

Valtteri Tiinanen

## **LÄMMÖNSIIRTIMEN LIKAANTUMISEN SEURANTA**

# **LÄMMÖNSIIRTIMEN LIKAANTUMISEN SEURANTA**

Valtteri Tiinanen  
Opinnäytetyö  
Syksy 2017  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikka

---

Tekijä: Valtteri Tiinanen

Opinnäytetyön nimi: Lämmönsiirtimen likaantumisen seuranta

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari, Ilkka Laakso

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2017 Sivumäärä: 48 + 2 liitettä

---

Tämä opinnäytetyö on tehty Stora Enso Oulu Oy:n sellutehtaalle. Työn aiheena oli lämmönsiirtimen likaantumisen seuranta. Tavoitteena oli tehdä sellutehtaan kuumaa vettä valmistavista lämmönsiirtimistä likaantumisen seurantaa Savcor Wedge -prosessianalysointijärjestelmään. Työ rajattiin keittämöllä olevaan putki-lämmönsiirtimeen, paisuntalipeänjäähdyttimeen.

Aluksi työssä käsiteltiin lämmönsiirtimen toimintaa datan perusteella. Lämmönsiirtimelle määritettiin ensin teho ja sen jälkeen kokonaislämmönsiirtokerroin Wedgen laskennallisia mittauksia hyväksi käyttäen. Lämmönsiirtimelle määritettiin kolme eri toiminta-alueita lämmönsiirtokertoimen perusteella: likainen, puhdas ja välimalli. Lisäksi tutkittiin, kuinka veden virtaukset ja lämpötilat käyttäytyvät puhtaassa ja likaisessa toiminta-alueessa.

Työssä lämmönsiirtimelle tehtiin myös työkalu likaantumisen seurantaa varten. Mallia työkalulle haettiin erään konferenssin tieteellisestä artikkelista. Työkalulla saadaan aikaan indeksi, joka kuvastaa likimain lämmönsiirtimen likaantumisvastuksen kehitystä. Likaantumisvastus saadaan likaisen lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimesta ja puhtaan lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimesta.

Dataan perustuvassa seurannassa todettiin, että puhtaana oleva lämmönsiirrin operoi arvolla yli 1500 W/m<sup>2</sup>K ja likaisena arvolla alle 1200 W/m<sup>2</sup>K. Lisäksi todettiin, että veden virtaukset kasvavat alueelta 49–51 kg/s alueelle 57–59 kg/s. Myös veden tulolämpötila laskee lämmönsiirtimen likaantuessa.

Seurantatyökalun tuloksista havaittiin, että lämmönsiirtimen likaantumisvastus saavuttaa arvon 0,2 m<sup>2</sup>K/kW ennen jokaista seisokkia. Lämmönsiirrin kannattaa puhdistaa, ennen kuin se saavuttaa arvon 0,3 m<sup>2</sup>K/kW, koska tällöin lämmönsiirrin on kerinnyt likaantua merkittävästi.

Lämmönsiirtimen likaantuminen havaitaan tällä hetkellä prosessiarvojen muutoksista. Toiminta-alueiden määrittäminen ja rakennettu työkalu ovat hyviä välineitä tukemaan lämmönsiirtimen likaantumisen tarkastelua, mutta niiden laajamittaisessa läpiviennissä on kuitenkin omat ongelmansa. Yhtä hyviä tuloksia voitaisiin saavuttaa mahdollisesti erilaisia mittauksia lisäämällä.

---

Asiasanat: lämmönsiirrin, likaantuminen, seuranta

## **ALKULAUSE**

Työn toimeksiantaja toimi Stora Enso Oulu Oy. Haluan kiittää Stora Enson väkeä kaikesta avusta työtä tehtäessä. Kiitokset myös koulun puolesta työn ohjaajana toimineelle Jukka Ylikunnarille ja Pirjo Partaselle.

Haluan erityisesti kiittää tyttöystävääni, ystäviäni sekä perhettäni saamastani tuesta koulutaipaleelle sekä opinnäytetyötä tehtäessä.

Oulussa 20.11.2017

Valtteri Tiinanen

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 STORA ENSON OULUN SELLUTEHDAS	7
2.1 Kuitulinja	8
2.2 Lipeälinja	9
3 LÄMMÖNSIIRTIMET	11
3.1 Putki- ja vaippalämmönsiirtimet	12
3.2 Lämmönsiirtimen mitoitukseen liittyvä laskenta	15
4 LIKAANTUMINEN	17
4.1 Likaantumisen tyypit	19
4.2 Likaantumisen vaiheet	21
4.3 Likaantumista aiheuttavat tekijät	22
4.3.1 Operointiparametrit	22
4.3.2 Lämmönsiirtimen parametrit	24
4.3.3 Fluidin koostumus	25
5 LIKAANTUMISEN HALLINTA JA PUHDISTAMINEN	26
5.1 Mekaaniset hallintamenetelmät	26
5.2 Kemialliset hallintamenetelmät	28
5.3 Mekaaniset puhdistusmenetelmät	29
5.4 Kemialliset puhdistusmenetelmät	30
6 LIKAANTUMISEN SEURANTA	32
6.1 Dataan perustuva seuranta	34
6.2 Likaantumisen seurantaan tarkoitetun työkalun kehitys	39
7 YHTEENVETO	45
LÄHTEET	47
Liite 1 Putkipuolen filmin lämmönsiirtokertoimen määrittäminen	
Liite 2 Putki- ja vaippapuolen lämmönsiirtokertoimien yhtälöt	

# 1 JOHDANTO

Lämmönsiirtimien likaantuminen on yleinen ja monimutkainen ongelma. Lika aiheuttaa lämmönsiirtimissä lämmönsiirtokyvyn heikkenemistä, lisää virtausvastuksia ja kasvattaa kustannuksia. Jotta näiltä ongelmilta vältyttäisiin tulisi lämmönsiirtimen mitoituksen, käytön ja puhdistuksen olla huolella suunniteltua. Oikeaoppinen operointi, puhdistaminen ja puhdistuksen ajoittaminen tuo kustannuksiin säästöjä ja minimoi lämmönsiirtokyvyn heikkenemisen aiheuttamat ongelmat prosessissa.

Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä sellutehtaan kuumaa vettä valmistavista lämmönsiirtimistä likaantumisen seuranta. Työ on rajattu käsittelemään ainoastaan paisuntalipeänjäähdytintä, joka on sellutehtaan keittämöllä sijaitseva putkilämmönsiirrin. Lämmönsiirtimen toiminnasta tehdään dataan perustuvaa seuranta ja likaantumisen seurantaan tarkoitettu työkalu Savcor Wedge -prosessianalysointijärjestelmän avulla.

Tämä opinnäytetyö on tehty Stora Enso Oulu Oy:n Sellutehtaalle. Sellutehdas valmistaa vuosittain noin 370 000 tonnia valkaistua havusulfaattisellua sekä sivutuotteena raakamäntyöljyä ja tärpähtiä.

## 2 STORA ENSON OULUN SELLUTEHDAS

Stora Enso Oulu Oy:n tehdas sijaitsee Nuottasaaren tehdasalueella Oulun kaupungin tuntumassa. Tehdas koostuu sulfaattisellutehtaasta, kahdesta paperikoneesta ja arkittamosta. Stora Enso Oulu Oy:n paperitehdas on yksi maailman suurimmista ja nykyaikaisimmista puuvapaiden taidepainopapereiden valmistajista. Paperitehtaan tuotanto on 1 125 000 tonnia vuodessa, ja sen päämarkkina-alueet sijaitsevat Euroopassa. Oulussa valmistettavat paperitehtaan tuotemerkit ovat LumiArt ja LumiSilk, joita käytetään korkealaatuisiin painotöihin, kuten esimerkiksi vuosikertomuksien valmistamiseen. (Tehdasesittely. 2017.)

Oululla on pitkät perinteet sellun valmistuksesta, sillä ensimmäinen valkaisu- ja sulfaattisellua valmistava tehdas on otettu käyttöön 1930-luvulla. Nykyisellään sellutehtaan tuotanto on noin 370 000 tonnia valkaistua havusulfaattisellua, josta noin 220 000 tonnia on myyntiin menevää markkinahavusellua. Loput sellumassasta käytetään tehtaan paperikoneilla. Sellutehtaalla saadaan myös sivutuotteena raakamäntyöljyä noin 20 000 tonnia ja raakatärpättiä 1000 tonnia vuodessa. Lisäksi sellutehdas tuottaa Nuottasaaren tehdasalueelle höyryä, sähköä sekä raaka- ja kemiallisesti puhdistettua vettä. Stora Enson lisäksi tehdasalueella toimivat Kraton Chemical Oy, Akzo Nobel Finland Oy, Eka Synthomer Oy sekä Oplax Oy. (Tehdasesittely. 2017; Yleisesitys. 2016.)

Sellutehtaan toiminta voidaan Oulussa jakaa pääasiassa kuitu- ja lipeälinjaan. Seuraavaksi käydään läpi selluprosessin yleiskuva. Kuvassa 1 on esitetty sellutehtaan prosessi lyhyesti.





Pesuvaiheessa ruskeasta massasta erotellaan siihen liuenneita aineita. Massaa pestään keittimessä, keittimen jälkeen, happivaiheessa ja valkaisussa. Keittimen pesun, keittimen jälkeisen pesun ja happivaiheen pesun tarkoitus on massan puhdistaminen jatkokäsittelyä varten sekä mustalipeän ja keittokemikaalien tehokas talteenotto. Seuraavaksi massa jatkaa matkaa lajitteluun, jossa massasta erotellaan haitalliset kiintoainekset, kuten keittymättömät hakepalat, oksat ja kivet. Haitalliset kiintoainekset tulee poistaa, koska ne heikentävät lopputuotteen laatua ja voivat aiheuttaa ongelmia prosessilaitteissa. (Knowpulp 2017.)

Lajittamon jälkeen massa jatkaa matkaansa happidelignifiointiin, joka on suoraa jatkoa ligniinin poistolle. Happidelignifioinnissa jäännösligniinin poisto tapahtuu hapen ja alkalien avulla, jotka hajottavat ja hapettavat ligniiniä alkalien liukenevaan muotoon tuhoamalla ligniinissä olevia värillisiä yhdisteitä ja poistamalla epäpuhtauksia. Happidelignifioinnilla voidaan merkittävästi vaikuttaa tehtaan päästöihin. (Knowpulp 2017.)

Valkaisun tarkoituksena on poistaa valkaisukemikaalien avulla ligniiniä ja nostaa massan vaaleutta. Valkaisukemikaalina Oulun valkaisussa käytetään klooridioksidia ( $\text{ClO}_2$ ) ja happea ( $\text{O}_2$ ). Tällaista prosessia kutsutaan ECF-valkaisuksi. Valkaisu tapahtuu vaiheittain, koska jos valkaisu yritettäisiin tehdä yhdessä vaiheessa, vaikuttaisi se massan lujuus ominaisuuksiin. Valkaisuvaiheet toimivat vuorotellen happamissa olosuhteissa ja alkalisissa olosuhteissa. (Knowpulp 2017; Sakko 2017.)

Valkaistua havusellumassaa käytetään Oulussa kahdella paperikoneella (PK7 ja PK6) ja loput massasta menevät kuivatukseen. Kuivatuksen tehtävänä on kuivata ja paalata sellumassaa myyntiä varten.

## **2.2 Lipeälinja**

Lipeälinja koostuu haihduttamosta, soodakattilasta, kaustisoinnista ja meesanpoltosta. Yhdessä keittämön kanssa nämä muodostavat niin kutsutun kemikaalikierron.

Keittämöltä saatu mustalipeä siirtyy haihduttamon käsiteltäväksi. Haihduttamon tehtävänä on poistaa vettä mustalipeästä sekä siihen sekoitettavista lisävirroista,

jotta sitä voidaan polttaa soodakattilassa. Haihduttamolle tulevan mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on Oulussa luokkaa 18,5 % ja haihduttamolta poistuvan noin 75 %. Vedenpoiston lisäksi haihduttamalla otetaan talteen keitossa syntyviä sivutuotteita, kuten metanolia, tärpähtiä ja suopaa. (Knowpulp 2017.)

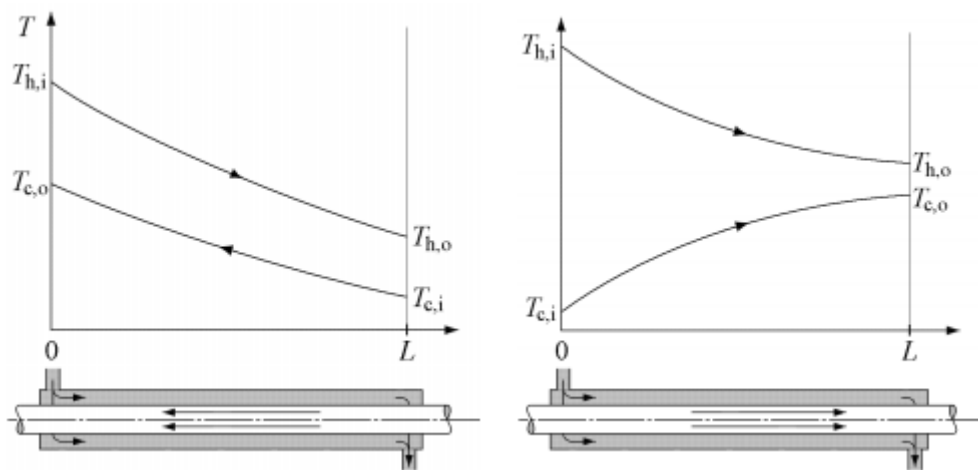
Soodakattilassa poltetaan haihduttamon kautta saatua mustalipeää. Mustalipeän polton tarkoituksena on saada talteen mustalipeän sisältämät keittokemikaalit ja prosessissa syntyvä energia. Mustalipeän sisältämät kemikaalit ovat natrium ja rikki, jotka vapautuvat tulipesässä muodostaen kemikaalisulaa eli natriumkarbonaattia ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ja natriumsulfidia ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). Mustalipeä sisältää myös orgaanisia aineita, jotka palaessaan tuottavat lämpöenergiaa. Lämpöenergian avulla voidaan soodakattilalla tuottaa höyryä prosessitarpeeseen sekä sähkön tuottamiseen. Kattilan pohjalta saatava kemikaalisula sekoitetaan liuottajassa laihavalkolipeään, jolloin syntyy viherlipeää. (Knowpulp 2017.)

Kaustisointi ja meesanpoltto muodostavat yhdessä niin kutsutun kalkkikierron. Viherlipeän muuttaminen valkolipeäksi tapahtuu kaustisoinnissa. Tässä viherlipeässä oleva kalsiumkarbonaatti muutetaan natriumhydroksidiksi poltetun kalkin avulla ( $\text{CaO}$ ). Syntynyttä valkolipeää voidaan taas käyttää keittimellä keittokemikaalina, mutta tätä ennen siitä tulee erottaa kaustisoinnissa syntyvä kalsiumkarbonaatti ( $\text{CaCO}_3$ ) eli meesa. Kalsiumkarbonaatti voidaan muuttaa lämmön avulla meesauunissa takaisin kaustistamalla käytettäväksi kalsiumoksidiksi. (Knowpulp 2017.)

### 3 LÄMMÖNSIIRTIMET

Lämmönsiirrin on laite, jolla siirretään termistä energiaa kahden tai useamman erilämpöisen fluidin välillä. Lämmönsiirtimiä, joissa lämmönsiirtymistä tapahtuu fluidien välillä lämmönsiirtopinnan läpi, kutsutaan rekuperaattoreiksi. Lämmönsiirtymistä voi tapahtua myös suoraan fluidien välillä ilman lämmönsiirtopintaa ja tällöin niistä käytetään nimitystä regeneraattori. Lämmönsiirtimiä käytetään paljon muun muassa prosessi- ja energiateollisuudessa, mutta myös aivan arkipäiväisissä käytännön sovelluksissa, kuten ajoneuvoissa ja ilmanvaihtokoneissa. (Shah – Sekulic 2003, 1–3.)

Lämmönsiirtimet jaetaan virtausjärjestelyiden perusteella yksinkertaisiin vasta-, myötä- ja ristivirtalämmönsiirtimiin. Kuvassa 2 on esitetty vasta- ja myötävirtalämmönsiirtimen toimintaa. Vastavirtalämmönsiirtimissä fluidit virtaavat toisiaan vastaan, ja se onkin termodynaamisesti tarkasteltuna paras muihin virtausjärjestelyihin verrattuna. (Shah – Sekulic 2003, 57–58.)



KUVA 2. Yksinkertainen putkilämmönsiirrin vasta- ja myötävirrassa (Saari 2010, 13)

Myötävirtalämmönsiirtimessä fluidit virtaavat lämmönsiirtimen sisälle samasta päädyistä ja poistuvat lämmönsiirtimestä samasta päädyistä. Fluidit virtaavat siis myötävirtaisesti. Myötävirtalämmönsiirtimen hyötysuhde on melko heikko, ja sen

lisäksi myötävirtalämmönsiirtimen sisään tulevien fluidien korkeat lämpötilaerot voivat aiheuttaa termistä jännitystä lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinnalle. (Shah – Sekulic 2003, 58–60.)

Ristivirtalämmönsiirtimissä fluidit virtaavat toisiaan ristiin ja ristivirtasiirtimen tehokkuus on yleensä vasta- ja myötävirtalämmönsiirtimen välissä. Ristivirtalämmönsiirtimessä fluidit eivät sekoitu, toinen fluideista sekoittuu tai molemmat fluidit voivat olla sekoittuneet. (Shah – Sekulic 2003, 60–63.)

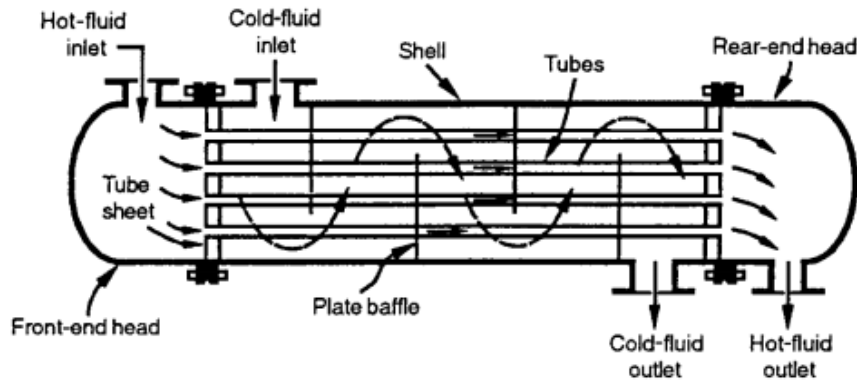
Lämmönsiirtimiä voidaan laittaa sarjaan tai lämmönsiirtimen läpivientien lukumäärää voidaan lisätä, jos yksittäisin lämmönsiirtimen pituus kasvaa liian suureksi, virtausnopeudet jäävät liian mataliksi tai lämmönsiirtimen tehokkuus jää heikoksi. Yhden läpiviennin lämmönsiirtimessä fluidi virtaa lämmönsiirtimen läpi yhden kerran. Monen läpiviennin lämmönsiirtimessä fluidi virtaa lämmönsiirtimen läpi useamman kerran. Läpivientien lisääminen kasvattaa lämmönsiirtimen tehokkuutta ja mitä suurempi lukumäärä niitä lisätään, sitä enemmän lämmönsiirtimen toiminta siirtyy kohti puhtaan vastavirtalämmönsiirtimen toimintaperiaatetta. Läpivientien lisääminen on mahdollista esimerkiksi putki- ja vaippalämmönsiirtimissä ja levylämmönsiirtimissä. (Kuppan 2013, 20.)

Tässä työssä käsitellään ainoastaan putki- ja vaippalämmönsiirtimiä. Muita yleisiä lämmönsiirintyyppejä ovat esimerkiksi kaksoisputkilämmönsiirtimet, levylämmönsiirtimet, spiraalilämmönsiirtimet ja lamellilämmönsiirtimet. (Shah – Sekulic 2003, 21–33.)

### **3.1 Putki- ja vaippalämmönsiirtimet**

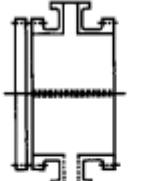


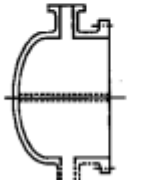
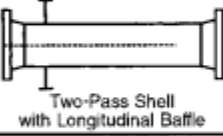
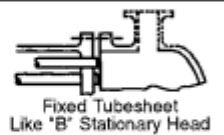
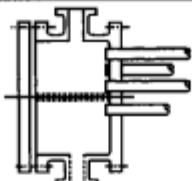


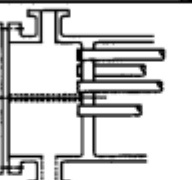
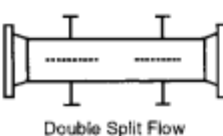

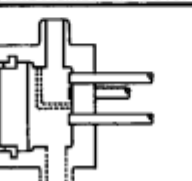
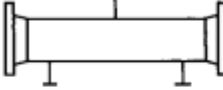
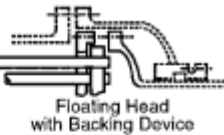
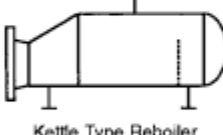
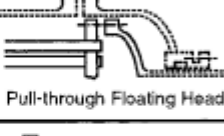
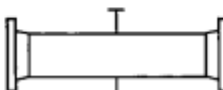
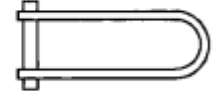
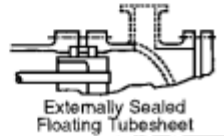
Putkilämmönsiirtimet ovat laajassa käytössä teollisuudessa, koska niitä on saatavilla laaja materiaali- ja kokovalikoima sekä ne voidaan kustomoida eri operointiolosuhteisiin, kuten likaantuviin ja radioaktiivisiin olosuhteisiin. Putkilämmönsiirtimen koostuu putkinipusta, joka on kiinnitettyä sylinterinmuotoisen vaipan sisään. Lämpö putkilämmönsiirtimissä siirtyy siten, että toinen fluideista virtaa putkissa ja toinen putkien ulkopuolella eli vaipassa. Putkilämmönsiirtimen pääkomponentteja ovat putket, vaippa, etupääty, takapääty, välilevyt ja putkilevyt. Kuvassa 3 on

esitetty putkilämmönsiirrin, jossa on yksi putki- ja vaippapuolen läpivienti. Lisäksi siinä on esitetty sen komponentteja ja toimintaa. (Shah – Sekulic 2003, 13–15.)



KUVA 3. 1-1-putkilämmönsiirrin ja sen komponentit (Shah – Sekulic 2003, 14)

Putkilämmönsiirtimissä käytetään erilaisia rakenteita, joilla voidaan saavuttaa haluttu lämmönsiirto ja painehäviöt. Erilaisilla rakenteilla voidaan myös helpottaa myös muun muassa lämmönsiirtimien puhdistamista ja vuotojen syntyä. Putkilämmönsiirtimet luokitellaan ja valmistetaan yleisesti ottaen TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) -standardien mukaan. Muita standardeja ovat Euroopassa käytettävä DIN ja amerikkalainen ASME. TEMA on kehittänyt järjestelmän, jonka mukaan putkilämmönsiirtimet voidaan luokitella eri pääryhmiin. Järjestelmässä käytetään kolmea eri kirjainta, joista ensimmäinen kertoo etupäädyn, keskimäinen vaipan ja viimeinen takapäädyn rakenteen. Muutamia yleisimpiä putkilämmönsiirtimen rakenteita ovat AES- ja BEM-tyyppiset putkilämmönsiirtimet. Kuvassa 4 on esitetty TEMA-standardin mukaiset rakenteet. (Shah – Sekulic 2003, 13.)

Front-End Stationary Head Types		Shell Types		Rear-End Head Types	
A	 Channel and Removable Cover	E	 One-Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like 'A' Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like 'B' Stationary Head
C	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow	N	 Fixed Tubesheet Like 'N' Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High-Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle Type Reboiler	T	 Pull-through Floating Head
		X	 Crossflow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

KUVA 4. TEMA-standardin mukaiset rakenteet päädyille ja vaipoille (Shah – Sekulic 2003, 15)

### 3.2 Lämmönsiirtimen mitoitukseen liittyvä laskenta

Lämmönsiirtimen teho on sama kylmällä ja kuumalla puolella, jos oletetaan, että lämmönsiirtimessä ei tapahdu häviöitä ensimmäisen termodynamiikan pääsääntön mukaisesti. Alaviite h viittaa kuumaan fluidiin ja c kylmään fluidiin. Lämmönsiirtimen teho lasketaan kaavalla 1. (Kuppan 2013, 41.)

$$q = (\dot{m}c_p)_h(T_{hi} - T_{ho}) = (\dot{m}c_p)_c(T_{co} - T_{ci}) \quad \text{KAAVA 1}$$

$\dot{m}$  = Fluidin massavirta [kg/s]

$c_p$  = Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

$T_{hi}$  = Kuuman fluidin sisääntulolämpötila [K]

$T_{ci}$  = Kylmän fluidin ulostulolämpötila [K]

$T_{ho}$  = Kuuman fluidin sisääntulolämpötila [K]

$T_{co}$  = Kylmän fluidin ulostulolämpötila [K]

Lämmönsiirtimen läpi siirtyvä teho lasketaan kaavalla 2. Lämmönsiirtimen tehon kaavasta voidaan laskea esimerkiksi kokonaislämmönsiirtokerroin U. (Kuppan 2013, 45.)

$$q = UAF\Delta T_{lm} \quad \text{KAAVA 2}$$

U = Kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

A = Lämmönsiirtopinta-ala [m<sup>2</sup>]

F = Logaritmisen lämpötilaeron korjauskerroin

$\Delta T_{lm}$  = Logaritminen lämpötilaero

Logaritminen lämpötilaero lasketaan kaavalla 3. Logaritmista lämpötilaeroa ei voida käyttää sellaisenaan, jos virtausjärjestelyt poikkeavat yksinkertaisista vasta- ja myötävirtalämmönsiirtimistä. Sen vuoksi logaritmista lämpötilaa joudutaan muokkaamaan logaritmisen lämpötilaeron korjauskertoimella F. Korjauskerroin on esitetty kaavassa 2. Korjauskertoimeen vaikuttavat lämmönsiirtimen rekuperaatioaste, kapasiteettivirtojen suhde ja lämmönsiirtimen virtausjärjestely. Korjauskerroin määritellään kirjallisuudesta löydettävillä kaavoilla tai yhtälöillä. (Kuppan 2013, 45–47; Saari 2010, 39–41.)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

KAAVA 3

$\Delta T_1$  = on virtauksen lämpötilaero lämmönsiirtimen alkupäässä [K]

$\Delta T_2$  = on virtaukseen lämpötilaero lämmönsiirtimen loppupäässä [K]

$\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$  ovat fluidien lämpötilaerot vasta- ja myötävirtalämmönsiirtimen päissä. Kuvassa 2 on esitetty fluidien lämpötilaerojen muodostumista kyseisissä lämmönsiirtimissä. Vastavirtalämmönsiirtimelle logaritminen lämpötilaero muodostuu seuraavasti.

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

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

Myötävirtalämmönsiirtimelle vastaavasti

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

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



## 4 LIKAANTUMINEN

Lämmönsiirtimien likaantumisella tarkoitetaan likaavien kerroksien muodostumista lämmönsiirtopinnoille. Likakerrostumat häiritsevät lämmönsiirtoprosessia ja virtauksien kulkua. Lian muodostamalla kerroksella on korkeampi lämmönvastus kuin lämmönsiirtopinnalla, joten se vastustaa lämmönsiirtoa ja heikentää lämmönsiirtimen tehokkuutta. Likakerrostumat vaikuttavat myös lämmönsiirtimen virtauspoikkipinta-aloihin, minkä vuoksi lämmönsiirtimen painehäviöt kasvavat. Kasvavien painehäviöiden takia joudutaan kasvattamaan esimerkiksi pumppujen tehoja, jotta tarvittu lämmönsiirtoteho säilyisi. (Garrett-Price – Smith – Watts – Knudsen – Marner – Suitor 1985, 9–10.)

Likaantuminen otetaan yleensä huomioon jo lämmönsiirtimen mitoitusvaiheessa likaantumisvastuksella  $R_f$  ja se lisää lämmönvastusta. Likaantumisvastus kasvattaa myös tarvittavaa lämmönsiirtopinta-alaa. Kaavassa 4 on esitetty lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroin  $U$  putken ulkopinnan suhteen. Alaviite  $o$  tarkoittaa vaippapuolta ja  $i$  putkipuolta. (Garret-Price ym.1985, 9–10.)

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{R_w}{A_w} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_i A_i} \quad \text{KAAVA 4}$$

$h$  = Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin

$A$  = Putken seinämän pinta-ala

$A_w$  = Keskimääräinen seinämän pinta-ala

$R_f$  = Likaantumisvastus

$R_w$  = Seinämän lämmönsiirtovastus

$U$  = Kokonaislämmönsiirtokerroin

Likaantumisvastuksien oikeaoppinen käyttö on hyvin pitkälle kokemusperäistä ja aiempiin likaantumisen seurannan tuloksiin pohjautuvaa. Apuna voidaan käyttää esimerkiksi TEMA-standardin likaantumisvastuksia, mutta niidenkin käyttö on hyvin rajallista. (Kuppan 2013, 477.) Taulukossa 1 on esitetty muutamia likavastuksen arvoja.

TAULUKKO 1. Putki- ja vaippalämmönsiirtimien likavastuksia (Müller-Steinhausen 2010, 81-82)

	Likavastus (m <sup>2</sup> K/kW)
<b>Käsittelemätön vesi</b>	0,35 - 0,53
<b>Höyry</b>	0,0 - 0,18
<b>Mustalipeä</b>	0,7 - 1,4

Motivan teettämässä Energiatehokas lämmönsiirto -oppaassa arvioidaan, että likaantumisen aiheuttamat kulut olisivat Suomessa noin 500 miljoonaa euroa vuodessa. Arvio perustuu siihen, että likaantumisen aiheuttamat kulut ovat 0,25 % maan bruttokansantuotteesta, kuten se on esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Saksassa. (Energiatehokas lämmönsiirto 2016, 3.) Likaantuminen kasvattaa kustannuksia käytännössä investoinneissa, energiakuluissa, tuotannonmenetyksissä ja huoltokuluissa. Taulukossa 2 on eritelty, kuinka likaantuminen kasvattaa erilaisia kustannuksia. (Awad 2011, 514.) Suomessa kannattaa lähtökohtaisesti panostaa investointeihin ja pyrkiä sitä kautta vähentämään lämmönsiirtimen puhdistustarvetta, koska puhdistukseen käytettävä työvoima on kallista. (Energiatehokas lämmönsiirto 2016, 6).

TAULUKKO 2. Likaantumisesta aiheutuvat kulut ja niiden syyt (Awad 2011, 514)

Kulut	Mikä kasvattaa?
<b>Investoinnit</b>	Ylimittaus sekä suuremmat kuljetus- ja asennuskustannukset.
<b>Energiakustannukset</b>	Lämmönsiirtotehon heikkeneminen ja kasvavat painehäviöt.
<b>Tuotannonmenetykset</b>	Suunnitellut ja suunnittelemattomat seisokit likaantumisesta johtuen.
<b>Huoltokulut</b>	Lämmönsiirtimien puhdistaminen ja hallintamenetelmien käyttö.

#### 4.1 Likaantumisen tyypit

Likaantumisen tyypit voidaan luokitella kuuteen eri kategoriaan, joita ovat saostuminen, partikkelilikaantuminen, kemiallinen likaantuminen, korroosiolikaantuminen, biologinen likaantuminen ja jäätyminen (Garrett-Price ym. 1985, 10–11). Yleensä lämmönsiirtimissä saattaa esiintyä useampaa kuin yhtä eri likaantumistyyppiä, jolloin likaantumisongelmasta tulee monimutkaisempi. Tällaisissa tapauksissa likaantumistyyppit voivat vaikuttaa synergistisesti eli ne tehostavat toistensa vaikutusta. (Awad 2011, 508.)

Saostumisessa fluidiin liuenneet aineet kiteytyvät lämmönsiirtopinnoille. Saostumista esiintyy, kun ylikyllästämisen johdosta fluidiin liuenneet epäorgaaniset suolat kerrostuvat lämmönsiirtopinnoille. Ylikyllästymistä voi tapahtua höyrystymisessä, jäähdyttämisessä ja lämmittämisessä sekä prosessivirtojen sekoittamisessa. Joissakin tapauksissa aines saostuu ennemmin lämmitetylle kuin jäähdytetylle pinnalle. Tällaista tilannetta kutsutaan käänteiseksi liukoisuudeksi. Kään-

teisen liukoisuuden ominaisuuksilla varustettuja suoloja on muun muassa merivedessä. Mitä useampaa eri suolaa saostumakerros sisältää, sen helpompi se on poistaa lämmönsiirtopinnalta. (Garrett-Price ym. 1985, 10.)

Partikkeliliikaantumisessa virtaavan fluidin sisältämät suspendoituneet partikkelit kerrostuvat lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinnalle. Jos kerrostumia syntyy gravitaation vaikutuksesta ja silloin kerrostumista kutsutaan sedimentaatioksi. Suspendoituneet partikkelit saattavat sisältää ympäristön epäpuhtauksia, korroosiotuotteita tai kemiallisen reaktion tuotteita. Ympäristön epäpuhtaudet voivat olla esimerkiksi hiekkaa, rautamineraaleja tai mikrobio-organismeja jäähdytysvedessä. (Garrett-Price ym. 1985, 12.)

Kemiallisessa liikaantumisessa lämmönsiirtopinnalle muodostuu kerrostumia, jotka ovat syntyneet kemiallisessa reaktiossa virtaavan fluidin kanssa. Lämmönsiirtimen pinta ei ole reaktantti, mutta se saattaa toimia ilmiössä katalyyttinä. Kemiallinen liikaantuminen on yleistä muun muassa öljynjalostuksessa ja ruuan prosessoinnissa. (Garrett-Price ym. 1985, 12.)

Korroosiolikaantumisen syntyminen sisältää kemiallisen tai sähkökemiallisen reaktion fluidin ja lämmönsiirtopinnan välillä. Reaktion tuloksena lämmönsiirtopinnan syntyä likaavia korroosiotuotteita. Korroosiolikaantumista voi syntyä kahdella eri tavalla: korroosiotuotteet kiinnittyvät lämmönsiirtopinnalle tai korroosiotuotteet kulkeutuvat jostakin aiemmasta vaiheesta toiseen paikkaan ja kerrostuvat lämmönsiirtopinnalle. Korroosiolikaantuminen on vallitseva monessa tapauksessa, jossa on havaittavissa kemiallista liikaantumista. (Awad 2011, 507.)

Biologinen liikaantuminen on hyvin yleistä vettä sisältävissä prosesseissa. Siinä lämmönsiirtopinnalle kiinnittyy ja kasvaa mikro- ja makro-organismien muodostamaa likaa. Syntynyt lika on yleensä biofilmin tai liman muodossa. Biologinen liikaantuminen voidaan jakaa kahteen alatyypin: mikrobiolikaantumiseen ja makrobiolikaantumiseen. Mikrobiolikaantuminen on mikro-organismien kiinnittymistä lämmönsiirtopinnoille, ja näitä voivat olla esimerkiksi levät, sienet, hiivat ja bakteerit. Makrobiolikaantuminen on makro-organismien kiinnittymistä lämmönsiirto-

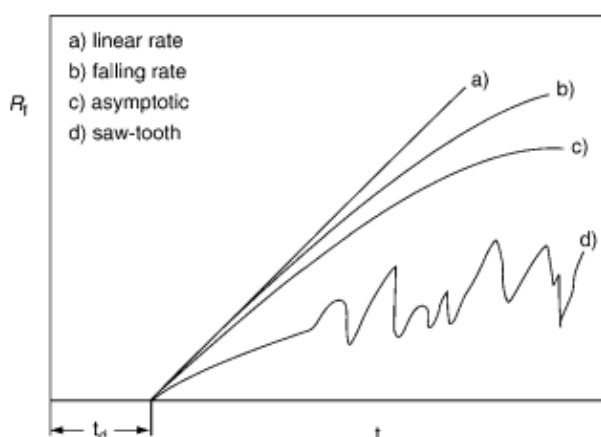
pinnalla, ja näitä voivat olla esimerkiksi simpukat ja muut meriveden kasvillisuudet. Mikrobiolikaantumisen aiheuttaa makrobiolikaantumista, joten yleensä mikrobiolikaantumisen hallinta on ensisijaista. (Awad 2011, 507.)

Jäätymisessä kerrostumat muodostuvat lämmönsiirtopinnalle joko fluidin jäätyessä tai korkean sulamispisteen sisältävän komponentin jäätyessä alijäähtyneelle pinnalle. Tämän tyyppin esimerkkinä voidaan käyttää jään muodostumista veden jäähdytyksessä. (Garrett-Price ym. 1985, 13.)

#### 4.2 Likaantumisen vaiheet

Likaantuminen voidaan jakaa kerrostumis- ja poistoprosessiin. Näistä kerrostumiseen kuuluvat alkuvaihe, aineensiirto lämmönsiirtopinnalle ja kerrostuminen. Poistoprosessiin kuuluvat poisto ja irtoaminen lämmönsiirtopinnalta. (Awad 2011, 508.) Myös vanheneminen voidaan laskea omaksi likaantumisen vaiheeksi (Garrett-Price ym. 1985, 13).

Alkuvaiheen aikana lämmönsiirtopinnan olosuhteet muuttuvat siten, että likaantuminen on mahdollista. Kuvassa 5 on esitetty alkuvaihetta kuvastava aikaväli  $t_d$  sekä likaantumisvastuksen käyttäytyminen ajan suhteen. (Garrett-Price ym. 1985, 13.) Alkuvaiheen kestoon vaikuttavat esimerkiksi pinnan lämpötila, fluidin nopeus ja lämmönsiirtopinnan olosuhteet (Awad 2011, 10).



KUVA 5. Likaantumisvastuksen kehitys ajan suhteen (Müller-Steinhagen 2010, 84)

Aineensierrossa virtaavasta fluidista siirtyy lämmönsiirtopinnalle jokin likaava komponentti. Aineensiertoon vaikuttavia mekanismeja on muun muassa diffuusio, elektroforeesi, termoforeesi ja sedimentaatio. (Awad 2011, 510.)

Lian kiinnittyminen johtuu kemikaalisista ja fysikaalisista prosesseista, jotka eivät ole vielä täysin ymmärrettyjä. Kolme merkittävää tekijää vaikuttavat kerrostumisen syntymiseen ovat pinnan olosuhteet, pinnan voimat sekä lian tarttumisen mahdollisuus. (Awad 2011, 510–511.)

Likakerroksen poistumista saattaa ilmetä samaan aikaan kun likakerroksia muodostuu. Likakerroksia poistuu, kun jokin seuraavista mekanismeista vaikuttaa kerrostumiin yksin tai yhtä aikaa: leikkausrasitus, turbulenssi ja eroosio. (Shah – Sekulic 2003, 874.)

Kerrostumien vanheneminen alkaa kiinnittymisvaiheessa, ja siihen vaikuttaa kaikki mitä likamateriaalille tapahtuu ajan kuluessa. Vanheneminen vaikuttaa likakerrostumien lämmönjohtokykyyn, ja lisäksi se saattaa vahvistaa tai heikentää likakerrostumia. (Shah – Sekulic 2003, 874.)

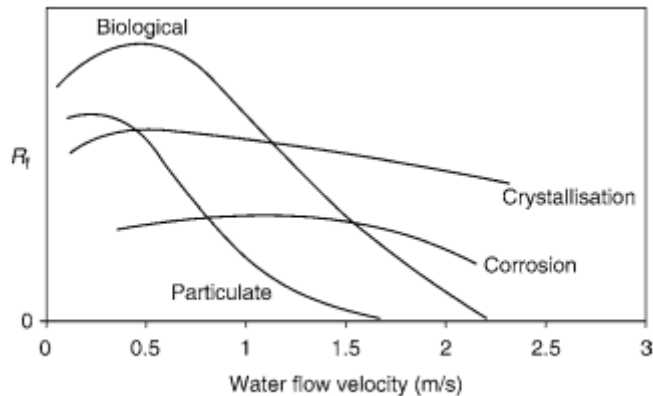
### **4.3 Likaantumista aiheuttavat tekijät**

Likaantumisprosessiin vaikuttavat monet operointiin ja suunnitteluun liittyvät muuttujat. Näitä muuttujia tarkistellaan likaantumisongelmien selvittämiseksi ja siksi, että suunnittelija voi vaikuttaa niihin. Likaantumista aiheuttavia tekijöitä ovat operointiparametrit, lämmönsiirtimen parametrit ja fluidin koostumus. (Awad 2011, 517.)

#### **4.3.1 Operointiparametrit**

Lämmönsiirtimissä virtaavan fluidin nopeuden kasvu vähentää likaantumista. Nopeuden kasvu saattaa nopeuttaa lian kerrostumista, mutta toisaalta se vauhdittaa lian irtoamista, jolloin kokonaislikaantuminen vähenee. Nopeuden kasvun aiheuttama lian irtoaminen johtuu lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinnan leikkausjännityksestä ja likakerrostuman mekaanisesta lujuudesta. Liian matalat virtausnopeudet edistävät likaantumista varsinkin biologisessa likaantumisessa, mutta toi-

saalta suuremmat virtausnopeudet voivat edistää joidenkin organismien aiheuttamaa likakerroksien kasvua. (Garrett-Price ym. 1985, 16.) Kuvassa 6 on esitetty veden nopeuden vaikutusta likaantumisvastukseen erilaisilla likaantumistyypeillä.



*KUVA 6. Veden nopeuden vaikutus likaantumisvastukseen (Müller-Steinhagen 2010, 84)*

Lämmönsiirtopinnan lämpötilalla on todettu olevan hyvin erilaisia vaikutuksia likaantumisen syntymiseen. Pinnan lämpötila kasvu saattaa vähentää tai kasvattaa likaantumista. Pinnan lämpötila voi olla myös vaikuttamatta likakerrostuman muodostumiseen. Voidaan kuitenkin todeta, että likaantumista ilmenee runsaammin, kun pinnan lämpötila kasvaa. Korkeampi pinnan lämpötila muun muassa kiihdyttää korroosiota, saostumista ja muita reaktiota. Matalammat pinnan lämpötilat hidastavat likaantumista ja niiden kautta syntynyt lika on yleensä helposti irrotettavissa. Toisaalta matalat lämpötilat voivat kuitenkin aiheuttaa saostumista ja jähmettymistä. Pinnan lämpötilan aiheuttama likaantuminen voidaan pitää kurissa löytämällä optimaalinen pinnan lämpötila sille tarkoitettussa prosessissa. (Awad 2011, 517.)

Virtaavan fluidin lämpötila vaikuttaa lian muodostumiseen, sillä likaantumisvastus kasvaa fluidin lämpötilan noustessa. Fluidin lämpötila vaikuttaa polymerisaation, kemiallisen reaktion ja saostumisen nopeuteen. (Garrett-Price ym. 1985, 17.)

### 4.3.2 Lämmönsiirtimen parametrit

Lämmönsiirtimien rakenteeseen liittyvillä parametreilla on suuri vaikutus lian muodostumiseen. Näitä vaikuttavia parametrejä ovat pintamateriaali, pinnan karheus ja lämmönsiirtimen tyyppi. (Garrett-Price ym. 1985, 17.)

Pintamateriaali vaikuttaa merkittävästi korroosio likaantumisen syntymiseen. Muissa likaantumisen tyypeissä pintamateriaalin ei ole todettu aiheuttavan likaantumista. Kupari estää biologista likaantumista biosidisilla vaikutuksillaan eli se tappaa eläviä organismeja. (Garrett-Price ym. 1985, 17.) Hiiliteräs on halpa ja yleinen materiaali, mutta se on altis korroosiolle. Titaani ja nikkeli eivät taas ole alttiita korroosiolle, mutta ne ovat erittäin kalliita ja niillä ei ole biosidisia vaikutuksia. (Awad 2011, 517–518.)

Karheat pinnat edistävät likaantumista, koska luovat alkuvaiheessa ydinkeskuk-sia kerrostumille ja helpottavat varsinkin hiukkaslikaantumisessa partikkelien tarttumista lämmönsiirtopinnalle. Karheus luo myös turbulentsuutta fluidiin ja aiheuttaa epätasapainon viskoosin kerroksissa. Paremmalla pinnan viimeistelyllä voidaan viivästyttää likaantumista ja helpottaa pintojen puhdistamista. Sileät pinnat voivat muuttua karheammiksi kulumisen, korroosion ja karstan muodostumisen johdosta. (Awad 2011, 518.)

Lämmönsiirtimen rakenteen huolellisella suunnittelulla voidaan vähentää likaantumisen syntymistä. Likaavampi fluidi kannattaa sijoittaa putkipuolelle putkilämmönsiirtimissä, koska putkipuoli on helpompi puhdistaa ja myös virtausnopeudet ovat siellä suuremmat. Matalat virtausnopeudet aiheuttavat virtauksen seisahdumista ja edesauttavat likaantumisen syntyä. Putkilämmönsiirtimissä kannattaa kiinnittää myös huomiota vaippapuolen virtausnopeuteen, joka on yleensä pienempi kuin putkipuolella. Jos likaantumista on odotettavissa vaippapuolella, kannattaa välilevyjen suunnittelussa keskittyä etenkin välilevyjen välityksiin ja leikkauksiin. Levy- ja spiraalilämmönsiirtimissä on suuret virtausnopeudet sekä korkea turbulentsuus ja tämän vuoksi ne eivät likaannu yhtä herkästi kuin putkilämmönsiirtimet. (Awad 2011, 519.)



### 4.3.3 Fluidin koostumus

Fluidin tyyppi ja siihen liuenneet aineet vaikuttavat likaantumisen syntymiseen. Esimerkiksi jäähdytysvesijärjestelmissä ja höyryntuotossa veden laadulla on todella suuri merkitys likaantumisen syntymiseen. (Garrett-Price ym. 1985, 18.)

Fluidin ominaisuuksista esimerkiksi viskositeetti ja tiheys vaikuttavat likaantumisen syntymiseen. Ne vaikuttavat myös pinnan leikkausjännitykseen, joka on taas merkittävässä roolissa lian poistumisessa. (Awad 2011, 518.)

## 5 LIKAANTUMISEN HALLINTA JA PUHDISTAMINEN

Likaantuneen lämmönsiirtimen puhdistaminen palauttaa lämmönsiirtimen tehokkuuden aikaisemmalle tasolle. Puhdistusväli riippuu hyvin pitkälti likaantumisongelman ankaruudesta. Joitakin lämmönsiirtimiä puhdistetaan muutamia kertoja vuodessa ja toiset voivat vaatia puhdistuksia hyvinkin säännöllisesti, kuten kuukausittain. (Awad 2011, 530.)

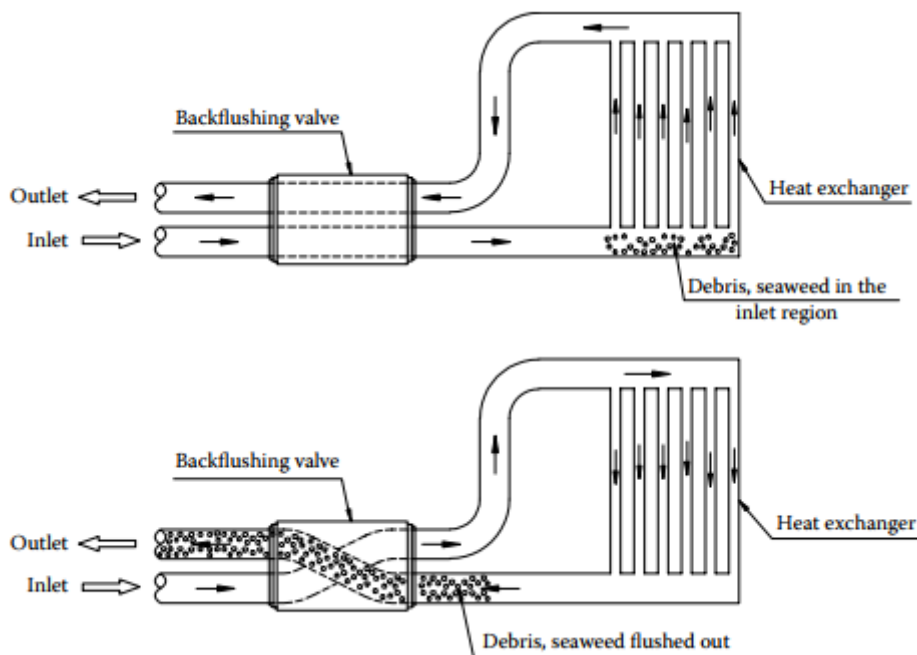
Lämmönsiirtimien puhdistaminen voidaan jakaa kahteen kategoriaan eli mekaaniseen ja kemialliseen puhdistamiseen. Puhdistukset suoritetaan yleensä siten, että lämmönsiirtimet on irrotettu irti prosessista. Tällaista tapaa kutsutaan offline-puhdistusmenetelmäksi. Jos puhdistamista suoritetaan käytön aikana, käytetään termiä online-menetelmä. (Awad 2011, 530–531.) Käytännössä online-menetelmät eivät ole varsinaisesti puhdistamiskeinoja vaan pikemminkin likaantumisen hallintaan tarkoitettuja keinoja.

Ennen kuin lämmönsiirtimen puhdistamista aletaan suorittamaan, olisi syytä analysoida likakerrostuman koostumusta ja löytää syyt lämpöpinnan likaantumiselle. Tämän jälkeen myös oikean puhdistamistavan määrittäminen helpottuu. Puhdistamistavan valintaan vaikuttavat muun muassa likaantumisen aste, likaantumistapa, materiaalien yhteensopivuus kemikaalien kanssa, lämmönsiirtopintojen puhdistamisen helppous ja tietenkin puhdistamisesta aiheutuvat kulut. (Awad 2011, 531.) Paras ratkaisu pahasti likaantuneille lämmönsiirtimille yleensä on mekaanisen ja kemiallisen puhdistamisen yhdistelmä (Müller-Steinhagen 2010, 103).

### 5.1 Mekaaniset hallintamenetelmät

Mekaaniset hallintamenetelmät ovat käteviä, koska ne eivät vaadi lämmönsiirtimen irtikytkentää prosessista ja säästävät aikaa ja rahaa puhdistamiselta. Toisaalta joidenkin mekaanisten menetelmien hankinta voi olla todella kallista. Yksinkertaisimmillaan mekaanisen hallintamenetelmien käyttö voi olla virtaavan fluidin suodattamista tai virtauksen turbulentsisuuden kasvattamista hetkellisesti esimerkiksi virtausnopeuksia nostamalla. (Awad 2011, 535–536.)

Yleinen tapa ehkäistä likaantumista on virtaussuuntien kääntö. Virtaussuuntien käännön yhteydessä myös virtausnopeutta voidaan hetkellisesti nostaa ja näin heikot likakerrostumat yleensä irtoavat. Virtaussuuntien kääntö ehkäisee likaantumista kuitenkin vain hetkellisesti. Kuvassa 7 on esitetty virtaussuuntien käännön toimintaperiaatetta. (Müller-Steinhagen 2010, 97–98.)



KUVA 7. Virtaussuuntien käännön toimintaperiaate (Kuppan 2013, 493)

Likaantumista voidaan hallita myös käyttämällä esimerkiksi TAPROGGE-järjestelmää. Siinä jäähdytysvesikierrossa kiertää kumipalloja, jotka ovat hiukan isompia kuin lämmönsiirtimen putken sisähalkaisija. Veden virtaus pakottaa pallot putkien läpi puhdistaan samalla putkien sisäpinnat likakerrostumista. Järjestelmällä ei voida kuitenkaan irrottaa kovia likakerrostumia. (Awad 2011, 536.)

Muita hallintakeinoja voivat olla esimerkiksi ultraäänen käyttö tai putkien sisälle lisättävät metallilangat. Ultraäänen avulla tehdyillä ravistuksilla on saavutettu laboratorio-olosuhteissa hyviä tuloksia, mutta teollisuuden mittakaavassa sen käyttö on vielä hyvin rajoitettua. (Müller-Steinhagen 2010, 98.)

## 5.2 Kemialliset hallintamenetelmät

Likaantumisenestoaineilla pyritään estämään likaantumista lämmönsiirtopinnoilla ja niistä saadaankin paras hyöty, kun niiden käyttö aloitetaan heti lämmönsiirtimen puhdistuksen jälkeen. Likaantumisenestoaineita ei voi siis käyttää varsinaiseen lämmönsiirtopintojen puhdistukseen. (Müller-Steinhagen 2010, 94.) Käytännössä kaikille eri likaantumistypeille on olemassa niille tarkoitettuja estoaineita.

Saostumista voidaan estää suolanpoistolla tai kemikaalisella käsittelyllä, kuten saostumanestoaineilla. Myös liuoksen pH-arvon aleneminen voi nostaa saostumisen riskiä. (Müller-Steinhagen 2010, 95.) Saostumanestoaineet ovat kalliita, mutta niistä saatava hyöty on selluprosessille mittava (Pöllänen 2017).

Partikkeliliikaantumisen aiheuttamaa likaantumista saadaan vähennettyä joko pinta-aktiivisilla lisäaineilla tai dispergointiaineilla. Dispergointiaineet estävät liukenemattomia partikkeleita kasautumasta suuremmiksi partikkeleiksi lämmönsiirtopinnoille. (Müller-Steinhagen 2010, 95.)

Kemiallista likaantumista voidaan pitää kurissa antioksidanteilla, metallin deaktiivointiaineilla ja dispergointiaineilla. Antioksidanttien tehtävä on estää hapen aiheuttamaa polymerisaatiota esimerkiksi kuluttamalla happea tai reagoimalla hapen kanssa. (Müller-Steinhagen 2010, 95.)

Korroosion aiheuttamaa likaantumista voidaan estää korroosion estoaineilla ja pH-arvon säädöllä. Suositeltava suoja korroosiolikaantumista vastaan on ohut, passivoiva oksidikerros lämmönsiirtoputkiston pinnalla. Kromaattipohjaiset estoaineet ovat tehokkaita ja halpoja, mutta toisaalta niiden käyttöä rajoittaa, että ne ovat ympäristömyrkkyjä. Toinen yleinen korroosionestoaine on polyfosfaatti, joka saattaa myös tehostaa likaantumista lisäämällä suoloja virtaavaan veteen. (Müller-Steinhagen 2010, 97.)

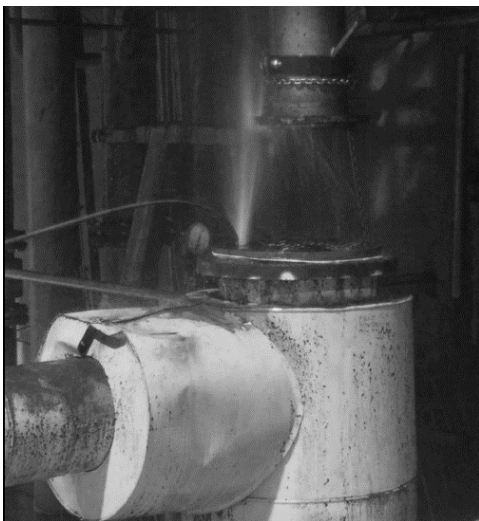
Biologista likaantumista hallitaan yleensä biosidisilla lisäaineilla. Näistä yleisin on kloori, joka reagoi veden muodostaen hypokloorihappoa. (Müller-Steinhagen 2010, 96.)

### 5.3 Mekaaniset puhdistusmenetelmät

Mekaanisia puhdistusmenetelmiä käytettäessä lämmönsiirtimen täytyy olla irrottuna prosessista ja purettu auki. Mekaanisista menetelmistä yleisimmät ovat vedellä ja höyryllä tehtävät painepesut, jossa pesupaineet voivat olla jopa 1500 bar. Painelaitteilla tehtäviin pesuihin tarvitaan aina ammattitaitoista työvoimaa, koska pesulaitteissa olevat paineet ovat vaarallisia. Painepesu ei välttämättä irrota kaikkea kerrostumia, jolloin veden sekaan voidaan lisätä esimerkiksi hiekkaa tehostamaan pesutulosta. (Müller-Steinhagen 2010, 102–103.)

Lämmönsiirtimen putkien läpi voidaan myös ampuu kumikuulia tai metallisia kappimpia veden- tai ilmanpaineen avulla. Kuulien ja kappimpien käyttö on nopeampaa verrattuna painepesulla tehtävään lämmönsiirtimen puhdistukseen. (Müller-Steinhagen 2010, 103.) Muita lämmönsiirtimien mekaanisiin puhdistuksiin käytettyjä keinoja ovat muun muassa lämmönsiirtimen manuaalinen puhdistus ja erilaisten nuohointien käyttö (Awad 2011, 532).

Mekaaniset puhdistuskeinot ovat yksinkertaisia, ja niiden avulla voidaan avata jopa täysin tukkoisia putkia. Kuvassa 8 on esitetty putkilämmönsiirtimen painepesua. Huonoksi puoleksi mekaanisessa puhdistuksessa voidaan katsoa se, että ne voivat aiheuttaa vahinkoa lämmönsiirtimen materiaaleille. (Awad 2011, 532.) Ne voivat esimerkiksi vahingoittaa putkia suojaavaa oksidikerrosta, joka aiheuttaa korroosio-ongelmia (Müller-Steinhagen 2010, 103).



*KUVA 8. Putkilämmönsiirtimen painepesu eli ”myyräys”*

## 5.4 Kemialliset puhdistusmenetelmät

Kemiallisia puhdistusmenetelmiä käytettäessä lämmönsiirtimen tulee olla irrotettuna prosessista, mutta lämmönsiirrintä ei tarvitse välttämättä purkaa. Yleisin kemiallisen puhdistuksen menetelmä on kierrätyksenä tehtävä pesu. (Garrett-Price ym. 1985, 74.)

Levylämmönsiirtimien ja putkilämmönsiirtimien pesut eivät juurikaan eroa toisistaan, mutta putkilämmönsiirtimien vaippapuolen huuhtelu vaatii enemmän aikaa ja vettä. Lämmönsiirtimet voidaan pestä CIP-pesuna (Cleaning-in-place), eli pesu tehdään paikallaan lämmönsiirrintä avaamatta. Yleensä kemiallinen pesu aloitetaan huuhtelemalla lämmönsiirtimen pinnat erilaisista irtoroskista ja tarkastamalla lämmönsiirtimen tiivistykset. Seuraavaksi lämmönsiirtimeen lisätään vettä, jota lämmitetään ja kierrätetään lämmönsiirtimessä. Tämän jälkeen kierrätettävään veteen lisätään puhdistava kemikaali sekä tarvittaessa inhibiittori. Puhdistava kemikaali on yleensä happojen sekoitus, mutta se mitä happoa käytetään, riippuu lämmönsiirtimen pinnoille kertyneestä sakasta. Pesuliuos kiertää lämmönsiirtimen läpi tietyn aikaa, minkä jälkeen pesunesteet valutetaan siirtimestä ulos joko kanaaliin tai talteen jätekonttiin. Tässä välissä tehdään lämmönsiirtimelle vielä huuhtelu. Kun varsinainen pesuvaihe on ohi, lämmönsiirtimien pinnat passivoidaan vielä alkaliliuoksella. (Korpelin 2017.)

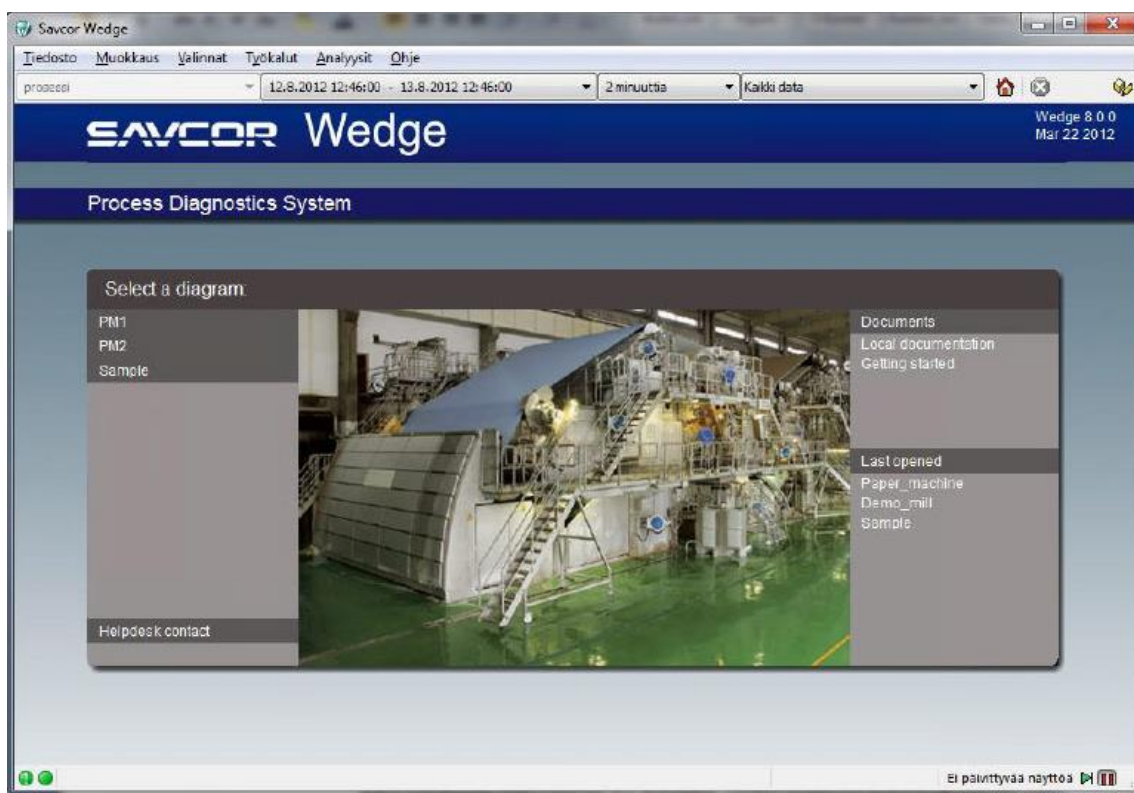
Kemiallisesti tehdyllä pesulla voidaan saavuttaa monia hyötyjä. Se on nopea ja tehokas tapa pestä lämmönsiirrin, koska lämmönsiirrintä ei tarvitse purkaa. Se ei myöskään sido niin paljon työvoimaa kuin mekaaninen puhdistus. Kemiallisella pesulla voidaan myös pestä niitä paikkoja, jotka ovat mekaanisesti saavuttamattomissa. Lisäksi kemiallinen pesu ei vaurioita lämmönsiirtopintoja kuten mekaaniset puhdistuskeinot. (Garrett-Price ym. 1985, 74.) Kemiallisessa pesussa käytettävät aineet ovat kuitenkin vaarallisia kemikaaleja ja ne voivat syövyttää metalleja sekä muodostaa pesun aikana myrkyllisiä kaasuja (Awad 2011, 535). Taulukossa 3 on esitetty muutamia lämmönsiirtimen puhdistamisessa käytettäviä happoja.

TAULUKKO 3. Muutamia lämmönsiirtimien puhdistukseen käytettäviä happoja  
(Müller-Steinhagen 2010, 102)

<b>Pesuaine</b>	<b>Käyttökohde</b>
<b>Hydrokloorihappo</b>	Ruosteen ja metallihilseen irrotukseen metalliputkista.
<b>Rikkihappo</b>	Ruosteen ja metallihilseen irrotukseen haponkestävälle teräkselle.
<b>Muurahaishappo</b>	Ruostumattomasta teräksestä valmistetut lämmönsiirtopinnat ja ei-ferriittisten materiaalien saostumat.
<b>Natriumkloridi</b>	Veden kovuuden aiheuttamiin saostumiin.

## 6 LIKAANTUMISEN SEURANTA

Työn tarkoituksena oli kehittää lämmönsiirtimille puhtauden seuranta Savcor Wedge -prosessianalysointijärjestelmällä. Wedgellä voidaan tarkastella ja analysoida prosessidataa. Kuvassa 9 on esitetty Wedgen käyttöliittymää. Työ on rajattu yhteen putkilämmönsiirtimeen, joka valmistaa kuumaa vettä valkaisun käyttöön. Seurattava lämmönsiirrin on nimeltään paisuntalipeänjäähdytin. Siinä likaantumista aiheuttaa lipeäpuolella saostuvat kalsiumkarbonaattikerrostumat sekä vesipuolen sisältämät moskat (Pöllänen 2017).

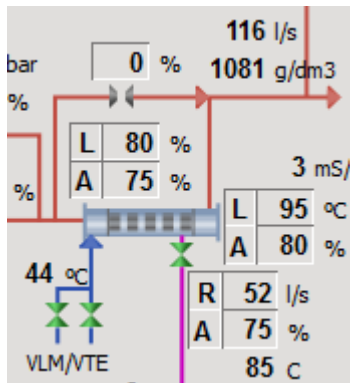


KUVA 9. Savcor Wedgen käyttöliittymä (Savcor Wedge Käyttöopas 2016, 3)

Paisuntalipeänjäähdytin on putki- ja vaippalämmönsiirrin, joka sijaitsee keittämöllä. Sen tarkoituksena on jäähdyttää keittimestä tulevan laihamustalipeän lämpötila alemmas, jotta se ei kuohaisi haihuttamon laihamustalipeäsäiliöissä (Pöllänen 2017). Lipeää jäähdytetään tehdasvedellä ja lämpimällä vedellä. Kuvassa 10 on esitetty paisuntalipeänjäähdytin Metson DNA:n operointipäätteellä. Läm-



mönsiirrin on TEMA-taulukon mukaan NEN-tyyppinen. Siinä on kolme putkipuolen läpivientiä ja yksi vaippapuolen läpivienti. Lämmönsiirtimestä on saatavilla kolme lämpötilamittausta, molempien puolien virtausmittaukset ja mustalipeän tiheys. Lisäksi lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinta-ala tiedetään. Näiden tietojen avulla voidaan määrittää lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin käyttämällä olettusta, että lämmönsiirtoteho on lämmönsiirtimen molemmin puolin sama.



KUVA 10. Paisuntalipeänjäähdytin Metson DNA:ssa

Lämmönsiirrin operoi tasaisilla virtauksilla niin putki- kuin vaippapuolella. Virtausalue putkipuolella on 100–125 kg/s välillä ja vaippapuolella 45–55 kg/s välillä. Putkipuolen fluidin lämpötilat ovat tasaiset, mutta vaippapuolella tapahtuu lämpötiloissa hieman enemmän muutosta.

Lämmönsiirtimen likaantuminen havaitaan tällä hetkellä lämmönsiirtimen prosessiarvojen muutoksista. Näitä voivat olla muutokset esimerkiksi lämpötilassa, veden virtauksessa, pumpun kierroksissa tai venttiilien ohjauksissa. Käytännössä likaantuminen huomataan kuuman veden lämpötilan putoamisesta ja vesipuolen venttiilien ohjauksista. Lämmönsiirtimen puhdistaminen toteutetaan seisokeissa, joissa lämmönsiirrin avataan puhdistusta varten. Normaalisti lämmönsiirtimen puhdistamisesta tulisi tehdä merkintä toiminnanohjausjärjestelmään. Näin ei kuitenkaan aina menetellä ja sen vuoksi lämmönsiirtimien puhdistumiskertoja on vaikea seurata. Myös lämmönsiirtimien puhdistusvälin määrittäminen on tämän seurauksena melko hankalaa. (Pöllänen 2017.) Kuvassa 11 on esitetty paisuntalipeänjäähdytin avattuna kevään 2017 seisokissa.



*KUVA 11. Paisuntalipeänjäähdyttimen putket avatusta päädyistä katsottuna*

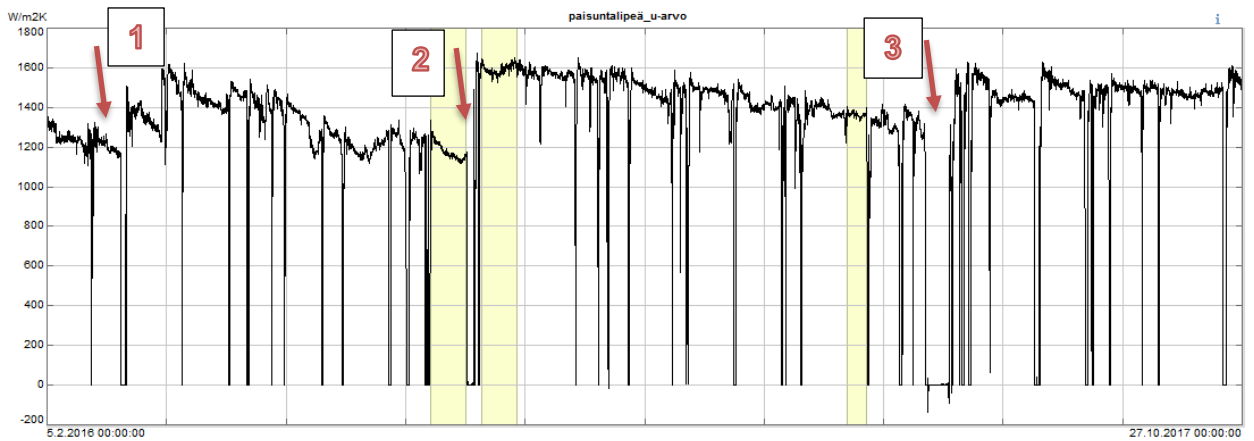
Wedgessä tarkasteltavan datan aikaväliksi valittiin 5.2.2016–27.10.2017, koska tällä aikavälillä kaikista tarvittavista mittauksista on saatavilla analysoitavaa dataa. Aikatasoksi valittiin 1 tunti, mikä tarkoittaa, että mittausdatan aikasarjan kahden peräkkäisen pisteen välinen näytteenottoväli on 1 tunti. Sellutehtaan seisokkeja on kyseisellä aikavälillä kolme kappaletta, joissa paisuntalipeänjäähdytin on puhdistettu painepesemällä putkipuoli ja lisäksi vaippapuoli on happopesty. Vuonna 2016 paisuntalipeänjäähdytin on puhdistettu 15.3–16.3 (seisokki 1) ja 13.9–15.9 (seisokki 2). Vuonna 2017 paisuntalipeänjäähdytin on puhdistettu kerran 12.5–23.5 (seisokki 3).

### **6.1 Dataan perustuva seuranta**

Dataan perustavassa seurannassa määritettiin lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroin eli niin kutsuttu U-arvo. Kaikki laskenta on suoritettu Wedgen laskennallisia mittauksia käyttäen. Laskennallisten mittausten lisääminen tarkoittaa sitä, että todellisten mittausten avulla voidaan määrittää omia laskettuja mitaustuloksia.

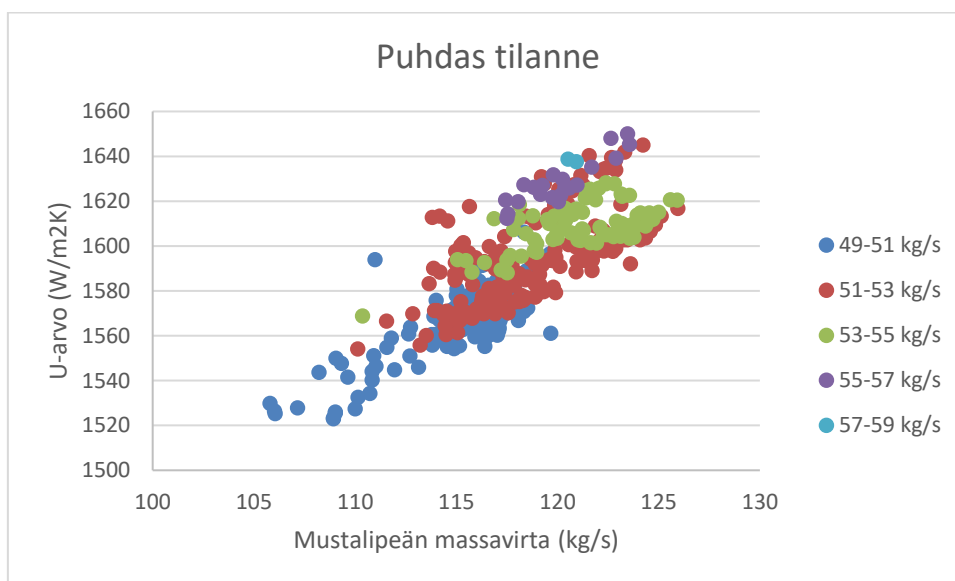
Laskenta aloitettiin määrittämällä lämmönsiirtimen teho. Teho laskettiin vesipuolelta, mutta koska prosessia käsitellään ideaalisena, on teho myös lipeäpuolella sama. Lisäksi logaritminen korjauskerroin, ominaislämpökapasiteetit ja veden tiheys oletettiin vakioiksi. Logaritmisen lämpötilaeron korjauskerroin on vakio 0,91. Vedelle ominaislämpökapasiteetti on 4,2 kJ/kgK ja tiheys 1000 kg/m<sup>3</sup>. Lipeän ominaislämpökapasiteetti on 3,6 kJ/kgK. Lasketun tehon avulla voidaan määrittää lämmönsiirtimeen tulevan lipeän lämpötila. Kun kaikki lämpötilat ovat tiedossa, voidaan laskea logaritminen lämpötilaero. Nyt kaikki kaavan muuttujat ovat tiedossa ja voidaan laskea lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokerroin laskettiin aiemmin mainitulla kaavalla 2.

Seuraavaksi tarkasteltiin lämmönsiirtokertoimen kehittymistä tarkasteluajaväliltä. Kuvassa 12 on määritetty lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin tarkasteluajaväliltä. Kuvassa on väritetty ne kohdat, joilta lämmönsiirtimen dataa on kerätty tarkasteluun. Ensimmäinen väritetty alue vasemmalta oikealla ajoittuu juuri ennen seisokki 2:ta. Lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin on tuolloin alhainen ja lämmönsiirtimen voidaan olettaa likaantuneen merkittävästi. Seuraava väritetty alue ajoittuu juuri kyseisen seisokin jälkeiselle ajalle, jolloin lämmönsiirtimen puhdas ja likaantumisen voidaan olettaa likimain nollaksi. Kolmas väritetty alue ajoittuu keväälle 2017 noin kuukausi ennen seisokki 3:ta. Lämmönsiirtokerroin on pienentynyt, mutta ei kuitenkaan yhtä paljon kuin ennen syksyn seisokkia. Kolmatta aluetta voidaan käsitellä välimallin-tilana eli se on jotain puhtaan ja likaisen väliltä.



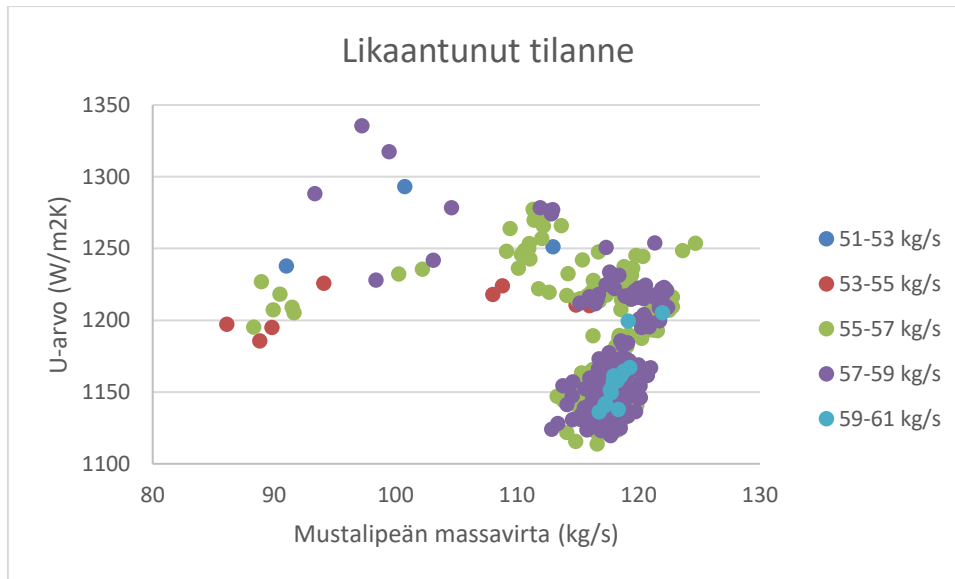
KUVA 12. Paisuntalipeänjäähdyttimen lämmönsiirtokertoimet 5.2.2016–27.10.2017. Punaisella merkityt nuolet kuvaavat sellutehtaan seisokkeja ja värilliset alueet tarkasteltavia toiminta-alueita.

Puhdas ajanjakso ajoittuu 20.9.2016–9.10.2016. Lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin on kyseisellä aikavälillä keskimäärin 1589 W/m<sup>2</sup>K. Putkipuolen massavirta on keskimäärin 117,9 kg/s ja vaippapuolen veden massavirta 51,9 kg/s. Kuvassa 13 on esitetty puhtaan lämmönsiirtimen virtauksia ja lämmönsiirtokerrointa kyseisellä ajanjaksolla. Puhtaana ollessaan lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimet ovat korkealla ja veden massavirta saa eniten arvoja välillä 49–53 kg/s.



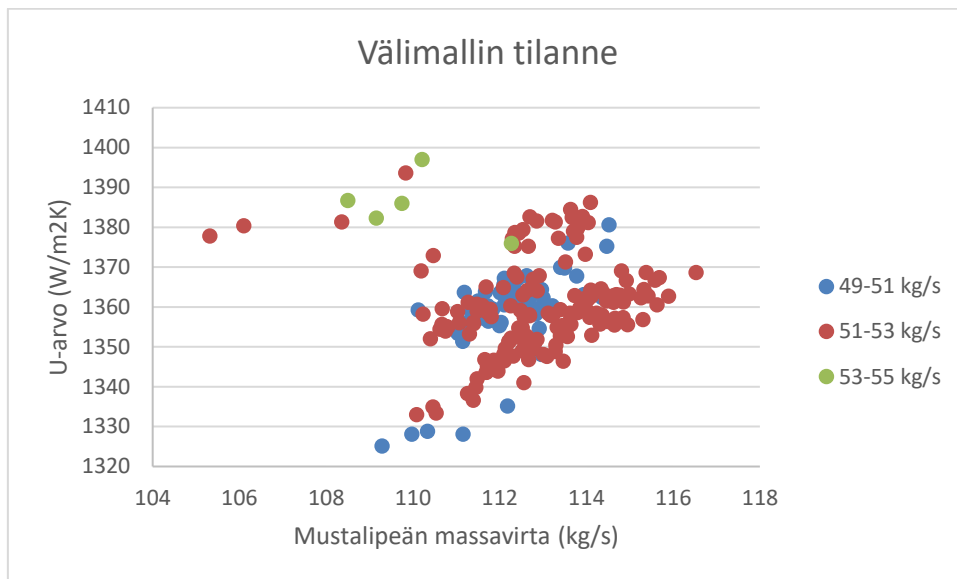
KUVA 13. Paisuntalipeäjähdytin puhtaana

Likaantunut ajanjakso ajoittuu 25.8.2016–13.9.2016. Tuolloin lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin on keskimäärin 1175 W/m<sup>2</sup>K, lipeäpuolen massavirta 116 kg/s ja vaippapuolen massavirta 57,1 kg/s. Kuvassa 14 on esitetty lämmönsiirtokerrointa likaantuneella ajanjaksolla virtauksien suhteen. Kuvaajasta voidaan todeta, että vaippapuolen veden mittausarvot ovat lähes kaikki 57–59 kg/s. Lämmönsiirtokerroimet ovat reilusti alhaisemmat kuin puhtaassa tilanteessa.



*KUVA 14. Paisuntalipeäjähdytyn likaisena*

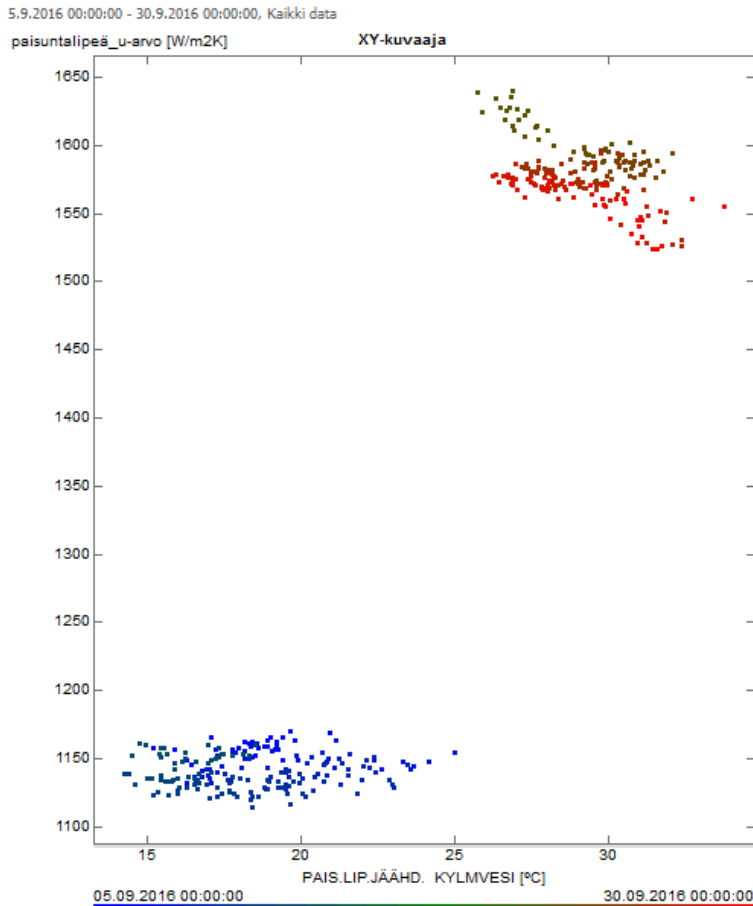
Välimallin ajanjaksoksi valittiin 1.4.2017–11.4.2017. Lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin on tuolloin keskimäärin 1360 W/m<sup>2</sup>K. Massavirtojen keskiarvot ovat 112,6 kg/s putkipuolella ja 51,41 kg/s lipeäpuolella. Kuvassa 15 on esitetty lämmönsiirtokerrointa välimallin tilassa virtauksien suhteen. Välimallissa veden virtaukset ovat 51–53 kg/s. Välimallin tilanteessa putkipuolen virtaukset ovat alhaisemmat verrattuna likaisen ja puhtaan lämmönsiirtimen tilanteisiin.



*KUVA 15. Paisuntalipeänjäähdytin puhtaan ja likaisen välimaastossa*

Datan perustuvan seurannan tuloksena voidaan todeta, että puhtaana olevan lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimen arvo on yli  $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Likaantuneen lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimen arvo on alle  $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$

Lisäksi tuloksista voidaan todeta, että lämmönsiirtimen ollessa likaantunut vesipuolen virtaukset kasvavat merkittävästi. Puhtaan lämmönsiirtimen läpi kulkee vaippapuolella  $49\text{--}51 \text{ kg/s}$  vettä ja likaisena  $57\text{--}59 \text{ kg/s}$  vettä. Tämä tarkoittaa sitä, että paisuntalipeä ei jäähdy tarpeeksi ja lämmönsiirrin tarvitsee lisää vettä jäähdyttääkseen paisuntalipeää. Lisäksi veden massavirtojen kasvaminen ei riitä, vaan automaatio ohjaa myös tehdasveden venttiiliä suuremmalle, jolloin tuleva vesi on ollut paljon kylmempää kuin lämmönsiirtimien operoidessa puhtaana. Kuvassa 16 on esitetty tulevan veden lämpötilan kehitystä ennen ja jälkeen seisokki 2:ta.



*KUVA 16. Tulevan veden lämpötila ennen ja jälkeen seisokki 2:ta*

## 6.2 Likaantumisen seurantaan tarkoitettun työkalun kehitys

Pisuntalipeänjäähdyttimelle rakennettiin myös työkalu likaantumisen seuranta varten. Mallia työkalua varten haettiin Heat Exchanger Fouling -konferenssin teollisesta artikkelista. Konferenssijulkaisussa likaantumisvastusta mallinnettiin likaantuneen ja puhtaan lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimien erotuksella (Kuboyama – Kuwahara – Nakamura – Iwahashi 2015). Tässä työssä käytettiin Kuboyaman rakentamaa työkalua, jota sovellettiin käytettäväksi putkilämmönsiirtimillä. Likaantumisen seuranta tällaista mallia käyttämällä antaa indeksin lämmönsiirtimen tehokkuuden muutoksille, mikä kuvastaa lämmönsiirtimen likaantumisvastuksen muutosta. Likaantumisvastuksen arvo lasketaan kaavalla 5. Likaantumisvastusta laskettaessa likakerrostumien lämmönjohtokyky oletetaan vakioiksi (Kuboyama ym. 2015).

$$R_f = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U_c}$$

KAAVA 5

$U_d$  = Kokonaislämmönsiirtokerroin likaiselle lämmönsiirtimelle [W/m<sup>2</sup>K]

$U_c$  = Kokonaislämmönsiirtokerroin puhtaalle lämmönsiirtimelle [W/m<sup>2</sup>K]

Likaisen lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroin muodostuu mittauksista saatavista virtauksista ja lämpötiloista sekä logaritmisen lämpötilan korjauskerroimesta ja lämmönsiirtimen pinta-alasta. Likaisen lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 2.

Puhtaan lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroin muodostuu putkipuolen filmin lämmönsiirtokertoimesta, vaippapuolen filmin lämmönsiirtokertoimesta, lämmönsiirtopinnan paksuudesta ja putken materiaalin lämmönjohtavuudesta. Lämmönsiirtopinnan paksuus on 1,2 mm ja materiaalin lämmönjohtavuudeksi oletettiin 16 W/m<sup>2</sup>K. Puhtaan lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 6.

$$U_c = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{\varphi}{k_t}$$

KAAVA 6

$h_i$  = Putkipuolen filmin lämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

$h_o$  = Vaippapuolen filmin lämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

$\varphi$  = Lämmönsiirtopinnan paksuus [m]

$k_t$  = Materiaalin lämmönjohtavuus [W/m<sup>2</sup>K]

Putkipuolen filmin lämmönsiirtokerroin määrittäminen aloitettiin laskemalla ensin putkipuolen Reynoldsin ja Prandtin luku. Tämän jälkeen edellä mainittujen avulla voitiin laskea Nusseltin luku Dittus-Boelterin-korrelaatiota käyttäen. Dittus-Boelterin kaavalla saadaan suurpiirteinen arvio todellisesta putkipuolen lämmönsiirtokertoimesta (Shah – Sekulic 2003, 482). Nusseltin luvun avulla voidaan laskea putkipuolen lämmönsiirtokerroin  $h_i$ . Nusseltin luku lasketaan kaavalla 7 ja putkipuolen filmin lämmönsiirtokerroin kaavalla 8. Kaavojen avulla laskettu putkipuolen esimerkki löytyy liitteestä 1.



$$Nu = 0,024 * Re^{0,8} * Pr^{0,3}$$

KAAVA 7

$Nu$  = Nusseltin luku

$Re$  = Reynoldsin luku

$Pr$  = Prandtin luku

$$h_i = \frac{(Nu * k_t)}{d_i}$$

KAAVA 8

$h_i$  = Putkipuolen lämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

$k_t$  = Putkipuolen materiaalin lämmönjohtavuus [W/m<sup>2</sup>K]

$d_i$  = Putken sisäpuolen halkaisija [m]

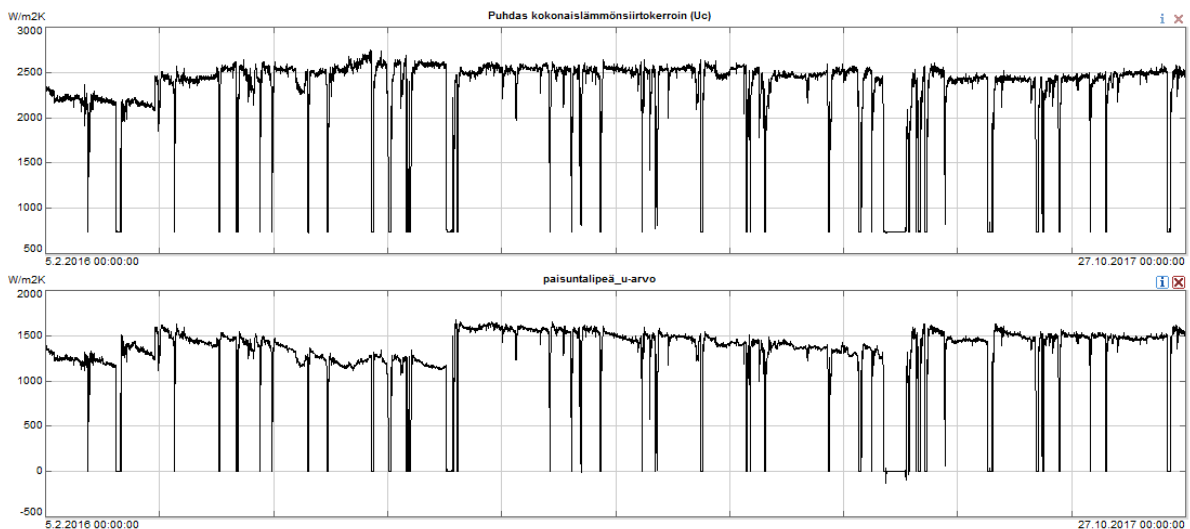
Vaippapuolen filmin lämmönsiirtokerroimen  $h_o$  määrittäminen ja siirtäminen Wedgeen olisi ollut liian haastavaa, joten tässä tapauksessa vaippapuolen filmin lämmönsiirtokerroimen arvot eri virtauksille saatiin suoraan laitetoimittajalta.

Edellä mainitun kaavan avulla ja laitetoimittajan tietojen perusteella virtausalueille määritettiin lämmönsiirtokerroimet molemmille puolille 5 kg/s välein. Tämän jälkeen kullekin virtaamalle saatiin lämmönsiirtokerroimet ja näistä muodostettiin kuvaaja. Kuvaajasta määritettiin seuraavaksi suora ja sen yhtälö. Edellä mainitut toimenpiteet ovat kuvattuna liitteessä 2. Suoran yhtälöt on helppo siirtää Wedgeen, ja niiden avulla voidaan noutaa massavirran putki- ja vaippapuolen likimain oikeat lämmönsiirtokerroimet. Seuraavaksi Wedgeen lisättiin puhtaan lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtokerroimen kaava 6, joka laskee suoran yhtälöiden avulla puhtaan kokonaislämmönsiirtokerroimen. Testimielessä laskettu puhtaan kokonaislämmönsiirtokerroimen arvo poikkesi alkuperäisesti puhtaan lämmönsiirtimen mitoitusarvosta noin 4,98 %, joten laskentaa voidaan pitää suhteellisen tarkkana. Taulukossa 4 on esitetty vertailulaskentaa todelliseen mitoitusdataan.

TAULUKKO 4. Lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroimien vertailua

	Putkipuolen Massavirta (kg/s)	Vaippapuolen Massavirta (kg/s)	Puhdas läm- mönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)
<b>Laskettu</b>	150	57,75	2786,2
<b>Mitoitusarvo</b>	150	57,75	2654,1

Kuvassa 17 on esitetty puhdas kokonaislämmönsiirtokerroin  $U_c$  ja likainen kokonaislämmönsiirtokerroin  $U_d$  tarkasteluajaväliltä. Kuvaajasta voidaan todeta, että puhtaan lämmönsiirtokerroimen arvo pysyttelee hyvin tasaisena noin 2500 W/m<sup>2</sup>K tuntumassa. Puhtaan lämmönsiirtokerroimen arvoon vaikuttavat ainoastaan putkipuolen ja vaippapuolen massavirrat.



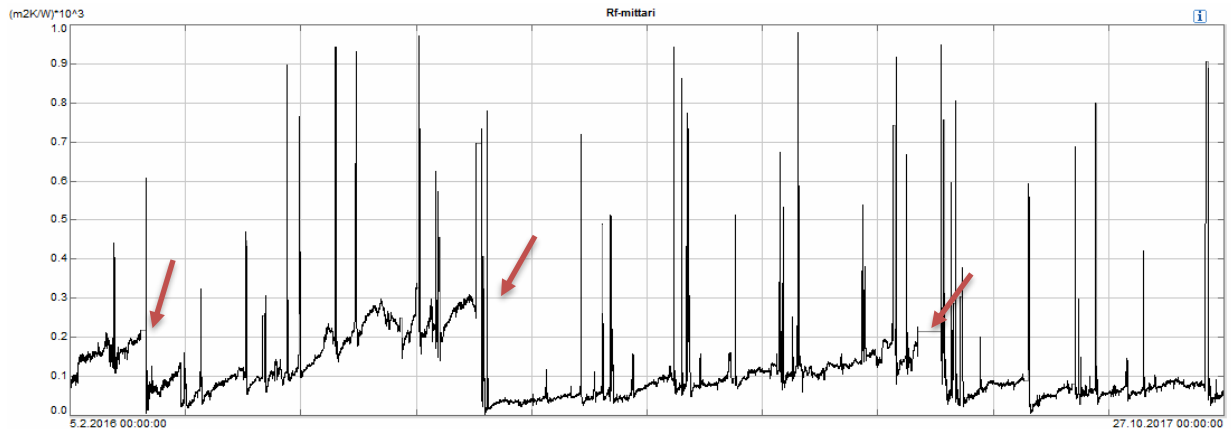
KUVA 17. Ylhäältä alaspäin: puhdas lämmönsiirtokerroin ja likainen lämmönsiirtokerroin

Lämmönsiirrin operoi korkeilla lämmönsiirtokertoimien arvoilla aina kun lämmönsiirtimeen puhdistus on suoritettu. Puhdistuksen jälkeen käyttöön otetun lämmönsiirtimeen likaantuminen voidaan olettaa hetkellisesti nolllaksi, eli  $U_c = U_d$ . Kaavalla 5 laskettaessa likaantumisvastuksen nolllakohta on likimain  $0,2 \text{ m}^2\text{K/kW}$  tietämällä. Nolllakohdan siirrolla saadaan likaantumisvastuksen arvot nolllakohdasta lähtien. Nolllakohdaksi asetettiin seisokin 2 jälkeinen aika, jolloin likainen lämmönsiirtokerroin on korkeimmillaan eli lämmönsiirrin oletetaan täysin puhtaaksi.

Kuvassa 18 on esitetty, kuinka puhtauden seurantaan tarkoitettu työkalu toimii. Likaantumista kuvaa  $R_f$ :n eli likaantumisvastuksen muutokset. Likaantumisvastuksen noustessa lämmönsiirtimeen likaantuminen kasvaa. Vuodesta 2016 lähtien likaantumisvastus on noussut arvon  $0,2 \text{ m}^2\text{K/kW}$  tietämille. Tämän jälkeen on pidetty seisokki 1, jolloin likaantumisvastus on laskenut.

Puhdistuksen jälkeen likaantumisvastuksen arvo on lähtenyt kasvamaan. Lopulta likaantumisvastus on kohonnut arvon  $0,3 \text{ m}^2\text{K/kW}$  tienoille, kunnes on seisokki 2 on pidetty. Seisokin jälkeen likaantumisvastuksen arvo putoaa  $0,01 \text{ m}^2\text{K/kW}$  tietämille, mikä tarkoittaa, että lämmönsiirtimeen on likimain puhtas. Lämmönsiirrin on ollut tuolloin kuvaajan perusteella todella likainen. Puhdistuksen jälkeen likaantumisvastus lähtee nousemaan hiljalleen.

Seisokkiin 3 mentäessä likaantumisvastuksen arvo on noussut noin  $0,2 \text{ m}^2\text{K/kW}$  tietämille. Seisokissa tehty puhdistus laskee likaantumisvastuksen arvon hieman reiluun  $0,01 \text{ m}^2\text{K/kW}$ :iin. Seisokin jälkeen likaantumisvastuksen arvo kohoaa hetkellisesti ja laskee taas  $0,01 \text{ m}^2\text{K/kW}$  tuntumaan. Syksyyn 2017 tultaessa lämmönsiirrin on pysynyt suhteellisen puhtaana, koska likaantumisvastuksen arvo on alle  $0,1 \text{ m}^2\text{K/kW}$ .



*KUVA 18. Likaantumisvastuksen kehitys tarkasteluaikavälillä. Nuolella merkityt kohdat tarkoittavat sellutehtaan seisokkeja, joissa lämmönsiirrin on puhdistettu.*

Työkalun käytön tuloksista voidaan havaita, että likaantumisvastus saavuttaa joka kerta ennen seisokkia vähintään arvon  $0,2 \text{ m}^2\text{K/kW}$ . Ennen seisokki 2:ta likaantumisvastus saavuttaa  $0,3 \text{ m}^2\text{K/kW}$  arvon ja silloin lämmönsiirtimen toimintakyky on jo merkittävästi heikentynyt, kuten jo dataan perustuvassa osiossa todettiin. Tämän vuoksi  $0,3 \text{ m}^2\text{K/kW}$  voidaan pitää arvona, jota ennen lämmönsiirrin kannattaa puhdistaa.

## 7 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kehittää kuumaa vettä valmistaville lämmönsiirtimille puhtauden seuranta. Seurannan tekemiseen hyödynnettiin Savcor Wedge -prosessianalysointijärjestelmää. Seurattavaksi lämmönsiirtimeksi valittiin ainoastaan keittämöllä sijaitseva putkilämmönsiirrin, paisuntalipeänjäähdytin, saatavilla olevien mittausten ja rakenteen perusteella. Työn rajaukseen vaikutti myös opinnäytetyöhön käytettävä aika.

Työn ensimmäisessä vaiheessa tarkasteltiin lämmönsiirtimen lämmönsiirtoker-toimia suhteessa lämmönsiirtimen virtauksiin tarkasteluaikavälillä. Tuloksissa määritettiin, että puhtaana lämmönsiirrin operoi arvolla yli  $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja likaantuneena operoi arvolla alle  $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Lisäksi tuloksissa todettiin, että lämmönsiirtimen lämmönsiirtoker-toimien laskiessa kylmän veden osuus kasvaa ja myös veden virtaukset kasvavat. Likaantumisen seuranta datan perusteella on hyvin yleistä ja sillä voidaan määritellä lämmönsiirtimelle erilaisia toiminta-alueita. Toiminta-alueiden avulla voidaan helposti tarkastella lämmönsiirtimen tehokkuuden tilaa, mutta niiden määrittäminen ei välttämättä kerro likaantumisen aiheuttamasta tehokkuuden alenemisesta. Esimerkiksi lämmönsiirtimien prosessiarvot voivat vaihdella joissain lämmönsiirtimissä todella paljon. Tämän vuoksi niiden käyttäminen ei ole likaantumista tarkasteltaessa välttämättä paras työkalu. Dataan perustuvaa menetelmää käyttämällä voidaan kuitenkin seurata lämmönsiirtimen tehokkuutta ja arvioida mistä tehokkuuden alentumat johtuvat.

Työn toisessa osassa rakennettiin Heat Exchanger Fouling -konferenssiartikkelin pohjalta lämmönsiirtimen likaantumisen seurantaan tarvittava työkalu. Työkalulla saadaan aikaan tehokkuuden indeksi, joka kuvastaa lämmönsiirtimen likaantumisvastuksen kehitystä. Likaantumisvastuksen arvo muodostuu likaisen- ja puhtaan lämmönsiirtoker-toimen arvoista. Likainen lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua lämmönsiirtoker-toimen perusyhtälöllä. Puhdas lämmönsiirtokerroin ottaa huomioon lämmönsiirtimen massavirrat, lämmönsiirtimen rakenteen ja fluidien ominaisuuksia. Työkalua käyttämällä voidaan esimerkiksi tarkastella, kuinka seisokissa tehdyt puhdistukset vaikuttavat lämmönsiirtimen likaantumisvastukseen

kehitykseen ja sillä voidaan myös arvioida milloin lämmönsiirrin kannattaa seuraavan kerran puhdistaa. Tämän työn tuloksena lämmönsiirrin kannattaa puhdistaa viimeistään, ennen kuin likaantumisvastus saavuttaa arvon  $0,3 \text{ m}^2\text{K/kW}$ . Työkalun käyttöä kannattaisikin yrittää soveltaa niihin lämmönsiirtimiin, joita joudutaan puhdistamaan useasti käytön aikana. Työkalun kehittäminen laajempaan käyttöön on kuitenkin melko työllistävää, ja esimerkiksi kaikista lämmönsiirtimistä ei ole saatavissa tarpeeksi mittaustietoja eikä mitoitustietoja, jotka ovat hyödyllisiä lämmönsiirtokertoimia tarkasteltaessa.

Käytännössä lämmönsiirtimien likaantuminen huomataan jo muuttuvista prosessiarvoista, kuten ohjauksista, lämpötiloista, virtauksista ja paine-ero mittauksista. Tämän vuoksi datan avulla tehtävä seuranta ei välttämättä ole kannattavaa laajemmassa mittakaavassa. Mittaustietoja on saatavilla yleisesti ottaen melko hyvin, mutta mittauksia, kuten paine-ero- ja lämpötilamittauksia lisäämällä voitaisiin saavuttaa merkittäviä hyötyjä lämmönsiirtimien likaantumisen seuraamisessa.

## LÄHTEET

Awad, Mostafa M 2011. Fouling of Heat Transfer Surfaces. Teoksessa Aziz Belmiloudi. Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. InTech. S.505-542 Saatavissa: <http://www.intechopen.com/books/heat-transfer-theoretical-analysis-experimental-investigations-and-industrial-systems/fouling-of-heat-transfer-surfaces>. Hakupäivä 10.10.2017

Energiatehokas lämmönsiirto. 2016. Motiva. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas\\_lammonsiirto\\_opas.pdf](https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf). Hakupäivä: 10.10.2017

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.

KnowPulp. 2017. Sellutekniikan ja automation oppimisympäristö. Sulfaattisellun valmistus. Sisäinen dokumentti. Stora Enso Oulu Oy.

Korpelin, Jukka 2017. Stora Enso Oulun sellutehtaan lämmönsiirtimien pesu. Sähköpostiviesti. 31.3.2017.

Kuboyama, Akiya – Kuwahara, Takuya – Nakamura, Mitsuka – Iwahashi, Shigeo 2015. Fouling Monitoring In Power Plant. Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning 2015. Saatavissa: [http://www.heatexchanger-fouling.com/papers/papers2015/65\\_Kuboyama\\_F.pdf](http://www.heatexchanger-fouling.com/papers/papers2015/65_Kuboyama_F.pdf). Hakupäivä 10.10.2017.

Müller-Steinhagen, Hans 2010. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces. Teoksessa VDI-GVC. VDI Heat Atlas Second Edition. Dusseldorf: VDI-GVC. S.79-103

Pöllänen, Juha 2017. Osastomestari, Stora Enso Oulu. Haastattelu 20.2.2017.

Saari, Jussi 2010. Heat Exchanger Thermal Design Guide. LUT Energia opetusmoniste 6. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology.

Sakko, Esa 2017. Sellutehtaan käyttöohjeet. Yleistä valkaisu-prosessista. Sisäinen dokumentti. Stora Enso Oulu Oy.

Savcor Wedge Käyttöopas. 2016. Savcor Oy. Sisäinen dokumentti.

Shah, Ramesh K – Sekulic, Dusan P 2003. Fundamentals of Heat Exchanger Design. New Jersey: Wiley & Sons Inc.

Soodakattilat – Käynnissäpito. 1998. Kurssimateriaali. Pohto.

Tehdasesittely. 2017. Sisäinen dokumentti. Stora Enso Oulu Oy.

Thulukkanam, Kuppan 2013. Heat Exchanger Design Book Second Edition. London: CRC Press Taylor & Francis Group.

Yleisesitys. 2016. Sisäinen dokumentti. Stora Enso Oulu Oy.



**ESIMERKKI.** Putkipuolen filmin lämmönsiirtokertoimen määrittäminen 120 kg/s virtaamalla.

Lähtötiedot fluidille ja lämmönsiirtimelle:

Massavirta (kg/s)	120
Ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)	3,8
Viskositeetti (mPas)	0,76
Lämmönjohtavuus (W/mK)	0,62
Putken ulkopuolinen halkaisija (mm)	30
Putken paksuus (mm)	1,2
Putkien lukumäärä	298
Putken materiaalin lämmönjohtavuus (W/mK)	16

Putkien lukumäärä/läpivienti:

$$N_{t,p} = \frac{N_t}{3} = \frac{298}{3} = 99,3$$

Putkipuolen virtausalue/läpivienti:

$$A_{o,t} = \frac{\pi}{4} d_i^2 N_{t,p} = \frac{\pi}{4} * (0,0276 \text{ m})^2 * 99,3 = 0,0594 \text{ m}^2$$

Prandtin luku:

$$Pr = \frac{\mu_t * c_{p,t}}{k_t} = \frac{(0,76 * 10^{-3}) \text{ Pas} * 3600 \text{ J/kgK}}{0,62 \text{ W/mK}} = 4,41$$

Reynoldsin luku:

$$Re_t = \frac{\dot{m}_t d_i}{A_{o,t} \mu_t} = \frac{120 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0,0276}{0,05943 \text{ m}^2 * (0,76 * 10^{-3} \text{ Pas})} = 73328,2 > 4000 \Rightarrow \text{Turbulenttinen virtaus}$$

Nusseltin luku:

$$Nu = 0,024 * Re_t^{0,8} * Pr^{0,3} = 0,024 * 73328,2^{0,8} * 4,41^{0,3} = 292,3$$

Putkipuolen lämmönsiirtokerroin

$$h_t = h_1 = \frac{(Nu * k_t)}{d_i} = \frac{292,3 * 0,62 \frac{\text{W}}{\text{m}} * \text{K}}{0,0276 \text{ m}} = 6566,44 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Vaippapuolen filmin lämmönsiirtokertoimet:

Vaippapuolen massavirta (kg/s)	Lämmönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)
55	6164,6
50	5795,9
45	5417,7

Putkipuolen filmin lämmönsiirtokertoimet

Putkipuolen massavirta (kg/s)	Lämmönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)
125	6784,4
120	6566,4
115	6346,6
110	6124,9
105	5901,1
100	5675,3

