

Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä

Tiina Koljonen & Kari Sipilä
VTT Energia



ISBN 951-38-5334-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5335-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000,
FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energiajärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Maini Manninen

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1998

Koljonen, Tiina & Sipilä, Kari. Uudemman absorptiojähdytystekniikan soveltaminen kaukojähdytyksessä. [Modern absorption technology for district cooling]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1926. 55 s.

Avainsanat absorption cooling technology, cooling systems, district cooling, thermal networks

TIIVISTELMÄ

Tässä projektissa tutkittiin absorptiojähdytystekniikan ja erityisesti uudemman 2-vaiheisen absorptiojähdytystekniikan soveltuvuutta suomalaiseen kaukolämpöjärjestelmään. Kaukojähdytyksellä saadaan kaukolämpöverkkoon lisäkulutusta kesäaikana, jolloin verkon käyttöaste on muuten alhainen. Kaukolämmitys ja -jähdytys yhdistettynä lämmön ja sähkön yhteistuotantoon sekä lämmön ja kylmän varastointiin antavat uusia mahdollisuuksia energiajärjestelmän kokonaisvaltaisen käytön suunnitteluun.

Kaukolämmöllä toimivista absorptiojähdyttimistä käyttökelpoisia ovat single-effect (SE) 1. yksivaiheinen tai single-effect/double-lift (SE/DL) 1. yksivaiheinen/kaksiporainen jäähdytin. Työainepareina käytetään vesi - litiumbromidi ($H_2O - LiBr$) tai ammoniakki – vesi ($NH_3 - H_2O$) –pareja. Mielenkiintoisin ratkaisu Suomen oloihin on SE/DL-absorptiojähdytin, jota voidaan ajaa myös pelkästään SE-moodissa.

Suomessa ensimmäinen kaukolämpökäyttöinen SE-absorptiojähdytin otettiin käyttöön Helsingin Pitäjänmäellä keväällä 1998. Saksassa on rakennettu ensimmäiset SE/DL-absorptiotekniikan pilottikohteet Berliiniin (400 kW) vuonna 1996 ja Düsseldorfin (300 kW) vuonna 1997. Täysin kaupallisin perustein on toteutettu vuonna 1997 Münchenin lentokentällä 2,5 MW:n SE/DL-absorptiokoneisto, joka käyttää dieselin prosessilämpöä.

VTT Energiassa tutkittiin sekä SE- että SE/DL-absorptiojähdyttimien toimintaa Aspen PlusTM -simulointiohjelmistolla. Simulointien mukaan SE-jähdyttimen COP laskee nopeasti alle 80 °C kaukolämpöveden lämpötilalla ja yli 30 °C:n jäähdytysveden tulolämpötilalla. Jos kylmän veden menolämpötilana käytettäisiin +7 °C:n sijasta +10 °C, nousisi SE-jähdyttimen COP noin 5 %. SE/DL-jähdyttimen COP ei ole niin herkkä parametrien muutoksille, koska jäähdytin voi toimia myös SE-tilassa.

Kahden eri kokoisien rakennustilavuuden jäähdytyskustannuksia arvioitiin esimerkkilaskelmalla, jossa kylmän tarpeen huipunkäyttöajat ovat yhtä suuret. Nykyisellä sähkön ja kaukolämmön keskihintatasolla SE-absorptiojähdytin saisi maksaa 6 – 28 % enemmän ja SE/DL-jähdytin 50 % vähemmän kuin perinteinen kompressorijähdytin, jotta kylmäenergian hinnat olisivat samat. Jos SE/DL-jähdytintä voidaan ajaa myös SE-tilassa, hintaero kompressorijähdytimeen verrattuna pienenee. Jos kaukolämmön hinta jäähdytyskaudella on puolet talven keskihinnasta ja kylmäenergian hinnat haluttaisiin kaikilla jäähdytystavoilla samoiksi, SE-absorptiojähdytin saisi maksaa 59 – 68 % ja SE/DL 31 – 33 % enemmän kuin kompressorijähdytin. Kylmäkoneen mitoituksessa on

aina otettava huomioon kylmävaraston käyttö kuorman tasaajana. Kylmäkoneen mitoitustehoa voidaan silloin pienentää ja koneen huipunkäyttöaika kasvaa. Suomessa kiinteistöjen jäähdytyksen huipun käyttöaika on tyypillisesti 500 – 700 tuntia vuodessa.

Absorptiotekniikalla toteutetun jäähdytyksen yhteinen etu kompressorijäähdytykseen (COP = 4,0) verrattuna on sähköenergian kulutuksen säästö ja sähkön lisätuotannon mahdollisuus lämmitysvoimalaitoksessa. Vastapainelaitoksessa ($r = 0,5$) 1 MW kylmätehon tuottaminen kuluttajalle absorptiotekniikalla (COP = 0,7) tuottaa noin 1 MW lisää myytävää sähkötehoa ja lämpöä tuottavassa kombilaitoksessa ($r = 1,0$) noin 1,7 MW.

Koljonen, Tiina & Sipilä, Kari. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. [Modern absorption technology for district cooling]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1926. 55 p.

Keywords absorption cooling technology, cooling systems, district cooling, thermal networks

ABSTRACT

The suitability of absorption cooling technology and in particular of modern 2-phase one to the Finnish district heating system was studied. In summertime, when the degree of utilisation in the network is low, additional consumption is created in the district heating network by applying district cooling. District heating and cooling combined with heat and electricity co-generation and with heat and cold storage offer new alternatives for planning an integrated utilisation of the energy system.

Feasible absorption coolers operated with district heat are a single-effect (SE) cooler or a single-effect/double-lift (SE/DL) cooler. Water - lithium bromide (H_2O - LiBr) or ammonia - water (NH_3 - H_2O) pairs are used as materials. The most interesting system in the Finnish conditions is an SE/DL absorption cooler, which can also be run solely in SE mode.

The first SE absorption cooler operated with district heat in Finland was commissioned in Helsinki in spring 1998. In Germany, the first pilot plants operated with SE/DL absorption technology were constructed in Berlin (400 kW) in 1996 and in Düsseldorf (300 kW) in 1997. A commercial SE/DL absorption machinery of 2.5 MW operated with the process heat of a diesel was commissioned at the airport of Munich in 1997.

The operation of both the SE and SE/DL absorption coolers was studied with the Aspen PlusTM simulation program at VTT Energy. According to the simulations the COP of the SE coolers falls quickly at less than 80 °C temperature of district heating water and at more than 30 °C inlet temperature of cooling water. If +10 °C were applied for the outlet temperature of cold water, instead of the present +7 °C, the COP of the SE cooler would increase by about 5%. The COP of the SE/DL cooler is not as sensitive to changes in parameters, as the cooler can also be operated in SE mode.

Cooling costs of two different building volumes were estimated with an reference calculation by applying the same peak operation time of cooling. At the present average price level of electricity and district heat, the price of the SE absorption cooler could be 6 - 28% higher and of the SE/DL cooler 50% lower than that of the conventional compressor cooler, to achieve the same price of cooling energy. If the SE/DL cooler can also be operated in SE mode, the price difference is reduced. If the price of district heat during the cooling season were half of the average price in wintertime and the prices of cold energy should be equal in all cooling modes, the price of the SE absorption cooler could be 59 - 68% higher and of the SE/DL cooler 31 - 33% higher than that of the

compressor cooler. When dimensioning the cooling machine, the use of the cold store as load compensator should always be considered. The dimensioning capacity of the cooling machine can be reduced, and its peak operation time increases. In Finland, the peak operation time of cooling in buildings typically ranges 500 - 700 hours a year.

Advantages common to coolers operated with absorption technology, compared to compressor cooling, are reduced consumption of electric power and a possibility of increasing electricity generation in the heating power plant. In a back-pressure power plant ($r = 0.5$) the generation of 1 MW cooling power with absorption technology (COP = 0.7) produces about 1 MW additional electric power for sale, and in a heat-generating combined plant ($r = 1.0$) about 1.7 MW.

ALKUSANAT

Tutkimus tehtiin VTT Energiassa ja se oli osa Tekesin rahoittamaa ja Suomen kaukolämpö ry:n koordinoimaa kaukolämmön TERMO-tutkimusohjelmaa. Tekesin lisäksi tutkimuksen rahoitukseen osallistui kuusi energialaitosta.

Tutkimusprojektin johtoryhmä koostui rahoittajien edustajista. Johtoryhmään kuuluivat:

Heikki Kotila	Tekes
Jari Kostama	Tekes
Mirja Tiitinen	Suomen kaukolämpö ry, puheenjohtaja
Markku Vartia	Helsingin energia
Jarmo Jokisalo	Espoon Sähkö Oy
Timo Paldanius	Vantaan Energia Oy
Pentti Valta	Lahden Energia Oy
Kari Härkönen	Rovaniemen Energia Oy
Tapio Kesikuru	Kokkolan Energialaitos

Johtoryhmä kokoontui kolme kertaa projektin aikana. Projektiin liittyi myös tutustumisen Saksassa Münchenin lentokentällä olevaan 2,5 MW:n absorptio-jäähdyttimeen.

Tekijät haluavat tässä yhteydessä kiittää rahoittajia ja johtoryhmän jäseniä.

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKUSANAT	7
1. JOHDANTO	10
2. ABSORPTIOJÄÄHDYTYSPROSESSIN TERMODYNAAMISET PERUSTEET	11
2.1 Sorptioprosessit	11
2.2 Teoreettinen absorptiolämpöpumppu	11
2.3 Absorptiojäähdytysprosessin toimintaperiaate	12
2.4 Absorptiojäähdytysprosessin raja-arvot ja häviöt	14
3. TYÖAINEPARIT	16
3.1 Työainepareille asetettavat vaatimukset	16
3.2 Vesi-litiumbromidi	17
3.2.1 Kiteytyminen	17
3.2.2 Korroosio-ominaisuudet	18
3.3 Ammoniakki-vesi	19
3.3.1 Ammoniakin ominaisuudet	19
3.3.2 Korroosio-ominaisuudet	20
3.3.3 Turvallisuusnäkökohdat	20
3.4 Muita työaineparivaihtoehtoja	20
3.4.1 Ammoniakki-litiumnitraatti (NH ₃ -LiNO ₃)	20
3.4.2 Metylamiini-vesi	21
3.4.3 Hiilivetyjen halogeenijohdannaiset kylmäaineena	21
3.4.4 Metanoli kylmäaineena	22
3.4.5 Vesi-alkalimetallihydroksidi	22
4. ABSORPTIOPROSESSIEN KUVAUS	23
4.1 Yksivaiheinen H ₂ O-LiBr-prosessi (Single-Effect)	23
4.1.1 Kaupalliset single-effect H ₂ O-LiBr-absorptiojäähdyttimet	23
4.1.2 Prosessiolosuhteet ja SE-jäähdyttimen rakenne	23
4.1.3 Säännölliset käyttö- ja huoltotoimenpiteet	25
4.1.4 Massa- ja energiataseet	25
4.2 Yksiportainen NH ₃ -H ₂ O-prosessi (Single-stage)	26
4.2.1 Kaupalliset single-stage NH ₃ -H ₂ O-prosessit	26
4.2.2 Prosessiolosuhteet ja jäähdyttimen rakenne	27
4.2.3 Massa- ja energiataseet	29
4.3 Kaksivaiheinen H ₂ O-LiBr-prosessi (Double-effect)	30

4.4	Kaksiportainen NH ₃ -H ₂ O-prosessi (Two-stage)	32
4.5	Kolmivaiheinen H ₂ O-LiBr-prosessi (Triple-effect)	34
4.6	Half-Effect H ₂ O-LiBr-prosessi	36
4.7	Single-effect / double-lift-prosessi	38
4.7.1	Prosessin kuvaus	38
4.7.2	SE/DL-pilotti- ja demonstraatiojäähdyttimet	39
4.7.3	SE/DL-laitteiston säätö	40
5.	ABSORPTIOPROSESSIMALLIT	41
5.1	Aspen Plus TM -ohjelmisto ja sen käyttö absorptioprosessien mallintamisessa	41
5.1.1	Aspen Plus TM -ohjelmisto	41
5.1.2	LiBr-H ₂ O-absorptiojäähdytysprosessien mallinnus Aspen Plus -ohjelmistolla	42
5.2	LiBr-H ₂ O Single-effect prosessi	42
5.3	Single-effect / Double-lift-prosessi	45
6.	ABSORPTIOJÄÄHDYTTIMET SUOMALAISESSA KAUKO- LÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ	47
6.1	Absorptiojäähdyttimen käyttökohteet	47
6.2	Absorptiojäähdyttimien kustannukset	48
6.3	Absorptiojäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksen mahdollisuudet suomalaisessa kaukojäähdytyksessä	48
7.	YHTEENVETO	52
	LÄHDELUETTELO	55

1. JOHDANTO

Kaukojäähdytystä käytetään eniten USA:ssa (n. 9 TWh/a) ja Japanissa (n. 1,5 TWh/a). Euroopassa ollaan aloittelemassa kaukojäähdytystä ja pilottihankkeita on toteutettu etenkin Ranskassa, Italiassa ja Saksassa. Vuonna 1995 Euroopassa kaukojäähdytysenergiaa käytettiin 391 GWh (Unichal '95), josta Ranskan osuus oli 326 GWh ja Italian 32,5 GWh. Ruotsi ja Norja ovat myös aloittaneet kaukojäähdytysjärjestelmien rakentamisen. Vuonna 1995 Ruotsissa käytettiin kaukojäähdytysenergiaa 30 GWh ja Norjassa 2,5 GWh. Euroopan kaukojäähdytysverkoston kokonaispituus oli samana vuonna 93 km (Unichal '95), josta Ranskassa oli 63 km ja Ruotsissa 19 km.

Erityistä mielenkiintoa Euroopassa tunnetaan absorptiojäähdytystekniikkaan, koska siinä voidaan hyödyntää jo rakennettua kaukolämpöverkkoa. Kaukojäähdytyksellä saadaan kaukolämpöverkkoon kulutusta juuri kesäaikaan, jolloin verkon käyttöaste on muuten alhainen. Kaukolämmitys- ja jäähdytys yhdistettynä lämmön ja sähkön yhteistuotantoon sekä lämmön ja kylmän varastointiin antavat uusia mahdollisuuksia energiajärjestelmän kokonaisvaltaisen käytön suunnitteluun.

Absorptiojäähdytystekniikka on keksitty jo viime vuosisadan puolella. Sovelluskohteet ovat olleet pääasiassa teollisuudessa, koska siellä on ollut sopivia lämmönlähteitä jäähdyttimen käyttöenergiaksi ja toisaalta absorptiojäähdyttimen suuri koko on rajoittanut sen käyttöä asuinkiinteistöissä.

Absorptiojäähdyttimien merkittävimmät valmistajamaat ovat Japani, Korea sekä Euroopassa Saksa ja Ranska.

Tämän projektin tarkoituksena oli tutkia absorptiotekniikan ja erityisesti uudemman 2-vaiheisen absorptiojäähdytystekniikan soveltuvuutta suomalaiseen kaukolämpöjärjestelmään.

Perinteisen 1-vaiheisen absorptiojäähdyttimen ongelmanahan on kaukolämpöveden kesälämpötilataso 80 °C, joka on noin 10 °C liian alhainen 1-vaiheisen absorptiojäähdyttimen käyttöenergiaksi. Kaukolämpöveden lämpötilaputous 10 – 15 °C on ollut myös liian pieni ja kiinteistöjen liittymisjohdon mitoitus, joka on tehty kaukolämpöliittymän mukaan, on muodostunut pullonkaulaksi riittävän jäähdytystehon saavuttamiseksi. Absorptiojäähdyttimessä muodostuu enemmän lauhdelämpöä kuin kompressorijäähdyttimessä, ja lauhdelämmön hyödyntäminen jollain tavalla olisi toivottavaa. Absorptiokoneen vaatima suuri tilantarve sekä paino lisäävät myös kiinteistökustannuksia verrattuna kompressorijäähdytykseen. Absorptiojäähdyttimen työaineparina käytetään yleisimmin LiBr-H₂O:ta tai NH₃-H₂O:ta, joiden käyttöä rajoittavat litiumbromidin kiteytymisraja noin +4 °C ja ammoniakkin myrkyllisyys, joten uusien käyttökelpoisten työaineparien löytäminen on varsin haasteellinen tehtävä.

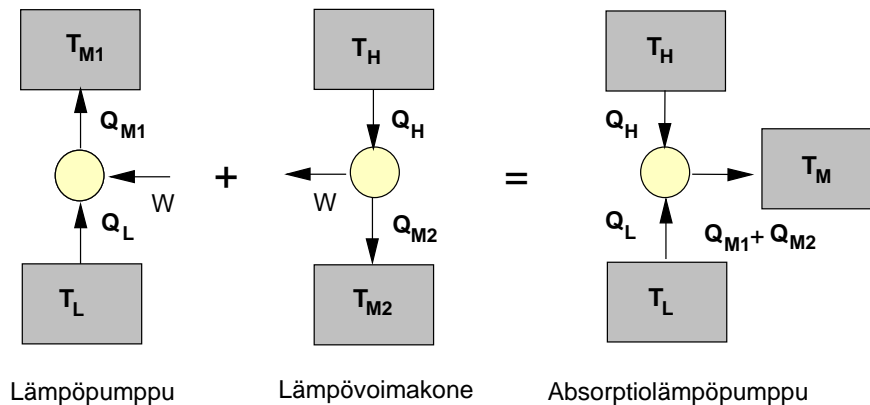
2. ABSORPTIOJÄÄHDYTYSPROSESSIN TERMODYNAAMISET PERUSTEET

2.1 Sorptioprosessit

Sorptioprosesseja ovat kaasun liukeneminen nesteeseen eli absorptio, kaasun sitoutuminen molekyylivoimien välityksellä huokoisen aineen huokoiseen sisäpintaan eli adsorptio sekä desorptio, eli kaasun vapautuminen kiinteästä aineesta tai nesteestä. Molekyylin energia nesteeseen liuenneena tai kiinteään aineeseen sitoutuneena on yleensä pienempi kuin vapaana. Näin ollen absorptio ja adsorptio ovat eksotermisiä (lämpöä vapauttavia) reaktioita ja desorptio endoterminen (lämpöä sitova) reaktio. Absorptiojäähdytysprosesseissa hyödynnetään tätä entalpian muutosta, joka on lauhdumislämmön ja liukenemislämmön (eli sekoituslämmön) summa.

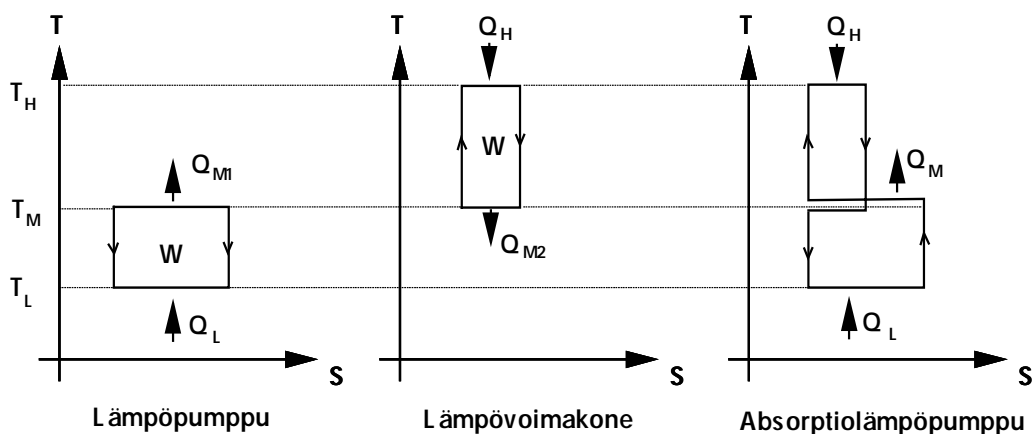
2.2 Teoreettinen absorptiolämpöpumppu

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämmön siirtyminen alemmalta lämpötilatasolta korkeammalle lämpötilatasolle vaatii tietyn vähimmäismäärän exergiaa, mikä suuruus on riippuvainen lämpötiloista. Perinteisissä jäähdytysprosesseissa tämä exergia on sähköistä työtä, jolloin kyseessä on lämpöpumppu. Absorptioprosessissa exergia tuodaan systeemiin lämpönä lämpövoimakoneen avulla. Teoreettinen absorptiojäähdytys- (t. absorptiolämmitys) prosessi voidaan ajatella lämpöpumpun ja lämpövoimakoneen kombinaatioksi (Kuva 1).



Kuva 1. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate [1].

Ideaalinen, reversiibeli lämpöpumppu ja lämpövoimakone ovat esimerkkejä Carnotkiertoprosesseista. Näissä paras hyötysuhde saavutetaan, kun lämpöä tuodaan ainoastaan maksimilämpötilassa ja lämpöä poistetaan ainoastaan minimilämpötilassa ja näiden lämpötilojen välillä ei tapahdu lämmönsiirtoja. Esittäessä Carnot-prosessit lämpötila-entropiakoordinaatistossa suorakaiteen sisään jäävä alue kuvaa työtä, eli exergian muutosta (Kuva 2).



Kuva 2. Absorptiolämpöpumpun teoreettinen kiertoprosessi.

Absorptiolämpöpumpun hyötysuhdetta kuvaa COP-arvo (Coefficient of Performance), joka on systeemin käyttämän lämpöenergian ja systeemiin tuodun lämpöenergian suhde:

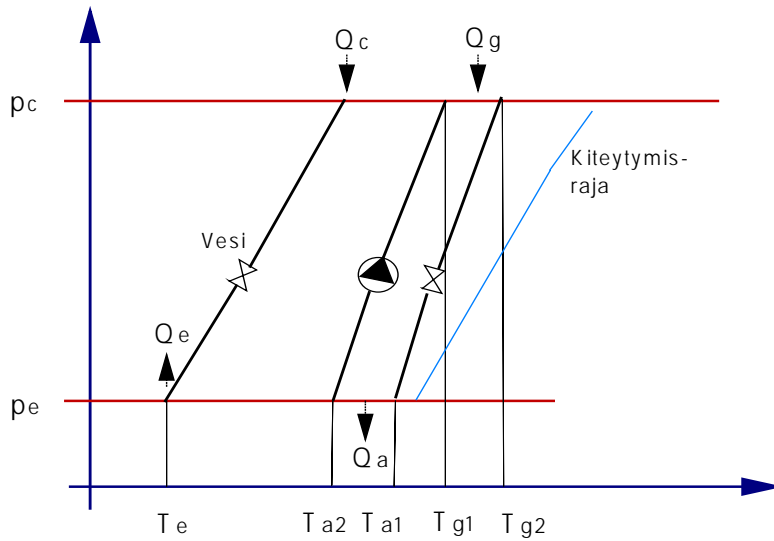
$$\eta = \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{1/T_M - 1/T_H}{1/T_C - 1/T_M} \quad (1)$$

Käytännössä Carnot-prosessien hyötysuhdetta pienentävät useat irreversiibelisyyttä aiheuttavat ilmiöt [1]:

- lämpötilagradientit lämmönsiirrossa
- konsentraatiogradientit aineensiirrossa
- viskositeetin aiheuttama kitka (painehäviö)
- kaasun kuristus/paisunta.

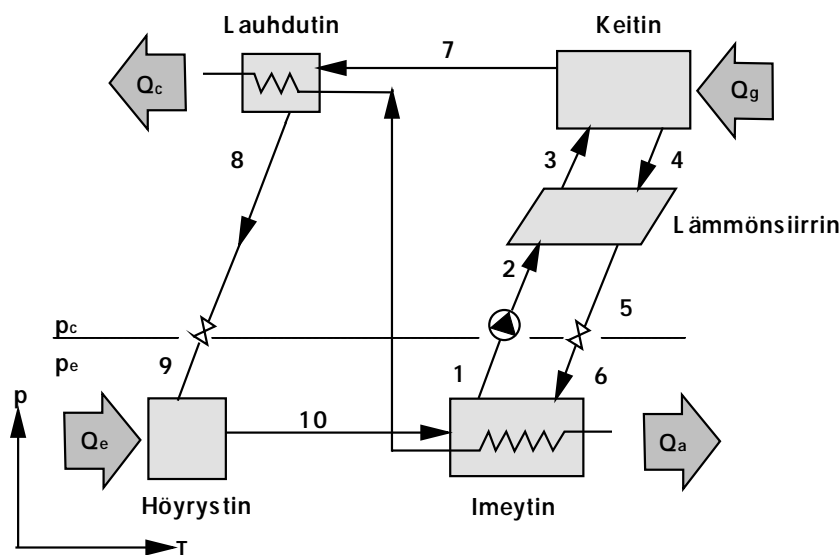
2.3 Absorptiojäähdytysprosessin toimintaperiaate

Absorptiojäähdytysprosessi perustuu tietyn liuennan aineen - liuottimen tai kylmäaineen - absorpentin ominaisuuksiin ja erityisesti kyseisen aineparin käyttäytymiseen liuoksena. Tietyissä paineessa ja lämpötilassa vallitsee tasapaino kaasun (tai höyryn) ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä. Muutettaessa lämpötilaa tai painetta tasapaino muuttuu, jolloin kaasua (tai höyryä) vapautuu tai sitoutuu. Tasapaino esitetään usein koordinaatistossa, jonka akseleina ovat lämpötilan käänteisarvo $1/T$ ja paineen logaritminen arvo $\log p$ (Kuva 3). Tässä Clausius-diagrammissa isosteerit (vakiopitaisuussuorat) ovat lineaarisia lähes kaikilla seoksilla, jonka vuoksi Clausius-diagrammeja käytetään yleisesti kuvattaessa eri absorptiojäähdytysprosesseja.



Kuva 3. Clausius diagrammi.

Absorptiojäähdytysprosessissa (Kuva 4) lämpöpumpun korvaa höyrystin ja lauhdutin. Kylmäaine virtaa lauhduttimelta paisuntaventtiilin kautta höyrystimelle. Osa kylmäaineesta höyrystyy jo paisuntaventtiilissä ja loput höyrystimellä. Höyry absorboidaan imeyttimeen ja liuoksen paine nostetaan takaisin ylemmälle painetasolle (p_c). Tämä prosessiosa vastaa lämpövoimakoneen suorittamaa työtä ja korvaa mekaanisen komprimoinnin. Imeytintä joudutaan jäähdyttämään lauhutus- ja liukenemislämmön kompensoimiseksi. Keittimessä kylmäaine vapautetaan ja väkevöity liuos palautetaan imeyttimeen lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiilin kautta.



Kuva 4. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate.

Absorptiojäähdytysprosessissa höyrystimen lämpö (Q_c) saadaan jäähdytettävästä nestevirrasta. Prosessin käyttöenergia saadaan keittimelle tuodusta lämmöstä (Q_g). Imeytintä ja lauhdutinta jäähdytetään useimmiten jäähdytysvedellä, joka yleensä syötetään jäähdytystornista. Liuoslämmönsiirtimessä kuuman, väkevän liuoksen lämpöä siirretään imeyttimestä poistuvaan laimentuneeseen liuokseen, jolloin absorptiolämpöpumpun hyötysuhde (COP) kasvaa.

Höyrystin koostuu höyrystinputkista, joissa jäädettävä vesi virtaa, jäähdytysaineen suihkuputkista ja jäähdytysaineen kokooma-altaasta. Imeyttimessä liuospumppu suihkuttaa absorptioaineen jäädyttävän veden putkille, ja laimentunut liuos kerätään kokooma-altaaseen. Keittimessä höyrystyslämmön luovuttava primäärilämpöputkisto ja imeyttimeltä syötettävän laimean liuoksen suihkutusputkisto on sijoitettu kiehutusaltaaseen. Lauhdutin koostuu putkista, joissa virtaa jäähdytysvesi, sekä välilevyistä [2, 3].

2.4 Absorptiojäähdytysprosessin raja-arvot ja häviöt

Absorptiojäähdytyspumpun käyttöä rajoittavat tietyt lämpötila-, paine- ja konsentraatorajat, jotka ensisijassa ovat riippuvaisia työaineparin ominaisuuksista. Esimerkiksi työaineparin stabiilisuus ja kiteytyminen rajoittavat useiden jäähdyttimien käyttöä.

Todellisessa lämmönsiirrossa tarvitaan lämpötilaero virtausten välillä, mikä aiheuttaa palautumattomuutta ja lämpöhäviötä kaikissa koneiston lämmönsiirtoa edellyttävissä osissa. Suurimmat painehäviöt syntyvät höyrystimessä ja imeyttimessä etenkin, jos höyryn ominaistilavuus on suuri (esim. vesi).

Lauhdutin

Lauhduttimen lämpötila ja siten myös lauhtumispaine p_c määräytyy käytettävissä olevasta jäähdytysveden lämpötilasta, jonka tulee olla riittävän alhainen lämpötilagradientin aikaansaamiseksi. Mikäli työaineparin kiehumispisteet ovat lähellä toisiaan (esim. $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$), höyrystyy keittimestä mukaan liuotinta, mikä lauhduttimeen kulkeutuessa nostaa lauhtumislämpötilaa. Todellisessa $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ jäähdytyskoneistossa höyry on puhdistettava ns. rektifikaatiolla, eli tislamalla.

Höyrystin

Höyrystimen paine määräytyy jäähdytyskohteen lämpötilatasosta. Jos esimerkiksi kylmäaineena on vesi ja jäähdytettävän veden lämpötilaksi halutaan $7\text{ }^\circ\text{C}$, höyrystimen lämpötila tulee olla korkeintaan $4 - 5\text{ }^\circ\text{C}$ riittävän lämpötilagradientin aikaansaamiseksi. Täten lämpötila T_c määrittää paineen p_c (Kuva 3), joka tässä tapauksessa on noin 0.9 kPa . Mikäli kylmäaineena on vesi (esim. $\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$ -lämpöpumput), veden korkea jäätymispiste rajoittaa jäähdyttimen käyttöä. Käytännössä kyseisillä jäähdyttimillä ei saavuteta alle $+5\text{ }^\circ\text{C}$:n jäähdytyslämpötiloja.

Mikäli höyrystimeen syötettävässä lauhhteessa on mukana liuotinta, höyrystimen painetta joudutaan laskemaan. Paineen lasku puolestaan pienentää jäähdyttimen tehoa ja COP-arvoa [3].

Imeytin

Imeyttimen lämpötilan määrää käytettävissä olevan jäähdytysveden lämpötila. Riittävän lämpötila- ja aineensiirtogradientin aikaansaamiseksi jäähdytysveden tulolämpötilan ja imeytimestä poistuvan liuoksen lämpötilan (T_{a2}) välinen ero tulee olla riittävän suuri. Näin ollen absorption jälkeinen tilapiste määräytyy höyrystymispaineesta p_e sekä absorption loppulämpötilasta T_{a2} , jolloin myös liuoksen konsentraatio x_2 on määritelty.

Ideaalisessa, palautuvassa absorptiossa vallitsee joka kohdassa aineen- ja lämmönsiirron tasapaino, jolloin ei esiinny lämpötila- tai konsentraatioeroja. Todellisuudessa virtauksen aikaansaamiseksi imeyttimeessä vallitsevan höyrinpaineen tulee olla alempi kuin höyrystimestä tulevan höyrin paine p_e , jonka vuoksi absorberiin syötettävä liuos usein alijäähdytetään ennen imeytintä. Käytännössä imeytimestä poistuvan liuoksen pitoisuus on pienempi kuin teoreettinen pitoisuus, joka vastaa loppulämpötilan T_{a2} ja paineen p_e mukaista tasapainoa. Mikäli rektifikaatio on epätäydellinen, laskee pitoisuus x_2 höyrystimen paineen laskun ansiosta [3].

Keitin

Ideaalisessa tapauksessa keittimen paine on sama kuin lauhduttimen paine. Todellisuudessa keittimen paine on painehäviöiden verran korkeampi. Keittimestä poistuvan liuoksen tilapiste määräytyy keittimen paineesta ja keiton loppulämpötilasta, joka puolestaan on riippuvainen keittimen rakenteesta ja käytettävästä lämmitysväliaineesta. Usein maksimilämpötilaa rajoittaa käytettävien aineiden stabiilisuus. Toisaalta primäärienergiavirran lämpötilan tulee olla korkeampi kuin keittimessä vallitseva lämpötila, mikä asettaa rajoituksia esimerkiksi kaukolämmön hyödyntämiselle absorptiojäähdytyksessä. Yksikköoperaatioita lisäämällä voidaan paitsi saavuttaa korkeampia COP-arvoja myös alentaa primäärienergian lämpötilaa, kuten esimerkiksi SE/DL-prosessissa (vrt. kappale 4.7).

3. TYÖAINEPARIT

3.1 Työainepareille asetettavat vaatimukset

Absorptiojäähdytysprosessissa työaineparin muodostavat kylmä- ja absorptioaine. Ideaalinen, reversiibelinen kiertoprosessi on riippumaton työaineparin ominaisuuksista. Sen sijaan todellisten jäähdytyskoneiden käytännön toteutus ja toiminta, tehokkuus sekä investointi- ja käyttökustannukset ovat riippuvaisia monista työaineparin fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista. Tavallisimmat työaineparit absorptiojäähdytysprosesseissa ovat vesi-litiumbromidi ($H_2O-LiBr$) ja ammoniakki-vesi (NH_3-H_2O), joita käsitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Kirjallisuudessa on esitetty lukuisia vaihtoehtoja, joista osa on tarkoitettu erityissovelluksiin (esim. korkeaan lämpötilaan) ja osa parantamaan $H_2O-LiBr$ - ja NH_3-H_2O - työaineparien ominaisuuksia. Mikään muu vaihtoehto ei kuitenkaan ole saavuttanut kaupallista suosiota.

Työaineparille vaadittavia ja toivottuja ominaisuuksia voidaan luetella lukuisia. Useat näistä ovat kuitenkin toisiaan poissulkevia, jolloin päädytään kompromisseihin. Taulukossa 1 on esitetty joitain toivotuista ominaisuuksista.

Taulukko 1. Työaineparille asetettavat vaatimukset [4].

Kylmäaine	Absorptioaine	Seos
Suuri latentti lämpö Korkea kriittinen lämpötila "Keskisuuri" höyrnpaine Alhainen jähmettymispiste Alhainen viskositeetti	Alhainen höyrnpaine Alhainen viskositeetti	Ei kiinteää faasia Myrkytön Kylmä- ja absorptioaineen hyvä liukoisuus toisiinsa Syttymätön

Kylmäaineen suuri latentti- tai höyrystymislämpö pienentää sen massavirtausta. Toisaalta liuksen entalpialla ei ole suurta merkitystä, koska prosessissa hyödynnetään absorptiolämpöä. Liuosentalpian absoluuttista arvoa merkittävämpi on sen suuruus suhteessa puhtaan kylmäaineen höyrystymislämpöön. Mitä suurempi kylmäaineen höyrystymislämpö on, sitä vähäisempi vaikutus on suhteellisen suurellakin liuosentalpian arvolla keittimen ja imeytimen lämpötaseeseen.

Kylmä- ja absorptioaineiden kiehumispisteiden välinen ero tulisi olla riittävän suuri, jotta välttyttäisiin rektifikaatiolta. Riittävänä voidaan pitää vähintään 200 - 300 K:n lämpötilaeroa.

Absorptio- ja kylmäaineiden sekä niiden seosten täytyy olla kaikissa prosessissa esiintyvissä lämpötiloissa ja paineissa kemiallisesti stabiileja, syttymättömiä, myrkyttömiä ja muutenkin vaarattomia. Ne eivät myöskään saisi aiheuttaa korroosiota.

3.2 Vesi-litiumbromidi

Vesi-litiumbromidi (H_2O -LiBr)-työaineparissa vesi toimii kylmäaineena ja litiumbromidin ja veden liuos absorbenttina. Taulukossa 2 on esitetty kyseisen työaineparin hyviä ja huonoja ominaisuuksia.

Taulukko 2. H_2O -LiBr-työaineparin ominaisuuksia.

H_2O	LiBr - H_2O
+ Suuri höyrystymisentalpia	+ Alhainen höyrynpaine
+ Myrkytön	+ Ei rektifikaatiotarvetta
+ Alhainen viskositeetti	+ Alhainen viskositeetti
	+ Hyvä liukoisuus
- Korkea jäätymispiste	- Aiheuttaa korroosiota
- Pieni höyrynpaine	- Kiteytyminen
	- Taipumus vaahtomiseen

Koska LiBr-suola on käytännössä haihtumaton (kp. normaaliolosuhteissa 1 282 °C), rektifikaatio ei ole tarpeellinen. Molekyyllitasolla joitain LiBr-molekyylejä voi haihtua nesteen pinnasta, mutta absorptiojäähdyttimen toiminta-alueella vesihöyryn voi olettaa olevan puhdasta absorbentin nestepinnan yläpuolella. Veden pienen höyrynpaineen seurauksena H_2O -LiBr-absorptiojäähdytin toimii alipaineessa, joka aiheuttaa rakenteellisia ongelmia. Koneiston tulee olla hyvin tiivis ja siinä tulee olla ilmanpoisto. Lisäksi suuri haitta on veden korkea jäätymispiste, joka sallii vain 0 °C:n yläpuolella olevat höyrystymislämpötilat. Käytännössä H_2O -LiBr-absorptiojäähdytimellä saavutetaan alimmillaan + 5 °C:n jäähdytyslämpötila.

3.2.1 Kiteytyminen

Imeyttimen toimintaa rajoittaa H_2O -LiBr-seoksen kristallisaatoraja. Suurilla LiBr:n väkevyyksillä seos alkaa kiteytyä, eikä lämpöpumpun toiminta ole mahdollinen. Lisäksi kristallisaatorajan läheisyydessä esiintyy viskositeetin nousua ja paikallista kristallisoitumista, joten kristallisaatorajaan on säilytettävä tietty välimatka.

LiBr:n liukoisuus veteen on voimakkaasti riippuvainen pitoisuudesta ja lämpötilasta, mutta heikosti riippuvainen paineesta. Lisäksi kiteytyminen vaatii nukleotidikeskusten olemassa olon. Mikäli nukleotidikeskuksia ei ole, liuos saattaa esiintyä ylikylläisenä. Kiteytyessään LiBr muodostaa hydraattimolekyylejä yhden tai useamman vesimolekyylin kanssa. Kiteytymisrajan läheisyydessä faasidiagrammissa on alue, jossa esiintyy sekä nestefaasi että kiinteä faasi. Tämä 'märkä kideseos' saattaa tarttua putkien seinämiin ja kiteytymiselle suotuisissa olosuhteissa tukkia täysin jäähdytyskoneiston putket. Nestevirtauksen pysähtyessä lämpöä virtaa ympäristöön ja lämpötila laskee putkistossa, jolloin 'märkä kideseos' tulee entistä kiinteämmäksi. Tyypillisesti kyseistä tukkeutumista esiintyy liuoslämmönsiirtimen ulostuloputkissa, joissa lämpötilat ovat

suhteellisen matalia ja LiBr:n pitoisuudet korkeita. Kiteytymisen välttämiseksi imeytintä tulee jäähdyttää riittävästi, jolloin voidaan käyttää pienempiä LiBr:n pitoisuuksia ja täten välttää toimimasta kiteytymisrajan läheisyydessä. LiBr:n kiteytymisominaisuudet ovatkin esteenä ilmajäähdytteisen H₂O-LiBr-absorptio-jäähdyttimen rakentamiselle, mikä on suuri ongelma erityisesti kuumassa ilmastossa.

Uusimmissa H₂O-LiBr-absorptiojäähdyttimissä kiteytymisen seuranta on automatisoitu, jolloin jäähdytin voi toimia lähempänä kiteytymisrajaa. Mikäli kiteytymistä kuitenkin havaitaan, lämpötilaa tulee nostaa viskositeetin alentamiseksi. Lisäksi LiBr-liuosta voidaan laimentaa höyrystimen vedellä ja keittimeen tuodun lämpöenergian määrää pienentää.

3.2.2 Korroosio-ominaisuudet

H₂O-LiBr-liuos vastaa korroosio-ominaisuuksiltaan keittosuolaliuosta. Etenkin nesteesseen liuennut happi tekee H₂O-LiBr-seoksen erittäin korrodoivaksi useille metalleille, kuten hiiliteräkselle ja kuparille. Jäähdytyskoneiston hermeettisyyden vuoksi liuoksen happipitoisuus on kuitenkin erittäin pieni ja korroosio hidasta. Korroosion aiheuttamia vahinkoja voidaan pienentää:

- materiaalivalinnoilla
- pH:n säädöllä
- inhibiittoreilla.

Perinteisissä 1-vaiheisissa eli single-effect- (SE) koneistoissa rakennusmateriaalina voidaan käyttää hiiliterästä, ruostumatonta terästä tai kuparia. Mikäli joudutaan toimimaan korkeammassa lämpötiloissa, kuten 2-vaiheisissa eli double-effect (DE)-absorptiojäähdyttimissä, osa komponenteista joudutaan rakentamaan kestävämmistä materiaaleista, kuten kuparinikkelistä. Kalleutensa vuoksi kuparinikkeliä tulee käyttää ainoastaan, jos kuparirakenteilla ei saavuteta riittävää elinikää korkealämpötilasovelluksissa tai jos ympäristö on erityisen korrodoiva (esim. merivesi). Lisäksi, vaikka LiBr-suola on käytännössä haihtumatonta, suurilla höyryn virtausnopeuksilla suolaa voi kulkeutua höyryn mukana. Tämä kiihdyttää korroosiota höyrytilassa. Korkeissa LiBr-liuoksen lämpötiloissa usein ruostumaton teräskään ei ole kestävä, vaan alkaa kupruilla ja halkeilla. Sen sijaan useat kumi- ja polymeerimateriaalit ovat kestäviä, joten laitteiston tiivistäminen ei tuota erityisiä ongelmia.

H₂O-LiBr-liuoksen hapetuspotentiaali on voimakkaasti riippuvainen sen pH-arvosta. Säädettäessä liuos hieman emäksiseksi hydroksyyliiradikaaleja on liuoksessa ylimäärin, mikä passivoi metallin. Ajan kuluessa liuoksen alkalisuus lisääntyy vetykaasun vapautuessa, jolloin liuoksen pH tulisi säätää lähes neutraaliksi. pH:ta yleensä säädetään lisäämällä liuokseen vetybromidihappoa, jolloin liuoksen ominaisuudet eivät oleellisesti muutu.

Korroosioinhibiittorit alentavat korroosionopeuksia reagoimalla metallin kanssa ja muodostaen suhteellisen stabiilin oksidikerroksen metallin pinnalle, jolloin metalli passivoituu. Yleisimmin käytetty inhibiittori oli aiemmin litiumkromaatti (Li₂CrO₄),

mutta siitä on luovuttu sen myrkyllisyyden vuoksi. Litiummolybdaatti (Li_2MoO_4) on todettu riittävän tehokkaaksi inhiboimaan korroosiota useissa sovelluksissa. Myös litiumnitraattia on käytetty absorptiojäähdytysprosesseissa. Inhibiittoria lisätään LiBr-liuokseen yleensä noin 1 %.

3.3 Ammoniakki-vesi

Ammoniakki-vesi ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$)-työaineparissa ammoniakki toimii kylmäaineena ja vesi absorbenttina. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -liuos täyttää useassa suhteessa työaineparille asetettavat vaatimukset (Taulukko 3).

Taulukko 3. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -työaineparin ominaisuuksia.

NH_3	H_2O	$\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$
+ Suuri höyrystysentalpia + Alhainen jähmettymispiste + Pieni viskositeetti	+ Pieni viskositeetti	+ Ei kiinteää faasia + Hyvä liukoisuus + Ei aiheuta korroosiota hiiliteräkselle
- Myrkyllinen - Korkea höyrönpaine	- Epädullinen Höyrönpaine	- Myrkyllinen - Rektifikaatio tarpeellinen - Tulenarka

3.3.1 Ammoniakin ominaisuudet

$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ on eniten käytetty työainepari absorptiokylmälaitteissa, jotka on tarkoitettu alle $0\text{ }^\circ\text{C}$:n höyrystyslämpötiloille. Työaineparin termodynaamiset ominaisuudet ovat edulliset, ennen kaikkea NH_3 :n korkea höyrystymisentalpia, suhteellisen korkea kriittinen piste ($132,3\text{ }^\circ\text{C}$, 11 MPa) ja matala jähmettymispiste. Kineettiset ominaisuudet ovat edulliset, absorptio- ja desorptioprosessit tapahtuvat nopeasti, eikä ole välttämätöntä kuumentaa liuosta yli keittimen teoreettisen loppulämpötilan.

$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdytin toimii korkeissa paineissa ja paine-erot ovat suuria. Lisäksi komponenttien kiehumispisteen väli on suhteellisen pieni (133 K), joten ammoniakkihöyrön rektifikaatio on välttämätöntä. Veden massaosuus ammoniakissa keittimen jälkeen on riippuvainen sen massaosuudesta ja lämpötilasta keittimessä sekä keittimen rakenteesta. Vaadittavat rektifikaatiolaitteet ja höyröjäähdytin pienentävät COP-arvoa sekä nostavat investointi- ja käyttökustannuksia, mikä on huomattavaa etenkin pienitehoisissa laitteissa. Mikäli rektifikaatiota ei tehtäisi, höyrystimeen kerääntynyt vesi voitaisiin poistaa ja kierrättää imeyttimeen. Tämä aiheuttaisi COP:n pienemistä, koska keittimeen tuotu energia olisi vakio huolimatta höyrystimen ”massavajeesta”, mikä myös pienentäisi kylmätehoa. Lisäksi poistettava vesi sisältäisi huomattavia määriä ammoniakkia, mikä vahvistaisi COP:n pienemistä.

3.3.2 Korroosio-ominaisuudet

Ammoniakki on erittäin hyvä liuotin kuparille, joten $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojähdytysprosessissa kupari kaikissa muodoissa on soveltumaton laitteistomateriaali. Laboratoriokokeet ovat osoittaneet, että jopa kromilla päällystetyt messinkiosat kärsivät ammoniakkin aiheuttamasta korroosiosta. Tämän vuoksi $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -prosesseissa käytetään yleisimmin terästä tai ruostumatonta terästä rakennemateriaalina. Mikäli teräs on valittu rakennemateriaaliksi, korroosioinhibiittorien käyttö on tarpeellista. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -systeemeissä inhibiittorit ovat raskasmetallisuoloja, jotka muodostavat suojaavan oksidikerroksen teräsmetallin pinnalle. Raskasmetallisuolojen aiheuttamien ympäristövaikutusten vuoksi on yritetty löytää vaihtoehtoisia inhibiittoreita ammoniakkin aiheuttamalle korroosiolle.

3.3.3 Turvallisuusnäkökohdat

Koska ammoniakki liukenee helposti veteen, se reagoi erittäin nopeasti solukalvojen kanssa, mutta NH_3 ei kuitenkaan imeydy ihon läpi. Pitkäaikainen altistuminen on terveydelle haitallista yli 25 ppm:n pitoisuuksissa. Ammoniakin pistävä haju on havaittavissa jo muutamissa ppm-pitoisuuksissa ja noin 50 ppm-pitoisuudessa haju on ihmiselle lähes sietämätöntä, joten ammoniakki vuodot on helposti havaittavissa. Ammoniakki on myös syttyvä ja räjähdysherkkä aine 16 - 25 til.-% pitoisuuksissa ilman kanssa, mikä myös tulee ottaa huomioon.

3.4 Muita työaineparivaihtoehtoja

Lukuisia työaineparivaihtoehtoja on esitetty kirjallisuudessa. Suurimmassa osassa edellä esitettyjen perinteisten työaineparien joko kylmäaine tai absorbentti on korvattu jollain muulla aineella. Esimerkiksi veden sijasta on käytetty metanolia ($\text{CH}_3\text{OH- LiBr}$) kylmäaineena tai litiumnitraattia absorbenttina ($\text{H}_2\text{O- LiNO}_3$). NH_3 :n sijasta on käytetty metylamiinia ($\text{CH}_3\text{NH}_2\text{-H}_2\text{O}$) ja LiBr on korvattu jollain muulla suolalla, kuten litiumkloridilla ($\text{H}_2\text{O- LiCl}$), metallihydroksidilla (esim. $\text{H}_2\text{O-NaOH-KOH}$), metallinitraatilla (esim. $\text{H}_2\text{O-LiNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_3$) tai LiBr :n lisäksi on käytetty jotain muuta suolaa (esim. $\text{H}_2\text{O-LiBr-ZnBr}_2$, $\text{H}_2\text{O-LiBr-ZnBr}_2\text{-LiCl}$). Absorptiojähdytysprosesseissa on myös käytetty kylmäaineena HCFC-yhdisteitä, jolloin absorbenttina toimii orgaaninen liuotin. Alla on esitetty joitain tunnetuimpia työaineparivaihtoehtoja.

3.4.1 Ammoniakki-litiumnitraatti ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$)

Rektifikaation välttämiseksi litiumnitraattia on käytetty veden sijasta absorbenttina jo kolmekymmentäluvulta lähtien. Kyseisen työaineparin termiset ja kaloriset ominaisuudet ovat soveliaita absorptiojähdytysprosessille, joista huomattavaa on etenkin absorptiokyky korkeissa lämpötiloissa. $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$:n käyttöä rajoittaa

kristallisaattoraja, joka esimerkiksi 25 °C:ssa kulkee 30 %:n NH₃-pitoisuudessa. Lämpötilan edelleen laskiessa LiNO₃:n absorptiokyky pienenee nopeasti, jonka vuoksi NH₃-LiNO₃-absorptiolämpöpumppuja on rakennettu tiloihin, joiden lämpötila ei oleellisesti laske alle 20 °C.

Ammoniakin määräämät painerajat ovat NH₃-LiNO₃-prosessissa korkeita, joten tässä suhteessa työainepari ei tarjoa parannusta. Kuten suolaliuoksilla yleensä, lähellä kristallisaattorajaa liuoksen viskositeetti suurenee, mikä kasvattaa painehäviötä koneistossa ja haittaa lämmönsiirtoa.

3.4.2 Metylamiini-vesi

Metylamiini-vesityöaineparissa ammoniakki on korvattu amiinilla, jonka lauhdutusaine on selvästi alempi kuin NH₃:lla. Myös CH₃NH₂-H₂O on kauan tunnettu työainepari. Verrattuna ammoniakkiin metyamiinilla voidaan havaita sekä parempia että huonompia termodynaamisia, fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia:

- + höyrystyminen tapahtuu lievästi alipaineisena
- + alhainen lauhdutusaine
- + kriittinen lämpötila korkeampi kuin ammoniakilla (151 °C)
- + jäätymispiste alhaisempi kuin NH₃:lla (-92.5 °C)
- pieni kiehumispisteiden väli (170 K)
- höyrystymisentalpia noin 2/3 pienempi kuin NH₃:lla (kuitenkin vielä erittäin hyvä)
- myrkyllinen, vaikkakin vaarattomampi kuin ammoniakki (pistävä haju jo vaarattomissa pitoisuuksissa)
- tulenarka ilman kanssa.

CH₃NH₂-H₂O:n suurin haittapuoli on sen 170 K:n kiehumispisteiden väli, jonka vuoksi regeneroitu höyry sisältää vielä enemmän vettä kuin NH₃ keittimen jälkeen. Lisäksi liuoksen väkevyys samoissa absorptiolämpötiloissa on 10 % alhaisempi, mikä hankaloittaa rektifiointia ja suurentaa rektifiointilaitteistojen kokoa.

3.4.3 Hiilivetyjen halogeenijohdannaiset kylmäaineena

Alifaatisten hiilivetyjen fluori- ja kloorijohdannaiset ovat yleisiä kompressorikyylälaitteissa edullisten termodynaamisten ominaisuuksiensa, kuten alhaisen jäähdytyspisteen, vuoksi. Laajimmin tutkittuja ovat osittain halogenisoidut hiilivedyt R21 ja R22. Kyseiset HCFC-yhdisteet liukenevat useisiin orgaanisiin liuottimiin, joista absorptiojäähdytyssovelluksissa termodynaamisesti parhaimmiksi ovat osoittautuneet tetraeteeniglykolin dimetyylieetteri (DTG t. DMETEG t. E181) ja dimetyyliformamidi (DMF). Näistä työaineparivaihtoehdoista R21-DTG on paras sovelluksissa, joissa tarvitaan matalaa lämpötilaa. Ongelmana on R21-DTG:n aiheuttama voimakas korrosio teräkselle ja kuparille yli 100 °C:n lämpötilassa. Sen sijaan R22-DTG:llä ei ole havaittu korrosiota aiheuttavaa vaikutusta teräkseen, kupariin tai alumiiniin aina 175 °C:seen asti. Verrattuna ammoniakki-vesi-töäainepariin R22-DTG:llä on sekä hyviä että huonoja ominaisuuksia:

- + korkea kiehumispisteiden väli (yli 300 K)
- + höyrynpaineet hieman korkeammat ja lauhdutusaineet hieman alhaisemmat kuin NH_3 :lla => paine-ero imeytimen ja keittimen välillä pienempi kuin $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$:lla
- + DTG ei syty helposti (leimahduspiste 140 °C)
- + molemmat komponentit suhteellisen vaarattomia
- R22:n höyrystymisentalpia 1/6 NH_3 :n höyrystymisentalpiasta (alhaisin kaikista esitetyistä kylmäaineista)
- imeytimessä vallitsee yleensä alle 20 %:n liuosväkevyys, joten liuoskierto on suuri
- alhainen kriittinen piste (96 °C).

3.4.4 Metanoli kylmäaineena

Metanolia on käytetty kylmäaineena veden sijasta sen korkean höyrystymisentalpian (lähes yhtä suuri kuin ammoniakilla) ja alhaisen jähmettymispisteen (-98 °C) vuoksi. Metanolilla on myös korkea kriittinen lämpötila (240 °C) eikä sillä ole hapen kanssa korrodoivaa vaikutusta rautaan, sinkkiin tai alumiiniin. $\text{CH}_3\text{OH-LiBr}$ -prosessissa höyrystin ja imeytin toimivat alipaineessa, joka on kuitenkin pienempi kuin vedellä. Keittimen ja lauhduttimen paineet ovat lähellä ilman painetta. Yleisesti ottaen $\text{CH}_3\text{OH-LiBr}$ -seokset käyttäytyvät saman tapaisesti kuin $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -seokset. Metanolin käyttöä kylmäaineena rajoittavat:

- palavuus ilmassa (laaja syttymisalue 6 - 36,5 til.-%)
- kiteytyminen ja viskositeetin kasvu lähellä kiteytymisrajaa
- myrkyllisyys (ei kuitenkaan niin myrkyllinen kuin NH_3)
- vaahtoaminen korkeissa keittimen lämpötiloissa ja alhaisissa väkevyyksissä.

3.4.5 Vesi-alkalimetallihydroksidi

Alkalimetallihydroksideja ja niiden seoksia on käytetty absorbentteina LiBr :n sijasta. Esimerkkinä mainittakoon kalium- ja natriumhydroksidin seos (1:1), jolloin jäähdyttimeen tuodun lämpövirran (Q_g) lämpötilaero ja siten myös COP-arvo on suurempi kuin $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -prosessissa. Tämä mahdollistaa myös kompaktien levylämmönsiirtimien käytön keittimessä.

Saksalainen energia-alan tutkimuslaitos Zae Bayern on kehittänyt EU:n Joule II-projektissa kaksiportaista $\text{H}_2\text{O-KOH-NaOH}$ -absorptiojäähdytintä [5]. Saatujen tulosten perusteella laitteisto voisi olla ilmajäähdyttäinen, mikä on suuri etu $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -prosessiin nähden. Alkalihydroksidien käyttöä kuitenkin rajoittaa niiden aiheuttama voimakas korroosio.

4. ABSORPTIOPROSESSIEN KUVAUS

4.1 Yksivaiheinen H₂O-LiBr-prosessi (Single-Effect)

4.1.1 Kaupalliset single-effect H₂O-LiBr-absorptiojäähdyttimet

Single-effect (SE) H₂O-LiBr-absorptiojäähdyttimet kehitettiin 1940-luvulla Yhdysvalloissa ja 1950-luvulta lähtien ne ovat olleet kaupallisesti saatavilla. Nykyään SE-jäähdyttimiä valmistetaan ja käytetään ympäri maailmaa. Eniten jäähdyttimiä valmistetaan Aasiassa, kuten Kiinassa, Intiassa, Japanissa ja Koreassa, mutta myös Länsi-Euroopassa, Amerikassa ja Tyynenmeren maissa on absorptiojäähdytinvalmistusta. LiBr-H₂O-absorptiojäähdytintä on käytetty lähinnä jäähdyttävissä ilmastointilaitteissa sen hyvien säätöominaisuuksien vuoksi (tehoalueella 0 - 100 %). Esimerkiksi Japanissa lähes 50 % ilmastointijärjestelmien jäähdytyksistä on hoidettu absorptiolaitteilla (SE- ja DE-jäähdyttimet).

Primäärienergia eli käyttöenergia tuodaan SE-jäähdyttimiin tyypillisesti epäsuorasti, jolloin lämmön lähteenä on yleensä höyry tai kuuma vesi. Myös savukaasua tai muuta jätelämpöä käytetään primäärienergiana. Yksivaiheisella H₂O-LiBr-jäähdyttimellä primäärienergian lämpötilan tulee yleensä olla vähintään noin 85 °C. Alle 85 °C:n lämpötiloilla lämmönsiirtopinta-ala ja COP laskevat nopeasti, mikä vaikuttaa laitteiston investointi- ja käyttökustannuksiin. Lisäksi kyseisillä matalilla syöttölämpötiloilla lämpötilan alenema on suurimmillaan noin 5 K, jolloin myös kuuman veden tms. virtausmäärät suurenevat. SE-jäähdyttimiä on saatavilla kokoluokissa noin 20 - 6000 kW (höyrystimen kapasiteetti). SE-jäähdyttimen COP-arvo on tyypillisesti noin 0.7.

4.1.2 Prosessiolosuhteet ja SE-jäähdyttimen rakenne

SE-jäähdyttimen prosessikaavio on esitetty sivulla 13. Nesteseos pumpataan lämmönsiirtimen kautta keittimeen, jota lämmitetään primäärienergialla.

Veden ja H₂O-LiBr-seoksen termodynaamisista ominaisuuksista johtuen SE-absorptiojäähdytin toimii alipaineessa. Vakuumiolosuhteet aiheuttavat useita negatiivisia vaikutuksia laitteiston käytön ja kustannusten kannalta:

- höyryn ominaistilavuus on suuri, jolloin prosessikomponenttien koko on suuri
- hermeettiseksi eristetty laitteiston vaippa tarpeellinen
- herkkyys prosessissa muodostuneille kaasuille
- hydrostaattisen paineen huomioon ottaminen höyrystimen suunnittelussa.

Prosessikomponenttien koko

SE-absorptiojäähdyttimen paine on pienin höyrystimessä ja imeyttimessä. Tyypillisesti kyseinen paine on noin 1 kPa, jolloin kylläisen vesihöyryn ominaistilavuus on

129 m³/kg. Suuresta ominaistilavuudesta seuraavat suuret höyryn nopeudet ja painehäviöt, jotka ovat kriittisiä etenkin höyrystimen ja imeytimen välillä. 1 kPa:n paineessa veden höyrynpainekäyrän kulmakerroin on 14 °C/kPa, mikä osoittaa, että pienet paineen muutokset aiheuttavat suuren muutoksen lämpötilassa. Lisäksi paineen muutos on logaritminen lämpötilaan nähden, jolloin matalissa paineissa (< 1 kPa) lämpötilan muutos on vielä suurempi. Painehäviö on kriittinen imeyttimessä tapahtuvan kiteytymisen vuoksi, koska vakiolämpötilassa paineen pieneneminen suurentaa liuoskonsentraatiota. Ongelmien minimoimiseksi höyryn aineensiirtopinta-alan tulee olla mahdollisimman suuri. Käytännössä tämä on toteutettu siten, että höyrystin ja imeytin on koteloitu samaan vaippaan, jolloin viskositeetin aiheuttamat häviöt ovat pienet.

Komponenttien kokoon vaikuttava tekijä ovat myös pienet lämpötilaerot lämmönsiirrossa. Esimerkiksi kylmäaineen ja jäädytettävän veden lämpötilaero tulisi olla mahdollisimman pieni, mikä vaatii suuret lämmönsiirtopinta-alat sekä pienet lämpövuot ja höyryn nopeudet, jolloin komponenttien koko kasvaa.

Absorboitumattomien kaasujen vaikutus

H₂O-LiBr-jäähdyttimen täydellinen eristäminen on tärkeää, koska ilma vaikuttaa prosessin tehokkuuteen ja toisaalta hapen kiihdyttämän korroosion vuoksi. Absorptiojäähdyttimessä syntyy myös absorboitumattomia kaasuja, jotka vaikuttavat prosessin hyötysuhteeseen.

Korroosion vuoksi H₂O-LiBr-jäähdyttimessä syntyy jatkuvasti pieniä määriä vetykaasua. Vety on absorptiojäähdyttimen toiminta-alueella käytännössä liukenematon sekä veteen että absorbenttiin. Näin ollen muodostunut vetykaasu akkumuloituu suurimmaksi osaksi höyrytilaan, joka on alimmassa paineessa. Tämä on erityisen haitallista imeytimen toiminnalle, koska vetykaasu pienentää absorptio nopeutta ja siten pienentää kapasiteettia ja COP:a. Vedyn vuoksi myös kiteytymisen kontrolloiminen on hankalampaa.

Ilmavuotojen ja vedyn aiheuttamien ongelmien minimoimiseksi absorptiojäähdytin tulee varustaa systeemillä, jolla höyryfaasi voidaan säännöllisesti imeä jäähdyttimestä. Useita yksinkertaisia ja kehittyneempiä mekanismeja on käytetty tähän tarkoitukseen, joista mainittakoon perinteiset vakuumpumput, ejektorisysteemit ja puoliläpäisevät palladiumembraanit.

Hydrostaattisen paineen vaikutus höyrystimessä

Koska höyrystin toimii alhaisessa paineessa, hydrostaattisen paineen vaikutus saattaa olla huomattava. Veden aiheuttama hydrostaattinen paine on 0.09807 kPa/cm, mikä aiheuttaa höyrystymislämpötilan nousun nestepatsaan korkeuden noustessa. Esimerkiksi 1 cm:n hydrostaattinen paine aiheuttaisi kyllästyslämpötilan nousun 5 °C:sta 6.5 °C:seen ja 10 cm nestepatsas nousun 16.3 °C:seen. Tämän vuoksi höyrystin on suunniteltu siten, että vesi ruiskutetaan horisontaalisille putkille 1 - 2 mm:n filmimäiseksi kerrokseksi, josta vesi höyrystyy.

4.1.3 Säännölliset käyttö- ja huoltotoimenpiteet

H₂O-LiBr-absortiojähdytin toimii yleensä ilman jatkuvaa valvontaa. Tiettyjä rutiini-tarkastuksia ja -toimintoja tulee kuitenkin suorittaa, kuten:

- jaksoittainen kaasun poisto
- jaksoittainen korroosioinhibiittorin lisäys
- jaksoittainen pH-puskurin lisäys
- jaksoittainen oktyylialkoholin lisäys
- jaksoittainen liuosanalyysi
- jatkuva lämpötilan ja paineen rekisteröinti.

Kolmea ensimmäistä toimenpidettä on kuvattu edellä. Oktyylialkoholia lisätään imeyttimeen parantamaan aineensiirtoa ja siten imeyttimeen toimintaa. Liuosanalyysillä sekä paineen ja lämpötilan seuraamisella varmistetaan koneiston hermeettisyys. Suurin vuosihuollossa suoritettava toimenpide on lämmönsiirtoputkien tarkistus ja puhdistus. Mikäli absorptiolämpöpumppu on hyvin suunniteltu, asennettu ja huollettu, se on yleensä luotettavampi, hiljaisempi sekä kestävämpi kuin kompressorijähdytin. Lisäksi sen käyttökustannukset ovat yleensä pienemmät kuin kompressorijähdyttimillä (vrt. kappale 6). Kokemus on osoittanut, että H₂O-LiBr-absorptiojähdyttimen käyttöaika on noin 20 vuotta.

4.1.4 Massa- ja energiataseet

Taulukossa 4 on esitetty esimerkki SE H₂O-LiBr-absorptiojähdyttimen aine- ja energiataseista (vrt. Kuva 4). SE-jähdyttimen prosessiparametrien vaikutusta jähdyttimen toimintaan ja tehokkuuteen on tarkasteltu lähemmin luvussa 5.

Taulukko 4. 10 kW:n single-effect H₂O- LiBr-absorptiojäähdytin [4].

i	h(i) J/kg	m(i) kg/s	p(i) kPa	Q(i) osuus	T(i) °C	x(i) % LiBr
1	85,24	0,0500	0,673	0,000	32,7	56,7
2	85,24	0,0500	7,445		32,7	56,7
3	159,3	0,0500	7,445		63,3	56,7
4	222,5	0,0454	7,445	0,000	89,9	62,5
5	141,0	0,0454	7,445		53,3	62,5
6	141,0	0,0454	0,673	0,006	44,7	62,5
7	2645,0	0,0046	7,445		77,0	0,0
8	168,2	0,0046	7,445	0,000	40,2	0,0
9	168,2	0,0046	0,673	0,065	1,3	0,0
10	2503,1	0,0046	0,673	1,000	1,3	0,0
COP = 0,720 Q _a = 14,297 kW Q _{shx} ¹⁾ = 3,09 kW f = 10,837 Q _c = 11,427 kW ε _{shx} = 0,640 p _c = 7,445 kPa Q _g = 14,952 kW W = 0,000209 kW p _e = 0,673 kPa Q _e = 10,772 kW						

¹⁾ shx = solution heat exchanger

Parametri f (Taulukko 4) kuvaa liuoskierron massasuhdetta ($m_3 / m_7 = x_4 / (x_4 - x_3)$), joka virtaa pumpun läpi. Esimerkin lukuarvo 10,8 on tyypillinen SE-prosessille, eli käytännössä jäähdytysaineen massavirta on noin kymmenes osa pumpun läpi virtaavan nesteen massavirrasta.

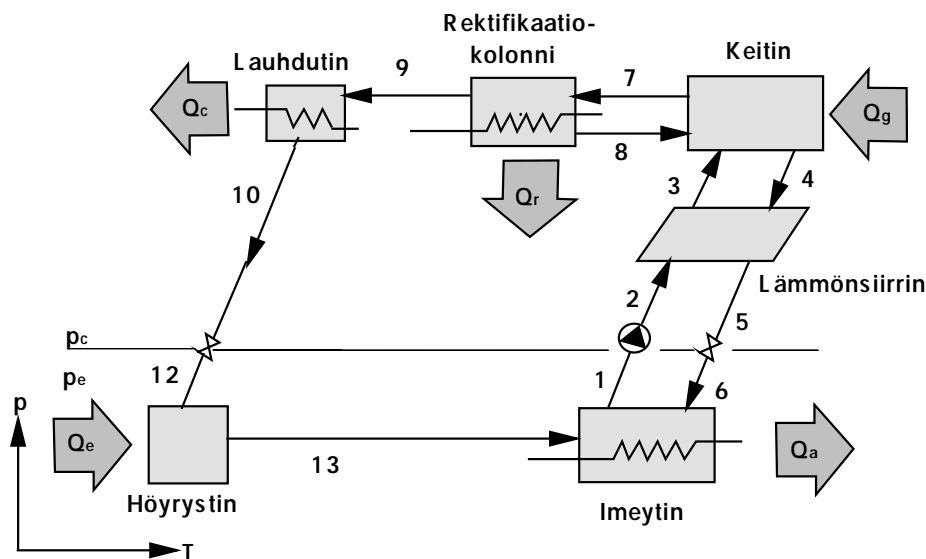
Parametri ε_{shx} ($(T_4 - T_5) / (T_4 - T_2)$) kuvaa liuoslämmönsiirtimen “tehokkuutta” ja sen perusteella voidaan arvioida lämmönsiirtimen kokoa. Liuoslämmönsiirtimen tehokkuus vaikuttaa myös oleellisesti jäähdytysprosessin COP-arvoon.

4.2 Yksiportainen NH₃-H₂O-prosessi (Single-stage)

4.2.1 Kaupalliset single-stage NH₃-H₂O-prosessit

Ferdinand Carré patentoi ammoniakki-vesi-absorptiojäähdytyspumpun vuonna 1859. 1960-luvulta lähtien yksiportaiset NH₃-H₂O-prosessit ovat olleet käytössä lähinnä jäähdyttävissä ilmastointilaitteissa.

Yksiportaisen NH₃-H₂O-jäähdyttimen rakenne on hyvin samankaltainen kuin yksiportaisen H₂O-LiBr-prosessin. H₂O-LiBr-prosessia on jouduttu kuitenkin modifioimaan, koska NH₃-H₂O-työaineparin ominaisuudet poikkeavat oleellisesti H₂O-LiBr-työaineparin ominaisuuksista. Huomattavin ero on rektifikaatiokolonnin lisäys NH₃-H₂O-prosessiin (Kuva 5).



Kuva 5. Yksiportainen $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdytin.

$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdyttimen COP on yleensä pienempi kuin $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ -jäähdyttimen, mikä johtuu $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -työaineparin termodynaamisista ominaisuuksista. Käytännössä COP-arvo on noin 0.6 - 0.65. Keittimeen tuodun primäärienergian minilämpötila on korkeampi kuin $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -jäähdyttimillä, eli käytännössä yli $100\text{ }^\circ\text{C}$.

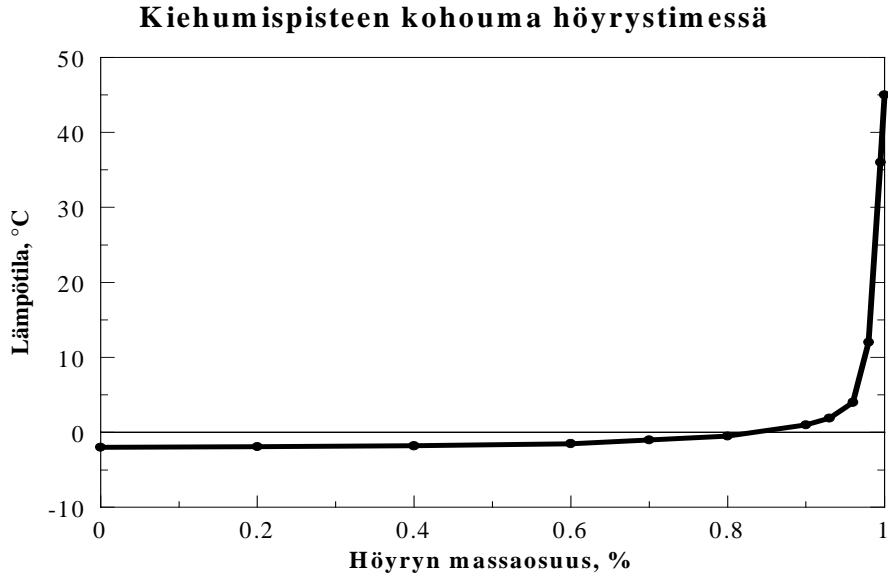
4.2.2 Prosessiolosuhteet ja jäähdyttimen rakenne

Ammoniakin kiehumispiste on $-33.4\text{ }^\circ\text{C}$ (NTP), joten jäädytin toimii korkeassa paineessa. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -jäähdyttimen paine on verrattavissa kompressorijäähdyttimen paineeseen, jossa kylmäaineena on R22. Yleensä keittimen ja lauhduttimen paine on noin 1,5 MPa sekä höyrystimen ja imeyttimen paine noin 0,2 MPa. Korkean höyrystimen vuoksi $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -jäähdytin on rakenteeltaan huomattavasti kompaktimpi kuin $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -jäähdytin. Yksittäisten osien rakenne on riippuvainen valitusta lämpösiirtopinnan tyypistä. Esimerkiksi imeytin voi olla pintaimeytin, jossa höyry virtaa mahdollisimman suuren nestepinnan ohi tai moniputkilauhduksen tyyppinen, jossa neste ruiskutetaan jäähdytysputkien pinnalle.

Rektifikaatio

Kuten kappaleessa 3.3 selostettiin, ammoniakkihöyryn rektifikaatio on välttämätöntä. Mikäli rektifikaatiota ei tehtäisi, ammoniakin mukana kulkeutunut höyry kerääntyisi höyrystimeen. Veden kerääntyminen höyrystimeen aiheuttaisi kiehumispisteen kohoaman höyrystimessä (Kuva 6), jonka vuoksi höyrystimen painetta jouduttaisiin alentamaan, jolloin myös imeyttimen prosessiolosuhteet muuttuvat. Painehäviön kompensoimiseksi imeytin tulisi jäähdyttää alempaan lämpötilaan tai ammoniakin massaosuutta pienentää imeytimessä. Jos keitin toimisi vakiolämpötilassa, veden kulkeutuminen lauhduttimeen pienentäisi sen lämpötilaa. Tämä on useimmiten mahdotonta jäähdytysveden lämpötilan vuoksi. Näin ollen sekä keittimen että

lauduttimen painetta tulisi nostaa. Veden kerääntyessä edelleen höyrystimeen jäähdytintä jouduttaisiin käyttämään yhä kauempana suunnitteluarvoista, mikä ei käytännössä ole mahdollista.



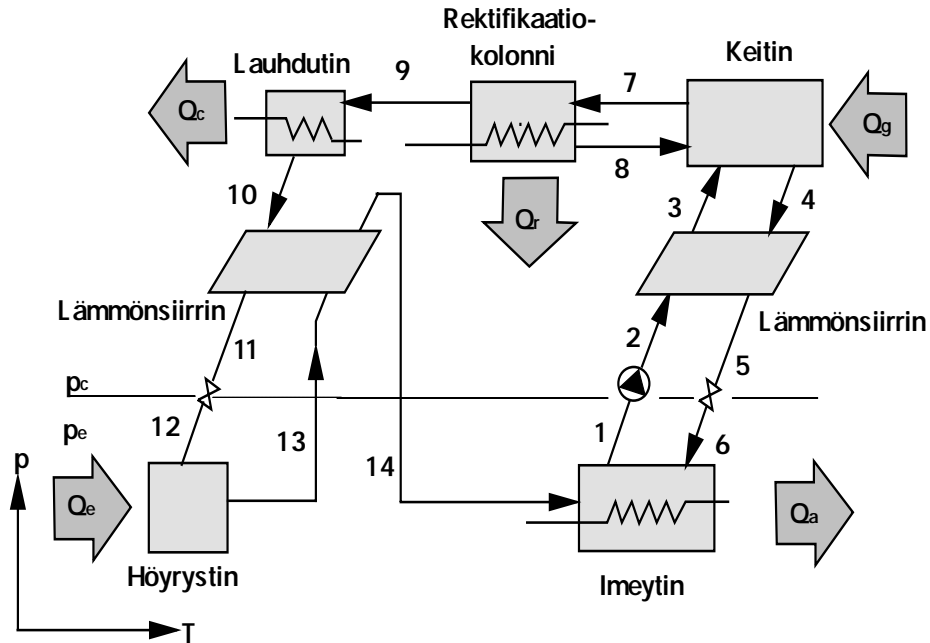
Kuva 6. Veden vaikutus $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdyttimen höyrystimen lämpötilaan.

Rektifikaatiokolonni on palautustislauskolonni, jossa puhdistettava höyry syötetään kolonnin alapäästä ja NH_3 -neste kolonnin yläpäästä. Puhdistuneesta NH_3 -höyrystä osa lauhdutetaan ja palautetaan kolonniin. Palautusjäähdytys lisää lämmön tarvetta, mutta tällöin saadaan tislattua lähes puhdasta NH_3 :a.

Prosessivirtojen kytkentä COP:n nostamiseksi

$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdyttimen tehokkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä prosessissa muodostunutta jätelämpöä, jolloin myös jäähdytystarve pienenee. Yleisimmin prosessin sisäistä lämmönsiirtoa tehostetaan lisäämällä lämmönsiirtimiä, jolloin myös investointikustannukset kasvavat.

Kuva 6 osoittaa, että jo 1 % vettä ammoniakissa voi aiheuttaa huomattavan lämpötilan nousun höyrystimessä, jos höyryn massaosuus kokonaismassavirrasta (vapor quality) on suuri. Mikäli rektifikaatio ei ole täydellinen, NH_3 -lauhde voidaan esijäähdyttää NH_3 -höyryllä, jolloin myös mahdolliset vesipisarot höyrystyvät ennen imeytintä (Kuva 7). Lauhteen esijäähdytys nostaa jäähdyttimen COP-arvoa. Haittana on kuitenkin lämmönsiirtimen aiheuttama painehäviö etenkin höyrypuolella, jonka vuoksi lauhteen esijäähdytystä ei voi ajatella $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -jäähdyttimelle.



Kuva 7. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdyttimen NH_3 -lauhteen esijähdytyksellä.

$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdyttimen COP-arvoa voidaan parantaa myös hyödyntämällä rektifikaatiokolonnin lämpöenergiaa Q_r . Imeyttimestä lähtevä virta (n:o 2) voidaan kierrättää rektifikaatiokolonnin kautta liuoslämmönsiirtimeen, jolloin lämpöenergiaa Q_r ei siirretä jäähdytysvirtaan, vaan energia hyödynnetään jäähdytysprosessissa. Kyseisellä järjestelyllä liuoslämmönsiirtimen lämpökuorma pienenee, mutta imeyttimen jäähdytystarve kasvaa. Näin ollen COP:n paraneminen voi olla marginaalista.

Joissain tapauksissa suuri lämpötilan muutos absorberissa tai desorberissa parantaa jäähdyttimen tehoa. Lämpötilaeroa voidaan suurentaa kierrättämällä $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -liuosta imeyttimessä ja keittimessä, jolloin laitteista poistuvien virtojen lämpötila kasvaa. COP suurenee, koska liuospumppun kapasiteetti ja imeyttimen jäähdytysvirta pienenevät sekä liuoslämmönsiirtimen lämpökuorma pienenee. Toisaalta liuosten kierrättäminen imeyttimessä ja keittimessä vaatii kolme läpivientä lämmönvaihtimiin, mikä nostaa investointikustannuksia.

4.2.3 Massa- ja energiataseet

Yksiportaisen $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdyttimen aine- ja energiataselaskelma lauhteen esijähdytyksellä (Kuva 7) on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. 160 kW:n yksiportainen NH₃-H₂O-absorptiojäähdytin.

I	h(i) J/kg	m(i) kg/s	p(i) kPa	$\frac{m_{\text{höyry}}}{m_{\text{tot}}}$	T(i) °C	x(i) % NH ₃
1	-42,3	1,00	240,2	0	40,0	0,368
2	-39,2	1,00	1555		40,5	0,368
3	306,8	1,00	1555	0,022	110,7	0,368
4	401,6	0,863	1555	0	131,0	0,268
5	0,9	0,863	1555		40,5	0,268
6	0,9	0,863	240,2		40,7	0,268
7	1547	0,150	1555	1,00	108,0	0,9444
8	264,1	0,013	1555	0	108,0	0,368
9	1294	0,137	1555	1,00	44,0	0,999634
10	190,1	0,137	1555	0,004	40,0	0,999634
11	88,5	0,137	1555		17,7	0,999634
12	88,5	0,137	240,2	0,119	-14,5	0,999634
13	1264	0,137	240,2	0,998	-10,0	0,999634
14	1372	0,137	240,2		37,5	0,999634
COP = 0,595		Q _a = 230,0 kW	Q _r = 51,0			
F = 7,32		Q _c = 151,0 kW	Q _{shx} = 346,0 kW			
P _c = 1555 kPa		Q _g = 268,0 kW	Q _{pc} ¹⁾ = 15,0 kW			
P _e = 240,2 kPa		Q _e = 161,0 kW	W = 3,05 kW			

¹⁾ pc = precooler

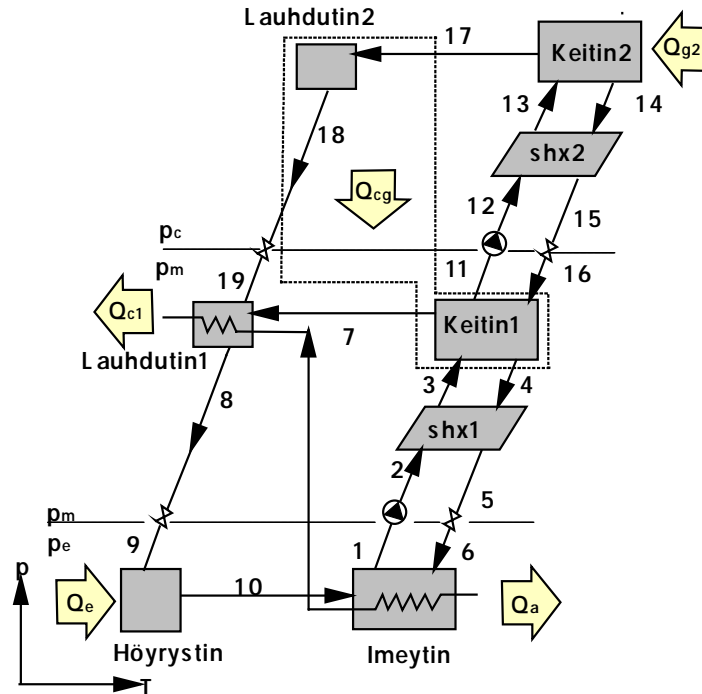
Vastaava COP-arvo ilman lauhteen esijäähdytystä on 0,549. Hyödyntämällä rektifikaation energiaa COP-arvoksi saadaan 0,636. Jos rektifikaation integroinnin lisäksi käytetään nestekiertoa absorberissa, COP-arvoksi saadaan 0,670.

4.3 Kaksivaiheinen H₂O-LiBr-prosessi (Double-effect)

Termi 'double effect' viittaa siihen, että prosessiin tuotu lämpö hyödynnetään kahdesti eri keittimissä, jolloin myös COP kasvaa. Vaiheiden (effect) lukumäärä ilmaisee oletettavan COP:n kasvun. Todellisuudessa DE-jäähdyttimen COP-arvon kasvu on pienempi kuin kaksinkertainen lämpöhäviöiden vuoksi. DE-prosessi on yksi esimerkki kaksiporraisesta (double-stage)-prosessista, joka voidaan ajatella muodostuvan kahdesta yksiporraisesta (single-stage)-prosessista. Portaisuudella on mahdollista nostaa systeemin tehokkuutta (esim. double-effect-, triple-effect-prosessit) tai primäärienergian lämpötilan muutosta (esim. single-effect/double-lift-prosessi).

Kuten edellä on esitetty, SE-absorptiojäähdyttimen COP-arvo on suhteellisen pieni riippumatta primäärienergian lämpötilasta. Näin ollen SE-jäähdytin on kilpailukykyisempi kuin kompressorijäähdytin ainoastaan, jos primäärienergia on halpaa, kuten esimerkiksi matalalämpötilainen jätelämpö. DE-absorptiojäähdytin on kehitetty hyödyntämään korkeita primäärienergian lämpötiloja. Tyypillisesti COP on 1,0 - 1,2, joten DE-jäähdyttimien kilpailukyky kompressorijäähdyttimien suhteen on

huomattavasti parempi kuin SE-jäähdyttimellä. H₂O-LiBr DE-jäähdyttimiä valmistetaan nykyään maailmanlaajuisesti. Kullakin valmistajalla on yleensä oma laitekonstruktio, vaikkakin perustoimintaperiaate on sama.



Kuva 8. Double-effect H₂O-LiBr-absorptiojäähdytin.

DE-prosessissa lämpöä tuodaan matalapaine- ja korkeapainekeittämiin (Keitin 1 & 2, Kuva 8) sekä höyrystimeen. Lämpöä poistuu jäähdytysveteen absorberista ja matalapainelauhduttimesta (Lauhdutin 1). Korkeapainelauhduttimen ja matalapainekeittimen välillä on prosessin sisäinen lämmönsiirto, joka on käytännössä toteutettu asentamalla kyseiset komponentit samaan lämmönsiirtolaitteeseen. DE-prosessin matalapainekeitin ja -lauhdutin toimivat suunnilleen samassa paineessa kuin SE-prosessin keitin ja lauhdutin. Lämpö tuodaan DE-prosessiin huomattavasti korkeammassa lämpötilassa (n. 150 °C) kuin SE-prosessissa, joten DE-absorptiojäähdytin ei pysty hyödyntämään kaukolämpöä. Korkea lämpötila kiihdyttää korroosiota, joten DE-jäähdyttimien korroosio-ongelmat ovat vakavampia kuin SE-jäähdyttimillä.

Eri valmistajien DE-jäähdyttimet poikkeavat toisistaan lähinnä liuoskierron kytkentätavassa. Edellä on esitetty DE-prosessin rinnankytkentä. Toinen vaihtoehto on kytkeä vaiheet sarjaan, jolloin laimea LiBr-liuos (virta 3) johdetaan matalapainelämmönsiirtimestä suoraan korkeapainelämmönsiirtimeen tai väkevä LiBr-liuos (virta 15) korkeapainelämmönsiirtimestä suoraan matalapainelämmönsiirtimeen. Rinnankytkennässä COP on hieman korkeampi kuin kytkettäessä vaiheet sarjaan, mutta rinnankytkennän säätö on monimutkaisempaa. Taulukossa 6 on esitetty 350 kW:n DE-jäähdyttimen prosessiarvot, kun keittimet on kytketty rinnan.

Taulukko 6. 350 kW:n double-effect H₂O-LiBr-absorptiojäähdytin (rinnankytkentä).

I	h(i) J/kg	m(i) kg/s	p(i) kPa	Q(i) Osuus	T(i) °C	x(i) % LiBr
1	65,5911	1,000	0,880	0,000	29,85	52,765
2	65,5932	1,000	4,171		29,85	52,765
3	102,7	1,000	4,171		47,33	52,765
4	195,0	0,852	4,171	0,000	76,39	61,967
5	151,4	0,852	4,171		53,12	61,967
6	151,4	0,852	0,880	0,003	47,91	61,967
7	2608,7	0,067	4,171		57,47	0,000
8	124,5	0,148	4,171	0,000	29,72	0,000
9	124,5	0,148	0,880	0,041	5,13	0,000
10	2511,0	0,148	0,880	1,000	5,13	0,000
11	124,284	0,550	4,171	0,000	57,47	52,765
12	124,322	0,550	64,231		57,49	52,765
13	194,1	0,550	64,231		90,18	52,765
14	323,3	0,469	64,231	0,000	144,84	61,967
15	241,4	0,469	64,231		101,16	61,967
16	241,4	0,469	4,171	0,015	78,60	61,967
17	2726,2	0,082	64,231		122,80	0,000
18	367,2	0,082	64,231	0,000	87,73	0,000
19	367,2	0,082	4,171	0,100	29,72	0,000

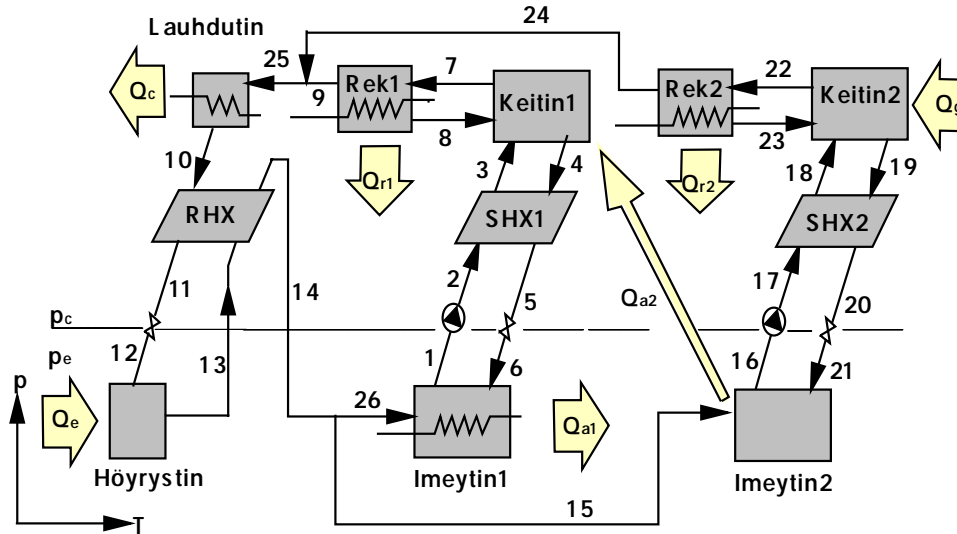
COP	= 1,325	Q _a	= 463,179 kW	Q _{shx1}	= 37,116
P _c	= 64,231 kPa	Q _{cd}	= 192,776 kW	Q _{shx2}	= 38,387
P _m	= 4,171 kPa	Q _{g2}	= 267,492 kW	W ₁	= 0,002 kW
P _e	= 0,880 kPa	Q _{c1}	= 185,702 kW	W ₂	= 0,022 kW
		Q _e	= 354,366 kW		

4.4 Kaksiportainen NH₃-H₂O-prosessi (Two-stage)

Kuten kaksiportaisen LiBr-H₂O-jäähdytysprosessin, myös kaksiportaisen NH₃-H₂O-jäähdyttimen COP-arvo tai primäärienergiavirran lämpötilan alenema ovat suurempia kuin yksiportaisen prosessin. Kaksiportaisia NH₃-H₂O-jäähdytysprosesseja on noin 30 erilaista, joista ainoastaan osaa on tutkittu käytännössä. Kuvassa 9 (vrt. Taulukko 7) on esitetty kaksiportainen, double-effect (kaksikattilainen) NH₃-H₂O-absorptiojäähdytysprosessi. Keittimen 2 lämmönlähteenä on yleensä savukaasu tai höyry. Keittimessä 2 vapautunut höyry absorboidaan imeyttimeen 2, jonka lämpöenergia hyödynnetään keittimessä 1. Näin ollen prosessiin tuotu energia hyödynnetään kahteen kertaan keittimissä kylmäaineen höyrystämiseen. Verrattaessa DE NH₃-H₂O-jäähdytysprosessia vastaavaan DE LiBr-H₂O-prosessiin DE NH₃-H₂O-jäähdyttimen keittimessä 1 höyrystyy enemmän kylmäainetta kuin DE LiBr-H₂O-prosessin keittimessä 1, jossa hyödynnetään lauhduttimen lämpöä (vrt. Kuva 8). Täten lisäämällä vaiheiden lukumäärää saadaan NH₃-H₂O-prosesissa suurempi COP:n muutos kuin LiBr-H₂O-prosessissa.

Taulukko 7. 90 kW:n double-effect NH₃-H₂O-absorptiojäähdytin.

I	h(i) J/kg	m(i) kg/s	p(i) kPa	$\frac{m_{\text{höyry}}}{m_{\text{tot}}}$	T(i) °C	x(i) % NH ₃
1	-48,6	1,00	277,96	0	40,0	0,391
2	-45,7	1,00	1548		40,4	0,391
3	252,7	1,00	1548	0,009	103,8	0,391
4	284,0	0,938	1548	0	111,1	0,351
5	-34,2	0,938	1548		40,4	0,351
6	-34,2	0,938	277,96		40,7	0,351
7	1521,5	0,066	1548	1,00	102,7	0,956
8	235,4	0,004	1548	0	102,8	0,391
9	1365,4	0,062	1548	1,00	67,1	0,995
10	187,6	0,079	1548	0	40,0	0,995
11	-48,5	0,079	1548		-10,0	0,995
12	-48,5	0,079	277,96	0,006	-10,9	0,995
13	1124,0	0,079	277,96	0,9	-10,0	0,995
14	1360,1	0,079	277,96		31,2	0,995
15	1360,1	0,016	277,96		31,2	0,995
16	423,4	0,270	277,96	0	111,5	0,067
17	426,2	0,270	1548		112,0	0,067
18	777,8	0,270	1548	0,021	183,4	0,067
19	840,5	0,253	1548	0	198,0	0,007
20	466,1	0,253	1548		112,0	0,007
21	466,1	0,253	277,96		112,0	0,007
22	2389,7	0,062	1548	1	182,1	0,336
23	736,2	0,043	1548	0,001	182,1	0,067
24	1568,1	0,019	1548	1	112,0	0,933
25	1365,4	0,079	1548	0,996	63,3	0,995
26	1360,1	0,062	277,96		31,2	0,995
27	1365,4	0,016	1548	1	67,1	0,995
28	79,1	0,003	1548	0,998	67,10	0,595
29	1381,9	0,016	277,96		40,7	0,995
COP	= 0,74	Q _g	= 120 kW	Q _{shx1}	= 298 kW	
P _c	= 1548 kPa	Q _e	= 92 kW	Q _{shx2}	= 96 kW	
P _e	= 277,96 kPa	Q _c	= 93 kW	W ₁	= 3,0 kW	
Q _{al}	= 100 kW	Q _{rhx}	= 18,6 kW	W ₂	= 0,8 kW	
Q _a	= 26,8 kW					



Kuva 9. Kaksiportainen double-effect $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -absorptiojäähdytysprosessi.

Kuvasta 9 nähdään, että prosessi toimii ainoastaan kahdessa painetasossa, kun taas DE $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ -prosessissa on kolme painetasoa. Mikäli $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -prosessi suunniteltaisiin kolmelle painetasolle, ylimmän painetason paine olisi noin 7 MPa tyypillisessä ilmastointijäähdyttimessä, mikä asettaisi erityisiä rakenteellisia vaatimuksia ja nostaisi siten jäähdyttimen hintaa huomattavasti.

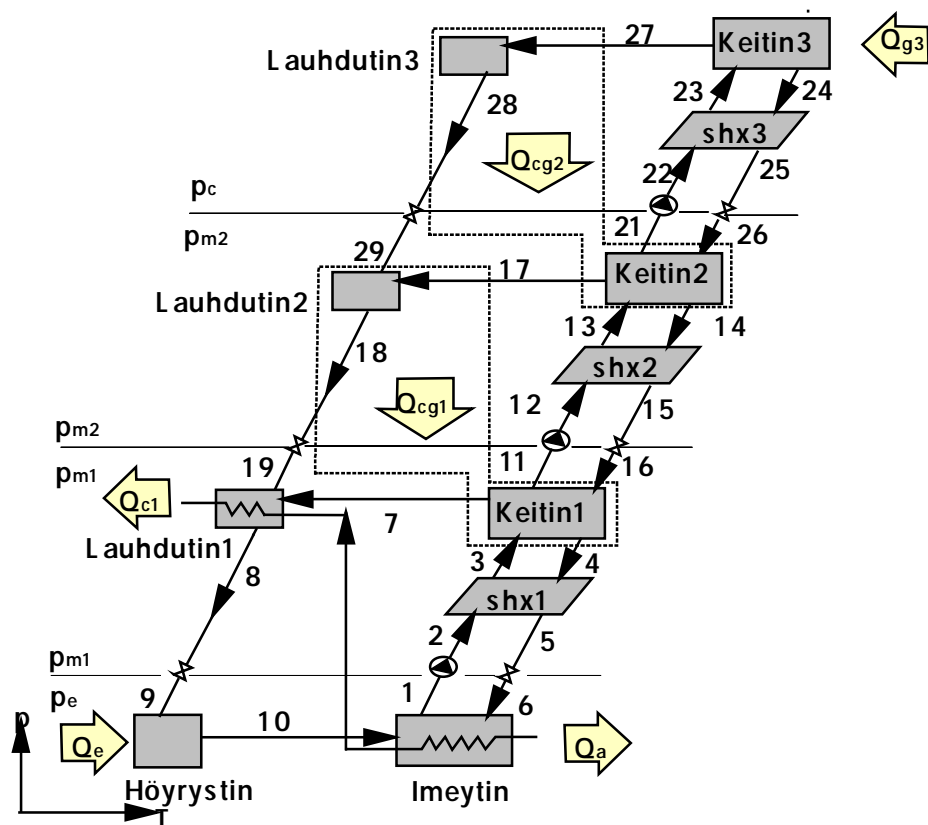
4.5 Kolmivaiheinen $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -prosessi (Triple-effect)

Triple-effect-absorptiojäähdyttimet ovat monen absorptiojäähdytinvalmistajan aktiivisena kehityskohteenä. Motivaationa on nostaa kaasukäyttöisen absorptiojäähdyttimen COP arvoon 1,4 - 1,5 pienellä investointikustannuslisäyksellä. Käyttöenergia tuodaan TE-jäähdyttimeen vielä korkeammassa lämpötilassa kuin double-effect jäähdyttimeen, joten korroosio- ja materiaalikysymykset ovat kriittisiä tekniikan kaupallistamisessa.

TE-jäähdytin toimii neljässä painetasossa (vrt. Taulukko 8), joista korkein on yli ilmanpaineen. TE-prosessissa on kaksi sisäistä lämmönsiirtoa korkeapaine-lauhduttimien ja -keittimien välillä (vrt. Kuva 10).

Taulukko 8. 230 kW:n triple-effect H₂O-LiBr-absorptiojäähdytin.

i	h(i) J/kg	m(i) kg/s	p(i) kPa	Q(i) osuus	T(i) °C	x(i) % LiBr
1	66,4	1,000	0,87	0	30,0	52,94
2	66,4	1,000	4,24		30,0	52,94
3	101,4	1,000	4,24		46,5	52,94
4	166,8	0,902	4,24	0	69,5	58,66
5	128,0	0,902	4,24		49,7	58,66
6	128,0	0,902	0,87	0,0060	41,4	58,66
7	2609,9	0,027	4,24		58,1	
8	125,6	0,098	4,24	0	30,0	
9	125,6	0,098	0,87	0,0420	5,0	
10	2510,7	0,098	0,87	1	5,0	
11	126,0	0,724	4,24	0	58,1	52,94
12	126,0	0,724	37,66		58,1	52,94
13	181,8	0,724	37,66		84,3	52,94
14	268,0	0,653	37,66	0	120,8	58,66
15	206,2	0,653	37,66		89,5	58,66
16	206,2	0,653	4,24	0,0133	71,2	58,66
17	2700,6	0,028	37,66		108,2	
18	311,5	0,071	37,66	0	74,5	
19	311,5	0,071	4,24	0,0764	30,0	
21	232,8	0,437	34,66	0	108,2	52,94
22	232,9	0,437	237,84		108,2	52,94
23	296,8	0,437	237,84		138,1	52,94
24	384,9	0,394	237,84	0	180,0	58,66
25	314,0	0,394	237,84		144,1	58,66
26	314,0	0,394	37,66	0,0493	76,1	58,66
27	2799,4	0,043	237,84		166,0	
28	528,2	0,043	237,84	0	125,8	
29	528,2	0,043	37,66	0,0933	74,5	
COP = 1,645		Q _a = 294,059 kW	Q _e = 232,7 kW			
p _c = 237,843 kPa	Q _{c1} = 80,1 kW	Q _{shx1} = 35,0 kW				
p _{m2} = 37,657 kPa	Q _{c2} = 76,0 kW	Q _{shx2} = 40,4 kW				
p _{m1} = 4,238 kPa	Q _{c3} = 96,8 kW	Q _{shx3} = 27,9 kW				
p _e = 0,872 kPa	Q _{g1} = 76,0 kW	W ₁ = 0,0022 kW				
ε _{shx} = 0,500	Q _{g2} = 96,8 kW	W ₂ = 0,0157 kW				
	Q _{g3} = 141,4 kW	W ₃ = 0,0577 kW				



Kuva 10. Triple-effect H_2O -LiBr-absorptiojäähdytin.

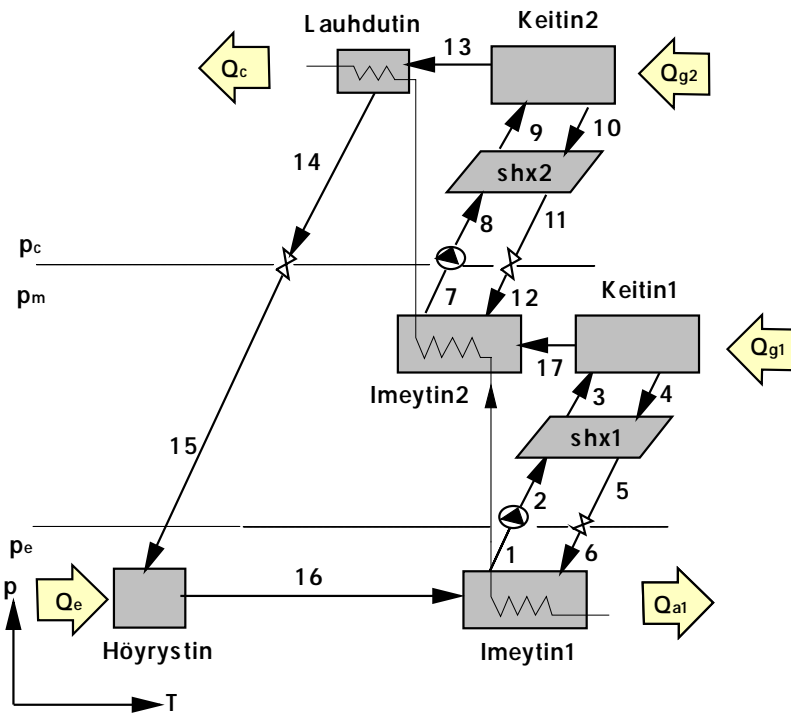
4.6 Half-Effect H_2O -LiBr-prosessi

Half-effect- (HE) prosessi soveltuu käyttökohteisiin, joissa primäärienergian lämpötila on liian alhainen SE-prosessille. Näin ollen HE-prosessi soveltuisi esimerkiksi kaukojäähdytykseen. Dühring-piirroksista (Kuva 11, Taulukko 9) nähdään, että HE-jäähdytin toimii kolmessa painetasossa, jolloin tarvitaan kaksi absorberia, desorberia ja liuoslämmönsiirrintä. Absorptiojäähdyttimen matala- ja korkeapaineosat toimivat kuten SE-prosessissa. Välipainetasossa keittimestä poistuva kylmäaine virtaa absorberiin ja korkeapainetasossa absorbentti väkevöidään toisen kerran.

Välipainetaso-ansiosta energia voidaan tuoda jäähdytimeen noin $70\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Huomattavaa on kuitenkin huono kylmäntuotannon hyötysuhde, mikä on HE-prosessin heikkous. Verrattaessa HE-prosessia SE-prosessiin saadaan yleensä puolet huonompia COP-arvoja, eli käytännössä COP-arvo HE-prosessille on noin 0.35.

HE-prosessia ja sen muunnoksia on rakennettu ja testattu ainoastaan laboratorio-oloissa tai pilottilaitteina. Yhtään kaupallista HE-jäähdytinmallia ei ole olemassa. Vuonna 1982 Battelle Memorial Institute rakensi 175 kW :n HE-jäähdyttimen, jonka mitattu COP-arvo oli 0.35. 1990-luvun alkupuolella Alaskassa otettiin käyttöön HE-jäähdytin, jossa väliaineena on NH_3-H_2O . Molemmat demonstraatiojäähdyttimet ovat toimineet hyvin,

mutta kaupalliseen valmistukseen ei ole ryhdytty suurten investointikustannusten vuoksi.



Kuva 11. Half-effect kiertoprosessi.

Taulukko 9. 900 kW:n half-effect H₂O-LiBr-absorptiojähdytin.

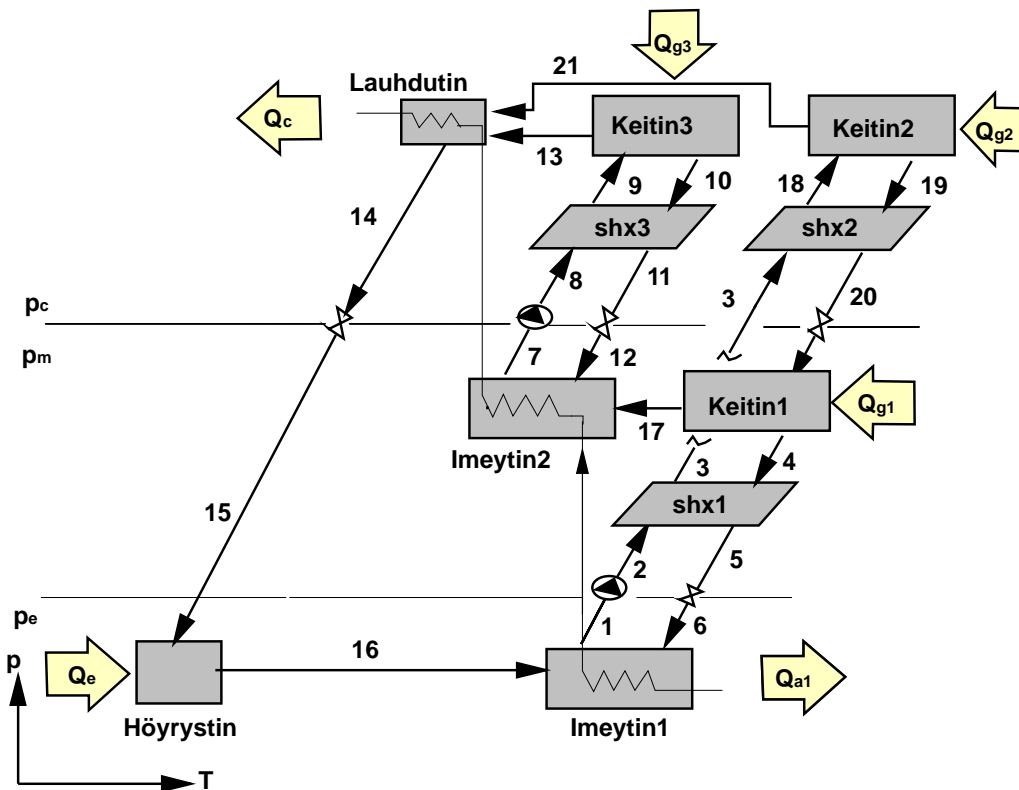
i	h(i) J/kg	m(i) kg/s	p(i) kPa	Q(i) osuus	T(i) °C	x(i) % LiBr
1	74,7	3,000	0,657	0,000	30,0	55,4
2	74,7	3,000	1,932		30,0	55,4
3	96,2	3,000	1,932		40,5	55,4
4	182,7	2,614	1,932	0,000	65,0	63,6
5	158,0	2,614	1,932		51,4	63,6
6	158,0	2,614	0,657	0,003	46,4	63,6
7	57,1	2,500	1,932	0,000	30,0	42,7
8	57,1	2,500	7,368		30,0	42,7
9	81,9	2,500	7,368		40,5	42,7
10	137,3	2,114	7,368	0,000	65,0	50,5
11	108,0	2,114	7,368		51,6	50,5
12	108,0	2,114	1,932	0,010	40,1	50,5
13	2602,9	0,386	7,368		54,8	0,0
14	167,4	0,386	7,368	0,000	40,0	0,0
15	167,4	0,386	0,657	0,065	1,0	0,0
16	2502,3	0,386	0,657	1,000	1,0	0,0
17	2591,7	0,386	1,932		48,1	0,0
COP = 0,395		Q _{a1} = 1154,6 kW		Q _e = 901,1 kW		
p _c = 7,368 kPa		Q _{a2} = 1085,8 kW		Q _{shx1} = 64,7 kW		
p _m = 1,932 kPa		Q _{g1} = 1189,1kW		Q _{shx2} = 61,9 kW		
p _e = 0,657 kPa		Q _{g2} = 1090,1 kW		W ₁ = 0,0024 kW		
ε _{shx} = 0,300		Q _c = 939,9 kW		W ₂ = 0,0097 kW		

4.7 Single-effect / double-lift-prosessi

4.7.1 Prosessin kuvaus

Saksalainen energiatutkimusinstituutti ZAE Bayern (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.) on kehittänyt single-effect/double-lift (SE/DL)-absorptiojähdytyskonseptin, jossa half-effect kierto-prosessiin on lisätty korkeapainetasolle kolmas keitin (Kuva 12). Työaineparina prosessissa on H₂O-LiBr. Jähdytin toimii kuten half-effect-prosessi, eli keittimiin energia voidaan tuoda matalassa lämpötilassa (70 °C), jolloin konsepti soveltuu kaukojähdytykseen. Kolmannen keittimen ansiosta SE/DL-prosessin tehokkuutta on pystytty parantamaan lähelle SE-jähdyttimen COP-arvoa. Käytännössä SE/DL-jähdyttimen COP-arvo vaihtelee välillä 0,35 - 0,7 riippuen jähdyttimen 'ajotavasta'. Prosessi voi toimia SE-jähdyttimenä, jolloin H₂O-LiBr-liuos kiertää pääasiassa yhden keittimen kautta (Keitin 2) ja SE/DL-jähdyttimen COP-arvo on suurimmillaan. SE/DL-prosessin etu on myös hyvä säädettävyys ja suhteellisen korkea COP-arvo osakuormalla.

SE/DL-jäähdyttimessä kuuma vesi (esim. kaukolämpö) syötetään keittimeen 2, josta se virtaa keittimeen 1 ja lopuksi keittimeen 3. Lämmönlähteenä toimivan veden lämpötilan alenema voi olla 30 K, joka on noin 20 K suurempi kuin SE-prosessilla. Näin ollen SE/DL-laitteiston jäähdytystehokkuus per l/s kuumaa vettä on noin kolme kertaa suurempi kuin SE-prosessilla. Alimmillaan SE/DL-prosessin primäärienergian paluulämpötila voi käytännössä olla 55 °C ja osakuormalla jopa vielä alempi.



Kuva 12. Single-effect/double-lift absorptiojäähdytin.

4.7.2 SE/DL-pilotti- ja demonstraatiojäähdyttimet

Ensimmäinen, 400 kW:n SE/DL-pilottijäähdytin käynnistyi Berliinissä elokuussa 1996. Jäähdyttimen valmistaja on ranskalainen Entropie GmbH ja se on asennettu Berliinin Teknilliseen korkeakouluun. SE/DL-jäähdytin on kytketty kaukolämpöverkkoon, joka on Bewagin (Berliner Kraft und Licht) omistuksessa. Bewag toimittaa kaukolämpöä Berliinin länsipuolelle, jossa on kolmiputkijärjestelmä, sekä Berliinin itäpuolelle, jossa on käytössä kaksiputkijärjestelmä. 400 kW:n SE/DL-laitteisto tuottaa kaukokylmää Berliinin länsipuolelle, jossa kaukolämpöveden suunnittelulämpötila on 110 °C. Jäähdyttimen COP-arvoksi on mitattu 0,62 kaukolämpöveden menolämpötilalla 95 °C, jolloin paluulämpötilaksi on saatu alle 65 °C. Kyseiset mittausarvot vastaavat hyvin suunnitteluarvoja (vrt. Taulukko 10). Osakuormalla 85 - 65 % COP-arvoksi saatiin noin 0,65 - 0,75.

Toinen, 300 kW:n jäädytin on ollut toiminnassa vuoden 1997 alusta lähtien. GEA Luftkühler GmbH:n valmistama jäädytin on asennettu Stadtwerke Düsseldorf AG:n voimalaitokseen. Sekä 300 kW:n että 400 kW:n kaukojäähdytysprojektien rahoittajina oli valtion lisäksi konsortio, jonka osapuolina oli 15 kaukolämmön toimittajaa ja kaksi laitosrakennusyritystä.

Suurin ja samalla ensimmäinen kaupallinen SE/DL-laitteisto on 2,5 MW:n jäädytin Münchenin lentokentällä. Myös tämä laitteisto on Entropie GmbH:n valmistama. Münchenin jäädyttimen investointikustannus oli noin 2 milj. DM.

SE/DL-jäädyttimet on rakennettu kuten kaupalliset standardiabsorptiojäädyttimet:

- samassa paineessa toimivat komponentit on hitsattu samaan kuoreen
- standardiprosessikomponentit (esim. hermeettiset liuospumput, kalvoventtiilit, kiteytymisen seuranta-automaatiikka, kondensoitumattomien kaasujen poisto-automaatiikka)
- ”falling film”-tyyppiset putkilämmönsiirtimet.

Taulukko 10. SE/DL-demonstraatiojäädyttimet.

	400 kW, Berliini	300 kW, Düsseldorf	2,5 MW, München
Lämpö-/voimalaitos	BEWAG, Berlin	Stadtwerke Düsseldorf AG	Flughafen München GmbH
Asennuspaikka	Berliinin Teknillinen korkeakoulu	Lauswardin voimalaitos, Düsseldorf	Münchenin lentokentän voimalaitos
Valmistaja	Entropie GmbH, Erding, Ranska	GEA Luftkühler GmbH, Herne, Saksa	Entropie GmbH, Erding, Ranska
Suunnitteluparametrit			
Kuuma vesi	95 / 65 °C	85 / 60 °C	1)
Jäähdytysvesi	27 / 35 °C	27 / 35 °C	1)
Jäähdytetty vesi	12 / 6 °C	12 / 6 °C	1)
Jäähdytysteho	400 kW	300 kW	2,5 MW
COP	0,62	0,58	0,60
Dimensiot	4,5 x 2 x 2,15 m	5,5 x 2 x 2,5 m	6 x 3 x 5 m

1) ei tiedossa

4.7.3 SE/DL-laitteiston säätö

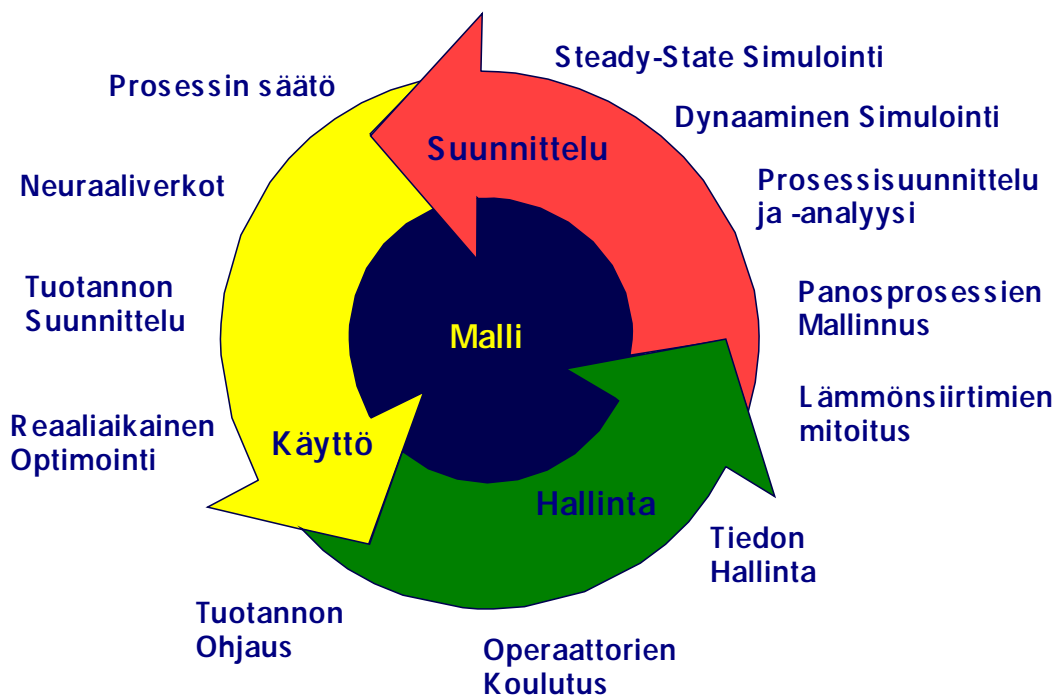
SE/DL-jäädyttimen säätö- ja instrumentointitarve on lähes sama kuin SE-jäädyttimellä. Esimerkiksi primäärienergian jako SE- ja DL-fraktioihin tapahtuu automaattisesti riippuen lähinnä kuumen veden syöttölämpötilasta ja massavirrasta. Ajettaessa SE/DL-jäädyttimellä osakuormaa voidaan valita kahdesta säätötavasta. Kuten SE-jäädyttimillä, jäähdytettävän veden ulostulolämpötila voidaan pitää vakiona ja pienentää kuumen veden syöttölämpötilaa tai massavirtaa. SE-jäädyttimillä molemmat menetöt johtavat lähes samaan COP-arvoon, kun taas SE/DL-jäädyttimellä kuumen veden massavirran säädöllä saadaan korkeampia COP-arvoja. Molemmissa säätövaihtoehdoissa 40 % osakuormalla SE/DL-jäädytin toimii kuten SE-jäädytin.

5. ABSORPTIOPROSESSIMALLIT

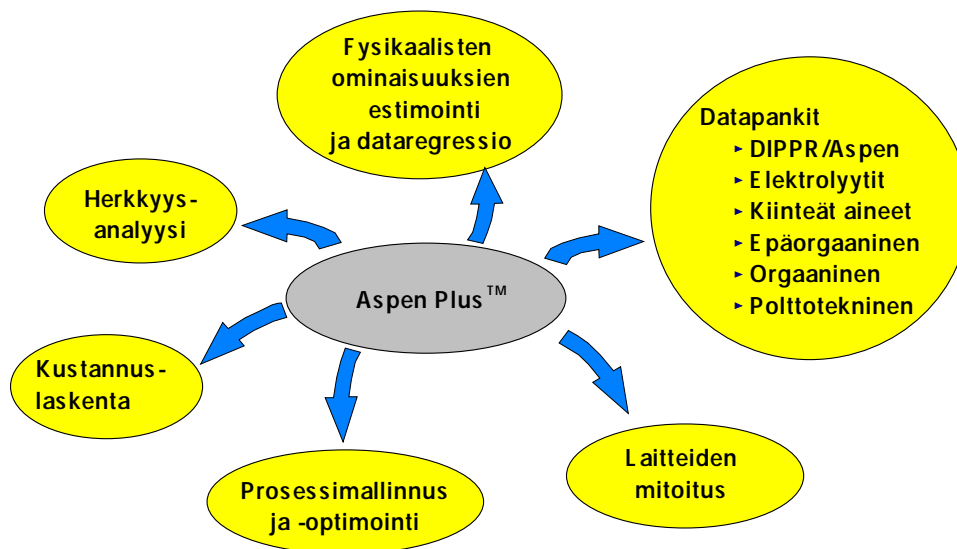
5.1 Aspen Plus™ -ohjelmisto ja sen käyttö absorptioprosessien mallintamisessa

5.1.1 Aspen Plus™ -ohjelmisto

Absorptiojäähdytysprosessien aine- ja energiataseiden laskennassa käytettiin Aspen Technology, Inc:n lisensoimaa Aspen Plus™-ohjelmistoa, joka on ehkä eniten käytetty 'steady state' simulointiohjelmisto kemian ja petrokemian teollisuudessa sekä lääke-teollisuudessa. Aspen-ohjelmistoa kehitettiin Massachusetts Institute of Technologyssa (MIT) vuosina 1976 - 1981 US Department of Energy (DOE) rahoituksella. Tämän jälkeen ohjelmistoa on laajennettu ja siihen on liitetty useita, myös reaaliaikaisia, prosessien suunnitteluun, käyttöön ja hallintaan suunnattuja ohjelmia (vrt. Kuva 13). Aspen Plus-ohjelmistoa käytetään lähinnä prosessien aine- ja energiataselaskentaan, prosessilaitteiden mitoittamiseen, prosessien optimointiin sekä kustannuslaskentaan (Kuva 14). Ohjelmiston vahvuus on sen tietopankeissa, joihin on koottu orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden ja yhdisteiden termodynaamiset, fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet.



Kuva 13. Aspen Technology Inc:n ohjelmistot.



Kuva 14. Aspen Plus™-ohjelmisto.

5.1.2 LiBr-H₂O-absorptiojäähdytysprosessien mallinnus Aspen Plus -ohjelmistolla

LiBr-H₂O-seoksen termodynaamiset ominaisuudet laskettiin Aspen Technin kehittämällä NRTL-mallin muunnoksella, joka soveltuu erityisesti elektrolyyttien laskentaan. NRTL on ns. aktiivisuuserroinmalli, jolla kuvataan polaaristen, epäideaalisten systeemien neste-höyryfaasitasapainoa. Laskentatarkkuuden lisäämiseksi elektrolyytti-NRTL-mallille regressoitiin parametreja kokeellisesta neste-höyrytasapainotiedosta.

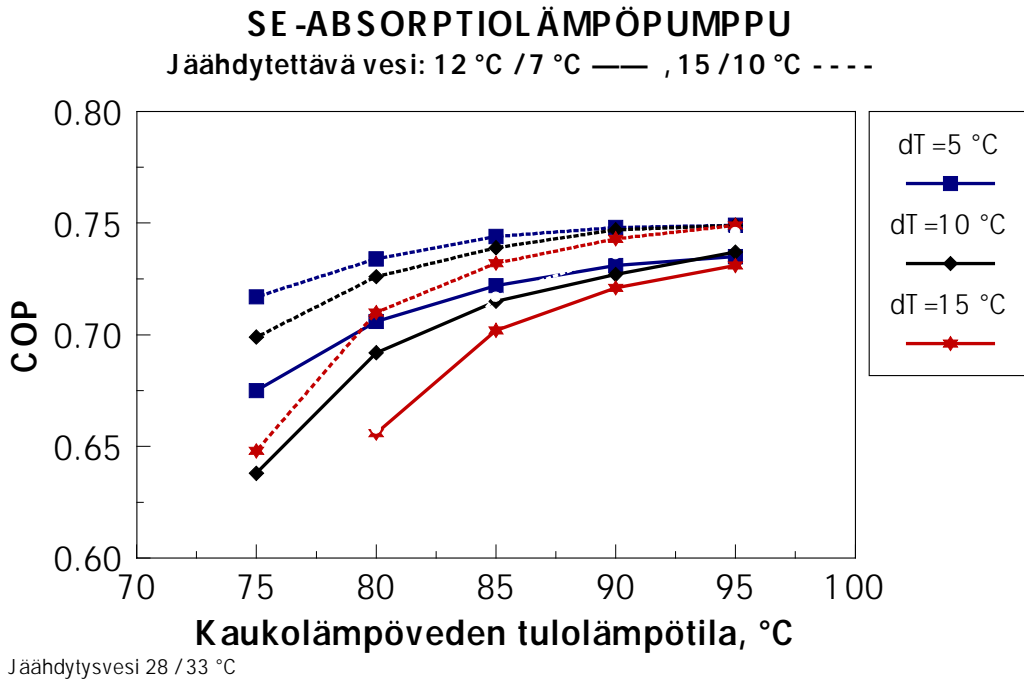
Aspen-ohjelmistolla laskettiin ainoastaan prosessien aine- ja energiataseet. Prosessikomponenttien geometriaa, lämpöhäviöitä, painehäviöitä yms. ei otettu huomioon laskennassa. Lämmönsiirtimet kuvattiin vastavirtasiirtiminä, joiden pinch-lämpötila oli n. 10 °C. Keittimen ja kaukolämpöveden lämpötilaero oli vähintään 5 °C.

5.2 LiBr-H₂O Single-effect prosessi

Liitteessä 1 on esitetty SE-prosessin Aspen Plus-virtauskaavio. Alla esitetyt tulokset laskettiin myös korealaisen Gold Starin ohjelmalla. Aspenin ja Gold Starin tulokset olivat vertailukelpoisia keskenään. Suurimmat erot tuloksissa johtuivat lähinnä ohjelmien laskemista LiBr-H₂O-liuoksen konsentraatioeroista, joka puolestaan vaikuttaa prosessin hyötysuhteeseen.

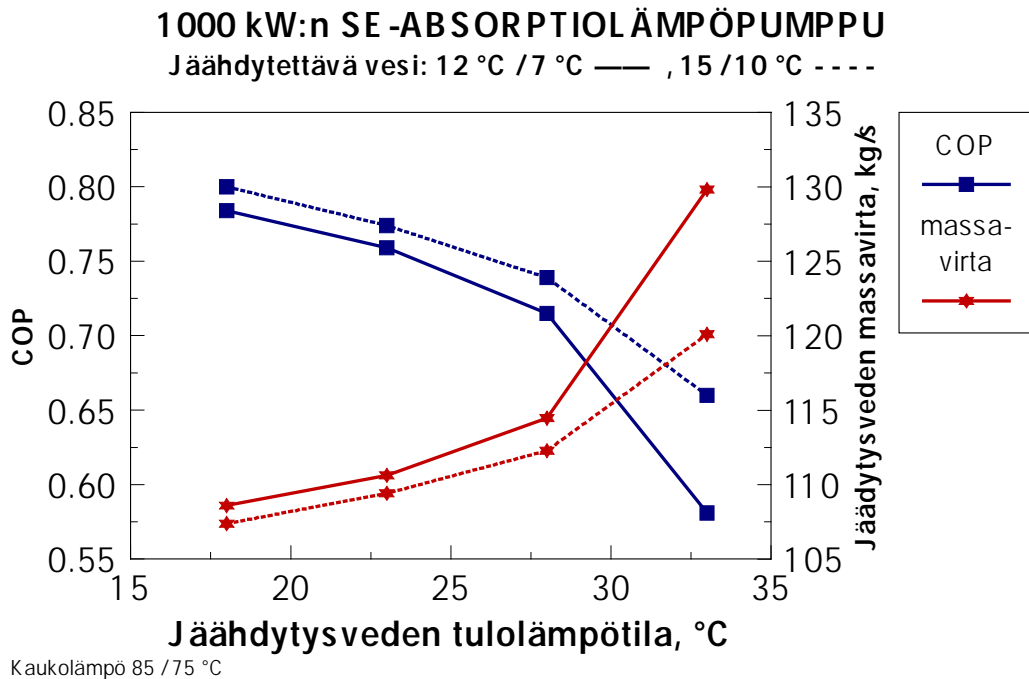
Kuvassa 15 on esitetty SE-jäähdyttimen COP kaukolämpöveden tulolämpötilan funktiona, kun kl-veden jäähtymä oletetaan 5, 10 15 °C:ksi. Jäähdytyspiirin lämpötiloiksi on oletettu 12/7 °C ja 15/10°C (meno/paluu). Imeytintä ja lauhdutinta jäähdyttävän veden lämpötiloiksi on oletettu 28/33 °C. Kuvasta nähdään, että käyttöenergian laskiessa alle 85 °C:n COP-arvo laskee nopeasti. COP:n lasku ei ole

kuitenkaan yhtä jyrkkä suuremmilla jäähdytyspiirin lämpötiloilla ja 5 °C:n kl-veden lämpötilan alenemalla.



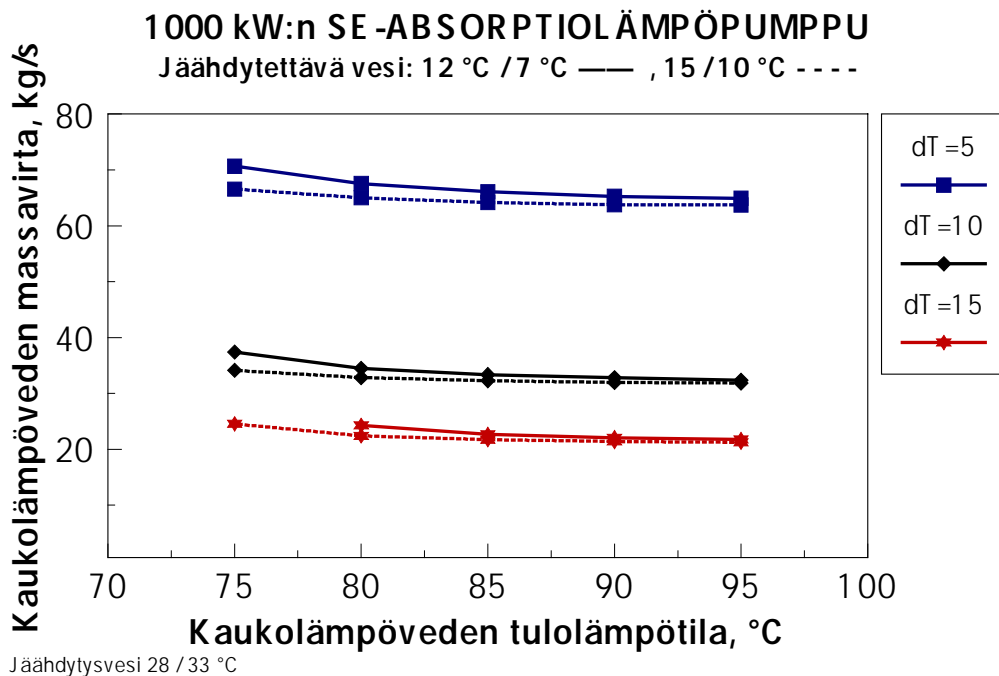
Kuva 15. SE-jäähdyttimen COP kaukolämpöveden tulolämpötilan funktiona.

Kuvassa 16 on esitetty imeytintä ja lauhdutinta jäähdyttävän veden lämpötilan vaikutus prosessin hyötysuhteeseen. Jäähdyttimen tehoksi on oletettu 1000 kW. Kuten kappaleessa 2.4 esitettiin, jäähdytysveden lämpötila määrää imeytimen toimintapisteen. Mitä alhaisempi jäähdytysveden lämpötila on, sitä parempi on prosessin hyötysuhde.



Kuva 16. SE-jäähdyttimeen tulevan jäähdytysveden lämpötilan vaikutus COP-arvoon.

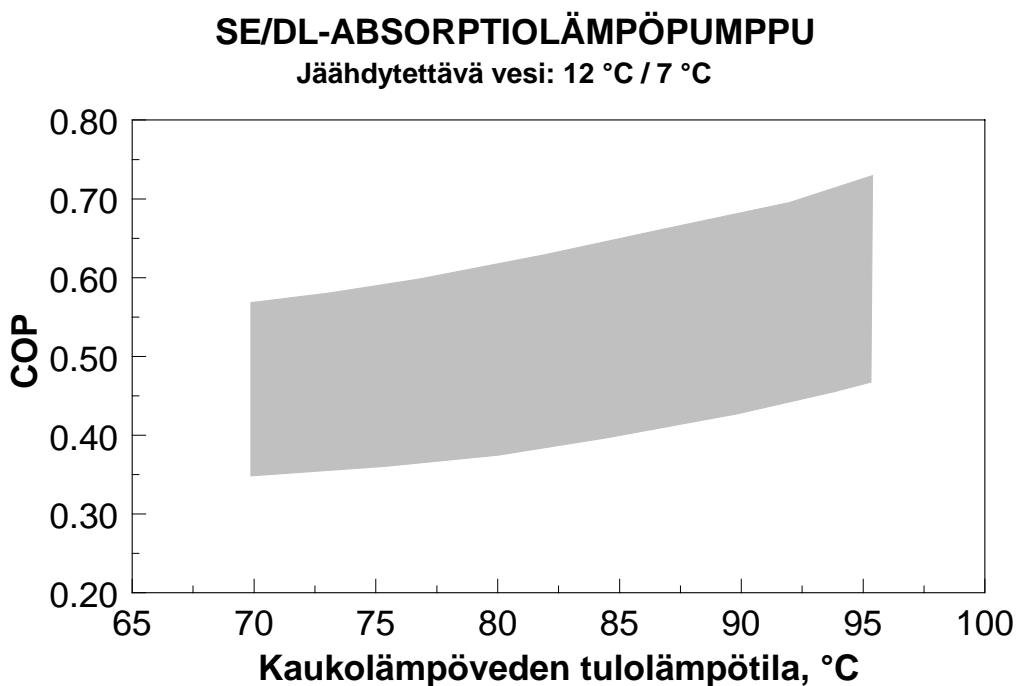
Kl-veden syöttölämpötilan vaikutus kl-veden massavirtaan (1000 kW:n jäähdytin) on esitetty kuvassa 17. Huomattavaa on, että kl-veden tulolämpötilalla on huomattavasti vähäisempi vaikutus kl-veden massavirtaan kuin kl-veden lämpötilan alenemalla.



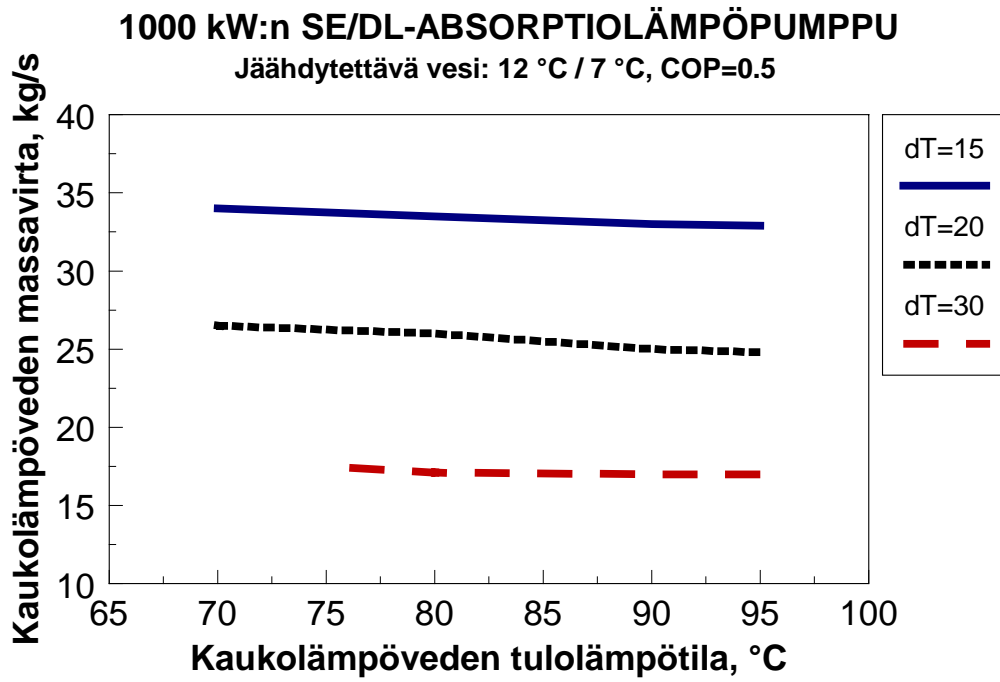
Kuva 17. SE-jäähdyttimeen tulevan kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus kaukolämpöveden massavirtaan.

5.3 Single-effect / Double-lift-prosessi

LiBr-H₂O SE/DL-prosessin Aspen-virtauskaavio on esitetty liitteessä 2. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty 1000 kW:n SE/DL-jäähdyttimen COP ja kl-veden massavirta, kun kl-veden jäähtymä on 15 – 30 °C. SE/DL-prosessin COP voi vaihdella 0,35 - 0,7 välillä (vrt. Kappale 4.7) riippuen jäähdyttimen ajotavasta, mikä näkyy kuvassa 18. COP-arvo kasvaa, jos keittimeen 2 virtaavan LiBr-H₂O-liuoksen massavirtausta suurennetaan ja vastaavasti keittimien 1 ja 3 massavirtausta pienennetään. Samalla kuitenkin kl-veden lämpötilan alenema pienenee ja kl-veden massavirtaus kasvaa. Kl-veden jäähtymän suuruuden vaikutus kl-veden massavirtaan näkyy kuvassa 19, jossa on esitetty SE/DL-jäähdyttimen toimintaa COP-arvolla 0,5.



Kuva 18. SE/DL-jäähdyttimen COP kaukolämpöveden tulolämpötilan funktiona.



Kuva 19. SE/DL-jäähdyttimeen tulevan kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus kaukolämpöveden massavirtaan.

6. ABSORPTIOJÄÄHDYTTIMET SUOMALAISESSA KAUKO-LÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

6.1 Absorptiojäähdyttimen käyttökohteet

Jäähdytysenergiaa tarvitaan rakennusten sisäilman jäähdyttämiseen, sisään puhallettavan ilman kosteuden alentamiseen, erilaisten viileiden säilytystilojen ja prosessien jäähdyttämiseen sekä jääratojen jäädyttämiseen. Kaukolämpöveden jakelulämpötila on kesäaikana noin 80 °C ja talvella maksimissaan 115 °C. Paluulämpötilana pyritään pitämään 40 - 50 °C. Huonetilojen (sisälämpötila maksimi 26 °C) jäähdytyspiirin lämpötilat ovat 7/12 °C. Taulukossa 11 esitetään absorptiojäähdytyskoneet ja niiden soveltuvuus eri käyttökohteisiin.

Taulukko 11. Absorptiojäähdytyskoneistot ja niiden soveltuvuus (x=soveltuu) eri käyttökohteisiin. SE=single-effect, HE=half-effect, SE/DL=single-effect/double-lift, DE=double-effect, TE=triple-effect prosessit.

Jäähdytyskoneisto				Jäähdytyskohde				
Jäähdytin	Prim.en.l. lt. °C	T _{in} -T _{out} kl-jäähd.	Kylmä lt. °C	Huoneisto, max 26 °C	Viileätila, 10-12 °C	Jääkaappi, 5 °C	Prosessi, 5-10 °C	Jäärata, -10 °C
SE,LiBr-H ₂ O	90	10	7	X	x		x	
SE,NH ₃ -H ₂ O	100	10	-10	X	x	x	x	x
HE,LiBr-H ₂ O	70	20	7	X	x		x	
HE,NH ₃ -H ₂ O	70	20	-10	X	x	x	x	x
SE/DL, LiBr-H ₂ O	80	25	7	X	x		x	
SE/DL, NH ₃ -H ₂ O	80	25	-10	X	x	x	x	x
DE,LiBr-H ₂ O	160	30	7	X	x		x	
DE,NH ₃ -H ₂ O	160	30	5	X	x	x	x	
TE,LiBr-H ₂ O	200	50	7	X	x		x	
TE,NH ₃ -H ₂ O	200	50	5	X	x	x	x	

Suomalaista kaukolämpöä energialähteenä käyttävänä absorptiojäähdyttimenä tulee kyseeseen vain single-effect, half-effect ja single-effect/double-lift absorptiojäähdyttimet. Kyseisten jäähdyttimien käyttökohteita ovat kiinteistöjen, viileiden säilytystilojen (esim. elintarvikekauppojen hedelmien kypsytyshuoneet) ja prosessien jäähdytys. Ammoniakki-vesijäähdyttimellä voitaisiin jäähdyttää ja ylläpitää myös jääratoja. Niiden käyttö keskittyy kuitenkin pääasiassa talvikauteen, jolloin kaukolämmöllä on muutenkin kysyntää.

6.2 Absorptiojäähdyttimien kustannukset

Absorptiojäähdyttimien hankintahinta on noin 1,0 – 1,4-kertainen vastaavan kokoisiin kompressorijäähdytyslaitteisiin verrattuna. Tuotekehityksen tuloksena absorptio-koneiden hinnat ovat kuitenkin laskemassa, jolloin niiden kilpailukyky paranee. LiBr–H₂O-laitteiden hinnat ovat noin:

- 1300 mk/kW, 500 kW:n yksikkö
- 1000 mk/kW, 1000 kW:n yksikkö
- 700 mk/kW, 1500 kW:n yksikkö.

NH₃–H₂O-koneiston hinnat ovat hiukan korkeammat. Absorptio- ja kompressorikoneiston hintaa lisää vielä jäähdytinkiiri, joka tarvitaan absorptiokoneen imeyttimen, lauhduttimen ja rektifikaatiokolonnin sekä kompressorikoneiston lauhduttimen jäähdyttämiseen. Jäähdytystornien hinnat ovat 20 – 30 % jäähdytyskoneen hinnoista.

Absorptiokoneistojen ylläpitokustannukset – noin 2 - 3 % vuosittain investointikustannuksista - ovat huomattavasti pienemmät kuin kompressorikoneistoilla, joiden ylläpitokustannukset vuodessa vaihtelevat 3 – 12 % investoinneista.

6.3 Absorptiojäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksen mahdollisuudet suomalaisessa kaukojäähdytyksessä

Jäähdytys voidaan tehdä sekä kompressorilla että absorptiokoneistolla kiinteistökohtaisesti tai keskitetysti, jolloin jäähdytysenergia jaetaan rakennuksiin kylmäverkon avulla. Pienet kompressorijäähdyttimet ovat edullisempia kuin vastaavan tehoiset absorptiojäähdyttimet. 500 kW:sta ylöspäin hintaero kaventuu ja yli 1 MW:n jäähdytysteholla absorptiokoneisto saattaa olla jo edullisempi kuin vastaava kompressorikoneisto. Kylmäkoneen mitoituksessa on aina otettava huomioon kylmävaraston käyttö kuorman tasaajana. Kylmäkoneen mitoitus-tehoa voidaan silloin pienentää ja koneen huipun käyttöaika kasvaa. Suomessa kiinteistöjen jäähdytyksen huipun käyttöaika on tyypillisesti 500 – 700 tuntia vuodessa. Kaukolämpöä energialähteenä käyttävänä kylmäkoneena kysymykseen tulevat ainoastaan single-effect (SE) tai single-effect/double-lift (SE/DL) absorptiojäähdyttimet. Jäähdytyskohteen lämpötilan mukaan valitaan joko LiBr–H₂O tai NH₃–H₂O työainepari.

Tarkastellaan kiinteistökohtaisina jäähdytysesimerkkeinä kahta etelä-suomalaista rakennusta, joiden tilavuudet ovat 150 000 m³ ja 28 000 m³. Kylmätehon tarpeet ovat 1200 kW ja 250 kW sekä arvioidut jäähdytysenergian tarpeet vuodessa 410 ja 82 MWh. Isompaan taloon mitoitetaan 600 kW:n kylmäkone ja 400 m³:n kylmävesisäiliö 600 kW:n kylmäteholle sekä pienempään rakennukseen 160 kW:n kylmäkone ja 80 m³:n kylmävarasto 90 kW:n teholla. Rakennusten sisäiset jäähdytysenergian jakotavat ovat samanlaiset eivätkä ne vaikuta jäähdytysenergian tuotantotapaan. Sähkön hinnaksi oletetaan 60 p/kWh ja kaukolämmön 176 mk/MWh (keskihinnat, KTM Energiakatsaus 4/97). Esimerkissä lasketaan, kuinka paljon SE- tai SE/DL-absorptiojäähdytysinvestointi

talokohtaisesti saa maksaa verrattuna kompressorijäähdytykseen, jotta jäähdytysenergian hinnat tulevat samoiksi molemmilla jäähdytystavoilla. Lisäksi arvioidaan edellisestä lähtökohdasta, paljonko tulee kylmäenergian hintaeroksi, jos kaukolämmön hinta puolitetaan jäähdytyskaudella. Arvioidaan myös puolella kaukolämpöenergian hinnalla, paljonko absorptiotekniikka saa maksaa verrattuna kompressorijäähdytykseen, kun jäähdytysenergian hinnat ovat samat. Tulokset esitetään taulukossa 12.

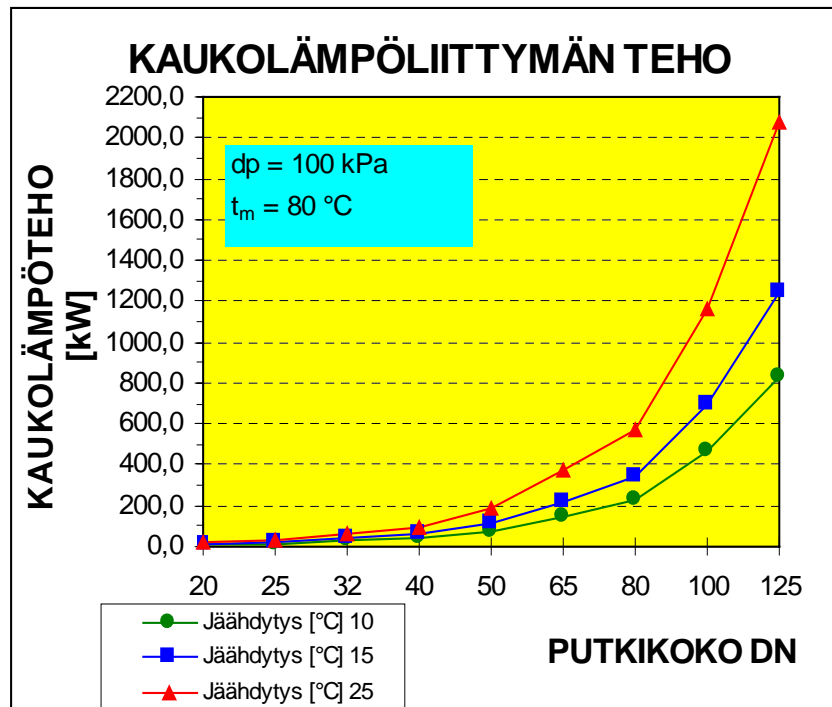
Keskitettyssä jäähdytyksessä jäähdytysenergia tuotetaan suuremmissa yksiköissä ja kylmäenergia jaetaan taloihin jakeluverkostolla. Jakelulämpötilat ovat 6 - 7/12 - 14 °C meno-/paluulämpötila. Jakeluverkosto voi olla eristetty teräsputkisto tai muoviputkisto. Siirtoaineena voidaan käyttää vettä, glykolivettä tai jähilevettä.

Taulukko 12. Talokohtaisen jäähdytysenergian tuotantovertilu suhteellisin hinnoin.

Toim. pide	Jäähdytyskohde Rakennus 150 000 m ³						Jäähdytyskohde Rakennus 28 000 m ³					
	Kompr.		SE-abs.j.		SE/DL-abs.j.		Kompr.		SE-abs.j.		SE/DL-abs.j.	
	Inv.	Kyl.en	Inv.	kyl.en	Inv.	kyl.en	Inv.	kyl.en	Inv.	Kyl.en	Inv.	kyl.en
Kyl.en.h. samat	100	100	106	100	49	100	100	100	128	100	87	100
Kl.hinta – 50 %	100	100	106	84	49	78	100	100	128	93	87	89
Kl.hinta – 50 %, Kyl.en.h. samat	100	100	168	100	131	100	100	100	159	100	133	100

Talviaikana putkisto ei kuitenkaan saa päästä jäätymään. Verkoston rakentamiskustannukset ovat samaa luokkaa kuin vastaavan kaukolämpöverkon rakentamisen. Kylmävarasto voidaan tehdä keskitetysti tuotantoyksikön viereen tai kiinteistökohtaisesti kuten hajautetussa järjestelmässä. Kuvassa 20 esitetään taloliittymän siirtämä lämpöteho eri jäähdytyksillä putkikoon mukaan, jos taloliittymän kokonaispainehäviö saa olla enintään 100 kPa. Kuvan mukaan esim. 15 °C:n jäähdytyksellä päästään DN 125:n putkella 1250 kW:n kaukolämpötehoon, jolloin voidaan saavuttaa absorptiojäähdyttimellä noin 850 kW:n maksimi kylmäteho. Jos kylmän jakelulämpötila nostettaisiin 10/15 °C:seen, SE-absorptiokoneen COP nousisi noin 5 %. Ym. 1250 kW:n kaukolämpöteholla saataisiin silloin noin 920 kW:n kylmäteho.

Jäävesijärjestelmässä jäävaraston lämpötila on noin 0 °C. Jään ja veden tiheys ero on noin 10 %, joten jääveden pumppaustarve on lähes sama kuin veden. Jos jäähdytyksen meno/paluueden lämpötilat ovat esimerkiksi 7/13 °C, veden jäähdytysvaikutus on noin 30 kJ/kg ja 20 %:n jähilepitoisuudella noin 144 kJ/kg. Jähilejärjestelmässä putkiston halkaisijat voidaan mitoittaa noin 30 % pienemmiksi kuin vesijärjestelmässä. Toisaalta jähilejärjestelmässä pumpun nostokorkeus mitoitetaan noin 10 % suuremmaksi. Maksimi jähilepitoisuus on 40 %, koska isommilla pitoisuuksilla pumpun juoksupyörä alkaa luistaa ja pumppu menettää tehoaan.



Kuva 20. Kaukolämpöliittymän siirtämä lämpöteho putkikoon ja jäähdytyksen mukaan.

Keskitetyn ja hajautetun jäähdytysenergian tuotannon etuja ovat mm.:

Keskitetty

- Suuri yksikkökoko
- Vähemmän huollettavia yksiköitä
- Ei kiinteistökohtaisia jäähdytystorneja
- Kylmäkonetilan säästö kiinteistöissä
- Voidaan hyödyntää osittain olemassa olevaa kaukolämpöverkkoa

Hajautettu

- Ei kylmän jakeluverkostoa
- Häiriötilanteet rajattuja
- Pienempi pumppaustarve
- Voidaan hyödyntää olemassa olevaa kl-verkkoa

Absorptiotekniikalla toteutetun jäähdytyksen yhteinen etu kompressorijäähdytykseen (COP=4,0) verrattuna on sähköenergian säästö ja sähkön lisätuotannon mahdollisuus lämmitysvoimalaitoksessa. Vastapainelaitoksessa ($r=0,5$) 1 MW:n kylmätehon tuottaminen kuluttajalle absorptiotekniikalla (COP=0,7) tuottaa noin 1 MW lisää myytävää sähkötehoa ja lämpöä tuottavassa kombilaitoksessa ($r=1,0$) noin 1,7 MW. Molempien jäähdytysenergian tuotantotapavaihtoehtojen kannattavuus täytyy laskea kuitenkin tapauskohtaisesti, sillä paikalliset olosuhteet voivat vaikuttaa kannattavuuteen suurestikin.

Absorptiojäähdytyskoneistojen kehitykseen on panostettu viime vuosina paljon ja tekniikan sovellukset kaukolämpökäyttöön kehittyvät koko ajan. Odotettavissa on merkittäviä parannuksia hyötysuhteissa, laitteiden koossa ja toimintalämpötiloissa sekä tehollisessa hinnassa.

Laajempaa kaukolämpökäyttöä ajatellen voidaan absorptiokoneen kehitystavoitteiksi listata :

- Kylmäkertoimen nosto
- Koneiston koon ja painon pienentäminen esim. levylämmönsiirtimien avulla
- Primäärienergian (kaukolämpö) lämpötila minimissään alle 80 °C
- Riittävä kaukolämmön jäähdytys, vähintään 25 °C ja tavoite 50 °C
- Kylmäkoneen lauhdelämmön jäähdytysaineena voitaisiin käyttää kaukolämmön paluuvettä tai lauhdelämmölle löydetään hyötykäyttöä tuotantokohteessa
- Käytön aikana säädettävä tai säätyvä työaineparin konsentraatio
- Nykyisiin verrattuna tehokkaamman, ympäristöystävällisen ja alhaisia lämpötiloja kestävä työaineparin kehittäminen, joka ei aiheuta korroosiota esim. hiiliteräkselle.

Toisaalta ajateltaessa laajempaa kaukolämpöön perustuvaa absorptiojäähdytyksen käyttöä kaukolämpötekniikan kehitystavoitteeksi pitäisi asettaa paluulämpötilan pudottaminen 25 – 28 °C:seen.

Keskitetyn kaukokylmäjärjestelmän yleistyminen vaatii vielä tehokkaan, luotettavan ja edullisen jakelujärjestelmän kehittämisen.

7. YHTEENVETO

Tässä projektissa tutkittiin absorptiojäähdystekniikan ja erityisesti uudemman 2-vaiheisen absorptiojäähdystekniikan soveltuvuutta suomalaiseen kaukolämpöjärjestelmään.

Euroopassa tunnetaan erityisesti mielenkiintoa absorptiojäähdystekniikkaan, koska siinä voidaan hyödyntää jo rakennettua kaukolämpöverkkoa. Kaukojäähdytyksellä saadaan kaukolämpöverkkoon kulutusta juuri kesäaikaan, jolloin verkon käyttöaste on muuten alhainen. Kaukolämmitys- ja jäähdytys yhdistettynä lämmön ja sähkön yhteistuotantoon sekä lämmön ja kylmän varastointiin antavat uusia mahdollisuuksia energijärjestelmän kokonaisvaltaisen käytön suunnitteluun. Absorptiojäähdytin on lisäksi ympäristöystävällinen vaihtoehto.

Kaukolämpökäyttöisenä käyttökelpoiset absorptiojäähdyttimet ovat single-effect (SE) l. yksivaiheinen tai single-effect/double-lift (SE/DL) l. yksivaiheinen/kaksiportainen. Nimet kuvaavat prosessien toimintaa. SE-prosessi koostuu keittimestä, lauhduttimesta, matalapainehöyrystimestä ja imeyttimestä. Keittimessä työaineparin höyrystyvä komponentti kiehutetaan erilleen ja lauhduttimessa höyry tiivistyy nesteeksi. Neste johdetaan matalapainehöyrystimeen ja syntyvä höyry imeyttimeen, jossa työaineparin komponentit yhdistetään ja muodostuu laimea liuos. Imeyttimestä laimea liuos johdetaan uudelleen keittimeen. Keittimestä työaineparin väkevöitynyt komponentti johdetaan suoraan imeyttimeen. Matalapainehöyrystin saa lämpöenergiansa jäähdytettävästä kohteesta. SE/DL-prosessissa on lisätty SE-prosessiin sarjaan samaan paineeseen ensimmäisen keittimen ja imeyttimeen kanssa toinen keitin ja imeytin, jotka toimivat alemmassa lämpötilassa. Prosessiin on lisätty myös kolmas keitin ja imeytin prosessin alemmalle paine- ja lämpötilatasolle. Järjestelyllä voidaan hyödyntää matalalämpötilaisempia lämmön lähteitä ja saadaan lämpötilaputous suuremmaksi.

Työainepareina käytetään vesi-litiumbromidi ($H_2O-LiBr$) ja ammoniakki-vesi (NH_3-H_2O) -pareja. Työaineparin yhdistämisellä imeyttimeessä saadaan vesi luovuttamaan lämpöä lauhdutuspiiriin. Keittimessä ainepari erotetaan toisistaan ulkoisen lämmönlähteen avulla. Keitin, liuoksen siirtopumppu ja imeytin vastaavat kompressorijäähdyttimen kompressoria.

SE-absorptiojäähdyttimiä on käytetty maailmalla jo pitkään. Uudesta kaukolämpöä lämmön lähteenä käytävästä sovelluksesta sen sijaan on vain muutamia esimerkkejä Euroopassa. Suomessa ensimmäinen kaukolämpökäyttöinen SE-absorptiojäähdytin otettiin käyttöön Helsingin Pitäjänmäellä keväällä 1998. Saksassa on panostettu SE/DL-absorptiotekniikan tutkimukseen. Koekohteena on rakennettu Berliiniin 400 kW:n pilottilaite vuonna 1996 ja Düsseldorfin 300 kW:n pilottilaite vuonna 1997, joten käyttökokemukset eivät ole vielä kovin pitkältä ajalta. Täysin kaupallisin perustein on toteutettu vuonna 1997 Münchenin lentokentällä 2,5 MW:n koneisto, joka käyttää dieselin prosessilämpöä.

VTT Energiassa tutkittiin sekä SE- että SE/DL-absorptiojäähdyttimien toimintaa Aspen PlusTM -simulointiohjelmistolla. Simulointien mukaan SE-jäähdyttimen COP laskee nopeasti alle 80 °C kaukolämpöveden lämpötilalla ja yli 30 °C:n jäähdytysveden tulolämpötilalla. Kylmän veden menolämpötila on normaalisti mitoitettu +7 °C:seen. Jos menolämpötilaa nostettaisiin +10 °C, nousisi SE-jäähdyttimen COP noin 5 %. SE/DL-jäähdyttimen COP ei ole niin herkkä parametrien muutoksille, jos jäähdytintä voidaan käyttää sekä SE- että SE/DL-moodissa.

Jäähdytys voidaan tehdä sekä kompressor- että absorptiokoneistolla kiinteistökohtaisesti tai keskitetysti, jolloin jäähdytysenergia jaetaan rakennuksiin kylmäverkon avulla. Pienet kompressorijäähdyttimet ovat edullisempia kuin vastaavan tehoiset absorptiojäähdyttimet. 500 kW:sta ylöspäin hintaero kaventuu ja yli 1 MW:n jäähdytysteholla absorptiokoneisto saattaa olla jo edullisempi kuin vastaava kompressorikoneisto. Kylmäkoneen mitoituksessa on aina otettava huomioon kylmävaraston käyttö kuorman tasaajana. Kylmäkoneen mitoitusstehoa voidaan silloin pienentää ja koneen huipunkäyttöaika kasvaa. Suomessa kiinteistöjen jäähdytyksen huipun käyttöaika on tyypillisesti 500 – 700 tuntia vuodessa.

Kahden erikokoisen rakennustilavuuden jäähdytyskustannuksia arvioitiin esimerkkilaskelmalla, jossa kylmän tarpeen huipunkäyttöajat ovat yhtäsuuret. Nykyisellä sähkön ja kaukolämmön keskihintatasolla single-effect (SE) -absorptiojäähdytin saisi maksaa 6 – 28 % enemmän ja single-effect/double-lift (SE/DL) 50 % vähemmän kuin perinteinen kompressorijäähdytys, jotta kylmäenergian hinnat olisivat samat. Jos SE/DL-jäähdytintä voidaan ajaa myös SE-tilassa, hintaero kompressorijäähdytimeen verrattuna pienenee. Jos kaukolämmön hinta jäähdytyskaudella on puolet talven keskihinnasta ja kylmäenergian hinnat haluttaisiin kaikilla jäähdytystavoilla samoiksi, SE-absorptiojäähdytin saisi maksaa 59 – 68 % ja SE/DL 31 – 33 % enemmän kuin kompressorijäähdytin.

Absorptiotekniikalla toteutetun jäähdytyksen yhteinen etu kompressorijäähdytykseen (COP=4,0) verrattuna on sähköenergian kulutuksen säästö ja sähkön lisätuotannon mahdollisuus lämmitysvoimalaitoksessa. Vastapainelaitoksessa (r=0,5) 1 MW kylmätehon tuottaminen kuluttajalle absorptiotekniikalla (COP=0,7) tuottaa noin 1 MW lisää myytävää sähkötehoa ja lämpöä tuottavassa kombilaitoksessa (r=1,0) noin 1,7 MW.

Absorptiojäähdytyskoneistojen kehityksessä on odotettavissa merkittäviä parannuksia hyötysuhteissa, laitteiden koossa ja lämpötiloissa sekä tehollisessa hinnassa. Laajempaa kaukolämpökäyttöä ajatellen voidaan absorptiokoneen kehitystavoitteiksi listata :

- Kylmäkertoimen nosto
- Koneiston koon ja painon pienentäminen esim. levylämmönsiirtimien avulla
- Primäärienergian (kaukolämpö) lämpötila minimissään alle 80 °C
- Riittävä kaukolämmön jäähdytys, vähintään 25 °C ja tavoite 50 °C
- Kylmäkoneen lauhdelämmön jäähdytysaineena voitaisiin käyttää kaukolämmön paluuvettä tai lauhdelämmölle löydetään hyötykäyttöä tuotantokohteessa
- Käytön aikana säädettävä tai säätökykyinen työaineparin konsentraatio

- Nykyisiin verrattuna tehokkaamman, ympäristöystävällisen ja alhaisia lämpötiloja kestävä työaineparin kehittäminen, joka ei aiheuta korroosiota esim. hiiliteräkselle tai kuparille.

Laajempaa kaukolämpöön perustuvan absorptiojäähdytyksen käyttöä ajatellen kaukolämpötekniikan kehitystavoitteeksi pitäisi asettaa paluulämpötilan pudottaminen 25 – 28 °C:seen, jolloin paluuvettä voitaisiin käyttää kylmäkoneiden lauhduttimien jäähdytykseen.

LÄHDELUETTELO

-
1. Aittomäki, A. Absorption Heat Pumps. Esitetty seminaarissa: Fjärrvärme-programmets Seminar "District Cooling", Espoo 4. 11.1996. TKK, Energiatekniikan ja ympäristösuojelun laboratorio.
 2. Perry's Chemical Engineers' Handbook, sixth edition. McGraw – Hill Book Company, 1984. S. 12 - 39 – 12 - 47.
 3. Käsmä, V. Jäähdytys kaukolämpöverkolla. Tampere: Tampereen Teknillinen korkeakoulu, 1996. 110 s. + 1 liite.
 4. Herold, K.E., Radermacher, R., Klein, S. Absorption Chillers and Heat Pumps. New York: CRC Press, Inc. 1996. 286 s.
 5. Anon. Zae Bayern, Tätigkeitsbericht 1996. Würzburg: Zae Bayern 1997. 99 s.