

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT Kemia
Prosessitekniiikan laboratorio
BJ10A0101 Kandidaatintyö ja seminaari

TEOLLISUUDEN JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT
Case: Kaasunerotuslaitteiston evaluointi

Tekijä:
Työn ohjaajat:

Henri Pitkänen
Eero Kolehmainen, LUT Kemia
Henna Lehtonen, L&T Recoil Oy

27.4.2011

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikka

Henri Pitkänen

Teollisuuden jäähdytysjärjestelmät Case: kaasunpoistolaitteiston evaluointi

Kandidaattityö, 2011

54 sivua, 26 kuvaa, 3 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: TkT Eero Kolehmainen, LUT Kemia
DI Henna Lehtonen, L&T Recoil Oy

Hakusanat: jäähdytysjärjestelmä, jäähdytystorni, läpivirtausjärjestelmä, kaasunpoisto, kaasunerotus, alipaine kaasunpoistin

Teollisuuden jäähdytysjärjestelmiä tarvitaan prosessien lämpötilan ja paineen hallitsemiseen. Vesi on käytetyin lämmönsiirtoaine hyvän saatavuutensa, halvan hinnan ja korkean lämmönsiirtokyvyn ansiosta. Jäähdytysjärjestelmät jaetaan kolmeen päätyyppiin, joita ovat läpivirtausjäähdytys, suljettu ja avoin kiertojäähdytys. Kullakin järjestelmätyypillä on tyypilliset alatyypinsä. Avoimella kiertojärjestelmällä on eniten alatyyppejä, joista yleisin on jäähdytystorni. Jäähdytystorneja on kolmea tyyppiä: märkä-, kuiva ja hybriditorni. Kullakin järjestelmätyypillä on ominaiset piirteensä käyttökohteiden, ympäristövaikutusten, ohjattavuuden, investointi- ja käyttökulujen suhteen, joita tässä työssä esitellään.

Työssä tutkitaan teollisuuden jäähdytysjärjestelmien esittelyn lisäksi erään alipaine kaasunpoistimen soveltuvuutta suljetun kiertojäähdytysjärjestelmän kaasunpoistoon. Suljettuun kiertojäähdytysjärjestelmään jää ilmaa täyttövaiheessa ja kulkeutuu liuenneena käytettävän jäähdytysveden mukana. Muodostuva ylikylläinen seos synnyttää veden sekaan ilmakuplia, jotka aiheuttavat korroosiota kemiallisesti ja kuluttamalla. Lisäksi kaasukuplat vievät tilavuutta nesteeltä. Tämä pienentää järjestelmän jäähdytystehoa merkittävästi, koska kaasun lämmönsiirtokyky verrattuna veden lämmönsiirtokykyyn on pieni. Työssä esitellään myös muita mahdollisia suljetun järjestelmän kaasulähteitä ja niiden aiheuttamia ongelmia.

Alipaine kaasunpoistimen kaasunerotustehokkuutta mitattiin jäähdytysvesinäytteiden selkeytymisnopeudella ja lämmönsiirtimien tehon paranemisella. Kahden viikon tarkastelujaksolla selkeytymisajat paranivat 36–60 % eri mittauspaikoissa ja lämmönsiirtimien tehot paranivat 6–29 %. Järjestelmään kuitenkin jäi merkittävä määrä kaasua, vaikka laitteen käyttöä jatkettiin tarkastelujakson jälkeen, joten tavoitteisiin ei päästy. Tutkitun alipaine kaasunpoistolaitteen ei todettu soveltuvan tehdasympäristöön kestävämmyyden, hankalakäyttöisyyden ja tehottomuuden takia. Tulokset kuitenkin osoittavat, että kaasunerotuksella on merkittävä vaikutus suljetun jäähdytysjärjestelmän toimivuuteen ja saavutettavaan jäähdytystehoon.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Chemical Technology

Henri Pitkänen

Cooling systems in industry Case: evaluation of a deaeration device

Bachelor's thesis, 2011

54 pages, 26 pictures, 3 tables and 4 appendices

Examiners: D.Sc (Tech) Eero Kolehmainen, LUT Kemia
M.Sc. (Tech) Henna Lehtonen, L&T Recoil Ltd.

Keywords: cooling, tower, once-through, recirculating, deaeration

Cooling water systems in industry are needed for controlling temperature and pressure of processes. Water is the most common heat transfer medium because of its good availability, low price and high heat capacity. Cooling water systems are divided to three main groups which are once-through systems, closed and open recirculating systems. Each system type has typical subtypes. The open recirculating system has more subtypes than other systems. Each cooling water systems have specific characteristics of usability, nature impact, controllability, investment and operating costs. These characteristics are presented in this thesis.

In addition to above mentioned this thesis examines one vacuum deaeration device and its suitability for removing gas from closed recirculating cooling system in industrial environment. Gases, mainly air, remains in the systems in some level when the closed recirculating systems is filled. Makeup water contains also diluted air. Free and diluted air is mixed with cooling water and formation of over-saturated water takes place. This causes corrosion in two different ways. Firstly the chemical corrosion occurs when oxygen is reacting mainly with iron and copper parts of piping system. Secondly micro bubbles rub especially curve part of the piping causing erosion. Effects of corrosion can be seen as elements of rust particles in cooling medium and at worst case as a pipe leakage. Gas also takes a part of cooling water volume which decreases the cooling capacity of the system.

The gas separation efficiency of vacuum deaeration device was measured by two parameters which were the clarification of cooling water and the cooling capacity of heat exchanger. After a two-week testing period clarification times in different sampling locations improved 30-60 %. The cooling capacity of heat exchangers improved 6-29 %. After the test period a large amount of free gas was still in the cooling system causing the problems mentioned before. The usage of deaeration device was continued after the test period without any further success. Therefore the conclusion is that the device is not suitable for gas removal of closed cooling water system in industrial environment. Results however clearly show the influence of high gas content to cooling capacity of cooling water.

Symboliluettelo

Q	lämpöteho, kW
A	lämmönsiirtopinta-ala, m ²
U	kokonaislämmönsiirtokerroin, kW/(m ² °C)
ΔT_{\ln}	logaritminen lämpötilaero, °C
T_i	jäähdytysvesivirran lämpötila, °C

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	3
2	LÄPIVIRTAUSJÄÄHDYTYS.....	5
	2.1 Suora läpivirtausjäähdytysjärjestelmä	5
	2.2 Epäsuora läpivirtausjäähdytysjärjestelmä.....	6
	2.3 Ominaispiirteet	6
	2.4 Käyttökohteet.....	7
	2.5 Ongelmat.....	7
	2.5.1 Vesilähteiden ominaisuudet	7
	2.5.2 Biologiset kasvustot	8
	2.5.3 Keskeiset ympäristövaikutukset	9
3	SULJETTU KIERTOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ.....	10
	3.1 Yksiosainen jäähdytyspiiri.....	10
	3.2 Kaksiosainen jäähdytyspiiri.....	11
	3.3 Käyttökohteet.....	12
	3.4 Ominaispiirteet	13
	3.5 Ongelmat.....	13
4	AVOIN KIERTOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ	14
	4.1 Ominaispiirteet	15
	4.2 Käyttökohteet.....	15
	4.3 Suihkutuslamppi	16
	4.4 Haihduttava kondensaattori	17
	4.5 Ongelmat.....	18
5	JÄÄHDYTYSTORNI	19
	5.1 Märkäjäähdytystornit.....	19
	5.1.1 Luonnollinen ilmavirtausmekanismi	20
	5.1.2 Koneellinen ilmavirtausmekanismi	22
	5.1.3 Yleisimmät ongelmat.....	25
	5.1.4 Märän jäähdytystornin suunnittelun perusta.....	25
	5.2 Kuivajäähdytystorni.....	26
	5.3 Hybridijäähdytystornit.....	26
6	JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN VALINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	29
	6.1 Energiatehokkuus	29
	6.2 Ympäristönäkökohdat.....	29
	6.3 Investointi- ja käyttökulut.....	30
7	KIRJALLISEN OSION YHTEENVETO	33
8	KOKEELLISEN OSION TYÖN TARKOITUS	34
	8.1 Työn taustaa.....	34
	8.2 Muiden potentiaalisten kaasulähteiden tarkastelu	35
	8.2.1 Vety H ₂	35
	8.2.2 Vetysulfidi H ₂ S.....	36
	8.2.3 Metaani CH ₄	36
	8.3 Reflex servitec 120gl kaasunpoistimen esittely ja toimintakuvaus	36
9	MITTAUSTEN SUORITUS JA KOELAITTEISTO.....	38
	9.1 Selkeytymiskokeet.....	38
	9.2 Selkeytymiskokeiden näytteenottopaikkojen valinta	39
	9.3 Turvallisuus näytteenotossa.....	40

9.4	Lämmönvaihdinten tehon selvittäminen.....	40
9.5	Tarkasteltavien lämmönvaihtimien valinta.....	41
10	MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY	42
11	TULOKSET.....	42
12	TULOSTEN TARKASTELU	45
12.1	Selkeytymiskokeet.....	46
12.2	Lämmönvaihtimien teho.....	47
12.3	Virhelähteet.....	49
13	KOKEELLISEN OSION JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMINTAEHDOTUS	50
14	LÄHTEET	52

1 JOHDANTO

Tämän tutkielman kirjallisen osion tarkoituksena on esitellä teollisuudessa käytettävien jäähdytysjärjestelmien päätyypit sekä niiden yleisimmät alatyypit. Lisäksi mainitaan lyhyesti eri järjestelmien käyttöä ei-teollisissa sovelluksissa. Kokeellisessa osiossa (kappaleesta 8 eteenpäin) puolestaan tutkitaan erään alipainekaasunpoistimen soveltuvuutta suljetun kiertojäähdytysjärjestelmän kaasunpoistoon. Lisäksi esitellään mahdollisia suljetun järjestelmän kaasulähteitä ja niiden aiheuttamia ongelmia.

Teolliset tuotantoprosessit tarvitsevat jäähdytysjärjestelmiä prosessien lämpötilan ja mahdollisesti paineen ylläpitämiseen. Merkittävimpiä jäähdytysjärjestelmien käyttäjiä ovat eri teollisuuden alat, esimerkiksi jalostamot, terästehtaat, petrokemian tehtaat, voimalaitokset, sellu- ja paperitehtaat sekä elintarviketehtaat. Jäähdytysjärjestelmän on tyydytettävä jäähdytystarve normaalin käynnin ajan lisäksi ylös- ja alasajotilanteissa, jotka määrittävät prosessin enimmäis- ja vähimmäisjäähdytyskapasiteetit. (EU-neuvosto 2000 ; Hoots et al. 2001).

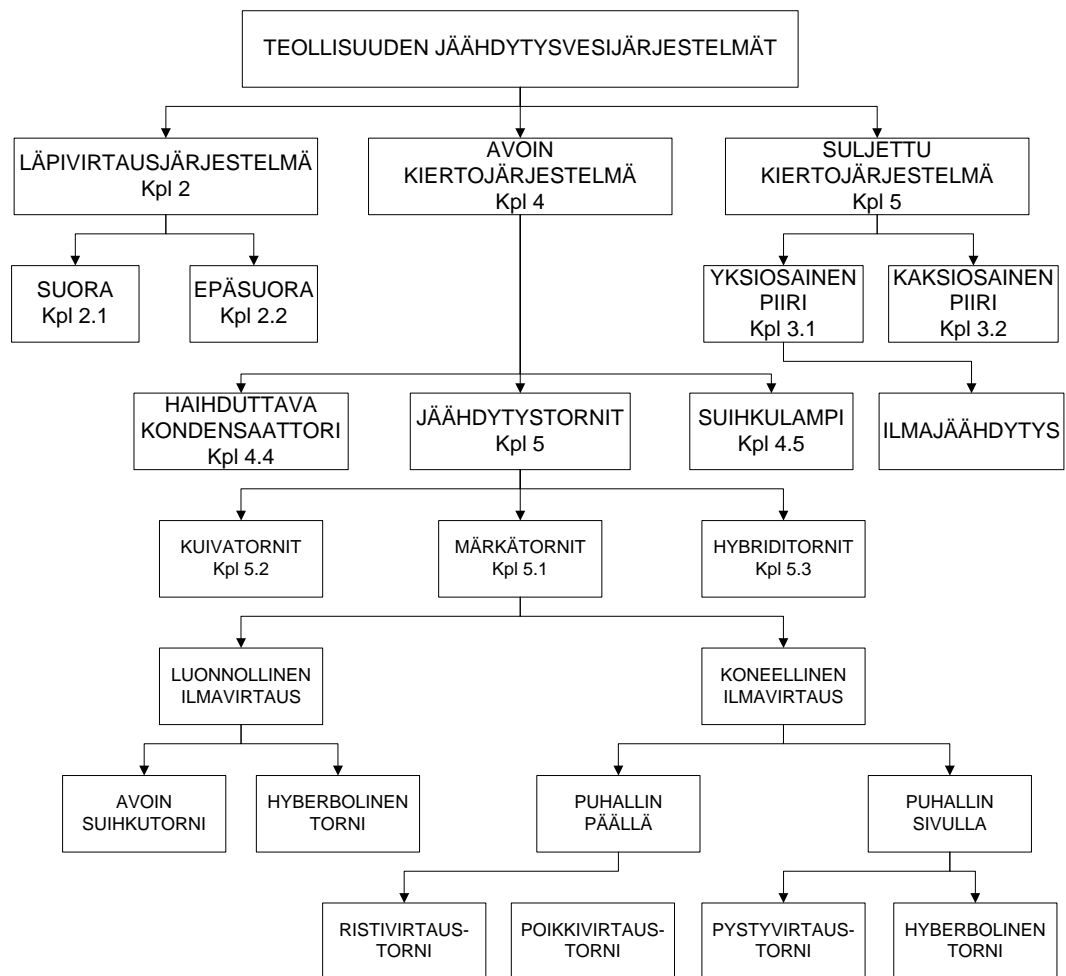
Kuuma, jäähdytettävä prosessivirta johdetaan lämmönvaihtimen läpi, jossa se luovuttaa lämpöä lämmönsiirtoaineelle. Prosessivirta jäähtyy ja lämmönsiirtoaine lämpenee. Vesi soveltuu hyvin ensisijaiseksi lämmönsiirtoaineeksi useimpiin jäähdytysjärjestelmiin hyvän saatavuutensa ja korkean ominaislämpökapasiteettinsa ansiosta. Jäähdytysjärjestelmästä riippuen lämmennyt vesi jäähdytetään tai korvataan uudella, viileämmällä vedellä. (Flynn 2009)

Sovelluksesta riippuen myös ilmaa käytetään ensisijaisena lämmönsiirtoaineena. Ilmajäähdytysjärjestelmä soveltuu esimerkiksi matalapainehöyryn kondensointiin, jossa ilmaa syötetään suoraan höyryn sekaan aikaansaaden lauhtumisen. Jäähdytysjärjestelmään syötettävän ilman ja ulos johdettavan jäähdytetyn virran lämpötilaero on minimissään 10–15 °C, joka asettaa selvät rajoitukset kyseisen järjestelmän käytettävyydelle. Useimpiin jäähdytysjärjestelmiin ilmajäähdytys ei ole riittävän tehokas, joten vettä käytetään ensisijaisena lämmönsiirtoaineena huomattavasti useammassa sovelluksessa. (Gougol et al. 2009)

Lämmönsiirtoaineena käytettävän veden jäähdytykseen on olemassa useita vaihtoehtoisia sovelluksia, joita tässä työssä tarkastellaan. Lisäksi esitellään muutamia ilmalla toimivia jäähdyttimiä. Esiteltävien järjestelmätyyppien lisäksi keskitytään avoimen piirin jäähdytysyksiköihin, joista jäähdytystorneja käsitellään laajimmin omassa kappaleessaan 5.

Teolliset jäähdytysjärjestelmät jaetaan rakenteensa ja toimintaperiaatteensa perusteella kolmeen luokkaan: läpivirtausjäähdytys, avoin ja suljettu kiertojäähdytys. Avoimissa kiertojäähdytysjärjestelmissä kiertovesi jäähdytetään pääasiassa haihtumisominaisuudella ilmaan, kun läpivirtausjärjestelmissä sekä suljetuissa järjestelmissä tätä ei voida hyväksikäyttää. (Flynn 2009)

Kuvaan 1 on koottu tässä työssä esiteltävien jäähdytysjärjestelmien päätyypit ja niiden alatyypit.



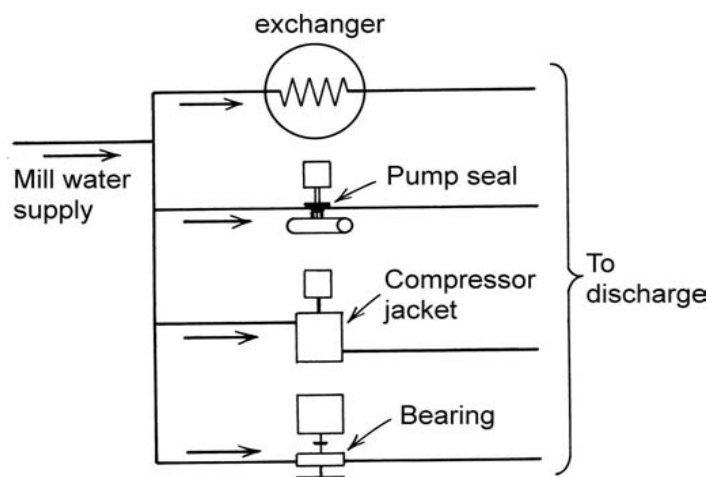
Kuva 1 Teollisuuden jäähdytysjärjestelmien pää- ja alatyypit.

2 LÄPIVIRTAUSJÄÄHDYTYS

Läpivirtausjäähdytyksessä vesi johdetaan jäähdytysjärjestelmän läpi ja sen jälkeen takaisin veden lähteeseen. Veden haihtumisominaisuutta ei käytetä hyväksi poistettaessa lämpöä järjestelmästä. Näin ollen lämmönsiirtokapasiteetti rajoittuu vedelle ominaiseen lämpökapasiteettiin, joka on $4.19 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$. Avoimissa kiertojäähdytysjärjestelmissä, jotka on esitelty kappaleessa 4, tapahtuu kiertoveden haihtumista, koska se on jatkuvassa kontaktissa ilman kanssa. Faasimuutos nesteestä kaasuksi kuluttaa energiaa noin $2300 \text{ kJ}/\text{kg}$. Tästä syystä avoimet järjestelmät voivat siirtää lämpöä 50–100 kertaa enemmän jokaista kiloa vettä kohden kuin läpivirtaus- ja suljetut järjestelmät. Tästä johtuen läpivirtausjärjestelmän tarvitsema vesimäärä on suuri. Läpivirtausjärjestelmät jaetaan suoraan ja epäsuoraan järjestelmään. (Flynn 2009)

2.1 Suora läpivirtausjäähdytysjärjestelmä

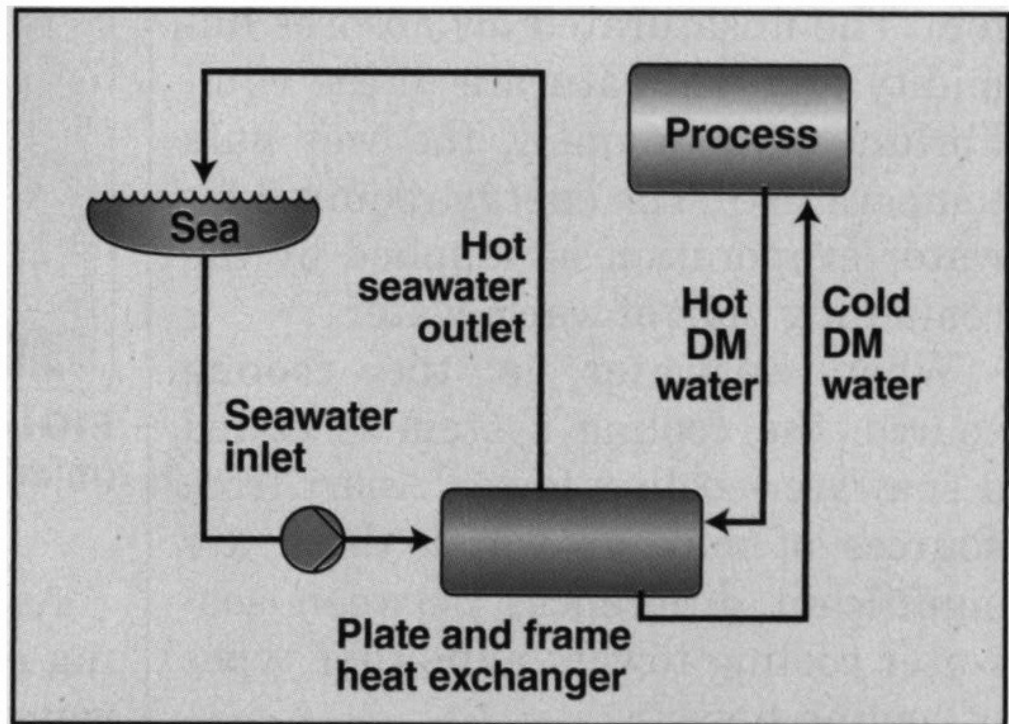
Suorassa läpivirtausjäähdytyksessä vesi johdetaan jäähdytettävien kohteiden läpi (lämmönvaihtimet, pumput, kompressorit, laakerit) ja palautetaan lähteeseen. Yksinkertaistettu kuva suorasta läpivirtausjärjestelmästä on esitelty alla kuvassa 2.



Kuva 2 Tyypillinen suora läpivirtausjäähdytys. Esimerkiksi järven pintavettä johdetaan lämmönvaihtimen läpi sekä pumppujen, kompressorien ja laakereiden jäähdytykseen. Läpivirranut vesi johdetaan takaisin järveen. (Flynn 2009)

2.2 Epäsuora läpivirtausjäähdytysjärjestelmä

Epäsuorassa läpivirtausjäähdytyksessä merivesi jäähdyttää suljetussa piirissä kiertävää suolatonta jäähdytysvettä, joka sitoo lämmön prosessivirroista. Epäsuorassa jäähdytysjärjestelmässä on vähemmän ongelmia verrattuna suoraan järjestelmään, joten sen käyttö on yleisempää. Kuvassa 3 on tyypillinen epäsuora läpivirtausjärjestelmä.



Kuva 3 Epäsuora läpivirtausjäähdytys. Prosessivirtojen jäähdytykseen käytetään suolatonta vettä (DM water). Suolaton vesi jäähdytetään merivedellä korroosionkestävällä lämmönvaihtimella. (Gougol et al. 2009)

2.3 Ominaispiirteet

Läpivirtausjäähdytysjärjestelmän käyttöalue teoreettisen jäähdytystehon suhteen on hyvin laaja. Erilaisten teollisten (ei voimalaitosten) jäähdytysjärjestelmien suoralla läpivirtausjäähdytyksellä (kuva 2) saavutettava prosessin jäähdytysteho on 0.1-2000 MW_{th} (lämpötehon yksikössä), kun vastaava lukema epäsuoralle järjestelmälle (kuva 3) on 0.1-1000 MW_{th}. Alin saavutettava lämpötilaero jäähdytysveden ja prosessiaineen välillä on ilmasto-oloista riippuen 3-10 °C. (EU-neuvosto 2000)

2.4 Käyttökohteet

Yleisimpiä sovelluskohteita läpivirtausjäähdytykselle ovat suuritehoiset tehtaot, joissa tarvitaan suurta jäähdytyskapasiteettia. Edellytyksenä on sijainti rannikkoalueella (lähellä vesilähdettä) sekä mahdollisuus laskea käytetty vesi pintavesistöön. (EU-neuvosto 2000).

Vesistöjen rasittamisen välttämiseksi voidaan läpivirtausjäähdytyksessä käytettyä vettä kierrättää laaja-alaisessa keinotekoisessa jäähdytyslammessa, jossa jäähtymistä tapahtuu haihtumalla ja lämpöhäviöillä luontoon. Haihtuva vesi korvataan esimerkiksi jokivedellä. Jäähdytyslampia käytetään alueilla, joissa on runsaasti joutomaata käytettäväksi. (Flynn 2009) Esimerkiksi Siilinjärven apatiittikaivoksen yhteydessä oleva kemiantehdaskompleksi käyttää hyväkseen jäähdytyslampia läpivirtausjäähdytyksissään.

2.5 Ongelmat

Läpivirtausjäähdytyksen suurimmat ongelmat liittyvät käytettävän jäähdytysveden lähteen ominaisuuksiin, biologisiin kasvustoihin ja järjestelmän ympäristövaikutuksiin. Vesilähteen ominaisuuksien ja biologisten kasvustojen vaikutukset läpivirtausjärjestelmään ovat ominaiset suuren läpivirtausmäärän takia. Näiden vaikutusten hallitsemiseksi käytetään fysikaalisia ja kemiallisia menetelmiä, jotka puolestaan vaikuttavat ympäristön ekologiseen tasapainoon monella tavalla. Samoin lähteeseen palautuvan veden korkeampi lämpötila aiheuttaa vesistössä muutoksia.

2.5.1 Vesilähteiden ominaisuudet

Jäähdytykseen käytettävä vesi saadaan pohja- tai pintavedestä. Maanalaiseen pohjaveteen on yleensä liuennut enemmän mineraaleja kuin pintavesiin, ollessaan pitkään kontaktissa kallion eri mineraalikerrosten kanssa (Isoaho 1988). Paikoitain pohjaveteen voi olla liunneena korroosiota aiheuttavia suoloja, kuten sulfaatteja ja klorideja sekä kaasuja, kuten hiilidioksidia ja rikkivetyä. Pohjavedessä voi olla myös korkeat pitoisuudet kalsiumia, magnesiumia ja silikaatteja, jotka aiheuttava kalkkeutumista esimerkiksi lämmönvaihtimiin heikentäen lämmönsiirtote-

hokkuutta. Pohjavesissä esiintyvät rauta- ja mangaani-ionit voivat hapettuessaan konsentroitua jäähdytysjärjestelmään aiheuttaen tukoksia ja korroosion kiihtymistä. (Flynn 2009)

Pintavettä saadaan järvistä, joista, meristä sekä murtovesistä (esimerkiksi Itämeri). Pintaveden laatuun vaikuttavat tekijät ovat moninaisemmat kuin pohjaveden laatuun, kuten sadevesien laatu, valunnan mukana tuomat kemikaalit, erilaiset jätevedet ja vesistöjen biologinen toiminta.

Suomen järville on ominaista korkea humuspitoisuus (kolloidiset kiintoaineet) ja sameus (savimineraalit). Nämä tekijät luovat haasteita järvipintaveden käyttöön teollisuuden jäähdytysvetenä. Kiintoaineet ja samea vesi tukkivat herkästi jäähdytysvesijärjestelmän. Näin ollen kiintoaineiden ja sameuden poistaminen on tärkeää tehokkaan ja toimivan jäähdytyksen aikaansaamiseksi. Toimivan puhdistusjärjestelmän suunnitteleminen on haastavaa, sillä kiintoaineen ja sameuden määrä vaihtelevat vuodenaikojen ja ilmasto-olojen mukaan. (Flynn 2009; Isoaho 1988)

Meri- ja murtovesi sisältävät järvi- ja jokivettä enemmän liuenneita suoloja, pääasiassa natriumsuolaa, joka korkeassa pitoisuudessa aiheuttaa korroosioriskin etenkin lämmönvaihtimille (korkea lämpötila). Tästä syystä meri- tai murtovettä käyttävien järjestelmien lämmönvaihtimet ja lauhduttimet tulee rakentaa korroosiokestävistä materiaaleista, kuten alumiinista tai titaanista. Putkilinjoille usein riittää päällystäminen korroosion kestäväällä materiaalilla, koska niihin kohdistuva rasitus on lämmönvaihtimia ja lauhduttimia pienempää. Meriveden käyttöä suositetaan aina kun se on mahdollista, koska sen laatutekijät (kemialliset ja fysikaaliset) pysyvät likipitäen vakiona ympäri vuoden. (Flynn 2009 ; Gougol et al. 2009)

2.5.2 Biologiset kasvustot

Läpivirtausjärjestelmissä voi ilmetä biologisia kasvustoja riippumatta käytetystä vesilähteestä. Pohjavesien anaerobiset bakteerikasvustot aiheuttavat paikalliskorroosiota soluhengityksessään tuottamallaan korrosoivilla kaasulla (Flynn 2009).

Lämpimissä pintavesissä elävät pieneliöt voivat kiinnittyä ja kerrostua jäähdytysvesijärjestelmän putkistoihin ja lämmönvaihtimiin. Tätä kutsutaan biologiseksi fouling-ilmiöksi. Luonnonolosuhteisiin verrattuna jäähdytysvesijärjestelmän olosuhteet ovat hyvin suotuisat eliöiden kiinnittymiselle ja lisääntymiselle. Ravinnon saanti on helppoa virtaavassa vedessä. Kohonnut lämpötila puolestaan pidentää eliöiden lisääntymiskautta. Suomen oloissa yleisimpiä biologisen fouling-ilmiön pieneliöitä ovat merirokko, sinisimpukka, kaspianpolyyyppi sekä tuoreimpana tulokkaana vaeltajasimpukka ja valekirjosimpukka. Näiden eliöiden lisääntyminen jäähdytysjärjestelmässä kuluttavat pumppuja, syövyttävät materiaaleja, lisäävät kitkapainehäviöitä ja pahimmillaan tukkivat putkilinjoja ja lämmönvaihtimia aiheuttaen vaaratilanteita prosessin jäähdytystehon heikentyessä. (Raita 2006 ; Hammo 1994)

Biologisen fouling-ilmiön torjuntaan on kehitetty monia ennaltaehkäiseviä menetelmiä, kuten erilaiset suodatusmenetelmät, ultraviolettisäteilyn sekä hapettavien ja ei-hapettavien kemikaalien käyttö. Jossain määrin myös putkistojen maalaamista myrkköseoksilla ja elektrolyyttistä suojausta on käytetty. Jälkikäteen toteutettavalla (reaktiivisella) torjunnalla pyritään tuhoamaan jo pinnoille kiinnittynyt eliöstö määrääjain, jolloin eliöstö ei ehdi aiheuttamaan tuhoja. Tähän soveltuvia torjuntamenetelmiä ovat lämpökäsittely, mekaaninen puhdistus, kuivattaminen, hapen poisto sekä hapettavien ja ei-hapettavien kemikaalien käyttö. (Raita 2006)

2.5.3 Keskeiset ympäristövaikutukset

Jäähdytykseen käytettävän veden mukana kulkeutuu järjestelmään vesistön pieneläimiä, jotka tuhoutuvat kiertopumppujen koneistoissa ja lämmönvaihtimissa tai vaihtoehtoisesti biofouling-torjunnassa. Suuremmat eliöt, kuten kalat, voivat jäädä loukkuun imulinjojen verkkosuodattimiin. Biofouling-torjunnassa käytetyt kemikaalit, kuten hypokloriitit, kuormittavat vesistöjä. (EPA 2008)

Vesistöön palautuva lämmennyt jäähdytysvesi heikentää pohjaeliöstön elinoloja, kun kasvien kasvukausi pitenee ja happea kuluttavan biomassan osuus vesistöjen pohjakerroksissa lisääntyy aiheuttaen happipitoisuuden laskun. (Kirkkala & Turkki 2005).

Läpivirtausjärjestelmien ympäristövaikutusten takia niiden määrä maailmalla on vähenemässä. Esimerkiksi Kalifornian rannikkoalueiden tehdaskompleksien läpivirtausjärjestelmien käyttöä ollaan rajoittamassa ja tehostamassa lakiteitse. (CEPA 2010)

3 SULJETTU KIERTOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ

Suljettu kiertojäähdytysjärjestelmä kehittyi suunniteltaessa ensimmäisiä moottori-jäähdytysjärjestelmiä. Suljetussa järjestelmässä vesi tai veden ja jäätymisenestoaineen (esim. glykoli) seos kiertää piirissä vuorotellen jäähtyen ja lämmeten olematta kontaktissa ympäröivään ilmaan. Suljetut järjestelmät jaetaan yksinosaisiin ja kaksiosaisiin järjestelmiin riippuen siitä, miten prosessivirtaa jäähdyttävä lämmönsiirtoaine jäähdytetään. (GE Water 2007)

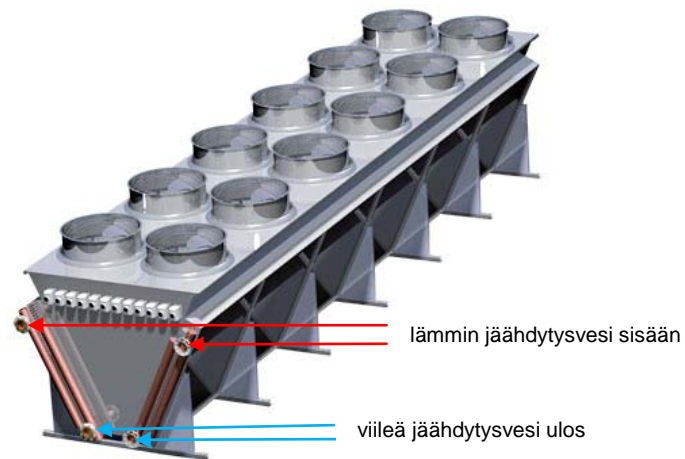
Tähän järjestelmätyyppiin luetaan myös ilman lämmönsiirtoainetta toteutettu täysin kuiva suora ilmajäähdytysjärjestelmä. Tällöin putkistoja tai kierukoita, joissa prosessivirta kulkee, jäähdytetään suoraan ilmalla puhaltimien avulla, eikä erillistä jäähdytyspiiriä tarvita. Nämä järjestelmät vaativat runsaasti tilaa etenkin puhuttaessa suuritehoisista järjestelmistä ja ovat täten rakennusteknisesti haastavia. Ne soveltuvat sellaisten prosessivirtojen jäähdyttämiseen, joiden tavoitelämpötila on ympäröivää ilmastoa korkeampi. (Bloemkolk et al. 1996)

3.1 Yksiosainen jäähdytyspiiri

Yksiosaista jäähdytyspiiriä voidaan käyttää laaja-alaisesti eri tehoisissa jäähdytysjärjestelmissä. Yleisimmin niitä kuitenkin käytetään alle 100 MW_{th} tehoisissa järjestelmissä. Suljetussa piirissä on epäsuora ilmajäähdytys. Siinä lämmönsiirtoaine jäähdytetään jäähdytysyksiköissä putkissa tai kierukoissa ohi virtaavalla ilmalla. Tällöin sekundaaripiiriä ei tarvita. Tällaisia sovelluksia on olemassa sekä märkiä, että kuivia. Märissä järjestelmissä jäähdytystehoa lisätään suihkuttamalla putkien tai kierukoiden pintaan lämpöä sitovaa vettä, jonka ilmavirta haihduttaa. Kuivissa järjestelmissä putkia tai kierukoita jäähdytetään pelkällä ilmavirralla. Molemmissa

tapauksissa kierukat voidaan varustaa jäähdytysrivoin, jolloin jäähdyttävä pinta-ala ja jäähdytysteho lisääntyvät. (EU-neuvosto 2000)

Kuvassa 4 on esitetty eräs suljetun piirin ilmajäädytin, joka toimii sekä kuiva-, että märkätekniikalla, riippuen käytetäänkö kennoston sumutusvettä. Kullakin ilmajäädyttimellä on kokoonsa perustuva maksimijäähdysteho. Jäähdytystehoa säädelään tuulettimen pyörimisnopeudella eli ilman virtausnopeudella. Tehon lisäys tapahtuu asentamalla useampia jäähdytysyksiköjä rinnakkain tai sarjaan jäähdytyskapasiteetin tarpeesta riippuen. (Alfa Laval 2003)

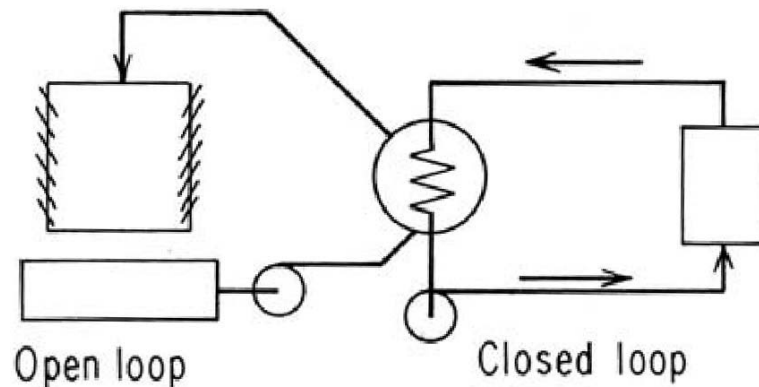


Kuva 4 Alfa Lavalin Fincoil ilmajäädytin. Jäähdytettävä kiertovesi syötetään kupariputkiston yläosaan, josta vesi jakautuu ohueksi filmiksi kennostoon. Kennoston läpi virrannut viileä kiertovesi poistetaan putkiston alaosasta.

L&T Recoil Oy:n käytetyn voiteluöljyn regenerointiprosessin jäähdytys hoidetaan yksiosaisella ilmajäädytyspiirillä. Kokeellisessa osiossa tutkitaan kyseisen jäähdytyspiirin kaasunpoiston yhteyttä lämmönsiirtotehokkuuteen.

3.2 Kaksiosainen jäähdytyspiiri

Kaksiosaista jäähdytyspiiriä (kuva 5) käytetään yleensä suuritehoisissa jäähdytysjärjestelmissä (yli 100 MW_{th}), joissa suljettu järjestelmä toimii primääripiirinä sitoen prosessivirran lämmön lämmönsiirtoaineeseen. Lämmönsiirtoaine luovuttaa sitomansa lämmön lämmönvaihtimella sekundaaripiiriin, joka on yleisesti, kappaleessa 4 esitellyn, avoimen järjestelmän mukainen. (EU-neuvosto 2000 ; Flynn 2009)



Kuva 5 Kaksinkertainen jäähdytyspiiri. Oikean puoleinen, primäärinen suljettu piiri jäähdyttää prosessivirran. Suljettu piiri jäähdytetään kuvan mukaisessa tapauksessa sekundaarisella avoimella järjestelmällä, jossa on jäähdytystorni. (Flynn 2009)

3.3 Käyttökohteet

Suljettuja jäähdytysjärjestelmätyyppejä on kehitetty vastaamaan hyvinkin erilaisien sovellusten jäähdyttämisestä. Näihin sovelluksiin lukeutuu normaalien teollisuuden prosessi- ja voimalaitosjäähdytysjärjestelmien lisäksi kaasumoottoreiden ja kompressorien jäähdytys, auton moottorin jäähdytys sekä kiinteistöjen jäähdytys ja lämmitys. (GE Water 2007)

Alla on esitetty kriteereitä, joiden perusteella suljettu jäähdytysjärjestelmä voidaan valita avoimen järjestelmän sijaan:

- Jäähdytettävä prosessi on lämpötilan suhteen kriittinen ja vaatii tarkkaa lämpötilan säätöä. (Herro & Port 1993)
- Korkealuokkaista ohjausta vaaditaan muusta syystä. (GE Water 2007)
- Jäähdytettävä prosessi on erityisen kuuma, jolloin kerrostumien muodostuminen (jäähdytystehon menettäminen) lämmönsiirtopinnoille on estettävää. (Herro & Port 1993)
- Suljetun piirin jäähdytysnesteen tulee toimia alle ympäristön tai alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, esimerkiksi ilmastointi- ja pakastuskoneissa. (Flynn 2009)
- Suljetun piirin jäähdytysnesteen lämpötila tulee olla yli sen kiehumispisteen, esimerkiksi paineistetussa kuumavesijärjestelmässä. (Flynn 2009)
- Prosessijäähdytystä tarvitaan vain ajoittain, jolloin jäähdytysvirtaus välillä sammutetaan. (Flynn 2009)

3.4 Ominaispiirteet

Suljetuilla jäähdytysjärjestelmillä on lukuisia ominaispiirteitä. Yksiosaisen piirin käyttökulut ovat alhaiset muodostuen lähinnä kiertopumpun kuluttamasta energiasta ja mahdollisista kemikaalilisäyksistä (esim. inhibiittori, hapen poisto). Järjestelmät koostuvat useista osioista, joiden rakennusmateriaaleina käytetään eri metalleja, muun muassa alumiinia, kuparia ja ruostumatonta terästä. Tällöin on mahdollisuus, että järjestelmään muodostuu korroosiota aiheuttavia galvaanisia pareja. (Capehart & Mossad 2007)

Suljetut piirit ovat suunniteltu tarvitsemaan vähän lisäettä, koska kemikaalien konsentroitumisongelmasta johtuvaa poistojärjestelmää ei tarvita, toisin kuin avoimessa piirissä. Vähäistä vedenkulutusta ei useinkaan saavuteta puutteellisen laaduntarkkailun ja ylläpidon aiheuttamien vuotojen ja kiertoveden vaihtojen takia. (GE Water 2007)

Biologisten kasvustojen syntyminen on vähäisempää kuin avoimessa järjestelmässä, jos hapen poistosta on huolehdittu. Hapettomuus myös vähentää korroosiota merkittävästi. Järjestelmäkoot vaihtelevat hyvin laajasti satojen litrojen ja kymmenien tuhansien kuution välillä. (Flynn 2009)

3.5 Ongelmat

Suljetuissa jäähdytysjärjestelmissä on vastaavat ongelmat kuin muissa jäähdytysjärjestelmätyypeissä. Näitä ongelmia ovat korroosio, biologiset kasvustot ja suolakerrostumat etenkin lämmönsiirtopinnoilla. Korroosio on yleensä helposti hallittavissa inhibiittorikäsittelyjen avulla, koska voidaan käyttää korkeita kemikaalipitoisuuksia. Korroosionestolla saavutetaan matala metallihävikki putkistoissa. Samoin suolakerrostumat voidaan estää käyttämällä pehmeää vettä. (GE Water 2009 ; Flynn 2009)

Suurimmat jäähdytystehoon liittyvät ongelmat aiheutuvat järjestelmän vuodoista ja biologisista kasvustoista. Vuotava vesi täytyy korvata uudella, jolloin järjestelmään pääsee täyttöveden mukana lisää kerrostumia aiheuttavia liuennetta suoloja

(pääasiassa kalsiumkarbonaatti, kalsiumsulfaatti, magnesiumsuolat ja silikaatit). Yleensä täyttövesi on myös happirikasta, esimerkiksi Haminan kaupunkivedessä on happea keskimäärin 9.5 mg/l (Suurnäkki 2011). Tämä puolestaan lisää korroosioriskiä. Hapen poistamista suljetusta järjestelmästä tutkitaan kokeellisessa osiossa.

Lisäksi täyttövesi voi sisältää ravinteita. Hapen ja ravinteiden takia täyttövesi voi edistää biologisia kasvustoja. Kasvustot voivat käyttää myös ravintonaan nitraatipohjaisia inhibiittoreita, joten inhibiittoreiden pilaantuminen on tässä tapauksessa mahdollista. Biologiset kasvustot edistävät järjestelmän likaantumista, kerrostumien muodostumista, tukkeutumista, korroosiota ja lopputuloksena heikentää jäähdytyskapasiteettia. (GE Water 2009 ; Flynn 2009)

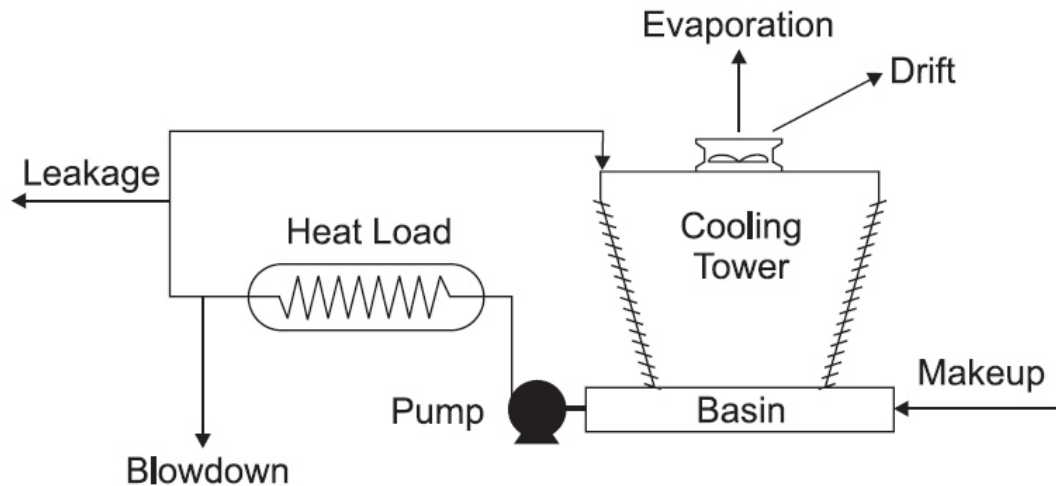
Suljetut jäähdytysjärjestelmät ovat harvoin jatkuvan laaduntarkkailun alaisena. Vuotojen, kasvustojen ja korroosioasteen seuraaminen ilman korkeatasoista jäähdytysveden laaduntarkkailua on hankalaa. Ongelmat huomataan tästä johtuen vasta siinä vaiheessa, kun tapahtuu selkeitä muutoksia esimerkiksi jäähdytystehossa tai järjestelmän paineessa. Tästä syystä jatkuva laadunvalvonta on järkevää ja mahdollistaa alhaiset käyttökustannukset. (Flynn 2009)

4 AVOIN KIERTOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ

Avoin kiertojäähdytysjärjestelmä kierrättää samaa jäähdytysnestettä (yleisimmin vettä) tuotteen tai prosessin jäähdyttämiseen, kuten suljetussa järjestelmässä. Jäähdytysveteen sitoutunut lämpö hävitetään haihduttamalla sitä jäähdytystornissa, suihkutuslammessa tai kondensaattorissa, jonka jälkeen jäljelle jäänyttä vettä voidaan käyttää uudestaan jäähdytykseen. Yleisin ja monikäyttöisin jäähdytysyksikkö on jäähdytystorni, joka esitellään kappaleessa 5. Suihkutuslamppi ja kondensaattori on esitelty kappaleissa 4.4 ja 4.5.

Kuvassa 6 on esitelty tyypillinen avoin kiertojäähdytysjärjestelmä, jossa on jäähdytystorni. Tornin pohjalle valunut jäähtynyt vesi kierrätetään pumpulla takaisin lämmönvaihtimille, joissa lämmennyt vesi virtaa takaisin torniin. Osa kiertovedes-

tä poistetaan (blowdown) kiintoainekertymien hallitsemiseksi ja osa kuluu mahdollisiin vuotoihin. Eniten vettä poistuu haihtumalla tornissa. Syöttövedellä (makeup) korvataan kuluvaa vesimäärä.



Kuva 6 Tyypillinen avoin kiertojäähdytysjärjestelmä, jossa jäähdytystorni poistaa lämmön haihduttamalla vettä ilmakehään. (Flynn 2009)

4.1 Ominaispiirteet

Avoimen järjestelmän ominaispiirteenä on suora kontakti ilmaan, jolloin veden haihtumisominaisuuden ansiosta jäähdytysteho on 50–100-kertainen suljettuun järjestelmään tai läpivirtausjärjestelmään verrattuna. Avoin järjestelmä siis käyttää jäähdytykseen merkittävästi vähemmän vettä kuin läpivirtausjäähdytys. Myös kemikaalikäsittely on huomattavasti taloudellisempaa. Avoimen järjestelmän käyttämiseen liittyviä ongelmia on kuitenkin enemmän kuin läpivirtausjärjestelmässä. (Flynn 2007)

4.2 Käyttökohteet

Avoin järjestelmä on yleisin ja eniten sovellettu jäähdytysjärjestelmä, koska veden haihdutukseen kehitettyjä jäähdytysyksiköitä (jäähdytystornit, haihduttavat kondensaattorit, suihkutuslammet) on lukuisia erilaisia. Näin ollen suurin osa jäähdytyssovelluksista voidaan toteuttaa avoimella kiertojäähdytysjärjestelmällä kapasiteetin vaihdella alle $0.1 \text{ MW}_{\text{th}}$:sta yli $2000 \text{ MW}_{\text{th}}$. Alla on esitelty tyypillisimmät avoimen kiertojäähdytysjärjestelmän jäähdytysyksiköt. (SPX Cooling Technologies 2007 ; EU-neuvosto 2000)

4.3 Suihkutuslamppi

Suihkutuslammet ovat vesialtaita, joihin on asennettu suihkutusrjestelmä veden pinnan yläpuolelle. Esimerkki suihkutusalmmesta on esitelty kuvassa 7. Merkittävämpänä erona kappaleessa 2 mainittuun jäädytyslampeen on pienempi koko. Suihkutusjärjestelmän vesisuuttimet hajottavat tulevan kuuman kiertoveden pieniksi pisaroiksi, jolloin veden haihtuminen (samalla jäätyminen) tehostuu. Suhteellisen lyhyt kontaktaika veden ja ilman välillä rajoittaa lämmönsiirtotehokkuutta merkittävästi. Kapasiteetin lisäämiseksi altaan kokoa täytyy kasvattaa tai vaihtoehtoisesti jakaa jäädytys useampaan altaaseen. Alhaisimpaan lämpötilaan päästään, kun kiertovesi virtaa altaasta altaaseen jäähtyen joka suihkutuskerralla lähemmäksi ympäristön lämpötilaa. (Flynn 2009 ; Perry & Green 1997)



Kuva 7 Suihkutuslampijärjestelmä kemian tehtaan jäädytysyksikkönä. © Ed Kashi 2001/CORBIS

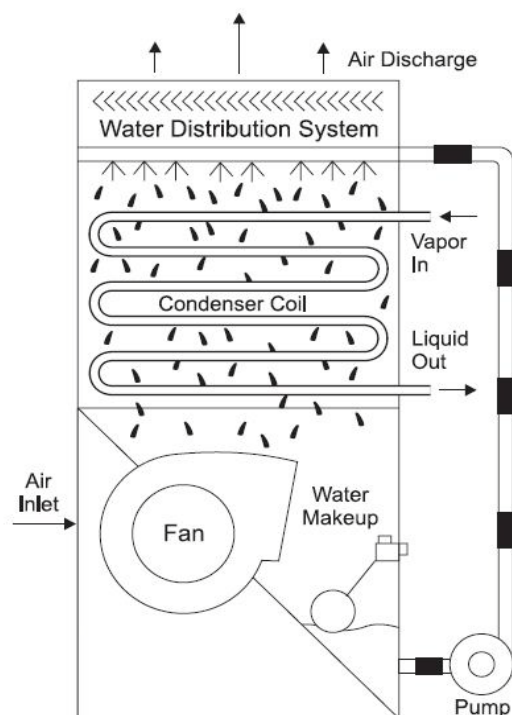
Suihkutuslammissa jäädytysvettä kuluu haihtumisen lisäksi tuulen vaikutuksesta, kun pienemmät pisarat sinkoutuvat tuulen mukana pois altaasta. Tätä häviötä voidaan vähentää asentamalla vallit altaan ympärille. Huonosti suunniteltu suihkutusrjestelmä voi myös lisätä vesihäviöitä, jos suihkusuuttimet hajottavan veden niin pieniksi pisaroiksi, että ne nousevat ilmapirran mukana sumuna. Allasjärjestelmässä täytyy olla suodatusyksikkö, jotta tuulen mukana kulkeutuva hiekka, lehdet, yms. eivät tuki järjestelmää. (Perry & Green 1997)

Suihkutuslammen eduiksi lasketaan suhteessa jäähdytystorniin alhaiset investointi- ja käyttökustannukset. Esimerkiksi 12000 tonnia sokeria päivässä tuottavan tehtaan jäähdytykseen kuluu jäähdytystorniyksiköllä 995 kW, kun suihkutusalammella energiankulutus on 750 kW. (SED 2009)

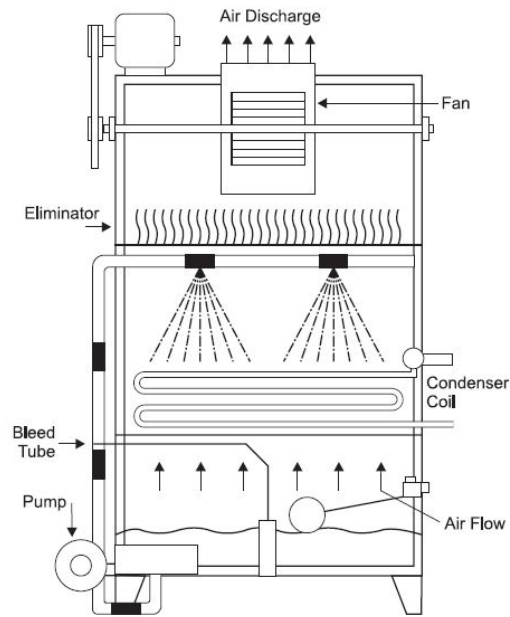
4.4 Haihduttava kondensaattori

Haihduttava kondensaattori yhdistää kappaleessa 5.1 esiteltävän märkjäähdytystornin ja tavanomaisen putkilämmönvaihtimen yhteen yksikköön. Näin ollen lämmönsiirto tapahtuu yhdessä yksikössä ilman pumppauksia tornin ja prosessivirran lämmönvaihtimen välillä. Tämän kaltaisia kondensaattoreita käytetään muun muassa tilajäähdytyksessä, erityisesti ammoniakkijärjestelmissä ja joissain teollisissa jäähdytyssovellutuksissa.

Haihduttavia kondensaattorityyppejä on useita. Ilma ja lämmönsiirtoaine voivat virrata samaan, vastakkaiseen tai risteävään suuntaan. Jäähdyttävä ilma voidaan imeä tai puhaltaa kondensaattoriin puhaltimella. Kuvissa 8 ja 9 on esitetty kaksi erityyppistä haihduttavaa kondensaattoria.



Kuva 8 Jäähdytysilmaa imevä haihduttava kondensaattori (Flynn 2007).



Kuva 9 Jäähdytysilmaa poispuhaltava haihduttava kondensaattori (Flynn 2007).

Tämän tyyppisissä kondensaattoreissa on vastaavat ongelmat kuin muilla avoimen järjestelmän jäähdytysyksiköillä tietyin lisäyksin, joista merkittävämpänä galvanoidujen rakenneosien korroosio (valkoinen ruoste). (Flynn 2007)

4.5 Ongelmat

Haihtumisominaisuutta hyväksikäyttävään järjestelmään konsentroituu syöttöveden mukana tulleita liuennaita aineita (veden poistojärjestelmästä huolimatta), joka lisää korroosioriskiä ja kertymien määrää. Myös suhteellisen korkea käyttölämpötila lisää merkittävästi korroosipotentiaalia. Kiertoveden pitkä viipymäaika ja korkea lämpötila mahdollistavat biologisten kasvustojen kehittymisen. Liikenteen ja teollisuuden aiheuttamat päästöt, kuten rikkidioksidi, ammoniakki ja rikkivety, voivat absorboitua avoimeen järjestelmän jäähdytysyksikön kautta ilmateitse lisäten korroosiota. Myös mikro-organismit, ravinteet ja suolat voivat absorboitua veteen avoimessa jäähdytysyksikössä, etenkin puhuttaessa jäähdytyslammista. (GE Water 2007)

5 JÄÄHDYTYSTORNI

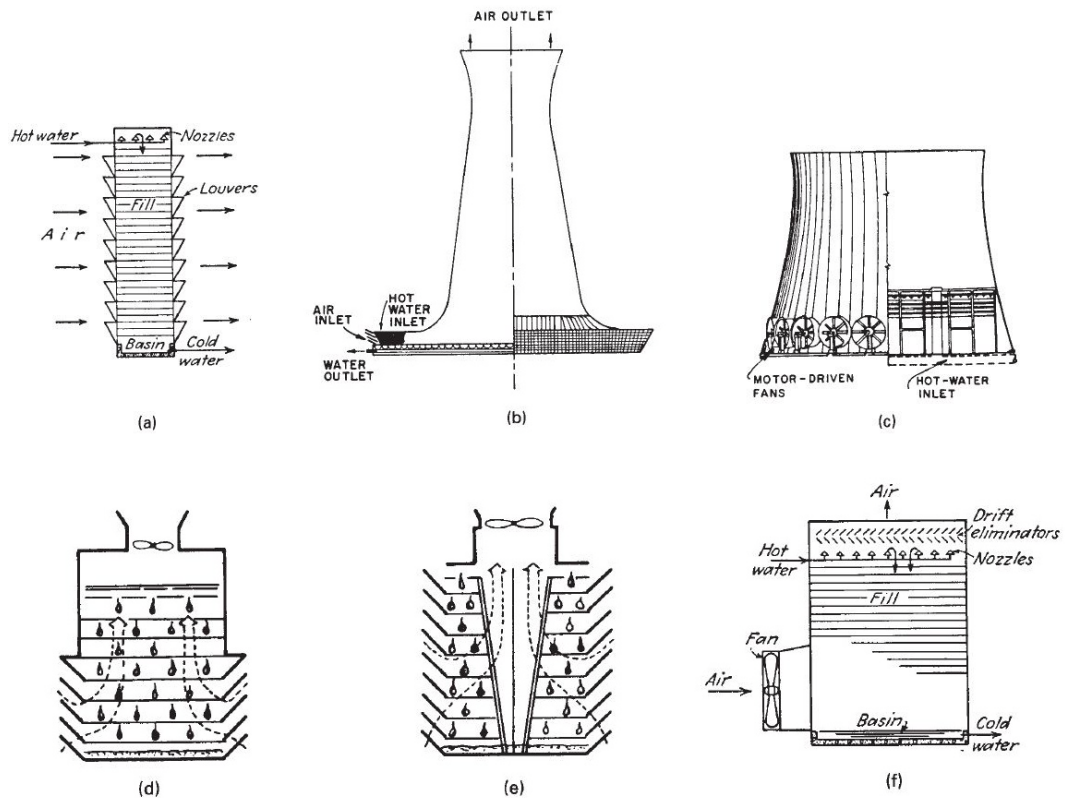
Jäähdytystornit on suunniteltu jäähdyttämään kiertovettä luomalla mahdollisimman hyvä ja pitkäkestoinen kontakti ilmaan. Jäähdytystorneja käytetään sekä avoimissa, että suljetuissa järjestelmissä. Niitä voidaan käyttää laaja-alaisesti eri kapasiteeteille: pienimmät jäähdytystornit on suunniteltu käsittelemään muutaman litran minuutissa käsittäviä virtauksia pienissä putkissa, kuten sellaisia, joita käytetään asuinkäytössä. Suuret jäähdytystornit käsittelevät virtauksia, jotka ovat satoja tuhansia litroja minuutissa, putkissa, jotka ovat halkaisijaltaan jopa 5 metriä, esimerkiksi energialaitoksissa. Kapasiteetiltaan jäähdytystornit vaihtelevat laajasti alle $0,1 \text{ MW}_{\text{th}}$:sta aina yli $2000 \text{ MW}_{\text{th}}$ asti. (Capehart & Mossad 2007; Flynn 2009 ; EU-neuvosto 2000)

Jäähdytystorneja on olemassa kolmea tyyppiä: märkä (haihduttava), kuiva (ei haihduttava) sekä yhdistelmä (kutsutaan usein hybridiksi). Yleisimmin käytössä olevat jäähdytystornit ovat kiertovettä haihduttavia eli märän tyyppin torneja. Tästä syystä tässä kappaleessa keskitytään lähinnä niiden esittelyyn.

5.1 Märkäjäähdytystornit

Märkäjäähdytystorni on yleisimmin käytössä oleva tornityyppi. Avoimessa piirissä jäähdytysvesi pumpataan tornin huipulle suuttimiin, joista se suihkutetaan laskeutuen painovoimaisesti tornin pohja-altaaseen. Jäähdytysilma otetaan torniin pohjalta ja se virtaa ylöspäin vettä vasten. Kontaktipinta-alan lisäämiseksi nämä kaksi fluidia virtaavat usein täytekappaleiden tai tasojen lävitse. Laajan kontaktipinta-alan johdosta aineen- ja lämmönsiirtyminen faasista toiseen on tehokasta. Kontaktipinta-alaa lisääville tasoille jäähdytettävä kiertovesi valuu joko ohuena filminä (kutsutaan filmitäytöksi, kontaktitasot ovat pystysuuntaiset) tai pisaroina (kutsutaan pisaratäytöksi, kontaktitasot ovat vaakasuuntaiset). Tasomateriaaleja ja -malleja on useita, kuten poimutettuja muovitasoja ja puisia kouruja. Myös geometrialtaan monimuotoisia täytekappaleita käytetään lisäämään kontaktipinta-alaa. Täytekappalekerroksesta poistuva lämmennyt kostea ilma poistuu tornin huipulta. Pohja-altaaseen laskeutuva jäähtynyt kiertovesi pumpataan takaisin lämmönvaihtimelle sitomaan lämpöä. (Capehart & Mossad 2007 ; Hensley 2009)

Märkäjähdytystorneja on eri tyyppisiä, jotka eroavat toisistaan ilmanottomekanismien perusteella. Niitä ovat luonnollinen ja koneellinen ilmanotto. Koneellinen ilmavirtaus saadaan aikaan puhaltimella (tai useammalla puhaltimella), joka (jotka) on sijoitettu joko tornin päälle tai sivulle (sivuille). Tornit, joissa puhallin on päällä, jaetaan vielä risti- ja poikkivirtaustyyppisiin. Kuvassa 10 on esitelty nämä tyypit periaatepiirroksin.



Kuva 10 Jähdytystornien päätyypit. a) Avoin suihkutorni, josta tuuli virtaa läpi. Teho on täten riippuvainen tuulen voimakkuudesta. b) Hyperbolinen luonnollisen ilmavirtauksen torni. c) Hyperbolinen mekaanisen ilmavirtauksen torni, puhallit sivuilla. d) Poikkivirtauksellinen torni, jossa puhallin päällä. e) Ristivirtauksellinen torni, jossa puhallin päällä. f) Pystyvirtauksellinen torni, jossa puhallin sivulla. [a) lähteestä Couper et al. 2010 ; b)-e) lähteestä Cheremisinoff & Cheremisinoff 1981 ; f) lähteestä Walas 1990]

Kuvan 10 tyypit esitellään alla olevissa kappaleissa tarkemmin.

5.1.1 Luonnollinen ilmavirtausmekanismi

Avoimessa suihkutornissa (kuva 10a) ilmavirtaus tornin lävitse riippuu täysin ympäröivistä sääolosuhteista. Suihkutornin jähdytysteho riippuu tuulen voimakkuu-

desta ja suuttimien suihkutusoimaisuuksista. Tyynellä säällä, alle 2 m/s tuulen nopeudella, jäähdytysteho on vielä olematon. Avoin suihkutorni on suhteellisen epäluotettava, matalan kapasiteetin jäähdytysyksikkö, joten niitä käytetään vain pientä jäähdytystehoa tarvitsevista prosesseista, joissa jäähdyttäminen ei ole kriittistä. Vesihäviöt ovat jäähdytyskapasiteettiin nähden suuret avorakenteesta johtuen. Investointi- ja käyttökustannukset ovat yksinkertaisen rakenteen ja toiminnan ansiosta pienet. (Couper et al. 2010)

Luonnollinen ilmavirtaus hyperbolisen tornin (kuva 10b ja 11) lävitse syntyy ilman tiheyserosta ilmakehässä ja tornissa. Lämpimällä, kostealla ilmalla on matalampi tiheys, mikä aikaansaa ilmavirtauksen. Tuulennopeus vaikuttaa myös tornin jäähdytystehokkuuteen. Niiden käyttökustannukset ovat pienet, koska sähköä ei kulu ilmavirtauksen synnyttämiseen. Korkeat tornit rakennetaan hyperboliseen muotoon vahvan rakenteen, vähäisen materiaalityrpeen ja hyvän virtausominaisuuden takia. Luonnollisen ilmankierron avulla toimivia torneja käytetään etupäässä suuritehoisissa järjestelmissä, esimerkiksi voimalaitoksissa. (Flynn 2009, EU-neuvosto 2000) Kuvassa 11 on esimerkki voimalaitoksen jäähdytystornista.



Kuva 11 Hyperbolinen jäähdytystorni, jonka lävitse ilma virtaa luonnollisesti perustuen kostean ja kuivan ilman tiheyseroon. (GE Water 2007)

5.1.2 Koneellinen ilmavirtausmekanismi

Koneelliseen ilmanottoon käytetään puhaltimia. Puhaltimien käyttö tehostaa jäähdytysprosessia haihduttaen enemmän kiertovettä, koska nestepisaroiden ohi virtaava ilmamäärä on moninkertainen luonnolliseen ilmavirtaukseen verrattuna. (Hensley 2009)

Hyperbolisessa tornissa, jossa ilmavirtaus saadaan aikaan puhaltimilla (kuva 10c ja 12), jäähdytysteho on jopa kolmenkertainen verrattuna vastaavanlaiseseen torniin luonnollisella ilmavirtauksella. Tuulettimet parantavat jäähdytyksen ohjattavuutta ja niitä voidaan käyttää esimerkiksi vain suuren kuormituksen aikana, kuten kesähelteellä (Couper et al. 2010). Kuvassa 12 on esimerkki tästä tyypistä.



Kuva 12 Hyperbolinen jäähdytystorni, jossa ilmavirtausta tehostetaan merkittävästi kehälle asennetuilla puhaltimilla. (Hensley 2009)

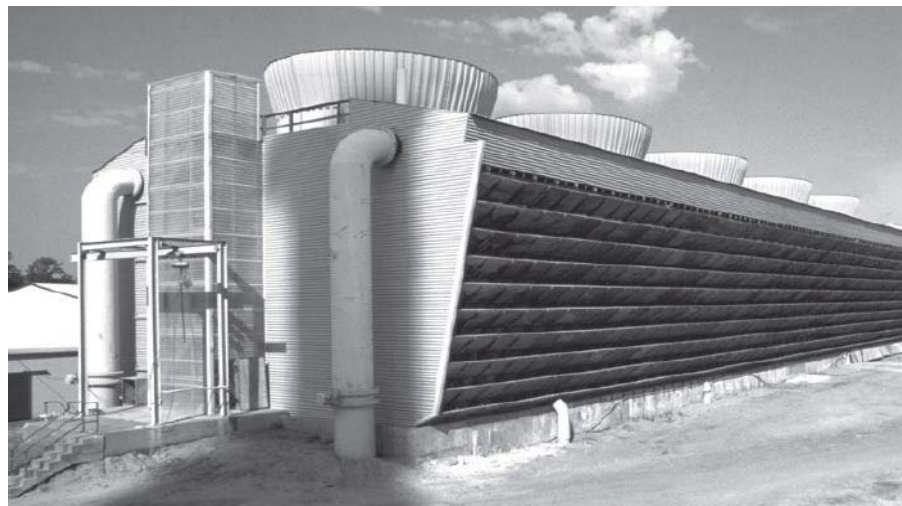
Poikkivirtaustornit, joissa puhallin on tornin päällä (kuva 10d), ovat yleisimmin käytettyjä jäähdytystorneja prosessiteollisuudessa. Ne ovat operoitavuudeltaan hyviä ja soveltuvat muuntuvakapasiteettiseen jäähdytykseen. Lämmenneen kostean poistoilman ulospuhallusnopeus on suurempi kuin kylmän ja kuivan ilman sisäänotto, joten poistoilman uudelleenkierrätystä, joka joissain tornityypeissä on ongelmana (kuva 16), ei juuri tapahdu. Tornin päälle rakennettuna puhallin aihe-

uttaa muihin tornityyppeihin verrattuna paljon melua sekä mahdollisia rakenteellisia ongelmia. (Couper et al. 2010 ; SPX Cooling Technologies 2007) Kuvassa 13 on esitetty ympyrän muotoon rakennettu matala poikkivirtaustorni.



Kuva 13 Ympyränmuotoon rakennettu poikkivirtaustorni. (Hensley 2009)

Ristivirtaustorneissa, joissa puhallin on tornin päällä (kuva 10e), on poikkivirtausta alhaisempi ilman virtausvastus. Niitä voidaan operoida suuremmilla virtausnopeuksilla, joten virrankulutus tehoyksikköä kohden on poikkivirtaustyyppiä pienempi. Ilman viipymäaika tässä tornityypissä on kuitenkin alhaisempi kuin poikkivirtaustornissa, joten lämmönsiirtoteho jää alhaisemmaksi. Käyttökuluja pienentää pumppauskustannukset, kun ristivirtaustorni ei ole niin korkea kuin toisen tyyppiset tornit. (Couper et al. 2010 ; Flynn 2009) Esimerkki eräästä ristivirtaustornista on kuvassa 14.



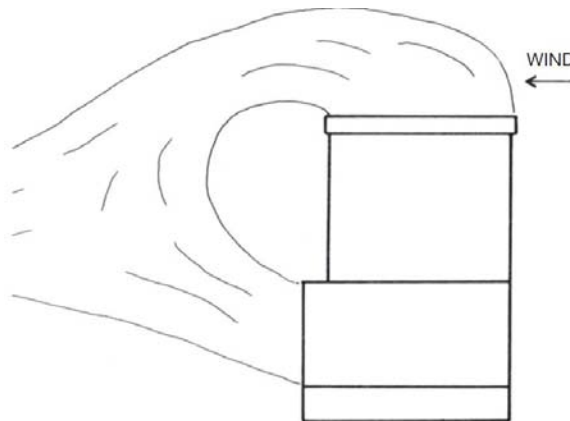
Kuva 14 Ristivirtaustorni, jossa on 5 puhallinyksikköä. (Hensley 2009)

Pystyvirtaustornien, joissa puhallin on asennettu tornin sivulle (kuva 10f), rakenne on yksinkertaisempi kuin tornien, joissa puhallin on päällä. Niiden melutaso on myös alhaisempi. Ilmanottoaukon luona tulee olla runsaasti tilaa, joten tornia ei tule sijoittaa ahtaaseen paikkaan. Ilman virtausominaisuudet ovat heikot 90° ilmanottokulman takia. Kuvassa 15 on esitetty eräs tyypillinen sivupuhaltimella varustettu pystyvirtaustorni. (Couper et al. 2010 ; Hensley 2009)



Kuva 15 Pystyvirtaustorni, johon puhallin on asennettu sivulle. © IPSCO Inc. 2003

Koska lämmin kostea ilma poistuu tornin huipulta hitaammin kuin sisään otettava kuiva ilma, on poistoilman uudelleenkierrätys (kuva 16) melko todennäköinen ongelma. Kostean ilman alhainen poistumisnopeus pienentää vesihäviötä (ilmavirran mukana kulkeutuvan veden määrää). (Couper et al. 2010 ; SPX Cooling Technologies 2007)



Kuva 16 Sivusta ilmavirtauksen ottavat jäähdytystornit ovat alttiita kostean poistoilman palautumiselle ilmanottoon. Kostea ilma aiheuttaa talvella suuria jäätymisongelmia tornin sisäosissa. (SPX Cooling Technologies 2007)

5.1.3 Yleisimmät ongelmat

Jäähdytysvesitorneissa on useita kiertoveden häviölähteitä. Veden haihtuminen on niistä suurin, mutta joissakin tornityypeissä pisaroituminen on voi olla merkittävä ongelma. Kiertovettä kulkeutuu pisaroina pois järjestelmästä lämmenneen kostean ilman mukana etenkin, jos ilman virtausnopeus on suuri. Pisarahäviöitä estetään asentamalla kostean ilman poistoaukkoon pisaranerottimiksi jakolevyjä. Ilman mukana nousevat pisarat kondensoituvat jakolevyihin, joista ne palautuvat vesikiertoon. Erilaisia pisaranerotintyyppisiä ovat kalanruoto- ja aaltomuotoiset levyt sekä solumaiset kennostot. Solumaisia kennostoja pidetään tehokkaimpina pisaranerottimina. (Capehart & Mossad 2007 ; Hensley 2009)

Märkäjäähdytystornien ongelmia ovat myös niiden päästöt ympäristöön. Haihtuva vesi muodostaa aerosolin tiettyjen hiukkasten, kuten sinkki-, kloori- ja kromiyhdisteiden (käytetään korroosiosuoja-aineena) kanssa. Samoin legioonabakteerin kehittyminen jäähdytystornissa, jossa lämpötilat ovat otolliset bakteerikasvitulle, on mahdollista. Samalla tavalla bakteerit leviävät lähiympäristöön aerosolina. Muita vaikutuksia ympäristöön ovat mineraalipäästöt sekä näkyvät vesihöyrypatsaat. Tietyissä olosuhteissa vesihöyry aikaansaa sumua tai vaarallisia jäätymiä tornin lähiympäristössä. (Flynn 2007)

5.1.4 Märän jäähdytystornin suunnittelun perusta

Kuten aikaisemmin todettiin, jäähdytystornin teho perustuu veden haihtumiseen. Jäähdytystornia suunniteltaessa tulee sijoituspaikalla vallitseva ilmasto ottaa huomioon. Pääasiallinen kysymys onkin: riittääkö jäähdytystornissa jäähdytystehokkuus kaikissa vallitsevissa ilmasto-olosuhteissa? Tärkein suunnitteluparametri tornin suunnittelussa ja valinnassa on ympäristön märkälämpötila. Teoriassa se on alin jäähdytystornissa saavutettava kiertoveden lämpötila. Suurten investointikustannusten takia sen tavoittelu ei ole kuitenkaan järkevää. Enemmän pyritään 3–5 °C korkeampaan lämpötilaan kuin mitä märkälämpötila on. Lämpötilaeron perusteella tehtäviin suunnitelmiin vaikuttaa oleellisesti märkälämpötilan vaihtelu eri vuoden aikoina. Tilastoituja märkälämpötiloja voi olla hankala löytää tieto-

kannoista, joskin kuivalämpötila ja suhteellinen kosteus ovat yleisesti tilastoituja arvoja. (Capehart & Mossad 2007)

5.2 Kuivajäähdystornit

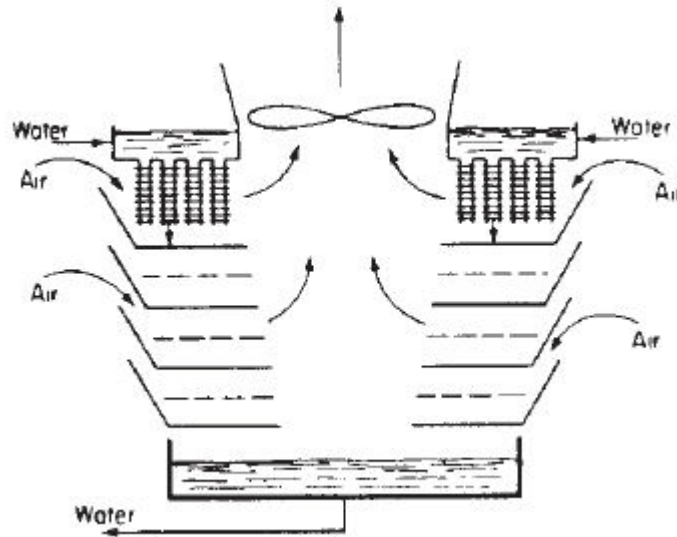
Kuivat jäähdystornit siirtävät lämpöä ilmaan haihduttamatta kiertovettä. Tällä menetelmällä päästään vain noin 10 °C lämpötilamuutokseen. Kuivajäähdytys jakautuu suoraan ja epäsuoraan jäähdyttämiseen. Suoraa kuivajäähdytysjärjestelmää käytetään voimalaitosten höyryturbiineilta tulevan poistohöyryn kondensoimiseen suoralla kontaktilla ilman kanssa. Mekaanisesti puhallettava viileä ilma lauhduttaa höyryn nesteeksi. Neste johdetaan takaisin höyrykiertoon. Epäsuora kuivajäähdytys koostuu suljetusta vesikierrosta, jossa kiertovesi jäähdyttää prosessivirtaa lämmönvaihtimella. Lämmennyt kiertovesi johdetaan putkistoon, jonka ohitse viileä ilma virtaa. Lämpö siirtyy konvektiivisesti putken läpi kiertovedestä ilmaan. Kuivajäähdystyyppisessä tornissa ilmavirtauksen tulee olla 3–4 kertaa suurempi kuin märkajäähdystornissa, jotta vastaavaan jäähdystehoon päästään. Tästä syystä tornin tulee olla suurempi ja täten se on kalliimpi rakentaa. (Capehart & Mossad 2007)

Kuivajäähdystornit jaetaan vastaavasti kuin märkajäähdystornit mekaaniseen ja luonnolliseen ilmavirtaustyyppiin. Etuja ovat täyttöveden ja veden käsittelyn tarpeettomuus, ne eivät kehitä höyryä, sumua tai päästöjä ympäristöön. Suurimmat ongelmat ovat suuret investointikustannukset, hankala operointi, korkea äänitaso puhaltimien takia sekä vallitsevan sään mukaan vaihteleva tehokkuus. (Capehart & Mossad 2007)

5.3 Hybridijäähdystornit

Hybridijäähdytys yhdistää märän ja kuivan jäähdystyyppin. Hybridijärjestelmiä on alettu kehittää tiukentuneiden ympäristöä suojelevien lakien ansiosta. Pääasiallinen syy hybridijärjestelmän käyttöön on märkätornissa syntyvän höyrypilven ehkäiseminen. Tähän päästään lisäämällä märkätornin yläosaan ylimääräinen kuivaosio, jossa tornista poistuvaa kostunutta ilmaa lämmitetään sellaiselle asteel-

le, ettei näkyvää höyrypilveä synny. Kuvassa 17 on esitetty periaatepiirros hybriditornista. (Capehart & Mossad 2007 ; Flynn 2007)



Kuva 17 Hybriditorni, jossa tornin yläosassa on kuuman veden epäsuoran kontaktin kuiva-jäädytin ja alla ristivirtauksellinen märkätornin osa. (Walas 1990)

Hybriditorniin syötettävä kuuma kiertovesi johdetaan aluksi kuivaosioon, jossa lämpöä poistetaan ilmajäädytteisessä kennossa. Kuivaosion kiertovesi virtaa märkäosioon, jossa lämpöä poistetaan haihduttamalla normaalin märkätornin tapaan. Märkäosiossa jäähtynyt kiertovesi valuu tornin pohjalle ja jäähdytykseen käytetty lämmin kostea ilma nousee ylöspäin. Tornin huipulla ilmajäädytyskennoilta tuleva lämmennyt ilma ja kostea ilma kohtaavat, jolloin tornista poistuvan ilman kosteuspitoisuus on tavanomaisesta märästä jäähdytystornista poistuvaa ilmaa pienempi. Alhaisempi kosteuspitoisuus poistuvassa ilmassa ei synnytä vastaavanlaista höyrypilveä kuin märässä tornissa. Kuvassa 18 on esimerkki kuuman kondenssiveden jäähdytykseen käytettävästä hybriditornista. (Capehart & Mossad 2007 ; Flynn 2007)



Kuva 18 Suuri hybriditorni kuuman kondenssiveden jäähdytyksessä. (Flynn 2007)

Hybriditornin kuiva- ja märkäosioita voidaan käyttää yhtäaikaaisesti tai erikseen riippuen vallitsevista sääolosuhteista ja vaadittavasta jäähdytyskapasiteetista. Talvella alhaisessa lämpötilassa pelkän kuivaosion käytöllä voidaan päästä riittävään jäähdytystehoon. Kesällä korkeassa lämpötilassa voidaan käyttää pelkkää märkäosiota jäähdytykseen, koska höyrypilven muodostumisriskiä ei ole. Tässä tilanteessa kuivaosio otetaan käyttöön vasta, kun vallitseva lämpötila alkaa laskea.

Hybriditornin suunnittelu ja rakentaminen on tavanomaista jäähdytystornia monimutkaisempaa. Strengin (1998) mukaan seuraavat asiat tulee suunnitella kesä- ja talvikäyttöä varten: lämpökapasiteetti, lämpötilaero syötön ja lähdön välillä, kuivalämpötila, kriteerit operointiin ilman syntyvää vesihöyryä, äänipäästösäädökset ja täyttöveden tarve.

Hybridijärjestelmän käytöllä voidaan päästä mataliin vedenkulutuslukemiin. Kulutus voi olla suljetun kiertojäähdytysjärjestelmän tasolla tai jopa alhaisempi. Tiukentuvan ympäristölainsäädännön, tehokkuuden ja käyttöluotettavuutensa ansiosta hybridijärjestelmät saattavat yleistyä tulevaisuudessa merkittävästi. (Streng 1998)

6 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN VALINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Uuden jäähdytysjärjestelmän valintaan ja sen suunnitteluun tai vanhan järjestelmän parantamiseen liittyy lukuisia huomioonotettavia asioita. Näistä tärkeimpiä ovat energiatehokkuus, ympäristönäkökohdat sekä investointi- ja käyttökulut.

6.1 Energiatehokkuus

Tehokkaimmin energian käyttöä voidaan vähentää optimoimalla veden virtaus tarvittavan jäähdytystehon mukaiseksi eli pitämällä se mahdollisimman alhaisella tasolla, valitsemalla pienen virtausvastuksen omaavia ja pieneen lämpötilaeroon kykeneviä jäähdytysyksiköitä sekä huolehtimalla asianmukaisesta laitehuollosta. (EU-neuvosto 2000)

Bloemkolk et al. (1996) toteavat vertailututkimuksessaan (öljyalostamon jäähdytysjärjestelmän valinta 425 MW_{th} jäähdytysteholle) suoraan prosessivirtoja jäähdyttävän ilmajäähdytteisen järjestelmän olevan energiankulutukseltaan pienin (2000 kW). Suoran läpivirtausjäähdytyksen energiankulutus oli toiseksi pienin (3500 kW). Muiden tutkimuksessa esitettyjen jäähdytysjärjestelmien energiankulutus kasvavassa järjestyksessä: epäsuora läpivirtausjäähdytys (5500 kW), avoin kiertojäähdytysjärjestelmä, jossa jäähdytystorni (5600 kW), suljettu kiertojäähdytysjärjestelmä, jossa jäähdytystorni (7000 kW) ja ilmajäähdytteinen yksiosainen järjestelmä (8700 kW).

6.2 Ympäristönäkökohdat

EU-neuvosto (2000) arvioi jäähdytysjärjestelmän ympäristövaikutuksia seuraavilla tekijöillä:

- veden kulutus
- veteen vapautuvat lämpö- ja kemikaalipäästöt
- vesieläinten joutuminen järjestelmän vedenottoon
- kemikaalipäästöt ilmaan

- melu
- mikrobiologiset kasvustot ja niiden riskit

Kolme ensin mainittua ovat ominaisia ongelmia läpivirtausjärjestelmille. Bloemkolkin et al. (1996) vertailututkimuksessa 425 MW_{th} jäähdytystehon saavuttamiseen kuluu jäähdytysvettä läpivirtausjäähdytyksessä 26 000 m³/h, kun jäähdytystornilla toteutettu järjestelmä kuluttaa vain 624 m³/h. Suora prosessivirtojen ilmajäähdytys ei kuluta vettä lainkaan. Kemikaalipäästöt ilmaan ovat jäähdytystornille ominainen ongelma. Meluhaitat koskettavat pääasiassa ilmajäähdytteistä järjestelmää, etenkin puhuttaessa suurikapasiteetisesta jäähdytyksestä (esim. Bloemkolkin et al. (1996) vertailututkimus). Tällöin äänekkäitä jäähdytysyksiköjä, toisin sanoen puhaltimia, tulisi olla kymmeniä. Mikrobiologiset kasvustot luovat ongelmia kaikissa jäähdytystyypeissä, mutta eniten ne aiheuttava riskejä jäähdytystorneissa, jotka aiheuttavat päästöjä ilmaan. Tämä mahdollistaa bakteerien leviämisen ilmateitse.

6.3 Investointi- ja käyttökulut

Investointi- ja käyttökulut ovat viime kädessä ratkaisevia tekijöitä suunniteltaessa jäähdytysjärjestelmän valintaa. Voimalaitosten jäähdytysjärjestelmistä (< 2000 MW_{th}) investointikuluiltaan edullisimpana pidetään läpivirtausjärjestelmiä ja jäähdytystornilla toteutettuja avoimia järjestelmiä. Prosessiteollisuuden jäähdytysjärjestelmien (yleisimmin alle 2000 MW_{th}) jaottelu ei ole yhtä selkeää. Bloemkolkin et al. (1996) kokoama taulukko I antaa yhden näkemyksen öljynjalostamon jäähdytykseen tarkoitettujen erityyppisten jäähdytysratkaisuiden investointikuluille, kun suunniteltu jäähdytyskapasiteetti on 425 MW_{th}.

Taulukko I Investointikulujen arviointi Bloemkolkin et al. (1996) mukaan eri tyyppisille jäähdytysjärjestelmäratkaisuille öljynjalostamon jäähdytykseen, jonka laskennallinen jäähdytystarve on 425 MW_{th}. Investoinnin nykyarvo (vuodesta 1996 vuoteen 2011) on laskettu "GDP deflator"-laskurilla (www.measuringworth.com), joka kuvaa hyvin investointien arvon muutosta.

Jäähdytysjärjestelmä	1	2	3	4	5	6
<i>Suorat kustannukset</i>						
Primäärinen vesikierto						
Vedenottoyksikkö	2.2	2.2			26.7	
Pumput	2.5	2.4	1.6	1.2		
Vedenpoistoyksikkö	1.3	1.3				
Putkistot	5.7	2.5	5.5	1.5		
Lämmönvaihtimet	26.7	26.7	26.7	26.7		
Jäähdytystornit			5.9	5.9		
Kemikaalien annosteluyksiköt			0.2	0.2		
Sekundäärinen vesikierto						
Putkistot		4.2		4.2	5.3	
Lämmönvaihtimet		6.5		6.5		
Pumput		2		2	2.1	
Vesisäiliöt		0.1		0.1	0.1	
Ilmajäähdyttimet					33.8	39.8
<i>Epäsuorat kustannukset (suunnittelu, yms.)</i>	3.5	6.4	4.0	6.4	12.4	11.9
Kokonaisinvestointikustannukset (miljoonaa US\$, tammikuu 1996)	41.9	54.3	43.9	54.7	80.4	51.7
Kokonaisinvestoinnin nykyarvo (miljoonaa US\$, tammikuu 2011)	55.3	74.2	57.9	72.2	106.0	68.2
Kokonaisinvestoinnin nykyarvo (miljoonaa €, tammikuu 2011)	40.6	54.5	42.5	53.0	77.8	50.1

- 1 Suora läpivirtausjäähdytys (kpl 2.1)
- 2 Epäsuora läpivirtausjäähdytys (kpl 2.2)
- 3 Avoin kiertojäähdytysjärjestelmä jäähdytystornilla (kpl 4)
- 4 Suljettu kiertojäähdytysjärjestelmä kaksiosaisella jäähdytyspiirillä, jossa on jäähdytystorni (kpl 3.2)
- 5 Ilmajäähdytteinen suljettu yksiosainen kiertojäähdytysjärjestelmä (kpl 3.1)
- 6 Suora ilmajäähdytys (kpl 3)

Kuten taulukon I tuloksista voidaan huomata, pienimmät investointikustannukset on suoralla läpivirtausjärjestelmällä (40.6 miljoonaa euroa), kun kalleimmat on ilmajäähdytteisellä suljetulla yksiosaisella kiertojäähdytysjärjestelmällä (77.8 miljoonaa euroa).

Gougolin et al. (2009) mukaan käyttökulujen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi jäähdytysveden saatavuus. Meren tai järven välittömässä läheisyydessä suuri jäähdytysteho (voimalaitokset, yli 2000 MW_{th}) saavutetaan edullisimmin läpivir-

tausjäähdytyksellä. Ympäristövaikutusten takia kuitenkin suositaan jäähdytystornveja. Keski- ja pienitehoisissa (alle 2000 MW_{th}) järjestelmissä käyttökulujen jaottelu ei ole selkeää. Bloemkolkin et al. (1996) kokoama taulukko II antaa erään käsityksen käyttökuluista vastaavalla tavalla kuin edellisessä taulukossa investointikuluista.

Taulukko II Vuosittaisten käyttökulujen arviointi eri tyyppisille jäähdytysjärjestelmäratkaisuille öljynjalostamon jäähdytykseen, jonka laskennallinen jäähdytystarve on 425 MW_{th}. Investoinnin poistot on määritetty 15 vuoden takaisinmaksuajan perusteella, korko laskelmassa on 6,5 %. Investoinnin nykyarvo (vuodesta 1996 vuoteen 2011) on laskettu "GDP deflator "-laskurilla (www.measuringworth.com), joka kuvaa hyvin investointien arvon muutosta.

Jäähdytysjärjestelmä	1	2	3	4	5	6
Energia	2.2	3.5	3.6	4.4	4.9	1.3
Kemikaalit	0.5	0.5	1.8	1.8	0	0
Vedenkulutus	0	0	2.7	2.7	0	0
Huolto	1.5	1.9	1.5	1.9	2.8	1.8
Poistot	2.8	3.6	2.9	3.6	5.3	3.5
Korko	1.3	1.8	1.4	1.8	2.6	1.7
Yhteensä (miljoonaa US\$, tammikuu 1996)	8.3	11.3	13.9	16.2	15.6	8.3
Nykyarvo (miljoonaa US\$, tammikuu 2011)	10.9	14.9	18.3	21.4	20.6	10.9
Nykyarvo (miljoonaa €, tammikuu 2011)	8.0	10.9	13.4	15.7	15.1	8.0

- 1 Suora läpivirtausjäähdytys (kpl 2.1)
- 2 Epäsuora läpivirtausjäähdytys (kpl 2.2)
- 3 Aavoin kiertojäähdytysjärjestelmä jäähdytystornilla (kpl 4)
- 4 Suljettu kiertojäähdytysjärjestelmä kaksiosaisella jäähdytyspiirillä, jossa on jäähdytystorni (kpl 3.2)
- 5 Ilmajäähdytteinen suljettu yksiosainen kiertojäähdytysjärjestelmä (kpl 3.1)
- 6 Suora ilmajäähdytys (kpl 3)

Bloemkolkin et al. (1996) esimerkissä (taulukko II) suoralla läpivirtausjärjestelmällä ja ilmajäähdytysjärjestelmällä on halvimmat vuosittaiset käyttökulut (8.0 miljoonaa euroa). Kaksiosainen suljettu jäähdytyspiiri, jossa sekundaaripiirissä on jäähdytystorni, on vuosittaisilta käyttökuluiltaan kallein (15,7 miljoonaa euroa). Tutkimuksessa todetaan suoran läpivirtausjäähdytyksen olevan kokonaisvaltaisesti edullisin ratkaisu. Ympäristövaikutusten takia sitä ei kuitenkaan pidetä hyvänä vaihtoehtona, vaan mielenkiintoisimmaksi vaihtoehdoksi esitetään suoraa ilmajäähdytystä.

Bloemkolkin et al. (1996) tekemää vertailututkimusta ei voida pitää yleispätevänä, vaan se on yksi laskelma tiettyyn paikkaan suunnitelluista tietyn kapasiteetin omaavista järjestelmistä. Investointien ja käyttökulujen suuruuteen vaikuttavat oleellisesti valitut jäähdytysyksiköt (esimerkiksi jäähdytystornin tyyppi), materiaalit, sijainti (rannikolla, sisämaassa, aavikolla), vuosittaiset ilmasto-olosuhteet, lainsäädäntö, yms. Näiden tekijöiden perusteella tehdään valintoja järjestelmien suhteen. Paras (halvin ja tehokkain) lopputulos voidaan saavuttaa yhdistelemällä eri järjestelmätyyppejä esimerkiksi siten, että kuumimpien virtojen jäähdytys hoidetaan edullisella ilmajäähdytyksellä (suuri lämpötilaero) ja tämän jälkeen loppujäähdytys hoidetaan jäähdytystornilla varustetussa avoimessa piirissä. Vaihtoehtoisia kokoonpanoja syntyy tätä kautta lukuisia ja on ymmärrettävää, ettei voida selkeästi todeta minkään järjestelmätyypin olevan ylitse muiden.

7 KIRJALLISEN OSION YHTEENVETO

Kirjallisessa osiossa esiteltiin teollisuudessa käytettyjen jäähdytysvesijärjestelmien tyyppisiä sekä niiden ominaisuuksia, käyttökohteita ja ongelmia. Päättyypeiksi esiteltiin läpivirtaus-, avoin ja suljettu järjestelmä.

Kullakin järjestelmätyypillä on omat hyvät ja huonot puolensa. Läpivirtausjäähdytys on kustannustehokas vaihtoehto jäähdytykseen vesilähteen läheisyydessä esimerkiksi voimalaitoksessa. Kemikaalikäsittelyn takia ympäristövaikutukset ovat merkittävät, joten investointikustannuksiltaan kymmeniä prosentteja kalliimpi avoin kiertojäähdytysjärjestelmä jäähdytystornilla on entistä suositumpi vaihtoehto. Sen ympäristövaikutukset ovat merkittävästi pienemmät. Esimerkiksi Kalifornian rannikolla suurten voimalaitoskompleksien läpivirtausjärjestelmiä ollaan korvaamassa jäähdytystorneilla lukuisissa tutkimuksissa todettujen ympäristövaikutusten takia.

Sisämaassa, kaukana ehtymättömistä vesilähteistä, jäähdytystornit avoimessa järjestelmässä ovat yleisin sovellus. Riippuen jäähdytystarpeen vaihtelevuudesta ja kapasiteetista, tehtaan sijainnista sekä julkislainsäädännöstä valitaan märkä- tai hybriditorni jäähdytysyksiköksi. Suihkutuslammet ovat harkittava vaihtoehto, kun

tehtaan ympäristössä on paljon joutomaata, eikä se ole erityisen tuulista aluetta. Haihduttavat kondensaattorit ovat hyvä vaihtoehto pienikapasiteettisiin, ahtaasti sijoitettaviin järjestelmiin, etenkin kun jäähdytysnesteenä käytetään ainetta (kuten ammoniakki), jonka pääsy ympäristöön aiheuttaisi vaaratilanteita ja saastumista.

Suljettu yksiosainen kiertojäähdytysjärjestelmä valitaan, kun päästöt ympäristöön ilma- ja vesiteitse halutaan minimoida sekä tavoitellaan mahdollisimman hyvää jäähdytysprosessin ohjattavuutta. Jäähdytysyksiköksi valitaan joko kuiva jäähdytystorni tai ilmajäähdytyskennosto kapasiteettitarpeen ja tilamahdollisuuksien perusteella. Prosessivirtojen suorilmajäähdytys mainitaan houkuttelevaksi vaihtoehdoksi kustannuksiensa perusteella, mutta sellaisen suunnittelu ja toteuttaminen todettiin haastavaksi.

Tällä hetkellä tutkimusintressit maailmalla kohdistuvat kappaleessa 5.3 esiteltyyn hybridijäähdytystorniin, jossa samaisella jäähdytysyksiköllä voidaan jäähdyttää hyvin kuumia sekä viileämpiä virtoja jäähdytystarpeen vaihdellessa laaja-alaisesti.

8 KOKEELLISEN OSION TYÖN TARKOITUS

Työn tarkoituksena on tutkia L&T Recoil Oy:lle hankitun kaasunpoistolaitteen vaikutusta jäähdytysnesteen kaasupitoisuuteen. Jäähdytysnesteenä 40 %:sta propyleeniglykoli-vesiseosta. Hankittu kaasunpoistolaite on Reflex GmbH:n valmistama ja sen toiminta perustuu alipaineen avulla suoritettavaan kaasun erotukseen nesteestä. Alkuoletus on, että kaasu poistuu jäähdytysnesteen seasta laitteen toiminnan vaikutuksesta.

8.1 Työn taustaa

L&T Recoilin käytetyn voiteluöljyn regenerointiprosessin jäähdytys hoidetaan suljetulla jäähdytysnestejärjestelmällä, jonka tilavuus on 35 m³. Järjestelmän täyttämiseen käytetään propyleeniglykolia ja kaupunkivettä, johon on liuenneena happea ja typpeä. Täyttövaiheessa järjestelmän täydellinen täyttäminen on hankalaa verkoston rakenteen vuoksi. Tästä syystä esimerkiksi lämmönvaihtimiin jää

ilmataskuja. Ilmataskujen kaasut sekä kaupunkiveteen liuenneet kaasut muodostavat ylikylläisen seoksen veden kanssa. Tämä tarkoittaa käytännössä kaasukuplia jäähdytysnesteeseen seassa.

Jäähdytysnesteeseen korkealla kaasupitoisuudella on selkeä vaikutus verkoston lämmönsiirtimien tehokkuuteen, koska kaasukuplat vievät lämmönsiirtopinta-alaa nesteeltä. Ongelma ilmenee käytännössä puutteellisena jäähdystehona. Lämmönvaihtimilla ei päästä suunniteltuihin jäähdystehoihin, mikä ilmenee mm. kohonneina tuotevirtojen lämpötiloina.

Toinen vakava ongelma on kaasun aiheuttama korroosio. Happi aiheuttaa kemiallista korroosiota reagoidessaan metallien kanssa. Typpikaasu ei osallistu kemiallisiin reaktioihin, mutta aiheuttaa eroosikorroosiota kuluttaessaan putkien ja lämmönvaihdinpakkojen pintoja.

8.2 Muiden potentiaalisten kaasulähteiden tarkastelu

Kemialliset reaktiot ovat yksi mahdollinen kaasunlähde suljetussa järjestelmässä. Tietyt materiaaliyhdistelmät, veden laatu, kemialliset lisäaineet, paine ja lämpötila voivat kehittää kaasuja, kuten vetyä, rikkivetyä ja metaania. (Reflex 1999)

8.2.1 Vety H₂

Vetykaasua voi syntyä järjestelmässä, jossa esiintyy korroosiotuotteena rauta(II)hydroksidia, niin sanotulla Schikorrin reaktiolla. Schikorrin reaktiossa rauta(II)hydroksidista muodostuu magnetiittiä (Fe₃O₄), vetykaasua ja vettä alla olevan reaktioyhtälön mukaisesti. (Reflex 1999)



8.2.2 Rikkivety H₂S

Natriumsulfiitin käyttö hapenpoistokemikaalina voi muodostaa vetysulfidia. Vetysulfidia voi muodostaa myös tietyt bakteerit. (Reflex 1999) Vetysulfidia voi päästä myös jäähdytysnesteverkostoon vuotavan kaasulämmönvaihtimen kautta.

Vetysulfidi on erityisen haitallista kuparille, jota käytetään joissakin tapauksissa lämmönsiirtimien materiaalina hyvän lämmönjohtavuuden takia. Normaalisti kuparista valmistetun lämmönvaihtimen pintaan muodostuu kuparioksidikerrostuma, joka suojaa korroosiolta. Vetysulfidin vaikutuksesta kuparioksidista muodostuu kuparisulfaattia, joka ei muodosta vastaavanlaista suojakerrostumaa korroosiota vastaan. Tästä aiheutuvat vauriot ovat näkyvillä vasta muutaman operointivuoden jälkeen. (Reflex 1999)

8.2.3 Metaani CH₄

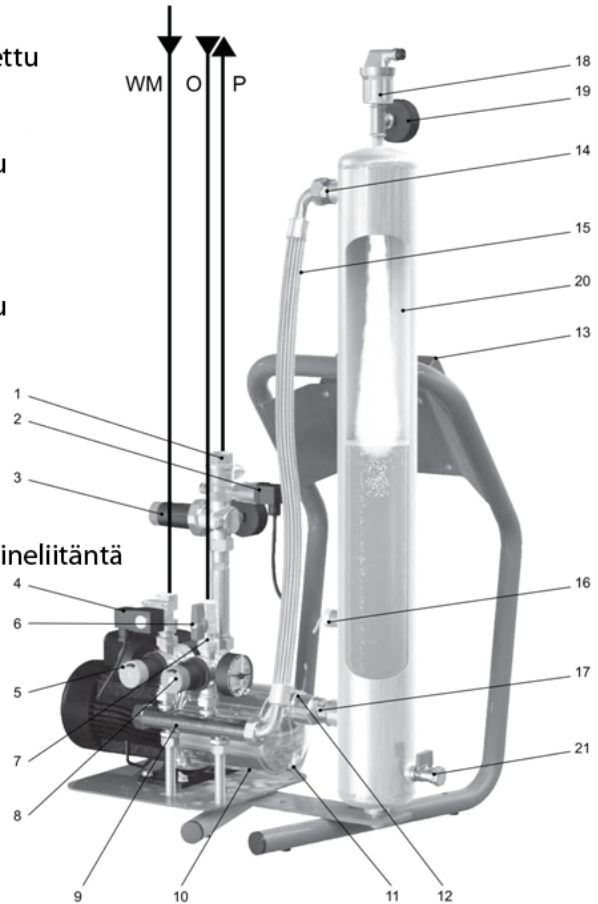
Metaanikaasu jäähdytysjärjestelmässä on useimmiten merkki bakteerikasvustoista. (Reflex 1999)

8.3 Reflex servitec 120gl kaasunpoistimen esittely ja toimintakuvaus

L&T Recoilille hankittu tyhjiökaasunpoistin erottaa suljetusta kiertojäähdytysjärjestelmästä teoriassa niin nesteeseen liuenneen kuin liukenemattoman kaasun. Tuote-esitteen mukaan sillä päästään lähelle 0 mg/l kaasupitoisuutta. (Reflex 1999)

Laite asennetaan jäähdytysnestekierron paluupuolelle päävirtaan ennen ilmajäähdytynyksiköitä. Laite on esitelty kuvassa 19.

1. Palloventtiili
2. Paineanturi
3. Painemittauksella varustettu ylivirtausventtiili
4. Magneettiventtiili
5. Lianerottimella varustettu paineenalennusventtiili
6. Palloventtiili
7. Magneettiventtiili
8. Lianerottimella varustettu paineenalennusventtiili
9. Yhdysputki
10. Pumppu
11. Pumpun tyhjennysruuvi
12. Pumpun ilmausruuvi
13. Kytkäkaappi IP 54
14. Suuttimella varustettu paineliitäntä
15. Yhdysletku
16. Vedenpuutekytkin
17. Imuliitäntä
18. Kaasunpoistin
19. Tyhjiömittari
20. Tyhjiösumutusputki
21. Täyttö- ja tyhjennyshana



Kuva 19 Reflex servitec 120gl yleiskuva. (Pitkänen 2010)

Laite ottaa päävirrasta kokonaistilavuutensa, 5 l verran, kaasurikasta jäähdytysnestettä kaasunpoistoon. Tämä sumutetaan putkeen (nro 20 kuva 19), jossa vallitsee alipaine. Jäähdytysnesteen sumutus (nro 14) pieniksi pisaroiksi ja alipaine tehostavat veden ja kaasun erottumista. Kaasu nousee ylös ja poistuu kaasunpoistoventtiilistä (nro 18). Kaasuton jäähdytysneste keräytyy alas putkeen. Pumppu (nro 10) käynnistyy ja syöttää keräytyneen veden takaisin jäähdytysverkostoon kuristusventtiilillä (nro 3) säädetyllä paineella. Jäähdytysnesteen poistuessa muodostuu jälleen alipaine tyhjiösumutusputkeen. Jäähdytysnesteen poistumisen ja alipaineen muodostamisen jälkeen laite on valmis käsittelemään seuraavan 5 l erän kaasurikasta jäähdytysnestettä. Sekvenssi alkaa alusta. (Pitkänen 2010)

9 MITTAUSTEN SUORITUS JA KOELAITTEISTO

Tyhjiökaasunpoistimen kaasunerotuskykyä jäähdytysnesteestä tarkastellaan kahdella parametrilla: jäähdytysveden selkeytymisellä sekä verkoston lämmönvaihtimien jäähdytysteholla.

Laitteen toimittaja lupaa kaasun poistuvan 150 tunnissa 35 m³ tilavuisesta verkostosta (Eqvist 2010). Tämän perusteella seuranta-ajaksi valitaan 2 viikkoa. Selkeytymiskokeet suoritetaan ja lämmönvaihtimien tiedot kerätään ennen tyhjiökaasunpoistimen asennusta sekä edellä esitetyn perusteella kahden viikon aikana asennuksen jälkeen. Mittausaikataulu on esitelty liitteessä 1. Lisäksi ulkolämpötila ja jäähdytysnesteen lämpötila mitataan kullakin mittauskerralla, jotta mahdollisesti niiden muutoksista johtuvia eroavaisuuksia voidaan arvioida. Lämmönsiirtimien tehon määrittämiseksi tarvittavat tiedot saadaan regenerointiprosessin ohjausjärjestelmästä.

9.1 Selkeytymiskokeet

Kokeet suoritetaan prosessilaatalla näytteenottoyhteiden luona, koska selkeytyminen alkaa välittömästi näytteenoton jälkeen. Koe suoritetaan ottamalla noin 800 ml jäähdytysnestettä korkeaan 1 l mittalasiin (halkaisija 7 cm, korkeus 26 cm). Selkeytymisaika mitataan ajastimella ja kirjataan ylös. Mittaus aloitetaan heti, kun mittalasisissa on 800 ml nestettä. Mittaus lopetetaan, kun kaasunesterajapinta ei ole enää erotettavissa. Jäähdytysnesteen lämpötila mitataan ennen koetta ja kokeen jälkeen selkeytyneestä nesteestä. Samoin ulkolämpötila mitataan.

Korkeaan mittalasiin otettu jäähdytysnestenäyte on "valkoisenaan" pieniä kaasukuplia, jotka ovat havaittavissa liitteessä 2 esitetyssä kuvassa 1. Kaasu poistuu nesteestä selkeästi nousevana rajapintana liitteessä 2 esitetyn kuvan 2 mukaisesti. Selkeän rajapinnan ansiosta selkeytymistä voidaan seurata visuaalisesti. Erottuminen katsotaan tapahtuneeksi, kun kaasun ja nesteen välinen rajapinta ei ole enää havaittavissa. Visuaalisessa tarkastelussa syntyvä virhe on minimissään, kun kokeiden suorittaja on jokaisella kerralla sama sekä selkeytymisaika varmistetaan

rinnakkaisnäytteellä. Rinnakkaisnäytteistä määritetty selkeytymisnopeus ei saa erota toisistaan yli 20 %. Mikäli ero on suurempi, uusitaan mittaus. Lisäksi jäähdytysneste valutetaan yhteestä tasaisesti, jolloin mittalasin täyttövaiheessa tapahtuva selkeytyminen on vastaavanlainen kullakin koekerralla.

Selkeytymiskoe tehdään kullakin kerralla kolmesta kohdasta verkostoa, joiden valinta on esitelty kappaleessa 9.2. Muutaman selkeytymiskokeen alkutilasta otetaan valokuva mittausaikataulun (liite 1) mukaisesti, jotta voidaan jälkikäteen tarkastella mahdollista kaasukuplien vähenemistä.

9.2 Selkeytymiskokeiden näytteenottoaikojen valinta

Kaasupitoisuuden ei voida olettaa olevan yhteneväinen kaikkialla verkostossa, joten selkeytymiskokeet suoritetaan useammasta kohdasta, jotta saadaan todellisuutta vastaava kuva jäähdytysnesteen tilasta.

Jäähdytysnesteen lämpötilalla on suuri merkitys selkeytymisnopeuteen Henryn lain perusteella. Henryn lain mukaan lämpötilan noustessa kaasun liukenevuus nesteeseen pienenee. Vapaita kaasukuplia on siis eriävä määrä nesteessä lämpötilan vaihdeltaessa. Näin ollen jäähdytysveden tulisi olla lähes saman lämpöistä eri koekerroilla, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Tähän päästään valitsemalla näytteenottokohdat jäähdytysnesteverkoston tulopuolelta eli ennen lämmönvaihtimia.

Henryn lain mukaan kaasun liukenevuus nesteeseen riippuu lämpötilan lisäksi paineesta. Näin ollen prosessilaattaa ylempänä tornissa, pienemmässä hydrostaattisessa paineessa, olevassa jäähdytysnesteessä on liuenneena vähemmän kaasua eli vapaita kaasukuplia on enemmän ja selkeytyminen on nopeampaa. Lisäksi liukenemattoman kaasun kuplakoko on suurempi, joka nopeuttaa selkeytymistä entisestään. Kattavin kuva jäähdytysnesteen tilasta saadaan valitsemalla näytteenottokohdat eri korkeuksilta.

Edellä esitetyn perusteella valitaan seuraavat näytteenottokohdat, jotka on esitetty kuvassa 20:

- Lämmönvaihtimen 02E203 (ohutfilmihaihduttimen esihaihduttimen vakuumikaasun lauhdutin, tornissa 30 metrin korkeudessa) tulopuoli, paine 3.5 bar
- Lämmönvaihtimen 02E204 (ohutfilmihaihduttimen vakuumikaasun lauhdutin, tornissa 20 metrin korkeudessa) tulopuoli, paine 4.5 bar
- Lämmönvaihtimen 06E702 (hapanvesistripperin jälkeinen jäähdytin, prosessilaatan tasolla) tulopuoli, paine 6.5 bar

9.3 Turvallisuus näytteenotossa

Näytteenotossa on muutamia riskitekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon. Prosessilaatan tasossa verkoston paine voi olla lähes 8 baria. Myös korkeimmalla sijaitsevassa näytteenottokohdalla paine on noin 3 baria. Näytteenotto tulee suorittaa tästä syystä varovaisesti.

Glykoli-vesiseos saattaa ärsyttää ihoa, jonka takia näytteenotossa ja -käsittelyssä tulee käyttää vedenpitäviä suojakäsineitä. Muu suojarustus tulee olla tehtaalla noudatettavien turvallisuusmääräysten mukainen.

9.4 Lämmönvaihdinten tehon selvittäminen

Jäähdytysnesteen selkeytyminen on siis yksi tyhjiökaasunpoistimen erotuskyvyn arviointiparametri. Toinen parametri on lämmönsiirtimien tehokkuus.

Lämmönsiirtimien tehokkuutta mitataan tietyillä venttiilien asennoilla eli tietyillä virtauksilla, kun järjestelmän paine pysyy vakiona. Tällöin lämpötilamuutokset osoittavat mahdollisen tehomuutoksen kullakin vaihtimella ja tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Tarkasteltaessa kappaleessa 11 esitettyjä tuloksia huomataan kuvaajista 24–26, etteivät mittausarvot ole kerätty tasaisin väliajoin. Tämä johtuu prosessissa tapahtuneista muutoksista, kuten koeajoista ja häiriötilanteista, jotka ovat vaikuttaneet jäähdytystarpeeseen.

9.5 Tarkasteltavien lämmönvaihtimien valinta

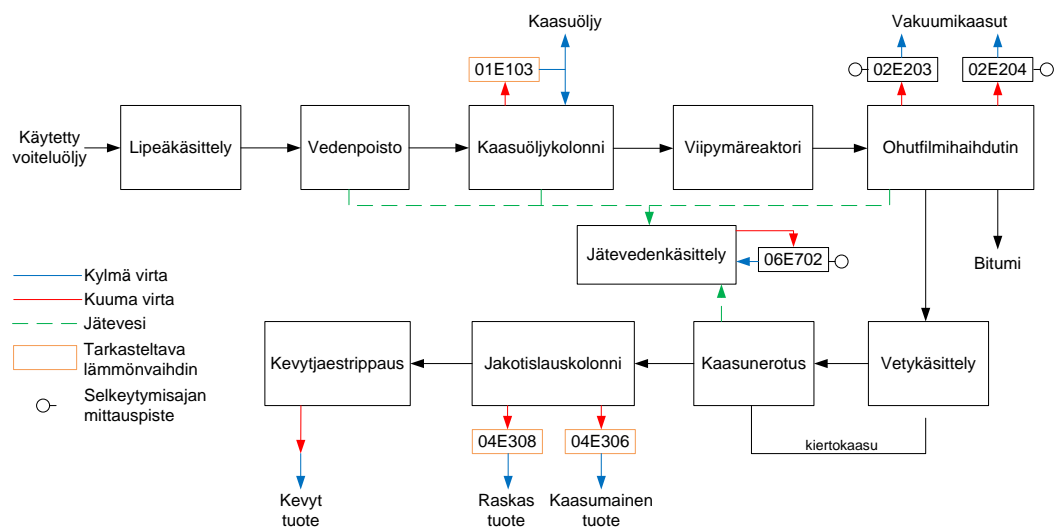
Seurattaviksi lämmönvaihtimiksi valitaan sellaisia kohteita, joiden operointi on vähäistä ja muutokset jäähdytystehon tarpeessa ovat pieniä eli virtaukset pysyvät lähestulkoon samoina koko seurantajakson. Lisäksi huomioidaan, että lämmönvaihtimeen tulevissa ja lähtevissä virroissa on lämpötilamittaukset yhtälö (3) varten, joka on esitelty kappaleessa 10. Tämän perusteella valitaan kaasuöljykolonnin yläkierron jäähdytin 01E103, jakotislauskolonnin kaasumaisen tuotteen jäähdytin 04E306 ja raskaan tuotteen jäähdytin 04E308. Nämä kohteet on esitetty lohkokaaviossa kuvassa 20.

Valittujen lämmönvaihtimien kokonaislämmönsiirtokerroimet ja lämmönsiirtopinta-alat on esitelty alla olevassa taulukossa III.

Taulukko III Valittujen lämmönvaihtimien mitoitusarvoja. (Vahterus 2009)

Lämmönvaihdin	Kokonaislämmönsiirtokerroin ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	Pinta-ala (m^2)
01E103	448	11.3
04E306	248	25.7
04E308	90	73.3

Selkeytyskokeiden mittauspisteiden ja tarkasteltavien lämmönvaihtimien sijainnit on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20 Lohkokaavio L&T Recoilin käytetyn voiteluöljyn regenerointiprosessista, johon on merkattu työssä tutkittavat lämmönvaihtimet ja selkeytyskokeiden mittauspisteet.

10 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY

Lämmönvaihdinten tehokkuuden määrittämiseen käytetään seuraavaa yhtälöä (Young & Freedman 2007)

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T_{\ln} \quad (2)$$

jossa	Q	lämpöteho, kW
	A	lämmönsiirtopinta-ala, m ²
	U	kokonaislämmönsiirtokerroin, kW/(m ² °C)
	ΔT_{\ln}	logaritminen lämpötilaero, °C

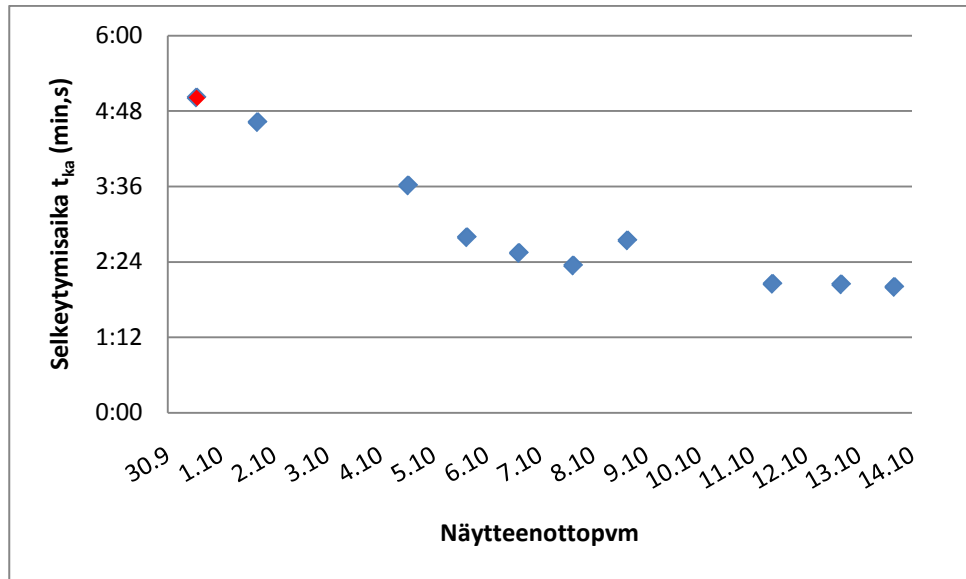
Logaritminen lämpötilaero lasketaan yhtälöllä

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_1 - T_4) - (T_2 - T_3)}{\ln \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}} \quad (3)$$

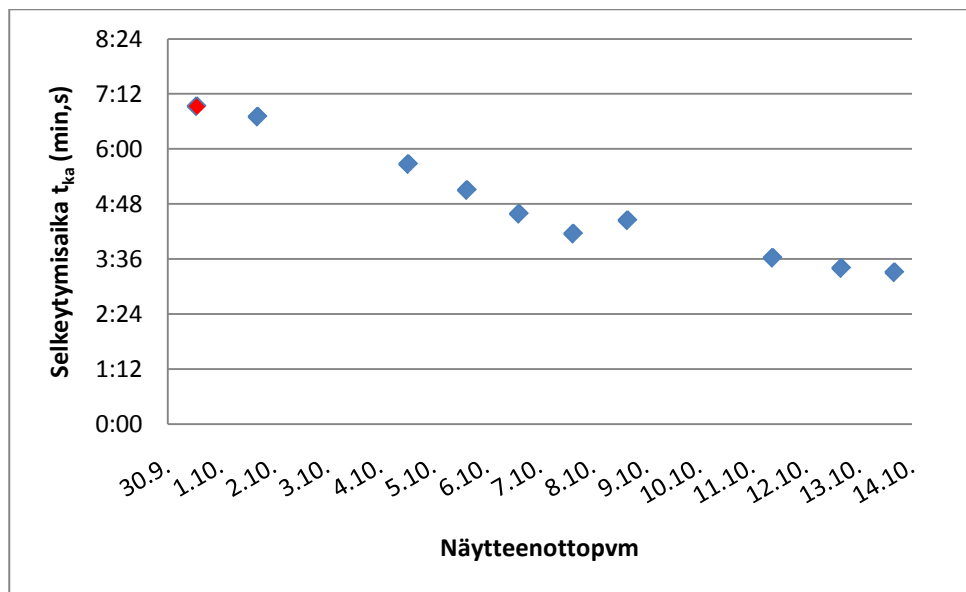
jossa	T_1	tuleva kylmä virta
	T_2	lähtevä kylmä virta
	T_3	tuleva lämmin virta
	T_4	lähtevä lämmin virta

11 TULOKSET

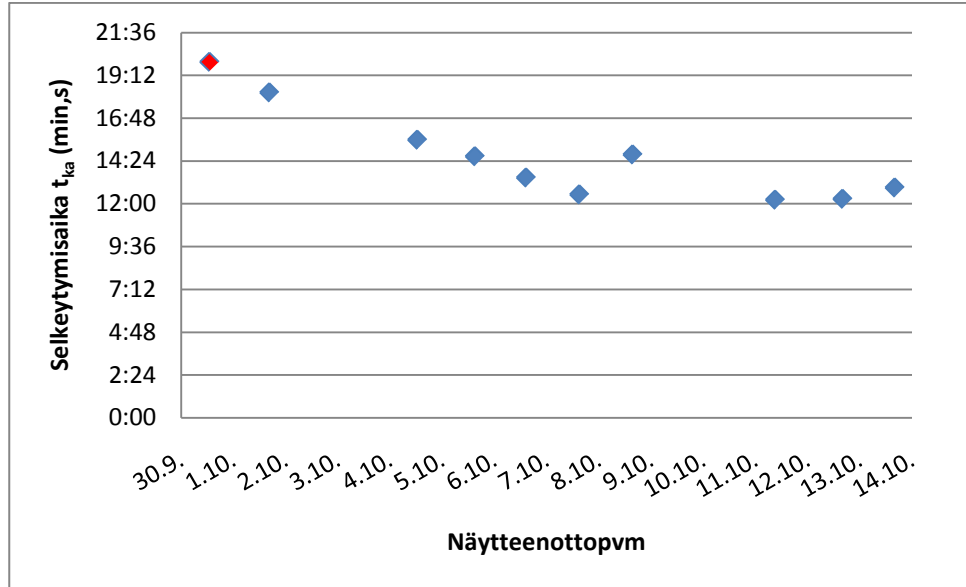
Kuvissa 21–23 on esitetty kappaleessa 9.1 esiteltyjen selkeytymiskokeiden tulokset. Kuvaajia vastaavat taulukot IV-VI ovat liitteessä 4. Alkutilanne on merkitty kuvaajaan punaisella värillä.



Kuva 21 Lämmönvaihtimen 02E203 näytteenottoyhteestä otettujen näytteiden (nro 1-10) selkeytymisaajat.

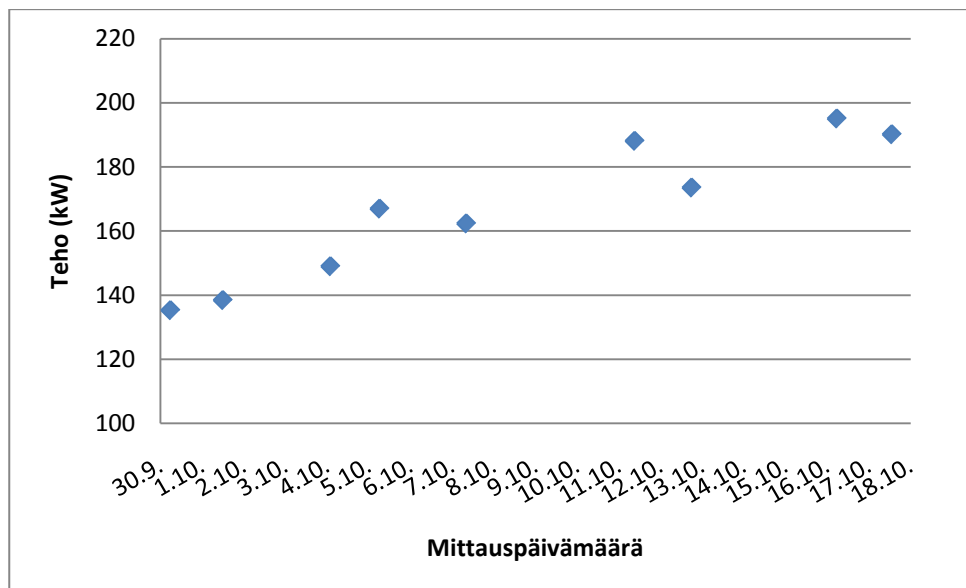


Kuva 22 Lämmönvaihtimen 02E204 näytteenottoyhteestä otettujen näytteiden (nro 12-22) selkeytymisaajat.

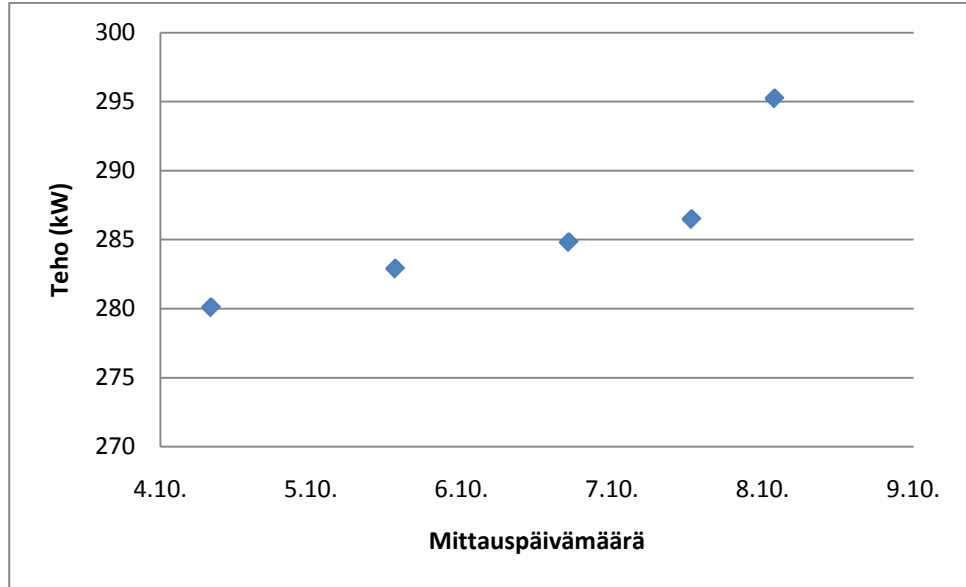


Kuva 23 Lämmönvaihtimen 06E702 näytteenottoyhteestä otettujen näytteiden (23-33) selkeytymisaajat.

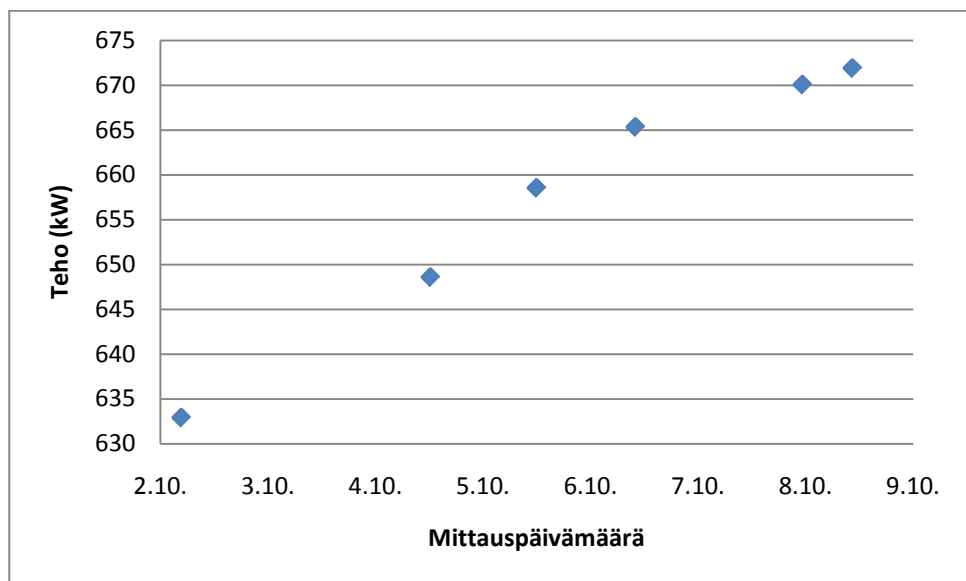
Kuvaajissa 24–26 on esitetty regenerointiprosessin ohjausjärjestelmästä kerätyt tiedot lämmönvaihdinten toiminta-arvoista. Teho on laskettu yhtälön (2) avulla. Esimerkkisijoitukset on esitetty liitteessä 3. Kuvaajia vastaavat taulukot VII-IX ovat liitteessä 4.



Kuva 24 Lämmönvaihtimen 01E103 teho mittauskerroilla 34-42.



Kuva 25 Lämmönvaihtimen 04E306 teho mittauskerroilla 43-48.



Kuva 26 Lämmönvaihtimen 04E308 teho mittauskerroilla 49-54.

12 TULOSTEN TARKASTELU

Työssä tutkittiin L&T Recoilille hankitun tyhjiökaasunpoistimen kaasun erotuskykyä jäähdytysverkoston nesteestä. Erotuskykyä seurattiin selkeytymisajan ja lämmönsiirtimien tehon paranemisen avulla. Tutkimukset tehtiin ennen tyhjiökaasunpoistimen asennusta sekä kahden viikon sisällä asennuksesta. Selkeytymisajan mittaamisessa käytettiin litran tilavuista korkeaa mittalasia, johon jäähdytysneste-

näyte, noin 800 ml, otettiin näyteenottoyhteestä ja mitattiin selkeytymisaika. Mittausaikataulu selkeytymiskokeille on esitetty liitteessä 1. Lämmönsiirtimien tehon määrittämiseksi tarvittavat tiedot saatiin regenerointiprosessin ohjausjärjestelmästä.

12.1 Selkeytymiskokeet

Tarkasteltaessa lämmönvaihtimen 02E203 näyteenottoyhteestä tehtyjä selkeytymiskokeita (taulukkoa IV) huomataan selkeytymisajan lyhenevän ajasta 5 min 1 s aikaan 2 min eli noin 60 % kahden viikon aikana. Kuvan 21 perusteella selkeytymisaika lyhenee aluksi nopeasti ajasta 5 min 1 s aikaan 2 min 47 s (mittaukset 1–4) ja sitten hidastuen, ajasta 2 min 32 s aikaan 2 min (5–11), pois lukien mittauskerran 7, jolloin selkeytymisaika kasvaa edeltävään mittauskertaan 14.6 %. Mittauskerran 7 tuloksen selittää jäähdytysverkoston paineennosto, jossa kiertopumpun paine nostettiin paineesta 6.5 bar paineeseen 7.5 bar operointisyistä. Paineennoston vaikutuksesta selkeytyminen on hitaampaa Henryn lain perusteella, koska nesteessä on suurempi osuus liuennutta kaasua ja kuplakoko on pienempi. Paineennoston jälkeen, mittauskerroilla 8–11, selkeytymisaika lyhenee enää vain 3 sekuntia.

Lämmönvaihtimen 02E204 näyteenottoyhteestä tehtyjen selkeytymiskokeiden tulokset (taulukko V) ovat hyvin vastaavanlaiset kuin 02E203:n tapauksessa. Selkeytymisaika lyhenee kokonaisuudessaan 51.9 %, ajasta 6 min 56 s aikaan 3 min 20 s. Kuvan 22 perusteella selkeytymisaika lyhenee aluksi nopeammin, ajasta 6 min 56 s aikaan 4 min 9 s (12–17) ja sitten hidastuu, ajasta 3 min 37 s aikaan 3 min 20 s (19–22). Paineennoston vaikutuksesta selkeytymisaika pitenee mittauskerrasta 17 kertaan 18 6.4 %.

Myös lämmönvaihtimen 06E702 näyteenottoyhteestä tehdyissä selkeytymiskokeissa (taulukko VI) on havaittavissa vastaavanlainen selkeytymisajan lyheneminen, joka on ajasta 19 min 58 s aikaan 12 min 45 s eli 36.1 %. Kuvan 23 perusteella selkeytymisaika lyhenee ajasta 19 min 58 s aikaan 14 min 14 s (23–30), mutta sitten kasvaa ajasta 12 min 14 s aikaan 12 min 45 s (31–33). Paineennoston vaikutuksesta selkeytymisaika pitenee mittauskerrasta 28 kertaan 29 15.1 %.

Yllä esitetyistä tuloksista ilmenee Henryn lain vaikutus selkeästi: selkeytymisaika on pidempi, mitä suurempi paine on. Lämpötilan vaikutukset ilmenevät selviten lämmönvaihtimelta 06E702 otetuissa näytteissä: mittauskerroilla 31–33 ulkolämpötila laski alle 10 °C, jolloin myös selkeytyneen näytteen lämpötila (T_2) laski selvästi. Tämä voi osaltaan olla syynä selkeytymisajan kasvuun. Samoin alhainen lämpötila on voinut vaikuttaa 02E203 ja 02E204 tehtyihin kokeisiin, koska mittauskerroilla 8-11 ja 19–22 selkeytymisnopeus ei juurikaan enää parane.

Alkuoletuksen mukaisesti jäähditysnesteen kaasupitoisuuden olisi pitänyt laskea lähelle arvoa 0 mg/l kahden viikon aikana tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä. Tämä siis olisi merkinnyt selkeytymisajan lähenemistä nolaa sekuntia. Täydelliseen kaasun erottumiseen jäähditysnesteestä ei päästy. Selkeytymisajat paraniivat alkuarvoistaan 60 % 02E203:lla, 52 % 02E204:lla ja 36 % 06E702:lla. Liitteessä 2 esitetyissä, mittausaikataulun mukaisesti otetuissa, selkeytyksen alkuhetken kuvissa 3–14 havaitaan silmämääräisesti kaasukuplien väheneminen liuoksen läpinäkyvyyden parantumisena. Selkeimmin eron huomaa 02E203:lta ja 02E204:lta otetuista kuvista, kun taas 06E702:lla muutos on lähinnä valkoisesta vaahdosta vaalean keltaiseksi nesteeksi. Kuvat kertovat jo itsessään, että nesteen seassa on edelleen paljon vapaata ja liuennutta kaasua.

12.2 Lämmönvaihtimien teho

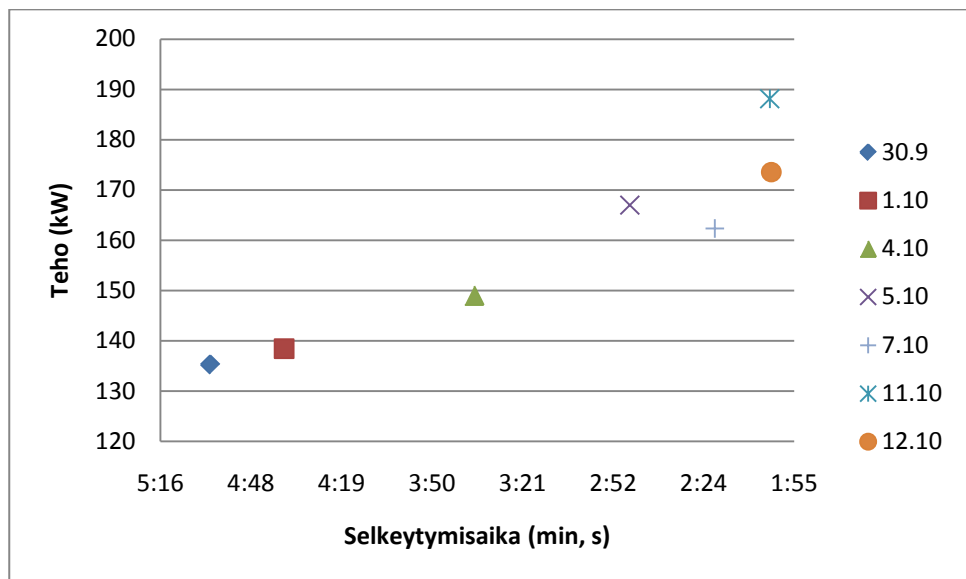
Alkuoletuksen mukaan lämmönsiirtimien tehon tulisi kasvaa, kun jäähditysnesteeseen liuennut kaasu ja liukenemattomat kaasukuplat poistuvat 2 viikon seurantajaksolla (Eqvist 2010). Tällöin kaasukuplien viemä lämmönsiirtopinta-ala siirtyy nesteelle, jonka lämmönsiirtokyky on moninkertainen kaasuun verrattuna.

Kuvassa 24 (taulukko VII) esitetyt 01E103 teholumemat paranevat tarkastelujaksolla arvosta 135.3 kW arvoon 190.2 kW eli 28.9 %. Lämmönvaihtimella 04E306 (kuva 25, taulukko VIII) vastaava tehon nousu on arvosta 280,1 kW arvoon 297,1 kW eli 5.7 %. Lämmönvaihtimella 04E308 (kuva 26, taulukko IX) puolestaan tehon nousu on arvosta 632.9 kW arvoon 671.9 kW eli 5.8 %. Kuvista 24–26 tehon kasvu ilmenee selkeästi ja on melko tasaista. Kuva 26 vastaa parhaiten selkeytymisnopeuden paranemista: aluksi selkeytyminen kasvaa nopeinten, jolloin

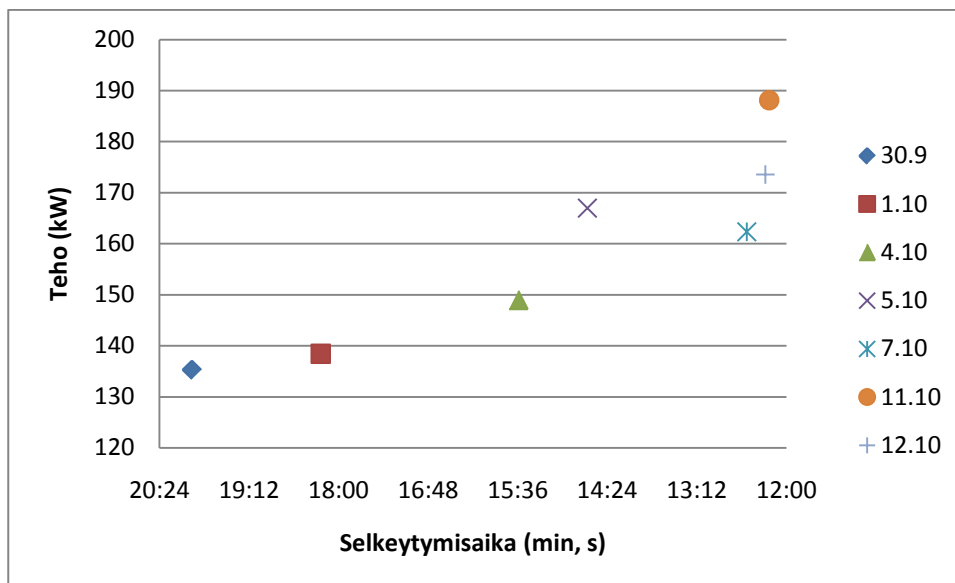
myös lämmönvaihtimen teho kasvaa eniten, koska kaasukuplien määrä vähenee eniten.

Lämmönvaihtimien 04E306 ja 04E308 tehon paraneminen on yhtenevä verrattuna lämmönvaihtimeen 01E103. Tämä selittyy sillä, että edellä mainitut lämmönvaihtimet ovat molemmat jakotislauskolonnin järjestelmässä ja täten jäädyttävät erilaisia prosessivirtoja verrattuna kaasuöljykolonnissa olevaan 01E103 lämmönvaihtimeen.

Selkeytymisajan ja lämmönvaihtimien tehon välistä korrelaatiota voidaan vielä tarkastella asettamalla kuvaajaan eri akseleille selkeytymisajan muuttuminen ajan suhteen ja lämmönvaihtotehon muuttuminen ajan suhteen. Valitaan lämmönvaihtimen 01E103 tehon paraneminen tarkasteltavaksi laajimman mittaustietojen takia ja verrataan sitä mittauspisteiden 02E203 (kuva 27) ja 06E702 (kuva 28) selkeytymisaikojen lyhenemisiin.



Kuva 27 Lämmönvaihtimen 01E103 tehon paraneminen (y-akseli) suhteessa mittauspisteessä 02E203 mitattuihin selkeytymisaikoihin (x-akseli) 30.9.-12.10.2010 välisenä aikana.



Kuva 28 Lämmönvaihtimen 01E103 tehon paraneminen (y-akseli) suhteessa mittauspisteessä 06E702 mitattuihin selkeytymisaikoihin (x-akseli) 30.9.-12.10.2010 välisenä aikana.

Kuvista 27 ja 28 havaitaan, että selkeytymisajan lyhetyssä (kahdessa eri mittauspisteessä) lämmönsiirtoteho vaihtimella 01E103 kasvaa. Tämä osoittaa lämmönsiirtotehon ja jäähdytysnesteen kaasupitoisuuden välisen korrelaation alkuoletuksen mukaisesti.

12.3 Virhelähteet

Selkeytymisajan mittaamisessa syntyi pientä virhettä loppupään mittauksissa, koska rajapinta ei ollut täysin selkeä, kuten kokeiden alkuvaiheessa, jolloin kaasua oli nesteen seassa enemmän. Myös pitkäkestoinen selkeytyminen lämmönvaihtimella 06E702 aiheutti virhettä tarkasteluun. Ulkolämpötila laski seurantajakson aikana lähelle nollaa, joka tietysti laski tutkittavan nesteen lämpötilaa. Se puolestaan hidasti selkeytymistä. Paikoittain voimakas tuuli saattoi myös vaikuttaa selkeytymisnopeuteen. Parempien tulosten saamiseksi selkeytymiskokeet olisi tullut suorittaa vakiolämpötilassa tuulen suojaisassa paikassa, mutta sellaisen koejärjestelyn toteutus olisi ollut hankalaa.

Tietojen kerääminen ohjausjärjestelmästä lämmönvaihtimen tehon määrittämiseen hankaloitui, kun vaihtimien virtaussäätöpiirit olivat automaattiasetuksella osan tarkastelujaksosta ja seurantajakson aikana prosessin jäähdytystarpeessa tapahtui

hetkellisiä muutoksia muun muassa koeajojen ja häiriötilanteiden takia. Tästä syystä ne olivat jatkuvalla säädöllä, jolloin tiettyä virtausta (eli tiettyä säätöventtiilin asentoa) edustavaa mittaustietoa oli hankala kerätä. Osa tiedoista on kerätty siten, että virtausta säättävä venttiili on hetkellisesti tietyssä asennossa, eikä pitkäkestoisesti, jolloin saataisiin parhaiten tilannetta kuvaavat tulokset. Luotettavimpien tulosten saamiseksi tarkastelujakso olisi pitänyt olla pidempi, jolloin sopivaa mittaustietoa olisi syntynyt enemmän.

13 KOKEELLISEN OSION JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMINTAEHDOTUS

Kokeellisessa osiossa tutkittiin L&T Recoilille hankitun tyhjiökaasunpoistimen soveltuvuutta suljetun kiertojäähdytysjärjestelmän kaasunpoistoon. Seurantaparametreina olivat jäähdytysnesteen selkeytymisaika ja valittujen lämmönvaihtimien tehon paraneminen.

Tyhjiökaasunpoistimen käyttöönotolla oli selkeästi havaittava vaikutus jäähdytysnesteen kaasupitoisuuteen. Silmämääräisten tarkastelujen, selkeytymisaikojen paranemisen ja lämmönsiirtimien tehon suurenemisen perusteella voidaan sanoa jäähdytysnesteen kaasupitoisuuden pienentyneen. Laitteella ei kuitenkaan päästy odotettuun tilaan eli kaasuttomaan jäähdytysnesteeseen kahden viikon seurantaajassa. Alla on esitetty syitä tähän.

Tyhjiökaasunpoistimen käyttöönoton (30.9.2010) jälkeen, laite alkoi toimia halutulla tavalla eli poistamaan kaasua jäähdytysnesteen seasta. Kappaleissa 12.1 ja 12.2 esitettyjen tulosten perusteella alku näytti vakuuttavalle. Laitte toimi yhtäjaksoisesti ensimmäiset 4 päivää käynnistyksestä. Tämän jälkeen laitteen toiminnassa alkoi ilmetä ongelmia, joiden takia se pysähtyi usein virhetilaan. Lisääntyvä pysähtely hidasti luonnollisesti kaasun erottumista. Tämä havaitaan selkeytymisaikojen paranemisen hidastumisena (kuvat 21–23) sekä selkeästi lämmönvaihtimen 04E308 tehon paranemisessa (kuva 28).

Pysähtelyyn johtaneet virhetilat aiheutuivat todennäköisesti laitteen toimintaympäristön muutoksista. Regenerointiprosessin tarvitseman jäähdystehon taso vaihtelee riippuen tuotantokapasiteetista, raaka-aineen laadusta sekä poikkeamatilanteista. Näistä johtuvia vaihteluita jäähdytysnesteen lämpötilassa ja paineessa tyhjiökaasunpoistin ei automaattisesti pysty käsittelemään siten, että kaasunerotusprosessin tasapaino pysyisi vakiona. Kaasunerotuksen tasapainoon vaikuttaa laitteeseen annosteltavan kaasurikkaan nesteen annostelu-aika, sen pois-pumppaus-aika tyhjiöputkesta (kts. kuva 19 kohta 20), määritetty lepoaika (jonka neste on tyhjiösumutusputkessa ilman sumutusta tai pumppausta) ja painepuolen kuristus (kts. kuva 19 kohta 3, jolla säädetään tyhjiösumutusputkesta poistuvan nesteen virtausnopeutta) (Pitkänen 2010). Näitä arvoja muuttamalla tyhjiökaasunpoistimen toiminnallinen tasapaino täytyy manuaalisesti hakea. Jokaisen pysähtymisen jälkeen laitetta tuli säätää, jotta se pysyi käynnissä.

Edellä mainituissa seikoissa piilee laitteen suurin heikkous: automatiikan puute. Laite ei osaa automaattisesti säätää sopivaa tasapainotilaa muuttamalla painepuolen kuristusta, nesteen syöttöä tyhjiösumutusputkeen, lepoaikaa tai pois-pumppausaikaa, vaan nämä säädöt täytyy tehdä käsin, aina kun toimintaympäristössä tapahtuu muutoksia (lämpötila, paine). Jatkuva säätäminen vaatii paljon työtä, koska tasapaino täytyy hakea kokeilemalla. Tämän asian vahvistaa myös tyhjiökaasunpoistimen valmistajan, Reflexin, tekemä tuotekehitys: uusimmissa tyhjiökaasunpoistinmalleissa on automatiikkaa selvästi lisätty (Reflex Servitec 2010).

Säätöjen tekeminen ja vikojen selvittäminen vaatii perehtymistä laitteen toimintaan ja yhteydenpitoa laitetoimittajaan. Tämän teettäminen tehtaalla työskentelevillä vuoro-operaattoreilla on täten hankalaa. Säätöä tekevän henkilön täytyy olla myös perillä viimeisimmistä säädöistä, jotta tasapainon haku suoritetaan oikein. Laitteen käyttöohjeessakin (Reflex 2009) sanotaan, että kaikki säätäminen tulee tehdä koulutetun huoltohenkilön toimesta.

Tyhjiökaasunpoistimen kaasunpoistokyvyn tutkimista ei voitu jatkaa kahden viikon tarkastelujakson jälkeen, koska laitteessa ilmeni toiminnallinen vika, jonka johdosta alipaineen muodostaminen ei onnistunut. Tässä vaiheessa laitteen jatku-

va säätäminen päätettiin heikkojen tulosten ja suuren työmäärän takia lopettaa sekä ottaa laite pois käytöstä toistaiseksi.

Laite on suunniteltu pääasiassa lämmitysvesiverkostojen kaasunpoistoon, jossa vallitseva lämpötila ja paine pysyvät lähes vakiotasolla sekä sijoitettavaksi lämpimään sisätilaan, eikä tehdasympäristöön. Loppupäätelmänä voidaan todeta, että kyseinen laite ei sovellu tehdaskäyttöön ja sen vaativiin olosuhteisiin.

Seurantajakson jälkeen jäähdytysnesteeseen jäi kaasua. Kaasupitoisuus on todennäköisesti kasvanut, koska jäähdytysverkostoon on tarkastelujakson jälkeen lisätty kaupunkivettä, johon on liuenneena ilmaa. Korroosio kuluttaa edelleen jäähdytysverkostoa ja lämmönvaihdivien teho ei ole halutulla tasolla.

Toimintaehdotuksena esitetään tehtaalle hankittavaksi sertifioitu vedenkäsittelylaite Elysator. Elysator poistaa jäähdytysnesteen seasta kaasun, sakan ja tuottaa korroosiosuojan, joka perustuu katodisuojaukseen (Elysatorin toimintaperiaate 2010). Toimintavarmuus tällä laitteella on huomattavasti parempi kuin Reflexin tyhjiökaasunpoistimella, koska Elysatorilla on pitkä referenssilista vastaavanlaisesta käytöstä muilla tehtailla, ei pelkästään kiinteistöjen lämmitysvesiverkostoissa (Asiakaslista 2010). Hankinta on lisäksi riskitön, koska laitteella on 1 vuoden toimintatakuu. Ainoa operointi, jota laite vaatii, on pohjalle kertyvän sakan poisto tyhjennysventtiilistä, joten sen käyttö on yksinkertaista. Laite ei vaadi lämmitettyä ja säältä suojattua tilaa, koska se toimitetaan eristettynä.

14 LÄHTEET

Alfa Laval. 2003. *Fincoil Solar Max nestejäähdyttimet ja lauhduttimet*. [Tuotesite]. Alfa Laval. [Viitattu 1.2.2011]. Saatavissa:

http://www.fincoil.fi/showfile.php?file=SMAXmanual_suo.pdf

Asiakaslista. [IWTM Finland Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 28.11.2010]. Saatavissa: <http://www.iwtm.com/index.php/fi/asiakkaitamme>

Bloemkolk, J. W. & van der Schaaf, R. J. 1996. *Design alternatives for the use of cooling water in the process industry: minimization of the environmental impact from cooling systems*. Journal Cleaner Production. [Verkkolehti]. Vol. 4 :1, s. 21-27. [Viitattu 30.1.2011]. PII: S0959-6526(96)00022-4

Capehart B. L. & Mossad, R. 2007. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology - Cooling Towers* - 13. painos. Yhdysvallat. Taylor & Francis. s. 246–254. ISBN 978-0-8493-3653-9 (painettu), 978-0-8493-3896-0 (elektroninen)

CEPA (California environmental protection agency). 2010. *Power Plant Once-Through Cooling Regulation 316(B)*. [Viitattu 9.1.2011]. Kalifornia. Yhdysvallat. Saatavissa:

http://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/npdes/cwa316.shtml

Cheremisinoff, N.P. & Cheremisinoff, P.N. 1981. *Cooling Towers: Selection, Design and Practice*. Yhdysvallat. Ann Arbor Science.

Couper, J. R. & Penney, W. R. & Fair, J. R. & Walas, S. M. 3. painos. *Chemical Process Equipment - Selection and Design*. 2010. Yhdysvallat. Elsevier. s. 260-278. ISBN 978-0-12-372506-6 (painettu), 978-0-08-091972-0 (elektroninen).

Elysatorin toimintaperiaate. 2010. [IWTM Finland Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 28.11.2010]. Saatavissa:

<http://www.iwtm.com/index.php/fi/elysator/toimintaperiaate>

EU-neuvosto. 2000. *Direktiivi 96/61/EY §16 kohta 2: Teollisuuden jäähdytysjärjestelmät*. Referenssiasiakirja. Suomen ympäristökeskus.13 s.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2008. *Cooling Water Intake Structures - Basic Information*. [Viitattu 5.1.2011]. Washington, D.C. Yhdysvallat. Saatavissa: <http://water.epa.gov/lawsregs/lawguidance/cwa/316b/basic.cfm>

Eqvist, Ralf. Kaasunpoistimen säätö. Termovent Oy. Sähköpostiviesti. 12.10.2010.

Flynn, D. J. 2009. *Nalco Water Handbook*. 3. painos. Yhdysvallat. McGraw-Hill. 1351 s. ISBN 978-0-07-154883-0.

GE Water. 2007. *Handbook of Industrial Water Treatment - Cooling water systems*. Internet-tietokanta. Kappaleet 23-34. [Viitattu 9.1.2011]. GE Power & Water Ltd. Saatavissa: <http://www.gewater.com/handbook/index.jsp>

Gougol, M. & Cham, J. P. & Resnani H. D. 2009. *Optimal Cooling Systems For Coastal Plants*. Chemical Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 116:5. S. 45-49. [Viitattu 11.8.2010]. Saatavissa: <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=1781800051&sid=1&Fmt=2&clientId=23486&RQT=309&VName=PQD>. ISSN: 0009-2460.

Hammo, S. 1994. *Lämmönsiirtimien likaantuminen - lämpö- ja virtaustekniikan jatkokurssi*. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 19 s. ISBN: 951-763-923-6.

Hensley, J.C. 2009. *Cooling Tower Fundamentals*. [Verkkojulkaisu]. Kansas. Yhdysvallat. SPX Technologies, Inc. 117 s. [Viitattu 23.1.2011]. Saatavissa: <http://spxcooling.com/en/library/detail/cooling-tower-fundamentals/>

Herro, H.M. & Port, R.D. 1993. *NALCO Guide to Cooling Water System Failure Analysis*. Yhdysvallat. McGraw-Hill. 420 s. ISBN 978-0-07-028400-5.

Hoots, J. E. & Johnson, D.A. & Lammering, J.D. & Meier, D.A. 2001. *Correctly Operate Cooling Towers*. In Proceedings of 60th Annual International Water Conference 2001. s. 30-36. Pittsburgh. Yhdysvallat. Saatavissa: www.aiche.org/uploadedFiles/CEP/Issues/030129.pdf

Isoaho, S. & Valve, M. 1988. *Vesikemian perusteet*. 2. painos. Espoo. Otakustantamo. 264 s. ISBN 951-672-048-X.

Kirkkala T. & Turkki K. 2005. *Rauman ja Eurajoen edustan merialue*. Teoksessa: Sarvala M. & Sarvala J. (toim.), *Miten voit, Selkämeri? Ympäristön tila Lounais-Suomessa 4*, Lounais-Suomen ympäristökeskus, Turku, s. 48-65.

Pitkänen, Henri. 2010. Reflex servitec 120GL: käyttöohje, toimintakuvaus ja huoltotoimenpiteet. L&T Recoil Oy. Sisäinen dokumentti.

Perry, R.H. & Green, D.W. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7. painos. Yhdysvallat. McGraw-Hill. 2581 s. ISBN 978-0-07-049841-9 (painettu), 978-1-59124-278-9 (elektroninen)

Raita, A. 2006. *Tilannekatsaus Fouling-eliöstöstä Suomen lämpövoimalaitosten jäähdytysvesijärjestelmissä*. [Viitattu 18.12.2010]. ÅF-Enprima Oy ja Ympäristötutkimus. Saatavissa:

<http://www.energia.fi/fi/julkaisut/ymparistopooli/tutkimusaineisto/tilannekatsaus-fouling-eliostosta-suomen-lampovoimalaitosten-jaahtytysvesijarjestelmissa.html>

Reflex Servitec. [Termovent Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 28.11.2010]. Saatavissa: <http://www.termovent.fi/tuotteet/reflex-kaasun-poistajat/reflex-servitek-kaasunpoistajat-tyhjioeputkiteknikalla.html>

Reflex Winkelmann GmbH + Co. KG. 1999. *Deaeration of heating and cooling systems: Theoretical foundations and practical solutions*. 1999. Esite. Saatu käyttöön laitetoimittajalta Termovent Oy:stä.

Reflex Winkelmann GmbH + Co. KG. 2009. 'servitec 35-95'-tyhjiökaasunpoistin: Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje. Versio 05/09. Saatu käyttöön laitetoimittajalta Termovent Oy:stä.

SED (Spray Engineering Devices Ltd.). 2009. [Viitattu 21.1.2011]. [Internet sivusto]. Saatavissa: <http://www.sedl.in/spraypond.php>

SPX Cooling Technologies. 2007. *Operating Cooling Towers*

In Freezing Weather. [Viitattu 23.1.2011]. [Tekninen raportti]. Saatavilla:
<http://spxcooling.com/pdf/H-003B.pdf>

Streng, A. 1998. *Combined wet/dry cooling towers of cell-type construction*. Journal of Energy Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 124 :3, s. 104–121. [Viitattu 24.1.2011]. Saatavissa: <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?114449>

Suurnäkki, M. Haminan Vesi. Puhelinkeskustelu 10.1.2011.

Walas, S.M. 1990. *Chemical Process Equipment; Selection and Design*. Boston. Yhdysvallat. Butterworth-Heinemann. 766 s. ISBN 978-0-7506-9385-1 (painettu), 978-0-0805-2344-6 (elektroninen)

Young, H.D. & Freedman, R.A. 2007. *Sears and Zemansky's university physics: with modern physics*. 12. painos. Yhdysvallat. Pearson education. 1632 s. ISBN 9780321501219

Vahterus PSHE-datasheets. 2009. *E103, E306, E308*. L&T Recoil Oy. Sisäinen dokumentti.

Mittausaikataulu selkeytymiskokeille

Kullakin mittauskerralla tehdään selkeytymiskokeet kolmesta paikasta, lämmönvaihtimien E203, E204 ja E702 läheisistä näytteenottoyhteistä.

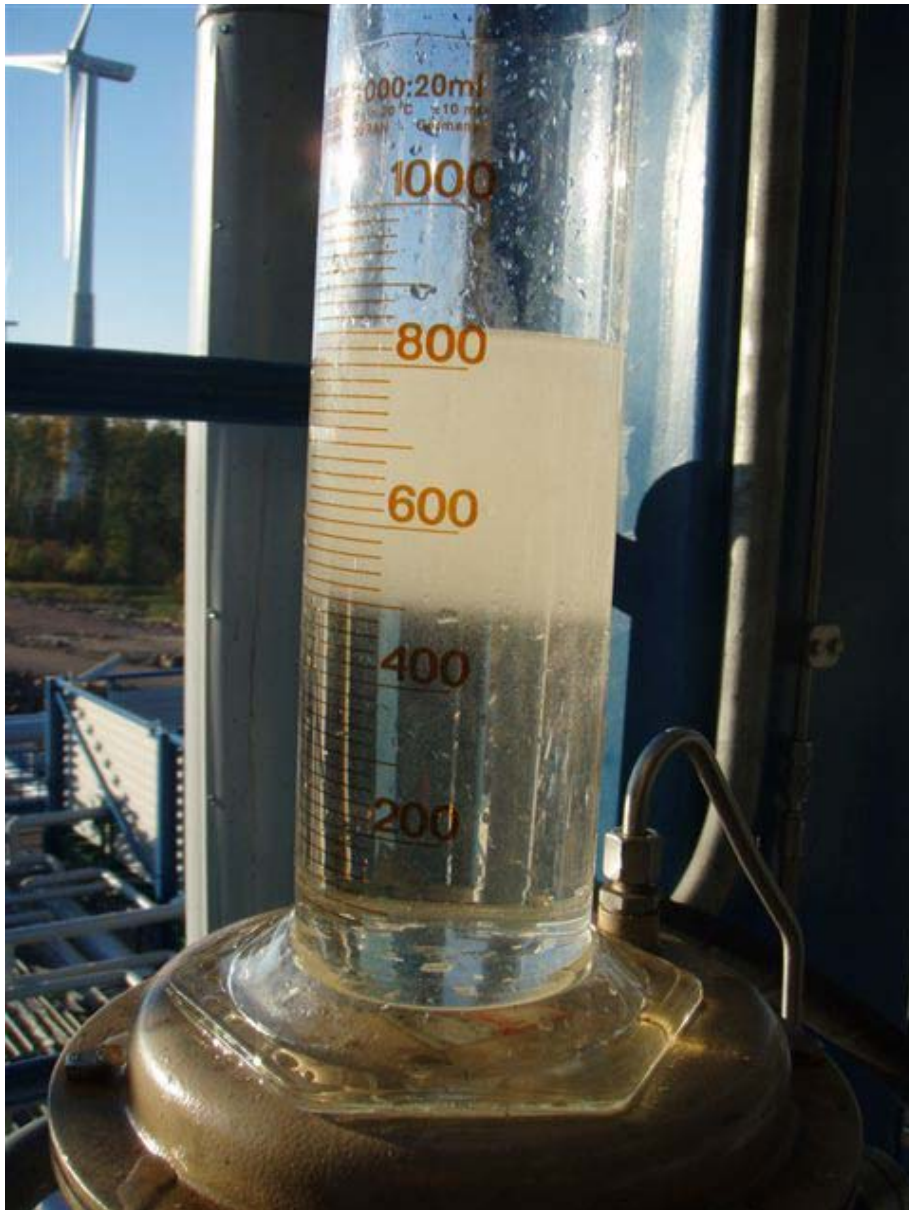
to 30.9.2010	1. mittaus, ennen käyttöönottoa, valokuvaus klo 16 tyhjiökaasunpoistimen käyttöönotto
pe 1.10.2010	2. mittaus
ma 4.10.2010	3. mittaus, valokuvaus
ti 5.10.2010	4. mittaus
ke 6.10.2010	5. mittaus
to 7.10.2010	6. mittaus
pe 8.10.2010	7. mittaus
ma 11.10.2010	8. mittaus, valokuvaus
ti 12.10.2010	9. mittaus
ke 13.10.2010	10. mittaus
to 14.10.2010	11. mittaus, valokuvaus

Liite 2 - Selkeytyskokeiden kuvat



Kuva 1

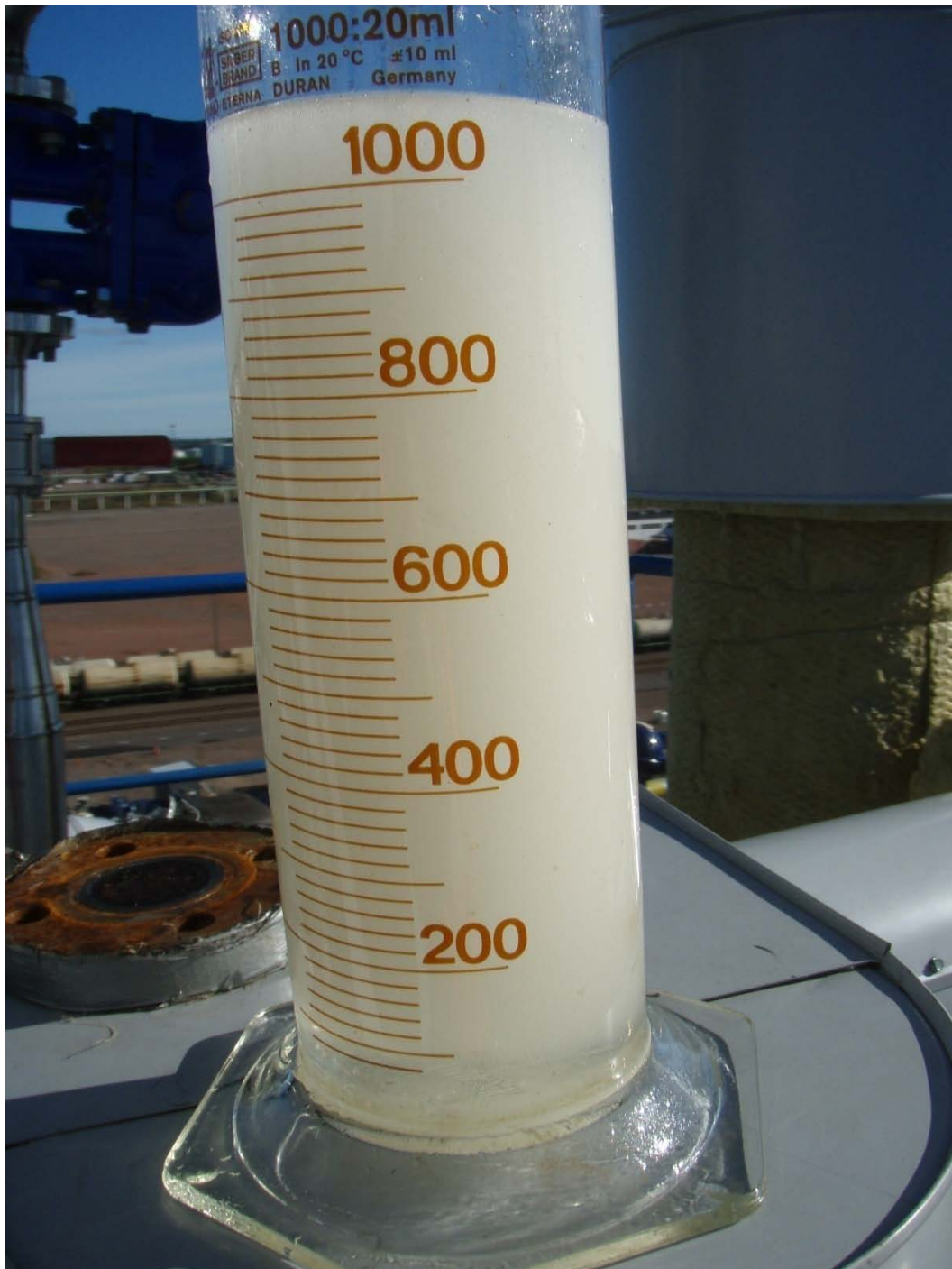
Jäähdytysnesteen tila ennen tyhjiökaasunpoistimen käyttöönottoa. Kuva on otettu prosessilaatan tasolta (lämmönvaihdin E702) 30.9.2010. Mittalasin tilavuus: 1 l, korkeus 26 cm, halkaisija 7 cm.



Kuva 2

Selkeytyminen etenee selkeänä rajapintana. Kuva on otettu lämmönvaihtimen E204 näytteenottoyhteestä 6.10.2010.

Lämmönvaihtimen 02E203 näytteenottoyhteestä tehdyt selkeytyskokeet



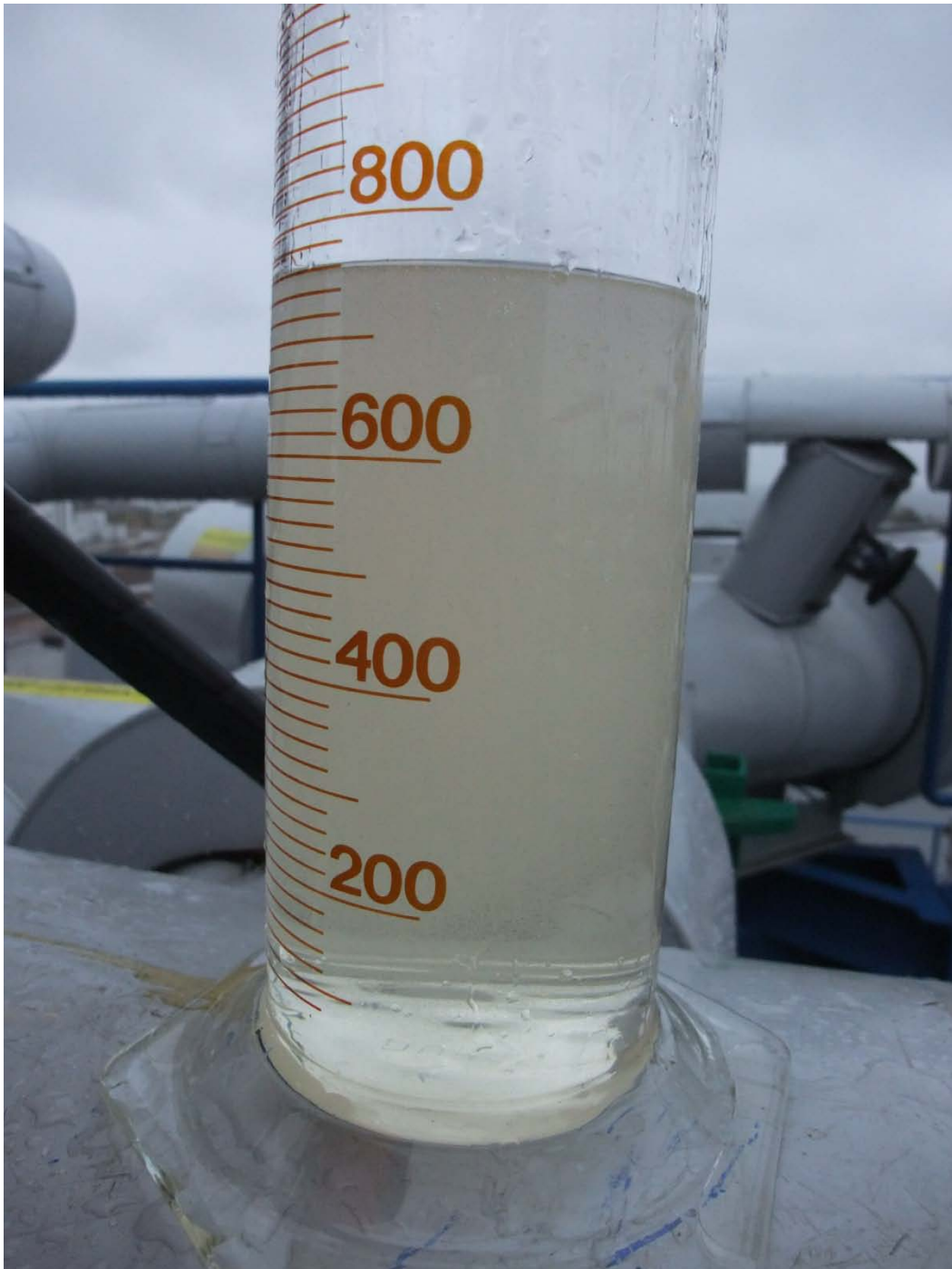
Kuva 3

Selkeytymiskoe 30.9.2010 lämmönvaihtimella E203, 1. mittaus, jäähdytysnesteen tila ennen tyhjiökäysunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 4

Selkeytymiskoe 4.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E203, 3. mittaus, jäähdytysnesteen tila 4 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämisestä.



Kuva 5

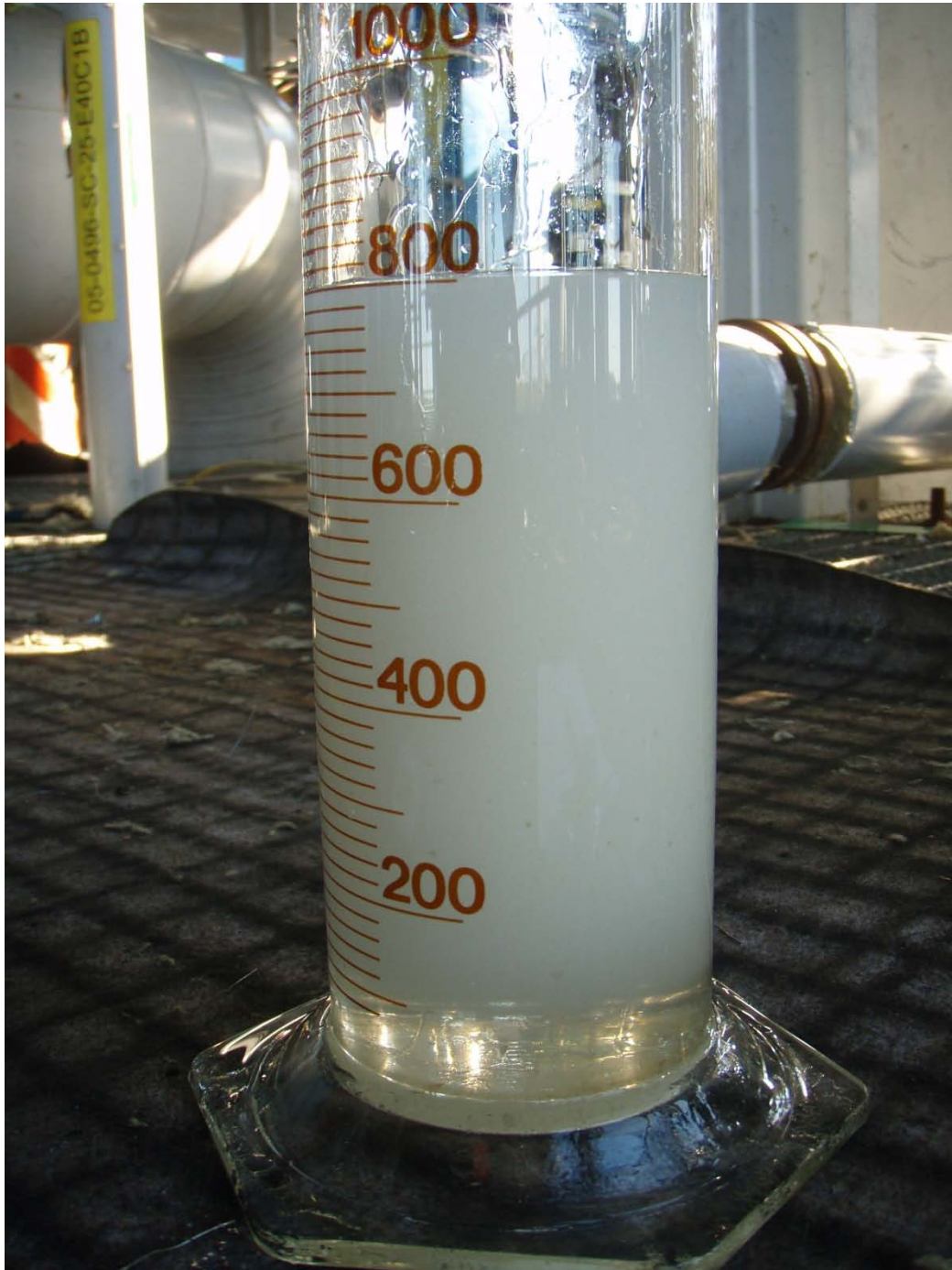
Selkeytymiskoe 11.10.2010 lämmönvaihtimella E203, 8. mittaus, jäähdytysnesteen tila 11 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 6

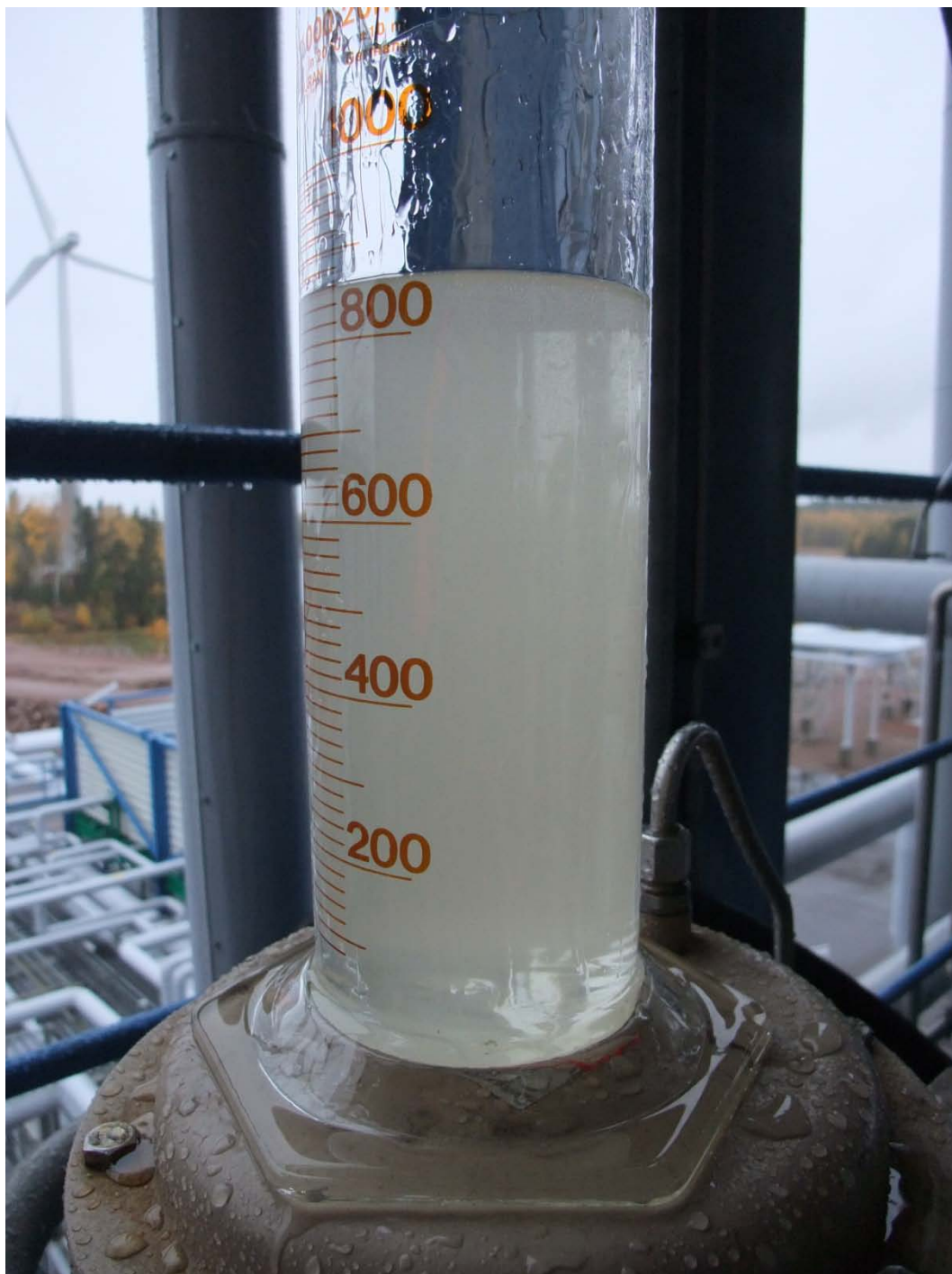
Selkeytymiskoe 14.10.2010 lämmönvaihtimella E203, 11. mittaus, jäähdytysnesteen tila 14 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.

Lämmönvaihtimen 02E204 näytteenottoyhteestä tehdyt selkeytyskokeet



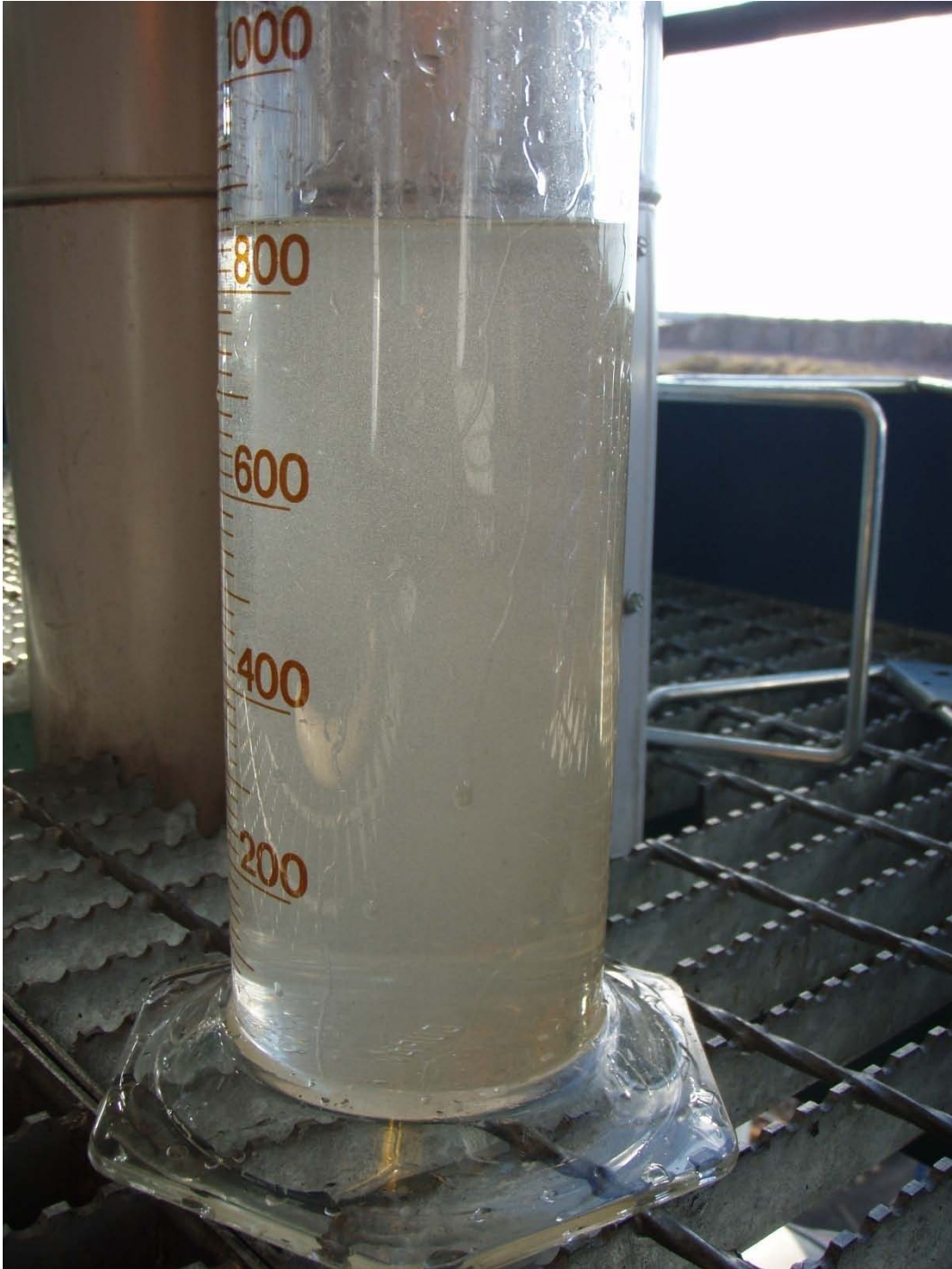
Kuva 7

Selkeytymiskoe 30.9.2010 lämmönvaihtimella E204, 1. mittaus, jäähdytysnesteen tila ennen tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



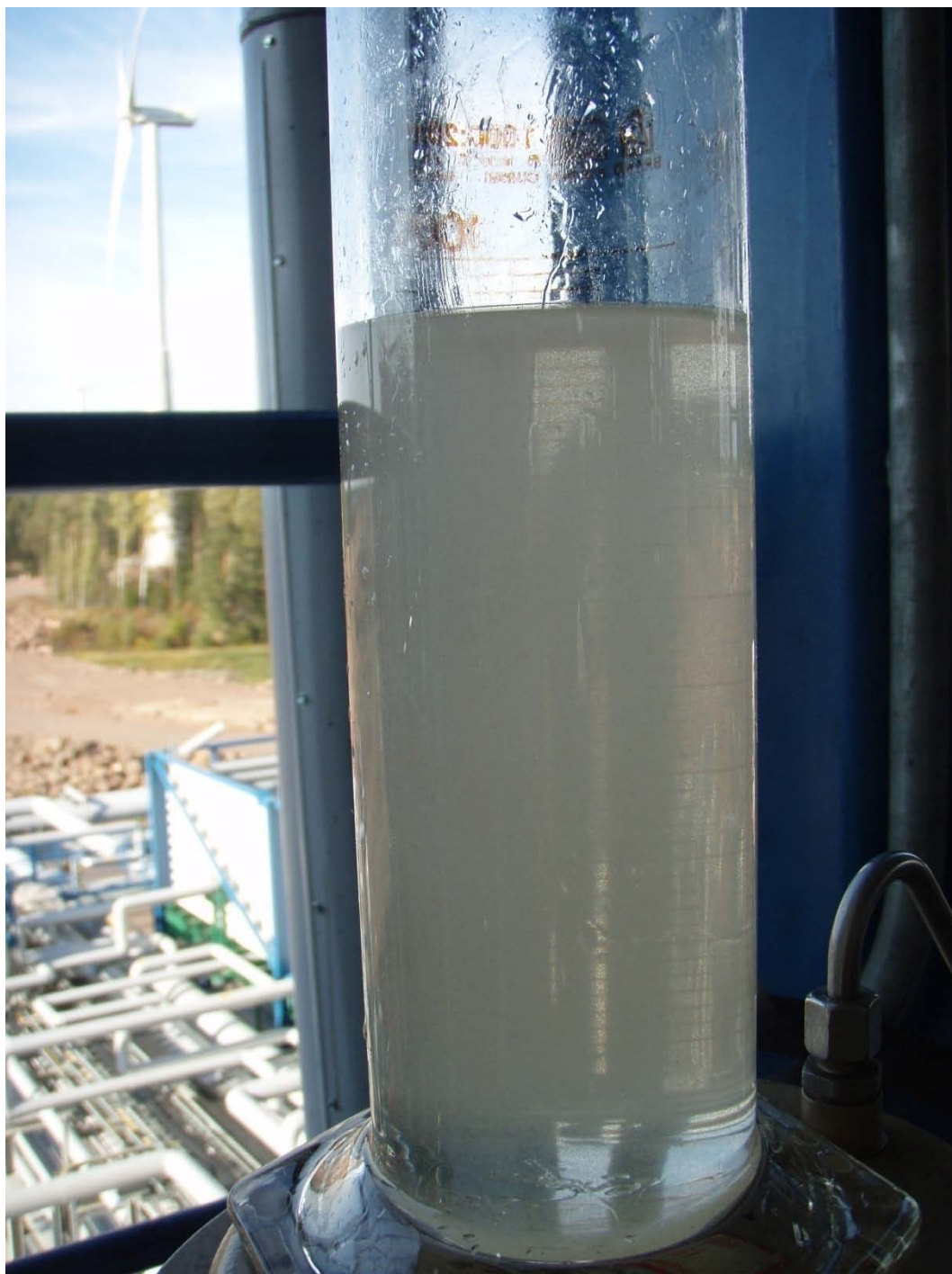
Kuva 8

Selkeytymiskoe 4.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E204, 3. mittaus, jäähdytysnesteen tila 4 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 9

Selkeytymiskoe 11.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E204, 8. mittaus, jäähdytysnesteen tila 11 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 10

Selkeytymiskoe 14.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E204, 11. mittaus, jäähdytysnesteen tila 14 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämisestä.

Lämmönvaihtimen 06E702 näytteenottoyhteestä tehdyt selkeytyskokeet



Kuva 11 Selkeytymiskoe 30.9.2010 lämmönvaihtimella E702, 1. mittaus, jäähdytysnesteen tila ennen tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 12 Selkeytymiskoe 4.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E702, 3. mittaus, jäähdytysnesteen tila 4 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 13

Selkeytymiskoe 11.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E702, 8. mittaus, jäähdytysnesteen tila 11 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.



Kuva 14

Selkeytymiskoe 14.10.2010 2010 lämmönvaihtimella E702, 11. mittaus, jäähditysnesteen tila 14 päivää tyhjiökaasunpoistimen käynnistämistä.

Esimerkkisijoitukset

Lämmönvaihtimen teho, Q , lasketaan yhtälöllä (2) seuraavasti lämmönvaihtimen 01E103 mittauskerralla numero 34

$$Q = 11.3m^2 \cdot 448W / (m^2 \cdot ^\circ C) \cdot 26.7^\circ C = 135.3kW$$

Logaritminen lämpötila, ΔT_{ln} , lasketaan yhtälöllä (3) samaiselle tapaukselle seuraavasti

$$\Delta T_{ln} = \frac{(19^\circ C - 44.4^\circ C) - (43.6^\circ C - 71.7^\circ C)}{\ln \frac{19^\circ C - 44.4^\circ C}{43.6^\circ C - 71.7^\circ C}} = 26.7^\circ C$$

Taulukot

Taulukoissa IV-VI on esitetty kappaleessa 9.1 esiteltyjen selkeytymiskokeiden tulokset. Taulukoissa käytetyt lyhenteet: Nro = näyteottokerran juokseva numero, T_u = ulkolämpötila, T_1 = nesteen lämpötila selkeytymiskokeen alussa, T_2 = nesteen lämpötila selkeytymiskokeen lopussa, t_1 = 1. mitattu selkeytymisaika, t_2 = 2. mitattu selkeytymisaika, t_{ka} = t_1 ja t_2 keskiarvo.

Taulukko IV Jäähdytysnesteen selkeytymisnopeuden mittaustulokset lämmönvaihtimen 02E203 näytteenottoyhteestä. Verkoston paine tässä kohdassa on noin 3.5 bar. Taulukko vastaa kuvaa 21.

Päivämäärä, kellonai- ka	Nro	T_u (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	t_1 (min,s)	t_2 (min,s)	t_{ka} (min,s)
30.9.2010 klo 13 (alkutilanne)	1	12	19	17	5:04	4:58	5:01
1.10.2010 klo 16:30	2	13	19	18	4:40	4:35	4:37
4.10.2010 klo 12:30	3	13	19	17	3:40	3:34	3:37
5.10.2010 klo 15:00	4	12	19	17	2:50	2:45	2:47
6.10.2010 klo 14:30	5	11	19	18	2:30	2:35	2:32
7.10.2010 klo 15:00	6	11	19	16	2:22	2:19	2:20
8.10.2010 klo 15:30	7	10	19	17	2:42	2:47	2:44
11.10.2010 klo 9	8	11	19	18	2:02	2:04	2:03
12.10.2010 klo 16	9	8	19	17	2:00	2:05	2:02
13.10.2010 klo 16	10	6	19	16	1:57	2:03	2:00
14.10.2010 klo 15	11	4	19	16	2:04	1:56	2:00

Taulukko V Jäähdytysnesteen selkeytymisnopeuden mittaustulokset lämmönvaihtimen 02E204 näytteenottoyhteestä. Verkoston paine tässä kohdassa on noin 4.5 bar. Taulukko vastaa kuvaa 22.

Päivämäärä, kellonai- ka	Nro	T_u (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	t_1 (min,s)	t_2 (min,s)	t_{ka} (min,s)
30.9.2010 klo 13 (alkutilanne)	12	12	19	16	7:02	6:50	6:56
1.10.2010 klo 16:30	13	13	19	16	6:45	6:39	6:42
4.10.2010 klo 12:30	14	13	19	16	5:45	5:35	5:40
5.10.2010 klo 15:00	15	12	19	17	5:00	5:12	5:06
6.10.2010 klo 14:30	16	11	19	17	4:32	4:38	4:35
7.10.2010 klo 15:00	17	11	19	17	4:11	4:07	4:09
8.10.2010 klo 15:30	18	10	19	16	4:22	4:31	4:26
11.10.2010 klo 9	19	11	19	17	3:34	3:41	3:37
12.10.2010 klo 16	20	8	19	17	3:22	3:26	3:24
13.10.2010 klo 16	21	6	19	16	3:20	3:17	3:18
14.10.2010 klo 15	22	4	19	15	3:18	3:22	3:20

Taulukko VI Jäähdytysnesteen selkeytymisnopeuden mittaustulokset lämmönvaihtimen 06E702 näytteenottoyhteestä. Verkoston paine tässä kohdassa on noin 6.5 bar. Taulukko vastaa kuvaa 23.

Päivämäärä, kellonai- ka	Nro	T _u (°C)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	t ₁ (min,s)	t ₂ (min,s)	t _{ka} (min,s)
30.9.2010 klo 13 (alkutilanne)	23	12	19	13	21:02	18:54	19:58
1.10.2010 klo 16:30	24	13	19	14	18:35	17:54	18:14
4.10.2010 klo 12:30	25	13	19	14	15:20	15:51	15:35
5.10.2010 klo 15:00	26	12	19	13	14:48	14:32	14:40
6.10.2010 klo 14:30	27	11	19	15	13:12	13:45	13:28
7.10.2010 klo 15:00	28	11	19	14	12:58	12:06	12:32
8.10.2010 klo 15:30	29	10	19	13	15:06	14:26	14:46
11.10.2010 klo 9	30	11	19	14	12:49	11:39	12:14
12.10.2010 klo 16	31	8	19	12	11:57	12:37	12:17
13.10.2010 klo 16	32	6	19	11	12:48	13:02	12:55
14.10.2010 klo 15	33	4	19	10	12:32	12:58	12:45

Taulukoissa VII-XI on esitetty regenerointiprosessin ohjausjärjestelmästä kerätyt tiedot lämmönvaihdinten toiminta-arvoista. Teho on laskettu yhtälöllä (2). Esimerkkisijoitukset on esitetty liitteessä 3. Taulukoissa käytetyt lyhenteet: T₁= lämmönvaihtimeen tuleva kylmä virta eli jäähdytysneste, T_{k2} = lämmönvaihtimesta lähtevä kylmä virta, T₃ = lämmönvaihtimeen tuleva lämmin virta, T₄ = lämmönvaihtimesta lähtevä lämmin virta.

Taulukko VII Lämmönvaihtimen 01E103 toiminta-arvot ja teho sellaisina ajankohtina, jolloin virtausta säätelevän venttiilin asento on ollut 50 %. Taulukko vastaa kuvaa 24.

Päivämäärä, kellon- aika	Nro	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	XA (%)	Teho (kW)
30.9.2010 klo 5:38	34	19	43.6	71.7	44.4	50	135.3
1.10.2010 klo 11:49	35	18	44.1	71.8	45	50	138.45
4.10.2010 klo 1:46	36	19	45.5	77.4	46.1	50	149.01
5.10.2010 klo 06:05	37	19	47.1	84.3	48.1	50	166.98
7.10.2010 klo 8:00	38	19	45.1	80.8	47.7	50	162.37
11.10.2010 klo 9	39	19	45.6	93.3	47.3	50	188.12
12.10.2010 klo 17:47	40	19	49.3	87.9	49.3	50	173.55
16.10.2010 klo 5:24	41	19	39.6	93.2	45.6	50	195.09
17.10.2010 klo 13:05	42	19	42.7	93.9	45.6	50	190.18

Taulukko VIII Lämmönvaihtimen 04E306 toiminta-arvot ja teho sellaisina ajankohtina, jolloin virtausta säätelevän venttiilin asento on ollut noin 20 %. Taulukko vastaa kuvaa 25.

Päivämäärä, kellon-aika	Nro	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	XA (%)	Teho (kW)
4.10.2010 klo 8:02	43	19	87.7	154.9	45.8	20.2	280.11
5.10.2010 klo 13:24	44	19	89.1	157.1	46	19.77	282.91
6.10.2010 klo 17:03	45	19	89.9	158.7	46	19.64	284.83
7.10.2010 klo 12:38	46	19	92.6	162.1	46	19.9	286.49
8.10.2010 klo 1:52	47	19	92.6	165.8	46	20.1	295.24
17.10.2010 klo 19:42	48	19	87	167.3	43	20.21	297.12

Taulukko IX Lämmönvaihtimen E308 toiminta-arvot ja teho sellaisina ajankohtina, jolloin virtausta säätelevän venttiilin asento on ollut 50 %. Taulukko vastaa kuvaa 26.

Päivämäärä, kellon-aika	Nro	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	XA (%)	Teho (kW)
2.10.2010 klo 4:36	49	19	23.3	237.5	51.1	50	632.92
4.10.2010 klo 12:13	50	19	24.3	239.2	53.2	50	648.59
5.10.2010 klo 11:54	51	19	24.1	241.7	53.9	50	658.56
6.10.2010 klo 9:59	52	19	21.9	242.3	54.1	50	665.36
7.10.2010 klo 23:16	53	19	22.8	242.2	55.1	50	670.08
8.10.2010 klo 10:26	54	19	22.2	242.2	55.2	50	671.92