kuva 5.12.*** *Prosessiveden energiataseen laskentatulokset.*

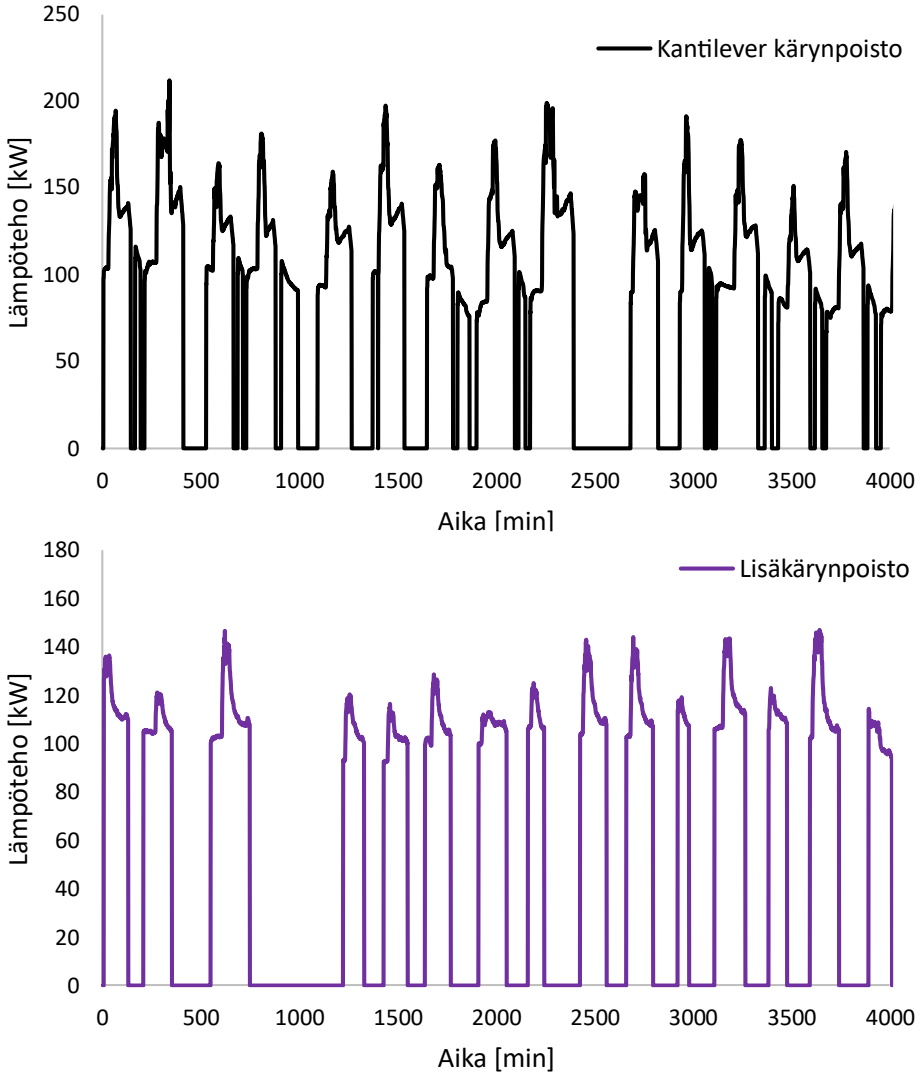
Prosessiveden lämmityksen vaatima prosessilämmön määrä on kuumatelojen prosessilämpöön ja jäähdytysvesien lämpösisältöön verrattuna selvästi alhaisempi. Tämä johtuu prosessiveden pienestä tarpeesta suhteessa jäähdytysvesien määrään. Myös talteenotettujen jäähdytysvesien lämpösisältö laskee prosessilämmön tarvetta. Prosessilämmönvaihtimelle menevän veden keskilämpötila on yllättävän alhainen, sillä se on hieman alhaisempi kuin talteenotettavalle jäähdytysvedelle asetettu lämpötilaraja.

Huuvan poistoilman mukana poistuu lämpöenergiaa jatkuvasti. Aikaisemmin esitettyjen mittaustulosten perusteella laskettu poistoilman lämpöteho ajan funktiona on esitetty kuvassa 5.13.




***Kuva 5.13.*** *Huuvan poistoilman lämpötehon ajallinen vaihtelu.*

Poistoilman lämpöteho vaihtelee jaksottaisesti noin 400 kW:n ja 900 kW:n välillä. Suurimman lämpötehon kohdat ajoittuvat hetkiin, jolloin poistoilma on prosessista johtuen lämpimämpää ja kosteampaa. Tehon maksimiarvoon vaikuttaa laskentatapa, sillä poistoilman kosteuden osalta on huomioitu tuntuvan entalpian lisäksi kosteuden latenttilämpö. Pelkän kuivan poistoilman lämpöteho vaihtelee 530 kW:n ja 270 kW:n välillä. Poistoilman kosteus siis vaikuttaa merkittävästi laskennalliseen lämpötehoon. Kärynpoistojen lämpötehot ajan funktiona on esitetty kuvassa 5.14.




***Kuva 5.14.*** *Kärynpoistojen kautta poistuvan ilman lämpötehon vaihtelut. Ylempänä kantileverin kärynpoiston ja alempana lisäkärynpoiston laskennalliset lämpötehot.*

Kärynpoistojen kautta poistuva lämpöteho vaihtelee kantileverin poistossa välillä 0–210 kW ja lisäkärynpoistossa välillä 0–150 kW. Jo mittaustulosten esittelyn yhteydessä todettu jaksottaisuus on kärynpoistoissa vahvaa. Taulukkoon 5.9 on koottu poistoilmavirtojen lämpöenergia kunkin mittausjakson ajalta kokonaisuudessaan sekä ominaiskulutuksen muodossa.

***Taulukko 5.9.*** *Prosessi-ilmanvaihdon poistoilmavirtojen lämpöenergiasisältö koko mittausjakson ajalta sekä tuotantomäärällä painotettuna.*

| | **Poistunut lämpöenergia** | |
|---|---|---|
| | **[kWh]** | **[kWh/t]** |
| Huuva | 158101,6 | 6092,3 |
| Kantileverin kärynpoisto | 7941,9 | 306,0 |
| Lisäkärynpoisto | 5004,1 | 709,6 |

VK38:n energiavirroista huuvan poistoilma on ainoa jatkuvaa lämpöä sisältävä virtaus. Jatkuvan käynnin takia myös poistunut lämpöenergia viimeisteltyä puristinhuopatonnia kohti on merkittävästi suurempi kuin kärynpoistoilla, kuten taulukon 5.9 laskentatuloksista nähdään. Kaikki muut VK38:n energiavirrat on täysin kytketty viimeistyskäsittelyn eri vaiheisiin. VK38:n kokonaisenergiankulutus prosessilämpöön ja sähköön jaoteltuna sekä kuumatelojen jäähdytyksen ja viimeistyskäsittelyn vedenkulutus on koostettu taulukkoon 5.10. Veden kokonaiskulutuksessa on huomioitu jäähdytysveden käyttö pesujärjestelmän prosessivetenä. Sähkönkulutuksen arvo on saatu laskemalla taulukossa 5.8 esitetyt tulokset yhteen.

***Taulukko 5.10.*** *VK38:n energialaskennan tulokset koostettuna.*

| | Sisäpuolinen kuumatela | Ulkopuolinen kuumatela | Pesujärjestelmä |
|---|---|---|---|
| Ominaiskulutus | | | |
| Prosessilämpö [kWh/t] | 1110,0 | 834,4 | 185,5 |
| Vesi [$m^3$/t] | 41,8 | 16,4 | 8,2 |
| Keskimääräinen teho [kW] | | | |
| Prosessilämpö | 168,1 | 171,9 | 213,3 |
| Jäähdytys | 779,5 | 725,5 | - |
| Maksimiteho [kW] | | | |
| Prosessilämpö | 968,7 | 1121,9 | 379,9 |
| Jäähdytys | 2037,5 | 1524,2 | - |
| **Ominaiskulutus yhteensä** | | | |
| Prosessilämpö [kWh/t] | | **2129,9** | |
| Sähkönkulutus [kWh/t] | | **1138,3** | |
| Vesi [$m^3$/t] | | **58,2** | |

Viimeistyskoneen energiankulutuksesta merkittävin osa on prosessilämpöä, josta suurin osa on suuren lämpötehon omaavien kuumatelojen lämmityksen tarvitsemaa lämpöenergiaa. Vettä kuluu eniten sisäpuolisen kuumatelan jäähdytykseen ja prosessiveden tarve on puolet ulkopuolisen telan jäähdytykseen käytettävästä vedestä.

## 5.6 Energiavirtojen luokittelu ja lämmöntalteenoton arviointi

Mittaustutkimuksen, koneen toimintaan perehtymisen sekä energialaskelmien perusteella voidaan luokitella VK38:n toimintaan liittyvät energiavirrat ja arvioida energiavirtojen hyödyntämismahdollisuuksia. Taulukossa 2.1 esitetyn hukkalämmön lämpötilatasoluokittelun mukaisesti viimeistyskoneen poistovirrat ovat matalan lämpötilatason virtoja.

VK38:n energiavirrat voidaan luokitella sekundäärienergiaksi sekä sekundääri- ja poistovirroiksi. Prosessilämpö luokitellaan sekundäärienergiaksi, sillä prosessilämpö tuodaan viimeistysprosessiin maakaasukattilassa lämmitettävän kuumaöljyn välityksellä. Sekundäärivirraksi luetaan kuumatelojen jäähdytysvedet, sillä niiden lämpösisältöä hyödynnetään talteenoton jälkeen prosessiveden muodossa. Poistovirtoja ovat prosessi-ilmanvaihdon poistoilmavirrat, pesujärjestelmästä viemäriin ja ulos johdettava imuvirta sekä telojen jäähdytysvesipiiristä viemäriin johdettavat talteenoton lämpötilaehdon alittavat jäähdytysvedet.

Varsinaiseksi hukkalämmöksi voidaan luokitella prosessi-ilmanvaihdon poistoilmavirrat. Kärynpoistojen ilmavirtaus on hyvin jaksottaista ja tuotannosta riippuvaa. Kantileverin kärynpoiston ilman lämpötila on muita poistoilmavirtoja korkeampi. Kyseinen poistoilma on kuitenkin öljyisempää mittaustutkimuksen aikana tehtyjen havaintojen perusteella. Lämpötilamittarin pintaan kertyi vajaan kahden viikon aikana selvä kerros öljyä. Lisäkärynpoiston ilma on lähes aina lämpötilaltaan samaa kuin tuotantotilan sisäilma ja mahdollisen käyntimuutoksen jälkeen se käy paljon harvemmin. Kokonaisuudessaan kärynpoistojen lämmöntalteenotto ei ole järkevää johtuen jaksottaisesta käynnistä ja poistoilman likaisuudesta.

Huuvan poistoilma sen sijaan on jatkuvaa virtausta ja sen lämpöä ei hyödynnetä tällä hetkellä lainkaan. Lisäksi lämpötilan vaihtelut eivät ole jaksottaisuudesta huolimatta merkittäviä. Kyseessä on siis potentiaalinen ja tasainen lämmönlähde ja se soveltuisi hyödynnettäväksi tuloilmakoneen tuloilman tai veden lämmitykseen. Lämmitettävä vesi voisi olla kiinteistön lämmitykseen käytettävää vettä. Potentiaalisin poistoilman lämmön käyttökohde on tuloilman lämmitys, sillä huuvan poistoilman aikaprofiili vastaa jatkuvan käynnin myötä tuloilman lämmöntarpeen aikaprofiilia lämmityskauden aikana. Lisäksi

sen lämpötila on aina lämmityskauden aikaista ulkolämpötilaa korkeampi. Poistoilmat ovat huuvan tapauksessa siis termodynaamisesti hyödynnettävissä olevaa hukkalämpöä.

Kuumatelojen jäähdytysvedet ovat maksimi- ja keskiarvolämpötilan perusteella matalan ja keskilämpötilan poistovirtauksia. Käytännössä ne voidaan luokitella sekundäärienergiavirraksi, sillä jäähdytysvesien lämpöä hyödynnetään keräämällä yli 35 °C jäähdytysvedet eristettyyn altaaseen ja käyttämällä ne prosessivetenä viimeistyskäsittelyssä. Lämpimän jäähdytysveden käyttö prosessivetenä vähentää prosessiveden lämmitykseen tarvittavaa prosessilämpöä. Lämmön talteenotto nykyisestä keräyssäiliöstä olisi teknisesti mahdollista esimerkiksi lämpöpumpun avulla. Tämä kuitenkin kasvattaisi prosessiveden lämmitystarvetta. Jäähdytysvesien lämmön hyödyntämismahdollisuuksia tarkastellaan kytkentämuutosten esittelyn yhteydessä hieman tarkemmin.

Viimeistysprosessin toinen tunnistettu poistovirta, pesujärjestelmän imuvirta, on hankalasti hyödynnettävä kohde. Prosessivesien lämpö säilyy imuvirtaan vain osittain, sillä osa kosteudesta ja lämmöstä haihtuu käsittelyn aikana ilmaan ja poistuu prosessi-ilmanvaihdon kautta. Tämä näkyy taulukoiden 5.1 ja 5.2 poistoilman kosteuden maksimiarvoissa. Imuvirtaan sekoittuva kylmä tiivistevesi laskee virtauksen lämpötilaa. Hyödynnettävyyden kannalta imuvirran täytyisi olla nesteenä, mutta jaksottaisuus edellyttää säiliötä. Mahdolliselle lämpöpumppuratkaisulle jaksottainen lämmönlähde ei tarjoa riittävästi lämpöä. Imuvirtausta ei myöskään voida ottaa talteen ja hyödyntää prosessissa uudelleen sen sisältämien kemikaalijäämien takia.

## 5.7 Lämmöntalteenoton tekniset toteuttamismahdollisuudet

Huuvan poistoilman lämmöntalteenoton teknisten toteuttamismahdollisuuksien tarkastelussa hyödynnetään alan yrityksille kohdistettujen sähköpostitiedustelujen tuloksia. Poistoilman lämmön hyödyntämiseen on laajasti saatavilla teknisiä ratkaisuja ja sähköpostitiedustelujen perusteella soveltuvia näistä ovat suora lämmönsiirto rekuperatiivisesti, epäsuora lämmönsiirto nestekiertoisella järjestelmällä tai lämpöpumppujärjestelmä. Rekuperatiivinen lämmön siirtäminen levylämmönvaihtimella poistoilmasta tuloilmaan ei ole mahdollista ilman kanavamuutoksia, sillä huuvan poisto on erillispoisto. Se olisi kuitenkin lämmönsiirron hyötysuhteeltaan nestekiertoista järjestelmää hieman parempi vaihtoehto.

Lämmönsiirto on toteutettavissa nestekierrolla tuloilman lämmitykseen, mikä ei vaadi tulo- ja poistoilmakanavien läheisyyttä. Lämmitys rajoittuisi tässä järjestelmässä

lämmityskauden ajalle. Lämpöpumppujärjestelmällä olisi mahdollista toteuttaa tuloilman lämmityksen lisäksi jopa tuloilman jäähdytys ja suuremman lämmöntuoton ansiosta myös tehdaskiinteistössä käytettävän veden lämmitys. Finess Energy Oy:n antaman vastauksen mukaan veden lämmitykseen sopii selvästi parhaiten hiilidioksidilämpöpumppu, jolla voidaan lämmittää vettä 90 °C lämpötilaan asti. Lämpöpumpulla poistoilma voitaisiin lauhduttaa 5–10 °C lämpötilaan. Nestekiertoiseen lämmönsiirtojärjestelmään verrattuna lämpöpumppu on kuitenkin merkittävästi kalliimpi ratkaisu. Teknisten ratkaisujen olemassaolon ja jatkuvan aikaprofiilin perusteella huuvan poistoilma on teknisesti hyödynnettävissä olevaa hukkalämpöä.

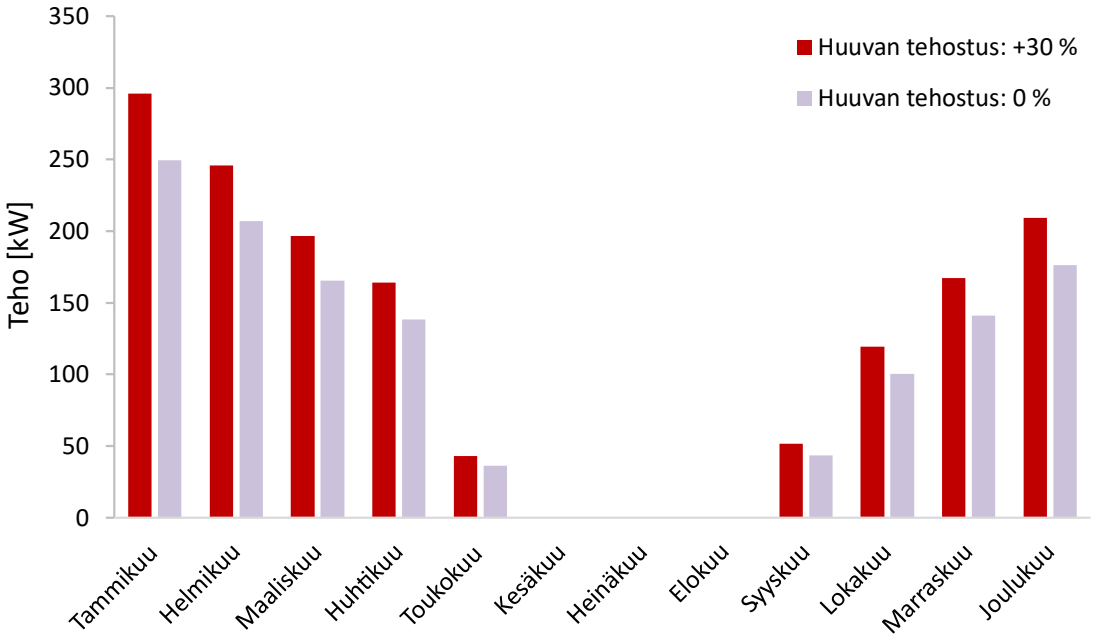
Termodynaamisen ja teknisen hyödyntämispotentiaalin olemassaolon myötä voidaan arvioida karkeasti teoreettista lämmöntalteenottopotentiaalia. Luvussa 2 teknisten ratkaisujen esittämisen yhteydessä mainittujen rekuperatiivisen suoran lämmönsiirron ja nestekiertoisen järjestelmän hyötysuhteiden avulla lasketut teoreettiset talteenoton lämpötehot on esitetty taulukossa 5.11. Potentiaalin arvioinnissa on käytetty taulukon 4.2 alkuarvoja ja siinä on huomioitu ainoastaan kuivan poistoilman lämpöteho. Lisäksi on oletettu järjestelmä, jossa poistoilman lämpötila on lämmöntalteenoton jälkeen 8 °C. Huuvan tehostusasetus on myös huomioitu.

***Taulukko 5.11.*** *Huuvan poistoilman lämmön talteenottopotentiaalin arviot kahdella eri lämmönsiirtotekniikalla.*

| | **Rekuperatiivinen suora lämmönsiirto** | **Nestekiertoinen järjestelmä** |
|---|---|---|
| Hyötysuhde [-] | 0,7 | 0,6 |
| Huuvan kuivan poistoilman keskimääräinen lämpöteho ilman talteenottoa [kW] | | |
| Huuvan tehostus: +30 % | 286,5 | 286,5 |
| Huuvan tehostus: 0 % | 200,6 | 200,6 |
| Talteenottopotentiaali [kW] | | |
| Huuvan tehostus: +30 % | 200 | 170 |
| Huuvan tehostus: 0 % | 140 | 120 |

Talteenottopotentiaali on hyvin karkea arvio, sillä hyötysuhteessa on huomioitu ainoastaan lämmönsiirron hyötysuhde eri teknologioilla. Taulukossa 5.11 esitetyt tulokset antavat kuitenkin hyvän arvion talteenoton lämpötehon suuruudesta. Järjestelmän talteenottoa mitoitettaessa täytyy huomioida myös lämmön käyttökohteen

vaatima lämpöteho, tässä tapauksessa tuloilmakoneen tuloilman lämmitystehon tarve lämmityskauden aikana. Kuvassa 5.15 on esitetty tuloilman keskimääräinen kuukausittainen lämmitystehon tarve kahdella eri tuloilman määrällä, jotka on kytketty huuvan tehostuksen arvoon.




***Kuva 5.15.*** *VK38:n alueen tuloilmakoneen tuloilman keskimääräinen lämmitystehon tarve.*

Tuloilman lämmitystehon tarve riippuu kuukauden keskilämpötilasta ja huuvan tehostuksen arvosta, sillä tuloilmamäärää säädetään huuvan poistoilmapuhaltimen käyntinopeuden perusteella. Yleisesti taulukon 5.11 lämmöntalteenottopotentiaalin arvioinnin ja kuvassa 5.15 esitetyn tuloilman lämmitystarpeen perusteella voidaan huomata, että lämmöntalteenoton avulla on mahdollista kattaa merkittävä osa tuloilman lämmitystarpeesta. Esimerkiksi 120 kW teholle mitoitettu nestekiertoinen järjestelmä kattaisi alhaisemman tuloilmamäärän maksimilämmitystehon tarpeesta kylmimpänä lämmityskauden kuukautena yli 40 %. Lämpimämpinä kuukausina järjestelmä kattaisi vielä suuremman osan tuloilman lämmitystarpeesta.

Lämmöntalteenoton avulla saavutettava säästö energiankulutuksessa ja kustannuksissa on esitetty taulukossa 5.12. Laskennassa käytetyt oletukset, alkuarvot ja menetelmät on kerrottu luvussa 4.9. Lämmöntalteenotolla on mahdollista saavuttaa merkittävää kustannussäästöä primäärienergiankulutuksen vähenemisen myötä. Järjestelmän takaisinmaksuajan määrittäminen vaatii tarkemman suunnittelun, ja todellinen tuloilman lämmitykseen huuvan poistoilmasta saatava lämpöteho voi olla lopulta pienempi. Tällöin myös kustannussäästöt ovat pienemmät.

***Taulukko 5.12.*** *Arvio huuvan poistoilman lämmöntalteenotolla saavutettavista säästöistä.*

| | **Huuvan poistoilman lämmöntalteenotto** |
|---|---|
| Lämmön käyttökohde | Tuloilman lämmitys |
| Maksimiteho [kW] | 120 |
| Säästö [MWh/vuosi] | 650 |
| Säästö [€/vuosi] | 61 800 |

Nestekierron lämmönsiirtonesteen valinnassa täytyy ottaa huomioon olosuhteet. Vesi soveltuu lämmönsiirtonesteeksi hyvin, mikäli jäätymisvaaraa ei ole. Glykoli tai bioetanoli soveltuu puhdasta vettä paremmin lämmönsiirtonesteeksi, jos lämpötilat ovat hyvin alhaiset.

Edellä arvioitua poistoilman soveltuvaa teknistä hyödyntämispotentiaalia rajoittaa hieman poistoilman likaisuus. Se on myös esteenä regeneratiiviselle lämmönsiirrolle kanavien sijainnin lisäksi, sillä likaisen poistoilman ei ole toivottavaa sekoittua tuloilmaan. Poistoilman mukana kulkeutuu viimeistysprosessissa huovasta irtoavaa mineraaliöljyä, joka tarttuu kanavan pinnoille. Öljy ei ole vesiliukoista, joten sen pesemiseen tarvitaan pesuainetta. Suodatinratkaisu ennen mahdollista talteenottovaihdinta olisi tarpeellinen. Kohteeseen sopiva suodatin on sähköpostikyselyjen perusteella pestävä G2-luokan metalliverkkosuodatin (Mastervent Oy 2025). Suodatin on mahdollista korvata räätälöidyllä ratkaisulla, joka sisältää lämmönvaihtimien automaattisen pesun. Pesu on toteutettu pesuyhteen, säätöventtiilin, viemäröinnin ja kanavan sulun avulla. (Finess Energy Oy 2025)

Kohteeseen sopiva lämmönvaihdintyyppi on lamellipatteri, sileäputkipatteri tai neulalämmönsiirrin. Sileäputkipatteri soveltuu erittäin likaiselle ilmalle mutta patterista tulisi hyvin paksu. Lamellipatteri soveltuu likaiselle ilmalle paksulla ja harvalla lamellivälillä. Talteenottopatterin molemmin puolin on asennettava viemäröinti- ja pesuvesiosat. Edellä mainitut patterit on pestävissä painepesurilla vesi-pesuaineseoksella ja pesu olisi tehtävä 2–3 kertaa vuodessa. (Mastervent Oy 2025)

## 5.8 Energiatehokkuuden parantaminen ohjausmuutoksilla

VK38:n energiankäyttöä on mahdollista tehostaa automaation ja reseptien ohjauksia päivittämällä. Ilman säädintason tarkastelua sekä kuumatelojen että prosessiveden lämmitys ovat ohjauksesta alueita, joiden energiatehokkuutta on vaikea selkeästi parantaa. Tämä johtuu siitä, että reseptistä asetetaan telojen lämmitykselle tavoitearvot, joita rampitusarvon mukaisella lämpötilan nousulla lähdetään lähestymään lämmitysventtiiliä ohjaamalla.

Rampitusarvon muuttamisella ei ole varsinaista merkitystä energiatehokkuuden kannalta, sillä sen laskeminen tai kasvattaminen muuttaa kuumatelojen hetkellistä lämmitystehoa ja täten myös telojen lämmitykseen vaadittua aikaa. Arvon laskeminen laskee lämpötehoa ja pidentää lämmitysvaiheen kestoa. Sen kasvattaminen puolestaan nostaa hetkellistä lämpötehoa ja lyhentää tavoitearvon saavuttamiseen vaadittua aikaa. Tarvittava lämpöenergia primäärienergialähteestä pysyy kuitenkin samana. Lämmönsiirron kannalta alhaisempi lämpötilan nousunopeus laskee telan ja kuumaöljyn välistä lämpötilaeroa pienentäen lämmön johtumisen tehokkuutta.

Kuumatelojen jäähdytysvesien lämpötila on sekä sisä-, että ulkopuolisen kuumatelan jäähdytysvaiheen alussa talteenoton kannalta hyvällä tasolla ja noudattaa jäähdytysveden lämpötilan asetusarvoa suhteellisen tasaisesti. Sisäpuolisen telan jäähdytysveden käyttö muuttuu jäähdytysvaiheen loppupuolella epäoptimaaliseksi, kuten luvussa 5.2 huomattiin. Tämä tapahtuu telalämmön laskiessa riittävän alhaiseksi ja on seurausta PID-säätimen asetusarvon puuttumisesta. Osa tämän epäoptimaalisen jäähdytysvaiheen vedestä on yli talteenoton lämpötilarajan ja laskee talteenotetun jäähdytysveden keskilämpötilaa.

Sisäpuolisen kuumatelan jäähdytyksen loppuvaihetta voidaan parantaa kahdella tavalla. Joko PID-säätimelle asetetaan tavoitearvo myös telalle menevän öljyn lämpötilan ollessa alle 100 °C, esimerkiksi lämpötilaan 70 °C asti, tai telan jäähdytysastetta muutetaan. Veden lämpötilan tavoitearvo voisi olla 60 °C tai hieman alhaisempi, kuten 50 °C öljyn lämpötilan ollessa 70 °C ja 100 °C välillä. Tämä muutos mahdollisesti pidentäisi jäähdytysvaiheen kestoa ja veden tilavuusvirta ei nousisi hetkellisesti yhtä korkeaksi kuin se tällä hetkellä nousee. Kokonaisuudessaan veden kulutus ei juurikaan muutu, mutta jäähdytysveden keskilämpötila nousee ja jäähdytysvettä käytetään tehokkaammin.

Jäähdytysasteen muutos eli se, mihin lämpötilaan kuumatelat jäähdytetään reseptin lopussa vaikuttaa sekä jäähdytysvesien käyttöön että telojen lämmitykseen tarvittavan prosessilämpöenergian määrään. Nykyisellään sisäpuolinen kuumatela jäähdytetään reseptin lopussa 55 °C lämpötilaan, mikä on huovan vaihdon ja lopputöiden aikaisten

työskentelyolojen kannalta sopiva arvo. Energiankäytön kannalta suurempi lämpötila olisi kuitenkin suotuisampi. Tällöin lämpötilaero lämpökäsittelyn alkuhetken oloarvon ja reseptin määrittelemän tavoitearvon välillä olisi pienempi ja tavoitelämpötilan saavuttamiseen vaadittu lämpöenergia pienenee. Pitkällä aikavälillä tällä muutoksella voidaan saavuttaa kustannussäästöä. Jäähdytysveden käyttöön tämä vaikuttaisi siten, että epäoptimaalinen vaihe lyhenee vähentäen jäähdytysveden kulutusta. Ulkopuolinen tela jäähdytetään nykyisellään 90 °C lämpötilaan. Kotiasemassa telan lämpötilan ylläpitäminen vie energiaa, joten ulkopuolisen telan voisi asettaa olemaan ilman ylläpitöä kotiasemassaan.

Prosessi-ilmanvaihdon toimintaan liittyvissä ohjauksissa on muutostarvetta. Lisäkärynpoisto on käytössä reseptillä ohjatusti tällä hetkellä aina, kun reseptissä ohjataan puhaltimet päälle. Tämän kärynpoiston lisäys on tehty polymeerikäsittelystä aiheutuvan käryn poistamiseksi, jotta tuotantotilojen sisäilman laatu säilyisi hyvänä koko viimeistämön alueella. Nykyisellään lisäkärynpoisto käy turhaan ja sen alkuperäisen käytön mukainen ohjaus reseptiin täytyisi toteuttaa siten, että puhallin ohjataan päälle reseptistä polymeerikäsittelyn ruiskutuksen aikaan.

Huuvan poistoilmapuhaltimen tehostuksen taso ei ole tällä hetkellä reseptillä ohjattua. Tehostuksen käyttö on vahvasti koneenhoitajasta riippuvaista, ja sähkömittausten perusteella puhallin käy lähes aina suurimmalla tehostuksen arvolla, jolloin puhallin käy 90 % käyntinopeudella. Käynti on prosessin kannalta riittävä, mutta suuren osan ajasta liian tehokasta. Puhaltimen tehostus olisi syytä muuttaa reseptillä ohjatuksi. Tällöin koneenhoitajasta riippuva tehostuksen käyttö poistuisi ja puhallin kävisi täsmällisemmin prosessitarpeisiin kytketysti. Suurimmasta tehostuksen arvosta olisi hyötyä kalanteroinnin ja polymeerikäsittelyn ruiskutuksen aikana, jolloin ilmassa on hetkellisesti eniten vesihöyryä ja käryä.

Huuvan käynnille voidaan päätellä riittävällä tasolla oleva poistoteho tuotannossa tehdyn lyhyen seurannan perusteella. Seurannan aikana huuvan puhallinta käytettiin 0 % tehostuksella ja telalämmöt olivat kalanteroinnin aikana 170 °C. Silmämääräisesti kuivauksen aikana vapautuva vesihöyry poistui huuvan kautta hyvin eikä mitään poikkeavaa ollut havaittavissa. Painavimpien huopien kuivauksessa höyryä nousee kuitenkin enemmän. Tämän perusteella reseptiohjauksen toteutus riittävälle huuvan puhaltimen käyntinopeudelle olisi seuraavanlainen: kalanteroinnin ja polymeerikäsittelyn aikana tehostusasetus +30 %, muun reseptiajon ja käsittelyiden välisenä aikana tehostus asetettu arvoon +0 %. Taulukkoon 5.13 on koottu kuumatelojen jäähdytyksen ja prosessi-ilmanvaihdon ohjaukselle tässä luvussa ehdotetut muutokset.

***Taulukko 5.13.*** *Muutosehdotukset osaprosessien ohjauksille.*

| Osaprosessi | Muutos | Arvo |
|---|---|---|
| Sisäpuolinen kuumatela | Lämpötila jäähdytyksen jälkeen | 70 °C |
| Ulkopuolinen kuumatela | Lämpötila jäähdytyksen jälkeen | Jäähdytys 90 °C asti, ei lämpötilan ylläpitoa kotiasemassa. |
| Kuumatelojen jäähdytysvedet | Jäähdytysveden lämpötilan tavoitearvo | 50 °C, kun $T_{öljy}$ < 100 °C |
| Huuvan poistoilmapuhallin | Tehostuksen arvo | +30 %: kalanterointi ja polymeerikäsittely (ruiskutus ja lämpökierrokset)<br>0 %: kaikki muut prosessin vaiheet ja käsittelyjen välinen aika |
| Lisäkärynpoisto | Puhaltimen käynti | Päällä ainoastaan polymeerikäsittelyn aikana. |

Taulukkoon 5.13 koostetun huuvan puhaltimen käyntimuutoksen seurauksena puhallin kävisi selvästi suurimman osan ajasta 0 % tehostuksella. Muutoksella saavutettavia hyötyjä ovat huuvan poistopuhaltimen sähkönkulutuksen pieneneminen sekä prosessin toimintojen korkeampi automaation aste. Lisäksi lämmityskaudella ulos puhallettavan, tuotantotilaa lämmittävän ilman määrä ja huuvan poistoilman mukaan säätyvä tuloilmamäärä pienenevät, jolloin myös tuloilman lämmitykseen tarvittava lämmitysenergia pienenee. Taulukossa 5.14 on esitetty huuvan poistoilmapuhaltimen käyntimuutoksella saatava säästö vuodessa puhaltimen sähkönkulutuksen sekä vähäisemmän tuloilman lämmitystarpeen myötä. Arvio on suoritettu luvussa 4.9 kuvatulla menetelmällä. Sähkönkulutuksen säästö perustuu huuvan puhaltimen sähkömittausten tuloksiin.

***Taulukko 5.14.*** *Huuvan käyntimuutoksen avulla saavutettavat säästöt lämmityskauden aikana.*

| | **Puhaltimen kuluttama sähkö** | **Tuloilman lämmitysenergia** |
|---|---|---|
| Säästö [MWh/vuosi] | 27 | 160 |
| Säästö [€/vuosi] | 1 900 | 15 300 |

Vuositasolla kustannussäästö on pienentyneen sähkönkulutuksen osalta hyvin pieni. Taulukosta 5.14 voidaan kuitenkin nähdä, että pidemmällä ajanjaksolla yksinkertaisella huuvan käynnin muutoksella on mahdollista saavuttaa lämmitysenergian osalta suurempi säästö. Mahdollisen huuvan lämmöntalteenoton ja puhaltimen käyntimuutoksen avulla saavutettava kokonaissäästö on jo vuositasollakin merkittävä.

Kokonaisuudessaan prosessin ohjaukseen ehdotetut muutokset lisäävät prosessin toimilaitteiden käytön tehokkuutta, optimoivat sähkönkulutusta laskien samalla poistuvan hukkalämmön määrää sekä tehostavat jäähdytysveden käyttöä. Suhteellisen pienellä prosessi-ilmanvaihdon muutoksella on myös mahdollista saavuttaa kustannussäästöä. Ehdotettujen ohjausmuutosten toteuttamisen jälkeen on syytä seurata niiden toimivuutta kärynpoiston riittävyyden ja yleisesti mahdollisten työolojen muuttumisen osalta.

## 5.9 Kytkentämuutosten mahdollisuudet

Luvussa 2 hukkalämpöjen hyödyntämiskohteiden jaottelun yhteydessä mainituilla prosessin kytkentämuutoksilla on VK38:n tapauksessa mahdollista saavuttaa energiankäyttöön liittyviä hyötyjä. Kytkentämuutos voisi olla lämmöntalteenottojärjestelmän kannalta edullista huuvan osalta ja se voisi olla mahdollista huuvan sijaintia muuttamalla. Huuvan tuominen lähemmäs VK38:n kantileveriä tai huuvan sulkeminen helmoilla lisäisi poistoilman keskilämpötilaa ja kuumatelojen lämmittämä ilma saataisiin kohdistetummin puhallettua huuvan kautta. Kohdistetumman poiston ja korkeamman keskilämpötilan yhteys on nähtävissä taulukossa 5.2 esitetyissä kantileverin kärynpoiston mittaustuloksissa. Huuvan muutoksen mahdollisuutta on tarkasteltava, mikäli lämmöntalteenottojärjestelmä päätetään toteuttaa.

Mikäli poistoilman lämmöntalteenottoa ei toteuteta, huuvan sijainnin muutoksella ei saavuteta hyötyjä. Lämmöntalteenoton puuttuessa lämmintä ilmaa puhallettaisiin suoraan ulos, jolloin prosessin aiheuttama sisäilmaa lämmittävä vaikutus pienenisi.

Tällöin menetetty lämpöenergia lisäisi tuloilman lämmitystarvetta lämmityskaudella. Toisaalta lämpiminä kuukausina tuotantotilat pysyisivät viileämpinä kohdistetumman huuvan poiston ansiosta.

Prosessikytkentämuutoksella on mahdollista tehostaa jäähdytysvesien käyttöä. Tämä on vaihtoehto aiemmin ehdotetuille jäähdytysprosessin ohjausmuutoksille. Muutos kannattaa tehdä, jos ohjausmuutoksella ei saavuteta haluttuja tuloksia. Kytkentämuutos mahdollistaisi talteenottoon menevän jäähdytysveden lämpötilan nostamisen. Lämpötilatason nosto lähtevän jäähdytysveden osalta nostaisi todennäköisesti myöhemmin prosessivetenä käytettävän veden lämpötilaa ennen prosessilämmönvaihdinta, jolloin prosessilämmön tarve kuumaöljyltä pienenisi. Muutoksen myötä saavutettavat säästöt on esitetty taulukossa 5.15. Arviointi on suoritettu kahdella eri lämmönvaihtimelle menevän prosessiveden lämpötilan keskiarvolla ja se perustuu prosessiveden lämpötilamittaukseen ja järjestelmän trenditietoihin.

***Taulukko 5.15.*** *Korkeamman prosessilämmönvaihtimelle menevän veden keskilämpötilan myötä saavutettavat energia- ja kustannussäästöt.*

| | $T_{ka,säiliöstä}$ = 45 °C | $T_{ka,säiliöstä}$ = 50 °C |
|---|---|---|
| Prosessilämmön tarve [kWh/t] | 92 | 48 |
| Säästö [MWh/vuosi] | 52 | 76 |
| Säästö [€/vuosi] | 4 500 | 6 500 |

Taulukosta 5.15 voidaan huomata, että prosessiveden korkeampi lämpötila ennen lämmönvaihdinta ei tuo suuria kustannussäästöjä vuoden ajanjaksolla. Tämä johtuu prosessiveden suhteellisen alhaisesta prosessilämmön tarpeesta. Talteenotetun jäähdytysveden keskilämpötilan nosto ei siis mahdollista suurta kytkentämuutoksen investointia, kun tarkastellaan ainoastaan jäähdytysveden jatkokäyttöä prosessivetenä.

Jäähdytyspiirin kytkentämuutos ja tavoiteltu lähtevän jäähdytysveden lämpötilan nostaminen toteutettaisiin kolmitieventtiilillä. Venttiiliä ohjataan lämpötilamittauksen mukaan, jolloin viileämpää, esimerkiksi alle 40 asteista, vettä kierrätetään takaisin jäähdytysvesipumpulle ja lämmönvaihtimelle. Tämän seurauksena kuitenkin jäähdytysvaihe hidastuu veden ja kuumaöljyn välisen lämpötilaeron pienentyessä. Samalla talteenoton lämpötilan raja-arvon täyttävä vesimäärä kasvaisi, ja jäähdytysvesiä

otettaisiin talteen selvästi enemmän suhteessa prosessiveden tarpeeseen. Tällöin nykyinen säiliökapasiteetti ei olisi enää riittävä. Tarve tulisi siis toiselle säiliölle.

Kahden säiliön talteenottojärjestelmässä jäähdytysvesien hyödyntämiselle syntyy uusia mahdollisuuksia. Osa jäähdytysvedestä hyödynnettäisiin edelleen prosessivetenä omasta säiliöstä, mutta käyttö olisi tehostetumpaa johtuen uudelleenkierrätyksen tai PID-säätimen tavoitearvon muuttamisen jälkeen saavutettavasta veden korkeammasta keskilämpötilasta. Talteenoton jaottelu kahteen säiliöön täytyisi lisäksi toteuttaa siten, että prosessivetenä hyödynnettäväksi menisi lämpimin vesi prosessiveden käytön mukaisissa määrissä. Useamman koneen yhteisessä jäähdytysveden talteenotossa talteenotettavan jäähdytysveden lämpötilaa täytyisi maksimoida kaikilla koneilla, jotta prosessilämmönvaihtimelle menevän veden lämpötila olisi mahdollisimman tasaisesti lähellä maksimiarvoa.

Prosessivetenä käyttämättömälle vedelle on tunnistettavissa useampi käyttökohde. Tämä viimeistysprosessissa hyödyntämätön vesi eroteltaisiin prosessikäytöstä omaan säiliöön ja lämpöä voisi hyödyntää suoraan kiinteistön lämmitysverkkoon. Esimerkiksi tuloilman lämmitykseen talteenotettu jäähdytysvesi soveltuisi jo nykyisen keskilämpötilan osalta ja lämpötilatason nosto ohjaus- tai kytkentämuutoksella parantaisi tätä soveltuvuutta. Tarvittaessa lämpötilatasoa voisi nostaa lämpöpumpulla lämmitysverkon vaatimalle tasolle.

Haasteena jäähdytysvesien lämmön hyödyntämisessä on talteenotetun jäähdytysveden lämmön riittävyys suhteessa lämpönielun lämmöntarpeeseen sekä aikaprofiilien erot lämmönlähteen ja nielun välillä. Tässä tapauksessa lämmön lähde on kytkeytynyt viimeistyskoneiden toimintaan ja telojen jäähdytykseen, jotka toistuvat 3–4 tunnin välein. Kiinteistön lämmitystarve sen sijaan on jatkuvaa.

## 5.10 Tulosten arviointi ja jatkotoimenpide-ehdotukset

Mittaustulosten pohjalta lasketut prosessilämmön ja vedenkulutuksen arvot ovat lähes odotusten mukaisia. Oli odotettua, että kuumatelojen osuus prosessilämmöstä on selvästi suurin. Kuumatelojen prosessilämmön laskenta perustui sekä automaatiojärjestelmän trenditietoihin että pumppukäyrien ja kuumaöljypumppujen sähkömittausten avulla tehtyyn arviointiin. Arviointi aiheuttaa tulokseen virhelähdettä, ja tarkastelijasta riippuen sen tekemiseen voisi löytyä hieman erilaisia keinoja. Kuumatelojen lämpötehon ja prosessilämmön arviointia voidaan pitää onnistuneena, sillä telat on mitoitettu tuottamaan noin 1 MW lämpötehoa.

Prosessiveden lämmitykseen vaadittu prosessilämpö vastaa suhteellisen hyvin odotuksia. Pienoinen yllätys oli lämmönvaihtimelle menevän veden alhainen keskilämpötila. Lämpötilamittaus vaikuttaa kuitenkin onnistuneelta, joten lämpötilan arvoa voidaan pitää luotettavana. Pientä eroa todelliseen arvoon tuo kuitenkin lämpötilan mittaus putken pinnalta. Mittaustapa sopii lämpötilaeron ja täten myös prosessilämmön määrittämiseen. Pintamittaus ei kuitenkaan anna täysin tarkkaa lämpötilan arvoa putken sisällä virtaavan veden lämpötilalle.

Prosessi-ilmanvaihdon mittaustuloksissa mahdollinen virhelähde on huuvan poistoilman virtausnopeuden mittaus, sillä mittaushetken tuuliset olosuhteet todennäköisesti hieman vaikuttivat mittarin lukemaan nopeuden arvoja korottavasti. Tämän seurauksena todelliset virtausmäärät voivat olla hieman alhaisempia etenkin, kun puhaltimen mitoitusarvo on 10 $m^3/s$ ja puhallin ei missään vaiheessa käynyt täydellä kierrosnopeudella. Mittaukseen perustuva laskenta antoi riittävän tarkan arvion poistoilman lämpösisällöstä.

Sähkömittausten tulokset ovat todellista alhaisempia. VK38:n syötön mittaustulos on sähkövirran maksimiarvon osalta odotetusta poikkeava. Todellisuudessa sähkövirran pitäisi vähintään imupumpun käynnistyessä nousta yli 100 A arvoon. Hetkellisesti suoritetussa tarkistusmittauksessa imupumpun sähkövirta oli pumpun käynnistyessä 110 A, kun pumpun kierrosnopeuden arvo oli 60 % maksimista. Imupumpun suhteellisen lyhyt käyntiaika huomioiden tämä mittaustuloksen poikkeavuus ei merkittävästi vaikuta laskennalliseen sähköenergian kulutukseen. Myös huuvan poistoilmapuhaltimen sähkömittauksen tulos on todellista alhaisempi, sillä puhaltimen taajuusmuuttajasta katsottu arvo tehostuksen asetuksella +30 % oli 14–15 A. Alhaisemmat sähkövirran mittausarvot antavat laskennallisesti todellista pienemmän sähkönkulutuksen.

Huuvan lämmöntalteenottopotentiaalin, tuloilman lämmitystarpeen ja huuvan käyntimuutoksen avulla saavutettujen säästöjen arviot ovat karkeita johtuen laskennassa tehdyistä oletuksista. Huuvan lämmöntalteenottopotentiaalin arvio perustuu mittaustuloksiin ja oletuksia tehtiin ainoastaan lämmönsiirron hyötysuhteiden osalta. Tuloilman lämmitystarpeen arviossa käytetty oletus vakiolämpötilasta lämmityspattereiden jälkeen aiheuttaa arvioon virhettä, sillä lämpötila säätyy sisälämpötilan mukaan, joka edelleen riippuu VK38:n kuumatelojen lämpötiloista ja niiden aiheuttamasta lämmittävästä vaikutuksesta. Pitkällä aikavälillä keskimääräinen tuloilman lämpötila on todennäköisesti hyvin lähellä laskennassa käytettyä oletusta. Tuloilman lämmitystarpeen ja poistoilman lämmöntalteenottopotentiaalin arviossa ei huomioitu ilman kosteutta, mikä yksinkertaistaa arviota. Tuloilmapuolella ilman kosteus

saattaa huurtua lämmönsiirtopinnoille kasvattaen painehäviötä ja laskien lämmönsiirron tehokkuutta.

Huuvan käyntimuutoksella saavutettava säästö perustuu lämpöenergian osalta tuloilman laskentaan, joten tässäkin tehdyt oletukset vaikuttavat arvioon. Lisäksi tuloilmamäärä huuvan tehostuksen ollessa 0 % on karkea arvio. Huuvan käyntimuutoksen myötä saavutettava säästö sähkönkulutuksessa perustuu sähkömittauksen tuloksiin. Säästön laskennassa ero todellisuuteen ei kuitenkaan ole niin merkittävä, sillä säästöpotentiaalissa huomioitu ero sähkötehossa kahden puhaltimen tehostusasetuksen välillä on todennäköisesti lähes sama todellisten ja mittauksiin perustuvien sähkötehojen välillä. Kokonaisuudessaan lämmöntalteenotto- ja säästöpotentiaalien osalta tehdyt arviot antavat hyvän käsityksen säästömahdollisuuksista.

Viimeistyskoneen energialaskelmien sekä osaprosessien lämpötilan ja tilavuusvirtojen kuvaajien analysoinnin pohjalta tunnistetut energiatehokkuutta parantavat muutokset ja lämmöntalteenoton toteuttaminen vaativat toimenpiteitä. Tässä luvussa esille tuodut kehitysehdotukset ja niiden vaatimat jatkotoimenpiteet on koottu taulukkoon 5.16.

***Taulukko 5.16.*** *Tutkimustulosten pohjalta muodostetut kehitysehdotukset jatkotoimenpiteineen koostettuna.*

| Kehitysehdotus | Jatkotoimenpiteet |
|---|---|
| 1. Ohjausten päivitys | Taulukon 5.13 ehdotusten toteuttaminen ja niiden vaikutusten seuranta. |
| 2. Huuvan poistoilman lämmöntalteenotto | Järjestelmätyypin valinta. Tarkempi järjestelmän suunnittelu ja kustannusarvio. |
| 3. Kytkentämuutos | Huuvan sijaintimuutoksen tai sulkemisen toteuttamismahdollisuuden selvittäminen. Jäähdytysveden kierrättämisen kytkentämuutoksen kustannusarvio ja vertailu ohjausmuutokseen. |
| 4. Lisätutkimuksen tarpeet | Jäähdytysveden talteenottoaltaan lämpötilan seuranta ja talteenottokokonaisuuden tarkastelu. |

VK38:n energiatehokkuutta kannattaa lähteä parantamaan prosessin ohjaukseen liittyvien kehitysehdotusten toteuttamisella. Muutokset eivät vaadi erillistä investointia ja niiden toimivuutta on helppo arvioida suhteellisen lyhyellä ajanjaksolla, kunhan seurantaan kiinnitetään huomiota. Huuvan poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmän investointi vaatii sopivimman teknologian valinnan ja tarkemman järjestelmämitoituksen, jotta tarkempi kannattavuustarkastelu voidaan tehdä. Kytkentämuutokset vaativat jäähdytysvesien osalta yksittäistä viimeistyskonetta laajempaa tarkastelua, jotta saadaan selkeämpi kokonaiskuva muutoksen tarpeesta. Lisäksi kannattaa arvioida, onko pelkällä PID-säätimen tavoitearvon tai sisäpuolisen kuumatelan jäähdytysasteen muutoksella mahdollista saavuttaa riittävä jäähdytysveden keskilämpötilan nosto, jolloin kytkentämuutosta ei tarvitse toteuttaa.

Työn tulosten pohjalta on tunnistettavissa jatkotutkimuksen tarve. Jäähdytysveden talteenottoaltaan lämpötila on selvitettävä esimerkiksi kaksi viikkoa kestävällä mittauksella, jotta saadaan varma tieto säiliön ja täten myös prosessivetenä käytettävän talteenotetun jäähdytysveden todellisesta keskilämpötilasta. Tämä lisätutkimus antaisi tarkemman kuvan veden keskilämpötilan nostamisen tarpeesta ja jäähdytysvesien lämmön hyödyntämismahdollisuuksista prosessin ulkopuolella.

# 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmastotavoitteisiin pyrkiessä energiankäytöllä on suuri merkitys. Merkittävä osa teollisuuden loppuenergiankäytöstä menee hukkalämpönä ympäristöön ja osa siitä on mahdollista hyödyntää kannattavasti teollisuuskohteen sisäisesti tai myymällä talteenotettua lämpöä kaukolämpöverkkoon. Hukkalämpöjen hyödyntämisessä on kartoitettava lämmönlähteet ja niiden ominaisuudet, jotta voidaan arvioida niiden teknistä hyödynnettävyyttä. Lopulta suurin tekijä investointipäätöksissä on hyödyntämisen taloudelliset tekijät, jotka ovat riippuvaisia käytetystä primäärienergian lähteestä sekä sovellettavasta teknologiasta.

Energiatehokkuus ja hukkalämmöt kytkeytyvät vahvasti toisiinsa. Energiatehokkuutta edistetään energiakatselmustoiminnalla sekä energiatehokkuudesta säädetyllä lailla ja direktiivillä. Teollisuusyrityksissä energiatehokkuustoimenpiteiden toteuttaminen on monivaiheinen prosessi, johon sisältyy rajoitteita, kuten päättävien tasojen suhtautuminen ja taloudelliset hyödyt. Usein energiatehokkuutta vahvasti edistäviä tekijöitä ovat kustannussäästöt ja ympäristöasiat.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää puristinhuopatuotannon viimeistyskoneen energiankulutusta ja arvioida mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseksi. Arviointi tehtiin mittaustutkimuksen pohjalta, minkä avulla aluksi selvitettiin koneen toimintaan liittyvien energiavirtojen termodynaamiset ominaisuudet ja ominaisenergiankulutus. Energiavirtojen luokittelun avulla tunnistettiin hyödynnettävissä olevia lämmönlähteitä, minkä jälkeen esitettiin teknisiä ratkaisuja lämmöntalteenotolle. Lopuksi tarkasteltiin energiatehokkuuden parantamisen mahdollisuuksia automaatiojärjestelmän ohjausmuutoksilla sekä kytkentämuutoksia.

VK38:n toimintaan liittyviä energiavirtoja ovat prosessilämpö, prosessivesi sekä poistovirrat. Prosessiin tuodaan lämpöä kuumaöljyn välityksellä kahdelle kuumatelalle sekä prosessiveteen. Jäähdytysvedet ovat prosessin sisäisiä sekundäärivirtoja, joita hyödynnetään prosessivetenä. Poistovirtoja ovat prosessi-ilmanvaihdon poistoilmavirrat ja imujärjestelmän imuvirta, joka on peräisin prosessivedestä.

Ominaisenergiankulutuksen mukaan jaoteltuna suurimmat energiavirrat ovat kuumatelojen prosessilämpö, jäähdytysvesien lämpöenergia sekä huuvan poistoilman mukana ulos poistuva lämpöenergia. Yhtä viimeisteltyä huopatonnia kohti prosessilämmön tarpeeksi laskettiin 2,1 MWh. Sähköä yhtä viimeisteltyä huopatonnia

kohti kuluu 1,1 MWh ja vettä 58,2 $m^3$. Suurin osa vedestä kuluu kuumatelojen jäähdytykseen.

Huuvan poistoilmaa lukuunottamatta kaikkia energiavirtoja leimaa jaksottaisuus. Lämmön talteenoton ja hyödyntämisen mahdollisuuksia arvioitaessa lämmön jaksottaisuus on merkittävästi näitä heikentävä tekijä etenkin silloin, kun virtaukset ovat matalan lämpötilan energiavirtoja. Viimeistyskoneen energiavirtojen hyödyntämisen arvioinnissa jaksottaisuuden ja lämpötilatason lisäksi oleelliseksi rajoitteeksi tunnistettiin lämmönlähteen väliaineen puhtaus.

Edellä mainittujen tekijöiden perusteella potentiaalisimmaksi hyödynnettäväksi energiavirraksi nousi huuvan poistoilman lämpö. Hyödyntäminen on järkevää jatkuvan lämmönlähteen ja suuren lämpösisällön ansiosta. Poistoilman lämpöä voisi hyödyntää tuloilman tai käyttöveden lämmitykseen.

Keskimäärin kuivan poistoilman teho on päivitetyllä huuvan käyntinopeudella 200 kW, kun poistoilma lauhdutetaan 8 °C lämpötilaan. Kohteeseen sopivia ratkaisuja ovat nestekiertoinen talteenottojärjestelmä lamellipattereilla tai neulalämmönsiirtimillä varustettuna. Arvioitu lämmöntalteenottoteho on noin 120 kW. Vuositasolla lämmöntalteenotolla voidaan saavuttaa 650 MWh energiasäästö nykyiseen lämmitysratkaisuun verrattuna, mikä vastaa vuoden 2024 keskimääräisellä maakaasun hinnalla noin 61 800 € kustannussäästöä. Lämpöpumppu olisi myös sopiva ratkaisu tarjoten laajemman mahdollisuuden lämmön hyödyntämiseen mutta on merkittävästi kalliimpi kuin nestekiertoinen järjestelmä. Teknistä ratkaisua suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon poistoilman likaisuus, mikä vaatii suodatusta ja järjestelmän säännöllistä pesua.

Kytkentämuutoksilla ja automaatiojärjestelmän ohjauksia päivittämällä on mahdollista saada aikaan kokonaisenergiatehokkuuden edistymistä. Huuvan tehostamisasetuksen päivittäminen koneenhoitajasta riippumattomaksi ja enemmän prosessiin kytketyksi pienentää lämmityskauden aikana tuloilman lämmitystarvetta. Tällä saavutettaisiin vuodessa 15 300 € säästö. Huuvan tuominen lähemmäs viimeistyskonetta nostaisi poistoilman keskilämpötilaa ja mahdollisen lämmöntalteenoton lämpötehoa.

Kuumatelojen jäähdytysveden lämpötilan asetusarvon päivittämisellä voidaan nostaa talteenotetun jäähdytysveden keskilämpötilaa ja vähentää prosessiveden lämmitykseen käytettävän prosessilämmön määrää. Jäähdytysveden kierrättäminen uudelleen lämmönvaihtimen läpi on myös yksi mahdollinen jäähdytysveden keskilämpötilaa nostava keino. Automaatioon ja kytkentään kohdistetuilla muutosehdotuksilla voidaan saavuttaa maltillisia kustannussäästöjä.

Tulosten pohjalta muodostetut jatkotoimenpide-ehdotukset on esitetty taulukossa 5.16. Ohjausmuutosten toteuttaminen on suhteellisen yksinkertainen keino vaikuttaa koneen energiankäyttöön. Huuvan poistoilman lämmöntalteenotto vaatii tarkempaa suunnittelua, jotta kohteeseen parhaiten sopiva ratkaisu kustannusarvioineen saadaan muodostettua. Tämän työn tuloksena on todettu VK38:n energiatehokkuuden parantamisen olevan mahdollista, ja kehitysehdotuksia on syytä alkaa toteuttaa askel kerrallaan.

# LÄHTEET


Aflaki, S., Kleindorfer, P.R., deMiera Polvorinos, V.S. (2013) Finding and Implementing Energy Efficiency Projects in Industrial Facilities. Production and Operations Management 22, 503–517. https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2012.01377.x

Alva, G., Lin, Y., Fang, G. (2018) An overview of thermal energy storage systems. Energy 144, 341–378. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037

Arora, R.C. (2012) Refrigeration and Air Conditioning. PHI Learning Pvt. Ltd.

Bianchi, G., Panayiotou, G.P., Aresti, L., Kalogirou, S.A., Florides, G.A., Tsamos, K., Tassou, S.A., Christodoulides, P. (2019) Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry. Energ. Ecol. Environ. 4, 211–221. https://doi.org/10.1007/s40974-019-00132-7

Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L.F., Lävemann, E. (2015) Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. Applied Energy 151, 157–167. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147

Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., Pugliese, G. (2013) A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews 19, 290–308. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.007

Chua, K.J., Chou, S.K., Yang, W.M. (2010) Advances in heat pump systems: A review. Applied Energy 87, 3611–3624. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014

Energiatehokkuuslaki 2014/1429 (2014) Suomen säädöskokoelma. Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadoskokoelma/2014/1429 (Viitattu 5.2.2025).

Energiatehokkuussopimukset 2017–2025 n.d. Saatavissa: https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/ (Viitattu 4.2.2025).

Euroopan komissio (2023) Energy efficiency targets. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-targets_en (Viitattu 4.2.2025).

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/1791 energiatehokkuudesta ja asetuksen (EU) 2023/955 muuttamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti 20.9.2023. (2023)

Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., Khaled, M. (2022) A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations. Cleaner Engineering and Technology 6, 100387. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387

Finess Energy Oy (2025). Tiedustelu huuvan poistoilman lämmöntalteenoton toteutusmahdollisuuksista. Sähköpostiviesti 5.5.2025.

Firth, A., Zhang, B., Yang, A. (2019) Quantification of global waste heat and its environmental effects. Applied Energy 235, 1314–1334. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.102

Forman, C., Muritala, I.K., Pardemann, R., Meyer, B. (2016) Estimating the global waste heat potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews 57, 1568–1579. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192

Fresner, J., Morea, F., Krenn, C., Aranda Uson, J., Tomasi, F. (2017) Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe. Journal of Cleaner Production 142, 1650–1660. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.126

Gupta, A.K., Arora, S.K., Westcott, J.R. (2023) Industrial Automation and Robotics. Mercury Learning & Information, Berlin, GERMANY.

Hall, S. (2012) 2 - Heat Exchangers, in: Hall, S. (Ed.), Branan's Rules of Thumb for Chemical Engineers (Fifth Edition). Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 27–57. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387785-7.00002-5

Heikkilä, I., Huumo, M., Siitonen, S., Seitsalo, P., Hyytiä, H. (2008) Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Teollisuuden energiatehokkuus. Suomen Ympäristökeskus.

Heikkilä, I., Kiuru, T. (2014) Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_ylijaamalampoenergia-analyysit.10766.shtml (Viitattu 14.1.2025).

IEA (2024) Energy Efficiency and Demand - Energy System. International Energy Agency. Saatavissa: https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand (Viitattu 22.4.2025).

IEA (2023) Industry - Energy System. International Energy Agency. Saatavissa: https://www.iea.org/energy-system/industry (Viitattu 22.4.2025).

Ilmatieteen laitos (2024) Havaintojen lataus - Ilmatieteen laitos. Saatavissa: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus (Viitattu 20.5.2025).

Ji, D., Liu, G., Romagnoli, A., Rajoo, S., Besagni, G., Markides, C.N. (2024) Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications. Applied Thermal Engineering 244, 122618. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618

Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S.A. (2018) Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress 6, 268–289. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017

Kakac, S., Liu, H. (2002) Heat Exchangers: Selection, Rating And Thermal Design.

Kamal, A., Al-Ghamdi, S.G., Koc, M. (2019) Revaluing the costs and benefits of energy efficiency: A systematic review. Energy Research & Social Science 54, 68–84. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.012

Klopfenstein Jr, R. (1998) Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. ISA Transactions 37, 257–263. https://doi.org/10.1016/S0019-0578(98)00036-6

Kluczek, A., Olszewski, P. (2017) Energy audits in industrial processes. Journal of Cleaner Production 142, 3437–3453. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.123

Körner, M.-F., Bauer, D., Keller, R., Rösch, M., Schlereth, A., Simon, P., Bauernhansl, T., Fridgen, G., Reinhart, G. (2019) Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. Procedia CIRP, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019 81, 998–1003. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.241

Law, R., Harvey, A., Reay, D. (2016) A knowledge-based system for low-grade waste heat recovery in the process industries. Applied Thermal Engineering 94, 590–599. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.103

Law, R., Harvey, A., Reay, D. (2013) Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry. Applied Thermal Engineering, Includes Special Issue: PRO-TEM Special Issue 53, 188–196. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.024

Li, W., Li, X., Gao, Y., Shi, W. (2022) Thermo-economic evaluation for energy retrofitting building ventilation system based on run-around heat recovery system. Energy 260, 125041. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125041

Lynnworth, L.C., Liu, Y. (2006) Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. Ultrasonics, Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU) 44, e1371–e1378. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.046

Maaskola, I., Kataikko, M. (2014) Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset, Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_lampopumppu-_ja_orc-sovellukset.10766.shtml (Viitattu 14.1.2025).

Manente, G., Ding, Y., Sciacovelli, A. (2022) A structured procedure for the selection of thermal energy storage options for utilization and conversion of industrial waste heat. Journal of Energy Storage 51, 104411. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104411

Mardiana-Idayu, A., Riffat, S.B. (2012) Review on heat recovery technologies for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 1241–1255. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026

Mastervent Oy (2025). Tiedustelu huuvan poistoilman lämmöntalteenoton toteutusmahdollisuuksista. Sähköpostiviesti 28.4.2025.

Mateu-Royo, C., Navarro-Esbrí, J., Mota-Babiloni, A., Amat-Albuixech, M., Molés, F. (2018) Theoretical evaluation of different high-temperature heat pump configurations for low-grade waste heat recovery. International Journal of Refrigeration 90, 229–237. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.017

Mileiko, S., Cetinkaya, O., Yakovlev, A., Balsamo, D. (2021) A Non-Intrusive Ultrasonic Sensor System for Water Flow Rate Measurement, in: 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Presented at the 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530165

Miró, L., Brückner, S., Cabeza, L.F. (2015) Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 51, 847–855. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.035

Morris, A.S., Langari, R. (2016) Chapter 16 - Flow Measurement, in: Morris, A.S., Langari, R. (Eds.), Measurement and Instrumentation (Second Edition). Academic Press, Boston, pp. 493–529. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800884-3.00016-2

Motiva (2024) Energiakatselmustoiminta. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta (Viitattu 4.2.2025).

Motiva (2019) Esiselvitys – Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/esiselvitys_-_ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.10766.shtml (Viitattu 13.1.2025).

Motiva (2016) Energiatehokas lämmönsiirto.

Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U., Micale, G. (2018) Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. Applied Thermal Engineering 138, 207–216. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043

Patterson, M.G. (1996) What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. Energy Policy 24, 377–390. https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1

Pehnt, M., Bödeker, J., Arens, M., Jochem, E., Idrissova, F. (2011) Industrial Waste Heat - tapping into a neglected efficiency potential. Presented at the European Council for an Energy-Efficient Economy (ECEEE Summer Study) 2011. https://doi.org/10.24406/publica-fhg-406064

Rønneseth, Ø., Liu, P., Justo-Alonso, M., Mathisen, H.M. (2019) Techniques for airflow measurements to determine the real efficiency of heat recovery in ventilation systems. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 352, 012068. https://doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012068

Shah, R.K., Sekulic, D.P. (2003) Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons.

Sharma, K. (2011) 1 - Why Automation?, teoksessa: Sharma, K. (Ed.), Overview of Industrial Process Automation. Elsevier, London, pp. 1–14. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415779-8.00001-2

Tan, C., Murai, Y., Liu, W., Tasaka, Y., Dong, F., Takeda, Y. (2021) Ultrasonic Doppler Technique for Application to Multiphase Flows: A Review. International Journal of Multiphase Flow 144, 103811. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103811

Thollander, P., Backlund, S., Trianni, A., Cagno, E. (2013) Beyond barriers – A case study on driving forces for improved energy efficiency in the foundry industries in Finland, France, Germany, Italy, Poland, Spain, and Sweden. Applied Energy 111, 636–643. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.036

Tilastokeskus (2024) Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö. Saatavissa: https://stat.fi/tilasto/tene#reference (Viitattu 13.1.2025).

Trianni, A., Cagno, E., De Donatis, A. (2014b) A framework to characterize energy efficiency measures. Applied Energy 118, 207–220. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.042

Turek, V., Kilkovský, B., Daxner, J., Babicka Fialova, D., Jegla, Z. (2024) Industrial Waste Heat Utilization in the European Union—An Engineering-Centric Review. Energies 17, 2084. https://doi.org/10.3390/en17092084

Työ- ja elinkeinoministeriö (2023) Hukkalämpö. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: https://tem.fi/hukkalampo (Viitattu 8.1.2025).

Valmet (2021) Valmet's Climate Program. Saatavissa: https://www.valmet.com/sustainability/climate-program/ (Viitattu 22.4.2025).

Wagner, T., Hausner, C., Elger, J., Lowen, U., Luder, A., Wagner, T., Hausner, C., Elger, J., Lowen, U., Luder, A. (2010) Engineering Processes for Decentralized Factory Automation Systems, in: Factory Automation. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/9504

Wheeler, A.J., Ganji, A.R. (2010). Introduction to Engineering Experimentation, Third Edition. ed. Pearson Education Ltd.

Woolley, E., Luo, Y., Simeone, A. (2018) Industrial waste heat recovery: A systematic approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments 29, 50–59. https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.001

Wydrych, J., Borsuk, G., Pochwała, S., Tomaszewska-Wach, B., Sebestyén, V. (2025) Modification of the method for determining the flow coefficient K of an Iris damper with a flowmeter with consideration for its applicability in a wider measurement range. Flow Measurement and Instrumentation 102, 102742. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102742

Yang, Y., Chen, H., Cao, Q., Qiao, M., Wang, Y., Fan, J.-N., Yang, C., Pan, B., Wang, X., Wang, F., Ju, W., Zhou, Y. (2023) Purification technology of oil mist in industrial buildings: A review. Building and Environment 235, 110229. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110229