

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

ABSORPTIOLÄMPÖPUMPPU TULEVAISUUDEN KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Lappeenrannassa 7.10.2021

Julia Fabritius

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Julia Fabritius

Absorptiolämpöpumppu tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmässä

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja ja ohjaaja: Tero Tynjälä

28 sivua, 4 kuvaa ja 2 taulukkoa

Avainsanat: absorptiolämpöpumppu, kaukolämpöjärjestelmä, bioenergia

Absorptiolämpöpumppusovelluksia on teollisessa käytössä vielä melko vähän, mutta kaukolämpöjärjestelmän toiminnalliset muutokset tulevaisuudessa voivat edesauttaa niiden yleistymistä. Myös energiajärjestelmän pirstaloituminen sekä sähkön hintavaihteluriskin kasvaminen lisäävät monimuotoisten energiantuotantoratkaisujen tarvetta. Fossiilisten polttoaineiden energiakäytön alasajoa vauhdittaa päästökaupan nopea hinnannousu, mikä lisää biopolttoaineiden osuutta lämmöntuotannossa.

Absorptiolämpöpumppu toimii termisellä energialla. Lämpökäyttöiset koneistot voidaan jakaa suoraikäyttöisiin ja epäsuorasti käytettäviin koneistoihin. Absorptiolämpöpumpun kiertoaineena toimii absorbentti-kylmäaineseos, ja työtä systeemille tekee imeytin-kiehutinlaitteisto. Tämän lisäksi lämpöpumppuosassa on lauhdutin, paisuntaventtiili ja höyrystin. Absorptiolämpöpumpun avulla on mahdollista hyödyntää energiantuotannon, teollisuuden ja yhteiskunnan ylijäämälämpövirtoja.

Absorptiolämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuden määrittämisessä tulee huomioida sekä suorat investointikustannukset että käytönaikainen kustannusrakenne. Ne voivat kohteesta riippuen vaihdella suurestikin. Investoinnin kannattavuuden kannalta suurin vaikuttava tekijä on lämmön- ja energianlähteen saatavuuden ajoittuminen kulutushuippujen yhteyteen.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	TULEVAISUUDENNÄKYMÄT JA PÄÄSTÖVÄHENNYSTOIMET.....	6
2.1	Suomessa	6
3	ABSORPTIOLÄMPÖPUMPPU	8
3.1	Yleistä.....	8
3.2	Absorptiolämpöpumpun komponentit ja toimintaperiaate	9
3.3	Absorptiolämpöpumpun suorituskyky	11
3.4	LiBr-H ₂ O liuos ja sen ominaisuudet.....	12
4	ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN ROOLI KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ.....	13
4.1	Prosessien ylijäämälämpö ja sen hyödyntäminen	13
4.2	Eri kokoisten kaukolämpöjärjestelmien ominaispiirteitä	16
4.3	Olemassa olevat laitokset	17
4.4	Hyödyt, haitat ja rajoitteet	19
5	ABSORPTIOLÄMPÖPUMPPUINVESTOINNIN KANNATTAVUUS	21
5.1	Kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä	21
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
7	YHTEENVETO	25
	LÄHTEET	26

LIITTEET

Liite 1. Absorptiolämpöpumpuinvestoinnin kannattavuuslaskelma

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

p	paine	bar, Pa
P	teho	W, J/s
R	ainekohtainen kaasuvakio	J/kgK
T	lämpötila	°C, K

Kreikkalaiset

ϕ	lämpöteho	W, J/s
--------	-----------	--------

Lyhenteet

COP	Coefficient Of Performance, lämpökerroin
CHP	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä esitellään absorptiolämpöpumpun toiminta, käyttökohteet ja potentiaali tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmissä. Työtä on rajattu siten, että siinä käsitellään absorptiolämpöpumppuja vain lämpövoimalaitosten yhteydessä. Puhuttaessa lämmöstä tarkoitetaan systeemissä olevaa lämpöenergiaa, ja lämpötilasta puhuttaessa tarkoitetaan numeerisesti mitattavissa olevaa kappaleen sisältämän lämpöenergian määrää.

Kaukolämpöjärjestelmän tulevaisuudennäkymiä on tarkasteltu Suomessa, nykytilaa ja absorptiolämpöpumpun roolia järjestelmässä yleisesti ja esimerkkisovellukset ovat Suomesta sekä muualta Euroopasta.

Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate on sama kuin perinteisellä, kompressorikäyttöisellä lämpöpumpulla: matalassa lämpötilatasossa olevan lämpöenergian siirtäminen korkeampaan lämpötilatasoon. Sitä voidaan käyttää sekä pienessä mittakaavassa kiinteistöjen lämmittämiseen ja isommassa mittakaavassa teollisuuden prosesseissa lämmöntuottoon, esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa. Tässä työssä tarkastellaan kaukolämpöveden tuottamista polttoaineenaan biomassaa käyttävän yhteistuotantolaitoksen yhteydessä olevalla absorptiolämpöpumpulla, joka käyttää lämmönlähteenään savukaasujen hukkalämpöä ja jonka kiertoineena toimii LiBr-vesi -liuos.

2 TULEVAISUUDENNÄKYMÄT JA PÄÄSTÖVÄHENNYSTOIMET

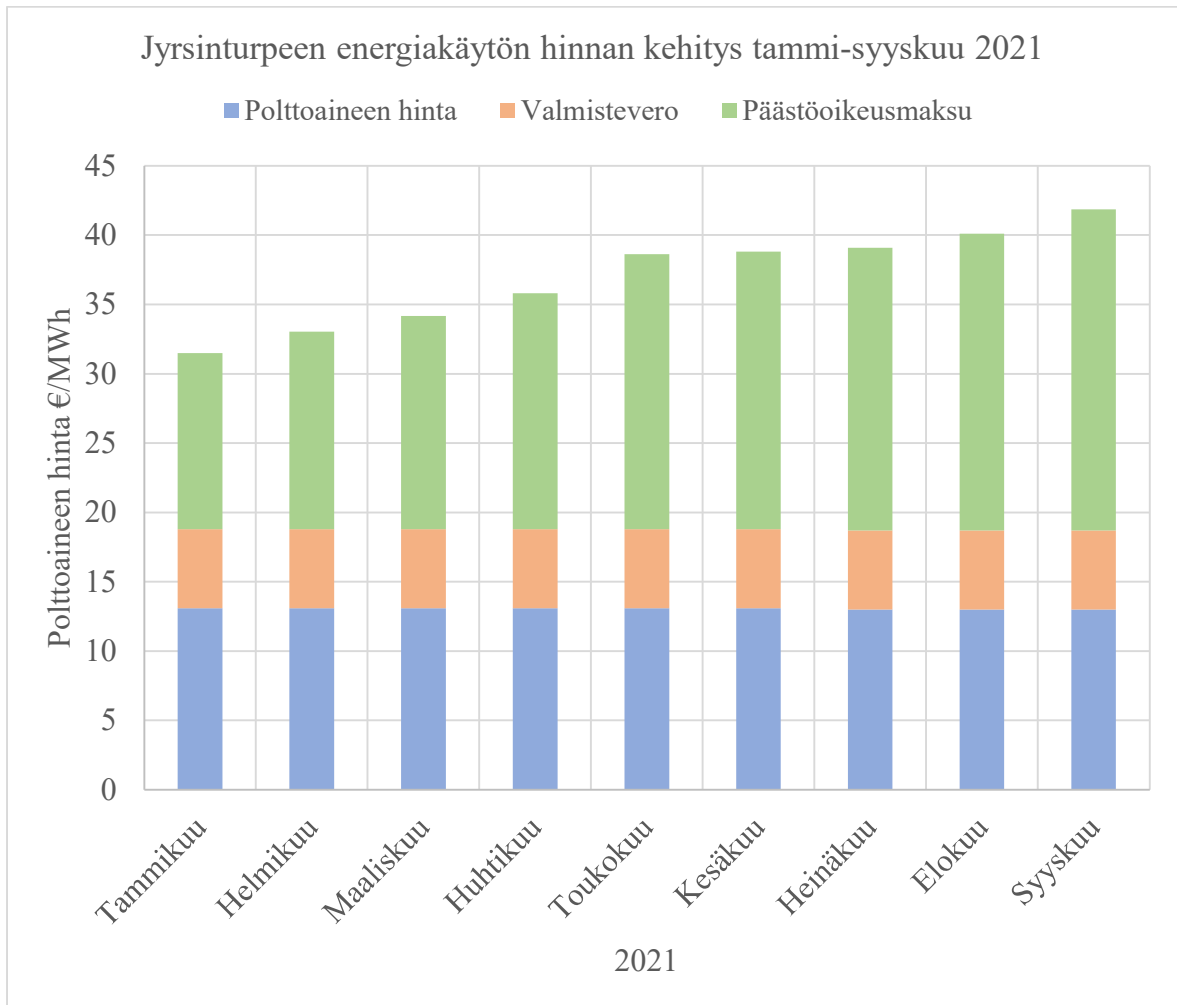
Päästövähennystoimenpiteiden laatuun ja määrään vaikuttaa vaaditut päästövähennykset yhteiskunnassa. Suomea sitoo kansainväliset ilmastositoumukset, EU:n päästövähennystavoitteet sekä kansalliset päästötavoitteet.

2.1 Suomessa

Kaukolämmön päästövähennystoimista merkittävimpiä ovat kivihiilen korvaaminen maakaasulla yhteistuotannossa ja kivihiilen energiakäytön kieltäminen vuonna 2029, turpeen energiakäytön puolittaminen vuoteen 2025 mennessä, biopolttoaineiden käytön lisääminen sekä lämpöpumppujen hyödyntämisen kasvattaminen. Kaukolämpöjärjestelmän toiminnallisuuden muutos on myös tarpeen. Tähän tarpeeseen vastaa esimerkiksi matalan lämpötilatason kaukolämpöjärjestelmien kehittäminen, kaukolämpöverkon älykäs, kaksisuuntainen käyttö sekä kaukolämpöverkkojen laaja yhdistäminen. Erityisesti matalan lämpötilatason kaukolämpöjärjestelmän kehittäminen laajentaa lämpöpumppujen hyödyntämismahdollisuuksia. Matalan lämpötilatason järjestelmän lämpötilataso on 50...80 °C, ja ne soveltuvat täten uudisrakennusalueille, sillä niiden energia- ja rakentamistehokkuusvaatimus (rakentamistehokkuus: kaavassa sallittu rakennusala / tontin pinta-ala) on korkeampi kuin perinteisten kaukolämpöjärjestelmien. Matalan lämpötilatason järjestelmät mahdollistavat hajautettua, kaksisuuntaista tuotantoa sekä jätelämmön ja uusiutuvien energialähteiden laajempaa hyödyntämistä kaukolämmöntuotannossa. (Sitra, 2015)

Turve on ollut 2010- ja 2020-lukujen Suomessa merkittävä lämmityspolttoaine. Sen käyttökustannukset ovat kuitenkin nousseet merkittävästi verojen ja päästöoikeuskustannusten moninkertaistumisen myötä vuodesta 2017 vuoteen 2021. Turpeen verotusta on lisätty tasaisesti vuosittain siten, että 1.1.2021 alkaen se on ollut 5,7 €/MWh. Päästöoikeuden hinta tammikuussa 2021 oli 33,40 €/tCO₂, ja syyskuun 2021 aikana se on ollut keskimäärin yli 60,91 €/tCO₂. (Energiavirasto, 2021) Turpeen päästöoikeuskustannus oli tammikuussa 12,7 €/MWh, eli polttoaineen hinnasta päästöoikeusmaksuja ja veroja oli yhteensä 18,4 €/MWh. (Energiateollisuus, 2021) Nyt syyskuussa päästöoikeuden hinta turpeelle on jo 23,16 €/MWh. Valmistevero on säilynyt samana, joten päästöoikeusmaksujen ja verojen osuus polttoaineen hinnasta on jo 28,86

€/MWh. Tällä on merkittävä vaikutus energiantuotannon kustannuksiin, sillä polttoaineen osuus hinnasta pienenee koko ajan. Kuvassa 1 esitetty jyrsinturpeen energiakäytön hinnan kehittyminen tammikuusta syyskuuhun 2021.



Kuva 1. Jyrsinturpeen energiakäytön kustannusjakauman kehitys vuonna 2021 välillä tammikuu-syyskuu. (Energiateollisuus, 2021; Tilastokeskus, 2021)

Graafista voidaan nähdä, että polttoaineen kokonaishinta on noussut yli kymmenen euroa megawattituntia kohden tammikuusta syyskuuhun, ja hinnannousu johtuu vain päästöoikeusmaksujen rajusta noususta. Valmistevero ja polttoaineosuus hinnasta on pysynyt tasaisena, valmisteveron ollessa 5,70 €/MWh ja polttoaineen hinta valmistupaikalla ensimmäisellä vuosipuoliskolla 13,1 €/MWh ja toisella 13,0 €/MWh. Päästöoikeuden hinnan nousu vauhdittanee energiantuotannon irtautumista turpeen käytöstä, ja turvetta korvataan pääsääntöisesti biomassalla.

3 ABSORPTIOLÄMPÖPUMPPU

3.1 Yleistä

Lämpöpumpun tarkoituksena on siirtää lämpöenergiaa matalammasta lämpötilatasosta korkeammalle lämpötilatasolle. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö ei voi siirtyä itsestään lämpötilatasoa vasten eli matalammasta lämpötilasta korkeampaan, vaan siihen vaaditaan työtä. Tästä juontaa nimitys lämpöpumppu, koska työkierto muistuttaa tavallisen pumpun kiertoa (väliaineen siirtämistä luontaisen kulkusuunnan vastaisesti tekemällä prosessiin työtä). Lämpöpumpputekniikan käytetyin sovellus on nestemäisten aineiden höyrystymiseen perustuva prosessi. Käyttöenergiana voidaan tällöin käyttää sähköä (kompressoripumppu) tai termistä energiaa (sorptioprosessi). Kompressoripumpun lämpökerroin voi helposti olla 3-4, mutta sorptioprosessin lämpökerroin ei voi koskaan teoreettisesti kohota korkeammaksi kuin 2. (Wikstén et al. 1980)

Absorptiolämpöpumppu on niin sanottu lämpökäyttöinen koneisto, eli se toimii suoraan termisellä energialla. Absorptiolämpöpumppukoneistoon kuuluu pieni prosessipumppu, joka toimii sähköllä. Tästä huolimatta sähkönkulutus jää pieneksi, minkä vuoksi se sopii hyvin sellaisiinkin kohteisiin, joissa sähköä ei kyetä tuottamaan omakustannehintaan tai sen hintavaihteluriski on suuri. Absorptiolämpöpumput soveltuvat lämmön talteenottoon, lämpötilatason nostoon ja jäähdytykseen. Niissä on vähän liikkuvia osia, ne ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja kestäviä, ja niiden tehonsäätö on portaaton 0...100 %. Absorptiolämpöpumpun hyötysuhde pysyy tasaisena osakuormillakin. Sen ominaiskustannus on 70...100 €/kW. Absorptiolämpöpumppujen ominaiskustannukset pysyvät vakioina laitoksen koosta riippumatta. (Motiva, 2014)

Absorptioprosessissa työaineena on absorbentti-kylmäainepari, esimerkiksi LiBr-vesi tai ammoniakki-vesi. Absorptioprosessin fyysisiä pääosia ovat keitin, höyrystin, lauhdutin ja imeytin. Sen tavallisin käyttökohde on kaukolämpöverkon veden lämmitys siten, että palaavasta vedestä otetaan lämpöä talteen, minkä jälkeen viilentynyt vesi johdetaan lämmönlähteeseen (esimerkiksi savukaasuista lämpöä talteenotettaessa savukaasulauhduttimiin), josta se palaa lämmentyneenä absorptiolämpöpumpulle, ja talteenotetulla lämpöenergialla lämmitetään kaukolämmön menovettä. 'Kompressorina' eli generaattoriosana toimii kiehutin-imeytinlaitteisto, jolla kierto tulistetaan. (Schossig, 2014)

3.2 Absorptiolämpöpumpun komponentit ja toimintaperiaate

Absorptiolämpöpumpun käyttöenergiana voi toimia höyry alhaisessa painetasossa 1...9 bar, kuuma vesi lämpötilatasossa +65...+150 °C tai esimerkiksi teollisuuskäyttöisten moottorien pakokaasut korkeassa lämpötilatasossa +250...+700 °C. (Calefa, 2021) Absorptiolämpöpumppu kuuluu niin kutsuttuihin lämpökäyttöisiin koneistoihin, jotka voidaan jakaa kahteen osaan: suorakäyttöiset (direct fired) tai epäsuorasti ajettavat (indirect fired) koneistot. Lämpöpumppu on suorakäyttöinen koneisto, jos polttoainetta syötetään suoraan lämpöpumpun käyttöön, ja epäsuora mikäli energialähteenä käytetty lämpöenergia tulee esimerkiksi voimalaitoksen väliottohöyrynä, eli polttoainetta ei polteta vain ja suoraan lämpöpumpun käyttöä varten. (Schossig, 2014)

LiBr absorptiolämpöpumpun väliaineena toimii litiumbromidi-vesi liuos, jossa litiumbromidi toimii absorbenttina ja vesi kylmäaineena. Absorptiolämpöpumppu (tässä osiossa vastedes viitataan vain termillä lämpöpumppu) koostuu kiehuttimesta (generator/desorber, riippuen lähteestä), lauhduttimesta (condenser), höyrystimestä (evaporator), imeyttimestä (absorber), liuoslämmönsiirtimestä (solution heat exchanger) sekä pienestä prosessipumpusta ja paistuntaventtiilistä.

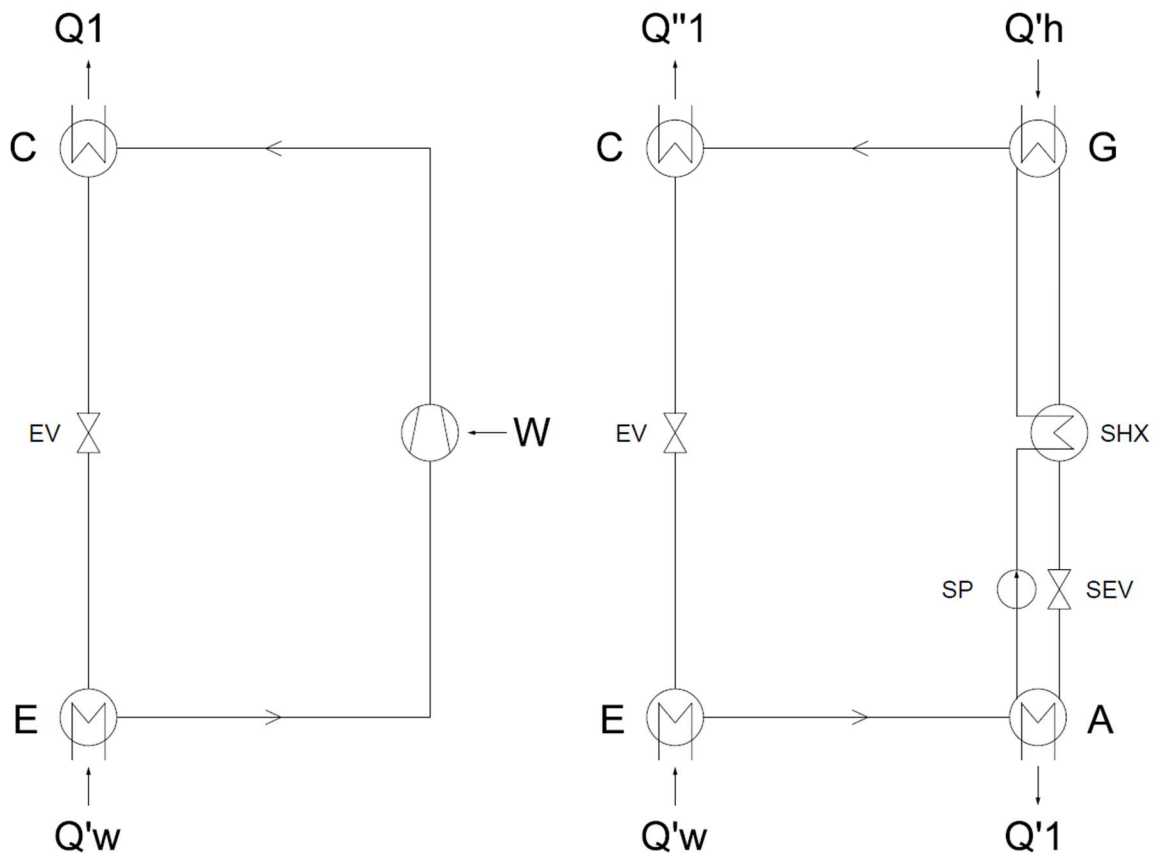
Toimintaperiaate perustuu siihen, että kylmäaineella ja absorbentilla on eri höyrystymispiste. Eri osissa lämpöpumppua kiertävän seoksen konsentraatio (absorbenttipitoisuus, tarkasteltavassa tapauksessa LiBr-pitoisuus) vaihtelee väkevästä (suuri konsentraatio) laimeaan (pieni konsentraatio) liuokseen.

Kiehutin on lämpöpumpun ”moottori”, eli käyttöenergiana toimiva lämmönlähde ohjataan kiehuttimelle, joka lämmittää laimeaa absorbentti-kylmäaine -liuosta suoraan. Kylmäaine höyrystyy ja nestemäisen liuoksen konsentraatio kasvaa ja siitä tulee väkevä liuos. Väkevä, kuuma liuos ohjataan liuoslämmönsiirtimen läpi imeyttimelle. Liuoslämmönsiirtimessä väkevä liuos luovuttaa lämpöä kiehuttimelle palaavan puolen laimealle liuokselle.

Kiehuttimessa höyrystynyt kylmäaine viedään lauhduttimelle, jossa se lämmittää suoraan lähtevän puolen kaukolämpövettä. Höyry jäähtyy ja sen paine laskee. Lauhduttimelta kylmäaine kulkeutuu paisuntaventtiilin kautta höyrystimelle, jossa osa kylmäaineesta höyrystyy uudelleen paineen laskiessa. Höyrystimessä kylmäaine höyrystyy kokonaan, kun

siihen tuodaan hukkalämmönlähteen lämpöä. Imeyttimelle kulkeutuva höyrystimessä tuotettu kylmäainehöyry absorboituu kiehuttimelta tulevaan väkevään liukeseen, ja liuos laimenee. Samalla sen lämpötila nousee olomuodonmuutoksen ja liukenemislämmön vaikutuksesta. Laimentunut liuos pumpataan liuoslämmönsiirtimelle, jossa sen lämpötila nousee lisää ja se palautuu takaisin kiehuttimelle. (Schossig, 2014)

Absorptiolämpöpumpun ja kompressorikäyttöisen lämpöpumppusyklin vertaamalla rinnakkain (kuva 2) voidaan huomata, että absorptiolämpöpumpussa kiehutin-imeytinlaitteisto korvaa kompressorin. Peruseriaatteiltaan laitteistot siis toimivat samalla tavalla, jolloin niiden välinen vertailu voidaan suorittaa suoraan teknis-taloudellisesta näkökulmasta ilman, että tarvitsee ottaa huomioon suuria toiminnallisia eroavaisuuksia.



Kuva 2. Kompressorikäyttöinen lämpöpumppusykli (vas.), jossa kompressorin tekee työtä systeemiin. Lauhdutin (C), höyrystin (E) ja paisuntaventtiili (EV) molemmilla sykleillä samanlaiset. Absorptiolämpöpumpussa (oik.) kiehutin (G), imeytin (A), liuoslämmönsiirrin (SHX), prosessipumppu (SP) ja paisuntaventtiili (SEV) korvaavat kompressorin. (Piiirretty referenssikuvan perusteella. Schossig, 2014)

Kuvassa 1 vasemmalla kompressorikäyttöinen lämpöpumppusykli. Kompressorin toimii sähköllä ja tekee työtä (W) systeemille nostaen höyrystyneen kylmäaineen painetta. Höyry menee lauhduttimelle (C), jossa se lauhtuu ja faasinmuutoksessa vapautuva energia vapautuu lämpönä (Q_1) lämpöpumpun kylmälle puolelle. Nesteytyneen kylmäaineen paine laskee, ja se kulkeutuu höyrystimelle, jossa systeemiin tuodaan lämpöä lämmönlähteestä ($Q'w$), ja kylmäaine höyrystyy. Höyrystynyt kylmäaine menee kompressorille, ja kierto alkaa alusta.

Absorptiolämpöpumppu (kuvassa 1 oikealla) toimii kahdella kierrolla: kiehutin-imeytinkierto sekä varsinainen lämpöpumppukierto, joka on lähes identtinen kompressorikäyttöisen lämpöpumpun kanssa. Työtä systeemiin tekee kiehutin (G), jonne tuodaan korkeassa lämpötilassa oleva käyttöenergia ($Q'h$), joka höyrystää kylmäainetta. Kylmäaine lähtee lauhdutin-höyrystinkierto, lauhduttimelta (C) saadaan lämpöä kylmälle puolelle ($Q''1$), höyrystimelle (E) tuodaan lämpöä lämmönlähteestä ($Q'w$) kuumalta puolelta ja höyry kiertää imeyttimelle (A), jossa se imeytyy (absorptioprosessi) väkevään liukseen ja ulos saadaan lämpöä ($Q'1$) lämpöpumpun kylmälle puolelle. Absorptiolämpöpumpulla siis saadaan kahdessa kohtaa prosessia lämpöä ulos. Imeyttimeltä laimea jäähtynyt liuos pumpataan pumpulla (SP) takaisin kiehuttimelle liuoslämmönsiirtimen (SHX) läpi, jossa sitä lämmitetään kiehuttimelta tulevalla väkevällä, säätöventtiilin (SEV) läpi tulevalla liuoslämmönsiirtimessä jäähtyneellä liuksella kuten prosessikuvauksessa edellä on selitetty.

3.3 Absorptiolämpöpumpun suorituskyky

Absorptiolämpöpumpun toimintaa kuvataan yleisimmin lämpökertoimen eli COP-luvun, *Coefficient of Performance*, avulla. Sekä lämmityksen että jäähdytyksen tuotannolle voidaan määrittää kertoimet. Absorptiolämpöpumpulle lämpökerroin on laitteistosta ulossaatavan lämpötehon ja käytettävän termisen tehon suhde. Lämpökerrointa voidaan parantaa pienentämällä olomuotoaan muuttavan työaineen ja ympäristön lämpötilaeroa sekä suurettamalla lauhduttimen ja höyrystimen lämmönsiirtokertoimia esimerkiksi suurettamalla lämmönsiirtopintoja. (Wikstén, 1980)

Absorptiolämpöpumpun lämmityksen COP-luvun määrittäminen tapahtuu yhtälön 1 mukaan.

$$COP = \frac{LÄMMITYSTEHO}{KÄYTTÖTEHO} \quad (1)$$

Lämmitysteho tarkoittaa lämpöpumpulla tuotettua lämmitystehoa ja käyttöteho suorakäyttöisen koneiston tapauksessa käytettyä polttoainetehoa, ja epäsuorasti käytettävän koneiston tapauksessa absorptiolämpöpumpun ajoon käytettävän lämmönlähteen (esim. höyryn) tehoa. Varsinaisen lämmönlähteen lämpötehoa ei lasketa mukaan lämpökertoimeen, koska se ei ole käyttöenergiaa vaan prosessissa siirrettävää energiaa.

3.4 LiBr-H₂O liuos ja sen ominaisuudet

Litiumbromidi (LiBr) on nimensä mukaisesti litiumin ja bromidin suola, joka muodostuu litium- ja bromidi-ioneista seuraavasti: $Li^+ + Br^- \rightarrow LiBr$. Sitä käytetään vesiliuoksessa energiatollisuudessa väliaineena erilaisissa lämmönsiirtimissä (pääsääntöisesti lämmityksen ja kylmän tuottamiseen käytettävissä absorptiolämpöpumpuissa ja -jäähdyttimissä) sen lämmönsiirto-ominaisuuksien takia. Litiumbromidin vesiliuosta merkitään lyhenteellä LiBr-H₂O.

Litiumbromidilla on negatiivinen liukenemislämpö eli se vapauttaa energiaa liuetessaan veteen. Litiumbromidi-vesi liuoksen entalpia h [kJ/kg] käyttäytyy konsentraation funktiona epälineaarisesti. Entalpia pienenee melko lineaarisesti konsentraation kasvaessa nolasta aina 50 % asti, ja mitä korkeammassa lämpötilassa liuos on, sitä suurempi entalpian muuttumisnopeus on. Kun ollaan matalassa lämpötilassa (0...10 °C), se pysyy melko vakiona 0...40 % konsentraatioon asti, minkä jälkeen entalpia alkaa kasvaa. (Palacios-Bereche et al. 2010)

Litiumbromidi on aineena ärsyttävää ja se on merkitty varoitusmerkillä. Varoitusmerkki kuvassa 3. Aine on haitallista nieltynä, aiheuttaa vakavaa ärsytystä joutuessaan silmiin, aiheuttaa ihoärsytystä ja voi aiheuttaa allergisen ihoreaktion. Se on myös psykoaktiivinen aine, jolla on sedatiivinen eli rauhoittava vaikutus. Sitä ei kuitenkaan käytetä enää lääkkeenä sen haittavaikutusten takia. (ECHA, 2021)



Kuva 3. Varoitusmerkki, jolla litiumbromidi tulee olla merkitty. Ärsyttävää. (ECHA, 2021)

4 ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN ROOLI KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Absorptiolämpöpumppujen merkitys nykyisessä energiajärjestelmässä on vielä melko marginaalinen. Yleisimmin ne toimivat lämpö- ja yhteistuotantolaitosten yhteydessä kasvattaen polttoprosessin hyötysuhdetta.

Absorptiolämpöpumpun avulla on mahdollista hyödyntää teollisuuden ylijäämälämpövirtoja. Näitä ovat esimerkiksi tuotantolaitoksesta poistuvien savukaasujen, jäähdytysveden tai poistoilman mukana poistuva lämpöenergia, jotka muuten poistuisivat prosessin häviöinä ympäristöön. Näin absorptiolämpöpumpulla on mahdollisuus parantaa prosessin kokonaishyötysuhdetta ja pienentää energiantuotannon ominaispäästöjä. Suomen suurien vuodenaikakohtaisten lämpötilaerojen vuoksi absorptiolämpöpumpun kyky tehdä sekä kaukolämpöä että -kylmää on merkittävä etu.

4.1 Prosessien ylijäämälämpö ja sen hyödyntäminen

Ylijäämälämmön (englanninkielisessä kirjallisuudessa *waste heat*) määritelmä on prosessissa tuotettu lämpöteho, jota ei pystytä hyödyntämään suoraan prosessissa ilman ylimääräisiä apulaitteita. Lähes kaikissa prosesseissa syntyy ylijäämälämpöä, joka muodostaa prosessiin häviöitä. Kaikkea ylijäämälämpöä ei kuitenkaan pystytä hyödyntämään prosessissa tai teollisuuslaitoksen sisäisesti taloudellisesti. Ylijäämälämpöä syntyy lähes kaikissa paikoissa yhteiskunnassa. Sen hyödyntämispotentiaaliin vaikuttaa eniten sen sijainti, kuljettumisen muoto (neste, kaasu), vuorokautinen ja ympärivuotinen jatkuvuus sekä se, missä lämpötilatasossa ylijäämälämpöä on hyödynnettävissä. Lämpöpumpputeknologia mahdollistaa matalissakin lämpötiloissa olevan ylijäämälämmön hyödyntämisen, mutta tekniset edellytykset eivät aina välttämättä takaa investoinnin taloudellista kannattavuutta. Ulkoinen käyttö on mahdollista lämpötilatasolta yli 90 °C olevalla lämmönlähteellä, jolloin sitä voidaan hyödyntää suoraan esimerkiksi kaukolämmöntuotantoon lämmönvaihtimilla. (Energiateollisuus, 2016) Näitä on kuitenkin melko harvoin ylenmäärin tarjolla, sillä 2012 käyttöön tullut energiatehokkuusdirektiivi velvoitti pienentämään energiankulutusta 20 % vuoteen 2020 mennessä. Tämän saavuttamiseksi prosesseista ei ole mahdollista päästää käyttökelpoista energiaa hukkalämpönä ulos. (Euroopan parlamentti, 2021)

Aloittaessa varsinainen ylijäämälämmön hyödyntämispotentiaalin määrittäminen, tulee hyödyntämiskohteet varmistaa mahdollisimman läheltä prosessia ja mielellään prosessin sisältä. Esimerkiksi lämmön talteenotto ja prosessin oman lämmöntarpeen kattaminen esilämmittimien avulla parantaa itsessään prosessin kokonaishyötysuhdetta. Varsinaisen prosessin energiatehokkuustoimenpiteiden jälkeen matalassa lämpötilatasossa olevaa jatkuvan lämmönlähteen hyödyntämispotentiaalia esimerkiksi lämpöpumpulla voidaan alkaa kartoittaa. Yleisimpiä, usein hyödyntämättä jäävän lämmönlähteitä ovat yhteiskunnassamme seuraavat: savukaasujen hukkalämpö, joka saattaa olla verrattain hyvin korkeassakin lämpötilassa verrattuna muihin yleisiin hukkalämmönlähteisiin; teollisuuden hukkalämpö, joka on usein myöskin korkeammassa lämpötilatasossa kuin nk. luontaiset ylijäämälämmönlähteet; yhdyskunnan jätevesien hukkalämpö; vesistöt: meret, joet ja järvet, lisäksi maaperän lämpö. (Energiateollisuus, 2016)

Savukaasujen mukana poistuvan hukkalämmön minimoinnilla on monia taloudellisia ja ympäristöhyötyjä. Se myös lisää energiatehokkuutta ja täten pienentää energiantuotannon kokonaispäästöjä. Kun savukaasujen lämpötila laskee lähelle kaukolämmön menoveden lämpötilaa, joka on Suomessa 75-120 °C riippuen ulkolämpötilasta ja lämmöntarpeesta (Hlv, 2021), ei niiden jäljellä olevan hukkalämmön hyödyntäminen ole enää mahdollista suoraan niin kutsutuilla savukaasupesureilla, joissa usein on pelkkä lämmönsiirrin. Tällöin tulee kysymykseen mahdollinen lämpöpumppuinvestointi. Savukaasujen hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpulla sisältää kuitenkin kaksi kompastuskiveä: kaukolämpöjärjestelmillä on alati kasvava joustavuusvaatimus, joka ei toteudu, kun lämpöpumppu hyödyntää lämmönlähteenään voimalaitoksen käynnistä syntyviä savukaasuja. (Energiateollisuus, 2016) Lisäksi savukaasuja jäähdyttäessä voi rikki-pitoisilla polttoaineilla tulla vastaan rikkikastepiste, jolloin lämpöpinnat alkavat likaantua rikkihapon muodostumisen myötä ja esiintyy ennenaikaista korroosiota rakenteissa. Tämä heikentää merkittävästi prosessin kokonaishyötysuhdetta ja voi siten heikentää koko voimalaitosinvestoinnin kokonaistaloudellisuutta. Biopolttoaineiden rikki-pitoisuus on kuitenkin keskimäärin melko matala.

Teollisuuden hukkalämpö on usein matalammassa lämpötilassa kuin savukaasujen mutta korkeammassa kuin useimmat muut hukkalämmönlähteet. Tämä tekee hyödyntämisestä sekä energiatehokkuus- että taloudellisuusnäkökulmasta kannattavampaa. Kuitenkin

lämmönlähteen jatkuvuus saattaa muodostua ongelmaksi, samoin kuin sen ajallisen saatavuuden osuminen yhteen lämmön kysynnän kanssa. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia kartoitettaessa on otettava huomioon myös alan tulevaisuudennäkymät, sillä lämpöpumpun takaisinmaksuaika on sen verran pitkä, ettei investointia kannata tehdä, jos ei ole varmuutta tuotannon tasaisuudesta ja jatkuvuudesta läpi lämpöpumpun käyttöiän. Teollisuudessa on myös monia prosesseja, joissa hukkalämpö kyettäisiin hyödyntämään sisäisesti, ja se tulisi aina olla ensisijainen tavoite ennen lämmön siirtämistä ulos prosessista. (Energiateollisuus, 2016)

Yleisimpiä teollisuuden ylijäämälämmön lähteitä ovat prosessien poistoilma, josta pystytään polttoprosessissa hyödyntämään 30...90 % esimerkiksi esilämmittämällä palamisilmaa lämmön talteenotolla tai palamisilman sekoitusesilämmittimellä. Jäähdytysjärjestelmien ylijäämälämmöstä pystytään hyödyntämään 35...95 % suorassa lämmityksessä tai lämmittämällä prosessin väliainetta. Ilmanpuristuslaitteiden ylijäämälämpönä pystytään hyödyntämään jopa 90 % syötetystä sähkötehosta suoraan lämmityksenä tai esimerkiksi lämpimän veden syötössä. Ilmanvaihtolaitteistoissa 35...90 % poistoilman ylijäämälämmöstä kyetään hyödyntämään tuloilman esilämmityksessä. Järjestelmätasolla ylijäämälämmön hyödyntämiseen on kaksi tapaa: järjestelmän sisäinen ylijäämälämmön hyödyntäminen tai järjestelmän ulkoinen ylijäämälämmön hyödyntäminen, jossa kolmas osapuoli pystyy hyödyntämään tuotettua ylijäämälämpöä. (Waste heat, 2021)

Jätevesien sisältämän hukkalämmön hyödyntäminen on yksi potentiaalisimpia keinoja lisätä kaupunkien ja yhdyskuntien energiatehokkuutta. Siellä missä on ihmisiä on myös jätevesiä, ja tätä myöten myös jäteveden puhdistuslaitoksia. Jäteveden puhdistuslaitoksen sijainnilla on kuitenkin suuri vaikutus varsinkin silloin, jos jäteveden lämpötila ei ole riittävä taloudellisen ja tehokkaan lämmönlähteen hyödyntämisen kannalta. Toisaalta sen saatavuus on melko tasaista ympäri vuoden, ja on myös ympäristön etu jos vesistöihin ei lasketa lämmintä vettä.

Luonnon lämmönlähteitä ovat maalämmön lisäksi merien, järvien ja jokien pohjaosien noin neljän celsiusasteen lämpötilatasossa oleva lämpö. Niiden hyödyntäminen vaatii lämmön *keruupiirin*, joka koostuu usein sadoista metreistä putkea. Vesistöjä lämmönlähteenä pohdittaessa tulee muistaa, että varsinkin pienemmän mittaluokan vesistöissä (matalat järvet, lammet ja vähävetiset joet) keruuputkiston asentaminen ja lämmönkeruu vesistöistä

voi aiheuttaa merkittäviä muutoksia sen ekosysteemiin: lämpötilataso pohjalla voi laskea talvisin paljonkin ja taas toisaalta lämpöpumpun ollessa kesäisin jäädytyskäytössä nousta huomattavasti. Se vaikuttaa suoraan veden happipitoisuuteen. Suuremmissa vesistöissä keruuputkistojen asentamisella on lähinnä maisemahaitta ja se, että putkistojen paikalla pohjatoimenpiteet (esim. ruoppaus, ankkurointi) estyvät. (Juvonen, 2013) Vesistöissä lämmönsiirinkomponenttien ja pumppujen likaantuminen saattaa aiheuttaa suurtakin haittaa. Toisaalta lämmönlähteitä on esimerkiksi Suomessa saatavilla lähes joka paikassa, joten hyödyntämispotentiaali on hyvä. (Energiateollisuus, 2016)

Maaperän lämpö jakautuu kahteen osaan: geotermiseen lämpöön (geoterminen energia), joka on hyödynnettävissä suorana lämmönlähteenä korkeassa lämpötilassa syvällä maaperässä (kilometri-useita kilometrejä) ja on peräisin maapallon sulassa ytimessä ja sen pehmeässä vaipassa tapahtuvasta radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Maaperän lämpötilagradientti eli se, miten geoterminen energia vaikuttaa maaperän lämpötilaan syvyyden funktiona on noin 0,5-1 °C/100m. Geoterminen energia on kuitenkin oma energiavarantonsa, eikä sitä ole tarkoituksenmukaista käyttää varsinaisena lämmönlähteenä lämpöpumpuille. Maaperän pintakerroksissa olevaa lämpöenergia sen sijaan on lämpöpumpunkäytössä hyvinkin hyödynnettävissä oleva matalassa lämpötilatasossa oleva lämmönlähde. Pintaosien lämpöenergia ei johdu maapallon ydinosien lämmöntuotannosta vaan on peräisin auringosta, eli sitä ei luokitella geotermiseksi energiaksi. Noin 15 metrin syvyyteen asti keskimääräinen pintalämpötila vaihtelee ympäristön lämpötilan mukaan, mutta 15 metrin syvyydessä se on Etelä-Suomessa lähestulkoon paikasta riippumatta vakio, noin 5-6 astetta. Sen jälkeen maaperän lämpötilaan vaikuttaa vain edellä mainittu lämpötilagradientti. Myös maaperän lämpöä hyödyntääkseen on rakennettava keruupiiri, joka voi olla lämpökaivo (usein kymmeniä metrejä syvä, jopa yli sata) tai noin metrin syvyyteen asennettava maapiiri. Maapiiri vaatii kuitenkin suuren putkistopinta-alan. (Juvonen, 2013)

4.2 Eri kokoisten kaukolämpöjärjestelmien ominaispiirteitä

Kaukolämpöjärjestelmät voidaan jakaa kokonsa puolesta pieniin, keskisuuriin ja suuriin.

Pienelle kaukolämpöjärjestelmälle on tyypillistä lämpökeskukset eli niin sanotut heat-only (HOB) -kattilat. Lisäksi niissä voi olla käytössä vähäisillä vuosittaisilla käyttötunneilla

ajettava nk. huippulämpökeskus, joka käyttää usein polttoaineenaan öljyä tai turvetta. Tuotettu lämpö ajetaan verkkoon, ja tällaiseen järjestelmään integroitaessa absorptiolämpöpumppua, se voidaan sijoittaa lämpökattilan yhteyteen, jolloin lämpöpumpulla ajetaan järjestelmän pohjakuormaa. Jos järjestelmään on lisäksi sijoitettu erillinen lämpöpumppulaitos (usein käyttää energialähteenään sähköä, ja käytössä kompressorikäyttöiset lämpöpumput), sekin ajaa pohjakuormaa. Kulutuspiikit katetaan tällöin huippulämpökeskuksella.

Keskisuudessa kaukolämpöjärjestelmässä on jo yleensä kytkettynä isompi yhteistuotantolaitos, jonka lisäksi on kuormahuippujen varalle huippulämpökeskukset kuten pienissäkin järjestelmissä. Liitettäessä absorptiolämpöpumppu yhteistuotantolaitoksen yhteyteen, saadaan laitoksen ja järjestelmän kokonaishyötysuhdetta nostettua.

Suurille kaukolämpöjärjestelmille tyypillistä on järjestelmän monimuotoisuus: tuotantolaitoksiin voi kuulua yhteistuotantolaitoksia, jätteenpolttolaitos, lämpökattila, huippulämpökeskus sekä järjestelmään saattaa kuulua myös kaukojäähdytysverkko. Jäähdytystä tehdään lämpöpumpuilla, ja kylmää voidaan varastoida jäähdytysakkuun mikäli järjestelmään sellainen kuuluu. Myös lämpöakut ovat tyypillisiä isommissa järjestelmissä, ja uudemmissa järjestelmissä myös kaukolämpöverkon kaksisuuntaisuus on mahdollista (eli kaukolämpöjärjestelmässä voi olla myös asiakkaita, jotka ajoittain toimivat lämmöntuottajina). (Energiateollisuus, 2016)

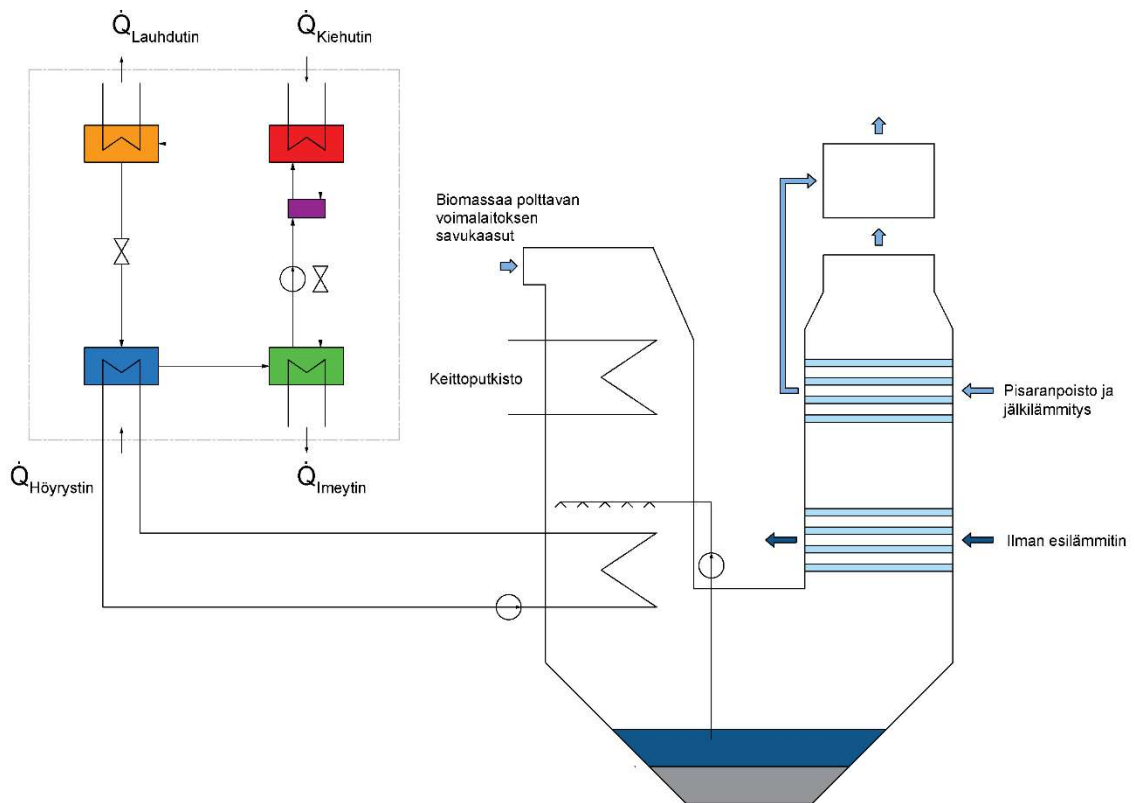
4.3 Olemassa olevat laitokset

Riihimäellä silloisen **Ekokemin** (nykyinen omistaja Fortum) kaksi absorptiolämpöpumppua. Ne tehostavat voimalaitoksen savukaasujen jäähdytystä. Lämmönlähde otetaan kahdessa vaiheessa: ensin kaukolämmön paluuedestä otetaan talteen lämpöä, jonka jälkeen viilentynyt paluuvesi ohjataan savukaasulauhduttimiin, joista tuodaan lämpöä takaisin pumpulle, ja sitä pumpataan pumpun kuumalle puolelle. Pumppujen lämpöteho on 2x4,5 MW, käyttöönottovuosi 2013. Kaukolämmön paluuvesi on noin 60-asteista, se viilenee 5...10 astetta pumpun ensimmäisessä vaiheessa ennen kuin vesi ohjataan savukaasulauhduttimille. Kaukolämmön menovesi on 90-120 asteista, ja pumput kykenevät tarvittavaan lämpötilannostoon ilman erillistä priimausta.

Tanskan **Bjerringbro Varmeværk** yhteistuotantolaitoksen yhteydessä on lämpöteholtaan 2,1 MW absorptiolämpöpumppu. Sen käyttöönottovuosi oli 2007, ja se hyödyntää maakaasu-CHP-laitoksen savukaasuja lämmönlähteenä. (Energiateollisuus, 2016)

Itävallan Halleinissa **AustroCel Hallein GmbH** on pääasiallinen selluntuottaja. Se myös tuottaa kaukolämpöä Salzburgin ja Halleinin yhteiseen, yhdistettyyn kaukolämpöverkkoon. Sen sähkön- ja lämmöntuotannon yhteistuotantolaitos käyttää polttoaineenaan biomassaa, ja voimalaitoksen yhteyteen on savukaasujen hukkalämmön hyödyntämistä varten asennettu absorptiolämpöpumppu. Sen käyttöönottovuosi oli 2006, ja pelkän absorptiolämpöpumpun investointikustannus 0,65 miljoonaa euroa. Absorptiolämpöpumppu käyttää lämmönlähteenään savukaasujen hukkalämpöä ja käyttöenergianaan voimalaitoksen väliottohöyryä. Absorptiolämpöpumpun lauhdutinpuolella kaukolämpövesi saavuttaa 90 °C lämpötilan. Sen väliaineena toimii LiBr-vesi, ja sen lämpöteho on 7 MW. Lämmityskäytössä sen COP-luku on 1.8, kun ajohöyryn lämpötila on 165 °C, kaukolämpöveden tulo on 60 °C ja meno 90 °C, sekä lämmönlähteen eli savukaasujen tulolämpötila jäähdyttimelle on 60 °C ja lähtölämpötila 40 °C. (IEA HPT, 2020)

Absorptiolämpöpumpun kytkentä biomassakattilan savukaasujen jäähdytyslaitokseen kuvassa 4. Savukaasujen jäähdytys on kytketty keittoputkiston jälkeen. Tällöin savukaasuja kastellaan lämmönsiirron parantamiseksi, savukaasujen jäähdytyksen jälkeen ne ohjataan ilman esilämmittimelle ja sen jälkeen kylmät savukaasut ohjataan pisananpoistoon, jossa niitä myös lämmitetään ja näin niiden suhteellinen kosteus laskee 100 %:sta alaspäin.



Kuva 4. Absorptiolämpöpumpun kytkentä savukaasujen jäädytykseen. Piirretty IEA:n raportissa olleen kuvan pohjalta, alkuperäinen lähde diplomityö *Rechberger, C. 2009. Wärmerückgewinnung mittels Rauchgaskondensationsanlagen bei biomassebefeuelten Heizkraftwerken. Diplomarbeit. Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz.*

Yhteistä kaikille lämmityskäytössä oleville absorptiolämpöpumppulaitoksille on matalat käyttökustannukset, korkea vuosittainen käyttöaika, voimalaitoksen kokonaishyötysuhteen kasvaminen, lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjen pienentyminen sekä osakuormalla ajon mahdollisuus ja hidas, mutta suhteellisen vaivaton säätö.

4.4 Hyödyt, haitat ja rajoitteet

Absorptiolämpöpumput ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja kestäviä. Ne vaativat vain vähän huoltoa, joten niiden käytettävyys on hyvä eikä käytön katkoksia juuri ole. Ne ovat laajasti säädettäviä, ja niillä voidaan tarvittaessa hyödyntää ylijäämälämpöä myös kaukokylmän tuottamiseen järjestelmässä, jossa kaukojäädytys on mahdollista. Niiden sähkönkulutus on vähäistä, joten sähkön hintavaihteluriski varsinkin kovien pakkasten aikaan ei vaikuta käyttökustannuksiin suuresti. Heikkous alhainen lämpökerroin eli COP matalissa lämpötiloissa (kun lämpötilaero pumpun yli kasvaa suureksi). Lämpökäyttöiset koneistot

reagoivat melko hitaasti kurmanmuutokseen. Niiden investointikustannus on myöskin suurehko siihen nähden, että kaukolämpö ei ole kuluttajahinnaltaan kovin kallista. Lämpökäyttöisenä koneistona sen hyödyt järjestelmän joustavuuden kannalta (esimerkiksi ajo silloin, kun voimalaitos ei käynnissä tai ajaa vain osakuormalla) voivat jäädä pieniksi, jos sekä käyttöenergia että lämmönlähde ovat peräisin voimalaitoksesta. (Motiva, 2019).

5 ABSORPTIOLÄMPÖPUMPPUINVESTOINNIN KANNATTAVUUS

Absorptiolämpöpumpuinvestoinnin kannattavuuden määrittämisessä tulee huomioida sekä suorat investointikustannukset, välilliset investointivaiheen kustannukset että käytönaikaiset kustannukset, jotka voivat kohteesta riippuen vaihdella suurestikin. Myös käyttöenergian ajallinen saatavuus saattaa muodostua yllättäväksi investoinnin kannattavuutta laskeväksi tekijäksi, jos lämpöpumpun käynti taukoaa merkittäviksi jaksoiksi lämmön kysynnän aikana.

5.1 Kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Absorptiolämpöpumpun ominaiskustannus on 70...100 €/kW. Vertailun vuoksi mekaanisen lämpöpumpun ominaiskustannus on 500...750 €/kW. Ominaiskustannukset pysyvät melko vakioina laitoksen koosta riippumatta, tosin ulkoisten liitännöiden kustannukset saattavat vaihdella suurestikin. Ulkoisten liitännöiden kustannusosuus kokonaisinvestoinnista on usein 10...60 %. (Motiva, 2014)

Absorptiolämpöpumpun investointikustannukset ovat tapauksesta riippuen noin puolekolmasosan vastaavaan kohteeseen sijoitettavan mekaanisen (kompressorikäyttöisen) lämpöpumpun investointikustannuksista. Takaisinmaksuaika on täten hieman lyhyempi, mutta ylijäämälämmönlähteen hyödyntämiskyky on usein merkittävästi heikompi kuin mekaanisella pumpulla. Myös käyttöenergian (väliottohöyryn) saatavuus saattaa muodostua ongelmaksi ajoittain, kun absorptiolämpöpumpun käyttöenergian tarve on suhteessa melko suuri. (Maaskola, 2014)

Investoinnin kannattavuutta voidaan tarkastella eri menetelmin. Energiantuotannossa yleisin tunnusluku on investoinnin takaisinmaksuaika, mikä voidaan määrittää investointikustannuksen, arvioidun vuotuisten käyttökustannusten ja tuoton sekä vaaditun korkotuotto vaatimuksen perusteella.

Tuotetun energian hinta voidaan myös jyvittää koko investoinnin eliniälle laskemalla niin sanottu LCOE (Levelized Cost Of Energy).

$$LCOE = \frac{\text{Käyttö- ja pääomakustannukset}}{\text{Energiantuotanto}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

Jossa I_t on vuoden ajalle jyvitetty investointikustannus, M_t käyttö- ja huoltokustannukset vuodessa, F_t polttoainekustannukset vuodessa, E_t energiantuotanto vuodessa, r korkokanta ja n investoinnin odotettu elinikä. Tällöin tulokseksi saadaan hinta/tuotettu energiayksikkö [€/MWh] tai [snt/kWh]. (DOE, 2015)

Esimerkkitapauksessa tarkastelussa on lämpöteholtaan 10 MW absorptiolämpöpumppu. Takaisinmaksuajan ja energiayksikön hinnan laskennan perustana olevat energian ja polttoaineen hinnat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Energian keskimääräisiä hintoja. (Tilastokeskus, 2021)

Energian keskimääräisiä hintoja	
Hake	23,2 €/MWh
Välipainehöyry	27 €/MWh
Sähkö	55 €/MWh
Kaukolämmön veroton kuluttajahinta	67 €/MWh

Laskennassa on käytetty kattilahiötysuhteena 0,85 ja korkotuottovaatimuksena 5 %. Omatuotetun väliottohöyryn hinnan laskennassa ei ole huomioitu menetetyn sähköntuotannon rahallista arvoa, joka tulee lopullista investointipäätöstä tehdessä ottaa myös tarkemmin huomioon. Myöskään kattilainvestointia ei ole huomioitu höyryn arvossa. Investoinnin käyttöikäksi on arvioitu 20 vuotta.

Käytetty lämpökerroin COP on laskennassa 1,8 ja arvioitu sähkönkulutus 0,02 MW. Huipunkäyttöaikana on käytetty 4500 tuntia, mikä on laskennallisesti keskimääräinen huipunkäyttöaika samaa kokoluokkaa oleville peruskuormaa ajaville kaukolämpökäytössä oleville lämpöpumppulaitoksille. Se on myös sama kuin yhteistuotantolaitosten keskimääräinen vuosittainen huipunkäyttöaika. (Energiateollisuus, 2016)

Absorptiolämpöpumppujen sähkön kulutuksen ollessa pientä merkittävin niiden käyttökustannuksiin vaikuttava riski on polttoaineen hinnan nousu. Vuodesta 2016 metsähakkeen hinta lämmöntuotannossa on pysynyt koko ajan yli 20 €/MWh, käyden alimmillaan tasolla 20,2 €/MWh vuonna 2018. Sen jälkeen se on noussut tasaisesti, ollen tällä hetkellä tasolla 23,2 €/MWh. (Tilastokeskus, 2021)

Edellä mainituilla lähtötiedoilla investointikustannus on noin 0,8...1,6 M€, käyttökustannukset noin 0,7 M€/a sekä tuotto noin 2,9 M€/a. Tällöin investoinnin

takaisinmaksuaika on noin viisi vuotta, ja keskimääräisen tuotetun energiayksikön hinta eli LCOE on 16,1...17,1 €/MWh. Laskennan tulokset taulukossa 2.

Taulukko 2. Investointilaskennan tulokset lämpöteholtaan 10 MW absorptiolämpöpumppulaitokselle.

Investointilaskennan tulokset				
Investointikustannus	0,8	...	1,6	M€
Käyttökustannukset			0,7	M€/a
Tuotto			2,9	M€/a
Takaisinmaksuaika	5,0	...	5,3	a
LCOE	16,1	...	17,1	€/MWh

Investointikustannusten määrään vaikuttaa suurilta osin ulkoisten liitännöiden kustannus. Keskimäärin suurempiin yksiköihin siirryttäessä kokonaisinvestointikustannus tehoyksikköä kohden alkaa pienentyä. Takaisinmaksuaikaan suurin vaikuttava tekijä on käyttöenergian hinta suhteessa tuotetun lämmön hintaan. Laskennassa on oletettu hukkalämmönlähteen olevan prosessin sisäistä, eli sillä ei ole jyvitettyä hintaa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Absorptiolämpöpumppujen rooli nykyisessä energijärjestelmässä on vielä melko marginaalinen, mutta kasvavien energiatehokkuusvaatimusten myötä eri sivuvirtojen (sekä materiaalien että energiavirtojen) hyödyntämisen taloudellisuuden kasvaminen saattaa olla ratkaiseva tekijä eri lämpöpumppuratkaisujen yleistymisessä teollisuuden ja energiantuotannon hukkalämmön hyödyntämisessä.

Absorptiolämpöpumpun etuja ovat sen suhteellisen edulliset investointi- ja käyttökustannukset. Niillä on lyhyt takaismaksuaika verrattuna mekaanisiin lämpöpumppuihin, joten investoinnin riskit ovat hieman pienemmät. Absorptiolämpöpumpuilla on mahdollista tuottaa myös kaukokylmää, mikä on tulevaisuuden joustavissa kaukolämmitys ja -viilennysratkaisuissa teknologian merkittävä etu.

Absorptiolämpöpumpuinvestoinnin riskejä lisää polttoaineen hinnan heilahtelu. Toistaiseksi Suomessa biomassan hinta on pysynyt ja pysynee tasaisena, mutta muiden (fossiilisten) lämmityspolttoaineiden hintatrendi on nouseva päästöoikeusmaksujen ja verotuskannan kasvaessa voimakkaasti. Mikäli Suomessa päästään poliittiseen yksimielisyyteen siitä, että biomassan käyttö energiantuotannossa on pitkässä juoksussa (yli 50 vuoden aikajänteellä) kestävä ratkaisu, todennäköisesti erilaisilla lämpöpumppuratkaisuilla tulee olemaan kasvava rooli energijärjestelmässä energiantuotannon tehokkuuden kasvattamisessa ja kokonaisilmastovaikutusten pienentämisessä nimenomaan yhteistuotantolaitosten yhteydessä.

Tällä hetkellä ei ole viitteitä siitä, että biovoimantuotantoa alettaisiin tulevaisuudessa ajamaan aktiivisesti alas, ja kaukolämpöjärjestelmillä odotetaan olevan kaupungeissa suuri merkitys myös tulevaisuudessa. Riippuu paljon sähkön hintavaihteluriskin kehityksestä kykenevätkö absorptiolämpöpumput syrjäyttämään investointikustannuksiltaan kalliimpia, mutta hukkalämmön hyödyntämiskyvyltään tehokkaampia mekaanisia lämpöpumppuja. Jos sähkön hintavaihteluriski kasvaa suuresti uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyessä voimakkaasti tulevaisuudessa, saattaa mekaanisen lämpöpumpuinvestoinnin riski kasvaa kestävämmäksi. Tällöin absorptiolämpöpumpun merkitys kasvane voimakkaasti.

7 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin kaukolämpöjärjestelmän tulevaisuudennäkymiä ja niihin vaikuttavia tekijöitä Suomessa. Energiasektorin merkittävin muutosajuri on päästörajoitukset, jotka lisäävät lämmöntuotantorakenteen muutostarvetta. Nykyisen kaukolämpöjärjestelmän saneeraustarve järjestelmän ikääntyessä sekä kasvavat energiatehokkuusvaatimukset mahdollistavat järjestelmän systeemitason muutoksen.

Absorptiolämpöpumpputeknologia on melko vakiintunut. Ne ovat lämpökäyttöisiä koneistoja, joita voidaan käyttää sekä pienessä mittakaavassa yksittäisten kiinteistöjen lämmitykseen että suuressa mittakaavassa esimerkiksi teollisuuden lämmöntarpeen kattamiseen ja kaukolämpöveden tuottamiseen. Absorptiolämpöpumppu vaatii kaksi lämmönlähdettä: korkeassa lämpötilatasossa olevan energialähteen sekä matalassa lämpötilatasossa olevan lämmönlähteen. Lämmönlähteenä käytetään usein muuten prosessissa hyödyntämättä jäävää niin kutsuttua hukkalämmönlähdettä.

Absorptiolämpöpumpulla ei ole kovin merkittävää roolia kaukolämpöjärjestelmässä. Suomessa ja muualla Euroopassa on muutama voimalaitos, jotka käyttävät savukaasujen jäädytykseen absorptiolämpöpumppuja. Yleisimmin absorptiolämpöpumppu on liitetty CHP-laitoksen yhteyteen. Sen etu on kyky tuottaa sekä kaukolämpöä että -kylmää.

Absorptiolämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuteen vaikuttaa sekä suorat investointikustannukset että käytön ajoittuminen mahdollisimman tarkasti kulutuksen mukaan. Yhteistuotantolaitoksen yhteydessä ei investoinnin kannattavuuden kannalta epäedullisia pitkiä käytön katkoksia yleensä esiinny, koska laitoksella ajetaan pääasiassa kaukolämpöjärjestelmän pohjakuormaa. Jos lämmönlähde tai käyttöenergia on jaksottaista, kuten teollisuuden prosessien hukkalämpö, voi sen saatavuuden vaihtelu heikentää investoinnin kannattavuutta merkittävästi.

Tulevaisuuden energiajärjestelmässä uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen kasvaa, mikä saattaa lisätä etenkin sähköntuotannon säariippuvuutta. Sähköntuotannon ajoittainen vaje kysyntään nähden nostaa sähkön hintatasoa markkina-alueella, mikä saattaa heikentää absorptiolämpöpumpun merkittävimmän kilpailijan mekaanisen lämpöpumpun kannattavuutta. Se voi muodostaa absorptiolämpöpumpulle merkittävän markkinaraon tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- Calefa. 2021. *Absorptiolaitteet*. Calefa.fi. [verkkosivu] Saatavilla:
<http://www.calefa.fi/fi/palvelut/teknologiat/absorptiolaitteet/> [Viitattu 30.3.2021]
- DOE. 2015. *Levelized Cost of Energy – LCOE*. U.S. Department of Energy. Office of Indian Energy. Energy.gov. [verkkojulkaisu] Saatavilla:
<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf> [Viitattu 19.9.2021]
- ECHA. 2021. *Substance Information – ECHA. Lithium bromide*. [verkkosivu] Saatavilla:
<https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.028.582> [Viitattu 31.8.2021]
- Energiateollisuus, Valor Oy. 2016. *Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä*. Energia.fi [verkkojulkaisu] Saatavilla:
https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf [Viitattu 2.4.2021]
- Energiateollisuus. 2021. *Kaukolämpövuosi 2020*. Energia.fi [verkkojulkaisu] Saatavilla:
https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2020_netto_kj_paivitetty_20210318.pdf [Viitattu 12.4.2021]
- Energivirasto. 2021. *Päästökauppa*. Energiavirasto.fi. Helsinki. [verkkosivu] Saatavilla:
<https://energiavirasto.fi/paastokauppa> [Viitattu 19.9.2021]
- Euroopan parlamentti. 2021. *Energiatehokkuus | Faktatietoja Euroopan unionista | Euroopan parlamentti*. [verkkosivu] Saatavilla:
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/69/energiatehokkuus> [Viitattu 31.8.2021]
- IEA HPT. 2020. *Absorption Heat Pump in Hallein, Austria – Absorptionswärmepumpe in Hallein*. Report. Heatpumpingtechnologies.org. [verkkojulkaisu] Saatavilla:
<https://heatpumpingtechnologies.org/publications/absorption-heat-pump-in-hallein-austria-absorptionswarmepumpe-in-hallein/> [Viitattu 28.8.2021]
- Juvonen, Janne; Lapinlampi, Toivo. 2013. *Energiakaivo - Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa*. Ympäristöopas 2013. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. Helsinki. ISBN 978-925-11-4211-6 [verkkojulkaisu] Saatavilla:

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y [Viitattu 30.8.2021]

Maaskola, Ilkka; Kataikko, Matti. 2014. *Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset*. Motiva. Helsinki. [verkkojulkaisu] Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampo_pumppu-_ja_ORC-sovellukset.pdf [Viitattu 31.8.2021]

Motiva. 2014. *Tuotannon hukkalämpö hyödyksi*. [verkkojulkaisu] Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf [Viitattu 12.4.2021]

Motiva. 2019. *Esiselvitys: Ylijäämälämmön hyödyntäminen teollisuudessa*. [verkkojulkaisu] Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf [Viitattu 30.3.2021]

Palacios-Bereche, Reynaldo; Gonzales, R; Nebra, S. A. 2010. *Exergy calculation of lithium bromide–water solution and its application in the exergetic evaluation of absorption refrigeration systems LiBr-H₂O*. International Journal of Energy Research. Wiley Online Library. [verkkojulkaisu] Saatavilla: <https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/exergy-calculation-of-lithium-bromide-jpg.pdf#:~:text=The%20bromide%20lithium%E2%80%94water%20%28LiBr%2FH2O%29%20solution%20iswidely%20used%20as,use%20of%20CFC%20refrigerants%20and%20its%20consequentenvironmental%20damage>. [Viitattu 31.8.2021]

Ranade, M.; Balu, R.; Nataraj, M.; Babu, P. 2008. *Customized Absorption Heat Pumps from Indian Industry*. Conf Proceedings paper. [verkkojulkaisu] Saatavilla: <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/customized-absorption-heat-pumps-from-indian-industry/> [Viitattu 28.8.2021]

Schossig, Peter et al. 2014. *Thermally Driven Heat Pumps fo Heating and Cooling*. Final Report. IEA Heat Pump Centre. Borås, Sweden. ISBN 978-91-87461-60-6 [verkkojulkaisu] Saatavilla: <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/thermally-driven-heat-pumps-for-heating-and-cooling/> [Viitattu 28.8.2021]

Sitra. 2015. *Energiaälykäs pääkaupunkiseutu*. Helsinki. [verkkojulkaisu] Saatavilla: <https://www.sitra.fi/julkaisut/energiaalykas-paakaupunkiseutu/> [Viitattu 4.4.2021]

Tilastokeskus. 2021. *Energian hinnat*. ISSN=1799-7984. 2. Vuosineljännes 2021.

Tilastokeskus. Helsinki. [verkkójulkaisu] Saatavilla:

http://www.stat.fi/til/ehi/2021/02/ehi_2021_02_2021-09-09_tie_001_fi.html [Viitattu 13.9.2021]

Waste heat. 2021. *Waste heat sources*. [verkkosivu] Saatavilla: <https://www.waste-heat.eu/about-waste-heat/waste-heat-sources> [Viitattu 2.4.2021]

Waste heat. 2021. *Waste heat utilization*. [verkkosivu] Saatavilla: <https://www.waste-heat.eu/about-waste-heat/waste-heat-utilization> [Viitattu 4.4.2021]

Wikstén, Ralf et al. 1980. *Lämpöpumput*. Julkaisukokoelma. Useita kirjoittajia. Suomen LVI-yhdistys. Helsinki.

Liite 1. Absorptiolämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuslaskelma

Absorptiolämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuslaskelma

Absorptiolämpöpumppu				
Ominaiskustannus	70	...	100	€/kW
Lämpöteho	10			MW
COP	1,8			
Välipainehöyry	27			€/MWh
Biomassapolttoaine (hake)	23,2			€/MWh
Kattilahyötysuhde	0,85			
Kaukolämpö	67			€/MWh
Ylijäämälämmön hinta	0			€/MWh
Sähkön käyttö	0,02			MW
Ostosähkö	55			€/MWh
Käyttöikä	20			vuotta
Huipunkäyttöaika	4500			h/a
Korkotuottovaatimus	5			%
Investointikustannus	0,8	...	1,6	M€
Käyttökustannukset	0,7			M€/a
Elinkaarituotto	2,9			M€/a
Takaisinmaksuaika	5,0	...	5,3	vuotta
LCOE	16,1	...	17,1	€/MWh

Ulkoisten liityntöjen kustannus on jyvitetty investointikustannukseen siten, että sen on arvioitu olevan 10...60 % kokonaiskustannuksesta.