

Siiri Lampela

**KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPPUJEN
TEKNOEKONOMINEN TARKASTELU**
Sovellusesimerkki paperiteollisuudesta

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Siiri Lampela: Korkealämpötilalämpöpumppujen teknoekonominen tarkastelu –
Sovellusesimerkki paperiteollisuudesta
Techno-economic analysis of high temperature heat pumps – Application example from the
paper industry
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka, energia- ja prosessitekniikka
Huhtikuu 2020

Korkealämpötilalämpöpumppu on lämmöntalteenottolaite, joka nostaa hukkalämmön painetta ja lämpötilaa, jotta sitä voidaan hyödyntää teollisuuden prosesseissa. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää millä tekniikoilla ja mihin lämpötiloihin nykyisillä korkealämpötilalämpöpumppuilla päästään, sekä minkälaisia sovelluskohteita lämpöpumpuille on. Lisäksi tavoitteena on tarkastella korkealämpötilalämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta valitussa sovelluskohteessa.

Teollisuus on suurin lämpöenergiankuluttaja ja globaalisti lämmöntuotannossa käytetään eniten maakaasua ja kivihiihtä, jotka aiheuttavat merkittävistä CO₂ päästöistä. Jotta ilmastonmuutosta saataisiin hillittyä, tulisi teollisuuden energiatehokkuutta kasvattaa esimerkiksi ottamalla hukkalämmöt hyötykäyttöön korkealämpötilalämpöpumppujen avulla, jolloin primäärienergian tarve vähenee.

Yksi tapa jaotella korkealämpötilalämpöpumpputekniikoita on systeemin mukaan avoimeen ja suljettuun. Avoimessa systeemissä energia ja materia voivat kulkea systeemin rajojen yli ja näitä tekniikoita ovat MVR ja TVR. Suljetussa systeemissä vain energia voi kulkea rajojen yli ja tähän lukeutuvat tekniikat absorptiolämpöpumppu, lämmönvaihdin sekä CCC. Lämpöpumpun energiatehokkuus määritellään lämpökertoimen (COP) avulla.

Korkealämpötilalämpöpumppuja voidaan soveltaa kemian-, metalli-, paperi-, mineraali- ja ruokateollisuudessa, joista suurin hukkalämmön hyödyntämispotentiaali, 1,7 TWh/a, lämpötilavälillä 100 – 200 °C Suomessa on paperi- ja massateollisuudessa. Tyypillisiä prosesseja ovat kuivaus-, keitto-, valkaisu-, tislauksen- ja haihdutusprosessit. Lisäksi lämpöpumppuja voidaan hyödyntää pastöroinnissa, suolan poistossa, sterilisoinnissa sekä kuumavalssauksessa.

Työssä tarkasteltiin paperi- ja massateollisuuden kuivatusprosessia sovelluskohteena. Tekniikaksi valittiin MVR, johtuen kuivatusprosessista syntyvästä vesihöyrystä, jota voidaan käyttää lämpöpumpun kiertoaineena. Takaisinmaksuajaksi saatiin 3,3 vuotta ja annuiteettimenetelmällä kymmenessä vuodessa säästöjä kertyy 674 k€/MW. Takaisinmaksuajan tulisi olla vähintään alle 2-3 vuotta, jotta teollisuuden yritys tekisi investoinnin, joten tarkastelukohteen investoinnin takaisinmaksuaika on siis liian suuri. Takaisinmaksuaika on altis sähkönhinnan muutoksille, mikäli käytetty polttoaine on halpaa. Jos tarkastelukohteeseen olisi siis valittu kallis polttoaine, kuten maakaasu tai kivihiihi, olisi investointi ollut kannattava. Annuiteettimenetelmän mukaan investointi olisi kannattava riippumatta polttoaineen hinnasta.

On monia syitä miksi korkealämpötilalämpöpumppuja ei ole vielä niin yleisesti käytössä teollisuudessa, kuten investoinnin kallis hinta, tiedon puute, asiakkaiden epävarmuus sekä yrityksen vähäinen tieto prosessiensa energiankulutuksista. Tilannetta voidaan helpottaa koulutuksella, onnistuneiden asennusten tiedottamisella, massatuotannolla sekä poliittisella päätöksenteolla esimerkiksi verotuksen ja lainantakauksen muodoissa. On kuitenkin selkeitä merkkejä kiinnostuksesta panostaa enemmän energiatehokkuuteen ja ympäristöystävällisyyteen. Tulevaisuudessa tutkimusta voisi ohjata enemmän monimutkaisempiin energianhallintamenetelmiin, jotta fossiilisista polttoaineista voitaisiin luopua täysin.

Avainsanat: Lämpöpumppu, hukkalämpö, energiatehokkuus, paperiteollisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPPU.....	3
2.1 Toimintaperiaate	3
2.2 Luokittelu	6
2.3 Avoimet systeemit.....	7
2.4 Suljetut systeemit.....	9
2.5 Sovelluskohteet.....	13
3. KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPUN KANNATTAVUUS.....	17
3.1 Investoinnin kannattavuustarkastelu	17
3.2 Lämpöpumpun taloudellinen sijoittaminen prosessiin.....	18
4. AINEISTO JA MENETELMÄT	19
4.1 Tutkimuksen vaiheet ja tavoite	19
4.2 Tarkastelukohde	19
4.3 Lämpöpumpputyypin valinta.....	21
4.4 Taloudellisen laskennan alkuarvot ja toteutus	22
5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	24
5.1 Korkealämpötilalämpöpumpputekniikat ja -sovelluskohteet.....	24
5.2 Tarkastelukohde	26
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	29
LÄHTEET	31

1. JOHDANTO

Energiantuotantosektori aiheuttaa suurimmat hiilidioksidipäästöt maailmassa sekä paljon ympäristövaikutuksia koko tuotantoketjunsa aikana. Tarkasteltaessa pelkästään lämmöntuotantoa globaalilla tasolla, maakaasua ja hiiltä käytetään ylivoimaisesti eniten polttoaineina maailmassa, huolimatta siitä, että ne aiheuttavat merkittäviä määriä CO₂ päästöjä (IEA 2018). Teollisuus on suurin lämmönkuluttaja ja sen osuus kaikesta lämpöön kuluvasta energiasta maailmassa oli 46% vuonna 2011 (Eisentraut & Brown 2014). Jotta Pariisin ilmastopimuksen tavoitteet saavutettaisiin, kuten energiatehokkuuden kasvattaminen, tulisi teollisuuden hukkalämpöjä hyödyntää esimerkiksi korkealämpötilalämpöpumppujen avulla. Korkealämpötilalämpöpumput tarjoavat suuren hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin sekä osallistuvat merkittävästi hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen (Arpagaus et al. 2018). Pelkästään Euroopassa hyödyntämispotentiaalia on noin 75 TWh (Foslie 2017).

Teollisuudessa syntyvät hukkalämmöt ovat yleensä matalammassa paineessa ja lämpötilassa, kuin mitä kyseisessä prosessissa vaadittaisiin. Usein tämä hukkalämpö ohjataan ilmanpoistokanavan kautta ilmakehään tai tiivistetään vedeksi jäähdytystorneissa. (Foslie 2017) Suurin osa hukkalämmöstä, jonka lämpötila kuitenkin on alle 100 astetta, voidaan hyödyntää korkealämpötilalämpöpumppujen avulla (Wen-Quan et al. 2016). Korkealämpötilalämpöpumput soveltuvat erityisesti teollisuudenaloihin, joiden hukkalämmön lämpötila on matala ja jotka samalla tarvitsevat lämpöä, jonka lämpötila on jopa 150 astetta tai yli. Korkealämpötilalämpöpumppu voi jalostaa lämpöä tuolle lämpötila-alueelle. (Kosmadakis 2019)

Bengtsson et al. (2002) ovat tutkineet paperi- ja massateollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä effluentin esihaihdutuksen ja lämmön pumppaamisen avulla tuorehöyryn säästämiseksi. Tuloksien mukaan projektit ovat potentiaalisia sekä taloudellisesti mahdollisia takaisinmaksuajan lyhyiden vuoksi. Vastaavasti Bakhtiari et al. (2010) ovat tutkineet absorptiolämpöpumppuja paperi- ja massateollisuudessa. Heidän mukaansa ne soveltuvat moniin erilaisiin prosesseihin teknologian joustavuuden takia sekä ovat taloudellisesti kiinnostavia vaihtoehtoja energiatehokkuuden parantamisessa. Tässä tutkielmassa selvitetään paperi- ja massateollisuuden kuivatusprosessin hukkalämmön hyödyntämistä ja sen kannattavuutta korkealämpötilalämpöpumpulla.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on perehtyä korkealämpötilalämpöpumppeihin ja tarkastella niitä niin tekniikan kuin talouden näkökulmilta. Tutkimuskysymyksinä ovat seuraavat:

1. Millä tekniikalla ja mihin lämpötiloihin nykyisillä kaupallisilla lämpöpumpuilla voidaan päästä?
2. Mitkä ovat käyttökelpoisimmat sovelluskohteet korkealämpötilalämpöpumpuille?
3. Mikä on korkealämpötilalämpöpumpuinvestoinnin kannattavuus tarkastellussa kohteessa paperi- ja massateollisuudessa?

Toisessa luvussa perehdytään korkealämpötilalämpöpumpun toimintaperiaatteeseen niin yleisellä tasolla kuin tekniikkakohtaisesti sekä tutkitaan korkealämpötilalämpöpumpujen sovelluskohteita. Kolmannessa luvussa taustoitetaan investoinnin kannattavuuteen liittyvää teoriaa sekä laskumenetelmiä, minkä jälkeen neljännessä luvussa lasketaan paperi- ja massateollisuuden sovelluskohteen korkealämpötilalämpöpumpun investoinnin kannattavuutta. Viidennessä luvussa analysoidaan laskettuja tuloksia verraten niitä muihin tutkimuksiin, minkä jälkeen kuudennessa luvussa kootaan yhteen työn havainnot ja tehdään johtopäätökset.

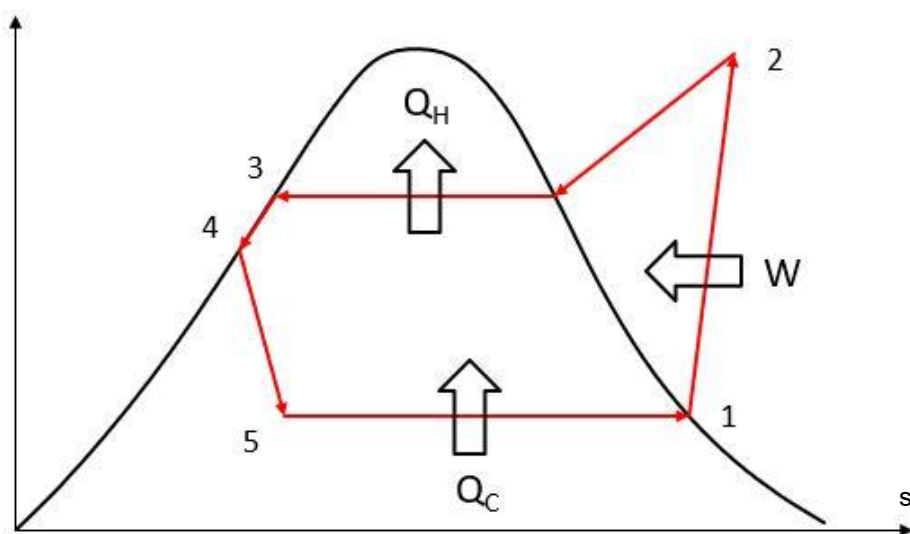
2. KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPPU

Korkealämpötilalämpöpumppu on lämmöntalteenottolaite, joka nostaa hukkalämmön lämpötilaa, jotta sitä voitaisiin hyödyntää uudelleen (HPT Magazine 2019). Lämpöpumpuja voidaan hyödyntää energiatehokkuuden parantamisessa sekä hiilidioksidipäästöjen kontrolloimisessa. Lämpöpumppumarkkinat kasvavat tasaiseen tahtiin. Useat maat keskittyvät kyseisillä markkinoilla kotitalouksissa hyödynnettäviin lämpöpumppeihin teollisuudessa käytettävien korkealämpötilalämpöpumpujen sijaan. Osittain tämä johtuu siitä, että yritykset priorisoivat mieluummin investointeja, jotka nostavat tuotantoa kuin investointeja, jotka parantavat energiatehokkuutta. (IEA 2014)

Korkealämpötilalämpöpumpuilla voidaan korvata esimerkiksi fossiilisiin polttoaineisiin perustuvia lämmittimiä tai sähkökattiloita ympäristöystävällisemmällä vaihtoehdolla, mikäli lämpöpumpun sähkö on tuotettu ympäristöystävällisesti. Lämpöpumppu voi tuottaa saman verran lämpöä neljännesosalla sähkökattilan käyttämästä sähköstä. Korkealämpötilalämpöpumput vähentävät siis primäärienergian tarvetta. (Viking Heat Engines 2020)

2.1 Toimintaperiaate

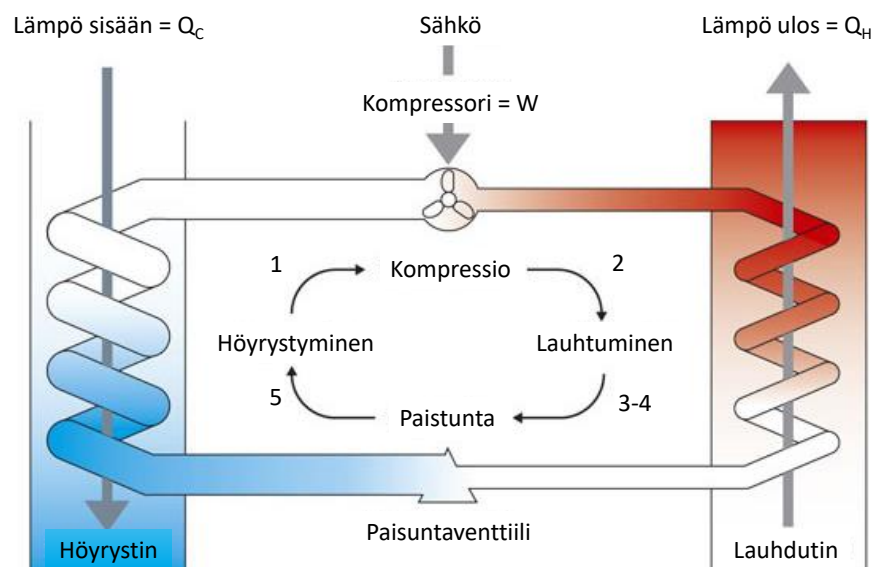
Lämpöpumpun toiminta perustuu käänteiseen Clausius-Rankine -prosessiin eli kylmähöyryprosessiin, jonka avulla voidaan siirtää lämpöä matalasta lämpötilasta korkeampaan. Kuvassa 1 on esitetty kyseinen todellinen prosessi T_s -tasossa.



Kuva 1: Käänteinen Clausius-Rankine sykli T_s -tasossa, muokattu lähteestä (Taehong 2014)

Yksinkertaisimmillaan lämpöpumpun järjestelmä koostuu lauhduttimesta, kuristusventtiilistä, höyrystimestä, kompressorista sekä niitä yhdistävistä putkista. Järjestelmässä kiertää väliaine.

Höyrystin, toinen lämmönvaihtimista, sijaitsee matalan lämpötilan alueella absorboiden lämpöä ympäristöstään. Tämä lämpö höyrystää nestemäisen väliaineen höyryksi, johon väliaineen matalasta kiehumispisteestä. Höyrystynyt väliaine kulkee seuraavaksi kompressorin läpi, jossa sen paine ja lämpötila nousevat. Tämän jälkeen korkeassa paineessa ja lämpötilassa oleva väliaine siirtyy lauhduttimeen, jossa väliaine lauhtuu takaisin nesteeksi. Samalla väliaine vapauttaa lämpöä. Lopuksi väliaine kulkee paisuntaventtiilin läpi, jossa se paisuu matalampaan paineeseen sekä lämpötilaan, ja sykli alkaa uudelleen. (IEA 1982)



Kuva 2: Yksinkertainen lämpöpumpukonfiguraatio, muokattu lähteestä (HPA 2020)

Kirjallisuudessa termien lämpöpumppu ja korkealämpötilalämpöpumppu eroavaisuuden määrittävä lämpötilataso ei ole yhtenäinen. Lämpötilataso määritetään lämpönielun eli lämpöpumpusta poistuvan lämpötilan mukaan. Tämä lämpötilatason raja vaihtelee kirjallisuudessa 80 asteesta jopa yli 150 asteeseen. (Arpagaus et al. 2018) Kirjallisuudessa esiintyy myös termiä erittäin korkealämpötilalämpöpumppu (Very high temperature heat pump). Wolfen et al. (2012) mukaan erittäin korkealämpötilalämpöpumppuihin luetaan lämpöpumput, jotka kykenevät poistamaan 140–160 asteista lämpöä. Tässä työssä korkealämpötilalämpöpumpuiksi määritellään lämpöpumput, joiden lämpötilataso on vähintään 100 astetta. Tutkielmassa ei huomioida termiä erittäin korkealämpötilalämpöpumppu.

Lämpöpumpun energiatehokkuus määritellään lämpökertoimen (Coefficient Of Performance, COP) arvon mukaan. COP määritellään seuraavalla kaavalla

$$COP = \frac{Q_H}{W}, \quad (1)$$

jossa Q_H tarkoittaa hyödyllistä energiaa ja W kompressoria ajavaa voimaa. (Berntsson & Flack 1997; Wolf et al. 2012)

Taulukkoon 1 on koottuna erilaisia väliaineita lämpöpumpuille. Taulukossa ODP (Ozone Depletion Potential) on otsonituhopotentiaali ja GWP-kerroin (Global Warming Potential) ilmaisee lämmityspotentiaalia. Turvallisuusryhmä kertoo väliaineen myrkyllisyydestä ja syttyvyydestä. (Wolf et al. 2012)

Taulukko 1: Erilaisia väliaineita ja niiden ominaisuuksia lämpöpumpuille, laadittu Wolf et al. (2012) mukaan

Tyyppi	Koostumus	ODP	GWP	T_{krit}	Turvallisuusryhmä
R410a	R32/R125	0	1730	72,6	A1
R134a	$C_2H_2F_4$	0	1300	101,0	A1
R245fa	$C_3H_3F_5$	0	950	154,0	B1
R600	C_4H_{10}	0	< 1	152,0	A3
R717	NH_3	0	0	133,0	B2
R744	CO_2	0	1	31,0	A1
SES36	R365mfc/PFPE	0	3126	177,6	tuntematon
DR-2	tuntematon	0	9,4	171,3	A1 (oletettu)
Opteon MZ* (Opteon 2020)	tuntematon*	0*	2*	tuntematon*	A1*

Taulukon kiertoaineista R410a on yleisin kiertoaine lämpöpumpuissa. Myös R134a:ta käytetään paljon. Kumpikaan kiertoaineista ei kuitenkaan sovellu korkealämpötilälämpöpumpujen kiertoaineeksi, koska niillä on matalat kriittiset lämpötilat. (Wolf et al. 2012)

R600 soveltuu moniin teollisiin prosesseihin korkean kriittisen lämpötilan myötä, mutta se on erittäin helposti syttyvä eikä sitä suositella käytettävän suuria määriä. Tämä rajoittaa kiertoaineen käyttöä isoissa prosesseissa. R717 on helposti syttyvä sekä myrkyllinen kiertoaine. Vaikka R717:n kriittinen lämpötila on 133 °C, ei se sovellu korkealämpötilälämpöpumpuihin kiertoaineeksi, koska R717 operoi korkeassa paineessa. Tämä asettaa kovia teknisiä vaatimuksia kompressorille. Johtuen R744:n matalasta kriittisestä lämpötilasta ei lämmönlähteen lämpötila voi ylittää 30 °C, minkä takia se ei sovellu korkealämpötilälämpöpumpuihin. (Wolf et al. 2012)

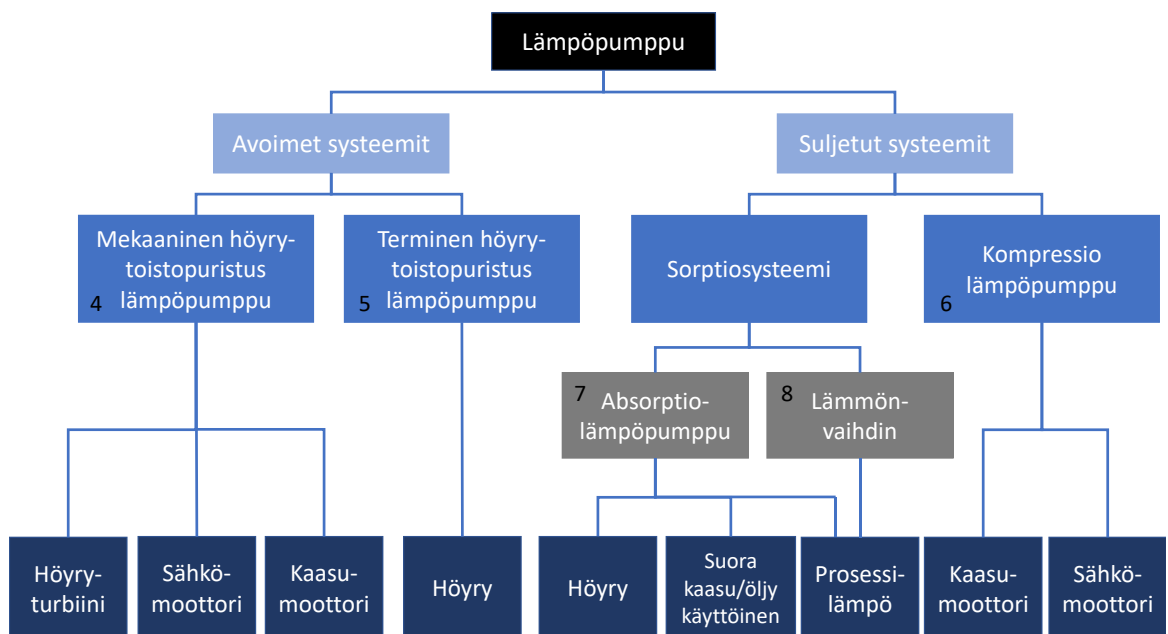
Yhdet uusimmista kiertoaineista, SES36 ja DR-2, vaikuttavat lupaavilta kiertoaineilta korkealämpötilälämpöpumpuissa. Molemmilla on korkea kriittinen lämpötila eikä ollenkaan

otsonituhopotentialia. DR-2 voi hyödyntää hukkalämpöä vain, jos se on 40 astetta tai korkeampaa. Lisäksi se ei ole myrkyllinen eikä helposti syttyvä. (Wolf et al. 2012)

Opteon MZ -kiertoaine on vakaa 225 °C:seen saakka ja tuottaa jopa yli 160 °C:n poistolämpötiloja. Kiertoaine on myös ympäristöystävällinen sekä turvallinen. Opteon MZ on uuden sukupolven HFO:hon pohjautuva kiertoaine, joka soveltuu hyvin korkealämpötilalämpöpumppeihin. (Opteon 2020)

2.2 Luokittelu

Korkealämpötilalämpöpumpputekniikoita voidaan luokitella systeemin mukaan termodynaamisesti avoimeen tai suljettuun sykliin (Nellisen & Wolf, 2015). Kuvassa 3 on esiteltyä luokittelu systeemin mukaan.



Kuva 3: Lämpöpumppujen luokittelua systeemin mukaan, laadittu lähteestä (Nellisen & Wolf 2015). Systeemin jälkeen lämpöpumput jaotellaan tekniikan mukaan, minkä laatikoissa olevat numerot viittaavat kyseisen tekniikan prosessikaavion kuvanumeroon.

Sorptiosysteemi on poikkeuksellinen, koska sen syklillä on kaksi mahdollista konfiguraatiota: lämpöpumppu ja lämmönvaihdin. Konfiguraatiot eroavat toisistaan vain painetasoiltaan, jotka vaikuttavat lämpötilatasoihin. (Berntsson & Franck 1997) Kuvassa 3 alimpana on lämpöpumppua ajava voima. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään systeemien alle lukeutuvia tekniikoita sekä korkealämpötilalämpöpumppujen sovelluskohteita.

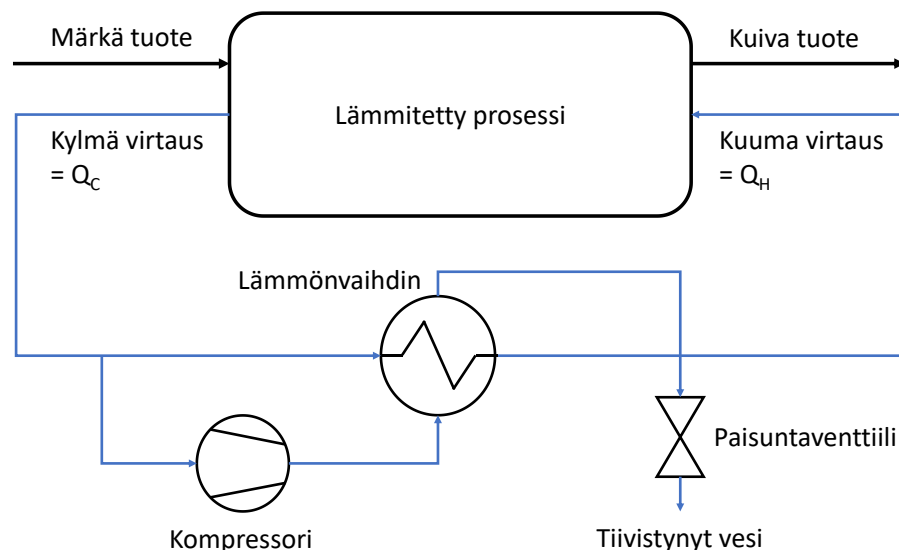
2.3 Avoimet systeemit

Avoimessa systeemissä lämpö, työ ja aine voivat kulkea systeemin rajojen yli. Korkealämpötilälämpöpumpputekniikoista mekaaninen ja terminen höyry-toistopuristus lämpöpumput lukeutuvat avoimen systeemin alle.

Mekaaninen höyry-toistopuristus (Mechanical Vapour Recompression, MVR) lämpöpumppu on variaatio hörypuristus syklistä, jossa höyry toimii väliaineena. MVR lämpöpumppuja käytetään teollisuudessa yleensä kuivatus-, haihdutus- ja tislauksprosesseissa, mutta nykyään niitä hyödynnetään myös suolanpoisto prosesseissa. (Foslie 2017)

MVR-lämpöpumppusysteemi rakentuu tyypillisesti kompressorista, lämmönvaihtimesta sekä höyrystimestä (Foslie 2017). Verrattuna perinteiseen lämpöpumppuun, MVR:ssä on 1 – 2 lämmönvaihdinta vähemmän, höyrystin ja/tai lauhdutin (Koninckx 2013).

Pääasiallisesta prosessista tuleva ylijäämä höyry on yleensä matalammassa lämpötilassa ja paineessa, kuin mitä itse prosessi vaatii. Tätä ylijäämä höyryä voidaan ohjata kompressoriin, joka nostaa höyryn lämpötilaa ja painetta, ja näin ollen voidaan hyödyntää pääasiallisessa prosessissa. Ylijäämä höyry luovuttaa lämpöä prosessiin ja lauhtuu vedeksi, joka poistetaan systeemistä. (Koninckx 2013; Foslie 2017) Ylijäämä höyry voidaan ohjata myös suoraan prosessiin (Wolf et al. 2012). Kuvassa 4 on esitettyä esimerkki MVR-prosessista, jossa on mukana höyryn regeneraatio.



Kuva 4: Esimerkki MVR prosessista höyryn regeneraatiolla, laadittu lähteestä (Foslie 2017).

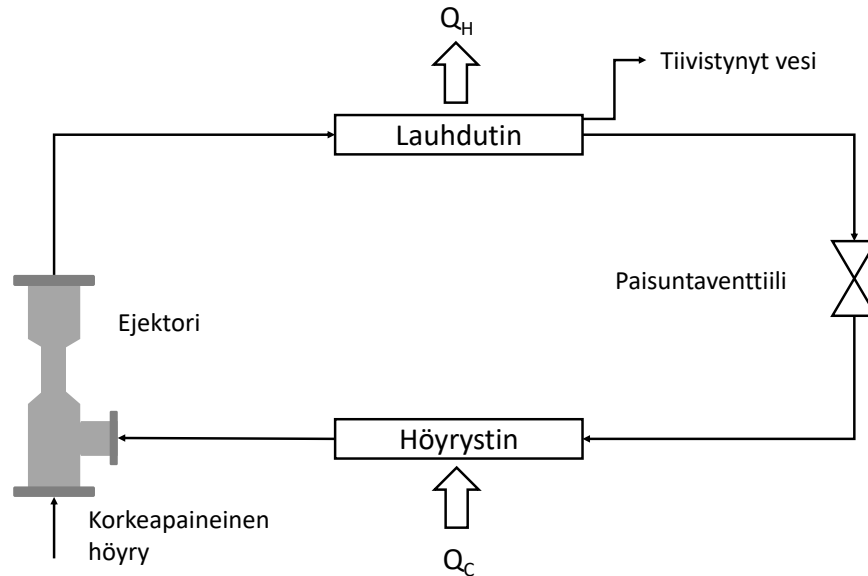
Tämänhetkiset MVR-lämpöpumput hyödyntävät 70 – 80 °C:n lämmönlähteitä ja tuottavat yli 110 °C lämpöä, osa jopa 200 °C:een asti. Yleisin väliaine on vesihöyry, mutta esimerkiksi kemianteollisuus hyödyntää muitakin prosessihöyryjä. (Koninckx 2013)

MVR-lämpöpumppujen yksi hyvistä puolista on niiden korkea COP-arvo. Hyödynnettäessä pääasiallisesta prosessista tulevaa matalalämpoisempää höyryä suoraan lämpöpumpussa, vähenee tarvittavien komponenttien määrä. Tämä johtuu siitä, että pääasiallinen prosessi toimii lämpöpumpun höyrystimenä. MVR-tekniikka soveltuu hyvin prosesseihin, joissa muodostuu höyryä joko tuotteena tai sivutuotteena. (Foslie 2017) COP-arvot ovat korkeita, mutta riippuvat suuresti lämpötilanoususta, joka on yleensä 20 asteen luokkaa (Berntsson & Franck 1997; IEA 2014). Foslien (2017) mukaan suurin mahdollinen COP-arvo lämpönielun ollessa 150 astetta ja lämpötilanousun 5 astetta hyötysuhteella 50% on noin 20. COP-arvon on kuitenkin mahdollista olla jopa yli 100 (IEA 2014, s. 273). Toinen MVR-lämpöpumppujen eduista verrattuna perinteiseen suljettuun systeemiin, on systeemin tarve vain yhdelle lämmönvaihtimelle (Foslie 2017).

MVR-lämpöpumppujen suurin haaste on oikeanlaisen kompressorin valinta (Berntsson & Franck 1997; Foslie 2017). Turbokompressorit soveltuvat korkeille ja keskikorkeille virtauksille, ruuvikompressorit operoivat korkeammassa painesuhteissa mutta soveltuvat vain matalille virtauksille (Berntsson & Franck 1997). Ruuvi- ja turbokompressorit ovat ne tekniikat, jotka kykenevät tuottamaan riittävän painesuhteen kohtuullisella massavirralla. Turbokompressorilla on pääsääntöisesti pienempi investointikustannus verrattuna ruuvikompressorin. (Foslie 2017) Kompressorin sijaan voidaan käyttää myös teollisia puhaltimia sarjassa (EVATHERM 2020).

Terminen höyry-toistopuristus (Thermal Vapour Recompression, TVR) lämpöpumppuja hyödynnetään yleensä haihdutus yksiköissä (Berntsson & Franck 1997; Koninckx, 2013; Liew & Walmsley 2016). TVR:ää voidaan hyödyntää myös panimoiden keittoprosesseissa (Berntsson & Franck 1997; IEA 2014).

TVR-lämpöpumppua ajaa korkeapaineinen höyry ja ejektori. Korkeapaineinen höyry kulkee ejektorin suuttimen läpi. Samaan aikaan höyrystimellä matalapaineisempi väliaine höyrystyy ja sekoittuu korkeapaineiseen höyryyn ejektorissa. (Wen-Quan et al. 2016) Tämä höyrysekoitus laajenee ja niiden kiihtyvyys muunnetaan paineeksi. Höyryseos siirtyy lauhduttimeen, jossa se lauhtuu osittain luovuttaen lämpöä käyttäjälle. Höyry ja lauhtunut vesi erotetaan toisistaan. Lauhtunut vesi poistuu systeemistä ja höyry siirtyy höyrytimeen, jossa se absorboi lämpöä lämmönlähteeltä. (Wolf et al. 2012) Kuvassa 5 on esitettyä TVR-lämpöpumppuesimerkkiä.



Kuva 5: Esimerkki TVR-lämpöpumpusta, laadittu lähteestä (Wen-Quan et al. 2016).

COP-arvot ovat matalilla lämpötilanousuilla jopa 2,5 – 3, mutta tyypillisesti selkeästi alle 2 (Berntsson & Franck 1997). Kissin ja Infante Ferreiran (2016) mukaan COP olisi 2 10 MW TVR-lämpöpumpulle.

Koska TVR-lämpöpumppuja ajaa lämpö eikä mekaaninen energia, niissä ei ole liikkuvia osia. Tämä madaltaa lämpöpumpun ylläpitokustannuksia (Berntsson & Franck 1997; Wolf et al. 2012) ja lisää lämpöpumpun käyttöluotettavuutta (Koninckx, 2013).

TVR-lämpöpumput kykenevät tuottamaan jopa 180 asteen ulostulolämpötiloja. Lämpötilanosto on kuitenkin vain noin 25 astetta. (Koninckx, 2013; Kiss & Infante Ferreira 2016). TVR-lämpöpumpun eduiksi lukeutuvat liikkuvien osien poissaolon lisäksi korkea käyttöturvallisuus, pienemmät investointikustannukset, vähäinen kulutus sekä yksinkertainen ja tehokas muotoilu. (Gig Karasek 2020)

2.4 Suljetut systeemit

Suljetussa systeemissä aine ei voi liikkua systeemin rajojen yli. Suljetun systeemin alle lukeutuu kaksi lämpöpumpputekniikkaa: suljetun syklin kompressori (Closed cycle compression, CCC) lämpöpumppu ja sorptiosysteemi.

CCC-lämpöpumput ovat teollisuudessa yleisimmin käytössä oleva tekniikka (Arpagaus et al. 2018) ja niitä käytetään muun muassa kuivatusprosesseissa ja panimoissa (IEA 2014). Sorptiosysteemejä sovelletaan esimerkiksi kemianteollisuuden prosesseissa (Berntsson & Franck 1997).

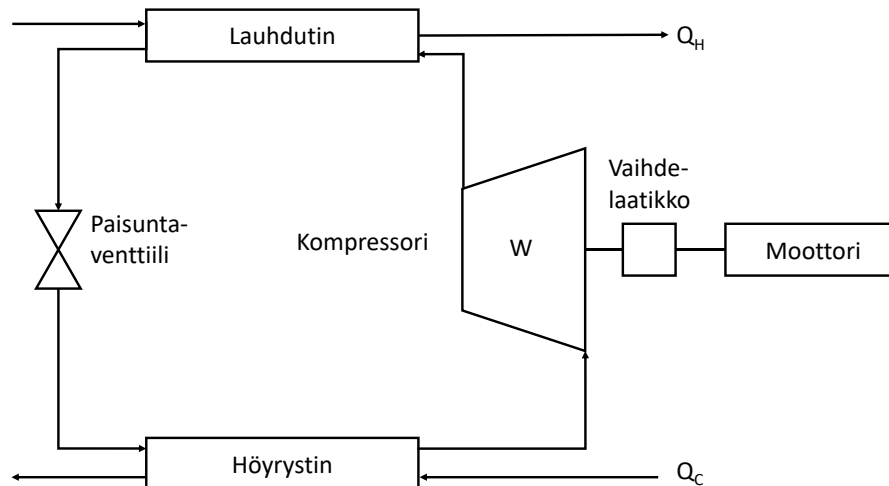
CCC-lämpöpumppujen toimintaperiaate on samantapainen kuin aluvussa 2.1 kerrottu toimintaperiaate. CCC-lämpöpumpuissa ei käytetä lämmönlähdettä suoraan kuten vesihöyryä MVR:ssä, vaan väliaine kiertää erillisessä putkistossa. Tämän seurauksena lämmönlähteen ei tarvitse olla kaasufaasissa, joka mahdollistaa CCC-lämpöpumppujen joustavamman käytön verrattuna MVR lämpöpumppeihin. CCC-lämpöpumput soveltuvat hyvin prosesseihin, joissa lämmönlähde ja lämmönpoisto sijaitsevat fyysisesti eri paikoissa sekä vaaditaan suuri lämpötilanousu (Wolf et al. 2012).

CCC-lämpöpumpun COP-arvo lasketaan kaavan 2 mukaan.

$$COP = \frac{Q_H}{W}, \quad (2)$$

jossa Q_H tarkoittaa lämpönieluun siirtyvää lämpötehoa ja W kompressorin tekemää työtä. Kompressoria ajava voima tulee joko sähkö- tai kaasumoottorista. Tyypillisesti sähkömoottorin COP-arvo on suurempi verrattuna kaasumoottorilla toimivaan lämpöpumppuun. (Berntsson & Franck 1997) Kaupallisesti saatavissa CCC-lämpöpumpuissa on COP-arvot vaihtelevat 1,6 – 5,8 (Arpagaus et al. 2018).

Mikäli CCC-lämpöpumpussa on esimerkiksi diesel käyttöinen kaasumoottori, voidaan moottorista aiheutuva hukkalämpö hyödyntää prosessissa. Kuvassa 6 on esitettyä yksi konfiguraatio CCC-lämpöpumpusta. (Berntsson & Franck 1997)



Kuva 6: Esimerkki CCC-lämpöpumpusta, laadittu lähteestä (Berntssonin & Franckin 1997).

Taulukossa 1 on esitettyä mahdollisia kiertoaineita, joita voidaan hyödyntää CCC-lämpöpumpuissa. Näistä lupaavin on Opteon MZ. Yksi CCC-lämpöpumppujen huonoista puolista on sen riippuvuus saatavista olevista kiertoaineista ja niiden ominaisuuksista.

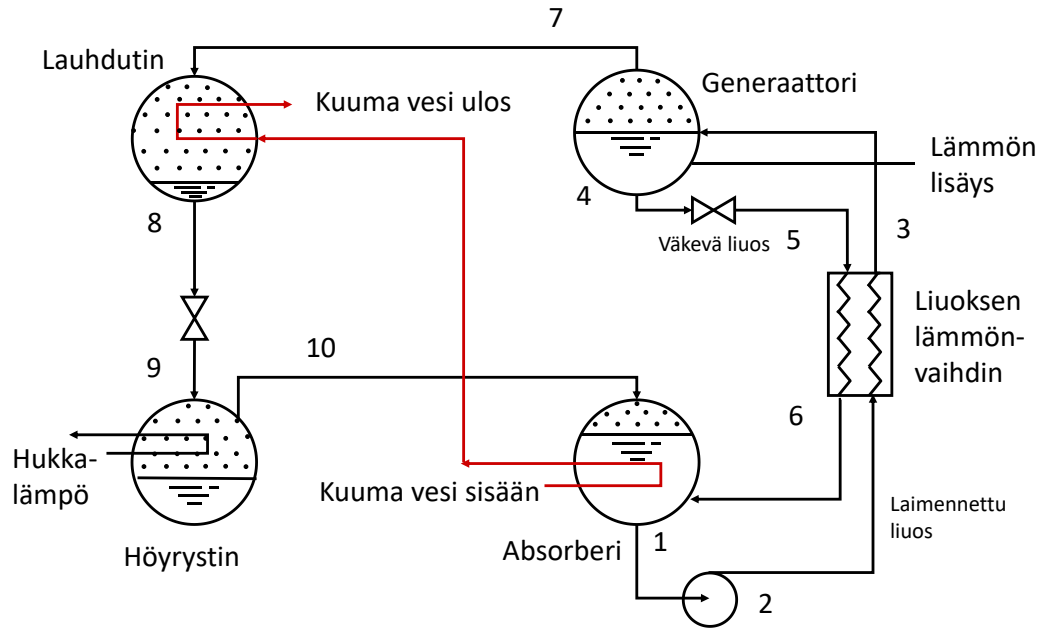
Sorptiosysteemitekniikkaan lukeutuu kaksi mallia, absorptiolämpöpumppu sekä lämmönvaihdin, jotka eroavat toisistaan vain painetasoiltaan (Berntsson & Franck 1997). Absorptiolämpöpumput ovat Costa et al. (2009) mukaan joustavia ja soveltuvat moniin prosesseihin myös paperi- ja massateollisuudessa. Lämmönvaihdinta voidaan hyödyntää kemianteollisuudessa ja metalliteollisuudessa esimerkiksi kuumavalssausprosesseissa (IEA 2014).

Sorptiosysteemin lämpöpumput perustuvat siihen, että seoksen kiehumispiste on korkeampi kuin vastaavan puhtaan haihtuvan kiertoaineen kiehumispiste. Kiertoaineen täytyy olla seos haihtuvasta ja haihtumattomasta komponentista. (Berntsson & Franck 1997) Sorptiosysteemi koostuu generaattorista, absorberista, lauhduttimesta ja höyrystimestä, sekä liuoksen lämmönvaihtimesta. Kiertoaineparina käytetään LiBr/H₂O:ta (Wen-Quan et al. 2016) tai NH₃/H₂O:ta (Wolf et al. 2012). Absorptiolämpöpumpussa rajoittava tekijä on kiertoaineen kiteytyminen (Berntsson & Franck 1997).

Absorptiolämpöpumpussa matala lämpötilataso T_L nostetaan kohtalaiselle tasolle (T_M) korkean lämpötilatason (T_H) lämmön avulla. Mahdollinen lämpötilatason nousu voidaan saavuttaa monilla eri suuruusluokilla johtuen kolmesta lämpötilatasosta. Mahdolliset ulostuloslämpötilat vaihtelevat 100 °C:sta 200 °C:een, riippuen käytettävästä kiertoaineparista. (Berntsson & Franck 1997).

COP-arvo määrittää, kuinka paljon voidaan tuottaa lämpöä suhteessa käytettyyn lämpöön (Berntsson & Franck 1997). Tyypillisesti COP-arvo on 1,3 – 1,4 välillä, kun kattilan hyötysuhde huomioidaan (Wen-Quan et al. 2016).

Absorptiolämpöpumppusykli koostuu kiertoaineen ja absorboivan aineen piireistä. Kiertoaineparina käytetään yleensä LiBr/H₂O:ta, jolloin absorboiva aine on litiumbromidi (LiBr) -liuos ja kiertoaine on vesi. Generaattorissa LiBr-liuosta lämmitetään, jotta voidaan tuottaa korkeapaineista ja kuumaa höyryä. Tämä höyry siirtyy lauhduttimeen, jossa höyry lauhtuu ja vapauttaa lämpöä. Paisuntaventtiilissä höyry laajenee ja siirtyy höyrystimeen, jossa se absorboi hukkalämpöä ja höyrystyy. Generaattorista väkevä LiBr-liuos siirtyy absorberiin, jossa höyry absorboidaan vapauttaen lämpöä. Laimennettu liuos siirtyy generaattoriin, jossa höyry keitetään pois ja sykli alkaa uudelleen. Prosessin aikana lämpöä vapautuu absorberista ja lauhduttimesta heti peräkkäin. (Wen-Quan et al. 2016) Kuvassa 7 on esitettyä absorptiolämpöpumppusykli, jossa vaiheet 1-2-3-4-5-6 ovat LiBr-liuoksen piirin kulku.

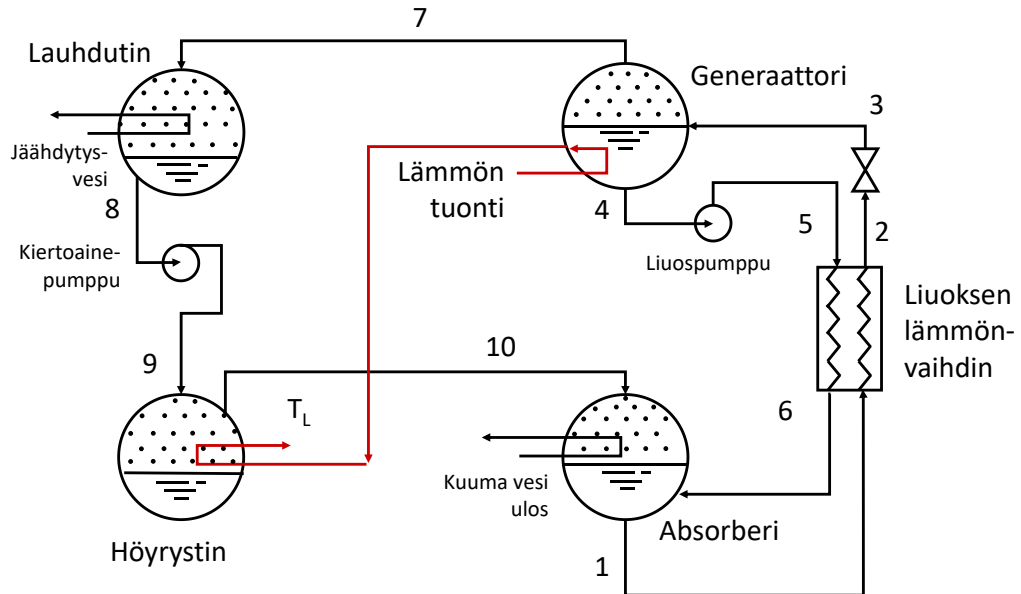


Kuva 7: Esimerkki prosessikaavio absorptiolämpöpumpusta, laadittu lähteestä (Wen-Quan et al. 2016).

Sorptiosysteemin toinen konfiguraatio on lämmönvaihdin tekniikka. Lämmönvaihdin soveltuu kohtalaisen lämpötilatason hukkalämmön hyödyntämiseen, sillä lähes puolet voidaan muuntaa korkeammaksi ja hyödylliseksi lämpötilatasoksi (Berntsson & Franck 1997).

Lämmönvaihdin konfiguraatiossa lämpö tuodaan kohtalaisella lämpötilatasolla (T_M), jonka lämmöstä osa muunnetaan korkeaksi lämpötilatasoksi (T_H) ja loput puretaan matalalla lämpötilatasolla (T_L). Lämmönvaihdin voi tuottaa noin 150 °C poistuvia lämpötiloja. (Berntsson & Franck 1997; Wen-Quan et al. 2016)

Kuvassa 8 on esitetty prosessikaavio lämpövaihtimelle, jossa kuuma vesi lämmitetään absorberilla ja kuljetetaan käyttäjälle. Tällöin lämmönvaihdin lämpöpumpun COP-arvo on noin 0,5, mikä tarkoittaa sitä, että puolet kohtalaisen lämpötilatason lämmöstä voidaan nostaa korkealle lämpötilatasolle. (Wen-Quan et al. 2016)



Kuva 8: Esimerkki mahdollisesta lämmönvaihtimen prosessikaaviosta, laadittu lähteestä (Wen-Quan et al. 2016).

Kuvassa 8 vaiheet 1-2-3-4-5-6 ovat liuoksen syklin vaiheita. Generaattorista höyry siirtyy lauhduttimeen ja lopulta absorberin kautta takaisin generaattoriin.

2.5 Sovelluskohteet

Kaupallisesti saatavilla olevilla korkealämpötilalämpöpumpuilla on erilaiset toiminta-alueet ja -lämpötilat, mitkä menevät lomittain tietyissä tekniikoissa. Tämän seurauksena on useampia tekniikoita, jotka soveltuvat tiettyyn prosessiin. Yleisin sovelluskohte korkealämpötilalämpöpumpuille on kuivatusprosessi (Wolf et al. 2012), jossa voidaan käyttää kaikkia tässä työssä käsiteltyjä tekniikoita. Muita prosesseja, joissa korkealämpötilalämpöpumpuja voidaan hyödyntää ovat haihdutus, keitto, tislauk, puristus, valkaisu, pastörointi, tekstiilien värjäys ja sterilisointi. (Berntsson & Franck 1997; Costa et al. 2009; Bakhtiari et al. 2010; Koninckx 2013; IEA 2014; CNIM 2016; Liew & Walmsley 2016; Foslie 2017)

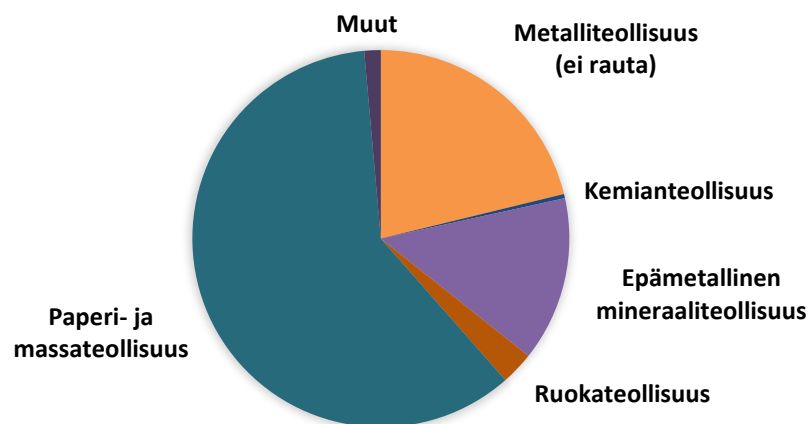
Teollisuuden hukkalämpö määritellään lämmöksi, joka on kelpaamaton teolliseen prosessiin. Yleisimmät hukkalämmöt ovat kaasu- ja nestevirtoja, sekä kiinteitä, kuten kuuma teräs. (Papapetrou 2018)

Korkealämpötilalämpöpumput soveltuvat teollisuuden tarpeisiin, johtuen teollisuudessa käytettävistä korkeista lämpötiloista verrattuna kotitalouksissa käytettäviin lämpötiloihin. Tässä tutkielmassa keskitytään Suomen alueella toimivaan teollisuuteen, niiden energiankulutukseen sekä mahdollisuuden hyödyntää korkealämpötilalämpöpumpuja.

Eurostatin (2018) mukaan vuonna 2018 EU-maiden teollisuudet kuluttivat 1050 TWh sähköä ja 175 TWh lämpöä, joista Suomen osuudet ovat 39 TWh ja 15 TWh. Vuonna 2015 teollisuuden energiankulutus EU:ssa vastasi 26% koko energiankulutuksesta (Papapetrou 2018).

Kemianteollisuus ja metalliteollisuus ovat suurimmat energiankuluttajat (Papapetrou 2018). Näiden teollisuuksien suurimmat teoreettiset hyödyntämispotentiaalit ovat prosessihöyryissä, joiden lämpötila on 160 – 200 °C (Arpagaus et al. 2018). Seuraavaksi suurimmat kuluttajat ovat paperi-, mineraali- ja ruokateollisuus. Ruokateollisuus vaatii yleensä lämpötiloja vain sataan asteeseen saakka. (Papapetrou 2018) Tämän takia ruokateollisuus ei ole hyvä sovelluskohde korkealämpötilalämpöpumpuille tässä tutkielmassa.

Suurin osa hukkalämmön hyödyntämispotentiaalista on lämpötilavälillä 100 – 200 °C, mikä tarkoittaa noin 100 TWh vuodessa. EU tasolla suurimmat teollisuudenalat tuolla lämpötilavälillä ovat metalli- (ei rauta), mineraali- (ei metalliset), ruoka- ja paperiteollisuus, joista suurin on epämetalliset mineraalit. Kuvassa 9 on esitettyä hukkalämmön hyödyntämispotentiaali lämpötilavälillä 100 – 200 °C eri sektoreittain Suomessa. (Papapetrou 2018)

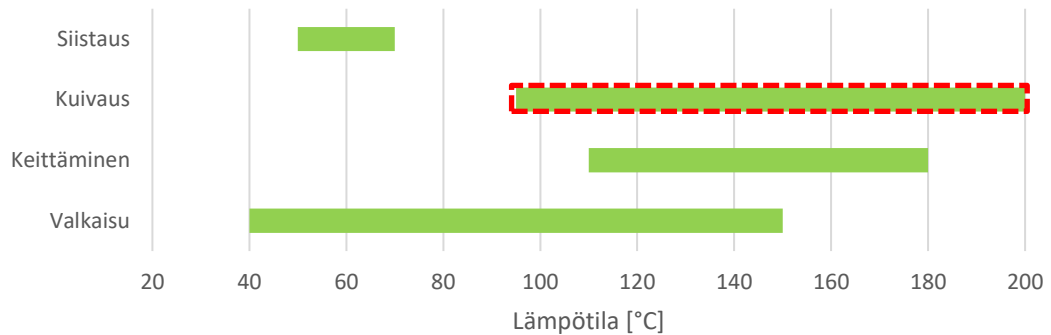


Kuva 9: Graafinen esitys hukkalämmön hyödyntämispotentiaalista Suomessa sektoreittain lämpötilavälillä 100 – 200 °C, laadittu lähteestä (Papapetrou 2018).

Kuvasta 9 nähdään, että suurin hukkalämmön hyödyntämispotentiaali Suomessa on paperi- ja massateollisuudessa, mikä on noin 1,7 TWh vuodessa (Papapetroun 2018). Tässä tutkielmassa keskitytään paperi- ja massateollisuuteen sovelluskohteena, johtuen suurimmasta hyödyntämispotentiaalista Suomessa.

Kuvassa 10 on esitettyä paperisektorin eri prosessien tyypillisiä lämpötiloja. Kuvasta nähdään, että paperisektorin prosesseista vain siistaus alittaa 100 °C rajan. Kuivaus,

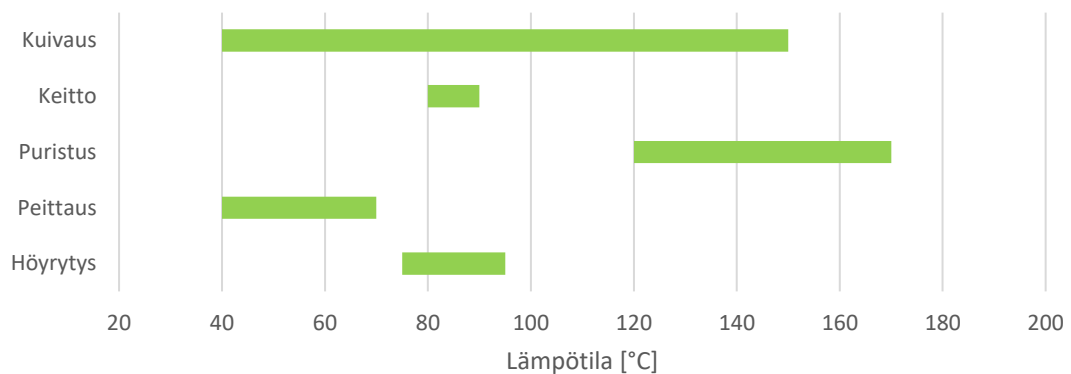
keittäminen ja valkaisu soveltuvat korkealämpötilalämpöpumpun sovelluskohteiksi lämpötilatasojen perusteella.



Kuva 10: Tyypilliset lämpötilat paperisektorin prosesseissa, laadittu lähteestä (Wolf et al. 2012). Punainen katkoviiva kuvastaa tarkastelukohteeksi valittua prosessia.

Yhden paperitonnin valmistukseen paperikoneella kuluu noin 2500 – 5500 MJ lämpöenergiaa, josta lähes kaikki käytetään paperin kuivatusprosessissa. Näin ollen kuivatusprosessi on suurin lämpöenergiankuluttaja paperikoneissa. (Knowpap 2020)

Vastaavasti kuvassa 11 on esitettyä puusektorin eri prosessien tyypillisiä lämpötiloja. Kuvasta nähdään, että vain kuivaus- ja puristusprosessit ylittävät 100 asteen rajan, ja täten soveltuvat sovelluskohteiksi.



Kuva 11: Tyypilliset lämpötilat puusektorin eri prosesseissa, laadittu lähteestä (Wolf et al. 2012).

Sellunvalmistuksessa prosessien lämpöenergiankulutus on vähentynyt, minkä seurauksena lämpöä voidaan tuottaa yli omien tarpeiden. Mikäli sellutehdas on erillinen, eli sitä ei ole integroitu paperitehtaan kanssa, jää matalapaineista höyryä yleensä runsaasti yli. Integraatissa sellutehtaan ylimääräinen höyry hyödynnetään paperikoneilla. Selluprosessissa syntyviä sekundäärilauhteita, eli hukkalämpöä, jota on otettu talteen, hyödynnetään sellutehtaalla eri prosesseissa lauhteen puhtauden mukaan. (Knowpulp 2020)

Tässä tutkielmassa keskitytään integroimattomaan paperitehtaan kuivatusprosessiin sen ollessa paperikoneen suurin lämpöenergiankuluttaja. Paperitehdas valitaan siksi, että sellutehtaissa on jo olemassa paljon sekundaarilauhteiden hyödyntämistä. Lisäksi paperitehtaan kuivatusosan poistoilmassa on paljon hyödyntämispotentiaalia. (Knowpap 2020)

3. KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPUN KAN- NATTAVUUS

Korkealämpötilalämpöpumppu on investointi, jonka tarkoituksena on alentaa lämpöenergia kustannuksia eli vähentää primäärienergiatarvetta. Tämänlaisille investoinneille asetetaan noin 12–15 % tuottovaatimus. Investoinnin kannattavuutta tulisi tarkastella vähintään kahdella menetelmällä viidestä, joita ovat takaisinmaksuajan menetelmä, pääoman tuottoaste -menetelmä, sisäisen korkokannan menetelmä, annuiteettimenetelmä ja nykyarvomenetelmä. (BusinessOulu 2020)

Tässä tutkielmassa investoinnin kannattavuus lasketaan takaisinmaksuajan menetelmällä ja annuiteettimenetelmällä. Menetelmät käydään läpi seuraavassa alaluvussa.

3.1 Investoinnin kannattavuustarkastelu

Takaisinmaksuajan menetelmä kertoo missä ajassa investoinnin nettotuotot/-säästöt ylittävät perushankintakustannukset. Laskukaava on siis

$$PBP = \frac{P}{N}, \quad (3)$$

jossa P tarkoittaa investoinnin perushankintakustannusta ja N vuotuisia nettotuottoja/-säästöjä. (BusinessOulu 2020)

Oletettaessa, että lämpöpumpun tuottama energia korvaa nykyisen kattilan tuottamaa energiaa, takaisinmaksuajan kaava muuttuu muotoon

$$PBP = \frac{P}{\left(\frac{B_{pa}}{\eta_{ka}} - \frac{B_{av}}{COP}\right) * h - m_{hp}}, \quad (4)$$

jossa B_{pa} on polttoaineen hinta [€/kWh], B_{av} on lämpöpumppua ajavan voiman hinta [€/kWh], η_{ka} kattilan hyötysuhde [%], h lämpöpumpun ajoaika vuodessa [h] ja m_{hp} lämpöpumpun vuosittainen ylläpitokustannus yksikössä €/kW. (Berntsson & Franck 1997)

Annuiteettimenetelmässä nykyhankintameno jaetaan pitoaikaa vastaaville vuosille yhtä suuriksi pääomakustannuksiksi eli annuiteeteiksi. Annuiteetti sisältää vuosikoron sekä poiston yhteenlaskettuna. Investointi on kannattava, kun vuotuiset nettosäästöt ovat yhtä suuret kuin pääoman hoitamisesta aiheutuvat kustannukset. (BusinessOulu 2020)

Kannattavuuden laskuissa käytettävä laskentakorkokanta tarkoittaa korvausta vieraan rahan saamisesta. Investoinnille tulisi asettaa vähintään lainalle asetettu korkotuottovaatimus. (BusinessOulu 2020) Paperitehtaan sovelluskohteen laskentakorkokannaksi valitaan 13 %.

3.2 Lämpöpumpun taloudellinen sijoittaminen prosessiin

Pinch-analyysi on laskentamenetelmä, jossa prosessien jäähdytys- ja lämmitystarpeita analysoidaan. Analyysissä selvitetään, kuinka suuri osa prosessin energiantarpeesta voidaan kattaa jo olemassa olevien prosessien sisäisellä lämmönsiirrolla ja kuinka paljon pitää tuoda ulkopuolelta. Lisäksi analyysistä selviää, millainen lämmönvaihdinverkko tarvitaan ja saadaan tietoa teoreettisesta minimistä lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeille. Yksi menetelmän hyödyistä on saada tietoa missä voidaan säästää. (Heikkilä & Kiuru 2014)

Lämpöpumpun optimaalinen sijoittaminen prosessiin voidaan tehdä Pinch-analyysin avulla. Sijoittamalla lämpöpumppu pinch-lämpötilaeron (kuuman ja kylmän virtauksen pienin lämpötilaero) päälle, lämpöpumppu ottaa lämpöä sieltä missä sitä on ylimäärin ja tuo sitä systeemiin, jossa tarvitaan lisälämmitystä. Tällä asetelmalla lämmitys- ja jäähdytystarpeet vähenevät. (Berntsson & Franck 1997)

Bakhtiari et al. (2010) tutkivat absorptiolämpöpumppujen sijoittamista paperi- ja massa-teollisuuteen ja löysivät kaksi mahdollista sijoittamistapaa, joilla molemmilla takaisinmaksuaika oli alle 3 vuotta. He sijoittivat lämpöpumpun prosessiin Pinch-analyysin avulla hyödyntäen prosessin ja lämpöpumpun omia kriteerejä. Bengtsson et al. (2002) vastavasti hyödynsivät Pinch-analyysiin perustuvia kehittyneempiä työkaluja, kuten kehittyneitä pinch-käyriä sekä matrix-menetelmää. Matrix-menetelmästä saa suuremman hyödyn, kun ratkaistava ongelma on monimutkainen.

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä luvussa tarkastellaan korkealämpötilalämpöpumppuja taloudelliselta näkökannalta. Tutkielmassa keskitytään valitun sovelluskohteen lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuteen.

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tutkimuksen vaiheita ja tavoitetta, valittua tarkastelukohdetta ja lämpöpumpputekniikan valintaa yleisellä tasolla, sekä tarkastelukohteen tasolla. Lopuksi määritellään laskennan alkuarvot ja toteutetaan kannattavuuden laskenta luvussa 3 käsitellyin periaattein.

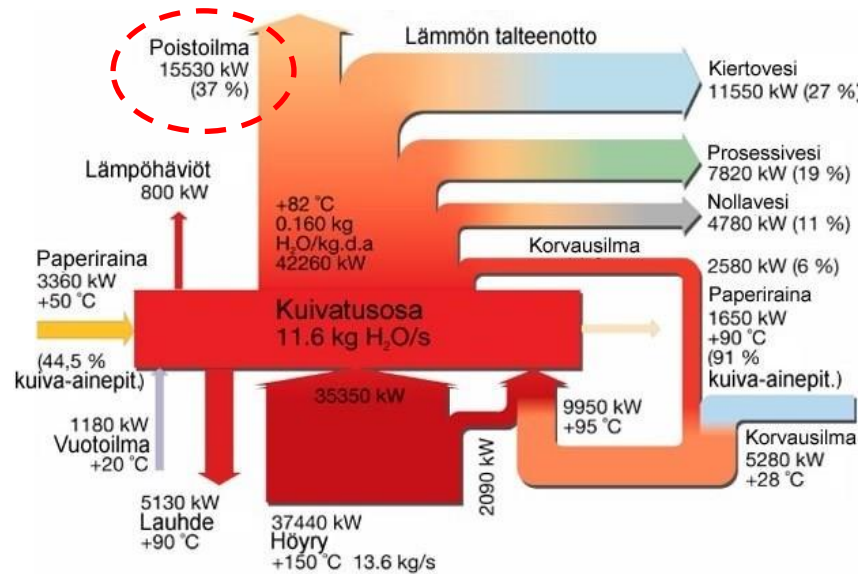
4.1 Tutkimuksen vaiheet ja tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kuinka taloudellisesti kannattavia korkealämpötilalämpöpumput ovat integroimattoman paperitehtaan kuivatusprosessin hukkalämmön hyödyntämisessä. Kannattavuutta lasketaan takaisinmaksuajan menetelmällä sekä annuiteettimenetelmällä.

Tutkimus alkaa tarkastelukohteen määrittelyllä, jossa selvitetään prosessiarvoja sekä hukkalämmön osuus. Tämän jälkeen valitaan kohteeseen soveltuva lämpöpumpputekniikka. Ennen laskennan suorittamista selvitetään lähtöarvot ja tehdään tarvittavat oletukset. Kannattavuutta tutkitaan eri lämmöntuotannon energiahinnoilla, sekä teollisuuden sähköhinnoilla. Tulokset analysoidaan luvussa 5.

4.2 Tarkastelukohde

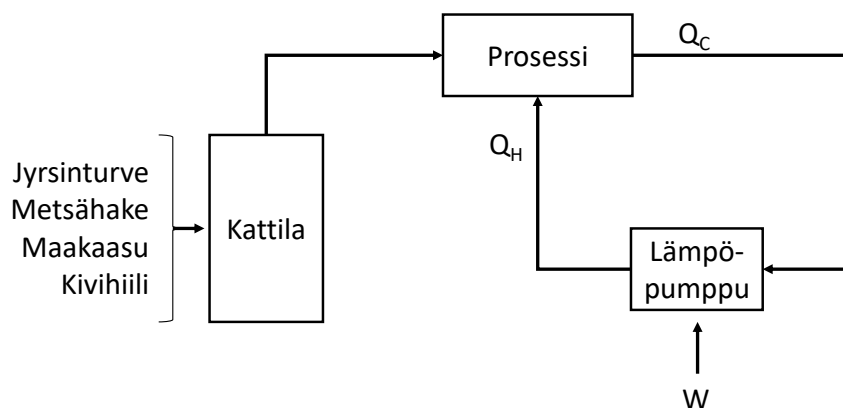
Korkealämpötilalämpöpumpun sovelluskohde on integroimattoman paperitehtaan sanomalehtipaperikoneen kuivatusosa. Kuvassa 12 on sovelluskohteen Sankey-diagrammi (Knowpap 2020).



Kuva 12: Sankey-diagrammi sanomalehtipaperikoneen kuivatusosasta (Knowpap 2020). Punainen katkoviiva korostaa prosessista poistuvaa hukkalämpöä.

Kuivatusosasta poistuu poistoilman mukana 82 asteista hukkalämpöä 15,53 MW verran ja sinne tuodaan 150 asteista prosessihöyryä. Lämmitystarve vaihtelee vuodenaikojen mukaan, joten myös hukkalämmön määrä vaihtelee. Vain osa talteen otetusta lämmöstä kierrätetään takaisin kuivatusprosessiin. Suurin osa käytetään konesalin tuuletusilman sekä prosessiveden lämmittämiseen. (Knowpap 2020) Oletetaan hukkalämmön määrän pysyvän vakiona vuoden aikana.

Kuvassa 13 on yksinkertaistettu prosessikaavio tarkastelukohteesta, johon on sijoitettu lämpöpumppu. Kattilaan voidaan syöttää eri polttoaineita. Kuvassa Q_C on kuivatusprosessista poistuva 82 asteinen hukkalämpö eli poistoilma ja Q_H on korkealämpötilälämpöpumpusta poistuva kuumempi höyryvirta.



Kuva 13: Yksinkertaistettu prosessikaavio valitusta tarkastelukohteesta, josta käy ilmi korkealämpötilälämpöpumpun sijoittaminen prosessiin. Kattilan vieressä on mahdolliset polttoaineet, jota kattilassa voidaan polttaa lämpöenergian tuottamiseksi.

Suomessa sanomalehtipaperia tuottaa vain yksi kone, UPM:n paperikone 7 (PK7) Kaipolassa Jämsässä (Virtanen 2012). PK7:n tuotantokapasiteetti vuodessa on 300 000 t (Aluehallintavirasto 2012). Alaluvussa 2.5 todettiin, että kuivatusprosessi käyttää lähes kaiken paperikoneella kuluvan lämpöenergian. Käytetään PK7:n vuosituotantoa esimerkkinä. Lämpöenergiaa kuluu siis 2500 – 5500 MJ/t, mikä tarkoittaa vuodessa PK7:n vuosituotannolla 750 – 1650 GJ kulutettua lämpöenergiaa. Mikäli kuvan 12 mukaisesti sanomalehtipaperikoneelta poistuu 37 % lämpöenergiasta poistoilmaan, tarkoittaisi tämä, että vuodessa syntyy 278 – 611 GJ hukkalämpöä.

4.3 Lämpöpumpputyypin valinta

Mikäli prosessi johon lämpöpumppua ollaan sijoittamassa, on yksinkertainen eli kun lämmönlähde ja -nielu ovat selkeästi tiedossa, ei ole yleensä tarvetta tehdä kaiken kattavaa analyysia virtauksista. Tärkeitä parametreja lämpöpumpun valinnassa ovat lämpönielun ja -lähteen lämpötilat ja lämpökuormat, sekä niiden fyysiset tiedot kuten sijainti. (Berntsson & Franck 1997)

Lämpöpumpputekniikoilla on omat raja-arvonsa, jonka alueella se operoi. Tekniikan valintaan vaikuttavat prosessin lämpönielu ja -lähteen lämpötilat, joiden suhdetta merkitään q :lla. (Berntsson & Franck 1997) Taulukkoon 2 on koottuna käsiteltyjen lämpöpumpputekniikoiden suurimmat lämpönielulämpötilat, lämpötilanostot ja q arvot.

Taulukko 2: Lämpöpumpputekniikoiden toimintaparametreja (Berntsson & Franck 1997; Koninckx 2013; Apragaus et al. 2018)

Tekniikka	Max. lämpönielulämpötila [°C]	Max. lämpötilanosto [°C]	q
MVR	200	90	1,1-1,4
TVR	180	40	1,7-10
CCC, sähkömoottori	165	80	1,1-1,5
CCC, kaasumoottori	165	90	1,3-3
Absorptiolämpöpumppu	200	50	2,5
Lämmönvaihdin	150	60	0,5

Esimerkiksi taulukon 2 tietojen avulla voidaan valita sovelluskohteeseen soveltuva lämpöpumpputekniikka. Monimutkaisissa prosesseissa tulisi tehdä tarkka analyysi esimerkiksi pinch-analyysillä oikean tekniikan löytämiseksi. Kuitenkin lopullisessa valinnassa tulee huomioida myös taloudellinen puoli, kuten investoinnin, käytön ja ylläpidon kustannukset (Kiss & Infante Ferreira 2016).

Kissin ja Infalnte Ferreiran (2016) mukaan lämpöpumpputekniikan valinta alkaa määrittelemällä prosessin vaatimukset ja tarvittava lämpötilatasonousu. Seuraavaksi määritel-

lään häviöt ja energieettinen suorituskyky, joiden jälkeen selviää säästöpotentiaali. Lopuksi vertaillaan vaihtoehtoisten tekniikoiden investointikustannuksia ja valitaan se tekniikka, jolla on lyhin takaisinmaksuaika.

Kaikkien lämpöpumppujen suorituskyky on parhaimmillaan, kun lämpötilanousut ovat matalia. Mikäli kiertoaineessa ei tapahdu lämpötilaliukua, on tekniikaksi valittava MVR, TVR tai absorptiolämpöpumppu, jotka soveltuvat kohteeseen. (Van de Bor & Infante Ferreira 2013) Tarkastelukohteessa syntyy höyryä, jonka toimiessa kiertoaineena, ei tapahdu lämpötilaliukua, koska se vaatii tapahtuakseen kiertoaineseoksen (Orr 2019).

Valitaan lämpötilanousuksi 30 °C, jolloin soveltuvimmat lämpöpumput ovat MVR ja TVR (Bengtsson et al. 2002). Foslien (2017) mukaan MVR-lämpöpumput soveltuvat hyvin kohteisiin, joissa syntyy höyryä joko tuotteena tai sivutuotteena. Valitaan MVR (sähkömoottori) tämän perusteella. 30 asteen lämpötilanousu tarkoittaa COP-arvoa 10 (Berntsson & Franck 1997, s. 25).

4.4 Taloudellisen laskennan alkuarvot ja toteutus

Tarkastelukohteessa poistuu ulkoilmaan 15,5 MW hukkalämpöä (Knowpap 2020). Valittu lämpöpumpputekniikka on MVR ja valittu lämpötilanousu 30 astetta, mikä tarkoittaa COP-arvoa 10 (Berntsson & Franck 1997, s. 25). Taulukkoon 3 on laskettu tarkastelukohteessa hyödynnettävän lämpöpumpun tietoja kaavan 1 mukaisesti laskettuna.

Taulukko 3: Tarkastelukohteessa hyödynnettävän lämpöpumpun tietoja

Tekniikka	ΔT [°C]	COP	Q_C [MW]	Q_H [MW]	W [MW]
MVR	30	10	15,5	17,2	1,72

Energioiden hintoja lämmöntuotannossa joulukuussa 2019 (Tilastokeskus 2020) on koottu taulukkoon 4. Suomessa käytetään pääasiassa lämmöntuotantoon biopolttoaineita, kivihiiltä ja maakaasua. Käytetään laskuissa metsähaketta, sen ollessa Suomessa yleisin käytetty polttoaine lämmöntuotantoon. Maailmassa selkeästi yleisimmät käytössä olevat polttoaineet ovat kuitenkin maakaasu ja kivihiili. (IEA 2020)

Taulukko 4: Energioiden hintoja Suomen lämmöntuotannossa joulukuussa 2019 (Tilastokeskus 2020)

Kivihiili [€/MWh]	Maakaasu [€/MWh]	Metsähake [€/MWh]	Jyrsinturve [€/MWh]
38,51	47,49	21,19	16,32

Oletetaan tarkastelukohteessa tuottavan lämmön kattilan hyötysuhteeksi 85 % (Van de Bor & Infante Ferreira 2013). Oletetaan, että lämpöpumppu on käynnissä koko vuoden

ajan paitsi 37,5 h/a, jolloin huolto tapahtuu. Huollosta aiheutuvat kustannukset koostuvat käytetyistä henkilötunneista ja vaihto-osien hinnoista. Huoltoinsinöörin keskipalkka Suomessa on 3537 €/kk (Duunitori 2020), mikä tarkoittaa noin 23,5€/h. Huolto ilman varaosien vaihtoa kustantaa 881,25 €/a aikaisemmin mainittujen oletamuksien pohjalta. Oletetaan vuosittaiset varaosakustannukset 10 k€, jolloin vuosittaiset huoltokustannukset ovat 633 €/MW.

Teollisuuden sähköhintana käytetään Tilastokeskuksen (2020) mukaan arvoa 7,5 snt/kWh. Käytetään laskentakorkokantana 13 % luvun 3 mukaisesti. Oletetaan pitoajaksi ainakin 10 vuotta ja jäännösarvoksi 0 €.

10 MW:n MVR-lämpöpumppuinvestointi maksaa 538100 €/MW Kissin ja Infante Ferreiran (2016) mukaan. Investoinnin suuruus on paikkakohtainen, eikä sitä voida suoraan käyttää vastaavatehoisen lämpöpumpun kustannusarviona. Investointikustannus sisältää itse lämpöpumpun lisäksi esimerkiksi asennuksen, lämmönlähteen ja -nielun laitteistot, putkituksen, hallinnointilaitteet sekä asennustunnit. Kuitenkin tyypillisesti hinta tehoa kohti alenee mitä suuremmista teholuokista on kyse. (Berntsson & Franck 1997) Tarkastelukohteessa lämpöpumpun teho olisi 17,2 MW, oletetaan hinnaksi 500 k€/MW.

Yllä olevien alkuarvojen mukaan takaisinmaksuajaksi saadaan kaavan 4 mukaisesti 3,3 vuotta. Vuosittaiset ylläpitokustannukset eivät vaikuta suuresti takaisinmaksu-aikaan, ellei hinta ole kokoluokaltaan reilusti yli 10 k€/MW.

Annuiteettimenetelmässä annuiteetti on samansuuruinen joka vuosi, eli 27 145 €/MW. On myös oletettu, että vuosittain syntyvä säästö on samansuuruinen jokaisena vuotena, eli 151 395 €/MW. Näillä arvoilla säästö on suurempi kuin annuiteetti vuosittain, eli investointi on kannattava. Kymmenessä vuodessa investointi tuo säästöjä 674 214 €/MW verran. Laskennassa on oletettu, että säästöt ovat joka vuosi samansuuruiset. Säästöjen suuruuteen kuitenkin vaikuttavat pumpun käynnissä oloaika, sähkönhinta ja mahdolliset ylimääräiset huoltokustannukset.

5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli perehtyä korkealämpötilalämpöpumpputeknikoihin ja niiden sovelluskohteisiin teollisuudessa. Lisäksi työssä tarkasteltiin lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta valitussa sovelluskohteessa.

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään ensin tekniikat ja sovelluskohteet. Lopuksi tarkastellaan valitun tarkastelukohteen investoinnin kannattavuutta ja pohditaan syitä sille miksi korkealämpötilalämpöpumppuja ei ole vielä teollisuudessa niin yleisessä käytössä.

5.1 Korkealämpötilalämpöpumpputekniikat ja -sovelluskohteet

Taulukkoon 5 on koottu yhteenveto työssä käsitellyistä tekniikoista ja niiden ominaisuuksista. Avoimen systeemin tekniikoiden, MVR ja TVR, vahvuuksiin lukeutuvat komponenttien pienempi lukumäärä verrattuna perinteiseen CCC-lämpöpumppuun sekä kiertoaine. Molemmissa käytetään kiertoaineina vesihöyryä, joka on turvallista, helposti saatavaa eikä aiheuta päästöjä. MVR-lämpöpumpussa on vähemmän lämmönvaihtimia, kun taas TVR:ssä ei ole ollenkaan kompressoria. Kompressorin puute tarkoittaa sitä, että TVR-tekniikassa ei ole liikkuvia osia, minkä takia ylläpitokustannukset ovat matalat ja käyttöturvallisuus on hyvä. Vastaavasti MVR:n kompressori on tekniikan heikkous, koska kompressoritekniikka rajoittaa lämpöpumpputekniikan kehitystä. TVR:n huonona puoleena on matala lämpötilanosto, koska hukkalämmön pitää olla jo valmiiksi lähellä 100 astetta, jotta se voidaan nostaa teollisuuden vaatimille tasoille. Tämä myös supistaa hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia.

CCC-lämpöpumpun selkeä etu on sen yleisyys tekniikkana, minkä seurauksena siitä on saatavilla useita eri kokoluokkia. Erillinen, suljettu kiertoainesykli on myös etu, koska tällöin hukkalämmön syntypaikka ja sen hyödyntämispaikka voivat sijaita kaukana toisistaan. Kiertoaine myös rajoittaa tekniikan käyttöä teollisuuden prosesseissa, koska kiertoaineen toiminta-alueen tulisi olla riittävän suuri.

Sorptiosysteemin tekniikat ovat selkeästi monimutkaisempia ja niissä on useampia komponentteja verrattuna muihin aiemmin mainittuihin, mikä nostaa niiden investointikustannusta. Toinen haaste on korrosio putkissa (CNIM 2016). Ne voivat kuitenkin tuottaa yhtä aikaa kuumaa höyryä sekä jäähdytysvettä, ja ovat monipuolisia tekniikoita. Sorptiosysteemejä on kuitenkin tyypillisesti käytetty jäähdytykseen (IEA 2014).

Taulukko 5: Yhteenveto työssä käsitellyistä tekniikoista ja niiden ominaisuuksista

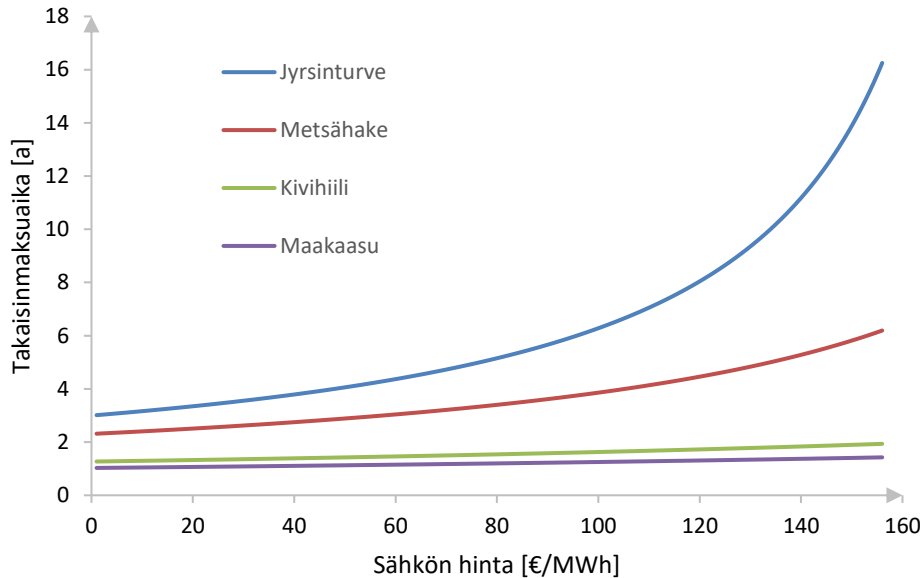
Tekniikka	COP	Kiertoa- aine	Max. Tulos	Max. deltaT	Vahvuudet	Heikkoudet
MVR	< 99	höyry	200 °C	90 °C	- lämmönvaihtimien vähyys - korkea COP	- kompressori
TVR	< 3	höyry	180 °C	40 °C	- ei liikkuvia osia - matalat ylläpitokustannukset	- matala lämpötilannosto
CCC	< 5,8	Opteon MZ, SES36, DR-2	165 °C	90°C	- yleisin tekniikka - lämpönielu ja lämmönlähde voivat sijaita kaukana toisistaan	- toiminta-alue riippuu saatavilla olevista kiertoaineista
Absorptiolämpöpumppu	1,3 – 1,4	LiBr/H ₂ O tai NH ₃ /H ₂ O	200 °C	50 °C	- monipuolinen - vähän liikkuvia osia	- kiertoaineen kiertyminen - korroosio
Lämmönvaihdin	0,5	LiBr/H ₂ O tai NH ₃ /H ₂ O	150 °C	60 °C	- kohtalaisen lämpöisen hukkalämmön hyödyntäminen - vähän liikkuvia osia	- kiertoaineen kiertyminen - korroosio

Kaupallisesti saatavilla olevilla korkealämpötilalämpöpumpuilla on erilaiset toiminta-alueet ja -lämpötilat. Kuitenkin toiminta-alueet menevät lomittain tietyissä tekniikoissa, minkä takia on useampia tekniikoita, jotka soveltuvat tiettyyn tarkastelukohteeseen. Parhaimman tekniikan valitsemiseksi tuleekin huomioida taloudellisuus, tekniset ominaisuudet sekä prosessin omat kriteerit.

Korkealämpötilalämpöpumpuille soveltuvia sovelluskohteita ovat kemian-, metalli-, paperi-, mineraali- ja ruokateollisuudessa. Tyypillisiä prosesseja missä korkealämpötilalämpöpumppuja voidaan hyödyntää ovat kuivaus-, keitto-, valkaisu-, tislauksen- ja haihdutusprosessit, joista yleisin on kuivausprosessi. Lisäksi lämpöpumppuja voidaan hyödyntää pastöroinnissa, suolan poistossa, sterilisoinnissa sekä kuumavalssauksessa. (Berntsson & Franck 1997; Costa et al. 2009; Bakhtiari et al. 2010; Koninckx 2013; IEA 2014; Liew & Walmsley 2016; Foslie 2017) Potentiaalia on paljon niin kuin myös prosessivaihtoehtoja, jolloin jokaiseen tarkastelukohteeseen tulisi löytyä soveltuva tekniikka taloudellisesti.

5.2 Tarkastelukohde

Tarkastelukohteen kuivatusprosessiin sijoitettava MVR-lämpöpumpun takaisinmaksuajaksi laskettiin 3,3 vuotta, kun teollisuuden sähkönhinta on 7,5 snt/kWh ja kattilan polttoaineena on metsähake. Kuvaan 13 on laskettuna eri polttoaineiden ja sähkönhintojen vaikutuksia tarkastelukohteen takaisinmaksuajan suuruuteen.



Kuva 14: Takaisinmaksuaika teollisuuden sähkönhinnan funktiona eri polttoaineilla

Kuvasta 13 nähdään, että mikäli lämmöntuotannon polttoaineena käytetään kallista polttoainetta, kuten maakaasua tai kivihiiltä, ei teollisuuden sähkönhinnan nousu vaikuta lähes ollenkaan takaisinmaksuajan suuruuteen. Vastaavasti jos korvattava polttoaine on halpaa, kuten jyrsinturve, sähkönhinnan heilahtelut vaikuttavat suuresti takaisinmaksu-aikaan ja investoinnin kannattavuuteen.

Tarkastelukohteen huoltokustannukset eivät vaikuta lähes ollenkaan takaisinmaksuajan suuruuteen. 4.4. alaluvussa laskettiin takaisinmaksuajaksi 3,3 vuotta huoltokustannuksilla 633 €/MW, mikä vastaa noin 11 000 € vuodessa. Mikäli huoltokustannus olisi 10 000 €/MW, mikä vastaa 172 000 € vuodessa, saataisiin takaisinmaksuajaksi 3,5 vuotta.

Korkealämpötilälämpöpumpuinvestointi on suuri verrattuna kaasu tai öljykäyttöisiin kattiloihin (Fleiter et al. 2016), joten jotta investointi olisi kannattava takaisinmaksuaikaa tarkasteltaessa, tulisi käyttökustannuksien olla matalat ja säästöt suuret. Usein teollisuus vaatii investoinnilta takaisinmaksuajan olevan alle 2 (Wolf et al. 2012) tai 3 vuotta (IEA 2014) eikä täten tutkielman tarkastelukohteen investointi tapahtuisi valituilla alkuarvoilla. Mikäli kattilan polttoaineena olisi maakaasu tai kivihiili, kuten suuressa osassa maailmaa on (IEA 2018), olisi investoinnin takaisinmaksuaika alle 2 vuotta (kuva 13). Muita tapoja

laskea takaisinmaksuaikaa on esimerkiksi valita matalampi lämpötilanosto, jolloin lämpöpumpun COP-arvo nousee sekä pitää lämpöpumppua käynnissä mahdollisimman pitkään.

Berntssonin & Franckin (1997) mukaan MVR- ja TVR-tekniikoilla on lyhyimmät takaisinmaksuajat verrattuna muihin tekniikoihin, ja ovat kannattavia investointeja, kun polttoaineiden hinnat ovat korkealla. Bengtsson et al. (2002) mukaan MVR- ja TVR-tekniikoiden hyödyntäminen paperiteollisuudessa tuorehöyryn säästämiseksi on taloudellisesti kannattavaa, sillä takaisinmaksuajaksi saatiin alle 2 vuotta eri vaihtoehdoille. Bakhtiarin et al. (2010) mukaan myös absorptiolämpöpumput ovat kannattavia paperi- ja massateollisuudessa valkaisu-prosessin hukkalämmön hyödyntämisestä. Takaisinmaksuajan pienentäminen on kuitenkin tärkeää, jotta myös pienemmän kokoluokan teolliset yritykset ryhtyvät investoimaan (Wen-Quan et al. 2016).

Mikäli investoinnilla olisi jäännösarvo, esimerkiksi 10 000 €, olisi se 10 vuoden päästä 144 €/MW. Verrattaessa jäännösarvo säästöihin, huomataan sen olevan kokoluokaltaan pieni, eikä vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Korkealämpötilalämpöpumpuilla on muitakin haasteita kuin takaisinmaksuaika, jotta niiden käyttö teollisuudessa lisääntyisi. Yksi näistä on tiedonpuute (Wolf et al. 2012; IEA 2014). Tiedosta on pulaa niin pumpun sovelluskohteen tarkoissa ongelmissa, kuin asentajan tietopankissa, sillä hänen tulisi olla ajan tasalla korkealämpötilalämpöpumpputekniikan kehityksestä sekä tuntea sovelluskohteen prosessin ominaisuudet. Yksi ratkaisu tähän on kouluttaminen. Lisäksi haasteita tuovat asiakkaat, jotka valitsevat mieluummin hyvin todistetun, perinteisen tekniikan, uuden sijasta (Wolf et al. 2012). Tätä varten tietoa ja esimerkkejä tulisi julkaista enemmän. Esimerkiksi EHPA (2017) julkaisee esimerkkejä onnistuneista lämpöpumppuprojekteista, joista harva ylittää tässä työssä määriteltyä 100 °C:ta. Wolfin et al. (2012) ja IEA:n (2014) mukaan yrityksillä ei ole tarkkaa tietoa eri prosessien tarkoista energiavaatimuksista. Tämän seurauksena on lähtökohtaisesti hankalampaa investoida lämpöpumppuun, ennen kuin mittauksia ja selvityksiä on suoritettu. Saksassa on vuodesta 2013 lähtien vaadittu yrityksiltä energiahallintaa verovähennyksien saamiseksi, mikäli yritys kuluttaa paljon energiaa (Wolf et al. 2012).

Todistetusti korkealämpötilalämpöpumpuilla on paljon potentiaalia, jota ei vielä hyödynnetä teollisuudessa. Yksi tapa kasvattaa energiatehokkuusinvestointeja on muuttaa nykyistä poliittista tilannetta, kuten lisätä fossiilisten polttoaineiden hintoja ja laskea vastavasti veroja ympäristöystävällisemmiltä vaihtoehdoilta. Lisäksi energiatehokkuusinvestoinneille voitaisiin tarjota matalia korkotasoja ja lainatakauksia.

Tekniseltä kannalta katsottuna kaupallisesti on saatavissa korkealämpötilalämpöpumpuja, jotka tuottavat yli 100 asteen poistumislämpötiloja. Käynnissä on paljon tutkimusprojekteja liittyen eri tekniikoihin, kiertoaineisiin, kompressorityyppeihin ja lämmityskapasiteettiin. (Arpagaus et al. 2018) Esimerkiksi Rotrex on kehittänyt öljyttömän turbokompressorin matalilla käyttökustannuksilla, jota he hyödyntävät MVR- ja CCC-tekniikassa. DryFiciency projektilla, jota Euroopan Unioni on rahoittamassa, on 3 kokeilua menossa MVR- ja CCC-tekniikoiden hyödyntämisestä eri kuivatusprosesseissa, joihin lämpöpumput tuottavat 150 – 160 °C lämpöä. (DryFiciency 2020) Suomessa vuonna 2017 energiatehokkuuteen liittyviin tutkimusprojekteihin oli varattuna 88 miljoonaa euroa (IEA 2018), mikä oli suurin tutkimusbudjetti energiatekniikan saralla.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia korkealämpötilalämpöpumppuja tekniseltä ja taloudelliselta kannalta, sekä selvittää korkealämpötilalämpöpumpuille soveltuvia sovelluskohteita. Tavoitteena oli myös valita sovelluskohteista prosessi ja tutkia lämpöpumpuinvestoinnin kannattavuutta kohteessa takaisinmaksuajan ja annuiteettimenetelmän avulla. Tässä tutkielmassa korkealämpötilalämpöpumppu määriteltiin pumpuksi, jonka tuottama ulostulolämpötila on vähintään 100 °C.

Teollisuus on suurin lämpöenergiankuluttaja ja globaalisti lämmöntuotannossa käytetään eniten maakaasua ja kivihiiltä, huolimatta niiden aiheuttamista merkittävistä CO₂ päästöistä. Jotta ilmastonmuutosta saataisiin hillittyä, tulisi teollisuuden energiatehokkuutta kasvattaa esimerkiksi ottamalla hukkalämmöt hyötykäyttöön korkealämpötilalämpöpumppujen avulla. Korkealämpötilalämpöpumppu voi jalostaa hukkalämpöä teollisuuden tarpeisiin, jolloin primäärienergian tarve vähenee.

Yksi tapa jaotella korkealämpötilalämpöpumpputekniikoita on systeemin mukaan avoimeen ja suljettuun. Avoimessa systeemissä energia ja materia voivat kulkea systeemin rajojen yli ja näitä tekniikoita ovat MVR ja TVR. Suljetussa systeemissä vain energia voi kulkea rajojen yli ja tähän lukeutuvat tekniikat sorptiosysteemit sekä CCC. Taulukossa 5 on tarkempi yhteenveto tekniikoista ja niiden ominaisuuksista.

Teollisuuden hukkalämpöä voidaan ottaa hyötykäyttöön korkealämpötilalämpöpumpuilla eri teollisuudenaloilla, kuten kemian-, metalli-, paperi-, mineraali- ja ruokateollisuudessa. Suomessa suurin hukkalämmön hyödyntämispotentiaali lämpötilavälillä 100 – 200 °C on paperi- ja massateollisuudessa, joka vastaa 1,7 TWh vuodessa. Tyypillisiä prosesseja missä korkealämpötilalämpöpumppuja voidaan hyödyntää ovat kuivaus-, keitto-, valkaisu-, tislauksen- ja haihdutusprosessit. Lisäksi lämpöpumppuja voidaan hyödyntää pastöroinnissa, suolan poistossa, sterilisoinnissa sekä kuumavalssauksessa. Sovelluskohteeseen tulevaa lämpöpumpputekniikkaa ei tulisi valita puhtaasti teknisiä taulukkoarvoja vertailemalla, vaan tulisi huomioida myös investoinnin suuruus ja käytön sekä ylläpidon kustannukset, jotka ovat prosessikohtaisia. Prosessiin soveltuvin tekniikka löytyy, kun vaihtoehtoisten tekniikoiden investointikustannukset kyseisessä prosessissa lasketaan ja valitaan se tekniikka, jolla on lyhin takaisinmaksuaika.

Työssä valikoitui tarkastelukohteeksi paperi- ja massateollisuuden kuivatusprosessi, joka kuluttaa suurimman osan lämpöenergiasta paperikoneella. Taulukossa 3 tarkaste-

luokohteeseen valitun lämpöpumpun tiedot. Investointikustannus oli 500 k€/MW, vuosittaiset säästöt 151 395 €/MW, huolto 633 €/MW, sähkönhinta 7,5 snt/kWh ja kattilan polttoaineen hinta 21,19 €/MWh. Takaisinmaksuajaksi saatiin 3,3 vuotta ja annuiteettimenetelmällä kymmenessä vuodessa säästöjä kertyy 674 k€/MW. Takaisinmaksuajan tulisi olla vähintään alle 3 vuotta, joissain paikoissa jopa alle 2, jotta teollisuuden yritys tekisi investoinnin. Tarkastelukohteen investoinnin takaisinmaksuaika on siis liian suuri. Takaisinmaksuaika on altis sähkönhinnan muutoksille, mikäli käytetty polttoaine on halpaa. Jos tarkastelukohteeseen olisi siis valittu kallis polttoaine, kuten maakaasu tai kivihiili, olisi investointi ollut kannattava. Huollon suuruusluokka on pieni, eikä täten vaikuta merkittävästi syntyviin vuosittaisiin säästöihin. Annuiteettimenetelmän mukaan investointi olisi kannattava riippumatta polttoaineen hinnasta.

Syitä miksi korkealämpötilalämpöpumppuja ei ole vielä yleisesti käytössä teollisuudessa on monia: investoinnin kallis hinta, tiedon puute, asiakkaiden epävarmuus sekä yrityksen vähäinen tieto prosessien energiankulutuksesta. Takaisinmaksuajan suuruus riippuu investoinnin kalliista hinnasta, jota saataisiin alaspäin, mikäli korkealämpötilalämpöpumppuilla olisi massatuotantoa. Tiedon puutteella tarkoitetaan niin asiantuntevien asentajien pientä lukumäärää, kuin vähäistä tietoa onnistuneista korkealämpötilalämpöpumppuinvestoinneista. Näihin ratkaisuihin olisivat asentajien koulutus sekä onnistuneiden asennusten julkaisu ja tiedottaminen laajemmin. Näistä jälkimmäinen vaikuttaisi rohkaisevasti asiakkaiden epävarmuuteen uutta tekniikkaa kohten. Myös poliittisella päätöksenteolla voidaan kannustaa yrityksiä energiatehokkuusinvestointeihin esimerkiksi verotuksen ja lainantakauksen muodoissa.

Korkealämpötilalämpöpumppuilla on paljon potentiaalia, jota ei ole vielä hyödynnetty. On kuitenkin selkeitä merkkejä kiinnostuksen kasvusta, niin Euroopan Unionin tasolta yksittäisiin yrityksiin, jotka haluavat panostaa energiatehokkuuteen ja ympäristöystävällisyyteen. Kehitystyötä, poliittista päätöksentekoa ja julkaisuja tulisi tehdä jatkossakin, jotta tietous tekniikasta leviäisi ja hukkalämpöjen potentiaali saataisiin hyötykäyttöön. Tekniikoiden kehittäminen ja tutkiminen, niin kiertoaineista ja kompressoreista itse kokonaisuuteen on tärkeää ilmastonmuutoksenkin kannalta. Aiheita tulisi tutkia enemmän, eikä pelkästään yhden prosessin tasolla vaan ohjata tutkimusta monimutkaisempiin energianhallintamenetelmiin, jotta fossiilisista polttoaineista voidaan joskus luopua, eikä pelkästään vähentää riippuvuutta niistä.

LÄHTEET

ALUEHALLINTAVIRASTO (2012), *Päätös UPM-Kymmene Oyj Kaipolan tehtaan ympäristöluvan lupamääräysten tarkistuksesta*, Jämsä, Aluehallintavirasto Länsi- ja Sisä-Suomi

ARPAGAUS, C., BLESS, F., UHLMANN, M., SCHIFFMANN, J. & BERTSCH, S.S. (2018), *High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials*.

BAKHTIARI, B., FRADETTE, L., LEGROS, R. & PARIS, J. (2010), *Opportunities for the integration of absorption heat pumps in the pulp and paper process*.

BENGTSSON C., NORDMAN R. & BERNTSSON T. (2002), *Utilization of excess heat in the pulp and paper industry – a case study of technical and economic opportunities*, Department of Heat and Power Technology, Chalmers University of Technology Sweden

BERNTSSON T. & FRANCK P. (1997), *Learning from experiences with Industrial Heat Pumps*, CADDET.

BUSINESSOULU (2020), *Investoinnin kannattavuus*, saatavissa: <https://www.yritystulkki.fi/fi/alue/oulu/aloittava-yrittaja/suunnittelu/taloussuunnitelmat/investoinninkannattavuus/> [viitattu: 2.4.2020]

CNIM (2016), *Technical datasheet – Absorption Machines*, CNIM Industrial systems, cnim.com, saatavissa: https://cnim.com/sites/default/files/2019-05/technical-datasheet_CNIM_absorption_machines.pdf [viitattu: 29.4.2020]

COSTA A., BAKHTIARI B., SCHUSTER S. & PARIS J. (2009), *Integration of absorption heat pumps in a Kraft pulp process for enhanced energy efficiency*, École Polytechnique Montréal Kanada

DRYFICIENCY (2020), *High Temperature Industrial Heat Pumps*, saatavissa: <http://dry-f.eu/> [viitattu: 29.4.2020]

DUUNITORI (2020), *Huoltoinsinööri palkka*, saatavissa: <https://duunitori.fi/palkat/huoltoinsinööri> [viitattu: 15.4.2020]

EHPA (European heat pump association) (2017), *16 examples of successful heat pump projects!*, EHPA ja Commercial Heat Pump Working Group, ehpa.org, saatavissa: <https://www.ehpa.org/about/news/article/16-examples-of-successful-heat-pump-projects/> [viitattu: 29.4.2020]

EISENTRAUT A. & BROWN A. (2014), *Heating without global warming – Market Developments and Policy Considerations for Renewable Heat*, International Energy Agency (IEA)

EUROSTAT, Energy database (2018), Saatavissa: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database> [viitattu: 28.2.2020]

EVATHERM (2020), *Technology – MVR*, saatavissa: <http://www.evatherm.com/en/technology/mvr.php> [viitattu: 22.4.2020]

FLEITER T., STEINBACH J., RAGWITZ M., ARENS M., AYDEMIR A., ELSLAND R., FRASSINE C., HERBST A., HIRZEL S., KRAIL M., REHFELDT M., REUTER M., STEINBACH J., DENGLER J., KÖHLER B., DINKEL A., BONATO P., AZAM N., KALZ D., TORO F., GOLLMER C., REITZE F., SCHÖN M., JOCHEM E., TUILLÉ F., FOVEZ G., LESCOT D., HARTNER M., KRANZL L., MÜLLER A., FOTHUBER S., HIESL A., HUMMEL M., RESCH G., AICHINGER E., FRITZ S., LIEBMANN L., TOLEIKYTÉ A., REITER U., CATENAZZI G., JAKOB M. & NAEGELI C. (2016), *Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables) – Final report*, European Commission, TU Wien, Observ'ER, Fraunhofer ISE, TEP, IREES & Fraunhofer ISI

FOSLIE S. (2017), *Possibilities for energy recovery by steam compression cycles*, SINTEF Energy Research.

GIG KARASEK (2020), *Thermal Vapor Recompression – TVR*, saatavissa: <https://www.gigkarasek.at/en/portfolio/evaporationstechnology/tvr/> [viitattu: 13.3.2020]

HEAT PUMP ASSOCIATION (HPA) (2020), *How do heat pumps work?*, saatavissa: <https://www.heatpumps.org.uk/consumers/heat-pump-technical-information/the-vapour-compression-cycle/> [viitattu: 27.3.2020]

HEIKKILÄ I. & KIURU T. (2014), *Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Ylijäämälämpöenergia-analyysit*, Motiva Oy Helsinki

HPT MAGAZINE (2019), *Industrial Heat Pumps – Good examples from ongoing Annex*, saatavissa: https://issuu.com/hptmagazine/docs/hpt_magazine_no2_2019 [viitattu: 7.4.2020]

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2018), *Data and statistics*, saatavissa: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=FINLAND&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=Heat%20generation%20by%20source> [viitattu: 6.4.2020]

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (2014), *Annex 35 Application of Industrial Heat Pumps: Final Report*, IEA Heat Pump Centre, Sweden

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (1982), *Heat Pump Systems: A Technology Review*, International Energy Agency (IEA) ja Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD)

KISS A. & INFANTE FERREIRA C. (2016), *Heat Pumps in Chemical process industry*, CRC Press

KNOWPAP (KNOWPAP – PAPERINVALMISTUKSEN OPPIMISYMPÄRISTÖ) (2020), *Lämmöntalteenotto*, Prowledge Oy & AEL, saatavilla: http://www.knowpap.com/extranet/suomi/paper_technology/paper_machine/drying_section/20_heat_recovery/frame.htm [viitattu: 28.3.2020]

KNOWPULP (KNOWPULP – SELLUNVALMISTUKSEN OPPIMISYMPÄRISTÖ) (2020), *Energiataseet*, Prowledge Oy ja AEL, saatavilla: http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/balances/4_energy_balances/frame.htm [viitattu: 28.3.2020]

KONINCKX F. (2013), *Waste Heat Utilization by Application of Heat Pumps in CHP Plants*.

KOSMADAKIS, G. (2019), *Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries*, Applied Thermal Engineering

LIEW P. & WALMSLEY T. (2016), *Heat pump integration for total site waste heat recovery*, Chemical Engineering Transactions, 52

METSÄTEOLLISUUS RY (2020), *Massa- ja paperiteollisuus, tilastot*, saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/massa-ja-paperiteollisuus/> [viitattu 28.3.2020]

NELLISEN P. & WOLF S. (2015), *Heat pumps in non-domestic applications in Europe: Potential for an energy revolution - PDF Free Download*, Saatavissa: <https://docplayer.net/41987374-Heat-pumps-in-non-domestic-applications-in-europe-potential-for-an-energy-revolution.html> [viitattu: 23.1.2020].

OPTEON (2020), *Opteon™ MZ Fluid for Thermal Management*, saatavissa: <https://www.opteon.com/en/products/thermal-management/fluid> [viitattu: 17.3.2020]

ORR BRYAN (2019), *What is temperature glide?*, saatavissa: <https://www.hvacrschool.com/what-is-temperature-glide/> [viitattu: 13.4.2020]

PAPAPETROU M., KOSMADAKIS G., CIPOLLINA A., LA COMMARE U. & MICALE G. (2018), *Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country*, Applied Thermal Engineering

TAEHONG S., KYOUNG K., SANGJO H. & KYUNG K. (2014), *Thermodynamic Analysis on Hybrid Turbo Expander – Heat Pump System for Natural Gas Pressure Regulation*, Journal of the Korean Institute of Gas

TILASTOKESKUS (2020), *Tuontipolttoaineiden hinnoissa laskua, kotimaisten polttoaineiden hinnoissa nousua vuonna 2019*, saatavissa: https://www.stat.fi/til/ehi/2019/04/ehi_2019_04_2020-03-12_tie_001_fi.html [viitattu: 15.4.2020]

TILASTOKESKUS (2020), *Liitetaulukko 2. Energian hintoja lämmöntuotannossa joulukuussa 2019*, saatavissa: https://www.stat.fi/til/ehi/2019/04/ehi_2019_04_2020-03-12_tau_002_fi.html [viitattu: 15.4.2020]

TILASTOKESKUS (2020), *Liitekuvio 5. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin*, saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2019/04/ehi_2019_04_2020-03-12_kuv_005_fi.html [viitattu: 20.4.2020]

VAN DE BOR D.M. & INFANTE FERREIRA C. (2013), *Quick selection of industrial heat pump types including the impact of thermodynamic losses*, Process & Energy Department, Delft University of Technology

VIKING HEAT ENGINES (2020), *New industrial heat pump produces heat in the very high temperature range*, saatavissa: <http://www.vikingheatengines.com/news/new-industrial-heat-pump-produces-heat-in-the-very-high-temperature-range> [viitattu: 17.3.2020]

VIRTANEN S. (2012), *MT: Suomessa enää yksi sanomalehtipaperia tuottava kone*, Tekniikka & Talous, saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/mt-suomessa-ena-yksi-sanomalehtipaperia-tuottava-kone/c7446e43-fb9e-3c5b-9655-d71cf59bfbb9> [viitattu: 15.4.2020]

WOLF S., FAHL U., BLESLE M., LAMBAUER J. & VOß A. (2012), *Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers*, Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), Universität Stuttgart.

WEN-QUAN T., YA-LING H., ZHANG H. & ZHANG J. (2016), *A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China*, Applied Energy.