



LEVYTEOLLISUUDEN PINNOITUSTEHTAAN ILMANVAIHDON ENERGIATE- HOKKUUDEN PARANTAMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan koulutusohjelma

14.4.2022

Ari-Pekka Mörntinen

Tarkastajat: Dosentti, TkT Aki Grönman

Liiketoiminnan kehityspäällikkö, DI Kimmo Ahonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Ari-Pekka Mörttinen

Levyteollisuuden pinnoitustehtaan ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen

Diplomityö

2022

89 sivua, 37 kuvaa, 26 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Dosentti, TkT Aki Grönman, LUT ja Liiketoiminnan kehityspäällikkö, DI Kimmo Ahonen, TKK

Avainsanat: hukkalämpö, lämmönvaihdin, rekuperatiivinen, regeneratiivinen, ilmanvaihto, rekuperaatioaste, lämpötila, ilmanvirta, kompressori

Diplomityössä tarkasteltiin Koskisen Oy:n pinnoitustehtaan ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantamista hyödyntämällä poistoilmasta saatavaa lämpöä tuloilman esilämmityksessä. Kohteessa on ennestään asennettuna neulalämmönvaihtimet ilmanvaihdon tulo- ja poistopuolella, mutta hyvin likaisten poistoilmanvirtojen vuoksi poistolämmönvaihtimet eivät toimi odotetulla tavalla. Lisäksi tarkasteltiin pinnoitustehtaalla sijaitsevien kompressorien tuottaman lämmön hyödyntämistä kiinteistön lämmitysverkostossa.

Ilmanvaihdon laskelmia varten hyödynnettiin saatavilla olevia pinnoitustehtaan lämpötila- ja suhteellisen kosteuden tietoja sekä ulkoisen konsultointiyrityksen tietoja ilmanvaihdon virtauksesta. Ulkolämpötilan ja kosteuden arviointiin käytettiin Ilmatieteenlaitoksen energialaskennan testivuotia 2020. Kompressorien tuottaman lämmön hyödyntämistä tarkasteltiin kiinteistölämmityksen lämmönsäätökäyrästäjojen avulla, joilla pystyi muodostamaan trendikäyrän laskelmia varten.

Laskennan tuloksien perusteella voidaan todeta, että nykyisen ilmanvaihdon saneeraus lämmöntalteenoton osalta on kannattavaa, joskin takaisinmaksuajat ovat korkeat. Takaisinmaksuaikoja voidaan pienentää hyödyntämällä energiatukia, jotka voi kattaa investoinneista 20 % tapauksesta riippuen. Lisäksi muiden tarjouspyyntöjen tekeminen voi olla kannattavaa. Kompressorien tuottaman lämmön käyttö on myös mahdollista ja sitä tulisi tutkia lisää.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Ari-Pekka Mörttinen

Improving the energy efficiency of ventilation in the wood panel coating plant

Master's thesis

2022

89 pages, 37 figures, 26 tables and 7 appendices

Examiners: Docent, D.Sc Aki Grönman, LUT and Head of Business Development, DI Kimmo Ahonen, TKK

Keywords: waste heat, heat exchanger, recuperative, regenerative, ventilation, recovery rate, temperature, air flow, compressor

In this thesis the improvement of the energy efficiency of ventilation in Koskisen Oy's coating plant was inspected by making use of the exhaust air heat in the preheating of supply air. There are needle heat exchangers installed on the inlet and outlet sides of the ventilation but because of dirty exhaust air, the exhaust heat exchangers are not working as expected. In addition, the utilization of compressor generated heat was inspected in the coating plant heating network.

The available data on the temperature and relative humidity of the coating plant were utilized along with the air flow data inspected by external consulting company. The test years of the Finnish Meteorological Institute's energy calculation for 2020 were used to estimate the outdoor temperature and relative humidity. The utilization of compressor generated heat was examined by using temperature control curves of the buildings heating network, which could be used to form a trend curve for the calculations.

According to the calculation results, the renovation of the current heat exchangers is profitable, although the payback times are quite high. The payback times can be reduced by utilizing the energy subsidies, which can cover around 20 % of the investment, depending on the case. In addition, new offers should be inspected. The use of compressor generated heat is also possible and should be inspected more.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

| | | |
|-------|---------------------------------------|-----------------------------|
| c_p | ominaislämpökapasiteetti | kJ/kgK |
| q_m | massavirta | kg/s |
| q_v | tilavuusvirta | m ³ /s |
| T | lämpötila | °C/K |
| t | aika | h |
| p | paine | Pa |
| R | yleinen kaasuvakio | kJ/kgK |
| RH | suhteellinen kosteus | % |
| U | yleinen lämmönsiirtokerroin | W/m ² K |
| A | pinta-ala | m ² |
| F | korjauskerroin | |
| C | lämpökapasiteettivirtaama | kW/K |
| R | lämpökapasiteettivirtaamien suhdeluku | (kW/K)/(kW/k) |
| G | Konduktanssi | kW/°C per m ³ /s |
| P | teho | kW |
| a | takaisinmaksuaika | vuosi |
| I | investointien summa | € |
| q | vuotuinen säästö | €/a |
| DF | diskonttaustekijä | |
| i | korkokanta | % |
| n | tarkasteluvuosi | a |

Kreikkalaiset

| | | |
|---------------|------------------|-------------------|
| Φ | lämpöteho | kW |
| ρ | tiheys | kg/m ³ |
| Δ | muutos | |
| ε | rekuperaatioaste | % |
| η | hyötysuhde | % |

Alaindeksit

| | |
|-----|--------------------------|
| d | kuivailma |
| v | vesihöyry |
| sat | saturoitunut/kyllästetty |
| ln | luonnollinen logaritmi |

Lyhenteet

| | |
|------|-----------------------------------|
| LTO | lämmöntalteenotto |
| VAK | valvonnanalakeskus |
| TK | tulokone |
| PK | poistokone |
| LVIS | lämpö, vesi, ilma ja sähkö |
| VSD | taajuusmuuttaja |
| LVIA | lämpö, vesi, ilma ja automatiikka |
| IV | ilmanvaihto |
| RAU | rakennusautomaatio |

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto..... | 3 |
| 2 | Työn tausta..... | 4 |
| 2.1 | Tavoitteet ja aiheen rajaus..... | 4 |
| 2.2 | Työssä käytetyt menetelmät..... | 5 |
| 3 | Ylijäämälämpö teollisuudessa..... | 7 |
| 3.1 | Määritelmä..... | 7 |
| 3.1 | Lämpöpotentiaali..... | 8 |
| 3.3 | Investoinnit energiatehokkuuteen..... | 10 |
| 4 | Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto..... | 11 |
| 4.1 | Ilman sisältämä lämpöenergia..... | 11 |
| 4.2 | Lämmönvaihtimien rakenteelliset ominaisuudet..... | 15 |
| 4.2.1 | Virtausgeometria..... | 15 |
| 4.2.2 | Lämmönsiirtorakenne..... | 21 |
| 4.3 | Lämmöntalteenottolaitteiden tyypit teollisuuden ilmanvaihdossa..... | 25 |
| 5 | Likaisten virtojen vaikutus lämmönvaihtimien toimintaan..... | 26 |
| 5.1 | Vaikutus lämmöntalteenottoon..... | 26 |
| 5.2 | Likaantumismekanismit..... | 27 |
| 5.3 | Ratkaisuja likaantumiselle..... | 29 |
| 5.3.1 | Ennaltaehkäiseminen..... | 30 |
| 5.3.2 | Pintojen puhdistaminen..... | 31 |
| 6 | Case: Koskisen Oy – Pinnoitustehtaan ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen.... | 34 |
| 6.1 | Kohteen esittely..... | 34 |
| 6.2 | Pinnoitustehtaan nykytilanne..... | 36 |
| 6.2.1 | VAK 02 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterit..... | 37 |
| 6.2.2 | VAK 10 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterit..... | 40 |
| 6.2.3 | VAK 18 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterit..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 6.2.4 VAK 10 kompressorihuoneen kompressorit | 42 |
| 6.3 Lämmöntalteenottopotentiali..... | 43 |
| 6.3.1 VAK 02 + VAK 18..... | 45 |
| 6.3.2 VAK 10 | 50 |
| 6.3.3 VAK 10 Kompressorihuoneen kompressorit | 52 |
| 6.4 Hukkalämmön mahdolliset käyttökohteet | 55 |
| 6.4.1 Tuloilman esilämmityksen saneeraus | 55 |
| 6.4.2 Kompressorin hukkalämpö lämmityksen tukena..... | 59 |
| 6.5 Investointien kannattavuuslaskenta | 66 |
| 6.5.1 Tarjous TPI Control..... | 68 |
| 6.6 Investointitukien hakeminen | 70 |
| 6.7 Investointien herkkyystarkastelu | 71 |
| 6.8 Pohdintaa | 74 |
| 7 Johtopäätökset..... | 76 |
| Lähteet | 78 |
| Liitteet | 81 |

Liitteet

Liite 1. Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain 2020

Liite 2. Kylläisen vesihöyryn paine suhteessa ilman lämpötilaan

Liite 3. Lämpöpotentiaalilaskentataulukko

Liite 4. Pinnoitustehtaan VAK 02 ja -18 tilojen kuukausittainen lämpötila 2021

Liite 5. Pinnoitustehtaan VAK 10 tilan kuukausittainen lämpötila 2021

Liite 6. VAK 10 tilan 450 lämmitysverkoston säätökäyrä

Liite 7. VAK 18 tilan 470 lämmitysverkoston säätökäyrä

1 Johdanto

Energiankulutus on hyvin suurta erityisesti metsä-, elintarvike-, metalli- ja kemianteollisuuden aloilla. Tämä tarkoittaa sitä, että ylijäämälämpöä eli tässä tapauksessa hukkalämpöä syntyy näillä aloilla merkittäviä määriä, joita olisi etenkin energiaintensiivisillä aloilla järkevää valjastaa hyötykäyttöön. Kaikilla aloilla sen hyödyntäminen ei kuitenkaan ole itsestään selvä asia. Syitä tälle on esimerkiksi tiedon vähäisyys hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksista, vaikka hukkalämpöpotentiaalia on runsaasti monilla erilaisilla teollisuuden aloilla. Lisäksi riippuen investointien kokoluokasta, niiden kustannukset saatetaan nähdä arveluttavina ja näin ollen hukkalämmön hyödyntämistä koskevat investoinnit saattavat jäädä muiden investointien varjoon. Ymmärrys hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuudesta on kuitenkin lisääntynyt. Erityisesti investointien toteuttamista helpottaa erinäiset energiatehokkuus investointeihin liittyvät tuet, joita voidaan tapauskohtaisesti myöntää yrityksille helpottamaan investointien toteuttamista.

Diplomityön tarkoituksena on tarkastella Koskisen Oy:n vanerilevyjen pinnoitustehtaan ilmanvaihdon lämmöntalteenottopotentiaalia epäsuoralla lämmöntalteenottojärjestelmällä. Kohteen nykyinen ilmanvaihdon lämmöntalteenotto ei toimi odotetulla tavalla hyvin likaisien poistoilmanvirtojen vuoksi. Siksi diplomityön alkuosiossa tutkitaan kirjallisuus- ja verkkolähteiden avulla lämmönvaihtimiin liittyvää teoriaa sekä perehdytään laskentamenetelmiin, joilla voidaan tarkastella lämpöpotentiaalia määritellyssä taserajassa. Lisäksi lämmönvaihtimien likaantumiseen liittyvää teoriaa käsitellään laajasti, jotta voidaan ymmärtää paremmin lämmönvaihtimien ylläpidon tärkeys niiden energiantehokkuuden ylläpidon osalta. Lämmönvaihtimiin liittyvää teoriaa hyödynnetään myös tarkasteltaessa kohteessa sijaitsevien kompressorien lämmöntalteenoton mahdollisuutta ja sen hyödyntämistä tehtaan lämmitysverkostoissa.

Lämmöntalteenottopotentiaalnin arvoa tarkastellaan hyödyntäen Koskisen Oy:n tuottaman kaukolämmön energian hinnan avulla, joka perustuu pääasiallisesti biomateriaalin polttamiseen tehtaan alueella sijaitsevilla leijupetikattiloilla. Tuloksien avulla voidaan tarkastella kohteen energiatehokkuutta parantavien investointien kannattavuutta selvittämällä mahdolliset takaisinmaksuajat. Investointien kannattavuutta selvitetään myös hyödyntämällä vaihtoehtoisia investointitukea, joka voidaan myöntää energiantehokkuutta parantaviin investointihankkeisiin.

2 Työn tausta

2.1 Tavoitteet ja aiheen rajaus

Työssä tarkastellaan Koskisen Oy:n pinnoitustehtaan poistoilmanvaihdossa ulos menevää hukkalämpöä ja sen siirtämistä tuloilman esilämmitykseen hyödyntämällä ilmanvaihdossa käytettäviä epäsuoria tulo- ja poistopuolen kaasu-neste-kaasu lämmönvaihtimia. Kohteessa on ennestään asennettuna tulo- ja poistolämmöntalteenottopattereita, mutta hyvin likaisten poistoilmanvirtojen vuoksi poistolämmöntalteenottopattereiden pinnalle on kertynyt paksumia likakerrostumia, joten niiden toiminta on lähes olematonta. Näin ollen ne on pääosin poistettu käytöstä avaamalla niiden huoltoluukut, joka mahdollistaa poistoilmanvirran kulkeutumisen ulkoilmaan ilman että lämmöntalteenottoa hyödynnettäisiin. Lisäksi osa lämmönvaihtopiireistä on myös suljettu eli lämmönkeruunestettä kierrättävät pumpput eivät ole toiminnassa. Työssä käydään läpi nykyisten lämmönvaihtimien ongelmat sekä lasketaan mahdolliset ilmanvaihdon energiasäästöpotentiaalit hyödyntäessä poistoilman lämpöä tuloilman esilämmityksessä.

Ilmanvaihdonlämmönvaihtimien lisäksi tarkastellaan pinnoitustehtaassa sijaitsevien kompressorien tuottaman lämmön talteenottoa neste-neste lämmönvaihtimella ja sen hyödyntämistä pinnoitustehtaan kolmessa erilämmitysverkostossa, joissa nykyiseltään käytetään Koskisen Oy:n alueella sijaitsevia pääasiallisesti biomateriaalilla toimivia leijupetikattiloita lämmönlähteenä. Työssä lämmityskattiloilla tuotettua lämpöä kutsutaan myös kaukolämmöksi.

Hukkalämpöpotentiaalın selvittämisen jälkeen on mahdollista laskea, kuinka paljon on mahdollista säästää energiankulutuksessa muodostuvissa kuluissa, jos osa poistoilman mukana kulkeutuvasta hukkalämmöstä saataisiin otettua talteen ja hyödynnettyä tuloilman esilämmityksessä. Laskennassa apuna käytetään lämmityskattiloiden polttoaineen muodostamaa hintaa megawattituntia kohden. Vuotuisilla säästöillä voidaan laskea tarkastelussa olevien investointien takaisinmaksuaikoja. Investointeja tarkastellaan ainoastaan poistoilman lämmöntalteenoton osalta. Kompressorien hukkalämmön talteenoton investointikustannuksia ei tässä raportissa tarkastella. Takaisinmaksuaikojen avulla voidaan selvittää mahdollisuuksia energiatuen hakemiselle esimerkiksi Business Finlandilta ja toimenpiteitä, joita energiatuen saanti vaatisi. Aiheessa rajataan ulkopuolelle ilmanvaihtoon liittyvät muut osaset sekä tarkempi lämmönvaihtimien mitoittaminen, jotta voidaan pysyä määritellyssä aikataulussa sekä näin myös voidaan välttyä liian suuresta aihekokonaisuudesta. Mitoitukseen liittyvää asiaa käsitellään kuitenkin hiukan kirjallisuuskatsauksessa.

2.2 Työssä käytetyt menetelmät

Työn kirjallisuusosio perustuu kattaviin kirjallisuus sekä verkkosivu lähdemateriaaleihin, joiden avulla pyrittiin muodostamaan riittävän suuri kokonaiskuva erilaisista lämmönvaihtimien tyypeistä ja niiden toiminnasta. Ymmärtämällä lämmönvaihtimien tekniikkaa, on helppoa käsitellä työssä tehtyä tutkimusosiota. Tarkastelussa olevan kohteen likaisten ilmanvirtojen vuoksi tarkasteltiin lisäksi lämmönvaihtimien likaantumiseen liittyvää teoriaa, joka edesauttaa tulevaisuudessa investointien jälkeistä lämmönvaihtimien huoltoa. Lämmönvaihtimien likaantuminen haittaa merkittävässä määrin niiden toimintaa. Lisäksi tarkasteltiin erinäisiä laskentamenetelmiä, joita voidaan hyödyntää erinäisten tilojen ilmanvaihdon hukkalämpöpotentiaalia laskettaessa. Kirjallisuusosiossa käytiin myös pintapuolisesti läpi lämmönvaihtimen suunnitteluun liittyvää asiaa, tosin sitä ei työn tutkimusosiossa tarkastella tarkemmin, sillä työn tarkoituksena on tukea päätöstä toteuttaa ilmanvaihdon lämmönvaihtimiin liittyvät investointihankkeet havainnoimalla lämmöntalteenottopotentiaali sekä sen tuomat mahdolliset vuotuiset säästöt.

Työssä tarkasteltavan CASE kohteen tietoja saatiin kattavasti haastattelemalla työpaikalla olleita työntekijöitä sähköpostikyselyiden sekä paikalla käytyjen keskusteluiden avustuksella. Lisäksi kiinteistöautomaation keräämiä tietoja ilmanvaihdon ja lämmitysverkostojen toiminnasta sekä ulkoisen konsultointiyrityksen tekemiä tutkimuksia kohteen ilmanvaihdon kunnostuksen osalta voitiin hyödyntää kattavasti laskettaessa kohteen lämmöntalteenottopotentiaalia. Konsultointiyrityksen aikaisemmin tehdyn tutkimuksen laskelmia poistoilmanvaihdosta talteen saatavasta lämmöstä oli mahdollista verrata työssä laskettuihin tuloksiin, mutta niitä ei esitellä työssä tarkemmin. Kohteessa olevia lämmönvaihtimia on myös valokuvattu, joka helpottaa tilanteen havainnollistamista. Ulkolämpötilojen arvioinnissa käytettiin energialaskennan testivuoden 2020 lukemia, jotka ovat saatavilla Ilmatieteenlaitoksen sivuilta. Lisäksi Konsultointiyrityksen selvitystyöhön oli liitetty tarjous ilmanvaihdon kunnostuksesta, jota tarkastellaan CASE osion lopussa investointien kannattavuuslaskelmissa sekä herkkyyssanalyysin hyödyntäen Koskisen Oy:n alueella biokattiloilla tuotetun energianhinnan arviota.

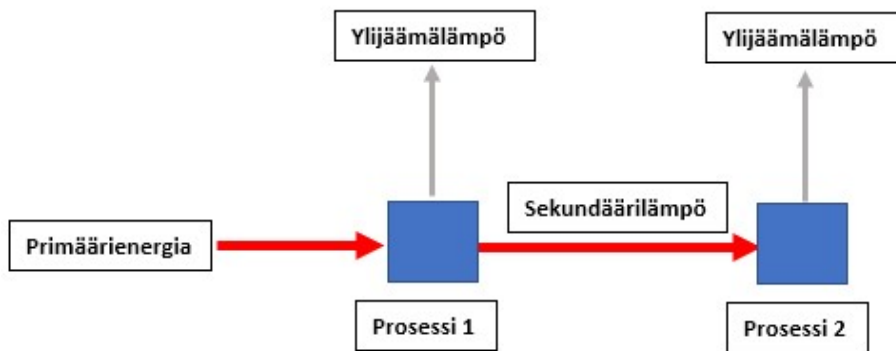
Työssä käsiteltävät tutkimusongelmat voidaan rajata karkeasti neljään pääkohtaan, joihin pyritään vastaamaan hyödyntäen aikaisemmin mainittuja menetelmiä sekä tietolähteitä. Työssä käsiteltävät tutkimusongelmat ovat:

1. Millä tavoin lämmönvaihtimet toimivat ja kuinka voidaan laskea mahdollinen lämpöpotentiaali määritellyssä taserajassa?
2. Miten lämmönvaihtimien likaantuminen tapahtuu ja kuinka sitä voidaan vähentää?
3. Miten suuri lämpöpotentiaali kohteen Pinnoitustehtaan ilmanvaihdossa on ja mitä investointeja tehtäessä tulisi ottaa huomioon?
4. Kuinka paljon Pinnoitustehtaan kompressoreista olisi mahdollista saada lämpöä käytettäväksi kohteen lämmitysverkostoihin?

3 Ylijäämälämpö teollisuudessa

3.1 Määritelmä

Erilaiset teollisuudessa käytettävät ja siellä muodostuvat energiamuodot voidaan yksinkertaistaen luokitella kolmeen luokkaan, joita ovat primääri-, sekundääri- ja ylijäämäenergia. Näistä primäärienergialla tarkoitetaan energiaa, jota ei ole vielä jalostettu. Tähän luokkaan sisältyy esimerkiksi vesivoima tai käsittelemätön biopolttoaine. Sekundäärienergialla tarkoitetaan sähköä tai lämpöä, jota on tuotettu vesivoiman avulla tai esimerkiksi jalostettua polttoainetta kuten bensiiniä. Ylijäämäenergialla tarkoitetaan esimerkiksi muodostuvaa ylijäämälämpöä, jota syntyy, kun primäärienergiaa hyödynnetään prosessissa luoden samalla sekundäärilämpöä seuraaviin prosesseihin. [1] Kuvassa 1 on yksinkertaistettu esimerkki edellä mainittujen energioiden eroavaisuudesta ja syntymekanismeista, joka perustuvat YIT:n ylijäämälämmön määritelmään.



Kuva 1 YIT:n ylijäämälämmön määritelmä, yksinkertaistettu alkuperäisestä kuvasta [2]

Ylijäämälämpöä syntyy monissa paikoissa niin erilaisissa teollisuuden prosesseissa kaasuina sekä niiden jäähdytysvesinä kuin myös ilmanvaihdon yhteydessä poistokaasuina. Taulukossa 1 eritellään erilaiset ylijäämälämmön lähteet sekä niiden keskimääräiset lämpötilatasot. On tärkeää huomioda, että ylijäämälämmön hyödyntämisen kannattavuus riippuu paljolti sen lämpötilatasosta sekä vuotuisesta saatavuudesta. [3]. Sen sijaan että syntynyttä ylijäämälämpöä hyödynnettäisiin jossakin prosessin vaiheessa tai esimerkiksi kylmän tuloilman esilämmityksessä niin se johdetaan tyypillisessä tapauksessa hukkalämpönä ympäristöön, jossa sen energiasisältöä ei voida enää hyödyntää kovinkaan helposti lämpöerojen taantuuessa ympäristön kanssa. [4]

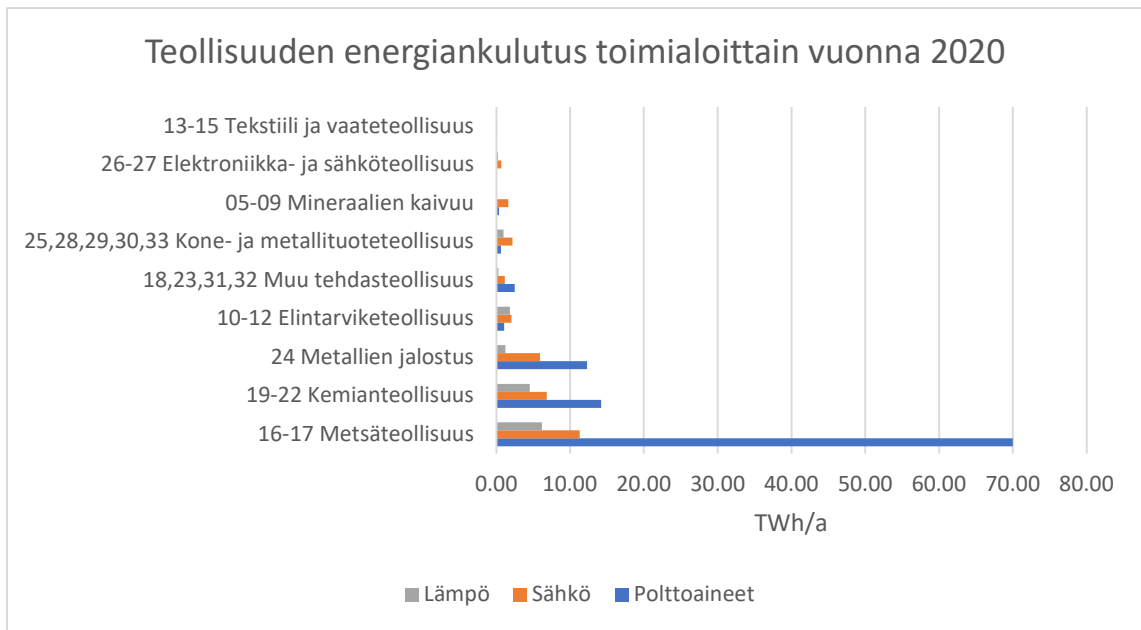
Taulukko 1 Yleisimpiä ylijäämälämmön lämpötilatasoja ja lämmönlähteitä [1]

| Lämpötilatasot | Lähteet |
|----------------|---|
| < 50 °C | -Prosessien jäähdytysvedet -Koneellisen jäähdytyksen lauhdelämpö -Prosesseihin liittyvät poistoilmavirrat |
| 50–100 °C | -Prosessien jäähdytysvedet -Höyryt -Öljyvoideltujen kompressorien jäähdyttäminen |
| > 100 °C | -Savukaasut -Prosessien poistokaasut |

Yleensä järkevin vaihtoehto ylijäämälämmön hyödyntämiseksi on käyttää se muodostumisalueella esimerkiksi lämmöntalteenoton yhteydessä. Ylijäämälämmön hyödyntämiskohteina toimii esimerkiksi polttoaineen kuivatus, raaka-aineiden esilämmitys tai kiinteistön lämmitys. Joissakin tapauksissa sitä voidaan myös myydä lämpöverkkoon tai käyttää sähköntuotannossa ORC-järjestelmällä eli orgaanisten aineiden kiertoon perustuvalla lämpöpumppu-prosessilla. Erilaiset hyödyntämismuodot riippuvat paljolti ylijäämälämmön lämpötilasta, joka määrittää sen, voiko sitä hyödyntää suoraan sellaisenaan vai tarvitaanko ennen sen hyödyntämistä jonkinlaista lämpöpumppua, jolla nostetaan sen energiapotentiaalia eli tässä tapauksessa lämpötilaa korkeampaan tasoon. Esimerkiksi matalalämpöinen ylijäämälämpö voidaan korottaa lämpöpumpuilla, jolloin sen hyödyntämismahdollisuus erilaisissa käyttökohteissa tehostuu. [4]

3.1 Lämpöpotentiaali

Arvioiden mukaan Suomen teollisuudessa käytetystä energiasta reilu kolmannes häviää ympäristöön hukkalämpönä ilman että sitä hyödynnetään missään prosessissa tai lämmityksessä. Erityisesti metsä-, elintarvike-, metalli- ja kemianteollisuus toimivat merkittävimmin hukkalämmönlähteinä. Lisäksi lauhdevoimalaitoksissa, öljyntuotannossa, saha- ja puutavaran valmistuksessa sekä kaatopaikoilla ja jätevedenpuhdistamoissa syntyy suuria määriä hukkalämpöä. [4] Hukkalämmön määrä on selvästi suurin energiaintensiivisimmillä teollisuudenaloilla. Numeroinnit kuvassa 2 viittaavat liitteen 1 mukaiseen taulukkoon, jossa kukin teollisuuden toimiala sekä niiden energiankulutus ovat tarkemmin eriteltyinä. Kuten kuvasta 2 voidaan nähdä, vuonna 2020 kaikista energiaintensiivisin metsäteollisuus käytti energiaa polttoaineena 70 TWh/a, sähkönä 11,33 TWh/a ja lämpönä 6,21 TWh/a. [5]



Kuva 2 Teollisuuden energiankulutus toimialoittain vuoden 2020 aikana [5]

Vuonna 2010 YIT:n tekemän arvion mukaan Suomessa teollisuuden ylijäämälämmön tekninen potentiaali oli noin 19 TWh/a, jonka määrittäminen toteutettiin hyödyntäen teollisuuden vuoden 2008 energiankäyttöä. Skaalaamalla saatu tulos vuoden 2017 aikaiseen teollisuuden energiankulutukseen, Motivan raportissa arvioidaan ylijäämälämmön potentiaalin olevan noin 16 TWh/a. Arvion oletetaan olevan lähellä todellista arvoa, sillä teollisuuksien energiantehokkuusinvestoinnit ovat laskeneet potentiaalia hiukan, mutta toisaalta uudenlaiset pumpputekniikat ovat mahdollistaneet entistä matalalämpöisemmän ylijäämälämmön hyödyntämisen. [1] Jatkuvat investoinnit energiatehokkuuden parantamiseksi teollisuudessa tulevat jatkossakin pienentämään ylijäämälämpöpotentiaalia.

3.3 Investoinnit energiatehokkuuteen

Investointien vähäisyydelle ylijäämälämmön hyödyntämiseksi teollisuudessa on monenlaisia eri syitä. Selvimmin esille tulee tiedon vähäisyys ylijäämälämmön hyödyntämismahdollisuuksista, vaikka ylijäämälämpöpotentiaalia on runsaasti monilla erilaisilla teollisuuden aloilla. Lisäksi riippuen investointien kokoluokasta, niiden kustannukset nähdään arveluttavina etenkin, jos kyseessä on uudenvuoden teknologia, jonka käytön luotettavuudesta ei olla aivan varmoja. Joissakin tapauksissa investoinnit energiatehokkuuden parantamiseen nähdään jopa kilpailevan teollisuusyrityksen muiden investointien kanssa. [1] Syyt riippuvat paljolti kohteena olevasta yrityksestä sekä yrityksen taloustilanteesta ja henkilöstön teknisestä osaamisesta ylijäämälämmön hyödyntämiseen liittyen. On huomioitavaa, että energianhinnan kallistuessa energiatehokkuuteen investoimisen kannattavuus kasvaa ja näin ollen saattaa lisätä yrityksen kiinnostusta energiainvestointeja kohtaan.

Suomessa pyritään edistämään Euroopan unionin määrittelemiä ilmastotavoitteisiin pääsyä houkuttelemalla yrityksiä tekemään uusia investointi- tai selvityshankkeita, joilla edistetään siirtymää kohti ilmastonutraaliutta. Houkuttelumekanismina käytetään energiatukea, joka vaihtelee investointihankkeesta riippuen. Energiatuen saamiseksi investointien- tai selvityshankkeiden tulee kohdistua uusiutuvan energian tuotantoon tai sen käyttöön, energiansäätöön tai energian käytön tehostamiseen sekä energiajärjestelmän muuntamista vähähiiliseen vaihtoehtoon. Vaadittujen ehtojen täytyessä, yritykselle voidaan mahdollisesti myöntää energiatuki. Energiatukiprosessi on kuitenkin harkinnanvaraista ja yleensä siinä ovat etusijalla uuden teknologian hankkeet. Jotta energiatuki voidaan myöntää, kahden ehdon tulee täytyä. Ensimmäisen ehdon mukaan energiatukea voidaan myöntää, jos investointia tai hanketta ei toteutettaisi ilman sitä. Toisen ehdon mukaan energiatukea voidaan myöntää vain silloin, jos yritys ei ole vielä tehnyt sitovia investointipäätöksiä tai tilauksia investointiin tai hankkeeseen liittyen. [6] Energiatukea käsitellään tarkemmin raportin CASE osiossa.

4 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto

4.1 Ilman sisältämä lämpöenergia

Ilmanvaihdon lämmön talteenottoa varten on tärkeää tarkastella asennuskohteessa olevan ilmanvirran lämpöpotentiaalia. Lämpöä voidaan siirtää ilmasta hyödyntämällä konvektiota eli fluidin virtausta lämpötilaerojen ansiosta. Konvektiota hyödyntämällä virtaavassa fluidissa oleva lämpöenergia siirtyy tätä viileämpään aineeseen esimerkiksi lämmönvaihdinta käyttämällä ilmanvaihdon kanaviston yhteydessä. Lämpöenergian siirtymistä voi tapahtua vapaalla- sekä pakotetulla konvektiolla. Vapaassa konvektiossa fluidi virtaa ilman ulkoista energiaa lämpötilaerojen ansiosta. Pakotetussa konvektiossa virtaus toteutuu pumpun tai puhaltimen avulla eli siinä hyödynnetään ulkoista energiaa. Konvektiossa tapahtuvaa lämpöenergian siirtymistä voidaan tarkastella laskemalla fluidin energiatase yhtälön 4.1 mukaisella tavalla, josta selviää miten paljon energiaa virtaava fluidi on luovuttanut huomioimalla alku ja loppulämpötila sekä virtaavan fluidin ominaislämpökapasiteetti, joka tyypilliselle ilmaseokselle on noin 1,01 kJ/kgK sekä virtaavan fluidin massavirta. [7, 8] Jos halutaan selvittää siirtynyttä energiamäärä tietyssä ajassa etukäteen määritellyssä taserajassa, se voidaan kertoa halutulla tuntimäärällä. Esimerkiksi ilmanvirran kulkeutuessa 1 kg/s vuoden ajan eli 8760 h samalla luovuttaen lämpöä 1 kelvinin verran voidaan laskea, että lämpöenergiaa luovutetaan yhteensä 8847,6 kWh vuodessa.

$$\Phi = c_p q_m (T_1 - T_2) \Delta t \quad (4.1)$$

Φ on lämpöteho [kW]

c_p on ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

q_m on virtaavan fluidin massavirta [kg/s]

T_1 on lämpöä luovuttavan fluidin alkulämpötila [K]

T_2 on lämpöä luovuttavan fluidin loppulämpötila [K]

Δt on aikamäärä, jona lämpöenergiaa siirretään [h]

Massavirta on riippuvainen virtaavan fluidin tiheydestä. Näin ollen massavirta voidaan laskea tilavuusvirran ja tiheyden avulla yhtälön 4.2 mukaisesti, jossa tilavuusvirran sekä fluidin paineen ja vallitsevan lämpötilan tulee olla etukäteen tiedossa esimerkiksi mittaamalla ne kanavistosta, jossa tarkasteltava fluidi kulkee. Normaalisti yleisenä kaasuvakiona käytetään 287 J/kgK ilmalle. Yhtälön tiheys koskee kuivaa ilmaa. Tilavuusvirta on tyypillisesti aina sama, eli se ei muutu fluidin tilavuuden mukaan.

$$q_m = q_v \frac{p}{RT} \quad (4.2)$$

q_v on tilavuusvirta [m^3/s]

p on fluidin paine [Pa]

R on yleinen kaasuvakio [kJ/kgK]

T on fluidin lämpötila [K]

Normaalitapauksissa ilma ei ole täysin kuivaa vaan siihen on sitoutunut tietty määrä kosteutta. Kosteuden suhteellinen määrä ilmassa määräytyy ilman lämpötilan mukaan. Tietyn lämpöisessä ilmassa voi olla vain tietty määrä kosteutta sitoutuneena. Käytännössä ilman kyky sitoa kosteutta kasvaa lämpötilan noustessa. Sitoutunut kosteus vaikuttaa ilman tiheyteen, joten se on hyvä huomioida esimerkiksi lämpötehoja laskiessa. Toisaalta vaikutus ei ole välttämättä kovinkaan merkittävä. Kostean ilman tiheyden määrittäminen onnistuu yhtälön 4.3 mukaisella tavalla. [9] Lämpötilan laskiessa voi tapahtua kondensoitumista, eli ilmaan sitoutunut kosteus tiivistyy näin ollen vedeksi.

$$\rho_{kosteaa} = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T} \quad (4.3)$$

$\rho_{kosteaa}$ on kostean ilman tiheys [kg/m^3]

p_d on kuivan ilman osapaine [Pa]

p_v on vesihöyryn osapaine [Pa]

R_d on kuivan ilman ominaiskaasuvakio 287,058 [J/kgK]

R_v on vesihöyryn ominaiskaasuvakio 461,495 [J/kgK]

Yhtälössä oleva höyrynpaine ja kuivan ilman osapaine voidaan laskea yhtälöiden 4.4 ja 4.5 mukaisilla tavoilla. Höyrynpainetta varten tulee selvittää tarkastelukohteena olevan lämpötilan maksimaalinen saturaatiopaine, joka tässä tapauksessa löytyy liitteen 2 taulukosta. Ilman kosteuden vaikutusta entalpiaan voidaan myös tarkastella Mollier diagrammin avulla, jolloin ilman ominaisuudet voidaan määrittellä graafisesti silloin, kun tiedossa on esimerkiksi lämpötila sekä suhteellinen kosteus. Tällöin voidaan esimerkiksi nähdä, millä lämpötilalla ilmassa oleva kosteus tiivistyy vedeksi kahden tunnetun arvon avulla.

$$p_v = RH p_{sat} \quad (4.4)$$

p_v on vesihöyryn osapaine [Pa]

RH ilman suhteellinen kosteus [%]

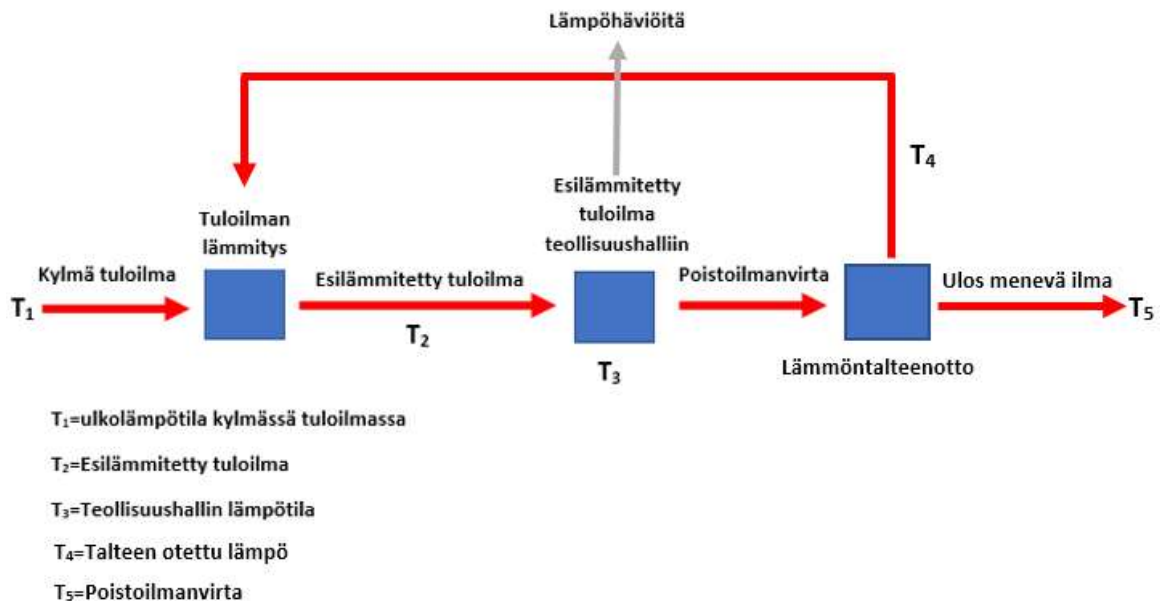
p_{sat} saturaatiopaine tarkasteltavassa lämpötilassa [Pa]

$$p_d = p - p_v \quad (4.5)$$

p_d on kuivan ilman osapaine [Pa]

Edellä mainittujen yhtälöiden avulla voidaan arvioida, kuinka paljon lämpöenergiaa ilmanvirrassa on sen kulkeutuessa ilmanvaihtokanavia pitkin poistoputkesta ulkoilmaan. Näin ollen ilmanvaihdon lämpöenergiapotentiaalin arvioimiseksi on olennaista selvittää ilmanvirran tilavuusvirta ilmanvaihdossa ja muuntaa se massavirraksi hyödyntäen sen tiheyttä sekä selvittämällä lämpötilaerot sisällä esimerkiksi tarkastelussa olevassa teollisuushallissa ja ulkoilman lämpötila. Tilanteen mukaista esimerkkiä havainnollistetaan kuvalla 3, josta voidaan huomata, että tuloilman esilämmittämiseen kuluva energia menee lopulta hukkalämpönä ulos, jos sitä ei hyödynnetä poistoilmanvirtauksesta esimerkiksi tuloilman esilämmityksessä epäsuoralla lämmönvaihdinratkaisulla. Erilaiset tuotantotilassa tapahtuvat prosessit voivat muodostaa paljon lämpöä, joka myös ohjautuu suoraan ulos poistoilman mukana ja näin ollen niiden hyödyntäminen voisi olla järkevää. Todellisuudessa ilmanvirtauksen lämpötila ei ole vakio vaan se riippuu hyvin paljon tuotannosta, vuodenajasta sekä lämpöhäviöistä. Pelkästään ilmanvirran jäähtymistä sisälämmöstä ulkolämpötilaan ei voida

sellaisenaan käyttää arvioidessa talteen otettavaa lämpöä lämmönvaihdinta hyödyntämällä. Suunnitteluvaiheessa voidaan esimerkiksi tarkastella rekuperaatioastetta eli lämmönvaihtimen muodostamaa lämpötilasuhdetta, jonka avulla voidaan selvittää, että millainen lämpötilasuhde lämmönvaihtimella voidaan teoriassa saavuttaa. Asiaa käydään läpi tarkemmin työn seuraavissa osioissa.



Kuva 3 Esimerkitapaus ilmanvaihdon lämpötilojen vaihteluista teollisuudessa sekä poistoilmanlämmön käytöstä tuloilman esilämmityksessä

On tärkeää huomioida, että ulkolämpötila vaikuttaa merkittävästi ilmanvaihdon lämmöntalteenoton kannattavuuteen erityisesti silloin, kun sitä käytetään tuloilman esilämmittämisessä. Aikaisemmin mainittua yhtälöä 4.1 tarkasteltaessa voidaan huomata, että lämpötilaerojen kaventuminen merkitsee vähentynyttä tuloilman lämmityksessä tarvittavaa tai poistoilmasta hyödynnettävää lämpöenergian määrää. Näin ollen voidaan todeta, että vuodenaikalla on merkitystä kannattavuutta tarkasteltaessa. Toisaalta kannattavuuteen vaikuttaa myös ylijäämälämmön hyödyntämiskohde. Esimerkiksi kesäaikana tuloilman lämmitystä harvemmin tarvitaan, joten ylijäämälämpöä olisi mahdollista hyödyntää myös muualla, jolloin lämmöntalteenottojärjestelmän käyttöaste pysyisi korkealla. Kuumimmilla ulkoilmoilla yleensä tarvitaan jonkinasteista jäähdytystä tuloilman esilämmittämisen sijaan. Tietysti on huomioitavaa, että laajemmat käyttökohteet tarkoittavat suurempia investointeja.

4.2 Lämmönvaihtimien rakenteelliset ominaisuudet

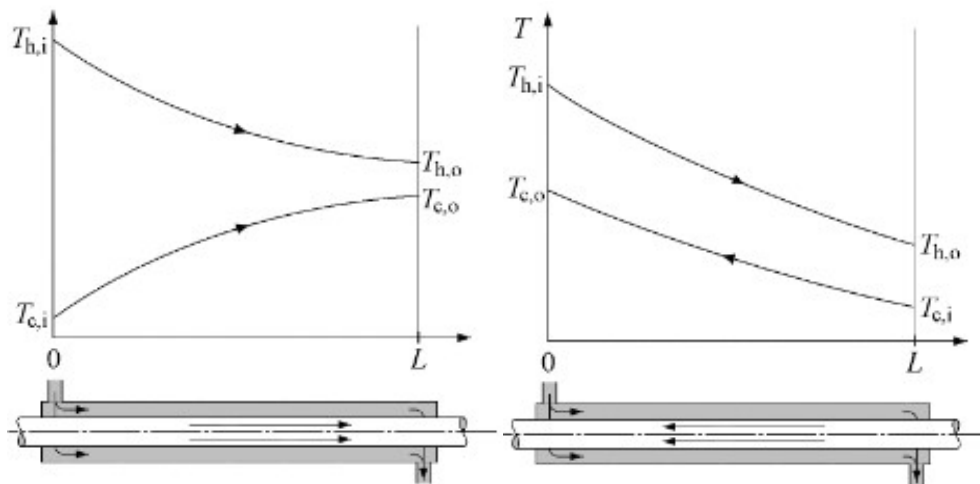
Lämmönvaihtimet voidaan jakaa omiin luokkiinsa virtausgeometrian sekä käytettyjen lämmönsiirtopintojen mukaan. Käytännössä yleisimmät lämmönvaihtimet toimivat hyödyntämällä kahta erilaista fluidia, joiden välillä lämpöä siirtyy lämpimämmästä fluidista kylmempään. Lämmönvaihtimet voidaan tyypillisesti jakaa rekuperatiivisiin ja regeneratiivisiin lämmönvaihtimiin. Rekuperatiivinen lämmönvaihdin tarkoittaa lämmön siirtymistä kahden fluidin välillä ilman että ne ovat kosketuksissa toisiinsa eli ne ovat eroteltuna toisistaan seinämällä tai putkella. Näin ollen ne eivät pääse sekoittumaan keskenään. Rekuperatiivinen lämmönvaihdintyyppi on kaikista yleisin. Regeneratiivisen lämmönvaihtimen toiminta perustuu siihen, että sen rakenne lämpenee ensimmäiseksi kuuman fluidin avulla, jonka jälkeen kylmempi fluidi kulkee saman rakenteen läpi lämmiten rakenteeseen varastoituneella lämpöenergialla. Regeneratiivisen lämmönvaihtimen ongelmana ovat yleensä potentiaaliset vuotokohdat niiden huonon tiiviyyden vuoksi. [10] Seuraavissa osioissa käydään läpi yleisimmät virtausgeometriat sekä tyypillisimmät lämmönsiirtopinnat lämmönvaihtimissa, jotka riippuvat lämmönvaihtimen käyttökohteesta.

4.2.1 Virtausgeometria

Erilaiset lämmönvaihdinratkaisut käyttävät tyypillisesti kolmenlaista virtausgeometriaa hyödyksi, joita ovat myötävirta, vastavirta sekä ristivirta. Virtausgeometrialla tarkoitetaan sitä, millä tavalla keskenään lämpöä vaihtavat fluidit virtaavat lämmönvaihtimen rakenteissa suhteessa toisiinsa. Kullakin virtausgeometrialla on omat etunsa niiden soveltamiskohteista riippuen. [11]

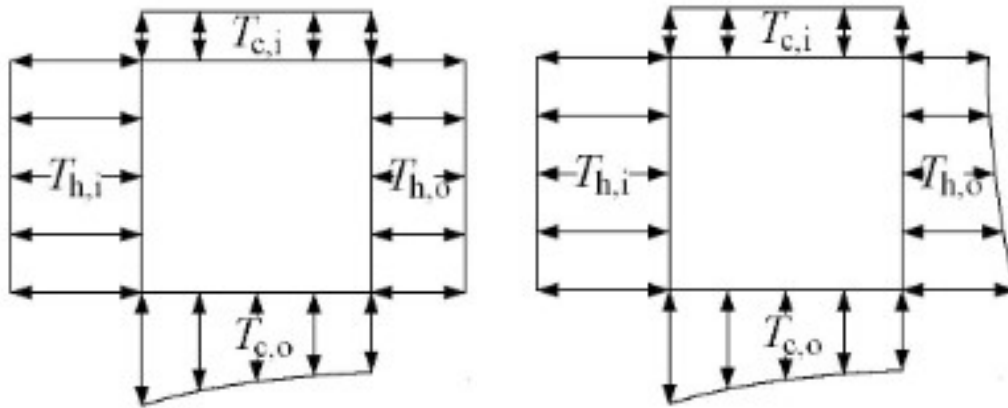
Myötävirtalämmönvaihtimessa fluidit virtaavat samansuuntaisesti, jolloin virtaavien fluidien lämpötilaerot ovat suurimpia lämmönvaihtimen alkupäässä ja toisaalta ne pienenevät lämmönvaihtimen loppupäässä. Tämä lämpöerojen pieneneminen on ongelmallista lämmönsiirtymisen tehokkuuden kannalta, sillä lämmön siirtymistä tapahtuu heikoimmin lämpöerojen kaventuessa. Lisäksi suuret lämpötilaerot sisääntulossa saattavat aiheuttaa räsitteitä lämmönvaihtimen rakenteille. Toisaalta huippulämpötilat pysyvät tällaisessa virtausgeometriassa tasaisempina. Esimerkki myötävirtalämmönvaihtimen lämpötilaeroista suhteessa lämmönvaihtimen pituuteen voidaan nähdä kuvassa 4 vasemmalla, jossa lämpimän- ja kylmän fluidin lämpötila tasaantuu lämmönvaihtimen loppuosassa. Vastavirtalämmönsiirrin toimii niin että fluidit kulkevat vastakkain suhteessa toisiinsa. Tämän virtausgeometrian ansiosta lämmönsiirtymisen on erityisen tehokasta verrattuna myötävirtalämmönsiirtimen

tehokkuuteen, koska lämpötilaerot eivät pääse pienentymään fluidien välillä merkittävästi lämmönvaihtimen eripisteissä. Esimerkki vastavirtalämmönvaihtimen lämpötilaeroista suhteessa lämmönvaihtimen pituuteen voidaan nähdä kuvassa 4 oikealla, jossa lämpimän- ja kylmän fluidin lämpötilaero pysyy melko tasaisena koko lämmönvaihtimen matkalta. [11]



Kuva 4 Vas. Myötävirtalämmönvaihtimen lämpötilaerot ja oik. vastavirtalämmönvaihtimen lämpötilaerot suhteessa lämmönvaihtimen pituuteen [11]

Myötä- ja vastavirtauksen lisäksi voidaan käyttää lämmönvaihdinta, jonka virtausgeometria perustuu lämpöä vaihtavien fluidien ristivirtaukseen. Ristivirtalämmönsiirtimessä fluidit voivat virrata kahdella erilaisella tavalla, joita ovat virtaus niin että toinen fluideista pääsee sekoittumaan lämmönvaihtimen avoimen rakenteen ansiosta sekä tavalla, jossa molemmat fluidit pysyvät sekoittumattomana erillisen ohjaavan lisärakenteen vuoksi. Verrattaessa ristivirtausta vastavirtaukseen, voidaan todeta, että ristivirtaus on hyvä vaihtoehto lämmönsiirtotehokkuuden osalta. Ristivirtaus mahdollistaa yksinkertaisempien osien suunnittelun, jotka mahdollistavat tasaisen virtauksen. Vastavirtalämmönvaihtimien suunnittelemisen on hiukan vaativampaa, jotta voidaan saavuttaa fluidien tasaiset virtaukset. Siksi joissakin tapauksissa vastavirtalämmönvaihtimissa käytetään myös ristivirtausta hyödyksi sisään- ja ulostulossa. Vastavirtalämmönvaihdin sopii silloin ristivirtalämmönvaihdinta paremmin, kun tarvitaan hyvin suuria lämmönsiirtonopeuksia. Molempien virtausgeometrioiden fluidien lämpötilojen muutokset voidaan nähdä kuvasta 5, jossa sekoittuvan virtauksen vaikutus selkeytyy tarkasteltaessa kuumen fluidin ulostuloa. [11]



Kuva 5 Ristivirtalämmönvaihtimen lämpötilamuutos, vas. sekoittuva ja oik. sekoittumaton virtaus. [11]

Kahden fluidin välistä lämmönsiirtymistä erilaisissa virtausgeometrioissa voidaan havainnollistaa yhtälöllä 4.6, jonka avulla voidaan laskea lämmönvaihtimessa tapahtuva lämmönsiirtoteho. Muovaamalla yhtälöä voidaan myös selvittää tarvittava lämmönsiirtopinta-ala lämmönvaihtimelle, johon vaikuttaa merkittävästi logaritminen keskilämpötilaero fluidien kylmien sekä kuumien virtauksien välillä tulo ja poistopäissä. [12] Lisäämällä yhtälöön korjauskerroin F , voidaan yhtälöllä laskea myös haastavampia virtausgeometrioita, kuten ristivirtaukseen perustuvaa lämmönsiirtymistä. Tapauksissa, joissa fluidien lämpökapasiteettivirtaamat ovat merkittävästi erisuuruiset, korjauskertoimenä voidaan käyttää numeroa yksi. [11]

$$\Phi = UA\Delta T_{ln}F \quad (4.6)$$

U on yleinen lämmönsiirtokerroin fluidien välillä [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

A on lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-ala [m^2]

ΔT_{ln} on logaritminen keskilämpötilaero fluidien välillä [K]

F on korjauskerroin

Logaritminen keskilämpötilaero myötä- ja vastavirtalämmönvaihtimille voidaan laskea yhtälön 4.7 mukaisella tavalla. Sen avulla voidaan selvittää, minkä kokoluokan lämmönvaihdinta mahdollisesti tarvitaan riittävän tehokkaaseen lämmönsiirtymiseen suhteessa fluidien lämpötilaeroihin. Mitä suurempi logaritminen keskilämpötilaero on, sitä pienempää

lämmönvaihdinta tarvitaan. Toisaalta pienempi logaritminen keskilämpötilaero vaikuttaa taas kasvavasti tarvittavaan lämmönvaihtimen pinta-alaan, joka näkyy kasvaneissa investoinneissa. [12] Logaritmista keskilämpötilaeroa laskiessa on syytä muistaa, että tuloksen ollessa nolla, keskilämpötilaerona voidaan käyttää suoraan kuumien fluidien lämpötilaeroa.

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{kuumat\ fluidit} - \Delta T_{kylmät\ fluidit}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{kuumat\ fluidit}}{\Delta T_{kylmät\ fluidit}}\right)} \quad (4.7)$$

$\Delta T_{kuumat\ fluidit}$ on kuuman fluidin tulo ja kylmän fluidin poiston erotus $T_3 - T_2$ [K]

$\Delta T_{kylmät\ fluidit}$ on kuuman fluidin poiston ja kylmän fluidin tulon erotus $T_4 - T_1$ [K]

Kuvassa 6 on yksinkertaistettu esimerkki vastavirtaukseen perustuvasta lämmönvaihtimesta. Sen avulla voidaan selventää logaritmisestä keskilämpötilaeron laskemiseen käytettäviä arvoja tarkastelemalla merkittävät termit. Mitä suurempi lämpötilaero molempien fluidien kylmillä virroilla on, sitä suurempi on logaritminen keskilämpötilaero ja näin ollen pienempi lämmönvaihdin riittää lämmönsiirron toteutumiseen. [12]



Kuva 6 Esimerkki vastavirtalämmönvaihtimen fluidien virtaussuunnista, muokattu Suomenkieliseksi [12]

Tarvittava pinta-ala voidaan laskea muokkaamalla yhtälöä 4.6 jakamalla lämmönsiirtymisteho lämmönsiirtokertoimella U ja logaritmisella keskilämpötilaerolla ΔT_m . Näin pinta-alan termi jää vasemmalle puolelle ratkaistavaksi. Näin ollen yhtälöstä 4.8 voidaan huomata eritermien vaikutus pinta-alaan. On tärkeää muistaa, että lämmönvaihtimen suunnittelu on tyypillisesti iteratiivinen prosessi. Alkutilanne lähtee tietyistä oletuksista, joita hiotaan suunnittelun edetessä tarkemmiksi samalla kun lämmönvaihtimen geometria tarkentuu. [11]

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{\ln F}} \quad (4.8)$$

Lämmönvaihtimen suunnittelun alkuvaiheessa voidaan lämmönsiirtokertoimeksi valikoida jokin alkuarvo taulukosta 2, jossa on muutamia etukäteen määriteltyjä lämmönsiirtokertoimia putkilämmönvaihtimille tai taulukosta 3, jossa on lämmönsiirtokertoimia levylämmönvaihtimille. Kutakin lämmönvaihtimen tyyppiä tarkastellaan seuraavassa osiossa tarkemmin.

Taulukko 2 Arvoja lämmönsiirtokertoimelle putkilämmönvaihtimissa erilaisille fluideille yksikössä W/m²K [11]

| Fluidi | kaasu, 1 bar | Kaasu, >25 bar | Neste, suuri viskositeetti | Neste, pieni viskositeetti | Faasi muutos |
|----------------------------|--------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| Kaasu, 1 bar | 5-35 | 10-60 | 15-50 | 20-70 | 20-70 |
| Kaasu, ≥ 25 bar | 10-60 | 100-400 | 100-400 | 150-500 | 200-500 |
| Neste, suuri viskositeetti | 15-50 | 100-400 | 100-400 | 200-500 | 200-900 |
| Neste, pieni viskositeetti | 20-70 | 150-500 | 200-500 | 400-1700 | 500-2000 |
| Faasi muutos | 20-70 | 200-500 | 200-900 | 500-2000 | 700-2500 |

Taulukko 3 Arvoja lämmönsiirtokertoimelle levylämmönvaihtimissa erilaisille fluideille yksikössä W/m²K [11]

| Fluidi | Kaasu, 10 bar | Neste |
|---------------|---------------|----------|
| Kaasu, 10 bar | 10-35 | 20-60 |
| Neste | 20-60 | 200-1200 |

Lämmönvaihtimen toimintaa tarkasteltaessa tai sen sijoittamisen suunnittelun aikana on syytä tarkastella sen rekuperaatioastetta tai toiselta nimeltä lämpötilasuhdetta, joka kuvastaa lämmönvaihtimen lämmönsiirtokykyä maksimaaliseen saatavilla olevaan lämpötehoon. Rekuperaatioastetta kuvaillaan yhtälön 4.9 mukaisella tavalla. Sitä voidaan käyttää myös niin sanotuissa epäsuorissa lämmönvaihdinjärjestelmissä, joissa lämpöä siirtyy poistoilmasta tuuloilmaan erisijainneista erilaisilla ilmanvirroilla. Rekuperaatioasteen suuruus vaikuttaa tarvittavaan lämmönvaihtimen kokoon. Siksi lämmönvaihtimia ei kannata mitoittaa liian isoiksi, jolloin investointien suuruus suhteessa niiden tuomaan hyötyyn saattaa pienentyä merkittävästi. [13] Liian tehokas lämmönvaihdin saattaa myös aiheuttaa kondensoitumista, jos kyseessä on kaasumainen fluidi.

$$\varepsilon = \frac{C_{kylmä}(T_2 - T_1)}{C_{pienin}(T_3 - T_1)} \quad (4.9)$$

ε rekuperaatioaste [%]

T_1 on fluidin lämpötila ennen lämmitystä [K]

T_2 on fluidin lämpötila lämmityksen jälkeen [K]

T_3 on lämpöä luovuttavan fluidin lämpötila [K]

$C_{kylmä}$ on lämpöä vastaanottavan fluidin lämpökapasiteettivirtaama [kW/K]

C_{pienin} on pienin lämpökapasiteettivirtaama tarkasteltavista fluideista [kW/K]

Ratkaisemalla rekuperaatioasteen yhtälöstä 4.9 lämpötila T_2 yhtälön 4.10 mukaisella tavalla, voidaan arvioida, että miten paljon milläkin rekuperaatioasteella saadaan lämpöä siirrettyä lämpöä luovuttavasta fluidista lämmitettävään fluidiin. Mitä suurempi rekuperaatioaste, sitä enemmän lämpöä saadaan siirrettyä.

$$T_2 = \frac{\varepsilon C_{pienin} T_3 - \varepsilon C_{pienin} T_1 + C_{kylmä} T_1}{C_{kylmä}} \quad (4.10)$$

Lämpöä luovuttavan sekä vastaanottavan fluidin lämpökapasiteettivirtaama voidaan laskea yhtälön 4.11 mukaisesti kertomalla tilavuusvirta tiheydellä ja ominaislämpökapasiteetilla.

$$C = q_v \rho c_p = q_m c_p \quad (4.11)$$

ρ on virtaavan fluidin tiheys [kg/m³]

Fluidien lämpökapasiteettivirtaamien suhdeluku voidaan ratkaista yhtälön 4.12 mukaisella tavalla. Suhdeluku pätee silloin, kun kummassakaan fluidissa ei tapahdu faasimuutosta eli olomuodon muutosta nestemäisestä kaasumaiseksi tai kaasumaisesta nestemäiseksi. Lämpökapasiteettivirtamien sijainti yhtälössä riippuu niiden suuruudesta. Normaalisti pienempi lämpökapasiteettivirtaama jaetaan suuremmalla lämpökapasiteettivirtaamalla.

$$R = \frac{C_{\text{pienin}}}{C_{\text{suurin}}} \quad (4.12)$$

C_{suurin} on suurin lämpökapasiteettivirtaama tarkasteltavista fluideista [kW/K]

Tilanteissa, joissa lämmöntalteenottoa hyödynnetään esimerkiksi tuloilman esilämmityksessä, voidaan pienemmän lämpökapasiteettivirtaaman omaavaa fluidia hyödyntämällä ja rekuperaatioaste olettaen huomioiden sekä sisä- ja ulkolämpötilan erotuksella laskea pois-
tosta esilämmitykseen siirretty lämpöteho yhtälön 4.13 mukaisella tavalla. [11]

$$\Phi = C_{\text{pienin}} \varepsilon (T_{\text{sisälämpötila}} - T_{\text{ulkolämpötila}}) \quad (4.13)$$

Lämmönvaihtimen konduktanssia eli kykyä siirtää lämpöä tietyssä olosuhteessa voidaan tarkastella yhtälön 4.14 avulla. Sitä varten tulee selvittää logaritminen lämpötilaero fluidien välillä sekä laskea lämmönvaihtimen teho esimerkiksi yhtälön 4.13 mukaisesti. [13]

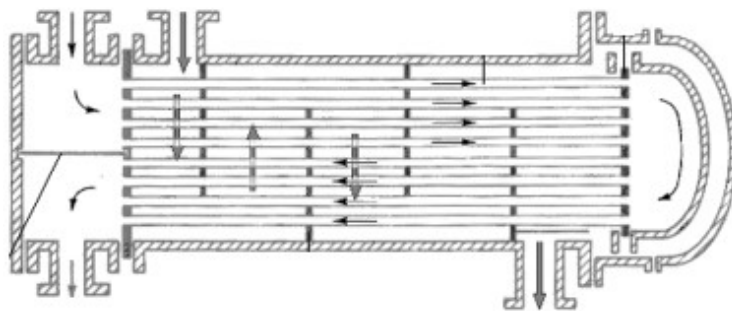
$$G = \frac{\Phi}{\Delta T_m} \quad (4.14)$$

G on konduktanssi [kW/°C]

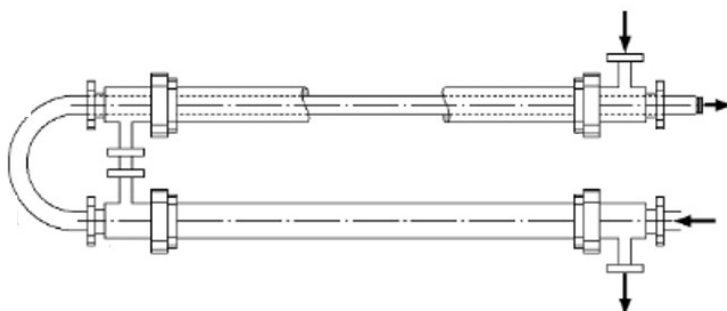
4.2.2 Lämmönsiirtorakenne

Erilaiset lämmönvaihtimet voidaan virtausgeometrian lisäksi jakaa myös niiden rakenteellisten ominaisuuksien osalta. Yleisimpiä lämmönvaihtimissa käytettyjä rakenteita ovat muun muassa putki- ja levylämmönvaihtimet, jotka ovat tyypillisesti rekuperatiivisia lämmönvaihtimia sekä regeneratiiviset lämmönvaihtimet eli esimerkiksi pyörivä lämmönvaihdin, joka varastoi lämpöä rakenteisiinsa. Lisäksi lämmönvaihtimista on olemassa erilaisia sovellutuksia, kuten yhdistelmä, joissa on putkia sekä erillisiä niin sanottuja eviä tai levyjä putkien pinnoilla tuomassa lisää pinta-alaa, joka tehostaa lämmönsiirtymistä. Siirtopinnoilla on myös omia alaluokkia, jotka poikkeavat toisistaan rakenteellisesti. [10]

Putkilämmönvaihtimien muoto vaihtelee tapauksesta riippuen. Putket voivat olla esimerkiksi pyöreitä, elliptisiä tai tasaisia kierrettyjä putkia. Lisäksi putket voidaan pinnoittaa lämmönvaihdon tehostamiseksi erilaisilla kuvioilla. Putkilämmönvaihtimet voidaan vielä luokitella esimerkiksi vaippa- ja putkilämmönvaihtimeksi, sekä tupla-putkilämmönvaihtimeksi, joista on nähtävissä esimerkit kuvissa 7 ja 8. Lisäksi putkilämmönvaihtimista on olemassa myös spiraali mallisia putkilämmönvaihtimia. Putkilämmönvaihtimien hyöty näkyy niiden soveltuvuudesta erilaisiin kohteisiin. Niiden geometriaa voidaan helposti muuttaa vaihtamalla putken halkaisijaa, pituutta sekä asentoa lämmönvaihtimessa. Lisäksi putkilämmönvaihtimet soveltuvat hyvin vaativiinkin olosuhteisiin, kuten tapauksiin, joissa ympäröivä paine on todella suuri tai lämmönvaihtimessa kiertävien fluidien paine-erot ovat isoja. Tyypillisiä käyttökohteita putkilämmönvaihtimille ovat neste-neste sekä neste-faasisiirtokset sovellutukset. Putkilämmönvaihtimia voidaan käyttää myös erityisen liikaavissa kaasu-neste tai kaasu-kaasu sovellutuksissa. [10]



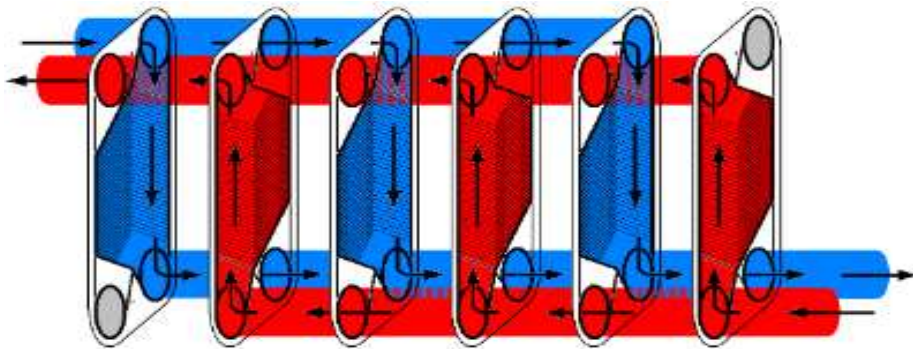
Kuva 7 Vaippa-putkilämmönvaihdin nuolien mukaisilla virtaussuunnilla [11]



Kuva 8 Tuplaputkilämmönvaihdin nuolien mukaisilla virtaussuunnilla [11]

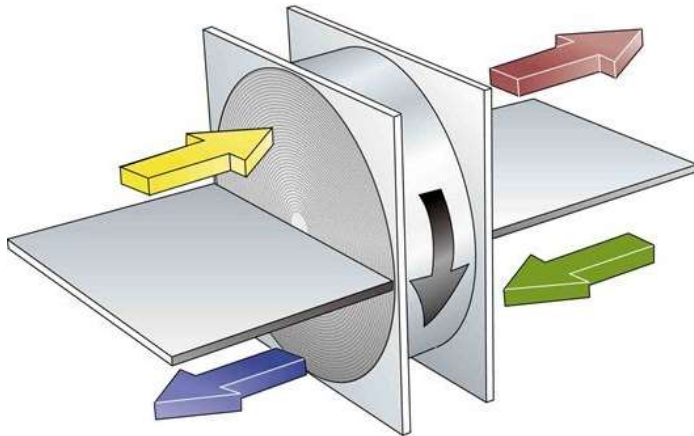
Levylämmönvaihtimet koostuvat tyypillisesti hyvin ohuista levyistä, jotka ovat kiinnitettyinä toisiinsa nipuksi tai kerroksiksi. Levyjen kiinnitys voidaan suorittaa erilaisilla menetelmillä, kuten hitsaamalla tai juottamalla. Tyypillisin levylämmönvaihdin on niin sanottu tiivistetty levylämmönvaihdin, jossa tiivisteillä estetään fluidien kosketus toisiinsa sekä

ulkopuolisen ilman kanssa. Tiivisteellisen levylämmönvaihtimen esimerkkirakenne sekä lämpöä luovuttavan ja lämpöä vastaanottavan fluidin virtaus esitetään kuvassa 9. Kuten kuvasta voidaan huomata, lämpöä luovuttava fluidi virtaa joka toisessa levyssä, kuin myös lämpöä vastaanottava fluidi. Putkilämmönvaihtimiin verrattuna levylämmönvaihtimet soveltuvat olosuhteiden osalta kevyempiin kohteisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttökohteen paineen ja lämpötilan tulee olla pienempiä toiminnan kannalta, jotta levylämmönvaihtimen kestävä vallitsevia olosuhteita. [10] Levylämmönvaihtimien etu tulee niiden matalista valmistuskustannuksista sekä kevyistä rakenteista, joka myös mahdollistaa niiden käytön niin sanotuissa kompakteissa lämmönvaihtinratkaisuissa, jotka eivät vaadi läheskään niin paljon tilaa asennuskohteelta, kuin esimerkiksi edellä mainitut putkilämmönvaihtimet. Levylämmönvaihtimia on myös mahdollista muuttaa tarpeen tullen esimerkiksi levyjä lisäämällä tai vähentämällä. Niiden muutettavuus myös mahdollistaa yksittäisten levyjen puhdistamisen. [11]



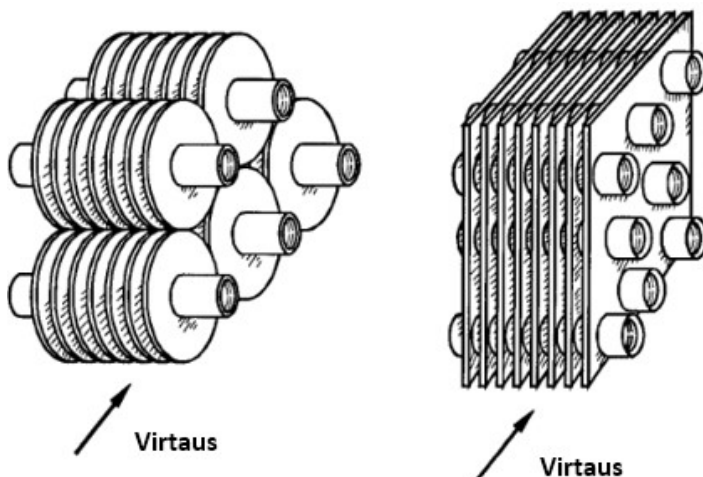
Kuva 9 Tiivisteellinen levylämmönvaihtimen virtausuunnilla [11]

Regeneratiivisista lämmönvaihtimista yleisin on niin sanottu pyörivä lämmönvaihtin, jossa lämpöä vaihtava pyöreä kiekkomainen rakenne tai matriisi pyörii akselinsa mukaisesti. Tulo- ja poistoilmanvirtaus kulkeutuvat omia kanaviansa pitkin, jolloin matriisin pyörimisen myötä tulo- ja poistoilmanvirtaus pääsevät kosketuksiin vuorotellen jäähtyneeseen ja lämmentyneeseen lämpöä keräävään ja luovuttavaan rakenteeseen, jolloin siihen varautunut lämpö siirtyy ilmanvirrasta toiseen. Lämmönsiirtyminen perustuu lämpöä varaavaan rakenteeseen. Pyörivän lämmönvaihtimen toimintaa havainnollistetaan kuvassa 10. Tyypillisesti pyörivät lämmönvaihtimet ovat hyödyllisiä niiden kompaktin rakenteen ansiosta. Tehokkaan lämmönsiirtymisen takaamiseksi ei ole tarvetta niin isoille lämmönvaihtinratkaisuille. Ongelmana tosin on niiden huono tiiveys, jolloin ilmanvirrat saattavat vuotaa rakenteen läpi. [10]



Kuva 10 Pyörivän regeneratiivisen lämmönvaihtimen toimintaperiaate [14]

Erikoisemmille lämmönvaihtimien sovellutuksille tulee tarvetta silloin, kun niiden asennuskohde sijaitsee erittäin ahtaissa tiloissa. Ahtaiden tilojen vuoksi lämmönvaihtimen tehoa ylläpitääkseen tulee sen pinta-alaa lisätä erityisesti tapauksissa, joissa vähintään toinen fluideista on kaasumaisessa muodossa. Lämmönvaihtimen pinta-alaa voidaan lisätä ympäröimällä lämmönvaihtoputki kauttaaltaan esimerkiksi ripoilla tai levyillä, jotka tehostavat lämmönsiirtymistä lämmönvaihtimen pinta-alan lisääntyessä merkittävästi. Esimerkki kummastakin tapauksesta voidaan nähdä kuvasta 11. Kuten voidaan huomata, tämän tyyppisten lämmönvaihtimien lämmönvaihtoala on yleensä hyvin iso. Tyypillisesti pinta-alan ja lämmönvaihtimen tilavuuden suhdelukema on vähintään $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. [11] Lisäksi on olemassa myös niin sanottuja neulalämmönvaihtimia, joissa ripat tai levyt on korvattu eräänlaisilla harjaksilla tai neulasilla lämmönvaihtimen pinta-alaa lisäämään. Esimerkiksi tämän työn CASE kohteella on käytössä Retermian neulalämmönvaihtimet, joita käsitellään tarkemmin työn myöhemmissä osioissa.



Kuva 11 Vas. lämmönvaihtimien pyöreillä ripoilla, Oik. lämmönvaihtimien levyillä [10]

4.3 Lämmöntalteenottolaitteiden tyypit teollisuuden ilmanvaihdossa

Teollisuuden ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen on lähestulkoon aina kannattava investointi, kunhan pidetään huolta, että prosessien toiminta sekä hyvän työympäristön vaatimukset täyttyvät. Esimerkiksi vuonna 2015 keskisuurilla- sekä energiavaltaisilla teollisuudenaloilla säästöä kertyi kussakin tapauksessa noin 5 GWh hyödyntämällä lämmöntalteenottoa. Keskisuurilla teollisuudenaloilla lämmöntalteenotto toimien määrä oli noin 35 kpl kun toisaalta energiavaltaisilla teollisuudenaloilla toimia tehtiin noin 13 kpl. Lämmöntalteenoton kannattavuuteen vaikuttaa useita eriasioita. Esimerkiksi poistoilman ominaisuudet kuten lämpötila, kosteus ja epäpuhtaudet, laitteiston käyttöaika tuotannosta riippuen, energian hinta ja laitteiston käyttökustannukset sekä talteen otetun lämmön soveltuvuus tarkasteltuun käyttökohteeseen. [15]

Teollisuuden ilmanvaihdossa käytetyt lämmöntalteenottoratkaisut ovat hyvin erilaisia kohteen olosuhteista riippuen. Sopivanlaisen ratkaisun löytämiseen vaikuttaa esimerkiksi lämmöntalteenottolaitteelle tarkoitetun tilan ahtaus, ilmanvaihdon järjestelyt, mahdolliset likaiset ilmanvirrat sekä muita asioita, jotka vaikuttavat lämmöntalteenoton tai tilojen ilmastointilaitteiden toimintaan kokonaisuutena. Taulukossa 4 on eriteltyinä muutamia vaihtoehtoja lämmöntalteenottolaitteille erilaisten asennuskohteiden ominaisuuksien mukaan. [15] Kuten taulukosta voidaan nähdä, lämmöntalteenottolaitteiston soveltuvuus tulee tarkastella aina tapauskohtaisesti, jotta käytönaikaisilta ongelmilta voitaisiin parhaan mukaan välttyä.

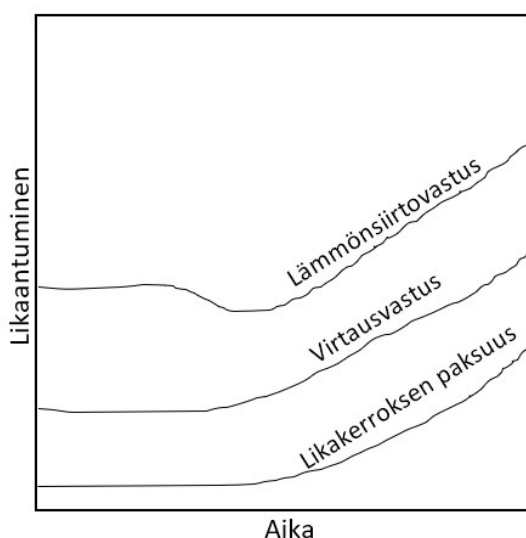
Taulukko 4 Erilaisiin tilanteisiin sopivia lämmöntalteenottoratkaisuja [15]

| Kohde | Soveltuva lämmöntalteenottolaitteisto |
|--|--|
| Ahdas tila | Nestekiertoinen- tai lämpöputkipatteri |
| Poisto- ja tuloilmat erillään | Nestekiertoinen patteri |
| Edullinen lämmönsiirtopinta | Levylämmönvaihdin |
| Suuri hyötysuhde | Regeneraattori |
| Tarve puhdistuksen aikaiselle irrotukselle | Lämpöputkipatteri, sektoroitu regeneraattori |
| Poistoilmassa pölyä | Regeneraattori, neulalämmönsiirrin |
| Todella likainen poistoilma | Levylämmönvaihdin + puhdistuslaitteet, lämpöputkilämmönvaihdin |
| Kosteuden siirto tarpeellinen | Regeneraattori |
| Poistovirta ei saa sekoittua tulovirran kanssa | Nestekiertoinen patteri, lämpöputkipatteri kaksoisväliseinällä |

5 Likaisten virtojen vaikutus lämmönvaihtimien toimintaan

5.1 Vaikutus lämmöntalteenottoon

Likaantuminen on yksi merkittävimpiä ongelmien aiheuttajia lämmönvaihtimien toiminnassa. Lämmönvaihtimille kertyvä lika vähentää niiden kykyä siirtää lämpöä sekä nostaa niissä tapahtuvia painehäviöitä. Painehäviön nousu tarkoittaa pumppaustehon tarpeen lisääntymistä samojen ilmanvirtojen ylläpitämiseksi, joka toisaalta lisää merkittävästi sähkönkulutusta. Joissakin tapauksissa lika aiheuttaa lämmönvaihtimiin jopa niin paljon, että niissä tapahtuva lämmönsiirtyminen voi pysähtyä kokonaan. [10] Kuvassa 12 on yksinkertainen esimerkki, kuinka lian kertyminen lämmönvaihtimen pinnalle vaikuttaa fluidin virtaukseen sekä lämmönvaihtimessa tapahtuvaan lämmönsiirtymiseen. Kuvan 12 mukainen lämmönsiirtovastuksen hetkellinen pieneneminen johtuu lian aiheuttamasta turbulentsisuudesta fluidin virtauksessa, joka tehostaa lämmönsiirtymistä. [16]



Kuva 12 Lämmönvaihtimen likakerroksen paksuuden vaikutus virtaukseen ja lämmönsiirtoon, muokattu alkuperäisestä suomeksi [16]

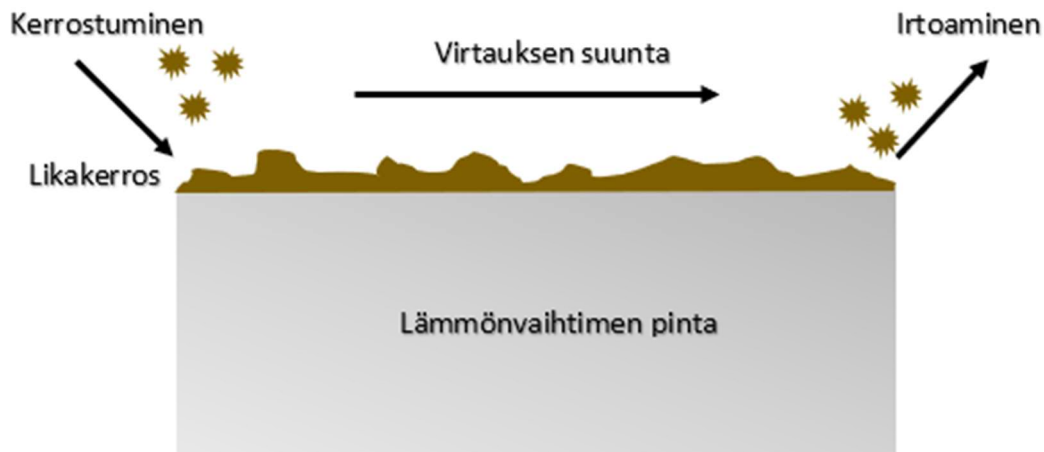
Teollisuudessa lian kertyminen lämmönvaihtimien pinnoille aiheuttaa lisääntyneitä primääripolttoaineiden kulutusta, mahdollisia kasvaneita kasvihuonekaasujen päästöjä, lisääntyviä kustannuksia sekä vaikeiden puhdistustöiden tarpeita. Nämä aiheuttavat yrityksille kasvavia kustannuksia niin investoinneissa, energiassa kuin myös lisääntyneinä huolto- ja tuotannon kustannuksina. Tyypillisesti likaantumisen aiheuttamia ongelmia lämmönvaihtimien kanssa pyritään pienentämään ylivoimaisesti lämmönvaihtimia 20–50 % normaalia suuremmaksi. Tällä tavoin lämmönvaihtimen ajatellaan toimivan tehokkaasti jopa silloin, kun likaa kertyy

sen pinnoille. Ylimitoittaessa virtausnopeudet yleensä pienenevät, jolloin myös lian kertyminen lämmönvaihtimen pinnalle on nopeampaa vähentyneen turbulenttisuuden eli leikkausvoimien pientymisen vuoksi. Käytännössä voidaan todeta, että lämmönvaihtimen likaantuminen aiheuttaa aina lisääntyneitä kustannuksia yritykselle. [17] Vuonna 1992 teetetyin arvion mukaan, lämmönvaihtimien likaisuus voi keskimäärin aiheuttaa kustannuksia, jotka ovat määrältään noin 0,25 % bruttokansantuotteesta. [16]

Lämmönvaihtimen likaantumisen aiheuttama energiatehokkuuden pientyminen kasvattaa lisälämmityksen tai -viilennyksen tarvetta. Joissakin tapauksissa ongelmaa pyritään korjaamaan lisäämällä virtausnopeutta pumpun tai puhaltimen tehoa kasvattamalla. Tämä kuitenkin lisää painehäviötä, jota lian kertyminen lämmönvaihtimen pinnalle aiheuttaa pienentäessä virtauskanavaa ja näin ollen lisäten virtausvastusta. Painehäviötä syntyy myös ilman että pumpun tai puhaltimen tehoa kasvatetaan. Sen sijaan että ongelmaa yritettäisiin korjata virtausnopeutta kasvattamalla lisäten pumppaukseen tai puhallukseen kuluvaa energiaa, tulisi sen sijaan keskittyä erilaisiin lämmönvaihtimien puhdistamismenetelmiin. [17] Puhdistusmenetelmiä on erilaisia lämmönvaihtimista ja lian tyypistä riippuen. Jokaisessa teollisuusyrityksessä lämmönvaihtimien likaantuminen tapahtuu kohteen ominaisuuksista sekä siellä virtaavien fluidien laadusta riippuen. Siksi lämmönvaihtimien likaantumista tulisi tarkastella aina tapauskohtaisesti. Tämä on myös yksi syy sille, minkä takia lämmönvaihtimien likaisuuden tarkastelu kokonaisvaltaisilla tutkimuksilla on hankalaa.

5.2 Likaantumismekanismit

Lämmönvaihtimien pintojen likaantuminen koostuu yleensä kahdesta samanaikaisesti tapahtuvasta prosessista, joita ovat kerrostuminen ja lian irtoaminen kuvan 13 mukaisella tavalla. Käytännössä lika kulkeutuu virtauksen mukana kohti lämmönvaihtinta, jossa se kiinnittyy lämmönvaihtimen pinnalle. Riittäväällä virtauksella ja virtauksen turbulenttisuudella lika kuitenkin saattaa osittain irrota ja palata takaisin virtaukseen. [16]



Kuva 13 Lämmönvaihtimen pinnan likaantuminen, muokattu alkuperäisestä [16]

Lämmönvaihtimen pinnalle kerääntyvä lika kuitenkin vaihtelee tapauksesta riippuen. Kaikki likaantumiseen johtavat tapahtumat voidaan jakaa kuuteen erilaiseen tyyppiin, joista kukin riippuu virtauksen luonteesta eli minkälaisesta fluidista lämpöä pyritään ottamaan talteen lämmönvaihdinta hyödyntämällä sekä muista mahdollisista likaantumisista edesauttavista olosuhteista kuten virtauksen nopeudesta ja vallitsevasta lämpötilasta. [16]

Likaantumismekanismeista yksinkertaisin on hiukkaslikaantuminen, jossa fluidin mukana kulkeutuvat hiukkaset tarttuvat lämmönvaihtimen pinnalle. Tällöin hiukkasten kerrostuminen on myös ajan saatossa mahdollista riippuen olosuhteista. Tässä tapauksessa hiukkaset voivat olla mitä vain pölystä epätäydelliseen palamisen aiheuttamiin nokihiukkasiin ja vedessä kulkeutuviin mineraalihiukkasiin. Saostuminen on likaantumismekanismi, jossa tyyppillisesti liuoksiin liuenneet suolat saostuvat lämmönvaihtimen pinnalle olosuhteiden muutosten vuoksi, joita ovat esimerkiksi muutokset lämpötilassa. Saostuneiden suolojen ominaisuudet vaihtelevat olosuhteiden mukaan. Esimerkiksi kuumissa olosuhteissa tapahtunut saostuminen on yleensä kovaa ja sitkeää mutta toisaalta kylmissä olosuhteissa saostunut aines on ilmavaa ja pehmeää. Kemiallisiin reaktioihin perustuva likaantumisessa fluidissa tapahtuu tahattomia reagoivien aineiden välisiä reaktioita. Tässä tapauksessa lämmönvaihdin ei itsessään tyyppillisesti ole osana reaktiota, mutta se saattaa toimia reaktion katalyyttinä eli se kiihdyttää reaktiota. Yleensä tällaista likaantumista tapahtuu huomattavan korkeilla lämpötiloilla. Kemiallisen reaktion myötä aiheutuva lika saattaa edistää lämmönvaihtimen pinnalla tapahtuvaa korroosiota. Korroosiolikaantumiseen kuuluu yleensä kemiallinen tai sähkökemiallinen reaktio lämmönvaihtimen pinnan ja fluidin välillä. Reaktion myötä syntyvät korroosiotuotteet muuttavat lämmönvaihtimen pinnan ominaisuuksia, jonka myötä

likaantuminen tapahtuu. Toisaalta korroosioon perustuvaa likaantumista voi tapahtua kahdella tavalla, joista ensimmäisessä korroosiotuotteet kertyvät lämmönvaihtimen pinnalle edellä mainitulla menetelmällä. Lisäksi korroosiotuotteita saattaa muodostua jossain toisessa vaiheessa ennen lämmönvaihtinta, jolloin ne kulkeutuvat fluidin mukana lämmönvaihtimeen ja kertyvät sen pinnalle hiukkaslikaantumisen mukaisella tavalla. Biologisessa likaantumisessa fluidien mukana kulkeutuvat kasvustot tai muut organismit kertyvät lämmönvaihtimen pinnalle. Tyypillisesti biologista likaantumista tapahtuu prosesseissa, joissa otetaan lämpöä talteen esimerkiksi puhdistamattomista vesivirroista. Biologinen likaantuminen voidaan jakaa kahteen osaan, joita ovat mikrobinen- ja makro-organismi likaantuminen. Mikrobinen likaantuminen tarkoittaa esimerkiksi leviää, sienikasvustoa, bakteereita sekä hometta, joita ei voi havaita omin silmin. Toisaalta makro-organismit tarkoittavat mikrobista likaantumista suurempaa, esimerkiksi simpukoita ja muuta kasvillisuutta, joita voidaan havaita omin silmin. Biologinen likaantuminen saattaa aiheuttaa myös korroosioon perustuvaa likaantumista muodostuneen biofilmikerrosten alapuolella lämmönvaihtimen pinnalle. Jähmettymistä tapahtuu silloin, kun jokin fluidi tai sen osanen jähmettyy lämmönvaihtimen pinnalle riittävän alhaisilla lämpötiloilla. [16]

Jokainen likaantumismekanismi voi tapahtua samassa prosessissa lähes samanaikaisesti, jolloin ne kykenevät vaikuttamaan toisiinsa. Tällöin niiden ennakoiminen voi hankaloitua merkittävästi. Esimerkiksi teollisuuden aloilla on huomattu joissakin tapauksissa tapahtuvan hiukkaslikaantumisen kanssa yhtäaikaisesti biologista likaantumista, kiteytymistä sekä kemiallisiin reaktioihin perustuvaa likaantumista. Näin ollen on selvää, miksi likaantumisen ymmärtäminen lämmönvaihtimen suunnitteluvaiheessa voi olla hyvin hankalaa. Toisaalta on tärkeää huomioida, että likaantumismekanismien esiintyvyydessä on eroja riippuen siitä, onko kyseessä nestemäinen vai kaasumainen fluidi. Nestevirtauksessa likaantuminen voi tapahtua kaikilla kuudella erimekanismilla, joita olivat hiukkaslikaantuminen, saostuminen, kemiallinen likaantuminen, korroosio, biologinen likaantuminen sekä jähmettyminen. Toisaalta kaasuvirtauksessa likaantumista tapahtuu pääasiassa hiukkaslikaantumisenä, kemiallisena likaantumisenä, korroosiona sekä jähmettymisenä. [16,10]

5.3 Ratkaisuja likaantumiselle

Lämmönvaihtimien pintojen likaantumista voidaan yrittää pienentää erilaisilla menetelmillä. Näihin menetelmiin kuuluu oikeanlainen suunnittelu, johon sisältyy myös tunnettujen likaantumismekanismien ennaltaehkäiseminen sekä lämmönvaihtimen puhdistaminen.

Suunnitteluun sisältyy monia erilaisia osa-alueita, joita tulee ottaa huomioon lämmönvaihtimen koko elinkaaren aika huomioiden. Siihen sisältyy myös puhdistuksen helpottaminen erilaisilla ratkaisuilla. [17]

5.3.1 Ennaltaehkäiseminen

Olellaisia asioita, joita suunnittelun aikana tulee huomioida likaantumisen ennaltaehkäisemiseksi tai lämmönvaihtimen puhdistamisen helpottamiseksi ovat tarkasteltavan lämmönvaihtimen tyyppi ja siinä käytettävät materiaalit, mitoitus sekä puhdistamisen järjestelyt. Lämmönvaihtimen valinnassa ja mitoituksessa tulee huomioida lämpöä luovuttavan sekä vastaanottavien fluidien ominaisuudet, kuten lämpötilaerot, paineet, virtaukset sekä likaisuus. Lisäksi määriteltävä rekuperaatioaste eli haluttu lämpötilojen suhde ja sallittavat painehäviöt vaikuttavat tarvittavaan mitoitukseen. Oikeanlaisella suunnittelulla voidaan tehdä riittävän energiatehokas lämmönvaihdin, jossa ennalta ehkäistään pintojen likaantumista ja helpotetaan toteutettavaa huoltoa sekä puhdistamista. Lämmönvaihtimen sijainti tulee olla paikassa, jossa puhdistaminen onnistuu helposti ja esimerkiksi vesipisteitä lämmönvaihtimen puhdistamista varten olisi hyvä olla lähettyvillä. Suunnittelun aikana on tärkeää muistaa tarkastella lämmönvaihtimen koko elinkaaren aikaisia kustannuksia, jolloin voidaan täysin ymmärtää matalien- ja korkeiden investointien tuoma ero saavutettavaan lopputulokseen. Oikeanlaisilla alkupäässä kalliimmilla ratkaisuilla vähennetty lämmönvaihtimen puhdistamistarve tarkoittaa pienempiä ylläpitokustannuksia vähäisempien puhdistustarpeiden ansiosta ja näin myös tehokasta lämmönvaihtoa. [17]

Tyypillisimpiä lämmönvaihdinmalleja teollisuudessa ovat putkilämmönvaihtimet, mutta niiden ongelmana on yleensä pintojen nopea likaantuminen [17]. Esimerkiksi hyödyntäessä lämmönvaihdinta kaasumaisissavirtauksissa likaantumista voidaan hillitä käyttämällä kompakteja lämmönvaihtimia, joissa on tyypillisesti korkeat leikkausnopeudet pienentyneiden ilmanvirtausreittien takia. Levylämmönvaihtimet soveltuvat tässä tapauksessa hyvin lämmöntalteenottoon levyjen pienien etäisyyksien ansiosta. Toisaalta pienet virtauskanavat levyjen välillä lisäävät tukkeutumisen todennäköisyyttä riippuen likapartikkelien kokoluokasta. [10] Toisaalta on myös tärkeää muistaa, että lämmönvaihtimia suositellaan käytettävän jatkuvasti täydellä teholla, jolloin lika ei pääsy kertymään sen pinnalle niin helposti suurin virtausnopeuksien ansiosta. [16]

Seuraavaksi tarkastellaan pääasiallisesti kaasuvirtauksissa tapahtuvia likaantumismekanismeja, sillä lämmöntalteenotto ilmanvaihdossa perustuu kaasuvirtauksiin, joka on tämän työn

pääaihe. Toisaalta on tärkeää huomioida, että tässä on otettu huomioon myös palamisessa syntyvät kaasut, joissa likaantumismekanismit ovat monimutkaisempia. Normaalisissa ilmanvaihdossa olevien lämmöntalteenottolaitteiden suurin ongelma on tyypillisesti hiukkaslikaantuminen. Taulukossa 5 esitellään, kuinka kaasuvirtauksessa kaasun ominaisuudet sekä yleiset olosuhteet vaikuttavat erilaisien likaantumismekanismien esiintyvyyteen lämmönvaihtimessa. Nuolilla osoitetaan, kuinka kunkin muuttujan kasvattaminen vaikuttaa likaantumismekanismien esiintyvyyteen. Esimerkiksi lämpötilaa nostamalla hiukkaslikaantumisen esiintyvyys lisääntyy sekä pienentyy liasta riippuen. Vakaatasossa oleva nuoli tarkoittaa vähäistä vaikutusta likaantumismekanismien esiintyvyyteen ja viiva liian riittämättömiä tutkimuksia asian todentamiseksi. [10]

Taulukko 5 Erilaisten likaantumismekanismien esiintyvyyden muutos fluidin ominaisuuksien sekä olosuhteiden muuttuessa [10]

| Muuttujat | Hiukkaslikaantuminen | Kemiallinen likaantuminen | Korroosio | Jähmettyminen |
|-----------------------|----------------------|---------------------------|-----------|---------------|
| Lämpötila | ↑↓ | ↓ | ↑ | ↑↓↔ |
| Virtaus | ↑↓↔ | ↓ | ↑↓↔ | ↑↔ |
| Epäpuhtaudet | — | ↓ | — | — |
| Konsentraatio | ↑ | ↑ | — | ↑ |
| Polttoaine-ilma suhde | ↑ | — | ↑ | — |
| Karheus | ↑↔ | — | — | ↑↔ |
| Happi | ↔ | ↔ | ↑ | — |
| Rikki | — | — | ↑ | ↑ |

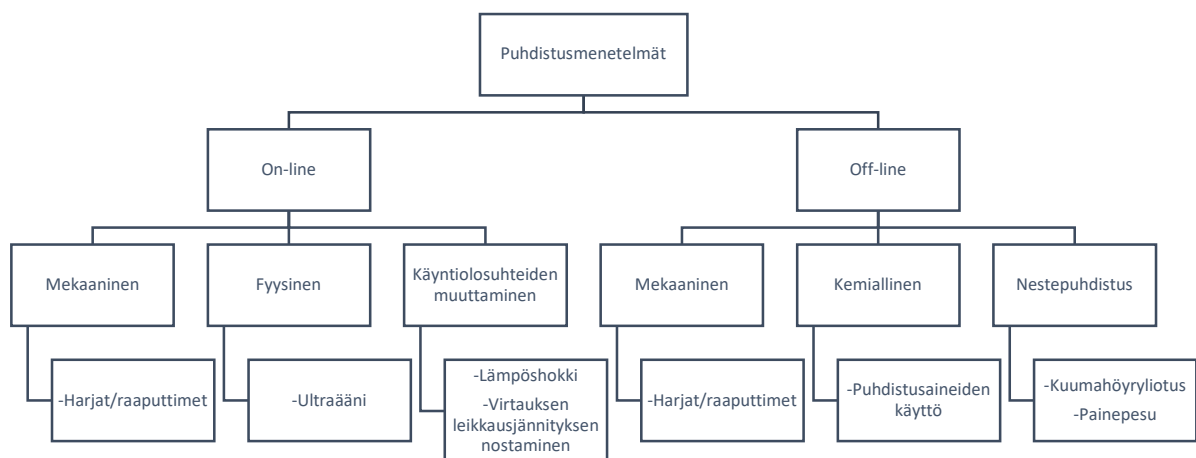
Lämmönvaihtimen likaantumisen ennaltaehkäisemistä voidaan toteuttaa lisäksi ennen lämmöntalteenottoa hyödyntämällä erillistä suodatinta ilmanvaihdossa, jonka avulla ilmassa virtaavat likapartikkelit eivät pääse tarttumaan lämmönvaihtimeen ja näin vaikuttamaan lämmöntalteenottolaitteen toimintaan. Sopivanlaisen suodattimen valintaan vaikuttaa useita eritekiäjiä, joita ovat vaadittu puhdistusteho, likapartikkelien halkaisija, kokonaisuuden kannalta sallittu painehäviö ja suodattimen vaihdon toistuvuus sekä muut mahdolliset tekijät, jotka saattavat heikentää suodattimen toimintaa. [18]

5.3.2 Pintojen puhdistaminen

Pelkästään hyvä lämmöntalteenottojärjestelmän suunnittelemisen ja likaantumisen ennaltaehkäiseminen eivät riitä poistamaan lämmönvaihtimen pinnalla tapahtuvaa lian kertymistä. Sitä tulee tapahtumaan väijäämättä, jonka vuoksi lämmönvaihtimen puhdistaminen tulee olemaan tärkeä osa niiden toiminnan ylläpitoa, jotta voidaan varmistaa riittävän tehokas lämmönsiirtyminen. Puhdistustarpeen toistuvuus riippuu kohteen sekä virtaavien fluidien

ominaisuuksista. Joissakin tapauksissa puhdistaminen kerran tai kaksi kertaa vuodessa riittää toiminnan takaamiseksi, mutta toisaalta joissakin kohteissa puhdistus pitää tehdä jopa kerran kuukaudessa, jotta voidaan ylläpitää riittävää lämmönsiirtotehokkuutta. [16]

Tyypillisesti erilaiset puhdistusmenetelmät voidaan jakaa kahteen eriluokkaan, joita ovat on-line ja off-line puhdistaminen. Käytännössä on-line puhdistaminen tarkoittaa lämmönvaihtimen käytön aikana toteutettavaa puhdistamista, jolloin sitä ei tarvitse poistaa käytöstä puhdistamisen ajaksi ja on näin ollen kyseessä on käytännöllisempi puhdistustapa. Off-line tarkoittaa puhdistamista, joka tehdään vasta lämmönvaihtimen käytöstä poistamisen jälkeen. Molemmat puhdistustavat käsittävät niin sanottuja puhdistusmenetelmien alempia luokkia, joista merkittävimmät ovat mekaaninen- ja kemiallinen puhdistaminen. Sopivanlaisen puhdistusmenetelmän valitseminen riippuu lian laadusta, määrästä sekä lämmönvaihtimen kemiallisten puhdistusaineiden kestävydestä. [16, 19] On-line ja off-line puhdistustapojen esimerkkejä sekä muutamia niiden sisältämiä alaluokkia esitellään kuvassa 14.



Kuva 14 Puhdistusmenetelmien luokittelu on-line ja off-line puhdistustapojen mukaan, muokattu alkuperäisestä Suomeksi [19]

Käytettävät puhdistusmenetelmät niin on-line, kuin myös off-line puhdistuksessa ovat täysin tapauskohtaisia. Jokaiseen järjestelmään sopii vain tietynlaiset puhdistusmenetelmät, mutta tyypillisesti molempia puhdistustapoja tarvitaan lämmöntalteenottotehon ylläpitämisen takia. Erityisesti mekaanisen ja kemiallisen puhdistusmenetelmän sopivuutta valitessa tulee huomioida, että mekaaninen puhdistaminen aiheuttaa lämmönvaihtimeen ja sen pinnoille mekaanista rasitusta lisäten kulumista ja toisaalta kemiallinen puhdistaminen ei välttämättä sovi kaikille lämmöntalteenottolaitteistojen materiaaleille, koska se saattaa aiheuttaa

joillekin materiaaleille korroosiota. Kemiaallinen puhdistus tarvitsee lisäksi huolellisuutta vaarallisten aineiden takia sekä erillistä raportointia toteuttamiseksi. [19]

Oikeanlainen ajoitus lämmönvaihtimen puhdistukselle sekä sopivan puhdistusmenetelmän valinta vaativat ymmärrystä lämmönvaihtimen toimintaolosuhteista. Lämmönvaihtimen pinnalle kertyvän lian analysointi on olennainen osa koko prosessia, sillä puhdistusteho riippuu lian ominaisuuksista sekä vallitsevista olosuhteista. Siivouksen ajoittamista varten olisi tärkeää seurata lämmönvaihtimen tehokkuutta, jolloin sen lämmönsiirtotehon aleneminen kertoo melko suoraan siivouksen tarpeesta. Tärkeitä seurattavia suureita ovat esimerkiksi paine-eron muutos sekä lämmönsiirtymisen lämpötilat. Paine-eron kasvaminen tarkoittaa lian kertymistä, joka vähentää ilmanvirran kulkeutumista ja toisaalta siirtyvän lämmön pienentyminen alentunutta lämmönsiirtotehoa.

6 Case: Koskisen Oy – Pinnoitustehtaan ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen

6.1 Kohteen esittely

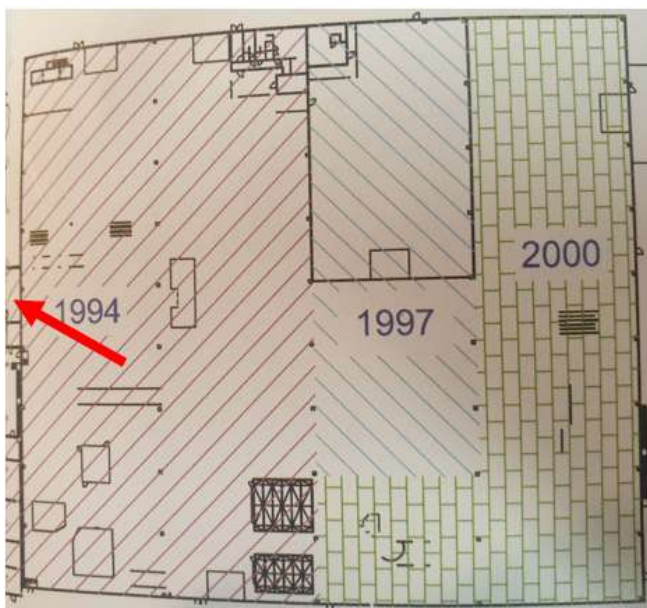
Pinnoitustehtaan ilmanvaihdon nykytilannetta on kartoitettu TPI Control nimisen konsultointiyrityksen toimesta 2021 vuoden alkupuolella ilmanvaihdon olosuhdeselvityksen muodossa. Olosuhdeselvitys kattoi koko pinnoitustehtaan ilmanvaihdon, jossa tarkasteltiin ilmanvaihtojärjestelmien ja prosessien teknistä tilaa sekä niiden energiatehokkuutta. Pääasiallisesti toteutettu olosuhdeselvitys kattoi nesteanalyysit, verkoston likaisuuden arvioinnin ja toiminnan tarkastelun, mikrobikasvuston mittaamisen jäähdytysverkostoista, painetasojen ja ilmauksen tarkastuksen, ilmanvaihtokoneiden toiminnan tarkistuksen, ilmamäärien mitaukset ilmanvaihtokoneilta sekä lämmöntalteenottopattereiden kunnan selvityksen. Mitauksien avulla on tehty laskelmat uusien lämmönvaihtimien mahdollisesta talteenottotehosta sekä tarjouksen, jota hyödynnetään työn investointien kannattavuuslaskennoissa. [20]

Tässä työssä perehdytään pääasiallisesti pinnoitustehtaan ilmanvaihdon lämpöpotentiaaliin hyödyntämällä ulkopuolisen yrityksen tekemää selvitystä sekä tarkastellaan pinnoitustehtaalla sijaitsevien kompressorien tuottaman lämmön hyödyntämistä lämmitysverkostoissa. Kuvasta 15 voidaan nähdä punaisella ympyröitynä, missä kohdassa Koskisen Oy:n Järvelässä olevaa tehdasaluetta olosuhdeselvityksen kohteena ollut pinnoitustehtas sijaitsee. Pinnoitustehtaan tarkoituksena on pinnoittaa erilaisilla pintamateriaaleilla valmiita vanerilevyjä monenlaisiin tarkoituksiin, kuten suojaamaan pakettiautojen peräkonttien pintoja tai esimerkiksi pinnoittamaan lattialle tulevia vanereita liukumista estävillä materiaaleilla.



Kuva 15 Pinnoitustehtaan sijainti Järvelässä sijaitsevan Koskisen Oy:n tehdasalueella [21]

Alueella sijaitseva pinnoitustehtas koostuu kolmesta erivuosina rakennetuista toisiinsa liitetystä tiloista, joista kukin voidaan nähdä kuvasta 16 niiden rakennusvuosien kanssa. Ensimmäinen tila, joka on pinnoitustehtaan vanhin osio ja missä sijaitsee toimistotilat ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa on valmistunut vuonna 1994. Tätä tilaa kutsutaan lyhenteellä VAK 02 ja sen ilmanvaihtoa numerolla 401. Seuraava tila on valmistunut vuonna 1997, johon sisältyy telapinnoitushalli eli niin sanottu kylmäliimaukseen perustuva vanerien pinnoitus sekä laajennus 1994 vuonna rakennetulle pinnoitustehtaalte, joka erottuu kuvasta keskeltä alueena, jossa ei ole tiloja erottavia seiniä. Kuten kuvasta 16 voidaan huomata, 1997 laajennuksen yhteydessä valmistunut telapinnoitushalli on itsenäinen kokonaisuus, joka on toisista seinillä suljettu tila. Vuonna 1997 laajennettua tilaa kutsutaan lyhenteellä VAK 10 ja sen ilmanvaihtoa numerolla 451. Viimeisin tila valmistui vuonna 2000, joka oli osa pinnoitustehtaan isompaa laajennusta. Viimeisimmäksi valmistunutta osaa kutsutaan lyhenteellä VAK 18 ja sen ilmanvaihtoa numerolla 471. Laajennuksien lisäksi tiloista löytyy myös erillinen suljettu kompressorihuone, joka on kuvaan merkittynä punaisella nuolella vasemmalla. [22]



Kuva 16 Koskisen Oy Pinnoitustehtaan laajennukset [22]

6.2 Pinnoitustehtaan nykytilanne

Pinnoitustehtaan ilmanvaihdon tulo- sekä poistupuolella on käytössä Retermian valmistamia ilma-neste-ilma neulalämmönvaihtimia. Kaikkia ilmanvaihdossa olevia lämmönvaihtimia käytetään tuloilman esilämmittämisessä. Retermian mukaan neulalämmönvaihtimet toimivat sellaisenaan G3-tason esisuodattimina niiden rakenteensa ansiosta, joten niitä hyödynnetään lämmönvaihtamisen lisäksi tulopuolella raitisilman mukana tulevien likapartikkelien suodattamisessa. Poistoilman suodatusta ennen poistolämmönvaihtimia ei ole. [23] Esimerkiasetelma tulopuolen lämmönvaihdosta voidaan nähdä kuvasta 17, jossa lämmönvaihdinpatteri on sijoitettu ennen raitisilman suodatinta. Tulopuolella lämmönvaihdinpatterin suodatusteho raitisilman mukana kulkeville likapartikkeleille näkyy suhteellisen puhtaasta suodattimesta.

Kohteessa käytetty ratkaisu, jossa lämmönvaihdinta hyödynnetään suodattamisessa, on toisaalta ongelmallinen silloin, jos poistoilma on erityisen likaista. Pinnoitustehtaalla syntyy kärynpoiston yhteydessä merkittäviä määriä likaavaa poistoilmaa, joka tarttuu poistolämmönvaihtimien pinnoille. Kussakin pinnoitustehtaan lämmönvaihtimen keruupiirissä käytettiin kiertoaineena monopropyleeniglykolia.

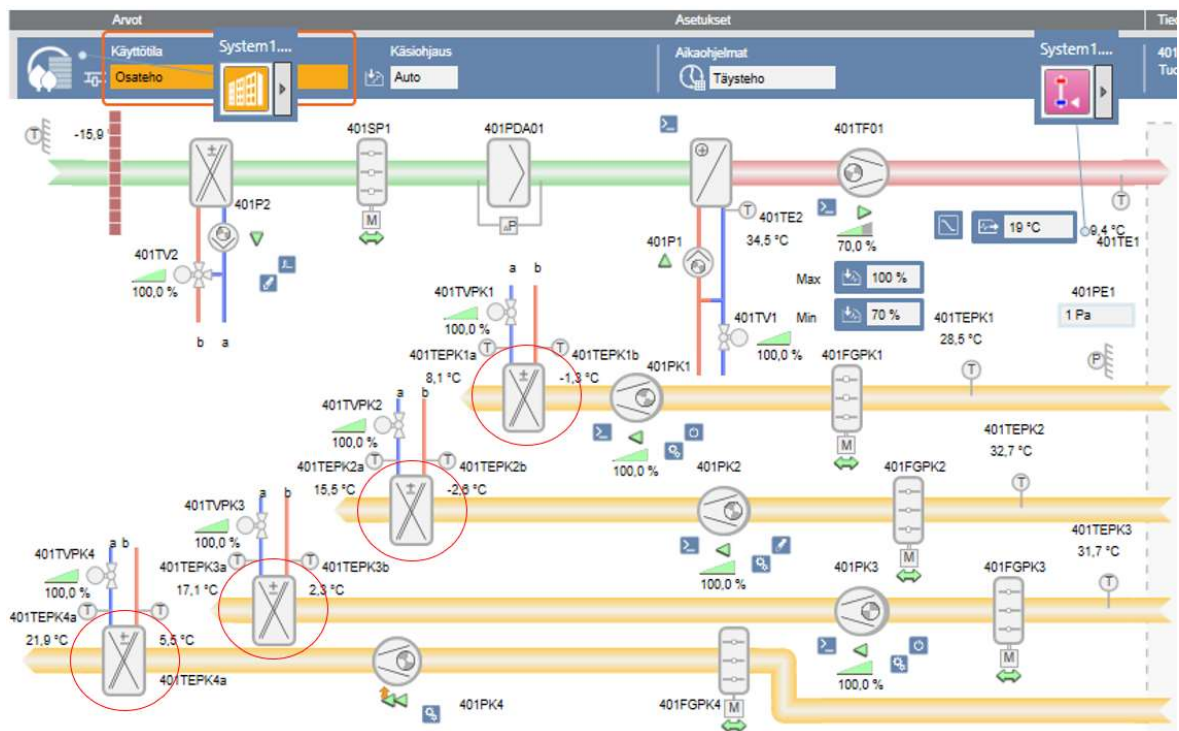


Kuva 17 Yksi tulopuolen lämmönvaihdinpattereista ja suodattimista

6.2.1 VAK 02 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterit

Ensimmäiset lämmöntalteenottopatterit, jotka sijaitsevat VAK 02 poistupuolella voidaan nähdä kuvassa 18 punaisella ympyrällä merkityistä kohdista. Pinnoitustehtaan ilmanvaihtojärjestelmän asetusten säätäminen onnistuu etänä ohjattavalta Siemensin designo kiinteistöautomaatiolla, jolla voidaan seurata ja säätää koko järjestelmän toimintaa. Seurantaan sisältyy esimerkiksi termoelementtien mittaamat lämpötilat sekä paine-erot määritellyissä pisteissä. Kuten kuvasta 18 voidaan huomata, lämmönvaihtimilla olevat lämpötilat ovat hyvin poikkeavia, joten niihin ei voi luottaa.

Poistoilmanlämmönvaihtimia VAK 02 ilmanvaihdolle löytyy neljä kappaletta. Ne ovat ulkonäöllisesti kuvan 19 mukaisia. Ne sijaitsevat pinnoitustehtaan katolla, kukin erillisenä ilmanvaihdon poistopisteenä hajautetuin sijainnein ympäri pinnoitustehtaan kattoa.



Kuva 18 VAK 02 ilmanvaihtojärjestelmän kaavio [22]



Kuva 19 Lämmönvaihdinyksikkö ulkopuolelta

Kuvista 20 ja 21 voidaan nähdä, miten likaisia poistolämmönvaihdinpatterit ovat VAK 02 ilmanvaihtojärjestelmän poistupuolella. Paikoittain lämmönvaihtimet olivat niin likaisia, että ne oli kierretty esimerkiksi avaamalla niiden päällä olevat huoltamiseen tarkoitetut luukut, jolloin ilmanvirta kulkeutui ulos helpommin ilman lämmönvaihtimen läpi kulkeutumisista. Sormin koskettaessa lika oli hyvin kiinteää eikä sitä saanut kovinkaan helposti irrotettua. Koostumukseltaan se oli hiukan tahmeaa. Kysyttäessä tehtaalla LVIS henkilöltä, selvisi että kyseinen lika ei irtoa juurikaan edes valmistajan omien ohjeistuksien mukaisien menetelmien avulla. Lämmönvaihtimien valmistajan ohjeistuksen mukaan lämmönvaihtimen pinta tulee ensin vaahdottaa ja sen jälkeen pestä painepesurilla puhtaaksi. Tarpeen tullen tämä prosessi tulisi toistaa niin usein, kunnes lika on irronnut kokonaan. Lämmönvaihtimien rakenteellisten ominaisuuksien takia mekaaninen lianpoistaminen ei ole kannattavaa lämmönvaihtimen neulasien vahingoittumisen vuoksi. Mekaanista puhdistamista on kokeiltu, mutta lämmönvaihtimien neulaset vääntyivät hyvin helposti, joka vaikuttaa lämmönvaihtimen toimintaan. Pinnoitustehtaan poistupuolen lämmönvaihtimien pinnoille kertyvä lika johtuu pääasiassa fenolipohjaisesta liimasta, jolla vanerien pinnoitusmateriaalit kiinnitetään. Pinnoituksen aikana fenoli fluidisoituu sidospaperissa lämpötilan ja paineen yhteysvaikutuksena. Fenolin kuivuessa vapautuu kaasua eli käryä, jota kertyy lämmönvaihtimen sekä ilmanvaihdon osien pinnoille.



Kuva 20 VAK 02 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterin pinta



Kuva 21 VAK 02 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterin pinta

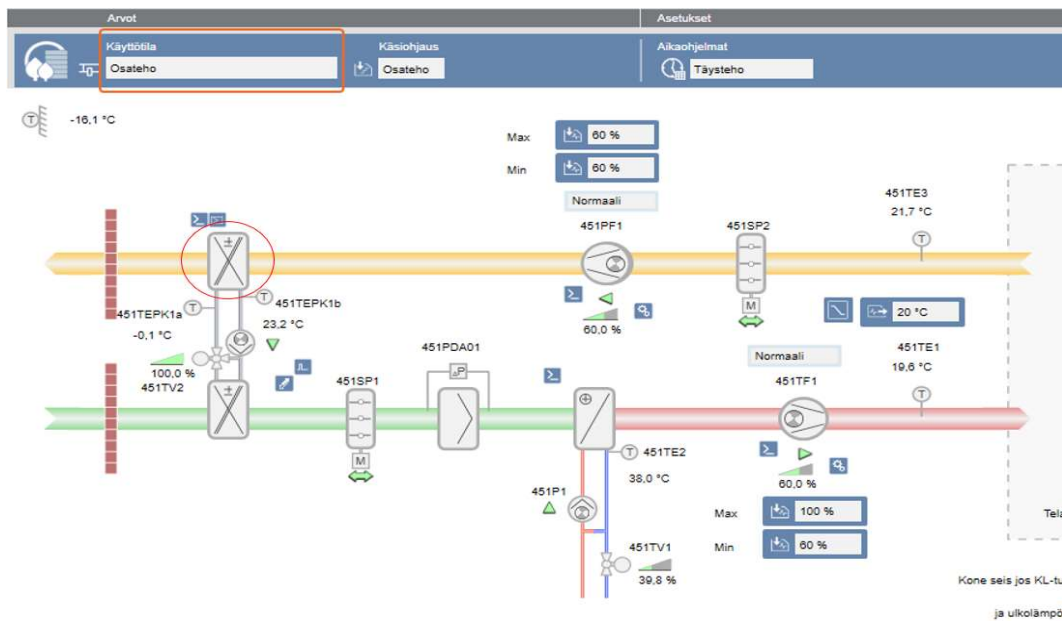
Kärynpoistolla tarkoitetaan pinnoitustehtaan puristimien yläpuolella olevia ilmanvaihtopisteitä, joissa on etänä säädettävät säleiköt. Kärynpoiston avulla ohjataan hyvin kuuma prosessissa syntynyt poistoilma ulos. Esimerkki yhdestä puristimen yläpuolella sijaitsevasta kärynpoistosta voidaan nähdä kuvasta 22, josta voidaan tarkemmin katsottuna erottaa pinnalle kertynyt lian määrä. Lika kulkeutuu suoraan sellaisenaan ilmanvaihtoa pitkin poistossa oleville lämmönvaihtimille. Työpaikan LVIS henkilön mukaan likaa on niin paljon, että säleikön säädön toiminta on lisäksi hyvin epävarmaa. Samaa likaa on myös lämmönvaihtimien pinnalla.



Kuva 22 Pinnoitustehtaan puristimen yläpuolella sijaitseva kärynpoisto

6.2.2 VAK 10 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterit

Ilmanvaihdon kaavio sijainnista VAK 10 voidaan nähdä kuvasta 23, jossa kohteen poistolämmönvaihdin on merkitty punaisella ympyrällä. Tässä ilmanvaihtojärjestelmän osiossa ei ole kuin yksi poistupuolen lämmönvaihdin. Lämmönvaihdin sijaitsee telapinnoitushallin ilmanvaihdon poistupuolella, jossa vanerilevyjen pinnoittaminen tapahtuu niin sanotusti kylmäpuristimella eli siellä ei synny kuumapuristuksen mukaista hyvin likaista käryä, joka kertyisi lämmönvaihtimen pinnalle. Lämmönvaihtimen pintojen puhtaus voidaan nähdä kuvasta 24. Puhtaudesta huolimatta lämmönvaihdin oli kierretty avaamalla lämmönvaihtimen huoltoluukku, jolloin ilma pääsee virtaamaan tehokkaasti suoraan ulos ilman että se kulkeutuisi lämmönvaihtimen läpi.



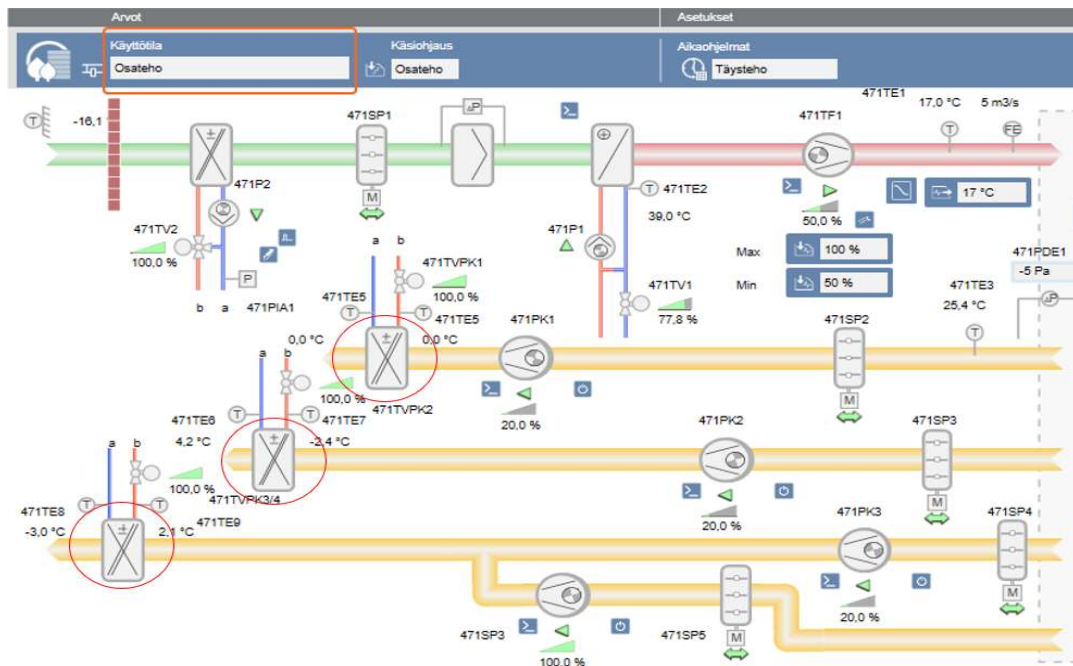
Kuva 23 VAK 10 ilmanvaihtojärjestelmän kaavio [22]



Kuva 24 VAK 10 poistolämmönvaihdinpatterin pinta

6.2.3 VAK 18 ilmanvaihdon poistolämmönvaihdinpatterit

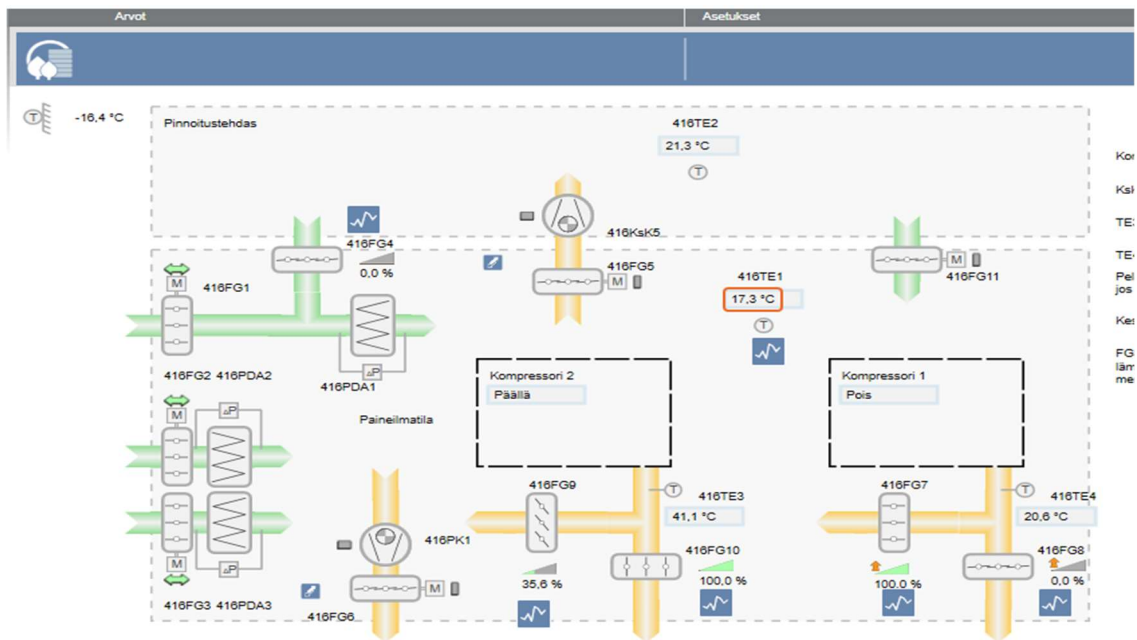
Ilmanvaihdon kaavio sijainnista VAK 18 voidaan nähdä kuvasta 25, jossa poistolämmönvaihtimet ovat merkattu punaisella ympyrällä. Sijainnin ilmanvaihdossa on yhteensä kolme poistolämmönvaihdinpatteria. Kuten kohteen VAK 02 poistolämmönvaihtimissa, myös VAK 18 poistolämmönvaihtimissa oli kertynyt runsaasti likaa pinnoille, jonka myötä niiden lämmönsiirtoteho ja ilmanvirtauksen läpikulku on niin vähäistä, että ne oli ohitettu avaamalla pääasiallisesti kaikkien lämmönvaihtimen huoltoluukut. Tällöin poistoilmanvirta pääsee kulkeutumaan suoraan ulos ilman lämmönvaihtimen läpikulkeutumista.



Kuva 25 VAK 18 ilmanvaihtojärjestelmän kaavio [22]

6.2.4 VAK 10 kompressorihuoneen kompressorit

Pinnoitustehtaan tuotantotilojen ilmanvaihdon lisäksi tarkastellaan kompressorihuonetta, jossa sijaitsee kaksi kappaletta Atlas Copcon teollisuustason kompressoreita. Kompressorien mallit ovat GA 132, jonka teho on 132 kW sekä GA 180 VSD, jonka teho on 180 kW ja siinä hyödynnetään taajuusmuuttajaa kompressorin ajon aikaisen energian säästämiseksi. GA 132 mallissa ei ole taajuusmuuttajaa. Molemmat ovat öljykäyttöisiä ruuvikompressoreita. Nykytilanteen mukaan kompressorien jäähdytyksen poistoilma kulkeutuu suoraan ulkoilmaan kuvan 26 mukaisella tavalla ilman minkäänlaista lämmöntalteenottoa. Kompressori 2:en poisto voidaan nähdä kuvasta 27.



Kuva 26 VAK 10 Kompressorihuoneen ilmanvaihtojärjestelmän kaavio [22]



Kuva 27 VAK 10 Kompressorihuoneen ilmanvaihdon poistoputki

6.3 Lämmöntalteenottopotentiali

Seuraavissa osioissa tarkastellaan, minkälaisia lämpöpotentiaaleja pinnoitustehtaan poistoilmanvaihdossa on kussakin tehtaan tilassa, jos poistoilmassa olevaa lämpöä hyödynnetään tuloilman esilämmityksessä. Lämmöntalteenottopotentialia tarkasteltaessa on tehty muutamia oletuksia vallitseviin lämpötiloihin sekä lämmönvaihtimien lämmönsiirtotehoon liittyen. Laskennoissa käytetyt lämpötilat perustuvat kuukausikohtaisiin keskiarvoihin. Kunkin tulo- ja poistoilmanvaihdon ilmanvirtauksina käytetään konsultointiyrityksen TPI Controllin etukäteen määrittlemiä tulo- ja poistoilman virtausarvoja. Samojen ilmanvirtausarvojen

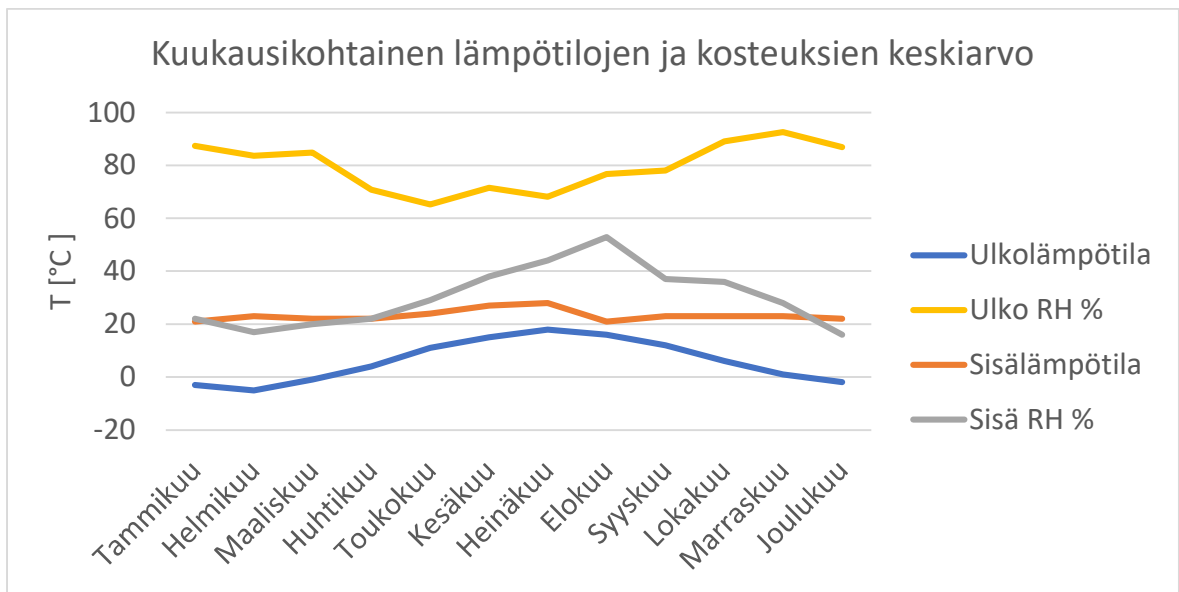
käyttäminen helpottaa työn tekoa sekä mahdollistaa myös tuloksien vertailun TPI Controllin tehtyjen laskelmien kanssa, joita ei toisaalta esitellä tarkemmin tässä työssä.

Työssä tehdyt laskelmat on toteutettu hyödyntämällä tätä työtä varten tehtyä Excel taulukkoa, josta kukin taustalla oleviin funktioihin vaikuttava arvo on helposti muutettavissa. Tämä myös mahdollistaa muiden tehtaantilojen ilmanvaihdon lämpöpotentiaalin tarkastelun. Liiteosion liitteestä 3 on nähtävillä taulukon ulkoasu sekä siihen tarvittavat arvot tuloksien laskemiseksi. Tuloksia tarkasteltaessa on syytä muistaa, että laskennat ovat viitteellisiä, joihin vaikuttavat merkittävästi esimerkiksi ulko- ja sisälämpötilojen vaihtelut sekä lämpötilamittausten tarkkuus.

Pinnoitustehtaan tulo- ja poistoilmanvaihdon lisäksi tässä osiossa arvioidaan käytössä olevien Atlas Copco kompressorien lämmöntalteenottopotentiaalia ja sen hyödyntämistä lämmityksen tukena. Kuten aikaisemmin todettiin, nykyiseltään kompressorien tuottama lämpö kulkeutuu suoraan ulkoilmaan ilmanvaihdon välityksellä ilman että sitä hyödynnettäisiin missään. Laskennassa on käytetty apuna Atlas Copcon ohjeistusta, jossa opastetaan, kuinka tehokkaasti lämpöä voidaan ottaa kompressorien jäähdytyksestä lämmönvaihtimella talteen ja mitä asioita on hyvä ottaa huomioon, kun kompressorin lämmöntalteenottoa ja sen potentiaalia ollaan tarkastelemassa.

6.3.1 VAK 02 + VAK 18

VAK 02 ja -18 jakavat keskimäärin saman sisälämpötilan sekä suhteellisen kosteuden, sillä tilojen välillä ei ole erillistä seinämää erottamassa niitä. Sisälämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitataan päiväkohtaisesti etäluettavalla anturilla. Lämpötilojen keskiarvosta poikkeavia arvoja toisaalta esiintyy tuotannon toiminnasta sekä vuodenajasta riippuen. VAK 02 ja -18 tilojen lämpötilat ja suhteellinen kosteus sekä energialaskennan testivuosiin perustuvat ulkolämpötilat ja suhteellinen kosteus vuodelle 2021 voidaan nähdä kuvasta 28, jossa sisälämpötilojen ja suhteellisen kosteuden keskiarvo kullekin kuukaudelle määriteltiin graafisesti lukemalla. Ulkolämpötilana ja suhteellisena kosteutena käytetään vyöhykkeen 1 energialaskennan testivuosien tuntiaineistojen keskiarvoja kullekin kuukaudelle. Pinnoitustehaan VAK 02 ja -18 tilojen tarkemmat lämpötila ja suhteellisen kosteuden vaihtelut voidaan nähdä graafisena liiteosion liitteestä 4.



Kuva 28 Vyöhyke 1 energialaskennan testivuosien sekä VAK 02 + 18 keskilämpötilat ja suhteelliset kosteusprosentit [24,22]

Laskelmissa käytetyt lämpötilat ulko- ja sisälämpötiloille löytyvät taulukosta 6. Lisäksi muut laskelmissa käytetyt arvot, kuten ilmanvaihdon käyntiaika, ilmanvirtauksien määrät sekä paineet voidaan nähdä taulukosta 7. Laskelmissa käytetään kirjallisuusosiossa esitettyjä yhtälöitä. Toivottuna sisäilmana käytetään arvoa 22 °C, joka perustuu poistoilmanvirtojen lämpötilojen keskiarvoon. Ilmanvaihdon käyntiaikana käytetään 168 h viikossa ja rekuperatioasteena 60 %. Sivuilla 61–62 käsitellään tarkemmin rekuperatioasteen vaikutusta vaadittuun lämmönvaihtimen pinta-alaan. Käytännössä yli 60 % rekuperatioaste tarkoittaa eksponentiaalisesti kasvavaa lämmönvaihtimen kokoa, jotta voidaan saavuttaa laskettu

lämmönsiirtomäärä. Suurempi lämmönvaihdin myös lisää tarvittavia investointeja. Siksi laskennoissa käytetään oletuksena 60 % rekuperaatioastetta.

Taulukko 6 Laskuissa käytetyt lämpötilat ja suhteelliset kosteusprosentit [24, 22]

| <i>Kuukausi</i> | <i>Ulkolämpötilat Vyöhyke 1 [°C]</i> | <i>Ulkokosteus [RH%]</i> | <i>VAK 02 + 18 lämpötilat 2021 [°C]</i> | <i>Sisäkosteus [RH%]</i> |
|-----------------|--|--------------------------|---|--------------------------|
| Tammikuu | -3 | 87 | 21 | 25 |
| Helmikuu | -5 | 84 | 23 | 25 |
| Maaliskuu | -1 | 85 | 22 | 27 |
| Huhtikuu | 4 | 71 | 22 | 36 |
| Toukokuu | 11 | 65 | 24 | 39 |
| Kesäkuu | 15 | 72 | 27 | 49 |
| Heinäkuu | 18 | 68 | 28 | 49 |
| Elokuu | 16 | 77 | 21 | 57 |
| Syyskuu | 12 | 78 | 23 | 47 |
| Lokakuu | 6 | 89 | 23 | 45 |
| Marraskuu | 1 | 93 | 23 | 31 |
| Joulukuu | -2 | 87 | 22 | 22 |

Taulukko 7 VAK 02 ja -18 ilman tilavuusvirrat sekä paineet [20]

| VAK 02 | | |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| | Tuloilma | Poistoilma |
| Ilman tilavuusvirta | 22 m ³ /s | 13 m ³ /s |
| Paine | 100 000 Pa | 100 000 Pa |
| VAK 18 | | |
| | Tuloilma | Poistoilma |
| Ilman tilavuusvirta | 14 m ³ /s | 9 m ³ /s |
| Paine | 100 000 Pa | 100 000 Pa |

Poistoilman lämpöpotentiaali laskettiin kullekin kuukaudelle hyödyntäen lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien keskiarvoja. Lämpötehojen lisäksi laskettiin myös tuloilmaan siirtyvä lämpö sekä lämmöntalteenoton osuus tuloilman esilämmityksessä. Lämpöpotentiaalilaskenta sekä tuloilmaan siirtyvä lämpö ja lämmöntalteenoton osuus tuloilman esilämmityksessä tammikuulle VAK 02 tapauksessa tehdään ensiksi laskemalla tuloilman tiheys hyödyntämällä ulkoilman keskimääräistä lämpötilaa tammikuulle, joka on tässä tapauksessa -3 °C. Kuivan ilman tiheys lasketaan olettamalla ilmanpaineeksi 100 000 Pa ja kaasuvakiona

käytetään 287 J/kgK, yhtälön 6.1 mukaisella tavalla. Paineolettama perustuu näkemykseen, että tiloissa vallitseva paine on lähes sama kuin ulkopuolella vallitseva, jonka oletetaan olevan noin 1 barin verran. Tämä johtuu useammista nosto-ovista, jotka ovat melko usein auki, jolloin paine-ero ulkona vallitsevan paineen kanssa tasaantuu.

$$\rho_{tulo,kuiva} = \frac{100\,000\text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * (273,15\text{K} + (-3\text{ }^\circ\text{C}))} = 1,290\text{ kg/m}^3 \quad (6.1)$$

Tiheys on riippuvainen lämpötilan ja paineen lisäksi myös siinä olevasta kosteuden määrästä, jota on tyypillisesti aina huoneilmassa. Kosteuden määrä ilmassa riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Mitä suurempi lämpötila, sitä enemmän kosteutta voi olla sitoutuneena ilmaan. Toisaalta matalammassa lämpötilassa kosteutta voi olla ilmassa huomattavasti vähemmän. Siksi talvipakkasilla suhteellinen kosteus on tyypillisesti korkea. Näin ollen kuivan ilman tiheys voidaan muuttaa kostean ilman tiheydeksi tarkentamaan laskennan tuloksia yhtälön 6.2 mukaisella tavalla, jossa kylläisen vesihöyryn paineena käytetään liitteen 2 taulukon mukaisia arvoja kussakin lämpötilassa.

$$\rho_{tulo,kostea} = \frac{100\,000\text{ Pa} - \left(\frac{87\%}{100} * 490\text{ Pa}\right)}{286,058 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * (273,15\text{ K} + (-3\text{ }^\circ\text{C}))} + \frac{\left(\frac{87\%}{100} * 490\text{ Pa}\right)}{461,495 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * (273,15\text{ K} + (-3\text{ }^\circ\text{C}))} = 1,287\text{ kg/m}^3 \quad (6.2)$$

Seuraavaksi voidaan laskea lämpökapasiteettivirtaama tuloilmanvirralle yhtälön 6.3 mukaisesti, jossa tuloilman tilavuusvirtana käytetään 22 m³/s sekä ominaislämpökapasiteettina 1,01 kJ/kgK.

$$C_{tulo} = 22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1,287\text{ kg}}{\text{m}^3} * 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 28,61\text{ kW/K} \quad (6.3)$$

Poistoilman lämpökapasiteettivirtaama lasketaan vastaavalla tavalla, kuin tuloilmalle käytämällä poistoilman arvoja. Näin voidaan siirtyä arvioimaan rekuperaatioastetta.

Lämpökapasiteettivirtaamien suhdeluku tulo- ja poistoilmanvirroille lasketaan yhtälön 6.4 mukaisesti jakamalla pienempi lämpökapasiteettivirtaama aina suuremmalla lämpökapasiteettivirtaamalla.

$$R = \frac{15,52 \text{ kW/K}}{28,61 \text{ kW/K}} = 0,54 \quad (6.4)$$

Rekuperatioasteeksi oletetaan arvoksi 60 %, eli poistoilmasta siirtyy lämpöä rekuperatioasteen verran tuloilman esilämmitykseen. Sen avulla voidaan ratkaista, mikä on tuloilman lämpötila esilämmityksen jälkeen yhtälön 6.5 mukaisesti, kun huomioidaan että tuloilma on aluksi $-3 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$T_{\text{esilämmitetty}} = \frac{15,52 \frac{\text{kW}}{\text{K}} * (273,15 \text{ K} + 21^\circ\text{C}) * \left(\frac{60\%}{100}\right) - 15,52 \frac{\text{kW}}{\text{K}} * (273,15 \text{ K} + (-3^\circ\text{C})) * \left(\frac{60\%}{100}\right) + 28,61 \frac{\text{kW}}{\text{K}} * (273,15 \text{ K} + (-3^\circ\text{C}))}{28,61 \text{ kW/K}} = 277,9 \text{ K} = 4,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.5)$$

Nyt yhtälöllä 6.6 voidaan laskea, kuinka paljon lämmönvaihtimen tuottama lämpöteho voisi teoriassa olla kuukaudessa hyödyntämällä pienintä lämpökapasiteettivirtaamaa, joka on tässä tapauksessa poistoilmanvirran lämpökapasiteetti ja etukäteen määriteltyä rekuperatioastetta sekä huomioimalla ilmanvaihdon käyttötunnit vuodessa. Laskennassa oletetaan, että yhdessä kuukaudessa on 4,35 viikkoa ja käyttöaste on 168 h viikossa.

$$\Phi = \frac{15,52 \frac{\text{kW}}{\text{K}} * \frac{60\%}{100} ((273,15 \text{ K} + 21^\circ\text{C}) - (273,15 \text{ K} + (-3^\circ\text{C}))) * 168 \text{ h} * 4,35 \frac{\text{vko}}{\text{kk}}}{1000} \approx 163,3 \text{ MWh/kk} \quad (6.6)$$

Poistoilmanvirrasta tuloilmanvirtaan siirtyvä lämpö voidaan laskea yhtälön 6.7 mukaisesti vähentämällä esilämmitetystä ilmasta ulkoilman lämpötila.

$$\Delta T_{\text{tuloilma}} = (4,8^\circ\text{C} - (-3^\circ\text{C})) = 7,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.7)$$

Lopuksi voidaan vielä laskea lämmöntalteenoton osuus ilmanvaihdon tuloilman esilämmityksestä yhtälön 6.8 mukaisella tavalla, missä 22 °C on sisäilman toivottu lämpötila. Tulokset VAK 02 tilalle löytyvät taulukosta 8 ja tulokset VAK 18 tilalle taulukosta 9.

$$LTO_{osuus\ esilämmityksestä} = \frac{7,8\text{ °C}}{22\text{ °C} - (-3\text{ °C})} * 100 = 30,8\% \quad (6.8)$$

Taulukko 8 Laskelmien tulokset VAK 02 tilalle

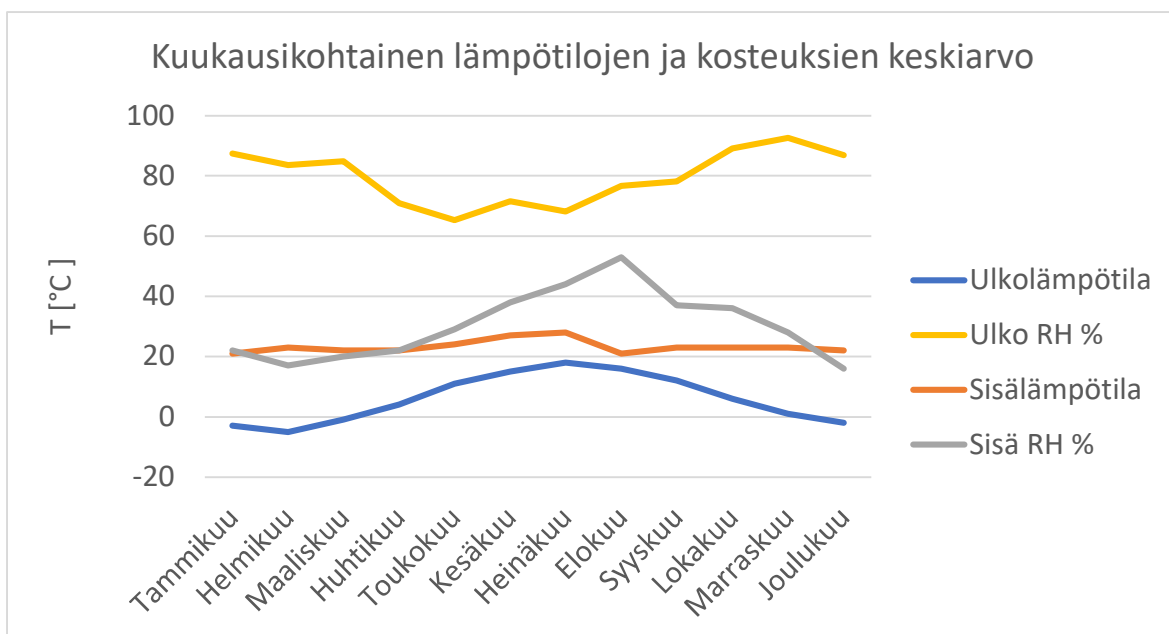
| <i>Kuukausi</i> | <i>Lämpöteho [MWh]</i> | <i>Tuloilmaan siirtyvä lämpö [°C]</i> | <i>LTO osuus esilämmityksessä %</i> |
|------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Tammikuu | 163.3 | 7.8 | 30.8 |
| Helmikuu | 189.3 | 9.0 | 32.9 |
| Maaliskuu | 156.0 | 7.5 | 32.2 |
| Huhtikuu | 122.0 | 6.0 | 32.7 |
| Toukokuu | 87.5 | 4.4 | 38.9 |
| Kesäkuu | 79.8 | 4.1 | 55.7 |
| Heinäkuu | 66.2 | 3.4 | 79.0 |
| Elokuu | 33.9 | 1.7 | 27.5 |
| Syyskuu | 74.2 | 3.8 | 36.3 |
| Lokakuu | 114.7 | 5.7 | 34.8 |
| Marraskuu | 148.5 | 7.2 | 33.8 |
| Joulukuu | 162.8 | 7.8 | 32.1 |

Taulukko 9 Laskelmien tulokset VAK 18 tilalle

| <i>Kuukausi</i> | <i>Lämpöteho [MWh]</i> | <i>Tuloilmaan siirtyvä lämpö [°C]</i> | <i>LTO osuus esilämmityksessä %</i> |
|------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Tammikuu | 113.1 | 8.5 | 33.5 |
| Helmikuu | 131.0 | 9.8 | 35.8 |
| Maaliskuu | 108.0 | 8.2 | 35.1 |
| Huhtikuu | 84.5 | 6.5 | 35.6 |
| Toukokuu | 60.5 | 4.8 | 42.3 |
| Kesäkuu | 55.2 | 4.4 | 60.6 |
| Heinäkuu | 45.8 | 3.7 | 86.0 |
| Elokuu | 23.5 | 1.9 | 29.9 |
| Syyskuu | 51.4 | 4.1 | 39.5 |
| Lokakuu | 79.4 | 6.2 | 37.8 |
| Marraskuu | 102.8 | 7.9 | 36.8 |
| Joulukuu | 112.7 | 8.5 | 35.0 |

6.3.2 VAK 10

Tila VAK 10 sijaitsee erillään toisista työtiloista. Sen ja muiden työtilojen välillä on seinät sekä nosto-ovi. Sisälämpötila ja suhteellinen kosteus mitataan samanlailla etäluettavalla lämpötila- ja kosteusanturilla. Lämpötilojen keskiarvosta poikkeavia arvoja toisaalta esiintyy tuotannon toiminnasta sekä vuodenaikasta riippuen, vaikka VAK 10 tapauksessa tuotanto ei tuota niin paljoa lämpöä, koska se perustuu kylmäilmaukseen eli tuotannon muodostamaa lämpöä ei synny niin merkittävästi. VAK 10 lämpötilat vuodelle 2021 voidaan nähdä kuvasta 29, josta keskilämpötila ja suhteellinen kosteus kullekin kuukaudelle määriteltiin graafisesti lukemalla. Ulkoisena lämpötilana ja suhteellisena kosteutena käytetään samoja keskiarvoja kuin VAK 02 ja -18 tapauksessa. Pinnoitustehtaan VAK 10 tilan tarkemmat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut voidaan nähdä liiteosion liitteestä 5. Tässä tapauksessa on syytä huomioida, että lämpötilat vuodelle 2021 oli saatavilla vasta maaliskuusta lähtien anturirikkojen takia. Tammi- ja helmikuun lämpötiloille käytettiin lämpötilaolettamia.



Kuva 29 Vyöhyke 1 energialaskennan testivuosisien sekä VAK 10 keskilämpötilat ja suhteelliset kosteusprosentit [24, 22]

Lämpötilat ulko- ja sisälämpötiloille löytyvät taulukosta 10. Lisäksi muut laskelmassa käytetyt arvot, kuten käyntiaika, ilmanvirtaukset sekä paineet voidaan nähdä taulukosta 11. Paineolettamat ovat samat kuin VAK 02 ja -18 tiloissa. Toivottuna sisäilmana käytetään samaa arvoa 22 °C ja ilmanvaihdon käynti on myös samaa 168 h viikossa koko vuodelle sekä rekuperaatioasteena käytettiin 60 %. Laskelmat toteutettiin samalla tavalla, kuin aikaisemmassa esimerkissä eli niitä ei tässä tapauksessa esitetä.

Taulukko 10 Laskuissa käytetyt lämpötilat ja suhteelliset kosteusprosentit [24, 22]

| Kuukausi | Ulkolämpötilat Vyöhyke 1 [°C] | Ulkokosteus [RH%] | VAK 10 lämpötilat 2021 [°C] | Sisäkosteus [RH%] |
|-----------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|
| Tammikuu | -3 | 87 | 20 | 25 |
| Helmikuu | -5 | 84 | 20 | 25 |
| Maaliskuu | -1 | 85 | 20 | 27 |
| Huhtikuu | 4 | 71 | 18 | 36 |
| Toukokuu | 11 | 65 | 20 | 39 |
| Kesäkuu | 15 | 72 | 23 | 49 |
| Heinäkuu | 18 | 68 | 26 | 49 |
| Elokuu | 16 | 77 | 20 | 57 |
| Syyskuu | 12 | 78 | 20 | 47 |
| Lokakuu | 6 | 89 | 19 | 45 |
| Marraskuu | 1 | 93 | 20 | 31 |
| Joulukuu | -2 | 87 | 20 | 22 |

Taulukko 11 VAK 10 ilman tilavuusvirrat sekä paineet [20]

| VAK 10 | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Tuloilma | Poistoilma |
| Ilman tilavuusvirta | 2,5 m ³ /s | 1,7 m ³ /s |
| Paine | 100 000 Pa | 100 000 Pa |

Poistoilman lämpöpotentiaali laskettiin kullekin kuukaudelle hyödyntäen lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien keskiarvoja. Lasketut tulokset VAK 10 tilalle löytyvät taulukosta 12. Lämpötehojen lisäksi laskettiin myös tuloilmaan siirtyvä lämpö sekä lämmöntalteenoton osuus tuloilman esilämmityksessä.

Taulukko 12 Laskelmien tulokset VAK 10 tilalle

| <i>Kuukausi</i> | <i>Lämpöteho [MWh]</i> | <i>Tuloilmaan siirtyvä lämpö [°C]</i> | <i>LTO osuus esilämmityksessä %</i> |
|------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Tammikuu | 20.5 | 8.6 | 34.1 |
| Helmikuu | 22.3 | 9.3 | 34.1 |
| Maaliskuu | 18.7 | 7.9 | 34.1 |
| Huhtikuu | 12.6 | 5.4 | 29.6 |
| Toukokuu | 8.0 | 3.6 | 31.4 |
| Kesäkuu | 7.0 | 3.2 | 43.3 |
| Heinäkuu | 7.0 | 3.2 | 73.2 |
| Elokuu | 3.6 | 1.6 | 25.4 |
| Syyskuu | 7.1 | 3.2 | 30.7 |
| Lokakuu | 11.6 | 5.1 | 31.0 |
| Marraskuu | 17.0 | 7.2 | 34.0 |
| Joulukuu | 19.6 | 8.3 | 34.1 |

6.3.3 VAK 10 Kompressorihuoneen kompressorit

Pinnoitustehtaalla sijaitsevien kompressorien sähkömoottorien tehot ovat valmistajan mukaan 132 kW sekä 180 kW. Tätä tietoa hyödyntämällä voidaan selvittää, että miten paljon käytössä olevien kompressorien kuluttamasta energiasta voidaan saada talteen hyödyntämällä lämmönvaihdinta kompressorien öljynjäähdytyksessä. Kompressorit tuottavat käynnin aikana niin sanottuna sivutuotteena lämpöenergiaa moottoritehonsa verran puristaessaan ilmaa alkuperäisestä pienempään tilaan. Siinä syntyvää lämpöä pyritään jäähdyttämään puristusvaiheiden välissä ruiskuttamalla öljyä ilmaseoksen sekaan madaltaen sen lämpötilaa. Lopuksi öljy erotellaan ilmaseoksesta ennen paineilman vientiä prosesseihin. Atlas Copcon mukaan kompressorien käymiseen kuluvasta energiasta voidaan ottaa talteen noin 50–90 %,

riippuen käytetystä kompressorityypistä. Esimerkiksi kompressoreissa, joissa on käytössä taajuusmuuttaja, ei voida ottaa talteen niin paljoa lämpöenergiaa kuin se kuluttaa. Tämä johtuu siitä, että taajuusmuuttaja tarvitsee ulkopuolista virtaa toimiakseen. Samoin myös ilmajähdytteinen kompressori kuluttaa moottoritehoa enemmän virtaa, jolloin talteen otettava energiamäärä suhteessa kokonaiskulutukseen on hiukan pienempi. Kompressorien lämmöntalteenottoa varten Atlas Copco on kehitellyt erillisen lämmöntalteenottolaitteiston, joka voidaan kytkeä suoraan kiinni kompressorin öljynjäähdyttimeen. Lämmöntalteenottolaitteistossa käytetään kiertoaineena vettä, joka jäähdyttää kompressorissa jäähdytyksessä käytettävää öljyä siirtämällä siinä olevan lämmön itseensä. Tätä kiertoaineena toimivaa vettä voidaan hyödyntää erilaisissa sovellutuksissa kohteesta riippuen. [25]

Taulukoista 13 ja 14 voidaan nähdä, minkälaisia energiamääriä voidaan teoriassa ottaa talteen Atlas Copcon lämmöntalteenottolaitteistolla. Käytetyt jäähdytyksen hyötysuhteet määrittelevät sen, miten paljon kompressorin kuluttamasta energiasta saadaan otettua talteen. Todellisuudessa talteen otettavaan energiamäärään vaikuttaa kompressorien käyntitehot sekä vuotuiset käyttötunnit, joista ei tällä hetkellä ollut tarkempia tietoja saatavilla.

Taulukko 13 Teholtaan 132 kW kompressorin mahdollinen energiansäästö

| Kompressorin teho [kW] | Jäähdytyksen hyötysuhde [%] | Tehon säästö [kWh] |
|------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 132 | 50 | 66 |
| 132 | 60 | 79 |
| 132 | 70 | 92 |
| 132 | 80 | 106 |
| 132 | 90 | 119 |

Taulukko 14 Teholtaan 180 kW kompressorin mahdollinen energiansäästö

| Kompressorin teho [kW] | Jäähdytyksen hyötysuhde [%] | Tehon säästö [kWh] |
|------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 180 | 50 | 90 |
| 180 | 60 | 108 |
| 180 | 70 | 126 |
| 180 | 80 | 144 |
| 180 | 90 | 162 |

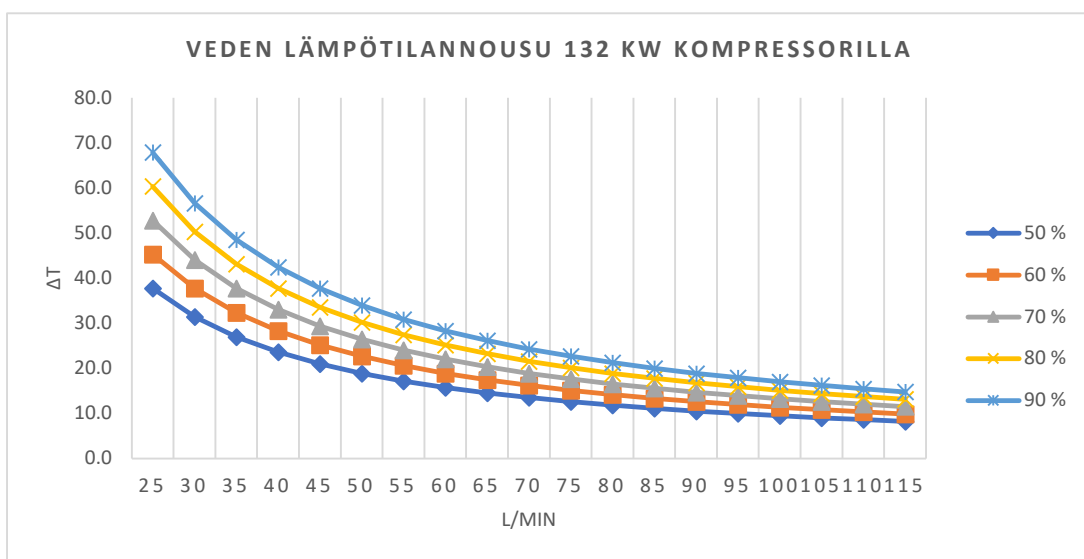
Käyttämällä yhtälöä 6.9 voidaan arvioida erilaisilla lämmönvaihtimen veden virtauksilla ja lämpötilannoilla talteen saatava energiamäärä. Veden ominaislämpökapasiteettina käytetään arvoa 4,2 kJ/kgK [8]. Massavirtana voidaan käyttää l/s yksikköä. Veden massavirta

määrittelee, kuinka tehokkaasti kompressorissa kiertävää öljyä jäähdytetään. Näin ollen on tärkeää huomioida, että mitä suurempia lämpötiloja haluaa ottaa talteen, sitä hitaampaa veden massavirran tulee olla ja näin ollen kompressorin käyntilämpötila nousee, joka saattaa toisaalta aiheuttaa ongelmia kompressorin toiminnalle. Toimintaongelmat lisäävät näin ollen mahdollisesti huoltojen tarvetta [25].

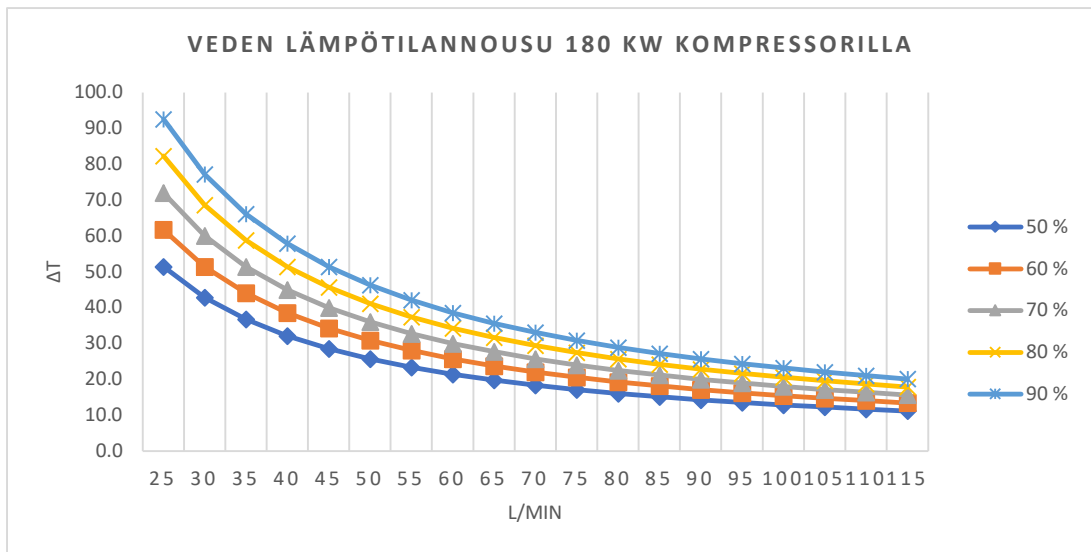
$$P_{\text{kompressorin teho}} = \frac{q_m \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{\eta}{100}} \quad (6.9)$$

η on talteenoton hyötysuhde [%]

Muokkaamalla yhtälöä niin että ratkaistaan esimerkiksi lämmön nousu vedessä, voidaan arvioida, että kuinka kuumaa vettä saadaan käytettäväksi milläkin virtaamalla. Kuvista 30 ja 31 voidaan nähdä molemmille kompressoreille lasketut mahdolliset veden lämpötilannousut erilaisille virtauksille kullakin talteenoton hyötysuhteella lämmönvaihtimessa virtaavan veden tilavuusvirran funktiona. On tärkeää huomioida, että lämmöntalteenottoratkaisut ovat hyvin tapauskohtaisia, joten teoreettiset arvot poikkeavat tyypillisesti todellisista jonkin verran. Lisäksi on hyvä muistaa, että virtauksen kasvaessa myös painehäviöt kasvavat putkistossa, joka tarkoittaa suurempia energiamääriä pumppauksessa.



Kuva 30 132 kW kompressorin hukkalämmön lämpötilannosto vedessä



Kuva 31 180 kW kompressorin hukkalämmön lämpötilannosto vedessä

6.4 Hukkalämmön mahdolliset käyttökohteet

Hukkalämmön hyödyntämistä on tärkeää tarkastella, sillä Koskisen Oy on asettanut tavoitteekseen tehostaa energiatehokkuutta niin että kokonaisenergiankulutus tuotettua tuotekuutiota kohden pienenee noin 7,5 % vuoteen 2025 mennessä. Vertailuarvona käytetään vuoden 2015 tietoja. Tehostamalla energiankäyttöä voidaan pienentää energiantuotantoon käytettävien luonnonvarojen määrää. [26] Esimerkiksi työssä tarkasteltu poistoilmanvaihdon lämmöntalteenotto ja sen hyödyntäminen tuloilman esilämmityksessä vähentää ulkoisten lämmönlähteiden käyttöä, pienentäen näin esimerkiksi polttoaineiden käyttötarvetta.

Tässä osiossa tarkastellaan, millä tavalla aikaisemmin laskelmoituja hukkalämmön määriä voidaan mahdollisesti hyödyntää kohteessa. Tarkastelukohteina ovat tuloilman esilämmitys poistoilmassa olevalla lämmöllä sekä kompressorin öljyn jäähdytyksessä käytettävä vesikiertoinen lämmönvaihdin ja sillä talteen otettavan hukkalämmön hyödyntäminen.

6.4.1 Tuloilman esilämmityksen saneeraus

Nykytilanteen mukaan kohteessa olevat ilma-neste-ilma lämmönvaihtimet eivät ole täysin toimintakunnossa niiden likaisuuden vuoksi. Lisäksi niissä kiertävissä keruunesteverkostoissa on ongelmia, joita ei tarkastella tarkemmin tässä työssä. Erityisesti ilmanvaihdon poistupuolen lämmönvaihtimet ovat pääasiallisesti hyvin likaisia eikä niiden lämmönvaihtopinnoille kertynyttä likaa saada helposti putsattua yrityksistä huolimatta. Joissakin tapauksissa mekaanista raaputtamista on yritetty, mutta neulalämmönvaihtimien neulaset taipuvat toimenpiteen aikana, joka heikentää niiden toimintaa eli se ei ole näin ollen kovinkaan

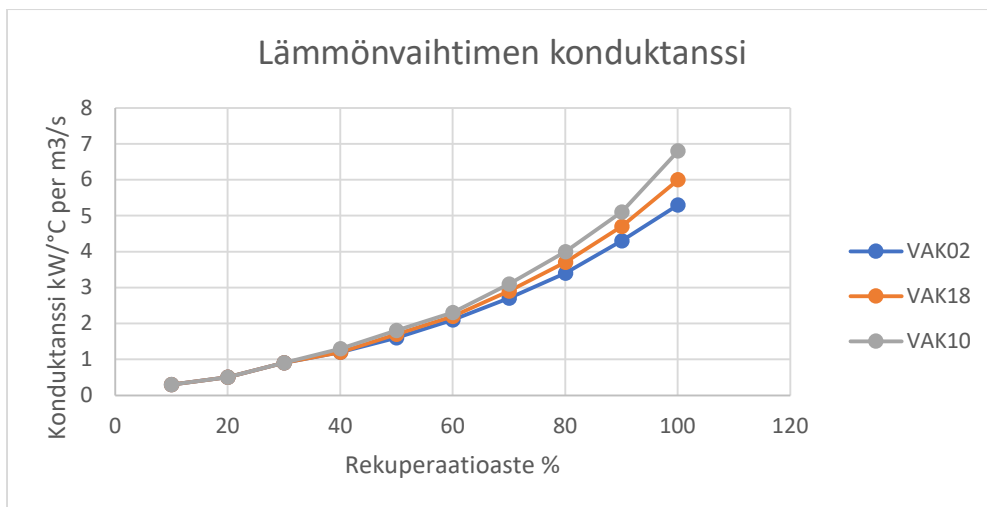
kannattavaa mahdollisten laiterikkojen vuoksi. Lämmönvaihtimien pinnoille kertynyt lika alentaa niiden lämmönvaihtoa ja läpi kulkeutuvaa ilmanvirtausta sekä näin ollen nostaa paine-eroa vähentäen ilmanvirran kulkua, joka toisaalta lisää tarvetta puhallintehojen nostamiselle. Siksi lämmönvaihtimien tarkastusluukut ovat suurimmalta osin avattuina riittävän ilmankulun varmistamiseksi. Lisäksi on huomioitavaa, että osassa lämmönvaihtimia ei ollut kiertoaineen pumpput käytössä. Yhdessä tapauksessa tuloilman esilämmitykseen käytettävän lämmönvaihtimen huoltoluukku oli myös avattu, jolloin se saadaan ohitettua tehostaen raatetun ilman virtausta. Syy huoltoluukun avaamiselle oli ollut niin sanottu vihellys, jota syntyi sen ollessa suljettuna. Tämä voisi viitata paine-erojen liialliseen kasvuun, joka voi johtua esimerkiksi tuloilman lämmönvaihtimen likaisuudesta tai vääränlaisesta mitoituksista suhteessa ilmanvirtaukseen.

Poistoilman lämmöntalteenotto ja tuloilman esilämmityksen saneeraus on näin ollen yksi mahdollisista toimista, joiden avulla poistoilman mukana hukkaan menevä lämpö voidaan ottaa hyötykäyttöön. Tällä hetkellä sisäilmasta tulevaan ulkoilmaan siirrettävää lämpöenergiaa arvioitiin olevan kussakin tilassa vuotuisesti yhteensä noin 2521 MWh/a. Laskennan oletuksena on, että sisätilan vuotuinen lämpötila tulisi keskimäärin olla noin 22 °C, joka toisaalta vaihtelee, sillä haluttu sisälämpötila määritellään laskemalla poistoilmanvirtojen lämpötilojen keskiarvo. Näin ollen haluttu sisälämpötila vaihtelee vuodenaikasta sekä tuotannosta riippuen. Tuloksiin on myös sisällytetty kesäkuukausien aikainen lämpöpotentiaali, vaikka sitä ei hyödynnettäisi tuloilman esilämmityksessä korkeiden ulkolämpötilojen vuoksi. Tuloksien mukaan merkittävimmät säästöt löytyvät VAK 02 ja -18 tiloista, joka johtuu pääasiallisesti niissä vallitsevista suuremmista lämpötiloista johtuen siellä käytettävistä kuumapuristimista sekä suuremmista ilmanvirtauksista. Rahallisesti kunkin pinnoitustehdään tilan ilmanvaihdon lämmöntalteenotossa on kyseessä yhteensä noin 70595 € säästö energiankulutuksessa vuodessa, jos oletetaan että energian hinta Koskisen Oy voimalaitoksen lämmöntuotannossa on noin 28 €/MWh ja rekuperaatioasteen oletama 60 % pitävät paikkaansa.

Rekuperatioasteen vaikutusta lämmönvaihtimen konduktanssiin voidaan tarkastella yhtälön 6.10 mukaisesti kullakin rekuperatioasteella vuotuisalla tasolla, jossa käytetään kuukausittaisen lämpötehon- sekä ilman- ja lämmönvaihtimen lämpimän nestevirran lämpöerojen keskiarvoja. Lämmönvaihtimen lämpimän nestevirran lämpötila voidaan laskea poistoilman ja esilämmitetyn ilman keskiarvoina. Yhtälössä nähdään esimerkki laskelma, kun

rekuperaatioaste on 10 % ja kyseessä on pinnoitustehtaan VAK 02 tilan poistoilmanvaihto. Konduktanssi kullekin rekuperaatioasteen arvolle ja pinnoitustehtaan tilalle nähdään kuvassa 32. Siitä voidaan havaita, että konduktanssin kasvu kiihtyy rekuperaatioasteen lähenytessä 100 %, joka tarkoittaa suurempia investointeja. Tämä johtuu tarpeesta kasvattaa lämmönvaihtimien kokoa saavuttaakseen haluttu lämmönsiirtokyky. Esimerkiksi Retermian mukaan epäsuoran lämmönvaihdinjärjestelmän rekuperaatioastetta tai niin sanottua lämmönvaihtimen muodostamaa lämpötilasuhdetta ei kannata tyypillisissä tilanteissa mitoittaa yli 71 %. Tämä johtuu siitä, että tarvittava lämmönvaihtimen koko kasvaa lähes eksponentiaalisesti mentäessä sen yli, jotta sillä voidaan saavuttaa haluttu lämmönvaihtoteho. [13]

$$G = \frac{26,6 \text{ kW}}{\left(\frac{23 \text{ °C} + 7 \text{ °C}}{2} - 7 \text{ °C}\right) * 13 \text{ m}^3/\text{s}} = 0,25 \text{ kW/°C per m}^3/\text{s} \quad (6.10)$$



Kuva 32 Rekuperaatioasteen vaikutus lämmönvaihtimen konduktanssiin kussakin pinnoitustehtaan tilassa

Säästöjen lisäksi on syytä huomioida, kuinka paljon ilmanvaihdon vuotuisalle lämmitysenergialle tulee hintaa poistolämmöllä lämmittämisen jälkeen, jolloin tuloilman lämpötilaa tulee vielä korottaa lisää saavuttaakseen toivottu sisälämpötila ulkoisella lämmönlähteellä, kuten tässä tapauksessa Koskisen Oy:n tuottamalla kaukolämmöllä. Taulukosta 15 voidaan nähdä kullekin tilalle oma vuotuinen kokonaislämmitystarve, lämpötehopotentiaali, lämmöntalteenoton jälkeen jäljelle jäävä lämmitystarve sekä kullekin oma rahallinen arvonsa. Lisäksi taulukosta 15 näkee kunkin tilan lämmöntalteenoton tuloilman vuosihyötysuhteen. Tuloilman vuosihyötysuhde voidaan laskea jakamalla lämmöntalteenoton lämpöteho potentiaali

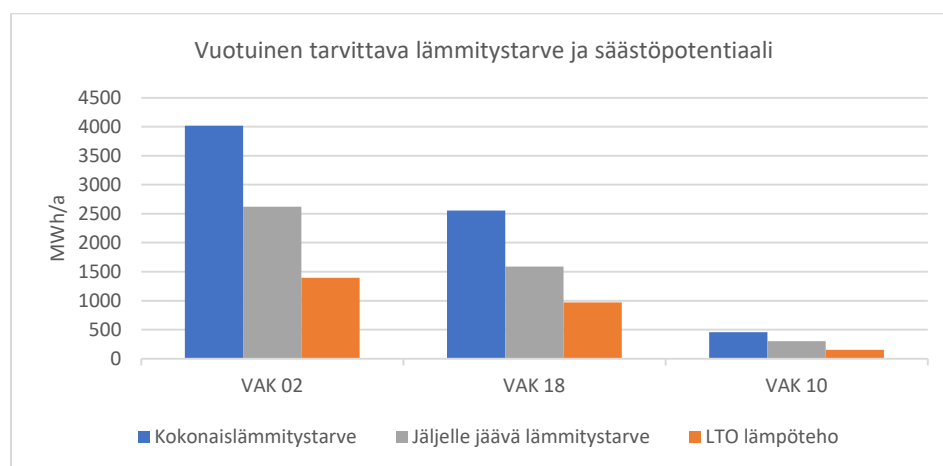
tilan kokonaislämmitystarpeella, kuten esimerkiksi VAK 02 tapauksessa yhtälön 6.11 mukaisella tavalla. Vuosihyötysuhdetta voidaan kasvattaa esimerkiksi rekuperaatioastetta nostamalla tai tasaamalla tulo- ja poistoilmanvirtoja. [27]

$$\varepsilon_a = \frac{1398 \text{ MWh/a}}{4018 \text{ MWh/a}} * 100 \% = 35 \% \quad (6.11)$$

Taulukko 15 Pinnoitustehtaan kunkin ilmanvaihdon vaatima lämmitysteho, lämpötehopotentiaali ja lämmönvaihtimen jälkeen jäävä lämmitystarve sekä kunkin vuotuisen energiamäärän hinta ja tuloilman vuosihyötysuhde

| | VAK 02 | VAK 18 | VAK 10 |
|----------------------------------|------------|------------|-----------|
| Kokonaislämmitystarve | 4018 MWh/a | 2557 MWh/a | 457 MWh/a |
| Kokonaishinta lämmölle | 112509 €/a | 71597 €/a | 12785 €/a |
| Lämpöteho potentiaali | 1398 MWh/a | 968 MWh/a | 155 MWh/a |
| Lämpötehon arvo | 39149 €/a | 27103 €/a | 4343 €/a |
| Lämmitystarve LTO jälkeen | 2620 MWh/a | 1589 MWh/a | 301 MWh/a |
| Maksettavaa | 73360 €/a | 44493 €/a | 8442 €/a |
| Tuloilman vuosihyötysuhde | 35 % | 38 % | 34 % |

Tuloilman esilämmitys poistosta talteen otettavalla hukkalämmöllä suhteutettuna kokonaislämmitystarpeeseen sekä jäljelle jäävään lämmitystarpeeseen esilämmityksen jälkeen nähdään kuvasta 33. Kuten voidaan huomata, kussakin tapauksessa lämmöntalteenotolla voidaan kattaa noin kolmasosa tarvittavasta tuloilman esilämmityksestä, tämän osoittaa myös taulukossa 15 näkyvät tuloilmojen vuosihyötysuhteet, jotka ovat noin kolmasosan vuotuisesta ilmanvaihdon esilämmityksestä.



Kuva 33 Kunkin tilan lämmitystarve, LTO järjestelmän lämpöteho ja LTO:n jälkeen jäävä lämmitystarve

Lämmönvaihtimien saneerauksen yhteydessä on tärkeää tarkastella poistoilman suodatusmahdollisuutta hyvin likaisten poistoilmanvirtojen vuoksi. Näin ollen lämmönvaihtimen ylläpidon kannalta pelkästään suodattimen vaihto saattaa riittää, riippuen suodattimen suodatus-tehosta. Tällöin lämmönvaihtimien pesemistä ei välttämättä tarvitse tehdä niin usein. Ongelmaksi voi kuitenkin osoittautua suodattimien jatkuva likaantuminen erityisen likaavien ilmanvirtojen vuoksi, jonka myötä suodattimia täytyy vaihdella jatkuvasti toiminnan ylläpitämiseksi ja riittävän ilmanvirtauksen takaamiseksi. On myös tärkeää ottaa huomioon kesäkuukausien aikainen lämmönvaihtimen tarpeettomuus, jolloin ulkolämpötila riittää kattamaan riittävän sisälämpötilan. Tällöin olisi saneerauksen yhteydessä tärkeää huomioida lämmönvaihdinpatterien ohitusmahdollisuus, jolloin ilmankierto tehostuisi painehäviöiden pienentyessä ja näin työskentelytilat voisivat pysyä olosuhteiden osalta parempina esteettömän ilmanvirrankulkeutumisen vuoksi. Ohituksen myötä myös lämmönvaihtimien likaantuminen vähentyisi, mutta toisaalta lämmöntalteenotto ei tällöin toimisi ja säästöt kesäkuukausina tulisi jättää huomiotta. Likaantumisen seurantaan tulisi myös panostaa. Pelkästään siirtyvän lämmön määrän seuraaminen voi riittää osoittamaan liiallisen lämmönvaihtimen likaisuuden. Lisäksi paine-eron kasvu lämmönvaihtimessa viittaa tukkeutuneisiin ilmankulku- reitteihin, joka tarkoittaa puhdistustarvetta.

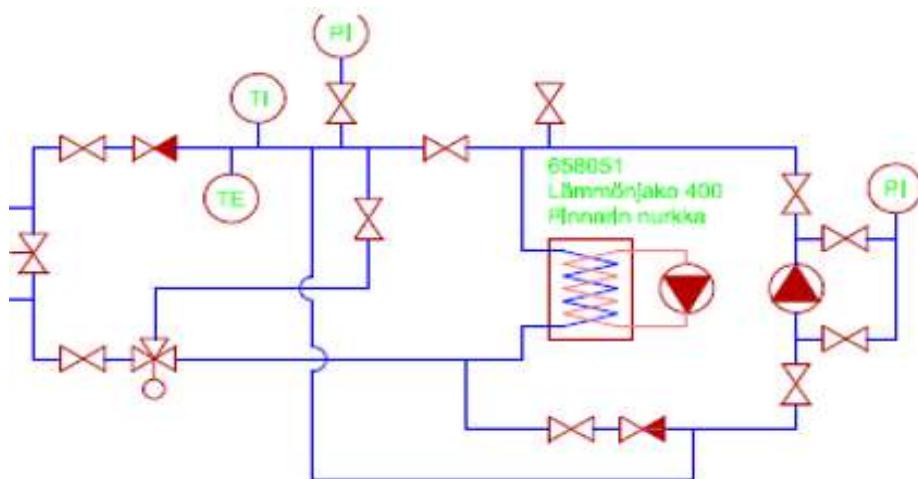
Likaantumisessa on syytä ottaa huomioon lämmönvaihtimien rakenteelliset ominaisuudet. Nykytilanteessa käytössä olleet neulalämmönvaihtimet ovat teetettyjen tutkimuksien mukaan hyviä vähentämään likaantumisen vaikutusta. Tämä johtuu pääasiallisesti niiden monimutkaisista pinnanmuodoista, jotka aiheuttavat lisääntyntä turbulentsuutta ilmanvirtauksessa lisäten leikkausvoimia vähentäen pintojen likaantumista. Toisaalta on huomioitavaa, että tutkimukset on pääasiallisesti koskenut lämpöputkipatteri lämmönvaihtimia, joissa on niin sanottuja eviä tai levyjä putkien pinnoilla eikä nykyisten lämmönvaihtimien mukaisia neuloja. [19] Siksi on tärkeää ottaa huomioon oikeanlainen lämmönvaihtimen rakenne suunnitteluvaiheessa, jotta voidaan välttyä nopeutuneelta likaantumiselta sekä ongelmallisilta puhdistusprosesseilta, joita lämmönvaihtimen vaikeat geometriat saattavat aiheuttaa.

6.4.2 Kompressorin hukkalämpö lämmityksen tukena

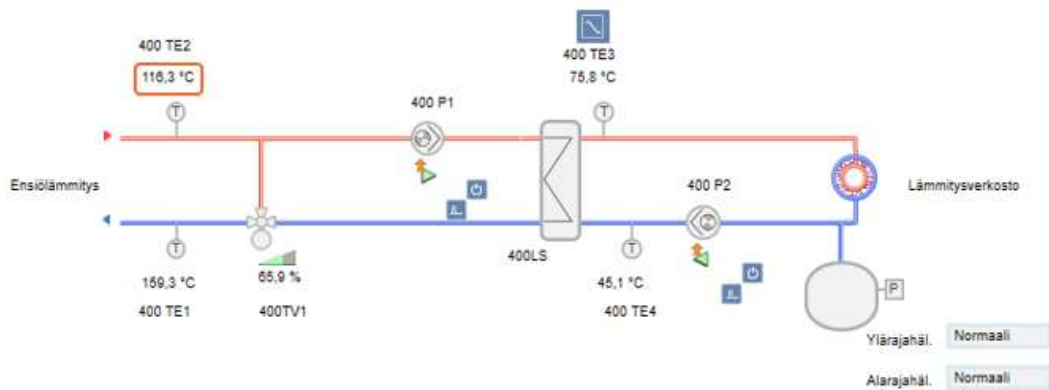
Nykyiseltään kompressorien tuottama lämpöenergia johdetaan suoraan ulos ilmanvaihtokanavia pitkin ilman että sitä hyödynnettäisiin esimerkiksi tuloilman lämmityksessä tai lämmitysverkossa esilämmityksessä ennen Koskisen Oy:n tuottaman kaukolämmön käyttöä. Näin ollen on tärkeää tarkastella kompressorien synnyttämän hukkalämmön hyödyntämistä

energiasäästöjä ajatellen. Kompressorien tuottamaa lämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi Atlas Copcon valmistamia vesikiertoisia lämmönvaihtimia käyttämällä, joiden avulla kompressoreissa käytettävää öljyä jäähdytetään. Lämmönvaihtimena voidaan käyttää myös muunlaisia lämmönvaihdinratkaisuja, jotka ovat riittävän tehokkaita kompressorin öljyn jäähdyttämiseksi ja näin ollen kompressorin toiminta pysyy vakaana ilman käyntiongelmia.

Nestekiertoisella lämmönvaihtimella talteen otettu lämpö voidaan käyttää esimerkiksi kiinteistön lämmityksessä tai muun muassa käyttöveden lämmityksessä. Sovelluskohteita on useita kohteen ominaisuuksista riippuen. Tässä tapauksessa tarkastellaan, miten hyvin kompressorissa syntyvää hukkalämpöä voidaan teoriassa hyödyntää pinnoitustehtaan lämmitysverkostossa lämmönlähteenä tai ilmanvaihdon lämmityksessä, jolloin lämmityksessä käytettävä niin sanottu tehtaan alueella tuotettu kaukolämmön kulutus voisi olla vähäisempää riippuen kompressorien käyttöasteesta. Viitteellisiä laskentoja varten oletetaan, että virtaamien lämpötilat eri verkon osasissa pysyy vakiona sekä kompressorin käyttöaste on 168 h viikossa. Kuvassa 34 on esimerkkikohde, jossa kompressorin hukkalämpöä olisi mahdollista hyödyntää tiettyjen ehtojen täyttyessä. Kyseessä on lämmitysverkoston lämmönjakopiste 400 eli pinnoitustehtaan nurkkaus, jonka lähetyvillä kompressorihuone myös sijaitsee ja näin ollen putkien kulkema matka on pienin mahdollinen muihin mahdollisiin lämmitysverkkojen kytkentäpisteisiin verrattuna. Kyseisen pisteen lämmitysverkosto kiinteistöautomaatiossa näyttää kuvan 35 mukaiselta.

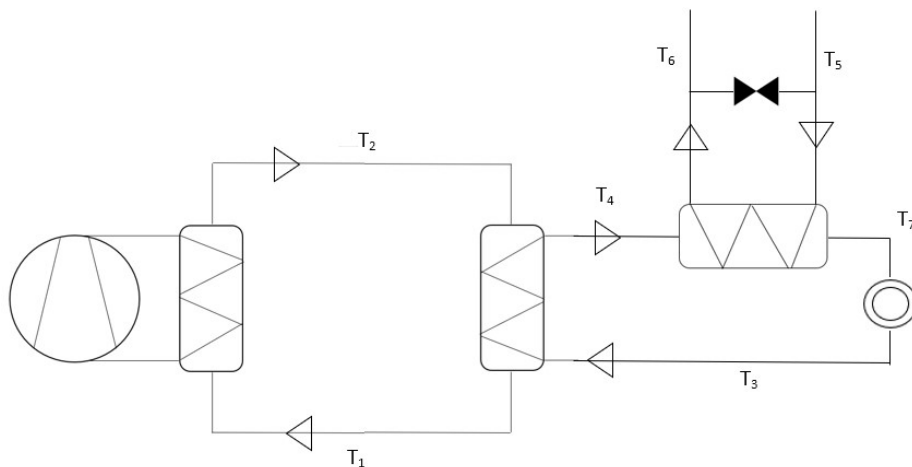


Kuva 34 LVI piirustus, jossa pinnoitustehtaan VAK 02 tilan nurkassa sijaitseva lämmönjako 400



Kuva 35 Kiinteistöautomaation kuva VAK 02 tilan lämmönjakopiiristä 400

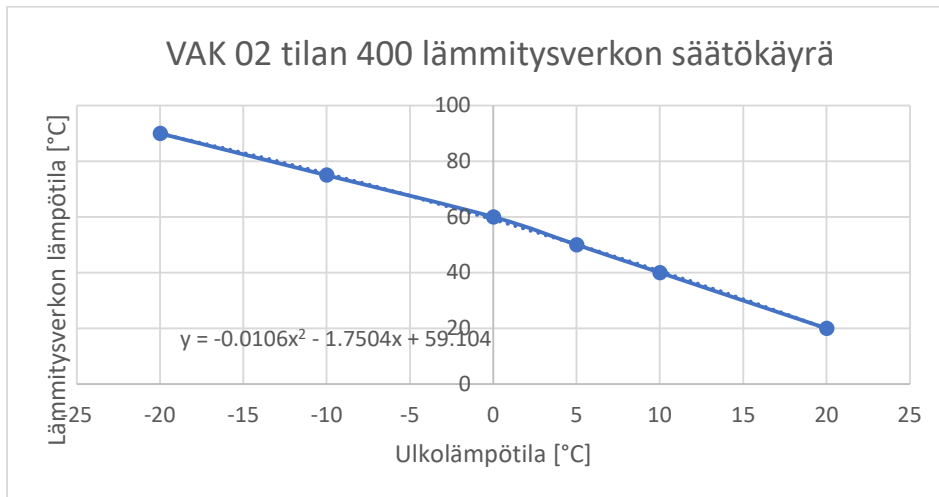
Kompressorin lämmönvaihdin olisi esimerkiksi mahdollista kytkeä kuvan 35 toisiopuoleen ennen ensiöpuolen lämmönvaihdinta, jossa kiertää niin sanottu tehtaalla biokattiloilla tuotettu kaukolämpö. Tällöin korottamalla lämmitysverkoston lämpötilaa ennen varsinaista lämmitystä voidaan vähentää ensiöpuolen lämpötilan tarvetta riippuen kompressorin käyttöasteesta sekä lämmitysverkoston päiväkohtaisesta lämmöntarpeesta. Tilannetta havainnollistava mahdollinen kytkentäkaavio esimerkki nähdään kuvassa 36, jossa kompressorin ja siihen liitetty lämmönvaihdin sijaitsee vasemmalla.



Kuva 36 Esimerkki kytkentäkaavio kompressorin lämmönvaihtimelle, T1-T2 kompressorin lämmönvaihdin, T3-T7 lämmönjakopiiri ja T5-T6 ns. kaukolämpö

Lämmitysverkoston lämmöntarve riippuu ulkolämpötilasta, jonka mukaan lämmitysverkoston toimintaa säädetään. Kuvasta 37 voidaan nähdä lämmitysverkoston säätökäyrä VAK 02 tilassa sijaitsevasta 400 lämmitysverkostosta, jonka perusteella voidaan Excel taulukkolaskentaohjelman avulla muodostaa trendiviiva ja trendiviivaan perustuva yhtälö, joka säädetään jäljittelemään säätökäyrää mahdollisimman tarkasti. Näin trendiviivan yhtälöllä voidaan arvioida, että millä tavoin ulkolämpötila vaikuttaa lämmityspiirissä vaadittavaan

lämpötilaan. Trendiviivan yhtälön mukaisesti kyseessä on toisen asteen polynomiyhtälöön perustuva trendiviiva.



Kuva 37 Tilassa VAK 02 sijaitsevan 400 lämmitysverkoston säätökäyrä

Esimerkiksi kiinteistöautomaation mukaan 8.2.2022 klo 15 ulkolämpötilan ollessa 0,8 °C, lämmitysverkko 400 nousee kaukolämmön avulla alkulämpötilasta 39 °C loppulämpötilaan 62 °C. Hyödyntämällä näitä alkutietoja, voidaan yksinkertaistaen tarkastella, kuinka tehokkaasti kompressorin lämmöntalteenotto toimii lämmitysverkoston 400 lämmityksen tukena. Oletuksena on se, että kompressorin lämmöntalteenoton tai jäähdytyksen hyötysuhde on 70 % ja rekuperaatioaste lämmönvaihtimen ja lämmitysverkoston välillä 100 % eli kaikki kompressorista saatu lämpö siirtyy suoraan lämmitysverkostoon. On tärkeää muistaa, että rekuperaatioaste on tyypillisesti hiukan pienempi riippuen virtaamasta ja lämmönvaihtimen kokoluokasta eli lämmönsiirtopinta-alasta. Tässä tapauksessa lämmönvaihtimessa siirtyvän lämmön määrää tasaa jäähdytyksen oletettu matalampi hyötysuhde, joten 100 % rekuperaatioaste ei vääristä todellisia tuloksia merkittävästi. Nyt lämmitysverkoston lämpötilaa nostetaan 23 °C, jolloin lämmön siirtyessä ilman häviöitä, kompressorin tulisi lämmittää lämmönvaihtimessa kiertävää vettä 23 °C. Tällöin tehtaalla tuotettua kaukolämpöä ei juuri tuollaisella lämmitystarpeella tarvita. Tämä tarkoittaa yhtälön 6.12 mukaisesti sitä, että kompressorin lämmönvaihtimessa kiertävän veden virtauksen tulisi olla noin 0,96 l/s saavuttaakseen vaadittavan lämpötilannoston. Yksinkertaistuksena on, että kompressorin lämmönvaihtimessa paluovesi on lämpötilaltaan myös 39 °C ja näin loppulämpötila kompressorin lämmönvaihtimen jälkeen 62 °C. Näin ollen voidaan olettaa, että kompressorin käyttöasteen ollessa 168 h/vko, se voisi kyseisellä ulkolämpötilalla lämmittää lämmitysverkon täysin itsenäisesti säästän kaukolämmön tuotossa kuluvaa energiaa.

$$q_m = \frac{\left(\frac{70}{100} * 132 \text{ kW}\right)}{23 \text{ }^\circ\text{C} * 4,19 \text{ kJ/kgK}} = 0,96 \text{ l/s} \quad (6.12)$$

Kuten yhtälöstä 6.13 voidaan huomata, trendiviivoihin perustuvat yhtälöt eivät ole täysin tarkkoja kertomaan vaadittua lämmitysverkoston lämpötilaa. Tässä tapauksessa 0,8 °C tarkoittaa 58 °C lämpötilantarvetta, kun toisaalta edellisen esimerkin mukaan lämmitysverkosto tarvitsi 62 °C lämpötilaa kiinteistöautomaation mukaan. Heittoa lämpötiloilla on yhteensä 6,5 %. Toisaalta tämä johtuu trendiviivan yhtälön pienestä eroavaisuudesta todelliseen säätökäyrään verrattaessa.

$$y = (-0.0162 * 0,8^2) - (1.7504 * 0,8) + 59.104 = 58 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.13)$$

Siirryttäessä lämmitysverkoston säätökäyrällä kohti kylmempiä ulkolämpötiloja, pelkkä kompressorin hukkalämpö ei riitä ylläpitämään vaadittua lämpötilatasoa. Tällöin tarvitaan tehtaalla tuotettua kaukolämpöä lisälämmönlähteenä. Huomioitavaa on, että kaikki tarvittavat pumput välissä kuluttavat sähköä, jolloin säästettävä energiamäärä on todellisuudessa laskettua pienempi. Kompressorin kannalta on myös tärkeää muistaa, että lämmönsiirron tulisi onnistua riittävän tehokkaasti, jolloin myös kompressori jäähtyy kunnolla ja pysyy toimintakunnossa. Lämmitysverkoston paluupuolen ollessa liian korkealämpöistä suhteessa kompressorin lämmönvaihtimessa kiertävään veteen kompressorin lämmönvaihtimen vesi ei pääse jäähtymään kunnolla, jolloin kompressorin toiminta saattaa häiriintyä. Siksi on tärkeää varmistaa kunnollinen jäähtymä kummassakin piirissä sekä lisätä lämmönvaihtimen ohitusmahdollisuus, jotta vältetään kompressorin ylikuumentumiselta ja siitä syntyviltä mahdollisilta laiterikoilta.

Vertailun vuoksi myös 450 lämmitysverkoston vaatima lämpö tarkastettiin kiinteistöautomaation tiedoista samalla päivämäärällä ja kellonajalla, kuin lämmitysverkoston 400 tapauksessa. Verkoston paluu lämpötila oli 49 °C ja meno 60 °C ulkolämpötilan ollessa 0,8 °C. Näin ollen voidaan olettaa, että lämmitysverkoston lämpöä pitää korottaa noin 11 °C, jolloin 132 kW kompressorilla se vastaa 2 l/s virtausta paluulämpötilan ollessa 49 °C.

Lisäksi 470 ilmanvaihdon lämmitysverkostolle tarkistettiin myös menolämpötilaksi 70 °C ulkolämpötilan ollessa 0,8 °C, mutta paluulämpötilaa ei ole saatavilla puuttuvat lämpötila anturin vuoksi. Koskisen Oy:n LVIS henkilön mukaan ilmanvaihdon esilämmityksen lämpötilassa pyritään saavuttamaan kunkin pinnoitustehtaan tilan ilmanvaihdon poistolämpötilojen keskiarvo. Näin ollen voidaan olettaa, että poistojen keskiarvo on pyöristäen noin 22 °C huomioiden jokaisen tilan keskilämpötila helmikuun aikana ilmanvaihdon lämpöpotentiaalilin tarkastelussa käytetyiden taulukoiden 6 ja 10 mukaisesti. Näillä tiedoilla voidaan laskea, että paluulämpötila on todennäköisesti noin 48 °C. Tällöin 132 kW kompressorilla 22 °C lämpötilannosto vastaa noin 1 l/s virtausta. Kuten tässä raportissa on käsitelty, ilmanvaihdon esilämmitys pyritään toteuttamaan ainakin osittain poistoilmasta saatavalla lämmöllä, jolloin kompressorista tarvittava lämpö on vähäisempää.

Kussakin tapauksessa on monia muuttujia, kuten kompressorien käyttöaste, piirien virtausnopeus sekä ulkolämpötila ja lämpöhäviöt, jotka vaikuttavat tarvittavaan lämpötilannostoon. Lisäksi on syytä huomioida, että lämmitysverkostojen virtausnopeuksia ei seurata. Siksi tarkkoja lämpötehoja sekä virtaamia tiettyjen lämpötilannostojen takaamiseksi on vaikea määrittellä. Taulukoista 16 ja 17 voidaan nähdä kunkin lämmitysverkoston lämmöntarve samojen vyöhykkeen I energialaskennan testivuoden 2020 ulkolämpötilojen mukaan, joita käytettiin ilmanvaihdon lämmöntalteenoton laskennassa. Laskennassa käytetään kunkin lämmitysverkoston säätökäyrän trendiviivan mukaista yhtälöä. Vähentämällä taulukoiden lämpötiloista kompressorien tuottama lämpö käyttäen taulukon 18 mukaisia arvoja kunkin lämmitysverkoston mukaisesti, voidaan selvittää, kuinka paljon lämpöä täytyy tuoda kaukolämmöllä kompressorien hukkalämmön lisäksi vuoden aikana. Kuten tuloksista voidaan huomata, erityisesti lämpimämpinä kuukausina kompressorin tuottama lämpö riittää sellaisenaan lähestulkoon molempien kompressorien kohdalla lämmitykseen. Sekä lämmitysverkoston 450 ja ilmanvaihdon lämmitysverkoston 470 säätökäyrät sekä trendiviivat yhtälöillä löytyvät liiteosiosta liitteinä 6 ja 7.

Taulukko 16 Lämmitysverkkojen erilaiset lämpötilavaatimukset vyöhykkeen I ulkolämpötilojen mukaan ja tarvittava lämpö 132 kW kompressorin hukkalämmön jälkeen [24]

| Ulkolämpötila | Lämmitysverkko 400 - Ennen komp./Jälkeen komp. | Lämmitysverkko 450 - Ennen komp./Jälkeen komp. | IV Lämmitysverkko 470 - Ennen komp./Jälkeen komp. |
|---------------|--|---|--|
| -3 °C | 64 °C/41 °C | 71 °C/60 °C | 75 °C/53 °C |
| -5 °C | 68 °C/45 °C | 74 °C/63 °C | 78 °C/56 °C |
| -1 °C | 61 °C/ 38 °C | 67 °C/56 °C | 71 °C/49 °C |
| 4 °C | 52 °C/ 29 °C | 56 °C/45 °C | 59 °C/37 °C |
| 11 °C | 39 °C/16 °C | 38 °C/27 °C | 41 °C/19 °C |
| 15 °C | 30 °C/7 °C | 29 °C/18 °C | 30 °C/8 °C |
| 18 °C | 24 °C/1 °C | 25 °C/14 °C | 23 °C/1 °C |
| 16 °C | 28 °C/5 °C | 28 °C/17 °C | 28 °C/6 °C |
| 12 °C | 37 °C/14 °C | 35 °C/24 °C | 38 °C/16 °C |
| 6 °C | 48 °C/25 °C | 50 °C/39 °C | 54 °C/32 °C |
| 1 °C | 57 °C/34 °C | 63 °C/52 °C | 66 °C/44 °C |
| -2 °C | 63 °C/40 °C | 69 °C/58 °C | 73 °C/51 °C |

Taulukko 17 Lämmitysverkkojen erilaiset lämpötilavaatimukset vyöhykkeen I ulkolämpötilojen mukaan ja tarvittava lämpö 180 kW kompressorin hukkalämmön jälkeen [24]

| Ulkolämpötila | Lämmitysverkko 400 - Ennen komp./Jälkeen komp. | Lämmitysverkko 450 - Ennen komp./Jälkeen komp. | IV Lämmitysverkko 470 - Ennen komp./Jälkeen komp. |
|---------------|--|--|---|
| -3 °C | 64 °C/32,6 °C | 71 °C/56 °C | 75 °C/45 °C |
| -5 °C | 68 °C/36,6 °C | 74 °C/59 °C | 78 °C/48 °C |
| -1 °C | 61 °C/ 29,6 °C | 67 °C/52 °C | 71 °C/41 °C |
| 4 °C | 52 °C/ 20,6 °C | 56 °C/41 °C | 59 °C/29 °C |
| 11 °C | 39 °C/7,6 °C | 38 °C/23 °C | 41 °C/11 °C |
| 15 °C | 30 °C/0 °C | 29 °C/14 °C | 30 °C/0 °C |
| 18 °C | 24 °C/0 °C | 25 °C/10 °C | 23 °C/0 °C |
| 16 °C | 28 °C/0 °C | 28 °C/13 °C | 28 °C/0 °C |
| 12 °C | 37 °C/5,6 °C | 35 °C/20 °C | 38 °C/8 °C |
| 6 °C | 48 °C/16,6 °C | 50 °C/35 °C | 54 °C/24 °C |
| 1 °C | 57 °C/2,6 °C | 63 °C/48 °C | 66 °C/36 °C |
| -2 °C | 63 °C/31,6 °C | 69 °C/54 °C | 73 °C/43 °C |

Taulukko 18 Kompressorien laskennassa käytetyt arvot

| Lämmitysverkko 400/450/470 | 132 kW kompressori | 180 kW kompressori |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Virtaama | 0,96 / 2 / 1 l/s | 0,96 / 2 / 1 l/s |
| Lämmönnosto | 23 / 11 / 22 °C | 31,4 / 15 / 30 °C |
| Käyttöaste | 168 h/vko | 168 h/vko |
| Talteenoton hyötysuhde | 70 % | 70 % |
| Energiansäästö | 92,4 kW | 126 kW |

Laskennallisesti kyse olisi 132 kW kompressorin kohdalla vuotuisasti noin 810 MWh/a tai 22689 €/a säästöistä. Toisaalta 180 kW kompressorin kohdalla 1105 MWh/a tai 30939 €/a säästöistä. Säästöt muodostuvat pienentyneistä lämmityskustannuksista pinnoitustehtaalla, jos lämmityksen hintana kaukolämmöntuotannossa on 28 €/MWh.

6.5 Investointien kannattavuuslaskenta

Investointien kannattavuutta varten on tärkeää laskea investointien takaisinmaksuaika. Tällöin on mahdollista selvittää, kuinka kannattavaa jonkin investoinnin toteuttaminen todellisuudessa on sen avulla muodostuviin säästöihin nähden. Mitä suuremmat säästöt ja pienemmät investointikulut ovat, sitä lyhyempi takaisinmaksuaika. Kannattavuuslaskennan tarkastelukohde on pinnoitustehtaan ilmanvaihdon lämmönvaihtimien saneeraus. Energiainvestointien kannattavuuslaskentaa varten täytyy tuntea mahdollinen vuotuinen energiansäästöpotentiaali, joka energiainvestoinnilla voidaan saavuttaa sekä kulutetun energian hinta-arvio. Näin voidaan laskea, että kuinka paljon investoinnilla voidaan teoriassa säästää rahaa vuodessa.

Ensimmäiseksi tarkastellaan toteutettavan investoinnin suoraa takaisinmaksuaikaa. Se lasketaan yhtälön 6.14 mukaisella tavalla jakamalla investointien summa vuotuisilla säästöillä. Suoraa takaisinmaksuaikaa laskiessa on syytä huomata, että siinä ei oteta huomioon mahdollista energianhinnan- tai rahan arvon muutosta. Siinä ei myöskään tarkastella takaisinmaksuajan jälkeen muodostuvia tuottoja vaan ainoastaan aikaa, kuinka kauan syntyvien säästöjen nykyarvolla kestääkään maksaa investoinnit takaisin. Siksi pelkästään suora takaisinmaksuaika ei riitä investointien kannattavuuden tarkastelussa. Suoraa takaisinmaksuaikaa voidaan käyttää esimerkiksi investointien rahoitusvaikutuksien tarkastelussa. [28]

$$a_{\text{suora takaisinmaksuaika}} = \frac{I}{q} \quad (6.14)$$

I investointien hankintameno [€]

q investointien myötä saavutettavat vuotuiset energiansäästöt [MWh/a]

Investointien kannattavuutta tarkasteltaessa voidaan käyttää nykyarvomenetelmää eli diskonttausmenetelmää. Siinä investointien myötä syntyvät säästöt tai tuotot sekä kulut diskontataan käyttäen nykyhetkeen sopivaa korkokantaa. Diskonttaus tarkoittaa tulevan rahavirran muuntamista nykyarvoon. Rahan arvon oletetaan olevan tulevaisuudessa nykyistä pienempi. Diskonttaustekijä lasketaan yhtälön 6.15 mukaisella tavalla. [29] Yleensä korkokannaksi valitaan 3–6 %, kun tarkastellaan energiainvestointien kannattavuutta. Todellisuudessa se kuitenkin vaihtelee tapauksen mukaan. [28]

$$DF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (6.15)$$

i käytetty korkokanta [%]

n tarkasteluvuosi [a]

Diskonttaustekijän avulla voidaan määritellä, kuinka paljon säästöjen nettoarvo on kunkin tarkasteluvuoden aikana. Vähentämällä jokaisella tarkasteluvuodella investointien määrästä diskontattu säästö, voidaan laskea, että kuinka pitkä takaisinmaksuaika investoinnilla on huomioidessa rahanarvon muutos tarkastelujakson aikana. Lisäksi korollinen tarkka takaisinmaksuaika voidaan määritellä yhtälön 6.16 mukaisesti. [29]

$$a_{\text{korollinen takaisinmaksuaika}} = \frac{-\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{I}{q}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)} \quad (6.16)$$

6.5.1 Tarjous TPI Control

Pinnoitustehtaan ilmanvaihdon saneeraukseen liittyvä tarjous on annettu TPI Control nimisen yrityksen toimesta, jonka toimenkuvaan kuuluu LVIA-tekniisten kiinteistöpalveluiden suunnittelu, seuranta ja niihin liittyvien toimenpiteiden toteutus. TPI Control tekee kiinteistöille kokonaisvaltaisia olosuhteiden seuranta-, kunnostus- ja kontrollipalveluita. [30] Tarjous koskee koko pinnoitustehtaalla olevaa ilmanvaihtoa kokonaisuutena. Tarjoukseen liittyvät osaset sekä niiden suunniteltu toteutusajankohta näkyvät taulukossa 19, jossa punaiset tekstit ovat hinta-arvioita, vihreät virallisia tarjouksia. Sininen teksti tarkoittaa toteutettuja toimia. Kokoanisuuudessaan kyseessä on noin 989 000 € arvoinen investointi. Toisaalta tässä raportissa tarkastellaan ainoastaan lämmönvaihtimiin liittyvien osioiden saneerausta, joiden yhteen lasketuksi hinnaksi taulukosta 19 saadaan 690 000 €, johon sisältyy TK401 poistopuolen uusinta ja LTO tulopatterin uusinta, TK471-451 poistopuolen uusinta ja LTO tulopatterien uusinta sekä LTO-verkoston kunnostukset. Suunnittelua ei oteta huomioon, vaikka sen vaikutus on kaikista hinta-arvioista vähäisin.

Taulukko 19 TPI Control tarjous eriteltynä [31]

| Toimenkuva | 1/2 2021 | 2/2 2021 | 2022 | 2023 | 2025+ |
|--|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| Sisäilman laadun parannus tehdashallissa | | 50 000 € | | | |
| TK401 Raitisilman suodatus ennen LTO-patteria tulopuolella (Ei uutta patteria) | | | 75 000 € | | |
| TK401 Poistopuolen uusinta ja LTO tulopatterin uusinta | | | 360 000 € | | |
| TK471-451 Raitisilman suodatus ennen LTO-patteria tulopuolella (Ei uutta LTO patteria) | | | | 75 000 € | |
| TK471-451 Poistopuolen uusinta (pl. 1 kpl) ja LTO tulopatterien uusinta | | | | 300 000 € | |
| Erillispoitopuhaltimien kunnostus | | | 3 000 € | | |
| IV-kanavien eristys kuumien laitteistojen kohdalla | | | | | 15 000 € |
| Suunnittelu | | | 10 000 € | | |
| RAU-mittausten lisäykset/muutokset | 10 000 € | | 10 000 € | 25 000 € | |
| LTO-verkoston kunnostukset | | | | 30 000 € | |
| Lämmitysjärjestelmien kunnostukset | | 10 000 € | | | 16 000 € |

Tarjouksen perusteella voidaan laskea investointien kannattavuus hyödyntämällä aikaisemmassa ilmanvaihdon lämmöntalteenoton osioissa laskettuja vuotuisia säästöjä kussakin pinnoitustehtaan tilassa yhteensä. Ensimmäiseksi yhtälöllä 6.17 lasketaan koroton tai suora takaisinmaksuaika jakamalla investointien suuruus saatavilla vuotuisilla säästöillä.

$$a_{suora\ takaisinmaksuaika} = \frac{690\,000\ \text{€}}{70\,596\ \text{€} \cdot 28\ \text{€/MWh}} = 9,8\ \text{vuotta} \quad (6.17)$$

Korollinen maksuaika voidaan laskea ensin määrittelemällä sopiva diskonttaustekijä kullekin tarkasteluvuodelle yhtälöllä 6.18, jota varten valitaan korkokanta, joka on tällä kertaa 4,5 % eli tyypillisen korkokannan puoliväli. Kertomalla vuotuinen säästö kunkin tarkasteluvuoden diskonttaustekijällä, saadaan selville säästöjen nykyarvo, joka tulee vähentää investointikustannuksista vuosittain. Taulukosta 20 voidaan nähdä tulokset 15 tarkasteluvuodelle, jossa nettokassavirta kääntyy positiiviseksi tarkasteluvuotena 13.

$$DF_{1.vuosi} = \frac{1}{(1+0,045)^1} = 0,96 \quad (6.18)$$

Taulukko 20 Korollinen takaisinmaksu

| Vuosi [a] | Nettosäästöt | Investointikustannukset | Diskonttaustekijä (4,5 %) | Säästöjen nykyarvo | Nettokassavirta |
|-----------|--------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------|
| 0 | | 690 000 € | | | -690000 |
| 1 | 70596 € | | 0,96 | 67556 | -622444 |
| 2 | 70596 € | | 0,92 | 64647 | -557796 |
| 3 | 70596 € | | 0,88 | 61863 | -495933 |
| 4 | 70596 € | | 0,84 | 59199 | -436734 |
| 5 | 70596 € | | 0,80 | 56650 | -380084 |
| 6 | 70596 € | | 0,77 | 54211 | -325873 |
| 7 | 70596 € | | 0,73 | 51876 | -273997 |
| 8 | 70596 € | | 0,70 | 49642 | -224354 |
| 9 | 70596 € | | 0,67 | 47505 | -176850 |
| 19 | 70596 € | | 0,64 | 45459 | -131391 |
| 11 | 70596 € | | 0,62 | 43501 | -87889 |
| 12 | 70596 € | | 0,59 | 41628 | -46261 |
| 13 | 70596 € | | 0,56 | 39836 | -6426 |
| 14 | 70596 € | | 0,54 | 38120 | 31694 |
| 15 | 70596 € | | 0,52 | 36479 | 68173 |

Taulukon 20 arvoilla voidaan selvittää tarkka korollinen takaisinmaksuaika. Tämä voidaan laskea sijoittamalla investointikustannukset, niiden tuoma vuotuinen säästö sekä korkokanta yhtälöön 6.19. Takaisinmaksuaikaa tarkasteltaessa on huomioitavaa, että investointien

tuomat säästöt laskettiin 60 % rekuperaatioasteella. Todellisuudessa se voi olla myös suurempi, jolloin takaisinmaksuaika on laskettua lyhyempi.

$$a_{korollinen\ takaisinmaksuaika} = \frac{-1 \left(\frac{1}{0,045} - \frac{690\,000\ \text{€}}{70\,596\ \text{€}} \right) - \ln(0,045)}{\ln(1+0,045)} = 13,17\ \text{vuotta} \quad (6.19)$$

6.6 Investointitukien hakeminen

Energiatuen hakeminen investointia varten voidaan toteuttaa silloin, kun hanketta ei ole vielä virallisesti käynnistetty. Investointikustannuksien tulee olla vähintään 10 000 € ja sen tulee liittyä uusiutuvaan energiaan tai mahdollisiin investointien tuomiin energiasäästöihin. Investointitukia hakiessa on syytä muistaa, että yrityksellä tulee olla toteutettavia investointeja varten oma rahoitus kunnossa eli yrityksen tulee pystyä kustantamaan koko investointihanke itse ennen mahdollisten energiatukien myöntämistä. Investointien suuruudelle ei ole määriteltyä ylärajaa. [32]

Energiansäästöjä tuovilla tai energiatehokkuutta lisäävillä investoinneilla on vuonna 2022 tavanomaisella teknologialla toteutettaessa saatavissa 20 % energiatukea, jos yritys on liittynyt energiatehokkuussopimukseen. Yritys, joka on mukana energiatehokkuussopimuksissa sekä käyttää sopimuksien lisäksi ESCO-palvelua voi saada 25 % energiatukea. Toisaalta tapauksissa, joissa yritys ei ole liittynyt energiatehokkuussopimukseen, mutta käyttää ESCO-palveluja, voi yritys tällöin saada 15 % energiatuen. ESCO-palvelussa ulkopuolinen asiantuntija hoitaa asiakasyrityksen investoinnit ja toimenpiteet energiatehokkuuden parantamiseksi. Edellä mainitut energiatukiprosentit pätevät myös silloin, jos energiansäästöjä tuova tai energiatehokkuutta lisäävä investoinnit liittyvät lämpöpumppujen hyödyntämiseen esimerkiksi hukkalämmön osalta. Energiatukien saamiseksi toteutettava projekti voidaan aloittaa aikaisintaan vasta sinä päivänä, kun rahoituspäätös on selvillä. [32]

Kuten aikaisemmin mainittiin, Koskisen Oy on vuonna 2016 liittynyt vuonna 2017 alkaneelle energiatehokkuussopimusjärjestelmän sopimuskaudelle. Tämä tarkoittaa sitä, että yritys on sitoutunut noudattamaan toimenpideohjelmää, joka kuuluu Elinkeinoelämän energiatehokkuussopimukseen. Sopimus on voimassa 31.12.2025 asti. [26] Tämä tarkoittaa sitä, että yrityksellä on mahdollisuus hakea energiainvestoinneille yllä mainittua tukea. Eri-tyisesti ilmanvaihdon saneerauksen yhteydessä, joka tehostaa energiasäästöjä, voidaan

arvioida saatavaksi noin 20 % energiatukea toteutettaville investoinneille. Näin ollen taulukossa 21 voidaan nähdä kunkin hinta-arvion suora- sekä korollinen takaisinmaksuaika huomioiden 20 % energiatuki tarvittaville investoinneille.

Taulukko 21 Investointien takaisinmaksuaika 0 % tuella sekä 20 % energiatuella

| Takaisinmaksuaika, tuki 0 % | | | | |
|-------------------------------------|-------------|------------------|-------------------------|--|
| Investointikohde | Hinta-arvio | Vuotuinen säästö | Suora takaisinmaksuaika | Korollinen takaisinmaksuaika (i=4,5 %) |
| TPI-Control, vain LTO | 690 000 € | 70 596 € | 9,8 a | 13,17 a |
| Takaisinmaksuaika, tuki 20 % | | | | |
| TPI-Control, vain LTO | 552 000 € | 70 596 € | 7,2 a | 9,85 a |

6.7 Investointien herkkyytarkastelu

Tarkasteltaessa investointien kannattavuutta, on myös hyvä varmistaa säästöjen potentiaalinen muutos ja sitä mukaan investointien takaisinmaksuaikojen vaihtelu. Tässä tapauksessa tarkastellaan, kuinka pitkät investointien takaisinmaksuajat ovat, jos energian tuotantoon käytettävän raaka-aineen hinta vaihtelee enintään 10 % verran niin arvonkasvun kuin myös arvonaleneman muodossa. Lisäksi tutkitaan mahdollisten investointikulujen muutosta ja niiden vaikutusta takaisinmaksuaikoihin. Taulukosta 22 voidaan nähdä laskennassa käytetyt energian hinta-arvioiden muutokset. Alkuperäinen energian hinta oletetaan olevan 28 €/MWh.

Taulukko 22 Energian hinta-arvion herkkyytarkastelu

| Nousee | Energian hinta | Laskee | Energian hinta |
|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| 2 % | 28,6 € | -2 % | 27,4 € |
| 5 % | 29,4 € | -5 % | 26,6 € |
| 10 % | 30,8 € | -10 % | 25,2 € |

Uudet takaisinmaksuajat näkyvät taulukosta 23. Siinä on huomioitu muuttuneet takaisinmaksuajat ilman investointitukia sekä 20 % investointituella. Kuten tuloksia tarkasteltaessa voidaan huomata, energian hinnan kasvaessa uusien energiaa säästävien energiainvestointien toteuttamisen kannattavuus kasvaa merkittävästi pienentyneiden takaisinmaksuaikojen muodossa. Lisäksi on hyvä huomioida, että investointien takaisinmaksun jälkeen energian

hinnan kallistuminen lisää investointien kannattavuutta myös jälkeempään kasvaneina vuotuisina säästöinä.

Taulukko 23 Suora- ja korollinen takaisinmaksuaika energian hinta-arvion muuttuessa

| Energian hinta-arvion muutos (28 €/MWh) ja sen mukainen takaisinmaksuaika (Suora/Korollinen i=4,5 %) | | | | | | |
|--|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| Kohde | 25,2 € | 26,6 € | 27,4 € | 28,6 € | 29,4 € | 30,8 € |
| TPI-Control, vain LTO | 10,9 a/15,24 a | 10,3 a/14,12 a | 10 a/13,56 a | 9,6 a/12,79 a | 9,3 a/12,33 a | 8,9 a/11,6 a |
| TPI-Control, vain LTO, 20 % tuki | 8,7 a/11,27 a | 8,2 a/10,51 a | 8 a/10,12 a | 7,7 a/9,59 a | 7,4 a/9,27 a | 7,1 a/8,76 a |

Energian hinnan muutos myös vaikuttaa säästöjen nykyarvoon. Se voidaan laskea kullekin vuodelle kertomalla nettosäästö määritellyllä diskonttaustekijällä yhtälön 6.20 mukaisesti, jossa lasketaan herkkyytarkastelussa lasketun pienimmän energian hinnan mukaan säästöjen nykyarvo ensimmäiselle positiiviselle vuodelle. [29] Käytännössä mitä suurempi hinta energialla on, sitä suurempi on myös muodostuneiden säästöjen nykyarvo. Käytetty korkokanta vaikuttaa toisaalta myös diskonttaustekijän suuruuteen. Molemmat vaikuttavat myös näiltä osin takaisinmaksuajan suuruuteen, mutta tässä työssä käytävissä laskelmissa tarkastellaan korkokantaa vakiona. Kunkin energian hinnan tuoman säästön nykyarvo ensimmäisellä positiivisella vuodella voidaan nähdä taulukosta 24.

$$\text{Säästöjen nykyarvo} = 63\,537 \text{ €} * 0,49 = 31\,417 \text{ €} \quad (6.20)$$

Taulukko 24 Säästöjen nykyarvo kullakin energian hinta-arviolla ensimmäisenä positiivisena vuotena

| Energian hinta-arvion mukainen säästöjen nettonykyarvo ensimmäisenä positiivisena vuotena (Suora/Korollinen i=4,5 %) | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Kohde | 25,2 € | 26,6 € | 27,4 € | 28 € | 28,6 € | 29,4 € | 30,8 € |
| TPI-Control, vain LTO | 31 417 € | 34 655 € | 37 303 € | 38 120 € | 40 689 € | 41 827 € | 45 791 € |
| TPI-Control, vain LTO, 20 % tuki | 37 465 € | 41 326 € | 42 569 € | 45 459 € | 46 433 € | 47 732 € | 52 255 € |

Energian hinnan muutosten lisäksi on mahdollista, että investointien suuruus tulee vaihtelevaan tilanteesta riippuen. Esimerkiksi projektin edetessä voi tulla yllättäviä kuluja, jotka lopulta kasvattavat tarvittavia investointeja. Erityisesti tämä pätee silloin, kun osa annetuissa investointien suuruuksista on pelkkiä hinta-arvioita, kuten tässä tapauksessa. Osa annetuista investointikuluista oli virallisia tarjouksia ja osa pelkästään hinta-arvioita. Näin ollen tarkastellaan, kuinka paljon takaisinmaksuaika muuttuu, jos investointien suuruus vaihtelee samoin prosenttiyksiköin, kuin energian hinnan muutoksia tarkasteltaessa. Taulukosta 25 voidaan nähdä, miten LTO saneeraukseen liittyvät investointikustannukset muuttuvat.

Taulukko 25 Investointikustannuksien herkkyytarkastelu

| Nousee | Investointikustannukset | Laskee | Investointikustannukset |
|--------|-------------------------|--------|-------------------------|
| 2 % | 703 800 € | -2 % | 676 200 € |
| 5 % | 724 500 € | -5 % | 655 500 € |
| 10 % | 759 000 € | -10 % | 621 000 € |

Taulukossa 26 voidaan nähdä kunkin investointikustannuksen vaikutus takaisinmaksuajkaan. Tarkasteltavana on investointikustannukset ilman energiatukea sekä 20 % energiatuella. Tässä tapauksessa energiatuki on huomioitu vasta investointimuutoksen jälkeen. Kuten voidaan huomata, muutokset takaisinmaksuajassa ovat hyvin merkittäviä.

Taulukko 26 Suora- ja korollinen takaisinmaksuaika investointikustannuksien muuttuessa

| Investointikustannuksien muutos ja sen mukainen takaisinmaksuaika (Suora/Korollinen $i=4,5\%$) | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|----------------|
| Kohde | 621 000 € | 655 500 € | 676 200 € | 703 800 € | 724 500 € | 759 000 € |
| TPI-Control, vain LTO | 8,8 a/11,45 a | 9,3 a/12,29 a | 9,6 a/12,81 a | 10 a/13,53 a | 10,3 a/14,08 a | 10,8 a/15,02 a |
| Kohde | 496 800 € | 524 400 € | 540 960 € | 563 040 € | 579 600 € | 607 200 € |
| TPI-Control, vain LTO, 20 % tuki | 7 a/8,65 a | 7,4 a/9,24 a | 7,7 a/9,61 a | 8 a/10,10 a | 8,2 a/10,48 a | 8,6 a/11,12 a |

Herkkyytarkasteluiden tuloksia tarkasteltaessa on syytä huomioida, että energian hinnan sekä investointikustannuksien muutokset voivat tapahtua samanaikaisesti. Näin ollen on tärkeää vertailla molemmissa tapahtuvia muutoksia, jotka lopulta tulevat vaikuttamaan lopulliseen takaisinmaksuajkaan. Erityisesti energian hinnan muutos on tärkeä tarkasteltaessa

investointien tuomien säästöjen nykyarvoa ja näin ollen toteutettavien investointien kannattavuutta.

6.8 Pohdintaa

Työssä käytetyt sisätilojen lämpötilat poistoilmanvaihdon osalta ovat vain graafisia arviointeja ja näin ollen ne eivät ole tarkkoja. Lämpötilat ovat todellisuudessa erilaisia jokaisena päivänä ja vaihtelevat tuotannosta riippuen merkittävästi. Erityisesti VAK 02 ja -18 tilojen poistoilmojen lämpötilat voivat olla jopa oletettua korkeampia puristimien tuottaman korkean lämmön takia, jota ei voida huomioida niin tarkasti lämpötila-anturien sijaintien ollessa hallin keskellä, jossa lämpötilat ovat tasaisemmat. Uunien tuottama lämpö kulkeutuu suoraan niiden yläpuolella olevista kärynpoistoista ulkoilmaan. Siksi on myös turvallista olettaa, että lämpöpotentiaali voi olla jopa suurempi pinnoitushallin poistoilmanvaihdossa ja näin ollen tulevat säästöt suurempia, joka toisaalta pienentää takaisinmaksuaikoja sekä parantaa investointien kannattavuutta.

Poistoilmanvaihdon lämmöntalteenottopatterit ovat nykyiseltään sijoitettuna hyvin hajautevasti pinnoitustehtaan katolla. Huollon kannalta voisi olla helpompaa asentaa ne ainakin ilmanvaihtoalueellisesti esimerkiksi saman katoksen alle, jossa niiden huoltaminen voisi onnistua keskitetysti. On myös syytä huomioida, että lasketut lämpöpotentiaalit koostuvat ilmanvaihtokokonaisuuksista eli niitä ei ole jaettu yksittäisille lämmönvaihtimille, joita kohteessa on asennettuna. Kussakin lämmönvaihtimessa sekä ilmanvaihdon poistoputkistossa tapahtuu painehäviöitä sekä lämpöhäviöitä, joita voisi vähentää keskittämällä lämmönvaihtimia esimerkiksi liittämällä poistoputkia toisiinsa ja kasvattamalla tarpeen tullen lämmönvaihtimen kokoa riittävän konduktanssin takaamiseksi. Pienentynein painehäviöin voidaan myös vähentää mahdollisuuksien mukaan puhaltimien tehoa, joka toisaalta pienentää sähkönkulutusta.

Investointikustannuksien osalta olisi myös järkevää kilpailuttaa tarjoajia, jotta voidaan nähdä, että olisiko takaisinmaksuaikoja mahdollista saada hiukan nykyistä tarjoustaan pienemmäksi. Lisäksi vaihtoehtoisia lämmönvaihtinratkaisuja voisi olla suotuisaa tarkastella nykyisten neulalämmönvaihtimien lisäksi. Esimerkiksi niin sanotut ripalämmönvaihtinpatterit voisivat olla hyviä vaihtoehtoja niiden helpomman puhdistuksen vuoksi. Ne kestävät todennäköisesti neulalämmönvaihtimia paremmin myös mekaanista rasitusta eikä niiden pinnalle välttämättä kerry niin helposti likaa johtuen tasaisemmista pinnanmuodoista. Toisaalta niiden lämmönsiirtoteho ei välttämättä ole aivan samalla tasolla, kuin

neulalämmönvaihtimissa, johtuen virtauksen vähentyneestä turbulentsisuudesta. Tätä asiaa olisi hyvä tutkia tarkemmin ja selvittää esimerkiksi mahdollisilta tarjoajilta.

Kompressorin lämmöntalteenottoa laskettaessa on syytä huomioida, että tulokset perustuvat karkeisiin arvioihin, jotka todellisuudessa tarvitsisivat tarkempia lähtöarvoja esimerkiksi lämmitysverkostojen virtauksista sekä kompressorien käyttöasteesta. Tuloksien avulla voidaan kuitenkin osoittaa, että kompressorien tuottamaa lämpöä voidaan hyödyntää kiinteistön lämmitysverkostoissa ja näin ollen jatkotutkimukset asiaan liittyen voisivat olla hyödyllisiä tulevaisuuden investointimahdollisuuksia tarkasteltaessa. Erityisesti kompressorien lämmöntalteenoton hyödyntäminen ilmanvaihdon lämmitysverkostossa poistoilman lämmöntalteenoton lisäksi voisi olla mielenkiintoinen tarkastelukohde. Toisaalta kyseessä on kaukaisin lämmityspiiri kompressorien sijainti huomioiden.

7 Johtopäätökset

Tarkasteltaessa pelkästään laskennoista saatuja tuloksia, voidaan huomata, että nykyisten tulo- ja poistopuolen lämmönvaihtimien saneeraus olisi selkeästi hyödyllinen toimenpide. Tällä tavoin ilmanvaihtoon kuluvasta tehdasalueella tuotetusta lämpöenergiasta voidaan korvata poistoilmalla otetulla lämmöllä noin kolmasosa. Toisaalta on tärkeää muistaa, että todellisuus poikkeaa aina teoreettisesta osuudesta, joten talteen saatava lämpö voi olla jopa enemmän, kuin laskettu tai vaihtoehtoisesti myös vähemmän. Asiaan vaikuttaa esimerkiksi meneillään olevat prosessit, jotka tuottavat reilusti pinnoitustehtaan sisätilaan lämpöä sekä lämmönvaihtimien koko, joka toisaalta vaikuttaa niiden konduktanssiin. On myös huomioitavaa, että esimerkiksi kesäkuukausina tuloilman lämmitys on todennäköisesti tarpeetonta, jolloin talteen saatava lämmitysenergia on todellisuudessa pienempi. Esimerkiksi tällöin ilmanvaihdon tehostamiseksi olisi hyödyllistä tehdä lämmönvaihtimille kiertomahdollisuus, jolloin myös lämmönvaihtimien likaantuminen pysähtyisi eikä niiden ylläpito synnytä tällöin kuluja lämpimimpinä kuukausina.

Lämmönvaihdon hyödyntämisen muodostamissa säästöissä ei ole huomioitu niiden ylläpitoon kuluvia kustannuksia, sillä niiden määrittelemine on vaikeaa ilman että tunnetaan likaantumisen toistuvuus ja näin ollen puhdistustarve. Niiden toimintaa tulisi seurata sopivin väliajoin, jolloin lämmönvaihtimen siivoustarve voitaisiin selvittää tarkasti ja näin voidaan välttyä liialliselta tai liian vähäiseltä ylläpidolta. Liian pitkittyneet puhdistusvälit vaikeuttavat merkittävästi lämmönvaihtimien puhdistamista, sillä lika ei irtoa niin helposti kovettuessa lämmönvaihtimen pinnalle. Puhdistamisen tarvetta olisi mahdollista vähentää suodattimien avulla, mutta niissä on myös omia ongelmia, kuten jatkuva tukkeutuminen riippuen suodatustehokkuudesta. Pinnoitustehtaan ilmanvaihdon likaisuus on tässä tapauksessa suurin ongelmakohta, joka vaikeuttaa lämmönvaihtimien toimintaa.

Kompressoreilta saatava lämpö on myös mahdollisesti kannattava investointitoimi. Tarkempia laskelmia varten niiden hyödyntämismahdollisuuksista pitäisi selvittää muun muassa niiden käyttöaste ja sähkömoottorinkäyntiteho. Kompressoreista talteen saatua lämpöä voisi hyödyntää esimerkiksi lämmitysverkostoiden tukena, jolloin Koskisen Oy:n tuottamaa kaukolämpöenergiaa kuluisi vähemmän ja näin ollen muodostuisi säästöjä vähentyneistä polttoainekustannuksista. Kompressorien laskelmissa käytettiin 100 % rekuperaatioastetta, joka on todellisuudessa pienempi. Toisaalta molempien kompressorien sähkömoottorin tehosta oletettiin saatavan otettua talteen 70 % tuotetusta lämmöstä, joka toisaalta voi olla myös

suurempi kompressoreista riippuen. Näin ollen 100 % rekuperaatioaste ei ole välttämättä niin ongelmallinen laskennan osalta.

Lopuksi voidaan todeta, että mitä energiaintensiivisempi toiminta on kyseessä, sitä suuremmalla todennäköisyydellä kohteesta voidaan löytää energiantehokkuutta parantavia tai säästöjä muodostavia investointikohteita. Investointien kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi hukkalämpökohteissa lämpöpotentiaali eli onko kyseessä matalaa- vai korkeaa lämpöä. Korkean lämmön hyödyntäminen on helpompaa kuin matalan lämmön, sillä korkeampi lämpö sopii helpommin useampiin käyttökohteisiin. Matalan lämmön korottaminen korkealämpöiseksi on toisaalta mahdollista esimerkiksi erilaisia lämpöpumpputekniikoita hyödyntämällä. Toisaalta lämpöpumput kuluttavat itsessään myös tietynmäärän energia lämmöntuottamiseksi, joka pienentää muodostuvia säästöjä.

Energiatehokkuuden investointeja tarkasteltaessa on myös hyvä huomioida energiatuen mahdollisuus, joka helpottaa investointipäätösten tekoa lyhentyneiden takaisinmaksuaikojen muodossa. Lyhyemmät takaisinmaksuajat myös mahdollistavat sen, että toteutettu energiantehokkuus investointi alkaa kohteesta riippuen tuottamaan rahaa esimerkiksi säästöjen muodossa nopeammin, jolloin säästöjen nykyarvo ei välttämättä alene merkittävästi. Joissakin tapauksissa ylijäämälämpöä voidaan myös myydä kaukolämpöverkkoon, jolloin säästöt tulevat myyntituloina.

Lähteet

- [1] Motiva, 2019. Esiselvitys – Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. [Viitattu 13.12.2021]. URL: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf, sivut 7-10, 16-17
- [2] YIT, 2010. Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä. [Viitattu 14.12.2021]. URL: <https://docplayer.fi/2968184-Tyo-ja-elinkeinoministerio.html>, sivut 7
- [3] VTT, 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. [Viitattu 14.12.2021]. URL: https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTT_2020.pdf, sivut 10-11
- [4] Motiva, 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. [Viitattu 13.12.2021]. URL: https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf, diat 1 ja 5
- [5] Tilastokeskus, 2020. Teollisuuden energiankäyttö 2020. [Viitattu 13.12.2021]. URL: https://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_fi.pdf, sivut 5
- [6] Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021. Energiatuki. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.12.2021]. URL: <https://tem.fi/energiatuki>
- [7] Hautala, M. & Peltonen, H. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa I, ISBN 978-952-5191-26-4, sivut 173, 321
- [8] MAOL taulukot, 2013. Nesteiden ja kaasujen ominaisuuksia, ISBN 978-951-1-26270-1, sivut 78
- [9] The Engineering ToolBox, 2022. Moist Air – Density vs. Water Content and Temperature. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.2.2022.]. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/density-air-d_680.html
- [10] Shah, R. & Sekulic. D, 2003. Fundamentals of Heat Exchanger Design, ISBN 0-471-32171-0, sivut 1-2, 12-23. 47-48, 863, 870-872, 890-893
- [11] Saari, J., 2010, Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto, Heat Exchanger Dimensioning. [Viitattu 3.1.2022]. URL: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4086/saari__heat_exchanger_dimensioning.pdf, sivut 12-14, 17-26, 31-32, 34, 38-39, 41-43

- [12] ASHRAE Handbook, 2020, HVAC Systems and Equipment (I-P Edition) – Heat Exchangers, ISBN 978-1-5231-3507-3, sivut 47.1-47.5
- [13] Retermia, 2015. Retermia News numero 1/2015. [Viitattu 25.1.2022]. URL: https://www.retermia.fi/wp-content/uploads/2016/03/RetermiaNews_1_2015_WEB.pdf, sivut 5-6
- [14] Swegon, 2022. Hyvä tietää lämmönsiirtimistä. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.1.2022]. URL: <https://www.swegon.com/fi/oppaat/tekniikat/erilaiset-lammonsiirintyytit/>
- [15] Motiva, 2018. Energiatehokas ilmanvaihto teollisuudessa. [Viitattu 12.2.2022]. URL: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/energiatehokas_ilmanvaihto_teollisuudessa.15370.shtml, diat 2, 5-6, 13-14
- [16] Mostafa M. Awad, 2011. Fouling of Heat Transfer Surfaces, Heat Transfer – Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. [Viitattu 14.12.2021]. URL: <http://www.intechopen.com/books/heat-transfer-theoretical-analysis-experimental-investigations-and-industrial-systems/fouling-of-heat-transfer-surfaces>, sivut 506-509, 514-515, 530-537
- [17] Motiva, 2016. Energiatehokas Lämmönsiirto. [Viitattu 13.12.2021]. URL: https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf, diat 1, 6, 18
- [18] ASHRAE Handbook, 2020, HVAC Systems and Equipment (I-P Edition), Air cleaners for particulate contaminants, ISBN 978-1-5231-3507-3, sivut 29.1
- [19] Muller-Steinhagen, H., Malayeri, M.R. & Watkinson, A.P, 2011. Heat Transfer Engineering – Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Strategies. DOI:10.1080/01457632.2010.503108, sivut 189-195
- [20] TPI Control, 2021. Olosuhdeselvitys – Järvelä, Koskisen Oy levyteollisuus pinnoitus-tehdas, Sisäinen materiaali.
- [21] Google Maps, 2022. Satelliittikuva Koskisen Oy tehdasalueelta, [Verkkosivu]. [Viitattu 14.1.2022]. URL: <https://www.google.com/maps>
- [22] Koskisen Oy, 2022. Kiinteistöautomaatio, sisäinen materiaali.
- [23] Retermia, 2022. Neulalämmönsiirtimet, [Verkkosivu]. [Viitattu 19.1.2022]. URL: <https://retermia.fi/fi/tuotteet/neulalammonsiirtimet/>

- [24] Ilmatieteen laitos, 2020. Energialaskennan testivuodet 2020 – Vyöhyke 1. [Verkkosivu.] [Viitattu 3.2.2022]. URL: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskenta-try2020>
- [25] Atlas Copco, 2011. Energy Recovery Stand Alone Kit Manual. [Verkkosivu]. [Viitattu 21.1.2022]. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1805847/Atlas-Copco-Er-S-1.html?page=30#manual>, sivu 21, 29-31
- [26] Koskisen Oy, 2021. Energia tehokkuus, Koskisen sisäinen materiaali
- [27] Ympäristöministeriö, 2003. Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. [Viitattu 10.2.2022]. URL: http://www.laskentapalvelut.fi/maaraykset/YM_opas_122.pdf, sivu 24
- [28] Motiva Oy, 2018. Toimenpiteen taloudellinen kannattavuus Laskentatyökalu – ohje työkalun käyttöön. [Viitattu X.2.2022]. URL: https://www.motiva.fi/files/14771/Toimenpiteen_taloudellinen_kannattavuus_laskurin_ohje_2018.pdf, sivut 6-8
- [29] Energy Economics for EnTeDi – Full digi, 2021. Energiatalouden johdantokurssi luento 2. – Investointilaskentamenetelmät. Diat 38-43, 50
- [30] TPI Control, 2022. Etusivu. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.2.2022]. URL: <https://www.tpi.fi/>
- [31] TPI Control, 201. Pinnoitustehdas, sisäilman laadun ja ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen. Sisäinen materiaali
- [32] Business Finland, 2022. Energiatuki. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.2.2022]. URL: <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki#:~:text=Voit%20hakea%20energiatukea%2C%20jos%20organisaationne,ovat%20v%C3%A4hint%C3%A4nC3%A4n%2010%20000%20euroa.>

Liitteet

Liite 1 Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain 2020 [3]

| Toimiala | Polttoaineet, TJ | Sähkö (netto), TJ | Lämpö (netto) TJ | Yhteensä, TJ |
|---|------------------|-------------------|------------------|--------------|
| 05 Kivihillen ja ruskohiilen kaivu | . | . | . | . |
| 06 Raakaöljyn ja maakaasun tuotanto | . | . | . | . |
| 07 Metallimalmien louhinta | 330 | 4 827 | 235 | 5 392 |
| 08□09 Muu kaivostoiminta ja louhinta sekä kaivostoimintaa palveleva toiminta | 976 | 708 | 7 | 1 691 |
| 10 Elintarvikkeiden valmistus | 3 346 | 6 378 | 5 233 | 14 957 |
| 11 Juomien valmistus | 247 | 581 | 890 | 1 718 |
| 12 Tupakkatuotteiden valmistus | . | . | . | . |
| 13 Tekstiilien valmistus | 149 | 271 | 176 | 597 |
| 14 Vaatteiden valmistus | 16 | 62 | 22 | 101 |
| 15 Nahan ja nahkatuotteiden valmistus | 10 | 43 | 12 | 65 |
| 16 Sahatavaran sekä puu- ja korkkituotteiden valmistus (pl. huonekalut); olki- ja punontatuotteiden valmistus | 8 789 | 5 026 | 8 172 | 21 987 |
| 17 Paperin, paperi- ja kartonkituotteiden valmistus | 224 554 | 32 732 | 12 535 | 269 821 |
| 18 Painaminen ja tallenteiden jäljentäminen | 53 | 881 | 286 | 1 220 |
| 19 Koksia ja jalostettujen öljytuotteiden valmistus | 31 896 | 4 498 | 5 950 | 42 344 |
| 20 Kemikaalien ja kemiallisten tuotteiden valmistus | 14 936 | 15 395 | 8 037 | 38 368 |
| 21 Lääkeaineiden ja lääkkeiden valmistus | 21 | 317 | 310 | 648 |
| 22 Kumi- ja muovituotteiden valmistus | 502 | 2 533 | 845 | 3 880 |
| 23 Muiden ei-metallisten mineraalituotteiden valmistus | 8 168 | 2 621 | 529 | 11 317 |
| 24 Metallien jalostus | 41 077 | 19 805 | 4 221 | 65 103 |
| 25 Metallituotteiden valmistus (pl. koneet ja laitteet) | 826 | 3 433 | 1 027 | 5 286 |
| 26 Tietokoneiden sekä elektronisten ja optisten tuotteiden valmistus | 26 | 1 019 | 313 | 1 357 |
| 27 Sähkölaitteiden valmistus | 65 | 1 194 | 555 | 1 814 |
| 28 Muiden koneiden ja laitteiden valmistus | 746 | 2 193 | 1 146 | 4 085 |
| 29 Moottoriajoneuvojen, perävaunujen ja puoliperävaunujen valmistus | 219 | 506 | 381 | 1 105 |
| 30 Muiden kulkuneuvojen valmistus | 261 | 554 | 419 | 1 233 |
| 31 Huonekalujen valmistus | 142 | 204 | 81 | 427 |
| 32 Muu valmistus | 32 | 225 | 145 | 402 |
| 33 Koneiden ja laitteiden korjaus, huolto ja asennus | 102 | 595 | 394 | 1 091 |
| Yhteensä | 337 490 | 106 603 | 51 918 | 496 011 |

Liite 2 Kylläisen vesihöyryn paine suhteessa ilman lämpötilaan [7]

| Lämpötila [°C] | Paine [kPa] | Lämpötila [°C] | Paine [kPa] |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| -30 | 0.037 | 9 | 1.15 |
| -25 | 0.063 | 10 | 1.23 |
| -20 | 0.103 | 11 | 1.31 |
| -15 | 0.165 | 12 | 1.4 |
| -10 | 0.287 | 13 | 1.5 |
| -9 | 0.31 | 14 | 1.6 |
| -8 | 0.335 | 15 | 1.7 |
| -7 | 0.362 | 16 | 1.82 |
| -6 | 0.391 | 17 | 1.94 |
| -5 | 0.422 | 18 | 2.06 |
| -4 | 0.455 | 19 | 2.2 |
| -3 | 0.49 | 20 | 2.34 |
| -2 | 0.527 | 21 | 2.49 |
| -1 | 0.568 | 22 | 2.64 |
| 0 | 0.611 | 23 | 2.81 |
| 1 | 0.657 | 24 | 2.98 |
| 2 | 0.706 | 25 | 3.17 |
| 3 | 0.758 | 26 | 3.36 |
| 4 | 0.813 | 27 | 3.56 |
| 5 | 0.872 | 28 | 3.78 |
| 6 | 0.935 | 29 | 4.01 |
| 7 | 1.0 | 30 | 4.24 |
| 8 | 1.07 | | |

Liite 3 Lämpöpotentialin laskentataulukko

| ILMANVAIHDON LASKENTATYÖKALU | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------------------|------|---|--------|-------|---------------------------------|---------------------------|------|---|
| Ilmanvaihto VAK 02 ja 18 | | | | | | | | | | |
| Käyntiaika/vko | 168 | h | | Rekuperaatiosaste | 60 | % | | | | |
| Toivottu sisälämpötila KA | 22 | °C | | Energian hinta | 28 | €/MWh | | | | |
| Kuukausikohtainen ulkolämpötila ja RH KA | | | RH % | Kuukausikohtainen esilämmitetyn ilman lämpötila | | | Lisälämmitysstarve | LTO osuus | | |
| Tammikuu | -3 | °C | 87 | Tammikuu | 4.8 | °C | 17.5 | °C | 30.8 | % |
| Helmikuu | -5 | °C | 84 | Helmikuu | 4.0 | °C | 18.3 | °C | 32.9 | % |
| Maaliskuu | -1 | °C | 85 | Maaliskuu | 6.5 | °C | 15.8 | °C | 32.2 | % |
| Huhtikuu | 4 | °C | 71 | Huhtikuu | 10.0 | °C | 12.3 | °C | 32.7 | % |
| Toukokuu | 11 | °C | 65 | Toukokuu | 15.4 | °C | 6.9 | °C | 38.9 | % |
| Kesäkuu | 15 | °C | 72 | Kesäkuu | 19.1 | °C | 3.3 | °C | 55.7 | % |
| Heinäkuu | 18 | °C | 68 | Heinäkuu | 21.4 | °C | 0.9 | °C | 79.0 | % |
| Elokuu | 16 | °C | 77 | Elokuu | 17.7 | °C | 4.6 | °C | 27.5 | % |
| Syyskuu | 12 | °C | 78 | Syyskuu | 15.8 | °C | 6.6 | °C | 36.3 | % |
| Lokakuu | 6 | °C | 89 | Lokakuu | 11.7 | °C | 10.7 | °C | 34.8 | % |
| Marraskuu | 1 | °C | 93 | Marraskuu | 8.2 | °C | 14.1 | °C | 33.8 | % |
| Joulukuu | -2 | °C | 87 | Joulukuu | 5.8 | °C | 16.5 | °C | 32.1 | % |
| Kuukausikohtainen sisälämpötila KA ja RH KA | | | RH % | Kuukausikohtainen jäteilman lämpötila | | | Tulo-/poistoilman hyötysuhde | | | |
| Tammikuu | 21 | °C | 22 | Tammikuu | 13.2 | °C | 33 | | | % |
| Helmikuu | 23 | °C | 17 | Helmikuu | 14.0 | °C | 32 | | | % |
| Maaliskuu | 22 | °C | 20 | Maaliskuu | 14.5 | °C | 33 | | | % |
| Huhtikuu | 22 | °C | 22 | Huhtikuu | 16.0 | °C | 33 | | | % |
| Toukokuu | 24 | °C | 23 | Toukokuu | 19.6 | °C | 34 | | | % |
| Kesäkuu | 27 | °C | 38 | Kesäkuu | 22.9 | °C | 34 | | | % |
| Heinäkuu | 28 | °C | 44 | Heinäkuu | 24.6 | °C | 34 | | | % |
| Elokuu | 21 | °C | 53 | Elokuu | 19.3 | °C | 35 | | | % |
| Syyskuu | 23 | °C | 37 | Syyskuu | 19.2 | °C | 34 | | | % |
| Lokakuu | 23 | °C | 36 | Lokakuu | 17.3 | °C | 33 | | | % |
| Marraskuu | 23 | °C | 28 | Marraskuu | 15.8 | °C | 33 | | | % |
| Joulukuu | 22 | °C | 16 | Joulukuu | 14.2 | °C | 33 | | | % |
| Tuloilmanvirtaus | 22 | m ³ /s | | Menot ja säästöt vuodelle | | | Konduktanssi laskenta | | | |
| poistoilmanvirtaus | 13 | m ³ /s | | Kokonaislämmitysstarve | 4018 | MWh/a | LTO-patterin kesk. lämpötilaero | 5.8 °C | | |
| Tuloilmanpaine KA | 100000 | Pa | | Kokoansihinta lämmölle | 112509 | €/a | LTO-patterin konduktanssi | 2.1 kW/Cm ³ /s | | |
| Poistoilmanpaine KA | 100000 | Pa | | LTO Lämpöteho | 1398 | MWh/a | LTO-keskilämpöteho | 159.4 kW | | |
| | | | | Säästöt vuodessa | 39149 | €/a | | | | |
| | | | | Jäljelle jäävä lämmitettävä | 2620 | MWh/a | | | | |
| | | | | Jäljelle jäävä maksettava | 73360 | €/a | | | | |
| | | | | Tuloilman vuosihyötysuhde | 35 | % | | | | |

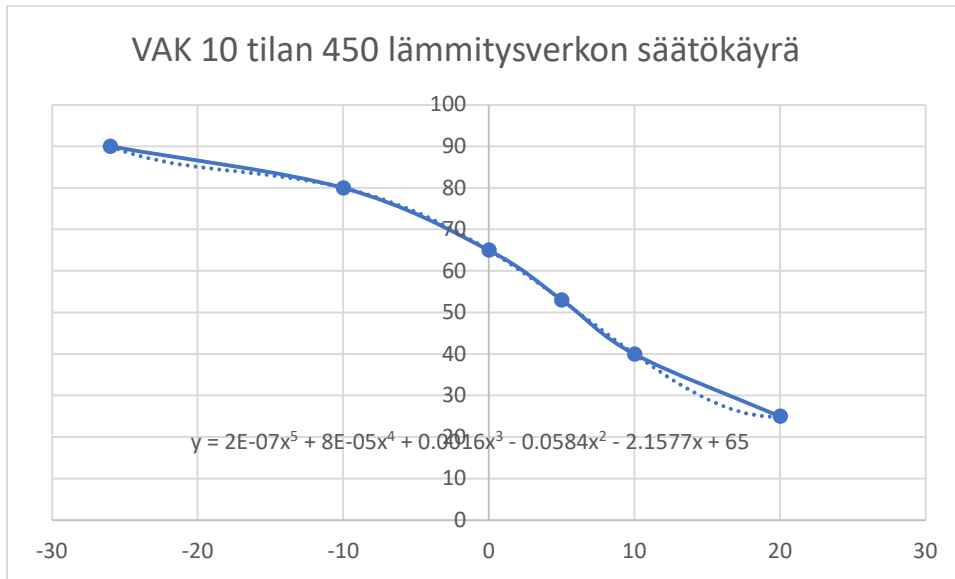
Liite 4 Pinnoitustehtaan VAK 02 ja -18 tilojen kuukausittainen lämpötila 2021 [22]



Liite 5 Pinnoitustehtaan VAK 10 tilan kuukausittainen lämpötila 2021 [22]



Liite 6 VAK 10 tilan 450 lämmitysverkoston säätökäyrä [22]



Liite 7 VAK 18 tilan 470 ilmanvaihdon lämmitysverkoston säätökäyrä [22]

