



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

JOKIVESILÄMMÖNVAIHTIMIEN LIKAANTUMISEN TUTKINTA JA SEURANTA JOENSUUN VOIMALAITOKSELLA

TEKIJÄ:

Kirsi Kuivalainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Kirsi Kuivalainen	
Työn nimi Jokivesilämmönvaihtimien likaantumisen tutkinta ja seuranta Joensuun voimalaitoksella	
Päiväys 15.4.2021	Sivumäärä/Liitteet 38
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savon Voima Joensuu Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia jokivesijäähdytteisten lämmönvaihtimien likaantumista Joensuun voimalaitoksella. Työn tavoitteena oli selvittää lämmönvaihtimien optimaalinen puhdistustapa sekä pesuajankohta. Prosessidataa seuraamalla pyritään näkemään likaantumisen aiheuttamat muutokset prosessissa ja reagoimaan niihin. Työn tilaajana oli Savon Voima Joensuu Oy. Työ rajattiin Joensuun voimalaitoksen välijäähdytysjärjestelmän levylämmönvaihtimiin, joiden jäähdyttämä vesi jäähdyttää turbiinin öljyjäähdyttimiä, syöttövesipumppuja, kompressoreita ja vesinäytekokeskuksia.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin lämmönvaihtimien toimintaa ja likaantumismekanismeja kirjallisuuden avulla. Lämmönvaihtimille laskettiin ensin lämpöteho. Lämmönvaihtimien likaantumista arvioitiin rekuperatioasteen ja lämpötilojen vertailumenetelmän avulla.</p> <p>Lämpötilojen vertailumenetelmä osoittautui rekuperaatioastetta paremmaksi mittariksi lämmönvaihtimien likaisuuden määrittämiseen. Kun lämmönvaihtimen teho on hyvä, on ainevirtojen lämpötilaerot pieniä lämmönvaihtimen jälkeen. Lämmönvaihtimien likaantuessa ainevirtojen lämpötilaerot kasvavat. Lämpötilaeron ollessa viisi astetta on syytä vaihtaa puhdas lämmönvaihdin käyttöön. Menetelmää on tarkoitus jatkossa hyödyntää voimalaitoksen prosessiseurannassa, jolloin lämmönvaihtimien puhdistus voitaisiin suorittaa oikea-aikaisesti.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä selvitettiin voimalaitoksen nykyisten puhdistuskäytäntöjen rinnalle menetelmiä, jotka voivat tuoda lisähyötyä lämmönvaihtimien puhtaanapitoon. Lämmönvaihtimien puhtaanapidon kustannustehokkain menetelmä on kemiallinen puhdistus, koska sillä saavutetaan erinomainen pesutulos ja kohtuulliset puhdistuskustannukset. Paras puhdistustulos saavutetaan emäspohjaisilla pesuaineilla. Likaantumisenestoaineita ei suositella käytettäväksi, sillä niistä ei ole havaittu olevan hyötyä likaantumisen estämiseksi. Suodattimen tarpeellisuutta likapartikkeliin suodattamiseen jokivedestä kannattaa myös harkita. Koska ainevirran pitäminen jatkuvana ja tasaisena vähentää lämmönsiirtopintojen likaantumista, olisi virtausmittauksen lisääminen sivu- ja välijäähdytysjärjestelmiin kannattavaa. Virtausmittaus antaisi tietoa virtausnopeuden muutoksista, jolloin niihin pystyisi reagoimaan tarvittaessa.</p>	
<p>Avainsanat</p> <p>lämmönsiirto, lämmönvaihtimet, levylämmönvaihtimet, likaantuminen</p>	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Kirsi Kuivalainen	
Title of Thesis Studying and Monitoring of Fouling of River Water Source Heat Exchangers at the Joensuu Power Plant	
Date 15 April 2021	Pages/Appendices 38
Client Organisation /Partners Savon Voima Joensuu Oy	
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to study the fouling of river water cooled heat exchangers at the Joensuu power plant. The aim of the work was to find out the optimal cleaning method and cleaning time of the heat exchangers. By monitoring the process data, the aim was to see and react to changes in the process caused by fouling. The client of the work was Savon Voima Joensuu Oy. The work was limited to plate heat exchangers for intercooling systems of the Joensuu power plant, which cools water for turbine oil coolers, feedwater pumps, compressors and water sampling centers.</p> <p>In this thesis, the operation and fouling mechanisms of heat exchangers were studied using literature. Fouling of the heat exchangers was monitored from the process data. The heat transfer rate was first calculated for the heat exchangers. The fouling of the heat exchangers was evaluated using effectiveness and the method of temperature comparison.</p> <p>The temperature comparison method was better suited for measuring the fouling of heat exchangers. When the efficiency of the heat exchanger is good, the temperature differences of the fluids after the heat exchanger are small. When the heat exchanger becomes dirty, the temperature differences in the fluids increase. When the temperature difference is five degrees, it is recommended to start using a clean heat exchanger. The method is intended to be utilized in the process monitoring of the power plant in the future, so that the cleaning of the heat exchangers could be carried out at the right time.</p> <p>In this thesis, methods that can bring additional benefits to the cleaning of heat exchangers were studied. The most cost-effective way to clean heat exchangers is chemical cleaning, as it achieves excellent cleaning results and reasonable cleaning costs. The best cleaning results are achieved with alkaline-based detergents. The use of antifoulants is not recommended as they have not been found to be beneficial in preventing fouling. The need for a filter that filters dirt particles from river water should also be considered. Since keeping the material flow continuous and steady reduces fouling of the heat transfer surfaces, it would be profitable to increase the flow measurement in the side and intercooling systems. Flow measurement would provide information on changes in the flow rate, allowing one to react to it if necessary.</p>	
Keywords heat transfer, heat exchangers, plate-heat exchangers, fouling	

ESIPUHE

Tämän insinöörityön tilaajana toimi Savon Voima Joensuu Oy. Haluan kiittää Savon Voiman työntekijöitä saamastani tuesta, erityisesti Joensuun voimalaitoksen käyttöpäällikkö Veli-Matti Kerosta työn ohjaamisesta ja Antti Kuosmasta yhteistyöstä ja avunannosta tämän prosessin aikana. Suuret kiitokset kuuluvat myös Anssi Kettuselle, joka opasti minua lämmönvaihtimien pesun saloihin.

Haluan kiittää Savonia-ammattikorkeakoulun puolelta Teija Honkasta ja Markku Huhtista. Heidän asiantuntemuksensa avulla työ valmistui ajoissa.

Kiitos myös kotijoukoille tuesta ja kannustuksesta.

Joensuussa 15.4.2021

Kirsi Kuivalainen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	SAVON VOIMA	8
3	JOENSUUN VOIMALAITOS.....	9
4	LÄMMÖNVAIHTIMET	10
5	LEVYLÄMMÖNVAIHTIMET	12
5.1	Tiivisteellinen levylämmönvaihdin.....	12
5.2	Spiraalilämmönvaihdin	14
5.3	Lamellilämmönvaihdin	15
6	LÄMMÖNVAIHTIMEN LIKAANTUMINEN.....	16
6.1	Likaantumistypit.....	16
6.1.1	Saostuminen tai kiteytyminen	16
6.1.2	Hiukkaslikaantuminen.....	17
6.1.3	Kemiallinen likaantuminen	17
6.1.4	Korroosio.....	17
6.1.5	Biologinen likaantuminen	17
6.1.6	Jähmettyminen	18
6.2	Likaantumismekanismit	18
6.3	Likaantumisolosuhteet.....	19
6.3.1	Käyttöparametrit.....	19
6.3.2	Lämmönvaihtimen ominaisuudet	19
6.3.3	Ainevirran ominaisuudet	20
7	PUHDISTUS	21
7.1	Mekaaninen puhdistus Off-Line menetelmällä	21
7.2	Mekaaninen puhdistus On-Line menetelmällä.....	21
7.3	Kemiallinen puhdistus.....	22
7.4	Levylämmönvaihtimen puhdistus	23
8	LÄMMÖNVAIHTIMEN TEHOKKUUDEN SEURANTA.....	24
8.1	Lämmönvaihtimen tehokkuuden laskenta	24
9	OPINNÄYTETYÖN TOTEUTUS	28
9.1	Lämmönvaihtimien puhdistus.....	29
9.2	Laskenta	30

9.2.1	Lämpöteho	31
9.2.2	Rekuperatioaste	32
9.2.3	Lämpötilojen vertailumenetelmä.....	33
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET.....	35
	LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Aloin etsimään opinnäytetyön aihetta vuoden 2020 kesällä. Joensuun voimalaitoksen käyttöpäällikkö ehdotti minulle projektia, jossa perehtyisin heidän lämmönvaihtimien likaantumiseen ja selvittäisin lämmönvaihtimien optimaalisen puhdistusajankohdan ja parhaimmat keinot puhdistukseen. Työ on rajattu Joensuun voimalaitoksen välijäähdytysjärjestelmän levylämmönvaihtimiin, joiden jäähdyttämä vesi jäähdyttää turbiinin öljyjäähdyttimeä, syöttövesipumppuja, kompressoreita ja vesinäytekokeskuksia. Prosessidataa seuraamalla pyritään näkemään likaantumisen aiheuttamat muutokset prosessissa ja reagoimaan niihin. Opinnäytetyön on tarkoitus valmistua keväällä 2021.

Lämmönvaihtimilla on suuri merkitys teollisuuden prosesseissa. Niillä siirretään termistä energiaa eri ainevirtojen välillä prosessivirrasta toiseen. Lämmönsiirtopintojen likaantuminen heikentää lämmönvaihtimien lämmönsiirtotehoa. Heikentynyt lämmönsiirto aiheuttaa prosessien ajautumista pois optimaalisesta tavoitetilasta, minkä kompensointi johtaa muun muassa energiankulutuksen kasvuun ja näin ollen myös kasvihuonepäästöjen kasvuun. Motivan vuonna 2016 tekemässä ”Energiatehokas lämmönsiirto”- hankkeessa saatiin selville, että Suomen teollisuus menettää jopa satoja miljoonia euroja vuosittain heikentyneen lämmönsiirron takia. Likaantuminen on yksi lämmönsiirron heikentymistä aiheuttava ongelma, mikä lisää tuotannon energiankulutuksen kasvun lisäksi investointi- ja huoltokustannuksia sekä mahdollisesti tuotannon menetyksestä aiheutuvia kustannuksia.

2 SAVON VOIMA

Savon Voima on 20 toimialueensa kunnan omistama energiakonserni. Sen muodostaa emoyhtiö Savon Voima Oyj sekä sen tytäryhtiöt Savon Voima Verkko Oy ja Savon Voima Joensuu Oy. Savon Voiman liiketoimintaa ovat sähkön ja kaukolämmön tuotanto sekä sähköverkkoliiketoiminta. Savon Voimalla on oma bioenergiaohjelma, minkä tavoitteena on tuottaa energiaa pääosin paikallisilla ja ympäristöystävällisillä polttoaineilla ja sitä kautta saavuttaa hiilineutraali tuotanto. (Savon Voima 2020a.)

Savon Voima osti Joensuun voimalaitoksen Fortumilta tammikuussa 2020. Joensuun kaupungilla on ilmasto-ohjelma Kohti hiilineutraalia kaupunkia, jota Savon Voima on sitoutunut viemään eteenpäin. Savon Voima onkin investoinut Joensuussa kaukolämpöreduktiolämmönvaihtimeen, jonka avulla sähköntuotannon joustavuus lisääntyy ja öljytoimisten varalämpölaitosten käyttö tulee vähenemään. Ostosähkön hinnan ollessa voimalaitoksen sähköntuotantokustannuksia alhaisempi ja lämmön kulutuksen ollessa suurta voimalaitoksen omaa sähköntuotantoa vähennetään ja kaukolämmöntuotantoa lisätään ohittamalla turbiini ohjaamalla tulistettua höyryä reduktiolämmönvaihtimeen. (Savon Voima 2020b.) Ilmastotavoitteisiin pääsyä edesauttaa myös yhteistyö lieksalaisen bioöljyjalostamo Green Fuel Nordic Oy:n kanssa, joka toimittaa metsästä saatavasta raaka-aineesta valmistettua bioöljyä Savon Voiman Joensuun lämpölaitokselle (Green Fuel Nordic Oy 2020).

3 JOENSUUN VOIMALAITOS

Joensuun voimalaitos on Joensuun Kontiosuolla sijaitseva sähköä ja lämpöä tuottava yhteistuotantovoimalaitos (CHP+). Voimalaitoksella on myös mahdollista tuottaa nopean pyrolyysin bioöljyä. Voimalaitoksen vieressä on lisäksi erillinen 30 MW:n biolämpölaitos (HOB) kaukolämmön tuotantoa varten ja 10 MW:n pyrolyysiöljyä käyttävä lämpölaitos (PyroHob). Voimalaitoksen polttoaineena ovat puu, jyrshinturve, bioöljy ja biokaasu. Biokaasua saadaan voimalaitoksen vieressä sijaitsevalta kaatopaikalta. Raskas polttoöljy toimii varapolttoaineena. Voimalaitoksella on leijukerroskattila, jossa polttoaine palaa kuplivan hiekkapedin päällä. Laitoksen turbiini on yhdistetty vastapaineväliottolauhdutusturbiini, jossa on korkeapaineosa ja lauhduttimella varustettu matalapaineosa. Voimalaitoksesta saatava sähköteho on 52 MW ja kaukolämpöteho on 140 MW. Kuvassa 1 näkyvän Joensuun voimalaitoksen on perustanut Imatran Voima Oy vuonna 1986. (Fortum 2017, 3.)



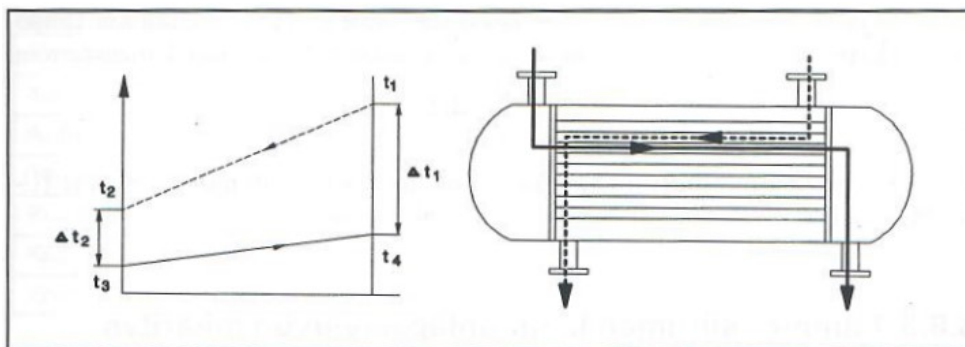
Kuva 1. Joensuun voimalaitos (Vesterinen 2020, Savon Voima Oyj)

4 LÄMMÖNVAIHTIMET

Lämmönvaihtimet ovat teollisuuden prosessien tärkeimpiä osia. Lämmönvaihdin on laite, joka siirtää lämpöenergiaa eri lämpötilassa olevien ainevirtojen välillä. Ainevirtoja voidaan joko jäähdyttää tai lämmittää. Lämmönvaihtimia ovat esimerkiksi lauhduttimet, höyrystimet, tulistimet, jäähdyttimet ja lämpöpatterit. Yleisimpiä lämmönvaihtimia ovat putki-, levy- ja regeneratiiviset lämmönvaihtimet. (Shah & Seculic 2003,1.)

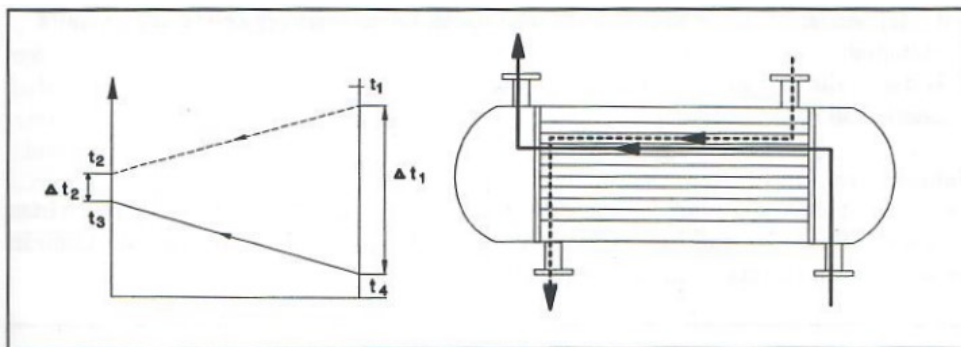
Useimmissa lämmönvaihtimissa lämmönsiirtopinnat erottavat ainevirrat toisistaan, etteivät ne sekoitu. Lämpö siirtyy johtumalla tai lämpösäteilyllä. Tällaiset lämmönvaihtimet ovat rekuperaattoreita, joita ovat muun muassa putkilämmönvaihdin ja levylämmönvaihdin. Lämmönvaihtimet, joissa on ajoittaista lämmönvaihtoa kylmän ja kuumen ainevirran välillä kutsutaan regeneraattoreiksi. Tällaisissa lämmönvaihtimissa molemmat aineet virtaavat vuorotellen samojen virtauskanavien läpi. Lämpöenergiaa varastoidaan kuumasta ainevirrasta ja se vapautetaan kylmään ainevirtaan. On olemassa myös lämmönvaihtimia, joissa ainevirrat ovat suorassa kontaktissa keskenään. Tällaisissa sovelluksissa kaksi nestevirtaa joutuu suoraan kosketukseen keskenään, jolloin ne vaihtavat lämpöä ja lopuksi ne erotetaan toisistaan. Tällaisissa lämmönvaihtimissa tapahtuu yleensä massansiirtoa lämmönsiirron lisäksi. (Shah & Seculic 2003,1-3,8.)

Lämmönvaihtimissa on kolme erilaista toimintaperiaatetta, jotka on jaoteltu ainevirran kulkeutumisen mukaan lämmönvaihtimissa. Näistä tehokkaimmat lämmönsiirto-ominaisuudet ovat vastavirtalämmönvaihtimella, joka näkyy kuvassa 2. Siinä kylmä ja kuuma aine virtaa rinnakkain mutta vastakäisiin suuntiin. Tällaisen lämmönvaihtimen etuina on, että lämmönsiirto voidaan saavuttaa pienemmällä lämmönsiirtopinta-alalla ja lämmitettävänä oleva ainevirta voidaan kuumentaa lämpöä antavan ainevirran poistumislämpötilaa kuumemmaksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 202- 203.)



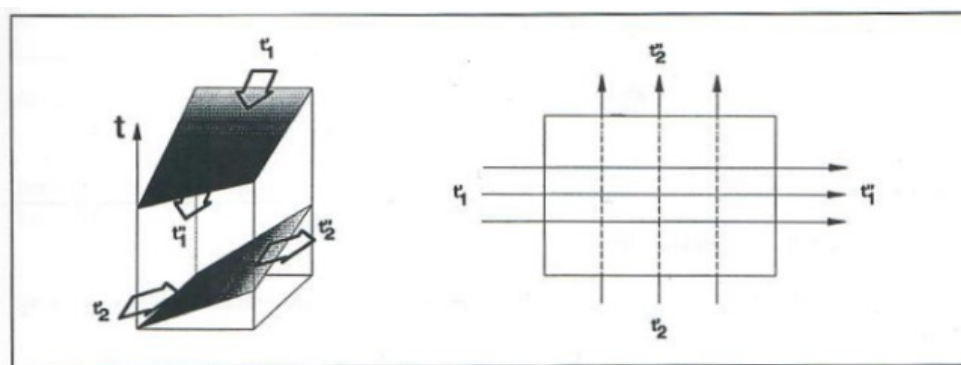
Kuva 2. Vastavirtalämmönsiirrin (Huhtinen ym. 2000, 203)

Myötävirtalämmönvaihdin toimii siten, että molemmat ainevirrat saapuvat samasta tulosuunnasta, virtaavat rinnakkain samaan suuntaan ja poistuvat toisesta päästä. Tässä sovelluksessa on alhaisin lämmönsiirtoteho. (Huhtinen ym. 2000, 202- 203.) Myötävirtalämmönvaihtimen ainevirtojen kulkusuunnat näkyvät kuvassa 3.



Kuva 3. Myötävirtalämmönsiirrin (Huhtinen ym. 2000, 203)

Ristivirtalämmönvaihdin toimii siten, että kylmä ja kuuma aine virtaa ristikkäin toisiinsa nähden. Tällaisessa sovelluksessa on kolme erilaista toimintatapaa, joissa ainevirrat eivät sekoitu keskenään, toinen ainevirroista on sekoittunut tai molemmat ainevirrat ovat sekoittuneet. Ainevirta on sekoittumaton silloin, kun aine kulkee yksittäisen virtauskanavan läpi ilman, että se sekoittuu vierekkäisten virtauskanavien välillä. Ainevirrat ovat taas sekoittuneet silloin, kun lämpöprosessi tapahtuu jokaisessa poikkileikkauksessa virtauskanavan koko leveydeltä. (Thulukkanam 2013, 19-20.) Ristivirtalämmönvaihtimen ainevirtojen kulkusuunnat näkyvät kuvassa 4.



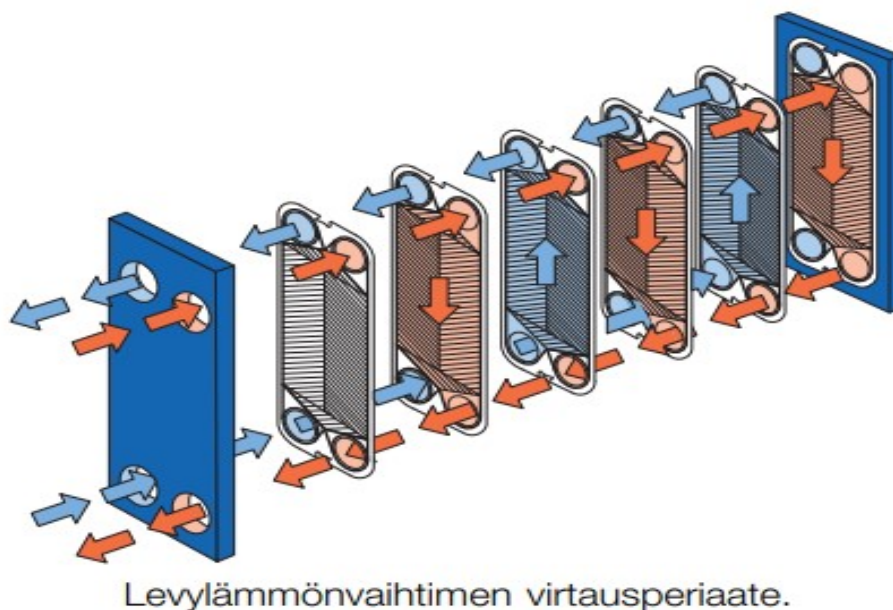
Kuva 4. Ristivirtalämmönsiirrin (Huhtinen ym. 2000, 203)

5 LEVYLÄMMÖNVAIHTIMET

Levylämmönvaihtimia on kolmea erilaista pääryhmää: tiivisteelliset levylämmönvaihtimet, spiraalilämmönvaihtimet ja lamellilämmönvaihtimet. Näiden lisäksi on olemassa myös hitsattuja, puolihitsattuja ja juotettuja lämmönvaihtimia. (Shah & Seculic 2003, 23.)

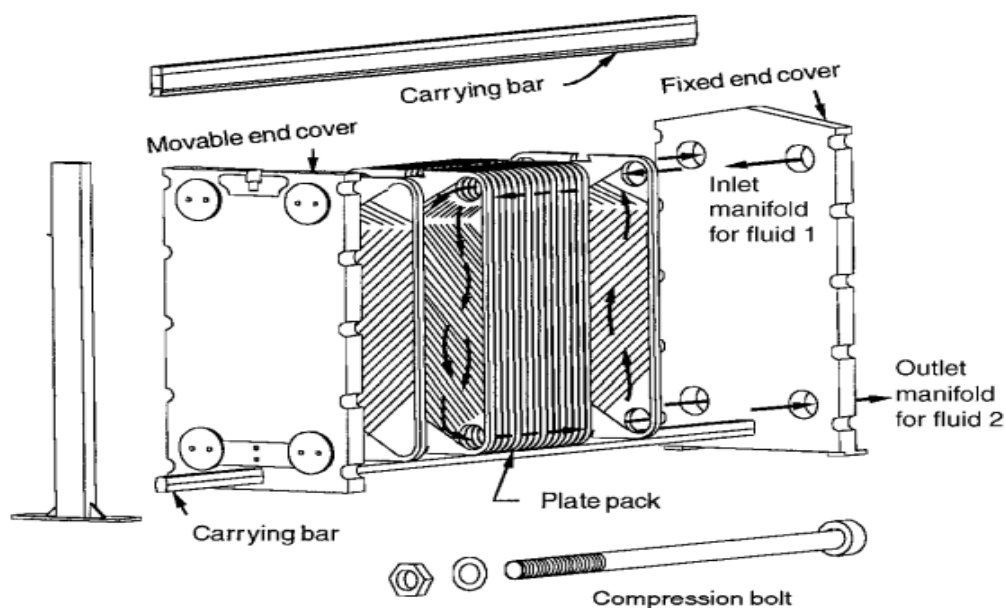
5.1 Tiivisteellinen levylämmönvaihdin

Tiivisteellinen levylämmönvaihdin koostuu ohuista aallotetuista tai kohokuvioituista metallilevyistä, jotka ovat kosketuksissa toisiinsa. Ainevirta kulkee levyjen kulmissa olevien tulo- ja lähtöyhteiden kautta. Kuvassa 5 näkyy tiivistetyn levylämmönvaihtimen ainevirtojen kulkusuunnat.



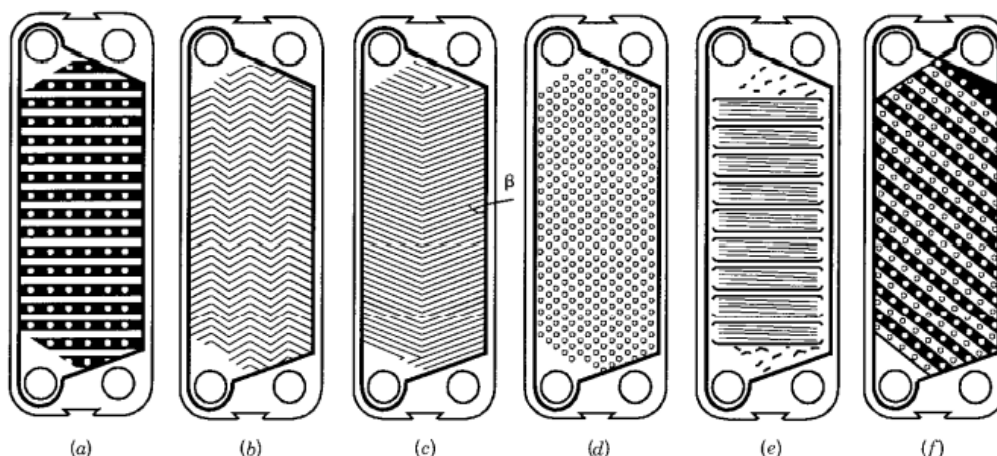
Kuva 5. Levylämmönvaihdin (Alfa-Laval, 2015a)

Levyjen keskellä kulkee virtauskanavat, joissa kulkee vuorotellen kylmiä ja kuumia ainevirtoja. Levyjen kehät ovat uritettu tiivistettä varten. Tiivisteellä on yhteys ilmakehään, joten tiivisteiden rikkoutuksessa ainevirrat eivät pääse sekoittumaan vaan vuotavat ilmakehään. Kehys pitää levyt yhdessä. Runkossa on kiinteä päätykansi ja liikuteltava päätykansi. Levyt on ripustettu ylemmstä kantotangosta ja ne asetetaan alemman kantotangon avulla oikeaan kohtaan. Päätykannet kiinnitetään toisiinsa pitkillä ruuveilla, jolloin tiivisteet puristuvat ja muodostavat tiiviin rakenteen. Kantopalkit ovat pidempiä kuin puristuksissa oleva levypakka, jolloin levyjä voidaan tarvittaessa liu'uttaa kantotankoja pitkin tarkastusta ja puhdistusta varten. Kuvassa 6 näkyy levylämmönvaihtimen rakenne.



Kuva 6. Tiivistetyn levylämmönvaihtimen rakenne (Shah & Seculic 2003, 23)

Levyissä on erittäin suuri pinta-ala, mikä mahdollistaa tehokkaan lämmönsiirron. Peräkkäiset levyt on koottu vuoron perään siten, että levyjen aallot koskettavat toisiaan tai risteävät toistensa kanssa. Näin saadaan aikaan kapeita ja mutkikkaita virtauskanavia. Levyjen aallotus edistää ainevirran turbulenttista virtausta lämmönsiirron maksimoimiseksi lämmönvaihtimessa. Suuri turbulenssi on mahdollista saavuttaa pienillä virtausnopeuksilla ja siten saavuttaa korkea lämmönsiirtokerroin. Levyjen kuviot valitaan lämmönsiirtimen käyttötarkoituksen mukaan. Kuvassa 7 on havainnollistettu yleisimpiä lämmönsiirtolevyjen kuviointeja. Levyjen koon ja lukumäärän valintaa vaikuttavat virtausnopeus, nesteiden fysikaaliset ominaisuudet, painehäviö ja käyttölämpötila. Levylämmönvaihtimen tehon nostaminen tai vähentäminen tapahtuu helposti lisäämällä tai poistamalla lämmönsiirtolevyjä. (Aittomäki 2012, 171; Shah & Seculic 2003, 22-26; Thulukkanam 2013, 393.)

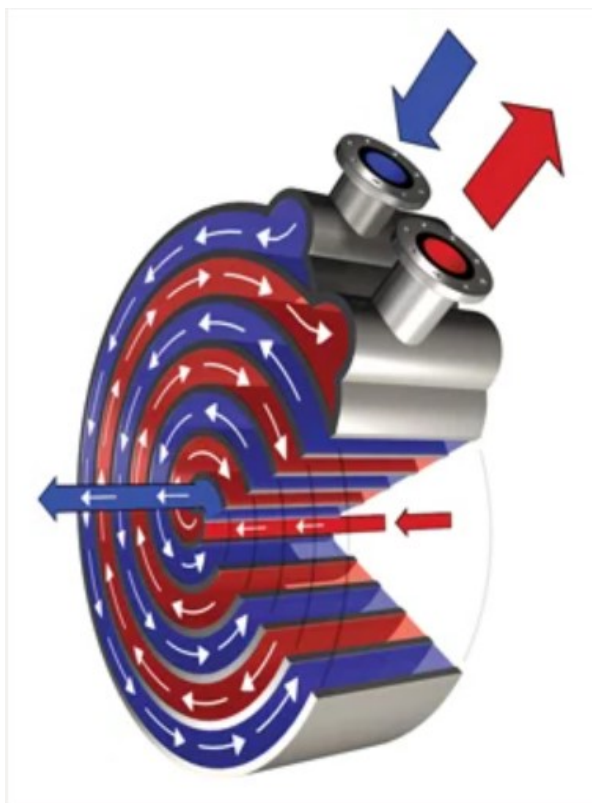


Kuva 7. Yleisimmät lämmönsiirtolevyjen kuviointit (Shah & Seculic 2003, 24)

Levylämmönvaihtimissa käytettävä materiaali on yleensä ruostumaton teräs ja titaani, sillä ne ovat korroosionkestäviä, lujia ja kestävät korkeita lämpötiloja. Grafiitti- ja polymeerilevyjä käytetään syövyttävien nesteiden kanssa. Levylämmönvaihtimia käytetään teollisuudessa yleisimmin siirrettäessä lämpöä nesteestä nesteeseen. Ne ovat yleisiä elintarvike- ja lääketeollisuudessa niiden helpon puhdistamisen ja steriloimisen takia. Prosessiteollisuudessa niitä käytetään muun muassa prosessilämmittiminä ja jäähdyttiminä sekä suljettujen piirien jäähdyttiminä. Levylämmönvaihtimia käytetään putkilämmönvaihtimia vähemmän. (Shah & Seculic 2003, 26.)

5.2 Spiraalilämmönvaihdin

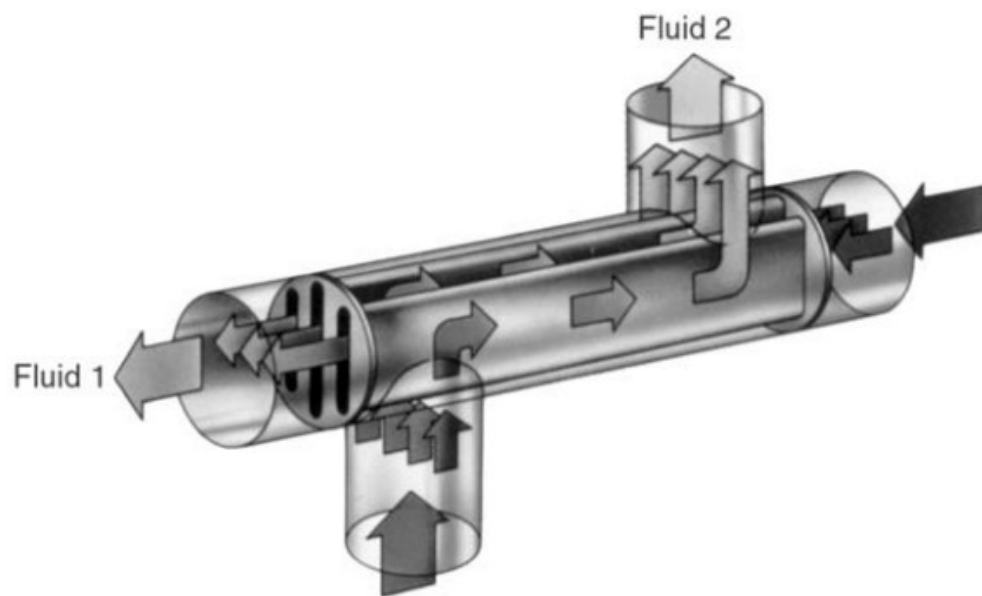
Spiraalilämmönvaihdin valmistetaan pyörittämällä kaksi pitkää päällekkäistä levyliuskaa karan ympärille muodostamaan spiraalikanavapareja. Spiraalikanaviin on tehty kanavavälit hitsaamalla välilevyt ennen pyörittämistä. Kanavat estävät nesteiden sekoittumisen. Toisessa kanavassa virtaa lämmin ja toisessa kylmä neste. Kuvassa 8 spiraalilämmönvaihtimen virtausperiaate. Nesteet kulkevat vastavirtaan. Spiraalilämmönvaihtimen muoto aiheuttaa keskipakovoiman, jolloin epäpuhtaudet poistuvat helpommin lämmönvaihtimesta. Siksi se soveltuu lietteen ja nesteen käsittelyyn, kun kiintoainepitoisuus on enintään 50%. (Thulukkanam 2013, 10-11.)



Kuva 8. Spiraalilämmönvaihdin (Alfa-Laval 2015b)

5.3 Lamellilämmönvaihdin

Lamellilämmönvaihdin koostuu sylinterimäisestä kuoresta, jonka sisällä on joukko lämpöä siirtäviä lamelleja. Lamellit ovat litteitä pitkiä putkia, jotka pinotaan lähelle toisiaan kapeiden kanavien muodostamiseksi. Yksi neste virtaa lamellien sisällä ja toinen neste lamellien ja kuoren väliin jäävässä tilassa. Nesteet kulkevat vastavirtaan. Lamellilämmönvaihtimia käytetään vain erikoistapauksissa. (Thulukkanam 2013, 14.) Kuvassa 9 lamellilämmönvaihtimen virtausperiaate.



Kuva 9. Lamellilämmönvaihdin (Shah & Seculic 2003, 32)

6 LÄMMÖNVAIHTIMEN LIKAANTUMINEN

Lämmönvaihtimen likaantumisprosessissa muodostuu lämmönsiirtoa ja ainevirtausta heikentäviä kerrostumia lämmönsiirtopinnoille, jolloin lämmönvaihtimen tehokkuus laskee. Likakerrokset muodostuvat ajan kanssa, kun lämmönvaihdinta käytetään. Likakerros lämmönsiirtopinnalla vähentää lämmönvaihtimen lämpökapasiteettia, koska likakerroksella on lämmönsiirtopintaa korkeampi lämmönvastus. Likakerros lisää myös painehäviöitä ahtauttamalla lämmönsiirtoputkia ja siten heikentää virtausta. Lämmönvaihtimen tehokkuus pyritään pitämään samana lisäämällä esimerkiksi pumpausta, tuuletusta tai lämmönsiirtopintoja. Tämä vaikuttaa teollisten prosessien energiankulutuksen kasvuun. (Thulukkanam 2013, 465; Garrett-Price, Smith, Watts, Knudsen, Marner & Sutor 1985, 9.)

Lämmönvaihtimien likaantumisen ennustamiseksi on selvitettävä likaantumisen syyt ja seuraukset, jotta puhdistusvälit ja kustannukset saadaan minimoitua tekemällä mahdollisimman vähän muutoksia prosesseihin. Lämmönvaihtimien likaantuminen vaikuttaa teollisuuden prosesseissa muun muassa paineisiin, lämpötiloihin, aineiden koostumuksiin ja virtausnopeuksiin, jolloin näiden muutokset on ymmärrettävä ja huomioitava, että voidaan ryhtyä toimenpiteisiin suorituskyvyn heikennyttyä. Jo kevyt likaantuminen vähentää merkittävästi lämmönvaihtimen tehokkuutta. Likaantumisen huomaa muun muassa silloin, kun painehäviö on kasvanut huomattavasti tai ainevirran loppulämpötila on muuttunut tavoitetasosta. (Awad 2011, 522-523.)

6.1 Likaantumistyyppit

Likaantumistyyppejä on kuusi erilaista: saostuminen, hiukkaslikaantuminen, kemiallinen likaantuminen, korroosio, biologinen likaantuminen ja jähmettyminen. Nämä voivat esiintyä sekä yksittäin että samanaikaisesti lämmönsiirtimien pinnoilla. (Garret-Price ym. 1985, 10-11.)

6.1.1 Saostuminen tai kiteytyminen

Saostumisessa lämmönvaihtimen ainevirtaan on liuenneena epäorgaanisia suoloja. Ainevirran lämpötilan muuttuessa myös liukoisuus muuttuu mikä aiheuttaa suolojen kiteytyminen lämmönsiirtopinnoille. Saostumista voi tapahtua nestettä kuumennettaessa tai jäähdyttäessä riippuen suolojen liukoisuudesta. Yleensä suolat saostuvat jäähdytettäessä. Tämän tyyppiset kerrokset ovat huokoisia ja pehmeitä. Käänteisen liukoisuuden omaavat suolat saostuvat kuumennettaessa. Silloin kiteytynyt kerros on kova ja sitkeä. Saostumista esiintyy käsiteltäessä käsittelemätöntä vettä, merivettä, geotermistä vettä ja muita suoloja sisältäviä ainevirtoja. (Garret-Price ym. 1985, 11-12; Awad 2011, 506-507.)

6.1.2 Hiukkaslikaantuminen

Hiukkaslikaantumisessa neste- tai kaasuvirrassa olevat liukenemattomat hiukkaset kerääntyvät lämmönsiirtopinnoille. Sedimentaatioksi kutsutaan sellaista prosessia, jossa painovoima aiheuttaa hiukkaslaskeuman. Hiukkaslikaantumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa liukenemattomien hiukkasten pitoisuus ainevirrassa, nesteen virtausnopeus, lämpövirta lämmönsiirtopinnalla ja likaantuneen pinnan lämpötilaolosuhteet. Liukenemattomia hiukkasia voivat olla korroosiotuotteet, ilmassa olevat hiukkaset, kuten noki ja pöly ja ympäristön epäpuhtaudet, kuten hiekka, rautamineraalit ja mikrobiorganismit.

6.1.3 Kemiallinen likaantuminen

Kemiallisessa likaantumisessa lämmönsiirtopinnoille muodostuu likakerrostumia ainevirrassa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden takia. Lämmönsiirtopinta ei osallistu reaktioon mutta voi toimia katalyyttinä, kuten krakkauksessa. Kemiallinen likaantuminen voi edistää korroosion muodostumista, jos pinnan suojaavaa oksidikerrosta ei pääse syntymään. Kemiallista likaantumista tapahtuu eniten öljynjalostuksessa, polymeroinnissa ja ruuan jalostuksessa. (Garret-Price ym. 1985, 12-13; Awad 2011, 507.)

6.1.4 Korroosio

Lämmönsiirtopinta reagoi kemiallisesti tai sähkökemiallisesti ainevirran kanssa synnyttäen korroosiotuotteita eli ruostetta ja syöpymistä lämmönsiirtopinnalle. Korroosiotuotteet likaavat lämmönsiirtopinnan ja heikentävät sen lämmönsiirtoa. Korroosiokohdasta voi myös irrota hiukkasia, jotka voivat kerrostua prosessin toisessa kohdassa. Lämmönsiirtopinnan materiaali vaikuttaa korroosion ilmenemiseen. Oikeiden materiaalien valinnalla voidaan välttyä korroosion aiheuttamilta haitoilta. Kemiallisen reaktion likaantuminen aiheuttaa korroosiota, jolloin suojaava oksidikerros ei muodostu lämmönsiirtopinnalle. Korroosion muodostumiseen vaikuttavat ainevirran ja lämmönsiirtopinnan kemialliset ominaisuudet, hapetuspotentiaali, emäksisyys, lämmönsiirtopinnan lämpötila ja lämpövirta sekä ainevirran massavirta. (Awad 2011, 507; Shah & Seculic 2003, 868-869.)

6.1.5 Biologinen likaantuminen

Biologinen likaantuminen on yleensä ongelmana luonnonvesivirroissa ja se johtuu makro-organismien, kuten simpukoiden ja kasvillisuuden tai mikro-organismien, kuten levien, sienien, hiivojen,

bakteerien ja homeiden kiinnittymisestä ja kasvusta lämmönsiirtopintaan. Yleensä ensin tapahtuu makro-organismien kiinnittyminen ennen kuin mikro-organismit alkavat kerrostua ja kasvaa lämmönsiirtopinnoilla. Biologisessa likaantumisessa muodostuu epätasainen ja rihmainen kalvo tai limakerros, joka on vaikea poistaa. Mitä karheampi pinta, sitä paremmin biologista likaantumista tapahtuu. Biologinen likaantuminen voi edistää korroosion muodostumista likakerroksen alla. Biologista likaantumista esiintyy yleensä luonnonvesiä käyttävissä lämmönvaihtimissa. (Awad 2011, 507-508; Shah & Seculic 2003, 869.)

6.1.6 Jähmettyminen

Lämmönsiirtopinnan lämpötila laskee liian alhaiseksi, jolloin ainevirta tai sen ainesosat jäätyvät tai jähmettyvät lämmönsiirtopinnalle. Jähmettymiseen vaikuttavat ainevirran ominaisuudet, massavirta, lämpötila, kiteytymisolosuhteet ja pintaolosuhteet. (Awad 2011, 508.)

6.2 Likaantumismekanismit

Likaantumisprosessiin kuuluu viisi eri vaihetta, joita ovat alkuvaihe, aineiden siirtyminen lämmönsiirtopinnalle, aineiden kerrostuminen lämmönsiirtopinnalle, likaantumisen vanheneminen ja poistovaihe. Kuluu aikaa ennen kuin likaantumisen aiheuttama lämmönsiirtovastuksen kasvu havaitaan. Tänä aikana muodostuu olosuhteet, jotka edistävät myöhempää likaantumista. Näitä olosuhteita ovat muun muassa lämpötila, konsentraatio, virtausnopeus, vähähappiset alueet, kiteytymispaikkojen muodostuminen ja kalvon muodostuminen lämmönsiirtopintaan. (Garret-Price ym. 1985, 13-14).

Aineiden siirtyminen lämmönsiirtopinnalle voi tapahtua eri tavoin. Esimerkiksi diffuusiassa likaantumista aiheuttavat partikkelit siirtyvät ainevirran suurimman pitoisuuden alueelta matalan pitoisuuden alueelle lämmönvaihtimen pinnalla. Termoforeesissa hiukkaset siirtyvät kylmälle pinnalle lämpötilamuutoksen vaikutuksesta. Elektroforeesissa staattisesti varautuneet hiukkaset kiinnittyvät lämmönsiirtopinnalle. Maan vetovoiman vaikutuksesta suuremmat partikkelit voivat laskeutua vaakasuorille pinnoille. (Garret-Price ym. 1985, 14-15).

Kolmannessa vaiheessa aineet kerrostuvat lämmönsiirtopinnalle. Kerrostumista edistävät dispersiovoimat eli molekyylien väliset voimat, sähköstaattiset voimat, lämmönsiirtopintaan muodostuneen kalvon pintajännitys ja ulkoiset voimakentät. (Garret-Price ym. 1985, 15).

Neljättä vaihetta kutsutaan vanhenemiseksi. Nämä muutokset tapahtuvat kerrostumisen jälkeen. Muutokset voivat olla fysikaalisia, kuten kuivumisesta aiheutuvia kristallirakenteen muutoksia tai kemiallisia, kuten kerrostuman ja lämmönvaihtimen materiaalin välillä tapahtuvia reaktioita. (Garret-Price ym. 1985, 15).

Likaa pystyy poistumaan samaan aikaan, kun ensimmäinen likakerros muodostuu. Likaa voi poistua eroosion, liukenemisen tai pirstaloitumisen seurauksena. Lian poistumiseen vaikuttavat virtausnopeus, kerrostumien lujuus, turbulenssi ja leikkausjännitys. (Garret-Price ym. 1985, 15-16).

6.3 Likaantumisolosuhteet

Likaantumiseen vaikuttavat käyttöparametrit, lämmönvaihtimen ominaisuudet ja ainevirran ominaisuudet (Garret-Price ym. 1985, 16).

6.3.1 Käyttöparametrit

Virtausnopeus, ainevirran ja lämmönsiirtopinnan lämpötilat vaikuttavat eniten likaantumisen kehittymiseen. Virtausnopeuden kasvaessa likaantuminen vähenee. Lian kerrostuminen voi lisääntyä mutta lian poistuminen nopeutuu kerrostumista enemmän pyörteiden ja lämmönsiirtopinnan leikkausjännityksen kautta. Biologisessa likaantumisessa taas paikalliset matalat virtausnopeudet edistävät mikro-organismien kiinnittymistä. Ne voivat kuitenkin kasvaa, kun happea ja ravinteita leviää lämmönsiirtopinnalle suurempien virtausnopeuksien takia. Ainevirran pitäminen jatkuvana ja tasaisena vähentää likaantumista. (Garret-Price ym. 1985, 16; Awad 2011, 517.)

Lämmönsiirtopinnan lämpötilan noustessa likaantuminen lisääntyy johtuen muun muassa lisääntyneestä korroosioasteesta, kemiallisten reaktioiden nopeutumisesta ja suolojen kiteytymisestä. Matalassa lämpötilassa likaantuminen on hitaampaa ja likakerrostumat helpommin puhdistettavissa. Biologinen likaantuminen tapahtuu tietyn lämpötila-alueen sisällä. Optimilämpötilassa solut kasvavat nopeasti. Kuitenkin liian korkeassa lämpötilassa solut vahingoittuvat tai kuolevat ja liian matalassa lämpötilassa solujen kasvu pysähtyy. (Garret-Price ym. 1985, 17; Awad 2011, 517.)

Ainevirran lämpötilan noustessa likaantumisvastus yleensä kasvaa. Ainevirran lämpötila vaikuttaa kemiallisen reaktion nopeuteen, kiteytymisnopeuteen ja polymerointinopeuteen. (Garret-Price ym. 1985, 17.)

6.3.2 Lämmönvaihtimen ominaisuudet

Lämmönvaihdinta suunniteltaessa on otettava huomioon likaantumisen vaikutus lämmönvaihtimen suorituskyykyyn. Pintamateriaali, pintarakenne ja lämmönvaihtimen tyyppi on huomioitava suunnittelussa, jotta likaantuminen olisi mahdollisimman vähäistä ja puhdistus helppoa. Pintamateriaalin valinnassa on huomioitava korroosio, biosidivaikutukset, hinta, lämmönjohtavuus, likaantuvuus ja puhdistuksen helppous. (Awad 2011, 517-518.)

Erilaisille likatyypeille on olemassa likaantumiskerroin tai likaantumisvastus, joka on otettava huomioon lämmönvaihdinta suunniteltaessa. Likaantumiskerroin kertoo likakerroksen teoreettisesta lämmönvastuksesta, joka johtuu likakerroksen muodostumisesta lämmönsiirtopinnoille. (Awad 2011, 523.) Taulukossa 1 on lueteltu erilaisten ainevirtojen likaantumisvastuksia.

Taulukko 1. Ainevirtojen likavastusarvoja (Awad 2011, 523)

Virtaava neste	Likavastus ($10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$)	
	Levylämmönvaihdin	Putkilämmönvaihdin
Pehmennetty vesi	0,018	0,18-0,35
Jäähdytystornin jäähdytysvesi	0,044	0,18-0,35
Merivesi	0,026	0,18-0,35
Jokivesi	0,044	0,35-0,53
Voiteluöljy	0,053	0,36
Orgaaniset liuottimet	0,018-0,053	0,36
Vesihöyry (puhdistettu vesi)	0,009	0,18

Lämmönvaihtimen karkea pintarakenne lisää likaantumista luomalla ydinpaikkoja alkukerrostumien muodostamiselle. Se myös lisää pintakemiallista aktiivisuutta, kalvon muodostusta lämmönsiirtopintaan ja luo turbulenssia ainevirtaan, jolloin viskoosiin kerrokseen aiheutuu epävakautta. Likaantumista voi viivästyttää paremmalla pintakäsittelyllä. Sileä pinta voi muuttua karheaksi ajan kuluessa korroosion, eroosion tai kalkkeutumisen vuoksi. (Garret-Price ym. 1985, 18; Awad 2011, 517-518.)

Likaantuminen riippuu paljon lämmönvaihdintyyppistä. Levy ja spiraalilämmönvaihtimet eivät ole niin alttiita likaantumiselle kuin kuori- ja putkilämmönvaihtimet, koska suuren virtausnopeuden ja turbulenttisuuden avulla vältetään pienen virtausnopeuden alueita, joihin kiintoaine voisi kerrostua. Lämmönvaihtimen suunnittelussa on huomioitava laitteen puhdistus. Likaisempi ainevirta sijoitetaan putken puolelle puhdistuksen helpottamiseksi. Lika kertyy kuoren puolelle helpommin, koska kuoren puolella on pienemmät virtausnopeudet kuin putkessa. (Garret-Price ym. 1985, 18; Awad 2011, 519.)

6.3.3 Ainevirran ominaisuudet

Ainevirran ominaisuuksilla, kuten viskositeetilla ja tiheydellä on merkittävä vaikutus likaantumiseen. Viskositeetti vaikuttaa kerrostuman paksuuteen. Viskositeetti ja tiheys yhdessä vaikuttavat rasiutukseen, joka taas vaikuttaa poistoprosessissa. Nesteessä olevat epäpuhtaudet, kuten suolat, kiinteät aineet, korroosiotuotteet ja mikro-organismit edistävät likaantumista. Kaasuissa taas likaantumiseen vaikuttavat rikkipitoisuus, epäorgaaniset aineet ja lentotuhka. (Garret-Price ym. 1985, 18; Awad 2011, 519.)

7 PUHDISTUS

Lämmönvaihtimet on puhdistettava aika ajoin lämmönsiirtotehon palauttamiseksi optimaaliselle tasolle. Puhdistusväli riippuu likaantumisen asteesta. Lämmönvaihtimia voidaan puhdistaa mekaanisesti tai kemiallisesti. Joissakin tapauksissa puhdistus voidaan suorittaa laitteen toimiessa On-Line menetelmällä. Useimmiten laite on sammutettava ja irrotettava prosessista puhdistuksen ajaksi. Tätä kutsutaan Off-Line menetelmäksi. Sopivan puhdistusmenetelmän valinnassa on otettava huomioon likaantumisen syy, likaantumisaste, likakerroksen tyyppi, lämmönvaihtimen materiaalien yhteensopivuus puhdistuskemikaalien kanssa, ympäristöystävällisyys, pintojen puhdistettavuus, kustannukset ja varotoimenpiteet. (Awad 2011, 530-531.)

7.1 Mekaaninen puhdistus Off-Line menetelmällä

Mekaanista puhdistusta voidaan tehdä useilla eri tavoilla, kun laite on irrotettu prosessista. Puhdistus voidaan tehdä manuaalisesti käsin, jos pääsy puhdistettavalle alueelle on helppoa ja kerrostuma pehmeää, kuten levylämmönvaihtimen kohdalla. Tässä menetelmässä on kuitenkin korkeat työvoimakustannukset. Suihkupuhdistusta tehdään korkeapaineisella vesisuihkulla lähinnä ulkopinnoille kerrostumien ja ilmassa olevien epäpuhtauksien poistamiseksi. Putkia voidaan puhdistaa käyttämällä nuohoimia, poraamalla tai ampumalla kumikuulia paineen avulla niiden läpi. Puhalluspuhdistuksessa sopiva hiova materiaali puhalletaan suurella nopeudella ilman tai veden avulla likaantuneeseen pintaan. Tämä soveltuu hyvin esimerkiksi putkien puhdistamiseen sisä- ja ulkopuolelta. Nokipuhalluksessa poistetaan partikkeleita ilma- ja höyrypuhalluksen avulla lämmönsiirtokanavien evistä. Tätä menetelmää käytetään palamis- ja savukaasulämmönvaihtimissa. Höyrypuhdistusta voidaan tehdä puhdistuskemikaalien avulla tai ilman niitä. Tätä menetelmää käytetään lämmönvaihtimien vahojen ja rasvojen puhdistamiseen. (Awad 2011, 531-532.)

Mekaanisen puhdistamisen etuina on yksinkertaisuus, helppous ja sen avulla voidaan puhdistaa täysin tukkeutuneet putket mutta puhdistettaessa on oltava varovainen, ettei putkiin tule vaurioita. Myös työturvallisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. (Awad 2011, 532.)

7.2 Mekaaninen puhdistus On-Line menetelmällä

Mekaaninen puhdistus laitteen toimiessa voidaan suorittaa useilla menetelmillä. Isoimmat partikkelit voidaan poistaa ainevirrasta suodattimen avulla. Virtausnopeuden hetkellinen lisääminen likakerrosten poistamiseksi on hyvä keino pienten virtausnopeuksien lämmönvaihtimille. Virtaussuunnan kääntäminen jaksottaisesti toimii liian irrotukseen jäähdytysveden vesipuolella. Ainevirran seassa voi kul-

kea kumipalloja tai hankaavaa materiaalia, kuten hiekkaa tai lasia, jotka poistavat kerrostumia putkien sisäpuolelta. On olemassa myös itsepuhdistuvia lämmönvaihtimia, kuten leijukerroslämmönvaihtimet, jotka koostuvat pystysuorista putkista, jossa ainevirran mukana leijuu kiinteitä hiukkasia. Lika poistuu, kun hiukkaset hankaavat putkien seinämiä. Lian poistoa voidaan tehdä myös ultraäänin avulla. Siinä ultraääni aiheuttaa värinää ja poistaa likakerroksia lämmönvaihtimen pinnalta. (Awad 2011, 535-536.)

7.3 Kemiallinen puhdistus

Kemiallinen puhdistus tehdään silloin, kun laite on irrotettu prosessista. Kemiallista pesua tehdessä on hyvä tietää likakerroksen tyyppi ja koostumus, että voidaan valita käytettävät pesuaineet oikein. Ennen kemiallisen puhdistuksen aloittamista on varmistettava myös laitteen komponenttien yhteensopivuus käytettävien kemikaalien kanssa, jotta vältetään mahdolliselta pintojen syöpymiseltä. Puhdistuksen jälkeen laite on huuhdeltava huolellisesti vedellä kemikaalijäämien poistamiseksi. Samalla tehdään tarkastus puhdistustehokkuuden ja korroosioaurioiden arvioimiseksi. Puhdistukseen käytetty kemikaali on hävitettävä oikeaoppisesti, jotta vältetään mahdollisilta ympäristöhaitoilta. Taulukossa 2 on lueteltu tyypillisimpiä pesuaineita likakerroksien puhdistamiseen. Puhdistuskemikaalien lisäksi voidaan käyttää likaantumisenestoaineita korroosion estämiseksi ja puhdistustehon parantamiseksi. (Awad 2011, 532-534.)

Taulukko 2. Pesuaineet likakerrostumien poistamiseen (Awad 2011, 533)

Likatyypä	Pesuaine
Rautaoksidit	Fluorivetyhappo, kloorivetyhappo, sitruunahappo, sulfamiinihappo, EDTA (etyleenidiamiinitetraetikkahappo)
Kalsium- ja magnesiumkerrostumat	Kloorivetyhappo, sitruunahappo, EDTA
Öljyt ja kevyet rasvat	Natriumhydroksidi, trinatiunfosfaatti, vesi-öljyemulsio
Raskaat orgaaniset kerrostumat, kuten tervat, asfaltit, polymeerit	Klooratut tai aromaattiset liuottimet, joita seuraa perusteellinen huuhtelu
Koksi / hiilipitoiset kerrostumat	Kaliumpermanganaatin alkaliset liuokset

Yleisin tapa tehdä kemiallinen puhdistus on Cleaning-in-Place (CIP) -menetelmä, jossa lämmitetty vesi-kemikaaliseos kiertää pumpun avulla lämmönvaihtimessa. Laite voidaan puhdistaa myös liottamalla pitämällä puhdistusliuosta jonkin aikaa laitteessa ja tarvittaessa uusimalla käsittely. Höyrypuhdistuksella taas saadaan veden ja kemikaalin seos sumuttamalla tasaisesti metallipintoihin. (Awad 2011, 534.)

Kemiallisessa puhdistuksen etuina ovat muun muassa erinomainen puhdistustulos, pidemmät puhdistusvälit ja kohtuulliset puhdistuskustannukset. Kemikaalien käyttöön liittyy myös haittavaikutuksia. Ne ovat vaarallisia käyttää, haitallisia ympäristölle ja syövyttäviä perusmetalleille. (Awad 2011, 535.)

7.4 Levylämmönvaihtimen puhdistus

Levylämmönvaihtimissa esiintyviä likaantumistyypppejä ovat hiukkaslikaantuminen, biologinen likaantuminen, kerrostuminen ja korroosio. Likaantumista ja puhdistuksen tarvetta vähentävät korkea turbulenttisuus, tasainen nestevirta, tasainen levyn pinta ja korroosionkestävä materiaali. Useimmissa levylämmönvaihtimissa vedenkäsittely olisi järkevää. Suodatin tuloaukon läheisyydessä estäisi lämmönsiirtokanavien tukkeutumisen suurilta partikkeleilta. Vähäisen likakerroksen puhdistaminen painepesurilla voi olla riittävä mutta se vaatii lämmönvaihtimen avaamisen. Useimmiten puhdistaminen käy kätevästi Cleaning -in-Place- (CIP) menetelmällä. Huuhtelu voidaan tehdä myötä- ja vastavirtaan lämmönvaihtimen tulo- ja lähtöyhteiden kautta. Liian likaiseksi päästettyyn lämmönvaihtimen puhdistukseen ei CIP-menetelmä kuitenkaan sovellu. (Kirjavainen 2013; Thulukkanam 2013, 425.)

8 LÄMMÖNVAIHTIMEN TEHOKKUUDEN SEURANTA

Lämmönvaihtimen siirtämä lämpöteho laskee lämmönvaihtimen likaantuessa. Lämmönvaihtimien tehokkuuden seuraaminen prosessidatan avulla auttaa havaitsemaan milloin prosessia parantaviin toimenpiteisiin on syytä ryhtyä. Oikea-aikainen puhdistus ja huolto tuo kustannussäästöjä, kun varmuuden vuoksi tehtävät toimenpiteet jäävät pois. Luotettavan prosessitiedon saaminen edellyttää kuitenkin riittävää mittarointia. Tyypillisimpiä seurattavia kohteita ovat prosessin kriittisten ainevirtojen lämpötilat, lämmönsiirtotehon muutokset, painehäviöt ja likakerroksen paksuus. (Motiva 2016, 12.)

Motivan vuonna 2016 tekemän ”Energiatehokas lämmönsiirto”- hankkeen mukaan lämmönvaihtimen tehokkuuden seurantaan voidaan käyttää esimerkiksi seuraavia menetelmiä:

Lämmönsiirron analysointimenetelmän avulla voidaan selvittää lämmönvaihtimen läpi kulkeva lämpöteho. Tätä menetelmää varten on tiedettävä ainevirtojen lämpötilat ja massavirta.

Lämpötilan analysointimenetelmän avulla mitataan yksittäistä prosessin kannalta kriittistä lämpötilaa. Tätä menetelmää ei voi suoraan verrata lämmönvaihtimen likaantumisen tai tehokkuuteen.

Lämpötilojen vertailumenetelmän avulla verrataan prosessin kannalta kriittisenä pidettyä lämpötilaa muiden lämpötilojen funktiona, kun lämmönvaihtimen teho on hyvä. Poikkeamat mitatuista lämpötiloista kertoo tehon heikentymisestä. Tätä menetelmää voi verrata paremmin lämmönvaihtimen likaantumiseen ja tehokkuuteen kuin lämpötilan analysointimenetelmää.

Painehäviön analysointimenetelmän avulla seurataan likaantumisen aiheuttamaa paine-eroa ainevirroissa. Tämä menetelmä ei suoraan kerro energiatehokkuudesta.

Likakerroksen optista tarkkailua voi tehdä erilaisilla optisilla mittareilla. Menetelmä kertoo likakerroksen paksuuden mutta mittaustulokset eivät ole luotettavia ja menetelmä on kallis toteuttaa.

8.1 Lämmönvaihtimen tehokkuuden laskenta

Lämmönvaihtimen lämpöteho voidaan selvittää laskemalla seuraavalla tavalla, kun tiedetään ainevirran massavirta, ominaislämpökapasiteetti ja ainevirran tulo- ja lähtölämpötila. Lämpöteho on sama lämmönvaihtimen kuumalla ja kylmällä puolella. (Incropera, Dewitt, Bergman & Lavine 2007, 676.)

$$q = \dot{m}_h * c_{p,h} * (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c * c_{p,c} * (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1)$$

missä q on lämpöteho [kW],
 \dot{m} on fluidin massavirta [kg/s],
 c_p on ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C],
 $T_{h,i}$ on kuumen ainevirran tulolämpötila [K]
 $T_{h,o}$ on kuumen ainevirran lähtölämpötila [K],
 $T_{c,o}$ on kylmän ainevirran lähtölämpötila [K] ja
 $T_{c,i}$ on kylmän ainevirran tulolämpötila [K].

Massavirta saadaan laskettua kaavalla

$$\dot{m} = \rho * q_v \quad (2)$$

missä \dot{m} on fluidin massavirta [kg/s],
 ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m³] ja
 q_v on tilavuusvirta [m³/s].

Lämmönvaihtimen lämpöteho voidaan laskea myös seuraavalla kaavalla, kun tiedetään kokonaislämmönsiirtokerroin, lämmönsiirtopinta-ala ja logaritminen lämpötilaero (Incropera ym. 2007, 676).

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (3)$$

missä q on lämpöteho [kW],
 U on kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m²K],
 A on lämmönsiirtopinta-ala [m²] ja
 ΔT_{lm} on logaritminen lämpötilaero [°C].

Logaritmisen lämpötilaeron laskeminen riippuu lämmönvaihtimen virtausjärjestyksestä. Logaritminen lämpötilaero voidaan laskea kaavalla

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (4)$$

missä ΔT_1 on ainevirtojen lämpötilaero kylmässä päässä [°C] ja

ΔT_2 on ainevirtojen lämpötilaero kuumassa päässä [°C].

Vastavirtalämmönsiirtimelle lämpötilaerot lasketaan seuraavalla tavalla

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci}$$

ja myötävirtalämmönsiirtimelle lämpötilaerot lasketaan

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{ci}$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{co}$$

missä $T_{h,i}$ on kuuman ainevirran tulolämpötila [K]

$T_{h,o}$ on kuuman ainevirran lähtölämpötila [K],

$T_{c,o}$ on kylmän ainevirran lähtölämpötila [K] ja

$T_{c,i}$ on kylmän ainevirran tulolämpötila [K].

Rekuperatioaste kuvaa lämmönvaihtimen tehokkuutta. Se kertoo, miten suuri määrä lämpöä voitaisiin saada talteen teoreettisesta maksimista. Energiatehokkuus on parhaimmillaan, kun lämpötilaero on mahdollisimman suuri, jolloin kokonaislämmönsiirtokerroin on hyvä. Lämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa eniten lämpöpintojen puhtaus, kun virtausnopeudet pysyy vakiona. Toisaalta virtausnopeuden laskiessa myös lämmönsiirtokerroin laskee. Rekuperatioaste lasketaan kaavalla 4. (Incropera ym. 2007, 687; Motiva 2016, 4.)

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{q}{c_{min}*(T_{h,i}-T_{c,i})} \quad (5)$$

missä ε on rekuperaatioaste,

q on lämpöteho [kW],

q_{max} on suurin mahdollinen lämmönsiirtoteho [kW],

c_{min} on pienempi lämpökapasiteettivirta [kW/K],

$T_{h,i}$ on kuuman ainevirran tulolämpötila [K] ja

$T_{c,i}$ on kylmän ainevirran tulolämpötila [K].

Lämpötilojen vertailumenetelmän mukaan kuuman ja kylmän ainevirran lämpötiloja lämmönvaihtimen jälkeen voidaan verrata keskenään. Tämä menetelmä antaa kuvan lämmönvaihtimen liikaantumisesta. Kun lämmönvaihtimen teho on hyvä, on ainevirtojen lämpötilaerot pieniä lämmönvaihtimen jälkeen. (Motiva 2016, 12.) Myötä ja vastavirtalämmönvaihtimien ainevirtojen lämpötilaeroja lämmönvaihtimen jälkeen vertailtaessa voidaan käyttää kaavaa

$$\Delta T = T_{h,o} - T_{c,o} \quad (6)$$

missä ΔT on lämpötilojen erotus,

$T_{h,o}$ on kuuman ainevirran lähtölämpötila [K] ja

$T_{c,o}$ on kylmän ainevirran lähtölämpötila [K].

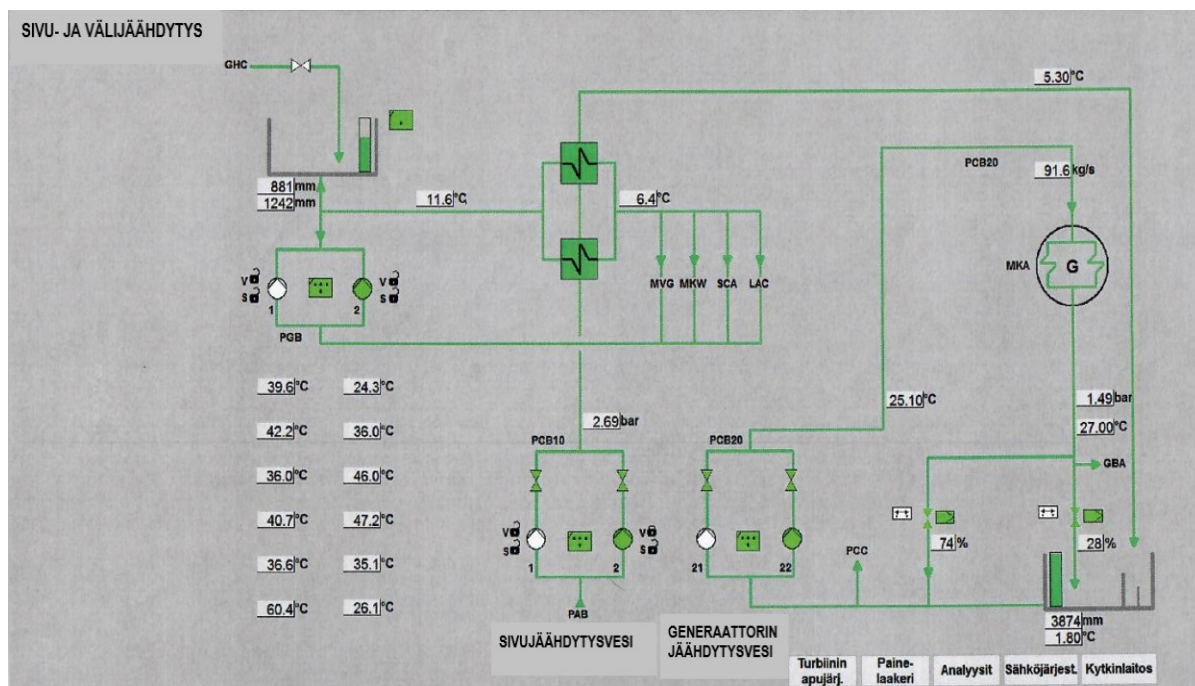
9 OPINNÄYTETYÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja seurata jokivesijäähdytteisten lämmönvaihtimien likaantumista ja kehittää järjestelmää niin, että likaantuminen voidaan huomata prosessiarvojen muutoksista. Opinnäytetyö rajattiin Alfa-Lavalin 1,1 MW välijäähdytysjärjestelmän levylämmönvaihtimiin, jotka näkyvät kuvassa 10. Lämmönvaihtimista vain toinen on yleensä käytössä.



Kuva 10. Alfa-Laval levylämmönvaihtimet (Kuivalainen 2020a)

Välijäähdytysjärjestelmä toimittaa jäähdytysvettä turbiinin öljyjäähdyttimille, syöttövesipumpuille, kompressoreille ja näytteenottojen jäähdytykseen. Välijäähdytysjärjestelmään kuuluu kaksi kappaletta pumppuja ja lämmönvaihtimia sekä paisuntasäiliö ja putkisto venttiileineen. Jäähdytysvesi saadaan välijäähdytyspiiriin sivujäähdytysvesijärjestelmästä, joka toimittaa jäähdytysvettä myös generaattorin jäähdyttimille ja ejektoreille, pohjakuonan sammutukseen ja lauhteenjäähdytysäiliöön. Jäähdytykseen käytettävä vesi saadaan Pielisjoesta ja se lasketaan Iiksenjokeen. (Imatran Voima 1985.) Kuvassa 11 valvomomonitorikuva sivu- ja välijäähdytyspiiristä.



Kuva 11. Sivu- ja väliläähdytyspiirit (Savon Voima 2021)

9.1 Lämmönvaihtimien puhdistus

Joensuun voimalaitoksella väliläähdytyspiiriin levylämmönvaihtimet puhdistetaan Cleaning- in- Place- menetelmällä. Lämmönvaihtimien tulo- ja lähtöyhteisiin kiinnitetään puhdistuslaitteen letkut ja esi- lämmitettyä vesikemikaaliseosta kierrätetään lämmönvaihtimen putkistossa vasta- ja myötävirtaan. Jokivedestä kertyy lämmönvaihtimiin biologisia likapartikkeleja, kuten limaista rihmastoja, jonka pesemiseen käytetään sitruunahappoa. Levylämmönvaihtimia on kaksi kappaletta, joista toinen on käytössä, kun toista lämmönvaihtinta puhdistetaan. Likainen vesi-happoseos tyhjennetään neutralointialtaaseen käsiteltäväksi. Kuvassa 12 näkyy Joensuun voimalaitoksen CIP-pesuri.



Kuva 12. CIP-pesuri (Kuivalainen 2020b)

9.2 Laskenta

Lämmönvaihtimien likaantumista seurattiin ja analysoitiin jäähdytysjärjestelmien prosessidatan avulla, joka saatiin sivu- ja välijäähdytyspiirien lämpötilamittauksista. Prosessidataa oli vuodesta 2015 vuoteen 2020 asti.

Lämmönvaihtimen kylmän puolen ainevirran jäähdytysvesi tulee sivujäähdytysjärjestelmästä. Lämmönvaihtimien kuumen ainevirran puolella on suljetun kierron välijäähdytysjärjestelmä, mitä sivujäähdytysjärjestelmä jäähdyttää. Taulukossa 3 on esimerkki sivu- ja välijäähdytyspiirin lämpötiloista ennen ja jälkeen lämmönvaihdinta. Sinisellä pohjalla on jäähdyttävän virtauksen lämpötilat ja oranssilla pohjalla on jäähdytettävän ainevirtauksen lämpötilat.

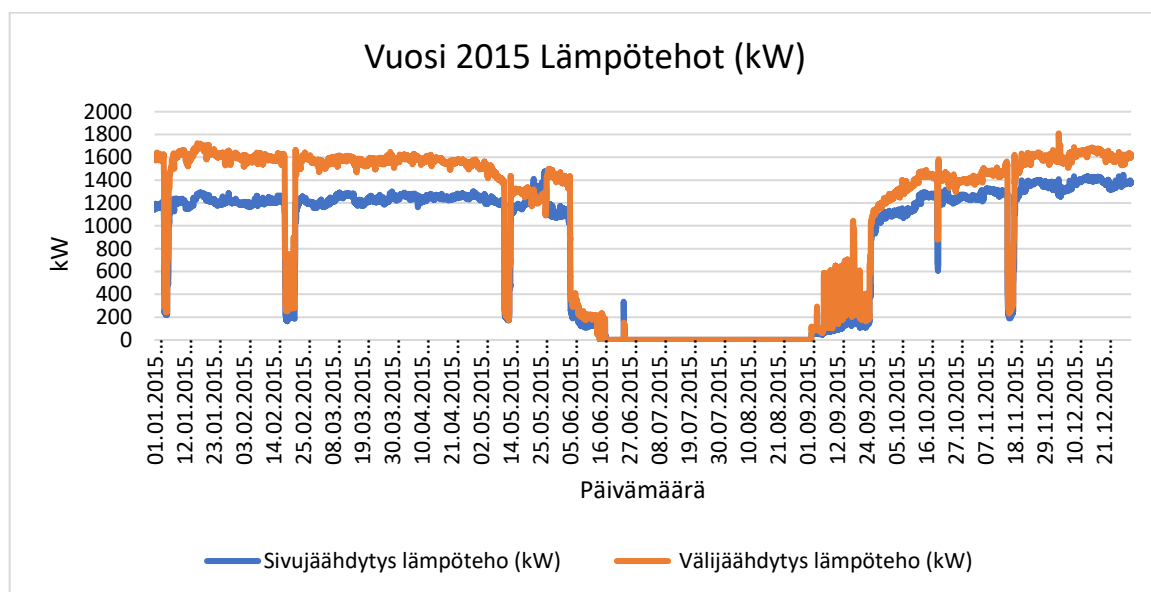
Taulukko 3. Sivu- ja välijäähdytysvesien lämpötiloja

Aika	PAB10CT001 SIVUJÄÄHDYTYS VESI LV ENNEN Jokiveden Lämpötila °C, K.A.	PCB19CT001 SIVUJÄÄHD.VESI LV JÄLK. Jokiveden lämpötila °C, K.A.	PGB10CT001 VÄLIJÄÄHD.VESI LV ENNEN Veden lämpötila °C, K.A.	PGB10CT002 VÄLIJÄÄHD.VESI LV JÄLK. Veden lämpötila °C, K.A.
01.01.2015 00:00:00	0,30	4,90	13,5	7,2
01.01.2015 01:00:00	0,30	4,88	13,4	7,1
01.01.2015 02:00:00	0,30	4,87	13,4	7,1
01.01.2015 03:00:00	0,30	4,90	13,5	7,2
01.01.2015 04:00:00	0,30	4,90	13,6	7,2

9.2.1 Lämpöteho

Lämmönvaihtimien likaantumisen seuranta aloitettiin laskemalla lämmönvaihtimien kylmän ja kuuman puolen ainevirtojen lämpötehot massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja ainevirtojen tulo- ja lähtölämpötilojen avulla kaavan 1 mukaisesti. Virtausmittauksen puuttuessa tieto massavirran laskemiseen saatiin pumpun tilavuusvirrasta, kun pumput toimivat vakionopeudella. Massavirta laskettiin kaavalla 2 kertomalla pumpun tilavuusvirta 60 l/s veden tiheydellä. Sivu- ja välijäähdytysjärjestelmien pumpuissa on sama tilavuusvirtaus.

Lämmönvaihtimien lämpötehot kuumalla ja kylmällä puolella täytyisi olla samat. Kuvasta 13 kuitenkin voi huomata, että sivu- ja välijäähdytysjärjestelmien lämpötehoissa on suuria heittoja, kun niitä vertaa toisiinsa. Erot lämpötehoissa johtuu virtausmittauksen puutteesta, jolloin oikeaa virtausta ei tiedetä. Kesän aikana prosessi ei ole toiminnassa, jolloin lämpötehot laskevat nolnaan.

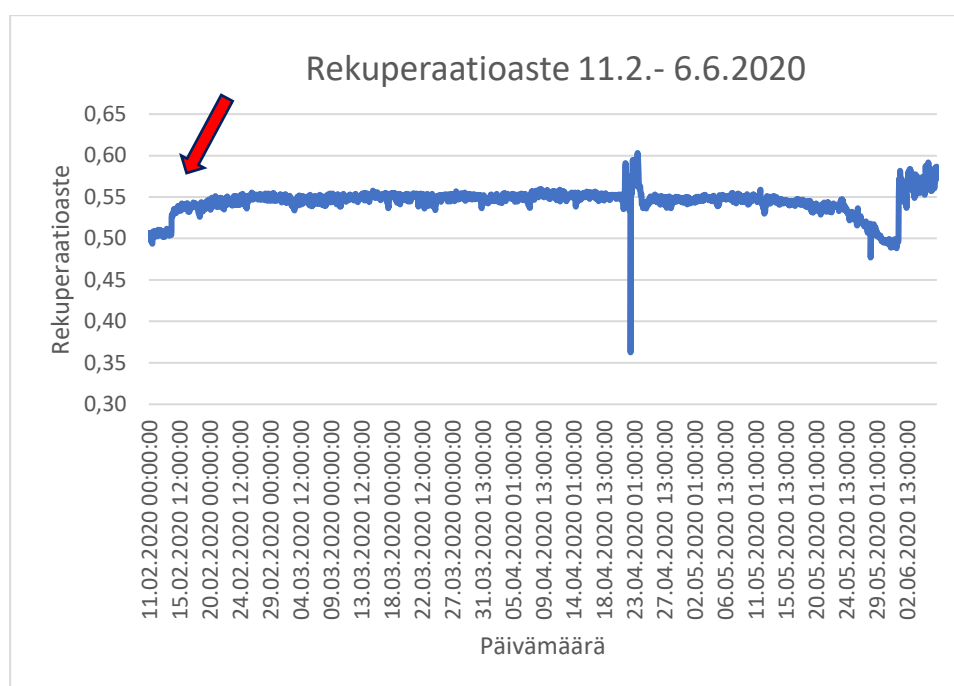


Kuva 13. Sivu- ja välijäähdytysjärjestelmän lämpötehot vuonna 2015

9.2.2 Rekuperaatioaste

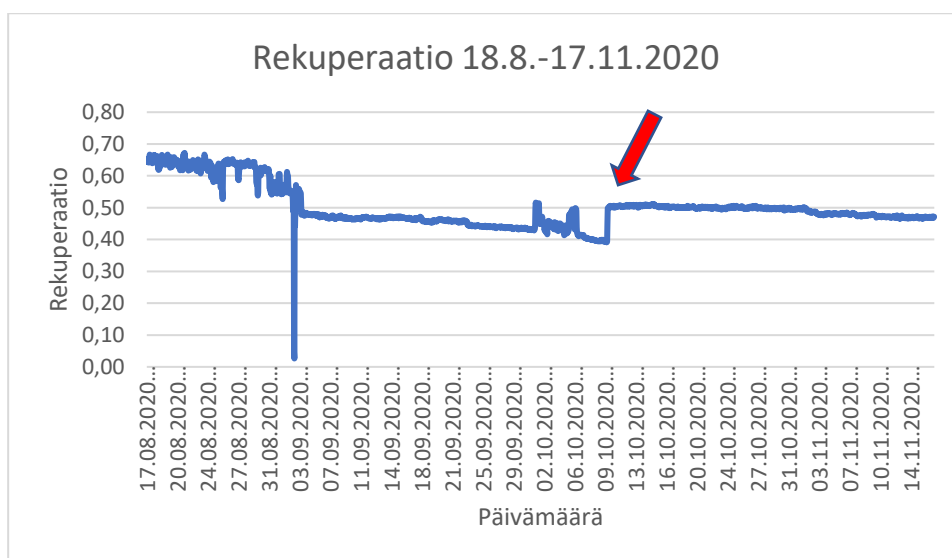
Lämmönvaihtimen likaantumista tutkittiin rekuperaatioasteen avulla. Rekuperaatioaste kertoo lämmönvaihtimen hyvyydestä. Energiatehokkuus on parhaimmillaan, kun rekuperaatioaste on lähellä ykköstä. Rekuperaatioaste laskettiin kaavan 5 mukaisesti.

Rekuperaatioasteesta voidaan huomata, että se nousee, kun puhdas lämmönvaihdin otetaan käyttöön. Rekuperaatioasteen nousut eivät välttämättä ole joka kerta kovin selviä, kuten voidaan huomata kuvasta 14. Rekuperaatioaste on ennen puhdistusta 0,5 ja puhdistuksen jälkeen noin 0,55. Nuolella merkityssä kohdassa puhdas lämmönvaihdin on otettu käyttöön.



Kuva 14. Rekuperaatioaste 11.2- 6.6.2020

Kuvasta 15 taas huomataan, että kun puhdas lämmönvaihdin on otettu käyttöön, on rekuperaatioasteen nousu suurempi ja näkyy kaaviossa selkeämmin kuin verrattaessa kuvaan 14. Heti lämmönvaihtimen pesun jälkeen rekuperaatioaste on parhaimmillaankin ollut 0,5- 0,6 välillä, josta se alkaa hiljalleen laskea lämmönsiirtopintojen likaantuessa.

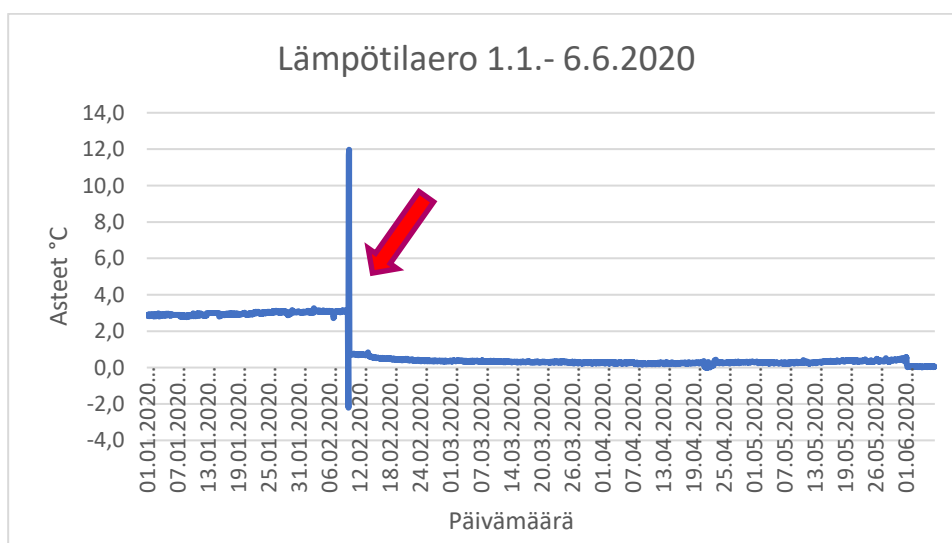


Kuva 15. Rekuperatioaste 18.8.- 17.11.2020

9.2.3 Lämpötilojen vertailumenetelmä

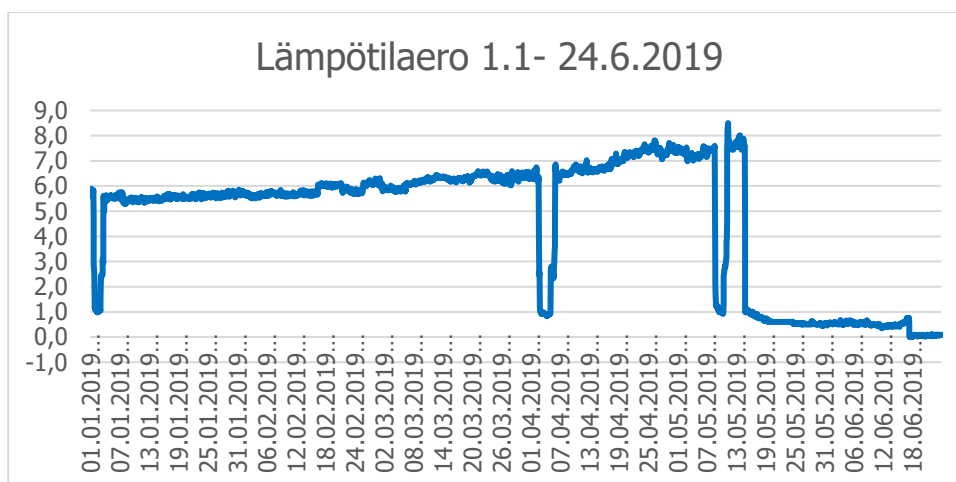
Rekuperatioastetta parempi tapa seurata lämmönvaihtimien likaantumista on lämpötilojen vertailumenetelmä, missä lämmönvaihtimen kylmän ja kuuman ainevirtojen lämpötiloja lämmönvaihtimen jälkeen vertaillaan keskenään. Lämpötilaero on laskettu kaavalla 6.

Lämmönvaihtimen ollessa puhdas ovat ainevirtojen lämpötilaerot pieniä ja lämmönvaihtimen tehokkuus hyvä. Lämmönvaihtimen likaantuessa myös lämpötilaerot kasvavat. Kuvasta 16 voi nähdä miten nuolen kohdassa lämpötilaero putoaa kolmesta asteesta lähelle nollaa astetta, kun puhdas lämmönvaihdin on otettu käyttöön.



Kuva 16. Lämpötilaero 1.1 – 6.6.2020

Lämmönvaihtimien likaantumisnopeus vaihtelee paljon eri vuosina. Kuvasta 17 voidaan huomata, että lämmönvaihtimen lämpötilaero on käynyt vuonna 2019 jopa lähellä kahdeksaa astetta ennen lämmönvaihtimen puhdistamista. Likaantumiseen vaikuttaa humuksen määrä luonnonvesissä, mikä vaihtelee vuosittain. Likaantumiskehityksen lisäksi lämpötilaeroa seuraamalla voi myös arvioida lämmönvaihtimien pesujen tehokkuutta. Lämpötilaeroa ei juuri ole, kun lämmönsiirtopinnat ovat puhtaita.



Kuva 17. Lämpötilaero 1.1.- 24.6.2019

10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET

Lämmönvaihtimien pesuajankohtaa on ajallisesti vaikea määritellä, sillä sateiden ja sulaneen lumen määrä vaikuttaa humuksen määrään luonnonvesissä. Humusta kulkeutuu valumavesien mukana maalta vesistöihin. Vähäsateisena vuotena jokivesi pysyy puhtaampana kuin runsassateisena vuotena, jolloin humusta luonnonvesissä on enemmän ja sitä kautta myös lämmönvaihtimet likaantuvat nopeammin ja niiden pesuja täytyy suorittaa useammin. Lämmönvaihtimet on kuitenkin perinteisesti puhdistettu ainakin kesärevision aikana.

Lämmönvaihtimien oikea-aikaista puhdistusajankohtaa voidaan sen sijaan seurata lämpötilojen vertailumenetelmän avulla. Välijäähdytys- ja sivujäähdytysjärjestelmän lämpötilojen erotus lämmönvaihtimen jälkeen antaa tietoa likaantumisen asteesta. Lämpötilaeron ollessa kahdesta kolmeen astetta on likaa jo alkanut kertyä lämmönsiirtopinnoille. Prosessidatasta voi nähdä, että lämmönvaihdin on ollut käytössä, kun lämpötilaero on ollut jopa lähellä kahdeksaa astetta. Lämmönvaihtimien pesut on suoritettava kuitenkin siinä vaiheessa, että likakerroksen paksuus ei ole esteenä kemialliselle puhdistukselle. Voimalaitoksella käytyjen pohdintojen perusteella tultiin siihen päätelmään, että lämpötilaeron ollessa viisi astetta on syytä ottaa puhdas lämmönvaihdin käyttöön ja puhdistaa likaantunut lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimen likaantumisen ennustamiseksi lisätään voimalaitoksen valvontajärjestelmään hälytys, joka ilmoittaa valvontajärjestelmässä, kun on välijäähdytyspiirin lämpötilamittauksen PGB10CT002 ja sivujäähdytyspiirin lämpötilamittauksen PCB19CT001 lämpötilaero lämmönvaihtimen jälkeen on saavuttanut viisi astetta.

Lämmönvaihtimien kustannustehokkain puhdistustapa on kemiallinen puhdistus, koska sillä saavutetaan erinomainen pesutulos ja kohtuulliset puhdistuskustannukset. Mekaaninen puhdistus vaatisi lämmönvaihtimen aukaisun, mikä vie paljon aikaa ja aiheuttaa korkeat työvoimakustannukset. Lämmönvaihtimen aukaisu antaisi kuitenkin todellisen tiedon lämmönsiirtopintojen kunnosta, likaisuuden asteesta ja pesun tarpeesta. Tällä hetkellä Joensuun voimalaitoksella lämmönvaihtimet puhdistetaan sitruunahappo-vesi seoksella. KI-lämmön vesienkäsittelyn asiantuntijan Miikka Kirjavaisen (2021) haastattelu antoi uutta tietoa puhdistuskemikaalien sopivuudesta jokivesien aiheuttamaan lämmönvaihtimien likaantumiseen. Sitruunahappoa parempi puhdistustulos biologisen lian poistamiseen tulisi emäspohjaisella pesuaineella. Likaantumisenestoaineita ei suositella käytettäväksi, sillä niistä ei ole havaittu olevan hyötyä likaantumisen estämiseksi.

Jokivedestä kertyy biologista likaa, kuten limaista rihmastoa lämmönsiirtopinnoille. Joensuun voimalaitoksella ei jäähdytykseen käytettävää jokivettä suodateta lainkaan. Sähköpostikeskustelu Hyxon aluepäällikkö Puustisen (2021) kanssa antoi tietoa jokivesien suodatuksesta. Jäähdytykseen käytettävää luonnonveden suodatusta ei ole laajasti käytössä Suomen voimalaitoksissa. Suodatin suodattaa luonnonvedestä vain kiintoainemuodossa olevat partikkelit. Isoille virtausmäärille ensisijaisesti suositellaan itsepuhdistuvaa automaattisuodatinta. Suodatukseen on mahdollista käyttää myös patruuna-, pussi- ja korisuodattimia mutta vedessä olevan virtaaman ja kiintoaineiden määrä määrittää

suodatustekniikan. Jäähdytykseen käytettävän jokiveden suodatus saattaa tuoda lisähyötyä lämmönvaihtimien puhtaanapitoon. Suodatuksella saatava todellinen hyöty likaantumisen ehkäisemiseksi on kuitenkin selvitettävä kustannusten minimoimiseksi.

Voimalaitoksen väli- ja sivujäähdytysjärjestelmissä ei ole tällä hetkellä virtausmittausta. Virtausmittaus antaisi oikeaa reaaliaikaista tietoa virtaavan nesteen nopeudesta. Koska ainevirran pitäminen jatkuvana ja tasaisena vähentää likaantumista, olisi hyvä tietää virtausnopeuden muutoksista ja tarvittaessa reagoida niihin. Virtausmittaus auttaisi myös määrittämään lämmönvaihtimien todellisen lämpötehon.

LÄHTEET

- Aittomäki, Antero 2012. Kylmäteknikka. 4. painos. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys ry.
- Alfa-Laval 2015a. Levylämmönvaihdin. Kuva. <https://www.armacore.com/4b0fad/globalassets/armacore-fi/webbase/productdocuments/tiivisteelliset-levylammonsiirtimet/tiivisteelliset-levylammonsiirtimet-t8-levylammonvaihdin-238946.pdf>. Viitattu 8.1.2021.
- Alfa-Laval 2015b. Spiraalilämmönvaihdin. Kuva. <https://www.alfalaval.fi/tuotteet-ja-jarjestelmat/lammonsiirto/levylammonvaihtimet/hitsatut-spiraalilammonvaihtimet/>. Viitattu 11.1.2021.
- Fortum 2017. Joensuun voimalaitoksen turvallisuustiedote. Verkkajulkaisu. 1.6.2017. https://www.fortum.fi/sites/g/files/rkxjap156/files/documents/fortum_turvallisuustiedote_joensuu.pdf. Viitattu 27.1.2021.
- Garrett-Price, B.A., Smith, S.A., Watts, R.L., Knudsen, J.G., Marner, W.J. & Sutor, J.W. 1985. Fouling of Heat Exchangers. New Jersey: Noyes Publications.
- Green Fuel Nordic Oy 2020. Toimitukset käyntiin Lieksan jalostamolta. Verkkajulkaisu. 4.12.2020. <https://www.greenfuelnordic.fi/ajankohtaista/toimitukset-kayntiin-lieksan-jalostamolta>. Viitattu 27.1.2021.
- Huhtinen, Markku, Kettunen, Arto, Nurminen, Pasi & Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilateknikka. 5. uusittu painos. Helsinki: Edita Oy.
- Imatran Voima 1985. Jäähdytys ja vedenkäsittely. Järjestelmäkuvaukset. Sisäinen Materiaali. Savon Voima Joensuu Oy.
- Incropera, Frank P., Dewitt, David P., Bergman, Theodore L. & Lavine, Adrienne S. 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kirjavainen, Miikka 2013. Lämmönsiirtimeen huolto on asiantuntijatyötä. Promaint- lehti 11.12.2013. <https://promaintlehti.fi/Laite-ja-korjaustekniikat/Lammonsiirtimeen-huolto-on-asiantuntijatyota>. Viitattu 25.1.2021.
- Kirjavainen, Miikka 2021. Aluepäällikkö, tekninen asiantuntija. Haastattelu 27.1.2021.
- Kuivalainen, Kirsi 2020a. Alfa-Laval levylämmönvaihtimet. Valokuva, 12.11.2020. Joensuu: Kirsi Kuivalaisen kokoelmat.
- Kuivalainen, Kirsi 2020b. CIP-pesuri. Valokuva 10.11.2020. Joensuu: Kirsi Kuivalaisen kokoelmat.
- Motiva 2016. Energiätehokas lämmönsiirto- opas. https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf. Viitattu 14.1.2021.
- Mostafa M. Awad 2011. Fouling of Heat Transfer. Teoksessa Belmiloudi, Aziz. Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. InTech. https://www.researchgate.net/publication/221910395_Fouling_of_Heat_Transfer_Surfaces. Viitattu 14.1.2021.

Puustinen, Ilpo 2021. Aluepäällikkö. Hyxo. Suodattimet jokiveden suodatukseen. Yksityinen sähköpostiviesti 24.2.2021. Viestin saaja: Kirsi Kuivalainen.

Savon Voima 2020a. Vuosikatsaus 2019. Verkkojulkaisu. 18.3.2020. https://savonvoima.fi/wp-content/uploads/2020/11/SV_Vuosikatsaus_2019_web.pdf. Viitattu 27.1.2021.

Savon Voima 2020b. Joensuun voimalaitoksen ensimmäiset investoinnit kohti hiilineutraalia Joensuuta käynnistyvät. Verkkojulkaisu. 20.10.2020. <https://savonvoima.fi/joensuun-voimalaitoksen-ensimmaiset-investoinnit-kohti-hiilineutraalia-joensuuta-kaynnistyvat/>. Viitattu 27.1.2021.

Savon Voima 2021. Sivu- ja välijäähdytys. Kuva. Joensuu: Joensuun voimalaitos.

Shah, Ramesh K. & Sekulic, Dušan P 2003. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. <https://windyhm.files.wordpress.com/2008/11/fundamentals-of-heat-exchanger-design-0471321710.pdf>. Viitattu 5.1.2021.

Thulukkanam, Kuppan 2013. Heat Exchanger Design Handbook. second edition. London: CRC Press Taylor & Francis Group. <https://www.slideshare.net/vijayabhaskar83/heat-exchanger-design-handbook-42097614>. Viitattu 5.1.2021.

Vesterinen, Kari 2020. Joensuun voimalaitos. Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Joensuu: Savon Voima Oyj.