

Henna Rautio

# ABSORPTIOLÄMPÖPUMPPU LÄMMÖN- TALTEENOTOSSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Huhtikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Henna Rautio: Absorptiolämpöpumppu lämmöntalteenotossa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikka  
Huhtikuu 2020

---

Kestävä energiantuotanto ja energiatehokkuus ovat tärkeässä asemassa, kun pyritään vastaamaan alati kiristyviin energiankäyttövaatimuksiin ja päästörajoituksiin. Tässä lämpöpumput tarjoavat mielenkiintoisia sovellusmahdollisuuksia esimerkiksi ylijäämälämmön hyödyntämisessä. Tässä työssä tarkastellaan absorptiolämpöpumpun toimintaa, ominaisuuksia ja soveltuvuutta lämmöntalteenottoon sekä lyhyesti lämpöpumppujen markkinatilannetta. Lisäksi suoritetaan lyhyt laskentaesimerkki, jossa tarkastellaan absorptiolämpöpumpun kytkemistä kaukolämpöverkkoon kahdella eri tavalla.

Absorptiolämpöpumpussa kylmäaine kiertää lauhduttimelta höyrystimelle ensin luovuttaen ja sitten sitoen lämpöenergiaa itseensä. Höyrystimeltä tuleva höyrystynyt kylmäaine absorboidaan imeyttimellä olevaan absorptioliuokseen. Reaktiossa vapautuu lämpöä, joka otetaan talteen. Reaktion jälkeinen seos pumpataan liuospumppun avulla korkeampaan paineeseen ja viedään keittimelle. Keitintä lämmitetään ulkoisen lämpöenergian avulla ja höyrystetään kylmäaine pois absorptioliuoksesta. Erotettu kylmäaine johdetaan lauhduttimelle ja keittimeen jäänyt absorptioliuos palautetaan takaisin imeyttimelle.

Valituilla työaineilla on suuri merkitys absorptiolämpöpumpun toimintaan. Työaineeksi soveltuva aine omaa korkean höyrystymislämmön, sopivan höyrinpaineen, alhaisen viskositeetin, on kemiallisesti stabiili ja vaaraton käsitellä. Laitteiston oikeanlaisen toiminnan kannalta on pidettävä huoli, ettei absorptioliuoksessa olevan suolan kiteytyminen, työaineiden aiheuttama korrosio tai kylmäaineen joukossa olevat epäpuhtaudet vahingoita laitteistoa.

Absorptiolämpöpumppu on käytössä hiljainen ja teknisesti kestävä, johtuen liikkuvien osien vähäisyydestä. Absorptiolämpöpumpulla lämpötilaa voidaan nostaa keskimäärin 30–65 °C:ta saavuttaen 0,7–2,0 lämpökertoimen. Lämpökerroin eli COP kuvaa lämpöpumpulla tuotettavan hyötylämmön suhdetta lämpöpumpun tarvitsemaan käyttöenergiaan. Kuten laskentaesimerkin tapauksessakin huomataan, absorptiolämpöpumppu sopii paremmin matalalämpötilajärjestelmien (40–60 °C) yhteyteen.

Absorptiolämpöpumppujen suurimmat valmistajat löytyvät Aasiasta, jossa niitä myös käytetään eniten. Suuren tilantarpeen takia absorptiolämpöpumput sopivat paremmin teollisuuden käyttöön kuin asuinrakennusten lämmitys- tai jäähdytystarpeisiin. Teollisuuden saralla absorptiolämpöpumppua voidaan käyttää tuottamaan lämpöä esimerkiksi elintarvike-, metsä-, vaate- ja kemianteollisuuden tarpeisiin tai kaukolämpöverkkoon.

Avainsanat: absorptiolämpöpumppu, absorptiojäähdytin, lämmöntalteenotto, ylijäämälämpö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN TEORIAA.....	3
2.1 Toimintaperiaate .....	3
2.2 Työaineparit .....	6
2.2.1 Vesi-litiumbromidi.....	7
2.2.2 Ammoniakki-vesi.....	8
2.2.3 Metanoli-litiumbromidi .....	8
2.3 Lämpökerroin .....	9
2.4 Lisälaitteet.....	13
3. ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN OMINAISUUDET .....	15
3.1 Edut .....	15
3.2 Rajoitteet.....	16
4. ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN KÄYTTÖKOHTEET.....	18
5. LASKENTAESIMERKKI.....	20
6. LÄMPÖPUMPPUJEN MARKKINAT .....	24
7. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
LÄHTEET .....	28
LIITE A: LÄMPÖKERTOIMEN LÄMPÖTILAMUOTOINEN ESITYS.....	30

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

COP	eng. Coefficient of Performance, lämpökerroin
$c$	ominaislämpökapasiteetti
$COP_c$	kylmäkerroin
$COP_h$	lämpökerroin
$COP_1$	kytkentämallin 1 lämpökerroin
$COP_2$	kytkentämallin 2 lämpökerroin
$m$	massavirta
$P_p$	liuospumun sähköteho
$Q$	lämpömäärä
$Q_a$	absorptioreaktiossa vapautuva lämpö
$Q_c$	lauhduttimessa vapautuva lämpö
$Q_e$	höyrystimelle tuotava lämpö
$Q_g$	keittimen käyttölämpö
$Q_i$	imeyttimen tuottama lämpö
$Q_{in}$	lämpöpumpun poistama lämpö
$Q_l$	lauhduttimen tuottama lämpö
$Q_{out}$	lämpöpumpun tuottama lämpö
$T$	lämpötila
$T_e$	höyrystimen lämmönlähteen lämpötila
$T_g$	keittimen käyttölämmön lämpötila
$T_{i,s}$	imeyttimelle syötettävän jäähdytysveden tulolämpötila
$T_{i,s,1}$	kytkentämallin 1 jäähdytysveden tulolämpötila
$T_{i,s,2}$	kytkentämallin 2 jäähdytysveden tulolämpötila
$T_{i,u}$	imeyttimestä poistuvan jäähdytysveden lämpötila
$T_{l,s}$	lauhduttimelle syötettävän jäähdytysveden tulolämpötila
$T_{l,u}$	lauhduttimelta poistuvan jäähdytysveden lämpötila
$T_{l,u,1}$	kytkentämallin 1 jäähdytysveden poistumislämpötila
$T_{l,u,2}$	kytkentämallin 2 jäähdytysveden poistumislämpötila
$T_m$	jäähdytysveden keskimääräinen lämpötila
$W_{in}$	lämpöpumpun sähköteho
$\Delta S$	entropian muutos
$\Delta S_a$	imeyttimen entropian muutos
$\Delta S_c$	lauhduttimen entropian muutos
$\Delta S_e$	höyrystimen entropian muutos
$\Delta S_g$	keittimen entropian muutos

# 1. JOHDANTO

Ilmaston tilaa koskevan huolen ja kiinnostuksen kasvaessa energiankäyttövaatimuksiin ja päästörajoituksiin on alettu kiinnittämään yhä enemmän huomiota. Kestävä energiantuotanto ja energiatehokkuus ovat avainsanoja pyrittäessä vastaamaan asetettuihin tavoitteisiin. Esimerkiksi Suomessa teollisuuden energiankäytöstä karkaa hukkalämpönä ympäristöön noin 37 %. Teollisuuden vuosittain tuottamasta ylijäämälämmöstä pystytään taloudellisesti kannattavin keinoin hyödyntämään arviolta noin 4 TWh, joka vastaa yli 200 000 omakotitalouden vuotuista lämmönkulutusta. [1]

Eräs mielenkiintoa herättävä sovellus on erilaisten lämpöpumppuratkaisujen hyödyntäminen lämmöntalteenotossa. Lämpöpumpun avulla matalalämpöisen ylijäämälämmön lämpötilaa voidaan nostaa käyttökelpoisemmalle tasolle, jolloin ylijäämälämmön sisältämä lämpöenergia voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi teollisuuden prosesseissa, kaukolämpöverkoissa tai muissa vastaavissa kohteissa.

Yhteistä kaikille erilaisille lämpöpumppujärjestelmille on lämmönlähteenä toimivan matalalämpöisen lämpöenergian hyödyntäminen nostamalla lämmön lämpötilatasoa ja edelleen alkulämpötilaa korkeammassa lämpötilassa olevan lämmön luovuttaminen lämmitettävään kohteeseen. Lämpöpumpun tarkoitus on siis siirtää lämpöä kylmemmästä lämmönlähteestä kuumempaan. Lämpöpumpun toiminta perustuu yleisesti lämpöpumpussa kiertävän kylmäaineen ominaisuuksiin ja tilamuutoksiin kiertoprosessin aikana.

Käytettyjen kiertoprosessien perustana voidaan pitää Carnot'n kiertoa, jossa kaasu ensin laajenee isotermisesti (lämpötila pysyy muutoksen aikana vakiona) ulkoisen lämmöntonnin seurauksena, minkä jälkeen kaasu jatkaa laajenemista adiabaattisesti (systemissä ei tapahdu ulkoista lämmönsiirtoa muutoksen aikana). Paisunnan päätyttyä seuraa isoterminen puristuminen, jonka aikana kaasu luovuttaa lämpöä ympäristöön. Lopuksi kaasu puristetaan adiabaattisesti takaisin alkupisteeseen.

Tässä työssä tarkasteltavaksi lämpöpumppujärjestelmäksi on valittu absorptiolämpöpumppu. Työssä perehdytään absorptiolämpöpumpun toimintaperiaatteeseen, ominaisuuksiin, sekä sen käyttöä rajoittaviin tekijöihin. Työssä tehdään myös lyhyt katsaus lämpöpumppujen markkinatilanteeseen ja kartoitetaan muutamia mahdollisia sovelluskohteita hyödyntäen kirjallisuudessa tehtyjä tutkimuksia. Lisäksi suoritetaan lyhyt laskentaesimerkki, jossa vertaillaan kahden eri kytkentämallin vaikutusta lämpöpumpun lämpökertoimeen ja toimintaan.

Luvussa 2 käydään läpi absorptiolämpöpumpun toimintaperiaatetta ja esitellään yleisimmin käytetyt työaineparit ominaisuuksineen. Sen lisäksi määritetään absorptiolämpöpumpulle lämpökerroin. Luvussa 3 esitellään absorptiolämpöpumpun käyttöön liittyviä rajoituksia ja luku 4 käsittelee sovelluskohteita. Luvussa 5 suoritetaan laskentamerkki, jonka avulla tutkitaan kahden eri kytkentämallin vaikutusta absorptiolämpöpumpulla saavutettavissa olevaan lämpökertoimeen. Luvussa 6 tehdään vielä lyhyt yleiskatsaus lämpöpumppujen markkinatilanteeseen. Lopuksi luvussa 7 kootaan yhteen työssä esitetyt asiat ja käydään läpi johtopäätökset.

## 2. ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN TEORIAA

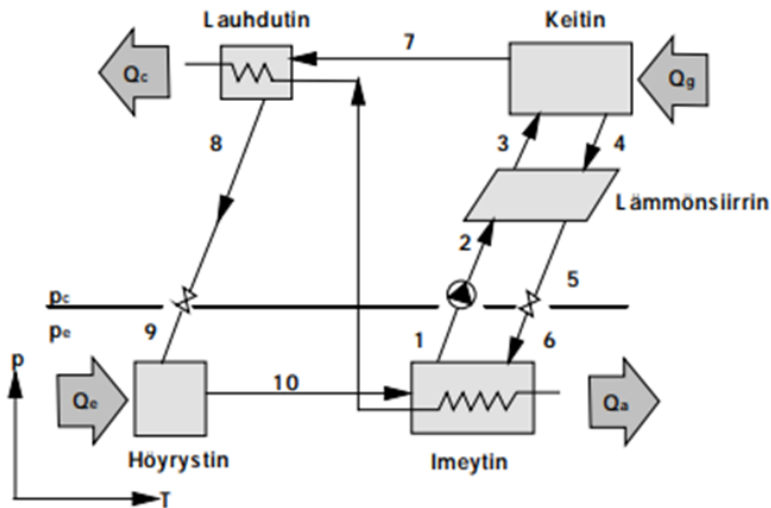
Lämpöpumpun ja absorptiokierron teoria juontaa juurensa 1700–1800-luvuille asti. Kyseessä ei siis ole mikään uusi teknologia, vaan absorptiolämpöpumpun toiminnan taustalla on jo kauan tunnettu tekniikka. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate on melko yksinkertainen ja suurimmilta osin perinteisen lämpöpumpun kaltainen. Perinteisenä lämpöpumpuna voidaan tässä tapauksessa pitää kompressorilämpöpumpppujärjestelmää, jossa kiertoaineen painetta ja lämpötilaa korotetaan mekaanisella sähkö- tai kaasumoottorikäyttöisellä kompressorilla.

Absorptiolämpöpumpussa sähköisen kompressorin tilalle on asennettu terminen kompressori, joka koostuu keitin-imeytinlaitteistosta. Kun mekaaninen kompressori korvataan termisellä kompressorilla, höyrystynyt kylmäaine absorboidaan liuokseen, jonka jälkeen liuos pumpataan korkeampaan paineeseen liuospumppun avulla. Liuospumppun avulla suoritettuun kylmäaineen paineen nostoon kuluu huomattavasti vähemmän sähköenergiaa kuin käytettäessä mekaanista kompressoria.

Terminen kompressori toimii lämpövoimakoneen tavoin ja pyörittää lämpöpumpppua. Absorptiolämpöpumpun voidaan siis ajatella olevan lämpöpumpun ja lämpövoimakoneen kombinaatio. [2] Perinteiseen lämpöpumpppuun verrattuna absorptiolämpöpumpppua käytettäessä huomiota on kiinnitettävä enemmän käytettävien työaineparien ominaisuuksiin ja yhteensopivuuteen.

### 2.1 Toimintaperiaate

Yksinkertainen absorptiolämpöpumpppu sisältää neljä lämmönsiirintä: lauhduttimen, höyrystimen, keittimen ja imeyttimen. Lämmönsiirtimien lisäksi laitteistoon kuuluvat liuospumppu ja kaksi paisuntaventtiiliä. Usein keittimen ja imeyttimen välille asennetaan vielä ylimääräinen liuoslämmönsiirrin, jonka avulla pystytään parantamaan lämpöpumpun energiatehokkuutta. Kuvassa 1 on esitelty yksinkertaisen absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate. Absorptiolämpöpumpun kiertoprosessin toiminta perustuu perinteisen lämpöpumpun tapaan lämpöpumpun korkea- ja matalapainepuolien väliseen paineroon. Paine-ero saadaan aikaan muuttamalla lämpöpumpussa kiertävien työaineiden konsentraatioita vaikuttaen siten aineiden toimintapisteisiin.



**Kuva 1.** Yksinkertaisen absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate [2].

Absorptiolämpöpumpun toiminta edellyttää kahden työaineen, kylmäaineen ja absorptioliuoksen, käyttöä. Kuvan 1 mukaisesti absorptioliuosta kierrätetään imeyttimen ja keittimen välillä vaiheiden 1–6 läpi seuraavasti:

- **1:** Imeyttimessä on höyrystynyttä kylmäainetta, joka absorboituu imeyttimessä olevaan absorptioliuokseen. Imeyttimestä saadaan ulos absorptioliuosta, jonka kylmäaine konsentraatio on korkea.
- **2–3:** Liuoksen painetta kasvatetaan liuospumppun avulla keittimen painetasolle sopivaksi ja pumpataan esilämmittimen kautta keittimelle. Esilämmittimen käyttö parantaa prosessin termistä hyötysuhdetta.
- **4:** Keittimeltä palaavan absorptioliuoksen sisältämä korkea lämpöenergia voidaan käyttää hyväksi jäähdyttämällä liuosta lämmönsiirtimessä. Jäähdytymisessä vapautuva lämpö käytetään kohdassa 3 imeyttimeltä palaavan liuoksen esilämmittämiseen ennen keittimelle syöttöä.
- **5:** Ennen imeyttimelle palauttamista jäähtyneen absorptioliuoksen painetaso on laskettava takaisin imeyttimen paineeseen. Paineen aleneminen tapahtuu syötämällä liuos paisuntaventtiilin läpi.
- **6:** Jäähdytetty ja matalapaineinen absorptioliuos syötetään uudestaan imeyttimelle, jossa kylmäaine pääsee absorboitumaan siihen.

Imeyttimessä kylmäaine siis absorboituu absorptioliuokseen. Absorptiossa on kyse ilmiöstä, jossa atomit, molekyylit tai ionit pidättyvät joko nesteeseen, kaasuun tai kiinteään



aineeseen [3]. Absorptiolämpöpumpussa tapahtuva absorptioreaktio on siis kaasumaisen kylmäaineen liukenemista nesteeseen. Absorptioreaktio on eksoterminen eli lämpöä vapauttava reaktio, minkä seurauksena imeytimestä vapautuu lämpöä  $Q_a$ . Absorbenttinä eli tässä tapauksessa liuottimena toimii jokin neste, kuten vesi tai suolaliuos.

Kun keittimelle tuodaan ulkoista lämpöenergiaa  $Q_g$ , absorptioliuokseen liuennut kylmäaine höyrystyy ja erkanee seoksesta. Tätä absorptiolle vastakkaista ilmiötä kutsutaan desorptioksi. Desorptiossa aineeseen sitoutuneet atomit, molekyylit tai ionit nousevat aineen pintaan ja vapautuvat aineesta [3]. Kylmäaineen höyrystymislämpötila on absorbentin höyrystymislämpötilaa alhaisempi, minkä seurauksena kylmäaine saadaan höyrystettyä ja erotettua liuoksesta absorptioliuoksen pysyessä nestefaasissa. Kylmäaineen höyrystyttyä, keittimeen jää jäljelle liuosta, jonka kylmäaine konsentraatio on alhainen. Laimea liuos kierrätetään takaisin imeyttimelle.

Samalla kun keittimeen jäävä absorptioliuos palautetaan takaisin imeyttimelle, kylmäaine jatkaa kiertoaan varsinaiseen lämpöpumpppuosiin. Prosessissa kylmäaine käy läpi pisteistä 1–3 ja 7–10 muodostuvan kierron seuraavasti:

- **1–3:** Absorptioliuoksessa liuenneena oleva kylmäaine pumpataan imeyttimeltä keittimelle kuten edellä absorptioliuoksen kiertoa kuvatessa.
- **7:** Korkeassa paineessa oleva höyrystynyt kylmäaine johdetaan keittimeltä lauhduttimelle, jossa se lauhtuu takaisin nesteeksi luovuttaen samalla lämpöenergiaansa  $Q_c$ .
- **8:** Kylmäaine kiertää lauhduttimelta höyrystimelle paisuntaventtiin kautta samaan tapaan kuin perinteisessä lämpöpumpussa.
- **9:** Matalapaineinen kylmäaine johdetaan höyrystimelle, jossa kylmäaine saadaan höyrystymään tuomalla ulkoista lämpöä  $Q_e$ .
- **10:** Lopuksi uudelleen höyrystynyt kylmäaine johdetaan takaisin imeyttimelle, jossa se liukenee uudestaan absorptioliuokseen.

Paisuntaventtiilissä virtauspinta-alan pienentäminen aiheuttaa virtausnopeuden kasvun, josta edelleen seuraa paineen aleneminen. Osa kylmäaineesta höyrystyy jo paisuntaventtiin läpi kulkiessa.

Imeyttimen paine ja lämpötila määräytyvät kylmäaineen ja absorptioliuoksen välisen absorptioreaktion jälkeisen tilapisteen mukaan. Reaktion jälkeinen tilapiste asettuu puhtaan kylmäaineen höyrystymispaineen ja reaktion loppulämpötilan määräämään tilaan. Todellisuudessa virtauksen aikaansaaminen kuitenkin edellyttää, että imeyttimen paineen on oltava höyrystymispainetta hiukan alhaisempi [2]. Imeyttimen kuumenee reaktion aikana

ja sitä on jäähdytettävä ylikuumenemisen estämiseksi. Siksi imeyttimen lämpötilatasoa valittaessa on otettava huomioon myös jäähdytysveden tulolämpötilan ja imeyttimestä poistuvan liuoksen lämpötilan välinen riittävän suuri eroavaisuus. Keittimen ja imeyttimen sekä lauhduttimen ja höyrystimen väliset paine-erot määrittelevät ylärajan jäähdytysveden tulolämpötilalle. Jäähdytysveden tulolämpötilaan vaikuttaa myös esimerkiksi imeyttimelle palaavan absorptioliuoksen pitoisuus. [4] Imeyttimestä poistuva jäähdytysvesi johdetaan usein imeyttimeltä lauhduttimelle, jossa se vastaanottaa lauhtumisessa vapautuvan lämmön.

Lauhduttimen paine ja lämpötila määräytyvät lämmitettävän kohteen kuten imeyttimeltä tulevan jäähdytysveden lämpötilan mukaan. Lauhduttimen painetaso määrää myös keittimen painetason. Ideaalisessa tapauksessa paine keittimellä ja lauhduttimella on sama. Todellisuudessa keittimen painehäviöiden takia paine keittimellä on kuitenkin hiukan korkeampi. [2] Samaan tapaan kuin lauhduttimen painetason määrää lauhduttimessa kiertävä vesi, höyrystimen paine määräytyy jäähdytettävän kohteen lämpötilan mukaan.

## 2.2 Työaineparit

Yleisimmin käytetyt työaineparit ovat kylmäaineena käytettävä vesi ( $H_2O$ ) ja absorptioliuoksena toimiva litiumbromidin ( $LiBr$ ) suolaliuos. Vettä voidaan käyttää myös absorptioliuoksena, jolloin kylmäaineena useimmiten on ammoniakki ( $NH_3$ ). Näiden yleisimpien työaineparien lisäksi on myös lukuisia muita yhdistelmiä, joissa usein jompikumpi edellä esitettyjen aineparien komponenteista on korvattu jollakin toisella yhdisteellä. Esimerkiksi veden sijasta  $LiBr$ :n kanssa voidaan käyttää kylmäaineena metanolia ( $CH_3OH$ ).

Absorptiolämpöpumpun toiminta asettaa käytettäville työaineille muutamia edellytyksiä ja rajoitteita. Käytettävän kylmäaineen ominaisuuksiin on kuuluttava mm. alhainen kriittinen lämpötila ja korkea kriittinen paine, kun taas absorptioliuokselle on edullista omata korkea kriittinen lämpötila ja alhainen kriittinen paine [5]. Liian korkeat painetasot edellyttävät laitteiston rakenteellisilta osilta korkeita lujuusvaatimuksia. Liian matalapaineiseen prosessiin saattaa vuotaa ympäristöstä ilmaa ja kosteutta. Prosessiin vuotamaan päässyt ilma mm. heikentää lämpöpumpun tehokkuutta, lisää korroosion vaikutuksia ja edesauttaa absorptioliuoksen kiteytymistä [4]. Lisäksi aineiden reagoiessa ilman kanssa syntyy kaasuja, jotka eivät absorboitu liuokseen ja jotka alentavat siten lämpöpumpun hyötysuhdetta [2]. Ilman mukana tuleva kosteus saattaa myös aiheuttaa höyrystimen jäätymistä [6].

Sekä kylmäaineella että absorptioliuoksella on molemmilla oltava korkea höyrystymislämpö, alhainen viskositeetti ja niiden muodostaman seoksen tulee olla kaikissa prosessin vaiheissa kemiallisesti stabiili. Korkea höyrystymislämpö pienentää tarvittavia kylmäaineen ja absorptioliuoksen massavirtoja [7]. Kylmäaineen ja absorptioliuoksen muodostaman seoksen tulee pysyä neste- tai kaasufaasissa. Lisäksi molempien aineiden tulisi yleisesti ottaen olla vaarattomia, myrkyttömiä, eivätkä ne saisi olla helposti syttyviä.

Imeyttimen tehokkaan toiminnan kannalta on tärkeää, että kylmäaine liukenee täydellisesti absorptioliuokseen. Tämä edellyttää riittävän suurta absorptiopainetta vastaavaa konsentraatioaluetta ja mahdollisimman suurta liukenemisnopeutta. Hidas liukeneminen vaatii suuren imeyttimen. Reaktionopeuden optimoimiseksi tulee valita ainepari, joka omaa suuren absorptiolämmön. Suuri absorptio nopeus myös parantaa imeyttimen lämmönluovutusta. [6]

Ainepareja valittaessa on otettava myös huomioon se, että ensinnäkin sekä kylmäaineen että absorptioliuoksen jäätymispisteiden tulisi olla huomattavasti ympäristön lämpötilaa alhaisempia. Toiseksi absorptioliuoksen kiehumispisteen tulisi olla riittävästi kylmäaineen kiehumispistettä korkeampi (ero  $> 200$  °C). Sen lisäksi, että ympäristöä alhaisemat jäätymispisteet estävät työaineiden jäätymisen, ne myös vähentävät jäätymispisteen läheisyydessä esiintyvän nesteen viskositeetin kasvun aiheuttamia haittoja [6]. Liuottimen kiehumispisteen riittävä eroavaisuus kylmäaineen kiehumispisteestä taas takaa keittimestä saatavan höyryn puhtauden, jolloin lisälaitteiden tarve vähenee. Jos keittimeltä saatava kylmäaine ei ole riittävän puhdasta, saattaa mukana olevat epäpuhtaudet vahingoittaa lauhduttimen ja höyrystimen toimintaa. Usein työaineilta vaaditut ominaisuudet sulkevat kuitenkin toisiaan pois, jolloin joudutaan tekemään kompromisseja haluttujen ominaisuuksien välillä.

### 2.2.1 Vesi-litiumbromidi

Kylmäaineena käytettäessä veden etuina ovat sen suuri höyrystymisentalpia, alhainen viskositeetti ja turvallisuus. Toisaalta vesihöyryn operointipaineet ovat suhteellisen alhaisia, minkä seurauksena lämpöpumppu toimii alipaineessa. Operoitaessa alipaineessa koneiston tulee olla hyvin tiivis ja sen tulee sisältää ilmanpoisto [2]. Veden korkean jäätymispisteen takia työainepari ei sovellu käytettäväksi alle 0 °C höyrystymislämpötiloissa.

Absorptioliuoksena käytettävän LiBr:n suolaliuoksen etuina ovat sen alhainen lämpökapasiteetti ja korkea veden absorptiokyky. LiBr-suolaa voidaan pitää käytännössä haihtu-

mattomana, jolloin lauhduttimelle vietävän kylmäaineen voidaan olettaa olevan puhdasta, eikä lisätoimenpiteille näin ollen ole tarvetta. Ongelmia aiheuttaa kuitenkin LiBr:n kiteytyminen, liuoksen korroosio-ominaisuudet ja taipumus vaahtoamiseen. H<sub>2</sub>O-LiBr liuoksen korroosio-ominaisuudet vastaavat keittosuolaliuoksen korroosio-ominaisuuksia [2].

LiBr-liuoksen tyypillinen kiteytymisraja on noin +4 °C. Jos lämpötila laskee alle kiteytymisrajan alkaa liuos kiteytymään. Liuoksen LiBr-pitoisuuden kasvaessa kiteytymisrajan määrittävä lämpötilakin kasvaa. Kiteytyessään LiBr muodostaa hydraattimolekyylejä yhden tai useamman vesimolekyylin kanssa. Seos, jossa esiintyy sekä nestefaasia että kiinteää faasia, ns. ”märkä kideseos”, saattaa tarttua putkien seinämiin ja pahimmassa tapauksessa tukkia putket täysin. Samalla nestevirtaus pysähtyy ja sen sisältämä lämpö virtaa ympäristöön, jolloin putkien sisällä oleva lämpötila laskee kiinteyttäen seosta entisestään. [2]

### 2.2.2 Ammoniakki-vesi

Kuten vesi myös ammoniakki omaa suuren höyrystymislämmön ja pienen viskositeetin. Ammoniakin jäätymispiste on alhainen, joten sitä voidaan käyttää myös alle 0 °C:n höyrystymislämpötiloissa. NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-liuoksen yhtenä hyvänä ominaisuutena voidaan pitää ammoniakin ja veden hyvää liukoisuutta toisiinsa. Liukeneminen ja eroaminen tapahtuvat nopeasti, jolloin liuosta ei ole tarvetta kuumentaa yli keittimen teoreettisen loppulämpötilan [2].

Toisaalta käytettäessä NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-liuosta, vaadittavat painetasot ovat usein korkeita, johdettua ammoniakin alhaisesta kiehumispisteestä. Ammoniakin ja veden höyrystymispisteet ovat myös lähellä toisiaan, jolloin höyrystimelle menevän kylmäaineen puhtaus ei ole yhtä suuri kuin käytettäessä esimerkiksi H<sub>2</sub>O-LiBr-yhdistelmää. Kun paine pysyy vakiona, puhtaan kylmäaineen höyrystymislämpötila on liuoksen höyrystymislämpötilaa matalampi. Näin ollen kylmäaineen puhtaudella on merkittävä vaikutus lauhdutustehoon. Lisäksi ammoniakki hapen kanssa reagoiessaan on helposti syttyvä aine.

### 2.2.3 Metanoli-litiumbromidi

Kylmäaineena olevan metanolin ominaisuudet muistuttavat hyvin paljon ammoniakin ominaisuuksia. Metanolin höyrystymislämpö on lähes yhtä suuri kuin ammoniakilla ja sen jäätymispiste on alhainen. Kuten vettä myös metanolia käytettäessä höyrystin ja imeytin toimivat alipaineessa. Tarvittava alipaine ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin vettä käytettäessä [2].

CH<sub>3</sub>OH-LiBr-yhdistelmä käyttäytyy hyvin samaan tapaan kuin H<sub>2</sub>O-LiBr-yhdistelmäkin. Yhtä lailla CH<sub>3</sub>OH-LiBr-liuoksen käyttöä rajoittaa LiBr:n kiteytyminen ja liuoksen taipumus vaahtoamiseen. Sen lisäksi metanolia käytettäessä on otettava huomioon metanolin laaja syttymisalue ja palavuus ilmassa sekä sen myrkyllisyys.

## 2.3 Lämpökerroin

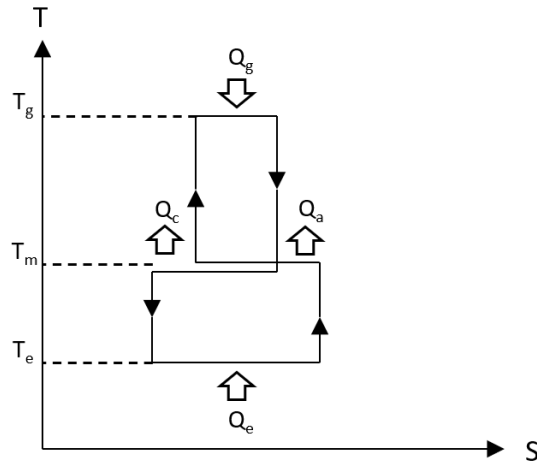
Lämpöpumppujen hyötysuhdetta yleisesti kuvataan COP-luvun avulla (eng. coefficient of performance). COP-luku kertoo, kuinka tehokkaasti systeemiin tuotu käyttöenergia saadaan muutettua hyötyenergiaksi. Toisin sanoen kuinka paljon lämpöpumpun avulla saadaan siirrettyä lämpöä suhteessa käyttöenergian määrään. COP-luku lasketaan sen mukaan, onko lämpöpumpun käyttötarkoitus lämmitää vai jäähdyttää. Lämmityskäytössä olevalle sähköiselle lämpöpumpulle  $COP_h$  eli lämpökerroin voidaan yleisesti esittää lämpöpumpusta saatavan lämpötehon  $Q_{out}$  ja lämpöpumpun ottaman sähkötehon  $W_{in}$  suhteena seuraavasti

$$COP_h = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (1)$$

Jäähdytyskäytössä olevalle lämpöpumpulle laskettavaa COP-arvoa kutsutaan usein kylmäkertoimeksi. Kylmäkeroin  $COP_c$  saadaan vastaavasti laskettua lämpöpumpun poistaman lämpömäärän  $Q_{in}$  ja lämpöpumpun ottaman sähkötehon suhteena seuraavasti

$$COP_c = \frac{Q_{in}}{W_{in}} \quad (2)$$

Ideaalisen absorptiolämpöpumppuprosessin vaiheet voidaan nähdä kuvasta 2, jossa ne on esitetty prosessissa tapahtuvien lämpötilan ja entropian muutosten avulla. Ideaalinen absorptiolämpöpumppuprosessi pitää sisällään kaksi isotermistä lämmöntuontia ja kaksi isotermistä lämmönpoistoa. Jokaista lämmöntuontia seuraa adiabaattinen paisunta ja jokaista lämmönpoistoa adiabaattinen puristus.



**Kuva 2.** *Ideaalinen absorptiolämpöpumppprosessi kuvattuna lämpötilan ja entropian muutosten avulla.*

Absorptiolämpöpumpussa lämpöä tuodaan siis kahdelle eri lämmönsiirtimelle ja vastaa- vasti lämpöä poistuu kahdesta eri lämmönsiirtimestä. Kuvan 2 mukaisesti absorptioläm- pöpumpulle syötettävä lämpö  $Q_g$  on niin sanottua käyttölämpöä, joka saadaan korkea- lämpöisestä lämmönlähteestä. Absorptiolämpöpumpun kokonaiskäyttöenergiaan sisäl- lytetään keittimelle tuotavan lämpöenergian lisäksi myös liuospumpun ottama sähkö- energia  $P_p$ . Keittimen lisäksi absorptiolämpöpumpulle tuodaan perinteisen lämpöpumpun tapaan matalalämpöisemmästä lämmönlähteestä poistettavaa lämpöä  $Q_e$ . Tämä lämpö tuodaan höyrystymille. Absorptiolämpöpumpusta saadaan ulos käyttökelpoista lämpöä sekä lauhduttimelta  $Q_c$  että imeyttimeltä  $Q_a$ . Ideaalisesti toimivan absorptiolämpöpum- pun energiatase voidaan kirjoittaa näiden syötettävien ja saatavien lämpövirtojen avulla seuraavasti

$$Q_g + P_p + Q_e = Q_c + Q_a \quad (3)$$

Yhtälössä 3 on otettu huomioon myös liuospumpun tarvitsema sähköenergia. Sähkö- energian määrä suhteessa keittimen lämpöenergiaan on usein kuitenkin verrattain pieni, minkä seurauksena liuospumpun tarvitsema sähköenergia voidaan usein jättää laskel- missa huomioimatta.

Kuten muidenkin lämpöpumpppujen tapauksessa absorptiolämpöpumpun lämpökerroin lasketaan tuotetun lämmön ja syötetyn kokonaiskäyttöenergian suhteena. Absorptioläm- pöpumpun lämpökertoimelle saadaan täten yhtälö

$$COP_h = \frac{Q_c + Q_a}{Q_g + P_p} \quad (4)$$

Vastaavasti absorptiolämpöpumpun kylmäkertoimelle saadaan yhtälö

$$COP_c = \frac{Q_e}{Q_g + P_p} \quad (5)$$

joka kuvaa höyrystimelle syötetyn lämmön ja kokonaiskäyttöenergian suhdetta.

Usein lämpöpumpun hyötysuhdetta halutaan tarkastella ulkoisten lämmönlähteiden ja lämmityksen kohteen lämpötilojen funktiona. Tämän esitysmuodon avulla pystytään tarkastelemaan hyötysuhteen riippuvuutta lämmönlähteen ja lämmityskohteen lämpötiloista. Absorptiolämpöpumpun lämpö- ja kylmäkertoimet voidaan esittää lämpötilojen avulla seuraavasti

$$COP_h = \frac{\frac{1}{T_e} \frac{1}{T_g}}{\frac{1}{T_e} \frac{1}{T_m}} \quad (6)$$

$$COP_c = \frac{\frac{1}{T_m} \frac{1}{T_g}}{\frac{1}{T_e} \frac{1}{T_m}} \quad (7)$$

missä  $T_g$  on keittimen käyttölämpövirran lämpötila,  $T_e$  on höyrystimelle tuotavan lämpövirran lämpötila ja  $T_m$  on lämmityskohteen lämpötila. Yhtälöiden 6 ja 7 tarkemmat johdot on esitetty liitteessä A. Kun lauhduttimesta ja imeyttimestä saatavat lämpövirrat otetaan talteen samaan nestevirtaan kuvan 1 mukaisesti, voidaan yksinkertaistuksen vuoksi sekä lauhduttimelta että imeyttimeltä saatavan lämmön ajatella poistuvan samaan lämpötilaan.

Absorptiolämpöpumpun lämpökertoimet ovat keskimäärin 1,7–2,0 ja kylmäkertoimet keskimäärin 0,7–1,0 luokkaa. Perinteiseen lämpöpumppuun verrattuna saavutettavat COP-arvot ovat melko alhaisia. Yleisesti ottaen mitä enemmän lämpöä lämpöpumppu pystyy luovuttamaan, sitä korkeampi lämpökerroin saavutetaan. Vastaavasti mitä enemmän lämpöpumpun avulla pystytään poistamaan lämpöä jäähdytettävästä kohteesta, sitä parempi kylmäkerroin saavutetaan. Absorptiolämpöpumpun tapauksessa COP:n kasvu ja lämmitystehon kasvu eivät kuitenkaan aina seuraa toisiaan.

Kun käyttölämmön tuontilämpötilaa tai lämpövirran suuruutta kasvatetaan kasvavat myös lauhtumisessa ja absorptioreaktiossa vapautuvat lämpömäärät sekä kylmäaineen höyrystymiseen tarvittava lämpömäärä. Lämpötilan nostamisen seurauksena keittimelle tulevan absorptioliuoksen kylmäaine pitoisuutta voidaan kasvattaa, jolloin kylmäainetta saadaan höyrystettyä enemmän [8]. Toisaalta lämpötilan noston seurauksena myös lauhduttimessa kiertävän jäähdytysveden lämpötila kasvaa, minkä seurauksena lauhduttimen ja imeyttimen toimintalämpötilat kasvavat. Tämän seurauksena käyttölämpövirran lämpötilan tai lämpövirran kasvattamisella havaitaan olevan absorptiolämpöpumpun tapauksessa negatiivinen vaikutus COP-arvoon. Taulukossa 1 on esitetty muutamia

esimerkkejä imeyttimessä ja lauhduttimessa kiertävän jäähdytysveden sisäänmeno lämpötilan ja käyttölämmön minimilämpötilojen vaikutuksesta saavutettavaan COP-arvoon.

Taulukko 1. *Yksivaiheisen vesi-litiumbromidi absorptiolämpöpumpun lämpökertoimen riippuvuus jäähdytysveden sisäänntulo lämpötilasta ja käyttölämmön minimilämpötilasta [9].*

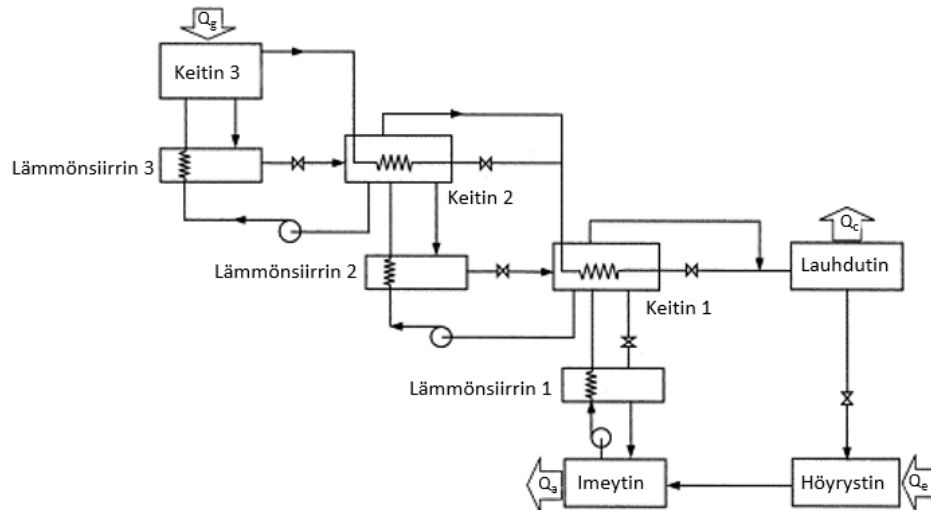
<b>Cooling water temperature (inlet to absorber &amp; condenser)</b>	<b>Minimum Heat source temperature (Inlet to generator)</b>	<b>COP</b>
23.9°C	65°C	0.75
26.7°C	75°C	0.74
29.4°C	85°C	0.72
32.2°C	95°C	0.71

H<sub>2</sub>O-LiBr systeemissä keittimen käyttölämmön lämpötila on tyypillisesti 75–120 °C:tta ja NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O systeemissä 125–170 °C:tta [7]. Tyypillisissä teollisuuden sovelluksissa höyrystimelle poistettavan ylijäämälämmön lämpötila on alle 55 °C. Lämpöpumpun tuottama lämpö syötetään usein esimerkiksi kaukolämpöverkossa kiertävään veteen 80–90 °C:n lämpötilassa. [10]

Kasvattamalla lämpöpumpun lämmönsiirtopinta-alaa lisätään lämpöpumpun lämmön tuotantoa, mutta alennetaan saavutettavissa olevaa COP-arvoa. Poikkeuksena kuitenkin on liuoslämmönsiirrin, jonka lämmönsiirtopinta-alan lisäämisen on havaittu alentavan lämpöpumpun lämmityskapasiteettiä, mutta kasvattavan COP-arvoa. [11] Esimerkiksi keittimen lämmönsiirtopinta-alan kasvattaminen saa aikaan sen, että samalla lauhduttimelle, höyrystimelle ja imeyttimelle kohdistuvat lämpökuormat pienevät.

Absorptiolämpöpumpun lämpökerrointa voidaan parantaa myös lisäämällä keitin vaiheiden määrää. Tämä tarkoittaa siis sitä, että imeyttimen jälkeisessä keittimessä seosta, jonka kylmäaine pitoisuus on korkea, kuumennetaan sen verran, että vain osa absorptioluokseen sitoutuneesta kylmäaineesta ehtii höyrystymään. Samalla kun kylmäaine vietään lauhduttimelle, loput liuksesta syötetään seuraavalle keittimelle. Seuraavalla keittimellä liuosta kuumennetaan lisää, jolloin saadaan taas osa kylmäaineesta höyrystettyä. Kuvassa 3 on esimerkki 3-vaiheisesta absorptiolämpöpumpusta. Höyrystynyttä kylmäainetta jäähdytetään ennen lauhduttimelle tuontia. Absorptiolämpöpumpulle tuotava käyttölämpö syötetään viimeiselle keittimelle ja tältä keittimeltä saatavan kylmäaineen jäähtymisessä vapautuva lämpö käytetään edellisten keitinten käyttölämpönä. Viimeiseen keittimeen jäävä laimea absorptioliuos palautetaan edellisten keitinten kautta imeyttimelle.





**Kuva 3.** 3-vaiheisen absorptiolämpöpumpun rakenne perustuen lähteeseen [13].

Vaiheiden lisääminen alentaa kylmäaineen höyrystyslämpötilaa, mutta kasvattaa absorptiolämpöpumpulle syötettävän käyttölämmön minimilämpötilaa [5].

## 2.4 Lisälaitteet

Edellä luvussa 2.3 esitetyt yhtälöt on määritelty ideaaliselle prosessille, jolloin niissä ei ole huomioitu todellisessa prosessissa esiintyviä häviöitä. Häviötä voivat aiheuttaa mm. lämmönsiirrossa esiintyvistä lämpötilaeroista aiheutuvat palautumattomuudet ja lämpöhäviöt, aineensiirrossa esiintyvät konsentraatioerot, viskositeetin aiheuttama kitka (painehäviöt) sekä kaasun paisunta. Suurimmat painehäviöt syntyvät yleensä höyrystimessä ja imeyttimeässä etenkin, jos käytettävien työaineiden höyryn ominaistilavuudet ovat suuria [2].

Prosessissa syntyviä häviöitä voidaan pienentää lisäämällä lämmönsiirrin esimerkiksi kuvan 1 mukaisesti keittimen ja imeyttimeen välille sekä höyrystimen ja lauhduttimen välille. Lauhduttimelta tulevan kylmäaineen ja keittimeltä palaavan liuoksen esijäähdyttäminen ennen paisuntaventtiilille menoa vähentää venttiileissä tapahtuvia paisuntatyön aikaansaamia häviöitä [6]. Keittimelle syötettävän liuoksen esilämmittäminen vähentää keittimelle tuotavan lämmön määrää ja parantaa systeemin termistä hyötysuhdetta. Esilämmityksen käytön seurauksena myös imeyttimeen kokoa voidaan pienentää [13].

Jos absorptioliuoksen ja kylmäaineen kiehumispisteet ovat lähellä toisiaan myös osa absorptioliuoksesta höyrystyy keittimessä kylmäaineen mukana. Mikäli absorptioainetta ei poisteta höyrystä, se kerääntyy höyrystimelle heikentäen höyrystimen toimintaa [13]. Absorptioaine voidaan erottaa höyrystä lisäämällä rektifikaattori eli esilauhdutin ennen lauh-

duttimelle menoa. Rektifikaattorissa höyryä jäähdytetään niin, että se alkaa nesteyty-  
mään. Absorptioaineen nesteytymisen ollessa voimakkaampaa kuin kylmäaineen pää-  
dytään tilanteeseen, jossa absorptioaine on nesteytynyt kokonaan, mutta suurin osa kyl-  
mäaineesta on yhä höyrynä. [6] Höyrystä erotettu liuos voidaan johtaa takaisin keitti-  
meen ja jäljelle jäänyt höyry päästetään etenemään varsinaiselle lauhduttimelle.

Rektifikaattoria tarvitaan esimerkiksi  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  systeemien yhteydessä. Rektifikaatiolait-  
teiden käyttö pienentää COP-arvoa ja nostaa lämpöpumpun investointi- ja käyttökustan-  
nuksia. Mikäli höyrystimeen syötettävässä lauhteessa on mukana absorptioainetta, höy-  
rystimen painetta joudutaan laskemaan. [2] Paineen aleneminen puolestaan pienentää  
jäähdytystehoa ja laskee COP-arvoa.

### 3. ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN OMINAISUUDET

Absorptiolämpöpumppuja pidetään yleisesti luotettavina ja helposti säädeltävinä. Absorptiolämpöpumpun ominaisuuksiin kuuluu sen kyky hyödyntää erilaisia lämmönlähteitä. Lämmönlähteenä voi toimia esimerkiksi aurinkolämpö, maaperästä tai vesistöistä saatava lämpö, jonkin polttoaineen kuten maakaasun poltosta saatava lämpö tai teollisuuden prosessien ylijäämlämpö kuten prosessi- ja savukaasujen tai jäte- ja jäähdytysvesien mukana muutoin ympäristöön kulkeutuva lämpö.

Absorptiolämpöpumpun lämpötilan nostokyky on noin 30–65 °C:tta sovelluskohteen olosuhteista ja käytetyistä työainepareista riippuen. Näin ollen esimerkiksi käytettäessä matalalämpöistä 30–40 °C:sta vettä lämmönlähteenä, saadaan sen avulla tuotettua 60-95 °C:sta käyttövettä. Uudensukupolven kehittyneemmillä absorptiolämpöpumppu systeemeillä odotetaan saavutettavan korkeampia jopa 260 °C lämpötiloja suurempien lämpötilan nostokapasiteettien avulla [7].

#### 3.1 Edut

Absorptiolämpöpumpun eduiksi voidaan lukea sen tekninen luotettavuus. Käytännössä ainoa liikkuva osa on pieni liuospumppu. Liikkuvien osien puute tekee lämpöpumpun vaatiman huolto- ja kunnossapitotarpeen alhaiseksi. Absorptiolämpöpumpun kunnossapitotoimenpiteisiin kuuluu lähinnä jaksoittainen lämpöpumpussa syntyneiden tai lämpöpumppuun vuotaneiden kaasujen poisto, korroosioinhibiittorien ja pH-puskurien lisäämisen, liuosanalyyysien tekeminen sekä jatkuva lämpötilan ja paineen seuraaminen [2,4]. Liikkuvien osien puutteen seurauksena lämpöpumpusta aiheutuvat meluhaitat ja värinä ovat lähes olemattomia. Keitin-imeytinlaitteiston sisältämä liuospumppu on myös ainoa sähköenergiaa tarvitseva osa, minkä seurauksena absorptiolämpöpumpun sähkönkulutus on hyvin pientä verrattuna perinteiseen lämpöpumppuun.

Pienen sähkönkulutuksen ja hyvän teknisen käyttövarmuuden seurauksena myös käyttökustannukset pysyvät suhteellisen alhaisina ja ne ovat usein vastaavaa perinteistä lämpöpumppua alhaisemmat. Motivan vuonna 2014 tekemässä ylijäämlämmön hyödyntämistä koskevassa tutkimuksessa [10] tarkasteltiin yrityskohtaisia teollisuuden lämmöntalteenotto-sovelluksia. Tarkasteluissa vertailtiin mm. eri lämpöpumppusovellusten sopivuutta sovelluskohteen ominaisuuksien ja tarpeiden mukaan. Tarkastelussa oli mukana 6 eri kohdetta. Tutkimuksessa suoritetun perinteisen lämpöpumpun ja absorptiolämpöpumpun välisen vertailun tuloksena todettiin, että absorptiolämpöpumpun

hankintakustannukset olivat jokaisessa tapauksessa perinteistä lämpöpumppua alhaisemmat. Myös investoinnin takaisinmaksuajat olivat absorptiolämpöpumpulla perinteistä lämpöpumppua lyhyemmät.

Eräs absorptiolämpöpumpun hyvistä ominaisuuksista on myös sen laaja säädettävyys. Absorptiolämpöpumpun tehoa pystytään säätämään portaattomasti säätöalueen ollessa 0...100 %. Osakuormilla käytettäessä hyötysuhde pysyy melko hyvin alkuperäisellä tasollaan eikä siis laske merkittävästi. Absorptiolämpöpumpun tehoa säädellään muuttamalla syötettävän käyttölämmön lämpötehoa [10].

### 3.2 Rajoitteet

Käytettäessä LiBr-suolaliuosta LiBr:n kiteytyminen ja sen aiheuttama putkien tukkeutuminen aiheuttavat rajoitteita esimerkiksi imeyttimen lämpötilatasolle. Liian korkeat LiBr-pitoisuudet tai liian alhaiset lämpötilat aikaan saavat liuoksen kiteytymisen [7]. Tyypillisimmin tukkeutumista esiintyykin liuoslämmönsiirtimen ulostuloputkissa, joissa lämpötilat ovat suhteellisen matalia ja liuoksen LiBr-pitoisuus korkea [2]. Yleisin syy kiteytymiselle on laitteistoon vuotamaan päässyt ilma, minkä seurauksena höyrystimen painetaso ja toimintalämpötila kohoavat alentaen höyrystimen lämmönsiirtokapasiteettiä. Kun höyrystimen kuormitus kasvaa, kasvaa myös keittimen lämmön tarve johtaen lopulta absorptioliuoksen suurempiin LiBr-pitoisuuksiin. [7]

Kiteytymistä voidaan estää huolehtimalla imeyttimen riittävästä jäähdyttämisestä. Imeyttimen jäähdyttämisen ansiosta absorptioliuoksessa voidaan käyttää pienempiä LiBr-pitoisuuksia, jolloin toimintapiste saadaan siirrettyä kauemmaksi kiteytymisrajan tuntumasta. Mikäli kiteytymistä havaitaan, liuoksen lämpötilaa tulee nostaa yli liuoksen kyllästyypistettä vastaavan lämpötilan, jolloin muodostuneet kiteet liukenevat takaisin liuokseen [7]. Sen lisäksi liuosta voidaan vielä laimentaa höyrystimessä kiertävän veden avulla, keittimelle tuotavan lämpöenergian määrää voidaan pienentää tai liuokseen voidaan lisätä kiteytymistä estäviä lisäaineita [2].

Lämpöpumpun rakennusmateriaaleja valittaessa tulee ottaa huomioon työaineiden mahdolliset korroosio-ominaisuudet. H<sub>2</sub>O-LiBr-liuos aiheuttaa korroosiota useille metalleille kuten kuparille ja raudalle. Myös ammoniakki on erittäin hyvä liuotin kuparille ja sen seoksille. Ammoniakkia käytettäessä absorptiolämpöpumpun rakennusmateriaaleiksi soveltuvat esimerkiksi ruostumaton teräs ja kumi- sekä polymeerimateriaalit [2].

Materiaali valintojen lisäksi korroosion aiheuttamaan materiaalien syöpymiseen voidaan vaikuttaa myös liuoksen pH:n säädöllä. Liuoksen hapetuspotentiali riippuu voimak-

kaasti liuoksen pH-arvosta ja liuoksen pH-taso tulisikin pitää lähes neutraalina. Ajan kuluessa  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ -liuoksesta vapautuu vetykaasua kasvattaen liuoksen alkalisuutta ja tehden liuoksesta emäksisemmän. [2] pH:ta voidaan säätää esimerkiksi lisäämällä liuokseen vetybromidihappoa [7].

Työaineiden aiheuttamaa korroosiota voidaan hidastaa myös lisäämällä liuokseen korroosioinhibiittoria. Korroosioinhibiittorit hidastavat tapahtuvia korroosio reaktioita reagoimalla metallin kanssa ja muodostaen stabiilin oksidikerroksen metallin pinnalle saaden aikaan metallin passivoitumisen [2]. Korroosioinhibiittoreina voidaan käyttää esimerkiksi litiumkromaattia ( $\text{Li}_2\text{CrO}_4$ ), litiummolybdaatti ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ) tai litiumnitraattia ( $\text{LiNO}_3$ ) [7].

Työaineiden ominaisuuksista johtuvien rajoitusten lisäksi absorptiolämpöpumpun suuri koko verrattuna perinteiseen lämpöpumppuun aiheuttaa usein käyttökohteiden rajautumista lähinnä teollisuuden sovelluksiin. Suuret lämmönsiirtopinta-alat ja lämmönsiirron pienet lämpötilaerot kasvattavat absorptiolämpöpumpun kokoa. Esimerkiksi kylmäaineen ja jäähdytettävän veden lämpötilaeron tulisi olla mahdollisimman pieni, mikä vaatii suuret lämmönsiirtopinta-alat sekä pienet lämpövuot ja höyryn nopeudet, mitkä kasvattavat komponenttien kokoa [2].

## 4. ABSORPTIOLÄMPÖPUMPUN KÄYTTÖKOHTEET

Pohdittaessa absorptiolämpöpumpun soveltuvuutta tiettyihin käyttökohteisiin, huomioon otettavia tekijöitä ovat esimerkiksi kyseisissä toimintaolosuhteissa saavutettava hyötysuhde ja riittävä lämmityksen- ja jäähdytyksen tarve kuten myös käyttöenergian hinta ja saatavuus. Lämpöpumpun käyttö yleisesti ottaen on kannattavaa tapauksissa, joissa lämpöpumpun avulla lämpöä pystytään luovuttamaan lämpötilassa, jossa se suoraan tai epäsuorasti voi korvata ostoenergiana saatavaa lämpöä kuten kattilahöyryä tai kaasunpoltoa. Edellyttäen, että lämpöpumpun käyttöenergia on kustannuksiltaan halvempaa kuin lämpöpumpun avulla korvattu energia ja, että lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaika on riittävän lyhyt. [10] Absorptiotekniikka hyödynnetään enemmän jäähdytyskäytössä kuin lämmöntuotannossa. Siinä missä absorptiojäähdyttimiä on käytetty jo pitkään, absorptiolämpöpumppujen käyttö lämmitys tarkoituksessa on melko vähäistä.

Ominaisuuksiensa puolesta absorptiolämpöpumppu sopii paremmin matalalämpötilajärjestelmien (höyrystimelle tuotava lämpö on lämpötilaltaan 40–60 °C:sta) yhteyteen kuin korkealämpötilajärjestelmien (höyrystimelle tuotava lämpö on lämpötilaltaan 90–70 °C:sta) yhteyteen. Matalalämpötilajärjestelmien yhteydessä toimivan absorptiolämpöpumpun ideaalinen lämpökerroin voi olla jopa 20–50 % parempi kuin korkealämpötilajärjestelmien yhteydessä [6]. Suuren kokonsa takia absorptiolämpöpumppujen käyttökohteita ovat yleensä pääasiassa teollisuuden tuotantolaitokset ja tehtaat.

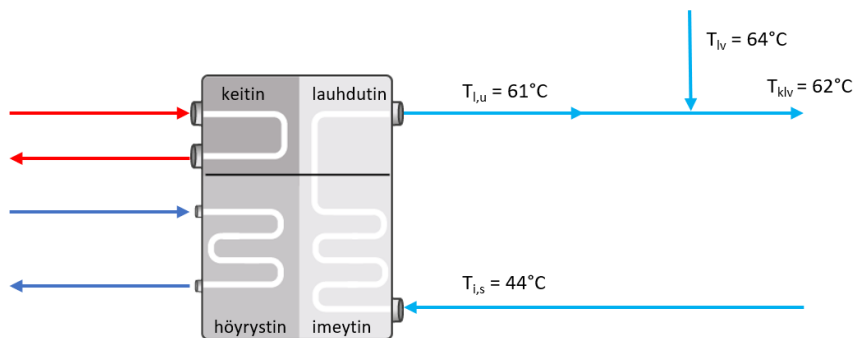
Moni teollisuusprosessi kuten kuivaus-, pesu-, haihdutus- ja tisläusprosessit tarvitsevat prosesseihinsa 40–90 °C:sta vettä [10]. Lämpöpumpuilla pystytään tuottamaan teollisuuden käyttöön höyryä sekä hyödyntämään niitä prosessivesien lämmityksen ja jäähdytyksen yhteydessä. Potentiaalisia käyttökohteita löytyy niin elintarvike-, metsä-, vaate- kuin kemianteollisuudesta. Teollisuusprosesseissa syntyvä ylijäämälämpö soveltuukin hyvin absorptiolämpöpumpun lämmönlähteeksi, koska teollisuuden prosesseissa syntyvät lämpövirrat ovat usein suuria ja suhteellisen korkealämpöisiä. Korkean lämpötilan lisäksi näiden etuna on sekä lämpömäärän että lämpötilan tasaisuus. Prosessilämpöjen hyödyntämisessä on kuitenkin otettava huomioon prosessissa esiintyvät välillä suuretkin ajalliset vaihtelut. [6]

Muita potentiaalisia käyttökohteita löytyy esimerkiksi kaukolämmön ja -kylmän tuotannosta sekä datakeskusten jäähdytyksen yhteydestä. Esimerkiksi Ruotsissa absorptiolämpöpumppua on käytetty teollisuuden ja yhdyskuntien hukkalämmön siirtämisessä kaukolämpöverkkoon [6]. Asuinrakennus käytössä absorptiolämpöpumppua voidaan pitää varteen otettavana ratkaisuna lähinnä tapauksissa, joissa sähköenergian saatavuus on hyvin rajallista, mutta joissa on edellytykset hyödyntää erilaisista lämmönlähteistä saatavilla olevaa lämpöenergiaa. Asuinrakennus käytössä olevat absorptiolämpöpumput käyttävät useimmiten käyttöenergianaan jonkin polttoaineen palamisessa saatavaa lämpöä. Lämpöpumppuja voidaan kuitenkin integroida myös esimerkiksi aurinkolämpösystemien ja geotermisten systemien yhteyteen. Absorptiojäähdyttimet ovat yleisin aurinkolämpösystemien yhteydessä käytettävistä jäähdytyslaitteista [12].

## 5. LASKENTAESIMERKKI

Tarkastelun kohteena on systeemi, jossa absorptiolämpöpumppua käytetään tuottamaan lämpöä kaukolämpöverkkoon. Absorptiolämpöpumppu on yhdistetty prosessin yhteyteen, josta se saa keittimelle ja höyrystimelle tarvitsemansa lämpöenergian. Absorptiolämpöpumpun avulla lämmitetään ensin imeyttimen ja sitten lauhduttimen läpi kulkevaa jäähdytysvettä. Lopuksi absorptiolämpöpumpusta poistuva jäähdytysvesi syötetään kaukolämpöverkkoon. Tarkastelussa keskitytään siihen, miten jäähdytysveden lämpötila vaikuttaa absorptiolämpöpumpun toimintaan ja lämpökeroimeen. Vertailun kohteena on kaksi erilaista kytkentätapaa, joilla absorptiolämpöpumppu on kytkettynä kaukolämpöverkon yhteyteen.

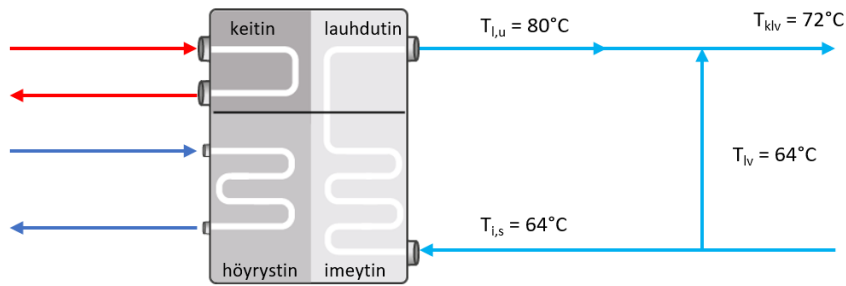
Ensimmäisessä kytkentämallissa imeyttimelle tuleva jäähdytysvesi otetaan suoraan kaukolämpöverkosta palaavana  $44\text{ °C}$ :na vetenä. Lauhduttimelta ulostuleva vesi on lämminnyt imeyttimen ja lauhduttimen läpi kulkiessaan  $61\text{ °C}$ :een lämpötilaan. Lauhduttimelta ulostullut jäähdytysvesi yhdistetään ennen kaukolämpöverkkoon syöttämistä prosessista saatavaan  $64\text{ °C}$ :een lämpötilassa olevaan veteen, jolloin takaisin kaukolämpöverkkoon syötettävän veden loppulämpötilaksi saadaan  $62\text{ °C}$ :tta. Kuvassa 4 on havainnollistettu ensimmäisen tapauksen mukaista kytkentämallia.



**Kuva 4.** KytKentämalli 1

Toisessa kytkentämallissa absorptiolämpöpumppuun syötettävä jäähdytysvesi on esilämmitetty  $64\text{ °C}$ :een lämpötilaan. Osa esilämmitetystä vedestä syötetään absorptiolämpöpumpulle, jonka sisällä jäähdytysvesi kulkee kuten edellä. Lauhduttimelta ulostuleva jäähdytysvesi on nyt lämminnyt  $80\text{ °C}$ :een lämpötilaan.  $80\text{ °C}$ :nen vesi yhdistetään takaisin yhteen esilämmitetyn veden kanssa, jolloin kaukolämpövedeen syötettävän veden loppulämpötilaksi saadaan  $72\text{ °C}$ :tta. Tätä kytkentämallia on havainnollistettu kuvassa 5.





**Kuva 5. Kytentämalli 2**

Imeyttimeltä poistettu lämpövirta  $Q_i$  voidaan laskea ennen ja jälkeen imeyttimelle menoa mitattujen jäähdytysveden lämpötilojen avulla seuraavasti

$$Q_i = mc(T_{i,u} - T_{i,s}) \quad (8)$$

missä  $m$  on jäähdytysveden massavirta,  $c$  on veden ominaislämpökapasiteetti,  $T_{i,u}$  on imeyttimestä poistuvan jäähdytysveden lämpötila ja  $T_{i,s}$  imeyttimelle syötettävän jäähdytysveden lämpötila. Vastaavasti lauhduttimelta saatavan lämpövirran  $Q_l$  suuruus saadaan laskettua seuraavasti

$$Q_l = mc(T_{l,u} - T_{l,s}) \quad (9)$$

missä  $T_{l,u}$  on lauhduttimelta poistuvan jäähdytysveden lämpötila ja  $T_{l,s}$  lauhduttimelle syötettävän jäähdytysveden lämpötila.

Kun kyseessä on systeemi, jossa imeyttimeltä poistuva jäähdytysvesi syötetään imeyttimen jälkeen lauhduttimelle voidaan lämpötilat  $T_{i,u}$  ja  $T_{l,s}$  merkitä yhtä suuriksi. Tämän seurauksena yhdistettäessä imeyttimeltä ja lauhduttimelta saatavat lämpövirrat saadaan seuraavanlainen yhtälö

$$Q_i + Q_l = mc(T_{l,u} - T_{i,s}) \quad (10)$$

Yhtälön 4 mukaisesti absorptiolämpöpumpun saavuttama lämpökerroin voidaan laskea imeyttimeltä ja lauhduttimelta saatavan kokonaislämpömäärän suhteena absorptiolämpöpumpun ottamaan käyttöenergiaan. Korvattaessa yhtälössä 4 esitetty lauhduttimelta ja imeyttimeltä saatavien lämpövirtojen summa yhtälöstä 10 saatavalla tuloksella lämpöpumpun COP:ksi saadaan siten

$$COP = \frac{mc(T_{l,u} - T_{i,s})}{Q_k + P_p} \quad (11)$$

Koska liuospumppun ottaman sähkötehon ja keittimelle syötettävän käyttölämpövirran määrää tai lämpötilan suuruutta ei tiedetä, lämpöpumpulle ei pystytä laskemaan tarkkaa

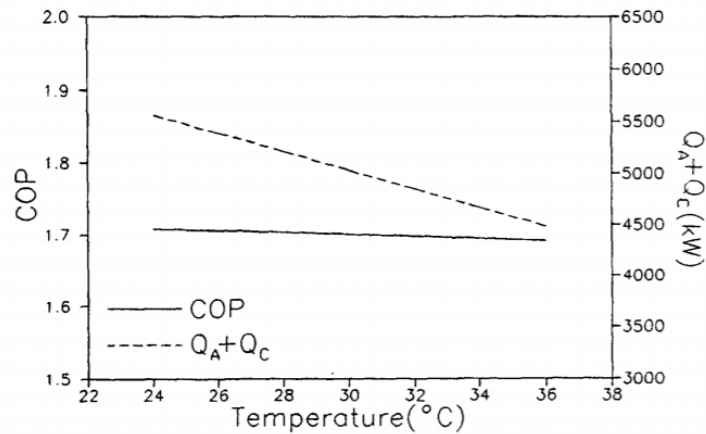
lämpökerrointa. Kun oletetaan, että keittimelle tuotu lämpövirta, liuospumun sähköteho, höyrystimen lämpövirta ja jäähdytysveden massavirta pysyvät kummassakin tapauksessa muuttumattomina, pystytään tapausten mukaisille COP-arvoille suorittamaan tietynlainen vertailu. Käyttämällä edellä esitetyillä eri kytkentämalleilla saavutettavissa olevien COP-arvojen vertailussa yhtälöä 11 pystytään vertailemaan COP-arvojen keskinäistä suuruutta. Koska veden ominaislämpökapasiteetin voidaan olettaa pysyvän vakiona, voidaan vertailu suorittaa seuraavan yhtälön avulla

$$\frac{COP_1}{COP_2} = \frac{(T_{l,u,1} - T_{i,s,1})}{(T_{l,u,2} - T_{i,s,2})} \quad (12)$$

missä  $COP_1$ ,  $T_{l,u,1}$ , ja  $T_{i,s,1}$  ovat ensimmäisen kytkentämallin mukaiset lämpökerroin, lauhduttimelta poistuvan jäähdytysveden lämpötila ja imeyttimelle tulevan jäähdytysveden lämpötila. Vastaavasti  $COP_2$ ,  $T_{l,u,2}$  ja  $T_{i,s,2}$  ovat jälkimmäisen kytkentämallin mukaiset arvot lämpökertoimelle ja jäähdytysveden lämpötiloille.

Yhtälöstä 12 saadaan tulos, jonka mukaan COP on ensimmäisessä kytkentämallissa 6,25 % suurempi kuin jälkimmäisessä. Saatu tulos johtuu lähinnä siitä, että ensimmäisessä kytkentämallissa lämpöpumpun avulla suoritettu lämpötilan nosto on asteen suurempi kuin toisessa kytkentämallissa. Jotta lämpöpumppu kuitenkin voisi tuottaa ensimmäisessä kytkentämallissa olevan suuremman lämmitystehon tarkoittaa se sitä, että lämpöpumpun muidenkin parametrien on muututtava. Tällöin alku oletus esimerkiksi siitä, että lämpöpumpun käyttölämmön määrä pysyisi molemmissa tapauksissa samana ei enää pidä paikkaansa.

Todellisuudessa jäähdytysveden lämpötilan nosto vaikuttaa esimerkiksi lauhduttimen ja keittimen toimintaan. Kuten aiemmin luvussa 2.1 todettiin, niin lauhduttimen toimintapiste määräytyy jäähdytysveden lämpötilan mukaan. Jäähdytysveden lämpötilan noston seurauksena lauhdutusteho pienenee ja lauhduttimen painetaso nousee. Lauhduttimen paineen nousu puolestaan kasvattaa keittimen toimintalämpötilaa, mutta laskee tarvittavan käyttölämmön määrää. [11] Kuvassa 6 on esitetty jäähdytysveden lämpötilan vaikutus saatavaan lämpökertoimeen ja lämpöpumpun tuottamaan lämmityskapasiteettiin.



**Kuva 6.** Jäähdytysveden lämpötilan vaikutus absorptiolämpöpumpun COP-arvoon ja lämmön tuottoon [11].

Kuten kuvasta 6 nähdään jäähdytysveden lämpötilan muutoksella ei kuitenkaan ole kovin merkittävää vaikutusta COP-arvoon. Tämä johtuu siitä, että painetason nousun seurauksena muuttuva primäärilämmön tarve pienenee lähes samassa suhteessa kuin lämmityskapasiteettikin.

Voidaankin siis todeta, että kytkentämallin 2 mukaisella jäähdytysveden lämpötilan nostolla ei suoraan ole kovinkaan suurta vaikutusta absorptiolämpöpumpun COP-arvoon. Lämpötilan nosto vaikuttaa kuitenkin lämpöpumpun sisäisiin toimintapisteisiin kasvattamalla esimerkiksi lauhduttimen painetasoa ja keittimen toimintalämpötilaa. Kuten luvussa 2.1 todettiin, on lämpötilaa nostettaessa myös otettava huomioon, että imeyttimeltä poistuvan liuoksen ja imeyttimelle tulevan jäähdytysveden lämpötilat eivät ole liian lähellä toisiaan. Tällä taataan se, että imeyttimen jäähdytys pysyy riittävän tehokkaana. Myös jäähdytysveden massavirran muutokset aikaansaavat muutoksia imeyttimen ja lauhduttimen toimintalämpötiloihin. Jos massavirtaa pienennetään liikaa, lämpöpumpun lämmönsiirtotehokkuus heikkenee, minkä seurauksena toimintalämpötilat nousevat liian korkealle tasolle [11]. Jäähdytysveden lämpötilan nostolla pystytään myös pienentämään käyttölämmön tarvetta. Samalla kuitenkin lämpöpumpun tuottama lämpömäärä pienenee.

## 6. LÄMPÖPUMPPUJEN MARKKINAT

Absorptiolämpöpumpputekniikan hyödyntäminen oli vielä 1900-luvulla melko yleistä. Höyrykompressoritekniikan kehittyessä absorptiolaitteet alkoivat kuitenkin nopeasti jäemmään taka-alalle ja kiinnostus absorptiotekniikkaan tutkimuksiin ja kehitykseen hiipui. [15] Absorptiolämpöpumppujen käytön vähenemiseen vaikuttivat myös esimerkiksi polttoaineiden ja sähkön hinnan lasku. Tilastollisia tietoja absorptiolämpöpumppujen käytettävyydestä on hyvin heikosti löydettävissä. Selvää kuitenkin on, että useassa tapauksessa absorptiolämpöpumppujen käyttö on selvästi mekaanista kompressorilämpöpumppua vähäisempää. Absorptiolämpöpumppujen markkinaosuus lämpöpumppujen kokonaismarkkinoista onkin edelleen melko pieni. Vaikka absorptiosysteemit tarjoavatkin monia etuja höyrykompressorien suosio dominoi lähes kaikilla markkina-alueilla [13]. Siitä huolimatta absorptiolämpöpumppujen nykyinen kehitys näyttäytyy lupaavana ja niiden osuus on kasvamassa hiljalleen.

Suurin osa yleisistä lämpöpumppumarkkinoista on keskittynyt pienasuinarakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeisiin. Lämpöpumppuvalmistajat ovat kuitenkin alkaneet kohdistamaan yhä enemmän kiinnostustaan suurien tehdas- ja varastotilojen lämmöntuotantoon sekä teollisten sovellusten kehitykseen ja myyntiin. Absorptiosysteemeille ominaisten suurien lämmön- ja massansiirtokomponenttien koko ja pääomakustannukset ovat rajoittaneet absorptiolämpöpumppujen käyttöä asuinrakennuksissa ja kevyissä kaupallisissa sovelluksissa [16]. Absorptiotekniikan markkinat tulevat jatkossa mitä todennäköisemmin sijoittumaan kokonaisenergiajärjestelmien, teollisen ylijäämälämmön talteenoton, aurinkolämpösystemien ja erityisesti jäähdytysjärjestelmien yhteyteen [15].

Absorptiolämpöpumppujen käytön lisääntymisen on arveltu keskittyvän suurimmilta osin sinne, missä niiden käyttö on tähänkin asti ollut suurinta [15]. Eniten absorptiolämpöpumppuja ja -jäähdyttimiä valmistetaan Aasiassa, jossa niitä käytetään pääasiassa ilmastointilaitteina ja jäähdyttiminä. Merkittäviä valmistajamaita ovatkin Kiina, Intia, Japani ja Korea. Absorptiolämpöpumppujen valmistajamaita löytyy Aasian lisäksi myös esimerkiksi Länsi-Euroopasta, Amerikasta ja Tyynenmeren alueelta. Absorptiolämpöpumppujen kannalta merkittävänä Euroopan maina esimerkkeinä voidaan mainita ainakin Saksa, Ranska, Englanti ja Sveitsi.

Absorptiolämpöpumppujen käyttöönoton lisääminen edellyttää niin lämpöpumpun suorituskyvyn parantamista kuin kustannusten alenemistakin. Kehitystyölle haasteita tulee

antamaan esimerkiksi absorptiolämpöpumppujen toiminta-alueen kasvattaminen, kapasiteetin skaalaus asuinrakennus käyttöön, kompaktimman kokonaisuuden aikaansaaminen sekä älykäs integrointi muiden lämmönlähteiden yhteyteen. Kehityksen kannalta tärkeä tekijä on myös käytettävät työaineparit. Näiden lisäksi absorptiolämpöpumppujen tulevaisuuteen ja taloudelliseen kannattavuuteen tulee vaikuttamaan sopivien käyttöenergianlähteiden saatavuus, hyödynnettävyys ja edullisuus.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Absorptiolämpöpumppu sisältää lauhduttimen ja höyrystimen lisäksi keitin-imeytinlaitteistosta koostuvan termisen kompressorin. Keitin-imeytinlaitteiston avulla kylmäaineen painetasoa nostaminen suoritetaan siten, että höyrystynyt kylmäaine absorboidaan ensin imeyttimeissä olevaan absorptioliuokseen. Absorptioliuoksen avulla kylmäaineen paineen korotus voidaan tehdä liuospumpun avulla, jonka tarvitsema sähköenergia on huomattavasti mekaanisen kompressorin vaatimaa sähköenergiaa pienempi. Paineen noston jälkeen kylmäaine höyrystetään uudelleen ja erotetaan liuoksesta keittimelle tuodun lämpöenergian avulla. Prosessin toiminta perustuu puhtaan ja absorptioliuokseen sitoutuneen kylmäaineen höyrystymispisteiden väliseen eroavaisuuteen.

Liikkuvien osien vähäisyys tekee absorptiolämpöpumpusta teknisesti luotettavan ja käytettäessä hiljaisen. Absorptiolämpöpumpun toimintaan vaikuttaa suuresti käytettyjen työaineiden ominaisuudet. Yleisimmin käytetyt työaineparit ovat  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ - ja  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -yhdistelmät. Valitusta työaineparista riippuen, absorptiolämpöpumppua käytettäessä on pidettävä huoli, että esimerkiksi absorptioliuoksessa käytettävän suolan kiteytyminen ja työaineiden aiheuttama korrosio eivät pääse aiheuttamaan vahinkoja laitteistolle. Jos kylmäaineen ja absorbentin höyrystymislämpötilat ovat lähellä toisiaan, tulee ennen lauhduttimelle menoa asentaa rektifikaattori, jotta voidaan taata höyrystyneen kylmäaineen riittävä puhtaus ja samalla varmistaa laitteiston oikeanlainen toiminta. Absorptiolämpöpumpun vaatimat huoltotoimenpiteet liittyvät lähinnä työaineiden oikeanlaisten toimintaolosuhteiden ylläpitämiseen.

Absorptiolämpöpumpun lämpö- ja kylmäkertoimiin sekä lämmitys- ja jäähdytyskapasiteettiin voidaan vaikuttaa usealla eri tavalla. Toimintaa voidaan säätää esimerkiksi käyttöenergian, höyrystimelle poistettavan lämmön tai jäähdytysveden määrää ja lämpötilaa muuttamalla. Kertoimia voidaan parantaa myös lisäämällä lämpöpumpun keitin vaiheiden määrää.

Absorptiolämpöpumput soveltuvat asennettavaksi matalalämpötilajärjestelmien yhteyteen, kun sähköenergian saatavuus on rajoitettua, toimintaa rajoittavat esimerkiksi melurajoitukset tai saatavilla on paljon hyödynnettäväksi sopivaa lämpöenergiaa. Suuren kokonsa takia absorptiolämpöpumppujen käyttökohteita ovat pääasiassa teollisuuden tuotantolaitokset ja tehtaat. Lämpöpumppuja voidaan integroida esimerkiksi aurinkoläm-

pösystemien, geotermistensysteemien ja ylijäämälämpösystemien yhteyteen. Absorptiolämpöpumput ovat parhaimmillaan ympäristöissä, joissa syntyy paljon lämpöä ja samaan aikaan tarvitaan jäähdytystä.

Absorptiolämpöpumppujen osuus kokonaismarkkinoista on verrattain pieni johtuen höyrykompressoritekniikan kehityksen aiheuttamasta absorptiolämpöpumppujen syrjäytymisestä sekä polttoaineiden ja sähkön hinnan lasku. Suuren kokonsa ja käyttölämmön vaatimusten takia absorptiolämpöpumpun käyttökohteet ovat lähinnä teollisuuden parissa. Suurimmat absorptiolämpöpumppujen valmistajamaat löytyvät Aasiasta. Absorptiolämpöpumppujen tulevaisuuden kannalta kehitystyötä tarvitaan vielä esimerkiksi toiminta-alueen kasvattamisen, kapasiteetin skaalaamisen, kompaktimman kokonaisuuden aikaansaamisen ja työaineparien kehityksen parissa.

# LÄHTEET

- [1] Tuotannon hukkalämpö hyödyksi, Motiva, 2014. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf)
- [2] T. Koljonen, K. Sipilä, Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä, VTT tiedotteita 1926, Espoo, 1998, 55 s. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>
- [3] Gold Book, IUPAC, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.4.2020): <https://gold-book.iupac.org/>
- [4] 2006 ASHRAE Handbook – Refrigeration (I-P edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2006, pp. 41.1-41.11.
- [5] P. Chatzidakis, B. Dawoud, An alternative approach towards heat pump working pair screening, Renewable Energy, Vol. 110, Sep 2017, pp. 47-58.
- [6] I. Aho, A. Laitinen, Absorptiolämpöpumppu öljylämmitysjärjestelmissä, VTT tiedotteita 1063, Espoo, Syys 1989, 80 s.
- [7] G. A. Florides, S. A. Kalogirou, S. A. Tassou, L. C. Wrobel, Design and construction of a LiBr-water absorption machine, Energy Conversion and Management, Vol. 44, Is. 15, Sep 2003, pp. 2483-2508.
- [8] J. F. Chen, Y. J. Dai, R. Z. Wang, Experimental and analytical study on an air-cooled single effect LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller driven by evacuated glass tube solar collector for cooling application in residential buildings, Solar Energy, Vol. 151, 15 Jul 2017, pp. 110-118.
- [9] Lesson 15: Vapor Absorption Refrigeration Systems Based on Water Lithium Bromide Pair, IIT Kharagpur, 2015, s. 15. Saatavissa: <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/112105129/pdf/RAC%20Lecture%202015.pdf>
- [10] I. Maaskola, M. Kataikko, Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset, Motiva, Helsinki, Tammi 2014, 86 s. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Lampopumppu- ja\\_ORC-sovellukset.pdf](https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf)
- [11] S. Jeong, B. H. Kang, S. W. Karng, Dynamic simulation of an absorption heat pump for recovering low grade waste heat, Applied Thermal Engineering, Vol. 18, Is. 1–2, Jan–Feb 1998, pp. 1-12.
- [12] H-M. Henning, Solar assisted air conditioning of buildings – an overview, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Is. 10, Jul 2007, pp. 1734-1749.
- [13] S. Aphornratana, S. Chungpalbulpatana, P. Srihirin, A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 5, Is. 4, Dec 2001, pp. 343-372.



- [14] I. Dinčer, M. Kanoğlu, *Refrigation Systems and Applications* (2<sup>nd</sup> Edition), John Wiley & Sons, 2010, s. 323-332.
- [15] F. Ziegler, *State of Art in Sorption Heat Pumping and Cooling Technologies*, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25, Is. 4, Jun 2002, pp. 450-459.
- [16] A. Goyal, M. A. Staedter, D. C. Hoysall, M. J. Ponkala, S. Garimella, *Experimental evaluation of a small capacity, waste-heat driven ammonia-water absorption chiller*, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 79, Jul 2017, pp. 89-100.

## LIITE A: LÄMPÖKERTOIMEN LÄMPÖTILAMUOTOINEN ESITYS

Aloitetaan tarkastelemalla absorptiolämpöpumpussa tapahtuvia reaktioita entropian kautta. Entropia kuvaa systeemissä vallitsevaa epäjärjestystä. Tässä tapauksessa aineiden sisältämien molekyylien ja atomien järjestyneisyyttä. Kuten tiedetään aineen lämpötilan noustessa molekyylien ja atomien liike-energia kasvaa ja samalla niiden epäjärjestyneisyys siis entropia kasvaa. Suljetun systeemin entropian muutos  $\Delta S$  voidaan esittää systeemin lämpötilan  $T$  ja systeemiin tuodun (tai systeemistä poistetun) lämpömäärän  $Q$  avulla seuraavasti

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (13)$$

Kun systeemiin tuodaan lämpöenergiaa systeemin entropia kasvaa ja vastaavasti lämpöä poistettaessa entropia pienenee.

Absorptiolämpöpumppu muodostaa suljetun systeemin, mikä tarkoittaa sitä, että systeemi voi toimia vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa vaihtaen energiaa, mutta ei ainetta. Tarkasteltaessa suljetun systeemin kokonaisentropianmuutosta sen on oltava 0. Tämän seurauksena myös absorptiolämpöpumpun kokonaisentropian muutoksen on oltava 0, minkä seurauksena muutosta kuvaavaksi yhtälöksi saadaan

$$\Delta S_g + \Delta S_e = \Delta S_c + \Delta S_a \quad (14)$$

missä  $\Delta S_g$ ,  $\Delta S_e$ ,  $\Delta S_c$  ja  $\Delta S_a$  ovat keittimessä, höyrystimessä, lauhduttimessa ja imeyttimessä tapahtuvien höyrystymis-, lauhtumis- ja absorptioprosessien aikaan saamat entropianmuutokset.

Absorptiolämpöpumppuprosessin lämpömäärät voidaan edelleen lausua hyödyntäen yhtälöä 13 seuraavasti

$$Q_g = T_g \Delta S_g \quad (15)$$

$$Q_e = T_e \Delta S_e \quad (16)$$

$$Q_c = T_m \Delta S_c \quad (17)$$

$$Q_a = T_m \Delta S_a \quad (18)$$

missä  $Q_g$  on keittimelle tuotu kokonaiskäyttöenergia sisältäen siis keittimelle tuotavan lämpömäärän ja liuospumpun ottaman sähkötehon.  $Q_e$  on höyrystimelle tuotava lämpö-

määrä ja  $Q_c$  ja  $Q_a$  ovat lauhduttimesta ja imeyttimestä vapautuvat lämpömäärät. Vastavasti keittimen, höyrystimen lämmönlähteiden lämpötiloja kuvaavat suureet  $T_g$  ja  $T_e$ .  $T_m$  kuvaa lämmityskohteen lämpötilaa, johon lauhduttimelta ja imeyttimeltä vapautuvat lämpömäärät poistetaan.

Prosessin lämpötasapainoa voidaan kuvata yhtälöllä

$$Q_g + Q_e = Q_c + Q_a \quad (19)$$

Esitettäessä prosessin lämpötasapainoa kuvaava yhtälö 19 edellä entropian avulla esitettyjen lämpömäärien määritelmien 15, 16, 17 ja 18 avulla saadaan yhtälö.

$$T_e \Delta S_e + T_g \Delta S_g = T_m (\Delta S_g + \Delta S_e) \quad (20)$$

Yllä esitettyä yhtälöä 18 käyttäen saadaan höyrystimellä ja keittimellä tapahtuvien entropianmuutosten välille seuraava yhteys

$$\frac{\Delta S_e}{\Delta S_g} = \frac{T_g - T_m}{T_m - T_e} \quad (21)$$

Lämmityskäytössä toimivalle lämpöpumpulle lämpökerroin lasketaan jakamalla keittimelle tuotu lämpömäärä prosessin tuottamalla lämmöllä eli lauhduttimesta ja imeyttimestä vapautuvalla lämmöllä.

$$COP_h = \frac{Q_a + Q_c}{Q_g} \quad (22)$$

Kun yhtälöön 18 lisätään määritelmät 15, 17 ja 18 lämpökertoimeksi saadaan

$$COP_h = \frac{T_m \Delta S_a + T_m \Delta S_c}{T_g \Delta S_g} \quad (23)$$

$$= \frac{T_m}{T_g} \cdot \frac{\Delta S_a + \Delta S_c}{\Delta S_g} \quad (24)$$

$$= \frac{T_m}{T_g} \cdot \frac{\Delta S_g + \Delta S_e}{\Delta S_g} \quad (25)$$

$$= \frac{T_m}{T_g} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta S_e}{\Delta S_g} \right) \quad (26)$$

Jotta yhtälö voidaan saattaa muotoon, jossa siinä esiintyy vain lämpötila arvoja, sijoitetaan saatuun tulokseen yhtälön 21 mukaisesti saatu höyrystimen ja keittimen entropianmuutosten suhteen riippuvuus toisistaan. Näin ollen saadaan yhtälö vielä muutaman väliaiheen kautta muokattua lopulliseen muotoonsa

$$COP_h = \frac{T_m}{T_g} \cdot \left( 1 + \frac{T_g - T_m}{T_m - T_e} \right) \quad (27)$$

$$= \frac{T_m}{T_g} \cdot \frac{T_m - T_e + T_g - T_m}{T_m - T_e} \quad (28)$$

$$= \frac{T_m}{T_g} \cdot \frac{T_g - T_e}{T_m - T_e} \quad (29)$$

$$= \frac{\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_g}}{\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_m}} \quad (30)$$

Lämpöpumpun kylmäkerroin lasketaan jakamalla keittimelle tuotu lämpömäärä höyrystimelle tuodulla lämpömäärällä eli kylmäaltaasta poistetulla lämmöllä.

$$COP_c = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (31)$$

Lämpötilamuotoisen yhtälön muodostus tapahtuu kuten edellä määritettäessä lämpökerrointa, jolloin saadaan yhtälö

$$COP_c = \frac{T_e \Delta S_e}{T_g \Delta S_g} \quad (32)$$

Tähän muotoon voidaan käyttää suoraan yhtälöä 21, jolloin saadaan

$$COP_c = \frac{T_m}{T_g} \cdot \frac{T_g - T_m}{T_m - T_e} \quad (33)$$

$$= \frac{\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_g}}{\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_m}} \quad (34)$$