

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SANASTO

SYMBOLILUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
----------	-----------------------	----------

### KIRJALLISUUSOSA

<b>2</b>	<b>LÄMMÖNVAIHTIMIEN JAOTTELU</b> .....	<b>2</b>
2.1	VAIPPA- JA TUUBILÄMMÖNVAIHTIMET .....	2
2.2	LÄMMÖNVAIHTIMIEN RAKENTEeseen PERUSTUVA JAOTTELU .....	4
	2.2.1 <i>Kiinteätuubistoinen lämmönvaihdin</i> .....	4
	2.2.2 <i>U-tuubilämmönvaihdin</i> .....	5
	2.2.3 <i>Uivapäätäinen lämmönvaihdin</i> .....	6
2.3	LÄMMÖNVAIHTIMIEN KÄYTTÖTARKOITUKSEEN PERUSTUVA JAOTTELU .....	7
<b>3</b>	<b>LÄMMÖNVAIHTIMEN SUUNNITTELU</b> .....	<b>8</b>
3.1	LÄMMÖNSIIRRON SUUNNITTELUSSA KÄYTETYT PERUSYHTÄLÖT .....	8
3.2	MATERIAALIN VALINTA .....	11
	3.2.1 <i>Vaippapuolen materiaalin valinta</i> .....	12
	3.2.2 <i>Tuubiston materiaalin valinta</i> .....	12
	3.2.3 <i>Väliseiniä ja ohjausrakenteiden materiaalin valinta</i> .....	12
	3.2.4 <i>Erikoisolosuhteet</i> .....	13
3.3	TUUBIPUOLEN SUUNNITTELU .....	14
3.4	VAIPPAPUOLEN SUUNNITTELU .....	15
<b>4</b>	<b>LÄMMÖNVAIHTIMIEN KÄYTÖN TEHOSTAMINEN</b> .....	<b>17</b>

<b>5</b>	<b>LÄMMÖNVAIHTIMIEN LIKAANTUMINEN.....</b>	<b>19</b>
5.1	LIKAANTUMISTYYPIT .....	20
5.1.1	<i>Raakaöljyn esilämmityksen likaantuminen .....</i>	<i>21</i>
5.2	LIKAANTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	22
5.3	LÄMMÖNVAIHTIMIEN LIKAANTUMISEN EHKÄISEMINEN .....	24
5.3.1	<i>Likainen virta tuubipuolella .....</i>	<i>24</i>
5.3.2	<i>Likainen virta vaippapuolella .....</i>	<i>25</i>
5.4	ERIKOISRAKENTEISET LÄMMÖNVAIHTIMET LIKAAVISSA OLOSUHTEISSA .....	27
<b>6</b>	<b>RAAKAÖLJYN TISLAUKSEN KORROOSIO-ONGELMAT .....</b>	<b>28</b>
6.1	KORROOSIO-ONGELMAT NAFTEENIHAPPO- JA RIKKIPITOISILLA SYÖTÖILLÄ .....	29
6.2	KORROOSIONESTOKEINOJA NAFTEENIHAPPOPITOISILLE SYÖTÖILLE .....	31
6.3	YLIMENOSYSTEEMIEN KORROOSIO-ONGELMAT .....	32
6.3.1	<i>Raakaöljyn suolanpoiston yhteys korroosio-ongelmiin .....</i>	<i>33</i>
6.4	YLIMENOSYSTEEMIEN KORROOSIONESTOKEINOJA.....	34
<b>7</b>	<b>RAAKAÖLJYN SUOLANPOISTON ONGELMIA.....</b>	<b>36</b>

**KOKEELLINEN OSA**

<b>8</b>	<b>RAAKAÖLJYN TISLAUSYKSIKKÖ</b> .....	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>LIKAANTUMISEN SEURANTAOHJELMA</b> .....	<b>46</b>
9.1	LASKENTAAN VAIKUTTAVIA MUUTTUJIA .....	48
<b>10</b>	<b>TULOKSET</b> .....	<b>52</b>
10.1	LÄMMÖNVAIHTIMIEN EA-10133 CD PESU.....	55
10.2	LÄMMÖNVAIHTIMIEN EA-10133 CD SAKKOJEN ANALYSOINTI.....	58
10.3	LÄMMÖNVAIHTIMIEN EA-10133 CD PESUSTA SAATU HYÖTY .....	62
10.4	LÄMMÖNVAIHTIMIEN LÄMPÖTEHOJEN JAKAUTUMINEN .....	65
<b>11</b>	<b>SUOLANPOISTON JA YLIMENOKORROOSION TUTKIMINEN</b> .....	<b>69</b>
11.1	RAAKAÖLJYN SUOLANPOISTON ANALYSOINTI .....	69
11.2	YLIMENOKORROOSION TUTKIMINEN .....	73
<b>12</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMINPITEET</b> .....	<b>77</b>
12.1	LIKAANTUMISEN SEURANTAOHJELMAN PARANNUSEHDOTUKSIA.....	79
<b>13</b>	<b>KIRJALLISUUS</b> .....	<b>81</b>
	<b>LIITELUETTELO</b> .....	<b>85</b>

## 1 JOHDANTO

Öljynjalostuksen ongelmana on usein lämmönsiirtimien likaantuminen ja erilaiset korroosio-ongelmat, jotka liittyvät usein lähekkäisesti toisiinsa. Lämmönsiirtimien likaantuminen on monista eri tekijöistä johtuva tapahtuma, johon raakaöljyn syöttölaadun vaihtelut vaikuttavat oleellisesti. Myös korroosio-ongelmat vaihtelevat erilaisilla syöttölaaduilla hyvin paljon. Ongelmallisia ovat nafteenihappopitoiset syöttölaadut, koska näitä raakaöljylaatuja ja niiden vaikutuksia ei ole juurikaan tutkittu.

Lämmönvaihdinten likaantumista pystytään nykyään seuraamaan varsin tarkasti ja prosessiteollisuudella on käytettävissään monenlaisia menetelmiä likaantumisen estämiseksi ja vähentämiseksi. Lämmönvaihdinten likaantumisen estämiseksi on kuitenkin tunnettava lämmönvaihdinten käyttäytyminen eri prosessiolosuhteissa. Lämmönvaihtimien käytön tehostaminen on energiataloudellisesti kannattavaa, varsinkin uunien alentuneiden tehontarpeiden muodossa.

Raakaöljyn tislausyksikön eräänä ongelmana on raakaöljysyötön vaihtelujen sekä, varsinkin nykyään, nafteenihappopitoisten syöttöjen aiheuttamien korroosio-ongelmien ennakoiminen ja ehkäisy. Korroosiotapahtumien tarkka ymmärtäminen ja ehkäisy ovat tärkeitä pyrittäessä optimoimaan raakaöljyn tislausyksikön ja koko jalostamon toimintaa. Tässä työssä perehdytään lämmönvaihdinten optimaaliseen käyttöön ja eri likaantumismekanismeihin sekä erilaisiin korroosio-ongelmiin Porvoon Kilpilahden jalostamon tuotantolinja 3:n Raakaöljyn tislausyksikössä (RT3). Työssä perehdytään erityisesti lämmönvaihdinten likaantumisen seurantaohjelman toimintaan ja parannuksiin. Lisäksi työn kokeellisessa osuudessa tutkitaan erilaisia käytännön esimerkkejä ylimenokorroosion ja suolanpoiston seurannasta.

## KIRJALLISUUSOSA

### 2 LÄMMÖNVAIHTIMIEN JAOTTELU

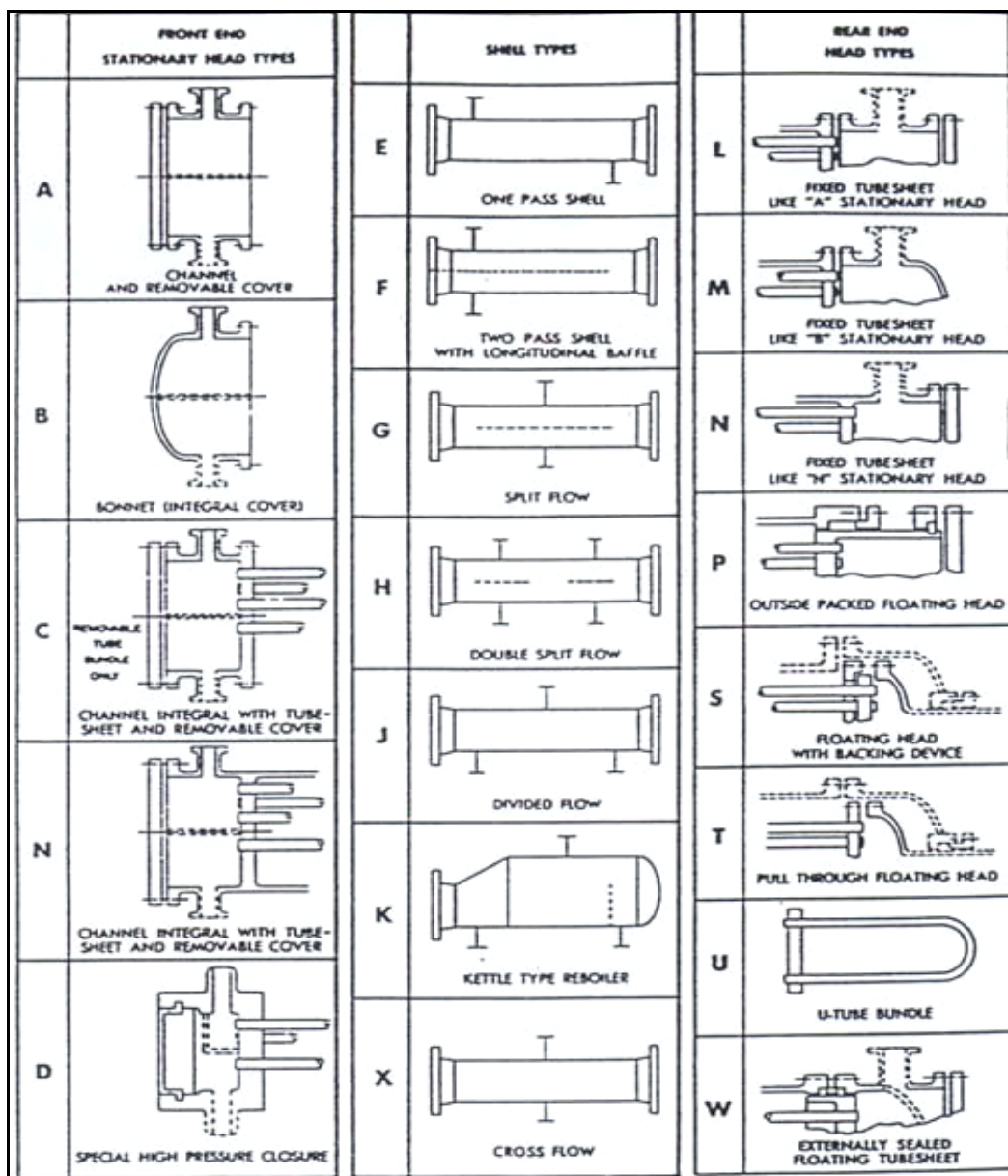
Lämmönvaihtimia käytetään raakaöljyntislausyksikössä syötön esilämmitykseen ns. esilämmitysjunassa, joka koostuu 58 eri lämmönvaihtimesta. Raakaöljyn tislausyksikössä (RT3) käytetään vaippa- ja putkilämmönvaihtimia. Näissä raakaöljy lämmitetään tislauskolonnin tuotteilla ja kiertopalautuksilla noin 250 °C:n lämpötilaan. Syötön esilämmitysjunan lämmönvaihtimien eräs ongelma on lämmönvaihtimien likaantuminen. Likaantuminen vähentää lämmönsiirtotehoa sekä aiheuttaa lisääntyviä painehäviötä. Painehäviö voi pahimmillaan johtaa syötön määrän laskuun. Tuubeilla ja tuubistoilla tarkoitetaan tässä työssä putkivaihtimen putkistoa, koska tuubi-sana on vakiintunut termi puhuttaessa lämmönsiirtolaitteistoista.

#### 2.1 *Vaippa- ja tuubilämmönvaihtimet*

Tässä kappaleessa keskitytään vaippa- ja tuubilämmönvaihtimien keskeisiin käsitteisiin. Vaippa- ja tuubilämmönvaihtimien keskeisimmät komponentit ovat:

- vaippa,
- vaipan eristeet,
- tuubit,
- päädyt,
- päätyjen eristeet,
- tuubisto,
- väliseinät,
- suuttimet.

Muita osia ovat mm. raidetangot ja välilevyt, ohjauslevyt, sidoslevyt, pitkittäiset väliseinät, tiivistevanteet, tuet ja muut tukirakenteet. Nämä erilaiset osat on kuvattu tarkemmin erilaisissa valmistajien standardeissa, esimerkiksi TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers association). Normaalisti vaippa- ja tuubilämmönvaihtimet jaetaan kolmeen osaan: Etupääty, vaippa ja takapää. Kuvassa 1 on esitetty TEMA:n terminologia erilaisille rakenteellisille vaihtoehdoille. Lämmönvaihtimet on jaettu kirjainyhdistelmillä; esimerkiksi BFL vaihtimessa on kupupääty, kaksoisvaippa pitkittäisellä väliseinällä ja kiinteätuubistoinen takapääty.[1]



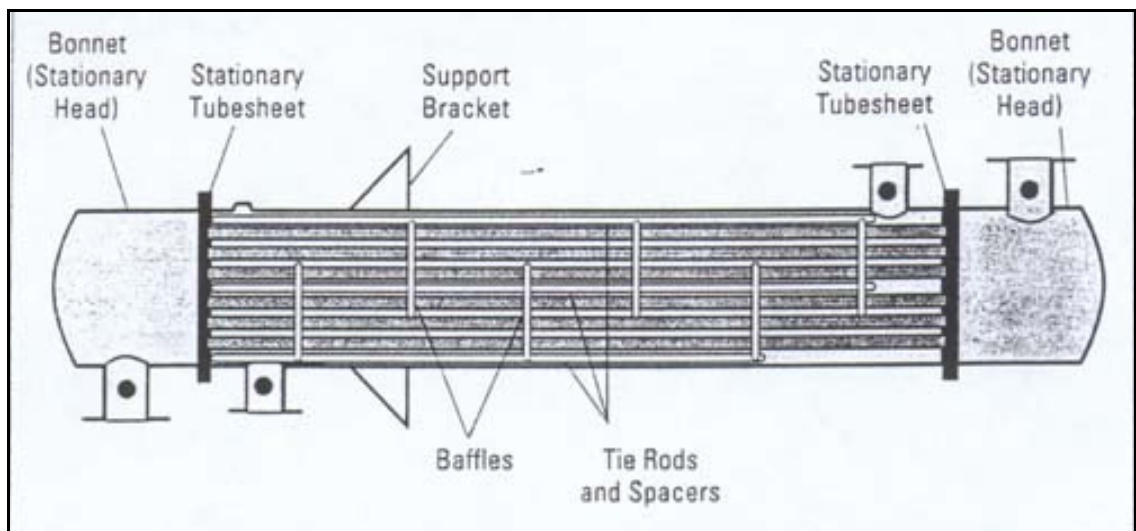
Kuva 1 TEMA:n määritelmät tuubi- ja vaippalämmönvaihtimille.[1]

## 2.2 Lämmönvaihtimien rakenteeseen perustuva jaottelu

Tässä työssä perehdytään lähinnä erilaisiin tuubilämmönvaihtimiin, koska RT3:n esilämmitys vaihtimet ovat tuubivaihtimia. Tuubilämmönvaihtimien jako rakenteen perusteella tapahtuu lähinnä tuubistojen rakenteen perusteella.

### 2.2.1 Kiinteätuubistoinen lämmönvaihdin

Kiinteätuubistoinen lämmönvaihdin on esitetty kuvassa 2. Kiinteätuubistoisessa lämmönvaihtimessa on suorat tuubit, jotka ovat kiinnitetty tukilevyyn vaihtimen molemmista päistä. Tukilevyt ovat hitsattu vaippaan kiinni. Vaihtimissa voi olla irroitettavat päädyt, kupupäädyt tai kokonaan kiinteät tuubit.



Kuva 2. Kiinteätuubinen lämmönvaihdin.[2]

Tärkein hyöty kiinteässä tuubistossa on sen yksinkertainen ja halpa rakenne. Itse asiassa kiinteätuubisto on halvin lämmönvaihdin rakenne, jos lämpölaajenemista ei tarvitse ottaa huomioon. Muita etuja ovat tuubien helppo mekaaninen puhdistus päätyjen tai kupujen poiston jälkeen, sekä vaippapuolen vuotojen minimointi, koska vaippapuolella ei ole laippaliitoksia.

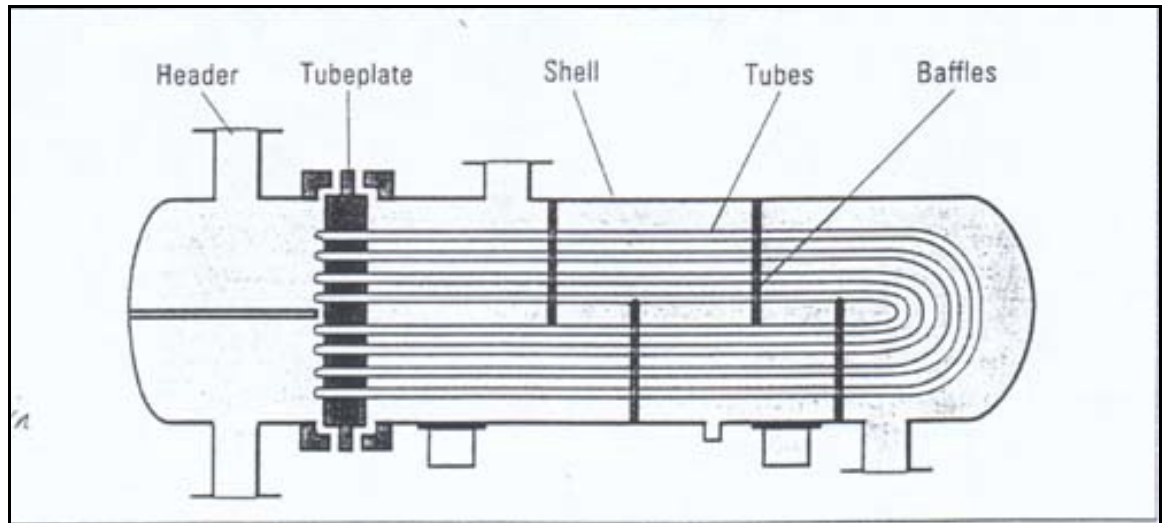
Mallin huonona puolena voidaan mainita tuubien ulkopuolien vaikea mekaaninen puhdistaminen, koska tuubit ovat kiinteästi kiinni itse vaipassa. Tämän takia kiinteitä tuubistoja tulisi käyttää vain jos vaippapuolella virtaa puhdasta ainetta. Jos vaippapuoli voidaan puhdistaa kemiallisin keinoin riittävän hyvin, voidaan kiinteää tuubistorakennetta käyttää myös likaaviin olosuhteisiin.

Kiinteätuubistoissa lämmönvaihtimessa pitää ottaa myös huomioon lämpölaajeneminen, jos lämpötilaero tuubien ja vaippapuolen välillä on suuri. Tällöin lämmönvaihtimen hinta kasvaa oleellisesti.[2]

### 2.2.2 U-tuubilämmönvaihdin

U-tuubi nimitys tulee yksinkertaisesti siitä että tuubiston toinen pääty on taivutettu u-muotoiseksi. Tällöin tuubiston valmistuskustannukset kohoavat huomattavasti verrattuna kiinteätuubistoiseen lämmönvaihtimeen. Myös vaihtimen ulkohalkaisija kasvaa hieman. U-tuubistoinen lämmönvaihdin on esitetty kuvassa 3.





Kuva 3. U-tuubilämmönvaihdin.[2]

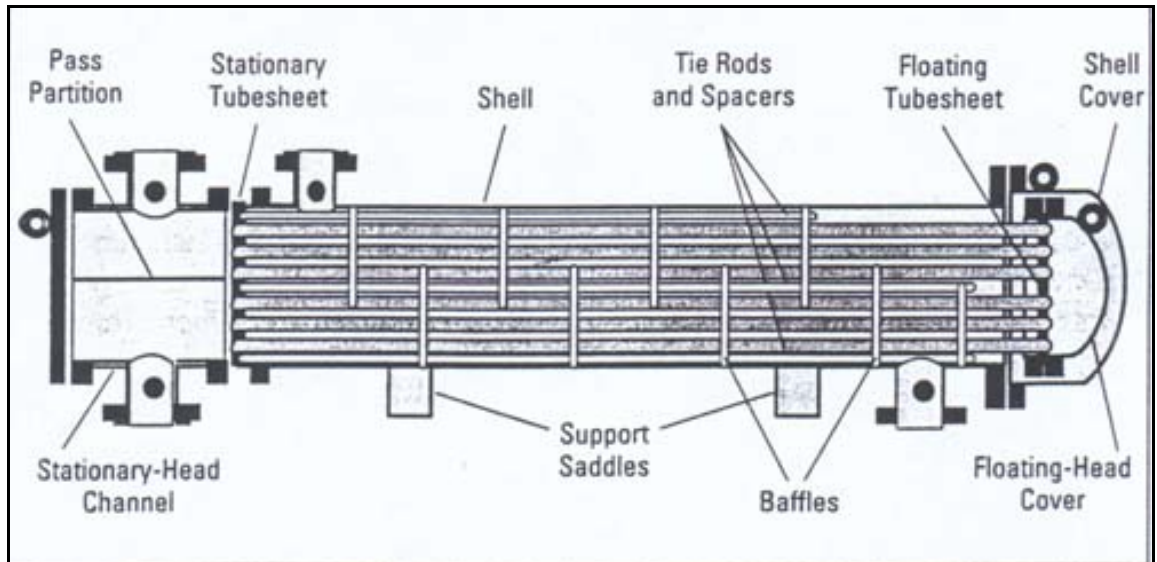
Vaihtimen etuna mainittakoon se että tuubisto voi laajeta tai supistua, koska tuubiston toinen pääty ei ole kiinni vaippapuolessa. Lisäksi tuubiston ulkopuoli voidaan helposti puhdistaa, koska tuubisto voidaan irrottaa.

Vaihtimen heikkoutena voidaan pitää tuubien sisäpuolen vaikeaa puhdistusta, koska u-mutka vaatii taipuisaa puhdistusmekanismia. Tämän takia U-tuubistoa ei pitäisi käyttää jos tuubipuolella virtaa likaavaa ainetta.[2]

### 2.2.3 Uivapäättyinen lämmönvaihdin

Uivapäättyinen lämmönvaihdin on monipuolisin tuubilämmönvaihdin ja samalla myös kallein. Tässä mallissa tuubiston toinen pääty on tuettu vaippaan ja toinen pääty voi vapaasti ”kellua” vaipan sisällä. Tuubistorakenne voidaan irrottaa puhdistusta varten. Tällöin vaihtimen molemmat puolet on helppo puhdistaa ja myös tuubiston laajeneminen ja supistuminen voidaan ottaa huomioon. Uivapäättyisestä lämmönvaihtimesta käytetään myös nimitystä kaksoiskupulämmönvaihdin, koska vaihtimessa on tuubiston toiseen päättyyn rakennettu kaksoiskupu, joka on halkaisijaltaan pienempi kuin vaipan kupupääty. Tuubisto on tuettu tätä

kaksoiskupurakennetta vasten ja itse kaksoiskupu sijaitsee varsinaisen vaippaosan kupupäädyn sisässä. Uivapäätynen lämmönvaihdintyyppi on liikaavissa olosuhteissa yleisimmin käytetty lämmönvaihdintyyppi. Uivapäätynen lämmönvaihdin on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Uivapäätynen lämmönvaihdin.[2]

Prosessiteollisuudessa yleisimmin käytetty uivapäätynen lämmönvaihdin on ns. TEMA S, missä on läpivedettävä tuubistorakenne ja kelluvassa päädysässä on tuubiston tukilevy, joka estää tuubiston pitkittäisen liikkumisen. Tällöin kaksoiskupurakenne on purettava ennen tuubiston ulosvetovaihetta.[2]

### 2.3 *Lämmönvaihtimien käyttötarkoitukseen perustuva jaottelu*

Periaatteessa käyttötarkoitukseen perustuva jako on hyvin yksinkertainen; yksifaasi (jäähdytys tai lämmitys) tai kaksoisfaasi (höyrystys tai kondensoiminen) lämmönvaihtimet. Kuitenkin lämmönvaihtimessa on kaksi puolta, joten yleensä jako tehdään seuraavasti:

- yksifaasi lämmönvaihdin (sekä vaippa- että tuubipuolella)

- kondensoiva lämmönvaihdin (toinen puoli kondensoi, toisella puolella yksifaasi)
- höyrystin (toinen puoli höyrystää, toisella puolella yksifaasi)
- kondensoiva/höyrystin (toinen puoli höyrystää toinen kondensoi)

Käyttötarkoitukseen perustuvassa jaossa käytetään seuraavaa terminologiaa:

- lämmönvaihdin ; molemmilla puolilla yksifaasinen prosessivirta
- jäähdytin; toisella puolella jäähdytettävä prosessivirta ja toisella puolella jäähdyttävä virta esim. vesi
- lämmitin; toisella puolella lämmitettävä prosessivirta ja toisella puolella lämmittävä virta esim. höyry
- lauhdutin; prosessikaasua kondensoidaan esim. vedellä
- jäähdytin/lämmitin; toisella puolella kondensoituva prosessivirta ja toisella puolella höyrystävä prosessivirta
- kiehutin; toisella puolella lämmitetään kolonnin pohjatuotetta ja toisella puolella on lämmittävä virta esim. höyry tai kuuma prosessivirta.[2]

### 3 LÄMMÖNVAIHTIMEN SUUNNITTELU

#### 3.1 Lämmönsiirron suunnittelussa käytetyt perusyhtälöt

Lämmönsiirtimen lämpöteho putki- ja vaippapuolella lasketaan yhtälöstä (1)

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1)$$

jossa	$Q$	lämpöteho, W
	$\dot{m}$	massavirta, t/h
	$c_p$	ominaislämpö, kJ/kg K

$\Delta T$  lämpötilaero, K.

Lämpötehon avulla voidaan ratkaista kokonaislämmönsiirtokerroin seuraavista yhtälöstä:

$$Q = F \cdot A \cdot U \cdot \Delta T_m \quad (2)$$

jossa	F	korjauskerroin, -
	A	lämmönsiirtopinta-ala, m <sup>2</sup>
	U	kokonaislämmönsiirtokerroin, W/m <sup>2</sup> K
	$\Delta T_m$	logaritminen lämpötilaero, K.[3]

Lämmönsiirron tehokkuus heikentyy kun lämmönsiirtopinnoille kerääntyy likaa. Likaantumista tapahtuu seuraavissa olosuhteissa;

- virtausnopeudet laskevat
- lämmönsiirtolämpötila kasvaa
- lika ja korroosiotuotteet lisääntyvät
- raakaöljyn muuttuu raskaammaksi.

Lämmönsiirtopintojen likaantuminen on lämmönsiirtoa heikentävä ilmiö, joka aiheuttaa lämmönsiirron tehon laskua. Lämmönsiirron tehokuutta lämmönvaihtimelle kuvataan yleensä lämmönsiirtoyhtälöllä, joka on muodostuu lämmönsiirtopintojen pintafilmeistä ja itse lämmönsiirtopinnan (tuubin) lämmönjohtavuudesta. Puhtaalle lämmönsiirtimelle lämmönsiirtoyhtälö on muotoa:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{L_m}{k_m} \quad (3)$$

jossa	$U_c$	lämmönsiirtokerroin puhtaalle vaihtimelle, W/m <sup>2</sup> K
	$h_i$	sisäpinnan pintafilmin lämmönsiirtokerroin, W/m <sup>2</sup> K

$h_o$	ulkopinnan pintafilmin lämmönsiirtokerroin, $W/m^2 K$
$L_m$	lämmönsiirtopinnan paksuus, m
$k_m$	lämmönsiirtopinnan lämmönjohtavuus, $W/m K$ . [4]

Lämmönvaihtimen likaantuessa alkaa lämmönsiirtopinnoille kerääntyä likaa, joka heikentää lämmönsiirtoa. Lämmönsiirtoa vastustava kerroin on tällöin pintafilmiä, lämmönsiirtoseinämän ja likakerroksien summa. Likaavissa olosuhteissa voi likakerroksien aiheuttama vastus olla jopa 50 - 85% kokonaislämmönsiirtovastuksesta. Käytännössä lämmönsiirtopintojen likakerrokset lasketaan yhteen ja niistä käytetään nimitystä lämpövastus. Lämmönsiirtoyhtälö likaisella lämmönvaihtimelle lasketaan tällöin yhtälöstä 4;

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_F \quad (4)$$

jossa	$U_D$	lämmönsiirtokerroin likaiselle vaihtimelle, $W/m^2 K$
	$R_F$	kokonaislikakerroin, $m^2 K/W$ . [4]

Likaisen lämmönsiirtimen pinta-ala saadaan puolestaan yhtälöstä (5);

$$A_D = \left( \frac{1}{U_C} + R_F \right) \left( \frac{Q}{\Delta T_m} \right) \quad (5)$$

jossa	$A_D$	likaisen lämmönsiirtimen pinta-ala, $m^2$ . [4]
-------	-------	---

Lämmönvaihdinprosessin suunnittelussa pitää ottaa huomioon seuraavia lähtökohtia:

1. molempien virtojen virtausmäärät
2. virtojen sisääntulo ja ulosmeno lämpötilat
3. prosessivirtojen käyttöpaineet
4. suurin sallittu painehäviö (yleensä nesteille 490-690 kPa ja kaasuille 50-200 kPa)

5. likaantumisen aiheuttama virtausvastus molemmille virroille
6. virtojen fysikaaliset ominaisuudet; viskositeetit, tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämmöt
7. lämpöteho
8. lämmönvaihtimen tyyppi
9. linjakoot; lämmönvaihtimen suunnittelussa pyritään saamaan lämmönvaihtimen sisäänmenot ja ulostulot linjakokojen kanssa samanlaisiksi ettei supistuksia tai laajennuksia tarvittaisi
10. toivottu tuubikoko; määritellään usein tuubin ulkohalkaisijan, paksuuden ja pituuden avulla
11. vaipan maksimihalkaisija ja muut mitat; pituus paino
12. rakennemateriaali; pyritään mahdollisimman selvään ja yksinkertaiseen materiaaliin eli vaipan ja tuubiston materiaalit määräävän muiden osien materiaalin
13. erikoisvaatimukset; mm. ylös- ja alasajo olosuhteet, puhdistusväli sekä vaihtoehtoiset käyttöolosuhteet.[2]

### **3.2            *Materiaalin valinta***

Lämmönvaihdin koostuu periaatteessa kahdesta erillisestä, toisiinsa vaikuttavissa, painesäiliöstä. Nämä ovat vaippa- ja tuubipuoli. Lämmönsiirtimen tyyppi valitaan Fortumin [5] käytännön mukaan: prosessivirtausten puolten valinta, vaippatyyppin ja tuubiryhmän valinta sekä jakokammion ja lämmönsiirtimien geometrisen rakenteen valinta. Materiaalin valintaan vaikuttaa myös virtaavien aineiden ominaisuudet: faasimuutokset, korroosio-ominaisuudet, paine jne. Näistä varsinkin faasimuutokset aiheuttavat esimerkiksi ylimenolauhduksissa huomattavia korroosio-ongelmia. Myös vaippapuolen väliseinien ja ohjauslevyjen materiaalien ja tuubisarjojen välillä on vuorovaikutusta, esimerkiksi galvaaninen pari tai tuubisarjojen värähtely voi aiheuttaa vaippapuolen virtauksissa korroosiota aiheuttavia virtauspiikkejä. Galvaanista paria tulee varoa varsinkin tuubien ja tuubiston tukilevyn sekä tuubiston ja väliseinien välillä. Galvaaniset parit vaihtelevat eri olosuhteille, mutta yleensä suunnittelussa

käytetään galvaanisien parien taulukoita merivesissä ja vesipitoisissa ympäristöissä. Myös hitsaus saumat ovat usein heikkoja kohtia ja voivat toimia korroosion alkupisteinä. Kaikkia materiaaleja ei myöskään voi edes hitsata toisiinsa kiinni.[6]

### 3.2.1 Vaippapuolen materiaalin valinta

Vaippapuolen materiaalin valinta on yleensä melko helppoa. Vaippapuolen paineluokista riippuen materiaaliksi valitaan yleensä paksuuden ja muodon mukaan sopiva korroosiota kestävä materiaali. Normaalioloissa seinämien materiaalit valitaan käyttäen BWG-luokitusta [7]: hiiliteräs, alumiini ja alumiiniseokset, kupari ja kupariseokset sekä muut seokset.

### 3.2.2 Tuubiston materiaalin valinta

Tuubisarjojen materiaalia valittaessa käytetään edellä mainittuja periaatteita. Tuubisarjojen suunnittelussa pitää ottaa huomioon myös tuubiston valmistustapa eli saumaton vai hitsatut saumat. Näistä saumaton on yleensä noin kaksi kertaa kalliimpi ratkaisu ja siksi saumattomia tuubistoja käytetään yleensä vain korkeissa lämpötiloissa ja paineissa. Tuubiston paineluokat ovat yleensä hieman korkeammat kuin vaippapuolella, joten tavallisen SA-516-70 levyteräksen sijasta voidaan käyttää esim. SA 508 tyhjäkäsiteltyä Ni-Cr-Co seosterästä.[6]

### 3.2.3 Väliseinien ja ohjausrakenteiden materiaalin valinta

Väliseinien ja ohjausrakenteiden materiaalin valinnassa tehdään usein liiallisia yleistyksiä, mutta niiden valinnassa pitää käyttää samoja kriteerejä kuin tuubistoissa

ja vaipoissa, sillä myös nämä rakenteet voivat aiheuttaa sekä galvaanista että eroosiokorroosiota. Usein väliseinien ja ohjausrakenteiden materiaaliksi valitaan kuitenkin vaippapuolen materiaali, sillä ne ovat kosketuksissa lähinnä vaippapuolen materiaaleihin. Kuitenkin väliseinät ovat kosketuksissa tuubeihin, joten galvaanista paria tulee välttää. Galvaaninen pari voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa väliseinän ohentumisen normaalista  $\frac{1}{4}$  ” koosta todelliseksi veitsenteräksi, jolloin tuubistoon saattaa kohdistua leikkaavia virtausvoimia, jotka vaurioittavat tuubistoa hyvin lyhyelläkin aikavälillä.[6]

### 3.2.4 Erikoisolosuhteet

Jäähdytysvedelle käytetään tavallisesti hiiliterästä tuubistoissa. Merivedelle hiiliteräs ei kuitenkaan ole sopiva vaihtoehto, sillä merivesi aiheuttaa korroosiota hiiliteräksessä. Jäähdytysvedelle käytetään usein erilaisia korroosion tarkkailu- ja ehkäisykeinoja esimerkiksi suodattimia, korroosionestoaineita ja systemaattista valvontaa. Myös virtausnopeuksiin tulisi kiinnittää erityistä huomiota, sillä liian suurilla virtausnopeuksilla esiintyy eroosiokorroosiota ja liian pienillä nopeuksilla kiinteät partikkelit laskeutuvat antaen korroosiolle ja mikrobiologisella korroosiolle kasvualustan.

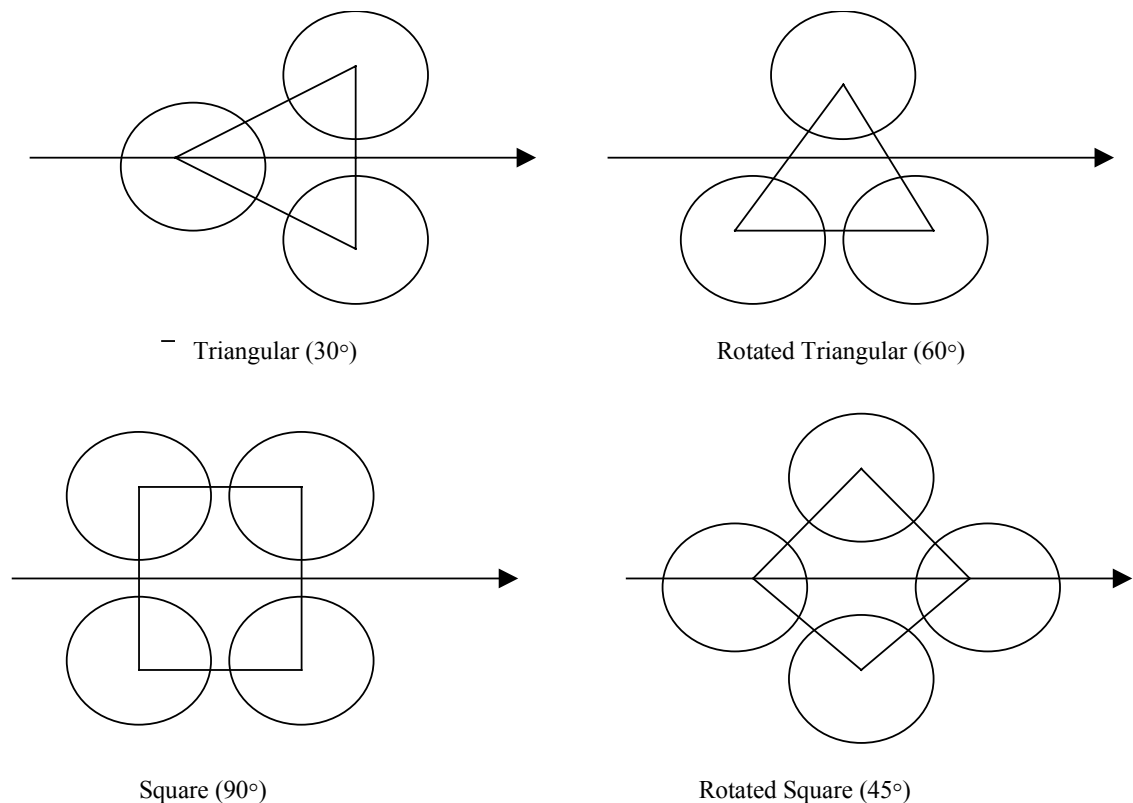
Happamat ja emäksiset virrat vaativat yleensä erikoismateriaaleja, mutta yleensä niiden korroosiohaitat ovat hyvin tunnettuja. Nämä virrat sisältävät kuitenkin piileviä riskejä, sillä ne aiheuttavat jännityskorroosiota, rakokorroosiota ja kalvojen kehittymistä.

Myös likaavat virrat aiheuttavat erityisolosuhteita, sillä likaavien materiaalien alustat tarjoavat korroosiolle hyviä kasvualustoja lisäksi nämä suspensiot sisältävät usein happamia faaseja. Likaavat suspensiot voivat myös tukkia tuubistoja aiheuttaen näin virtauksien muuttumista.[6]



### 3.3 Tuubipuolen suunnittelu

Tuubipuolen virtaus edustaa yksinkertaisesti virtausta putkessa. Lämmönsiirto ja painehäviöt vaihtelevat virtausnopeuden mukaan ja yleensä pyritään maksimoimaan painehäviö, koska tällöin vaihtimesta saadaan irti suurin mahdollinen lämpöteho. Tuubipuolella käytetään yleensä seuraavia tuumakokoja:  $\frac{3}{8}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{5}{8}$ ",  $\frac{3}{4}$ ", 1",  $1 \frac{1}{4}$ " ja  $1 \frac{1}{2}$ ". Näistä  $\frac{3}{4}$ " ja 1" ovat yleisimmin käytetyt. Likaaviin olosuhteisiin ei pitäisi käyttää alle  $\frac{3}{4}$ " tuubikokoa. Tuubiston layout-sijoittelussa käytetään yleensä neljää eri mahdollisuutta: kolmiomainen ( $30^\circ$ ), käännetty kolmio ( $60^\circ$ ), neliömäinen ( $90^\circ$ ) ja käännetty neliö ( $45^\circ$ ). Nämä eri vaihtoehdot on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Tuubiston erilaisia layout-sijoittelu ratkaisuja.[2]

Kolmiomalli mahdollistaa suuremman määrän tubeja kuin neliömäinen ratkaisu samalla vaippakoolla. Tuubipuolella on kolmiomallissa myös pienempi painehäviö,

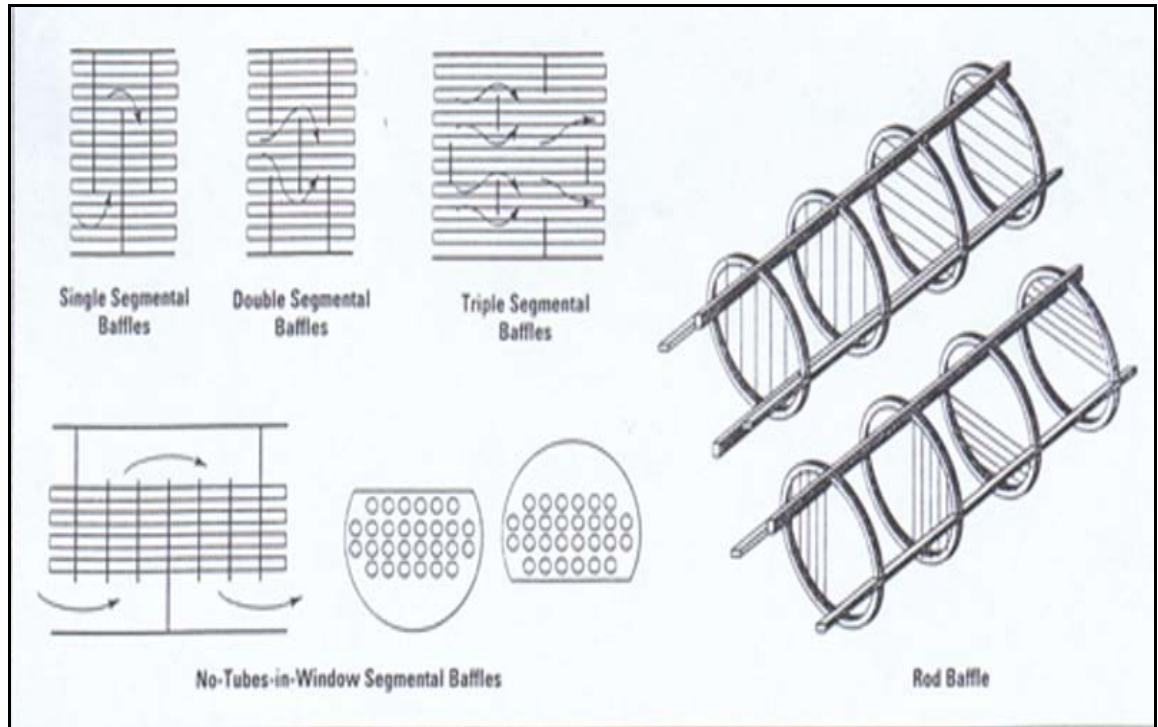
tosin kolmiomallissa vaippapuolen painehäviö kasvaa hieman, jolloin saavutetaan korkeampi turbulenssi ja sen avulla tehokkaampi lämmönsiirto kuin neliömallisessa ratkaisussa. Tyypillinen tuubien jakoväli on 1,25 kertaa tuubin ulkohalkaisija, jolloin kolmiomalli ei mahdollista tuubien välien tehokasta mekaanista puhdistusta, kun taas neliömallissa puhdistus on helpompaa. Tämän takia neliömallia suositellaan käytettäväksi likaavissa olosuhteissa. Jos tuubien ulkopuolen kemiallinen puhdistus on mahdollista ja tarpeeksi tehokasta, voidaan myös kolmiomallia käyttää likaavissa olosuhteissa tehokkaasti.

Tuubiston jakovälillä tarkoitetaan kahden vierekkäisen tuubin välistä lyhyintä etäisyyttä. Yleensä pyritään käyttämään pienintä mahdollista jakoväliä, koska tällöin saadaan aikaiseksi pienempi vaipan ulkohalkaisija. Erikoistapauksissa voidaan jakoväliä kuitenkin kasvattaa esim. haluttaessa vähentää vaippapuolen painehäviötä.[2]

### **3.4 Vaippapuolen suunnittelu**

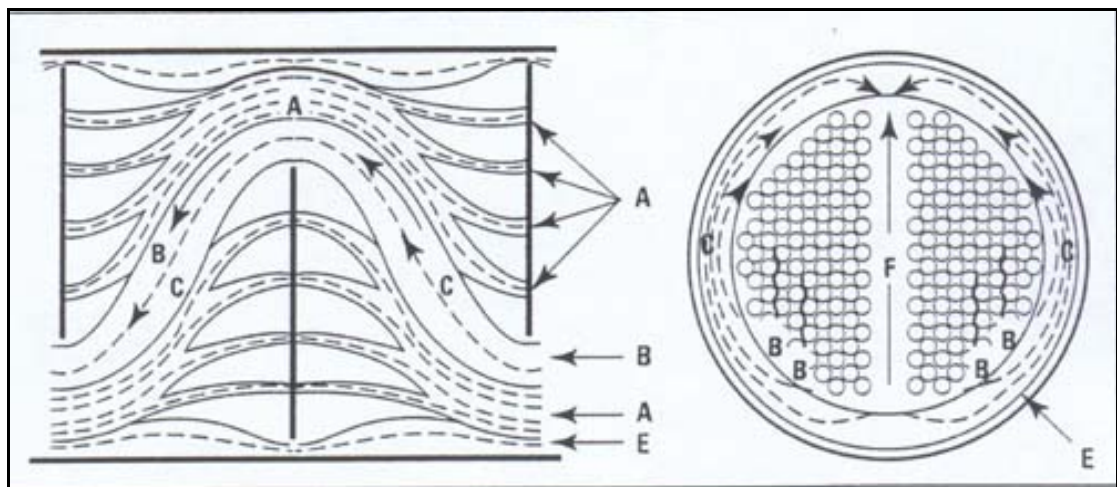
Vaippapuolen suunnittelu on paljon monimutkaisempia kuin tuubipuolen, koska vaippapuolella ei ole vain yhtä prosessivirtaa, vaan yksi päävirtaus (kohtisuoraan tuubistoa kohden) ja neljä vuoto- ja ohivirtausta. Vaippapuolen suunnitteluun vaikuttaa myös tuubiston sijoittelu ja väliseinien ja -levyjen sijoittelu. Edellä mainitusta kuvasta 1 havaitaan, että vaippapuolella on olemassa lukuisia erilaisia rakenneratkaisuja, joista TEMA E on yleisin käytössä oleva ratkaisu.

Väliseiniä ja suuntauslevyjä käytetään tukemaan tuubistoa, suuntaamaan vaippapuolen virtausta sekä estämään tuubiston värinästä aiheutuvia vaurioita. Väliseinät ja suuntauslevyt ovat tavallisesti levyjä tai erilaisia tankoja. Väliseinien sijoittelu määrittelee siis vaippapuolen virtausnopeuksia ja siksi niiden oikea sijoittelu on tärkeää. Vaippapuolen virtaus pyritään saamaan kohtisuoraan tuubistoa kohden, jolloin lämmönsiirto on tehokkainta. Erilaisia väliseinä ja -levytyyppejä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Erityyppisiä väliseiniä ja -levyjä sekä suuntauslevyjä ja tankoja.[2]

Vaippapuolella on siis yksi päävirta, joka on kohtisuorassa tuubistoa kohden sekä neljä ns. vuoto- tai ohitusvirtaa. Vaippapuolen eri virtaukset ovat esitetty kuvassa 7.[9]



Kuva 7. Vaippapuolen erilaiset virtaustyypit.[2]

Tinker [8] kutsuu näitä virtauksia seuraavasti:

- päävirtaus B,
- tuubiston ja väliseinien rakojen vuotovirtaus A
- laippapuolella tuubiston ohi virtaava virta C
- tuubiston keskeltä ohittava virta F
- välilevyjen ja vaipan välinen vuotovirta E

Näistä virtauksista vain päävirrassa B tapahtuu tehokasta lämmönsiirtoa ja muut ovat ns. ei toivottuja virtauksia. Näitä virtauksia voidaan säädellä seuraavilla tekijöillä:

- välilevyjen välinen etäisyys ja koko,
- tuubiston sijoittelu,
- tuubistojen tukirakenteilla,
- tuubiston ja väliseinien väliraoilla,
- vaipan ja väliseinien raoilla,
- tiivisteiden ja tiivistevanteiden sijoittelulla.

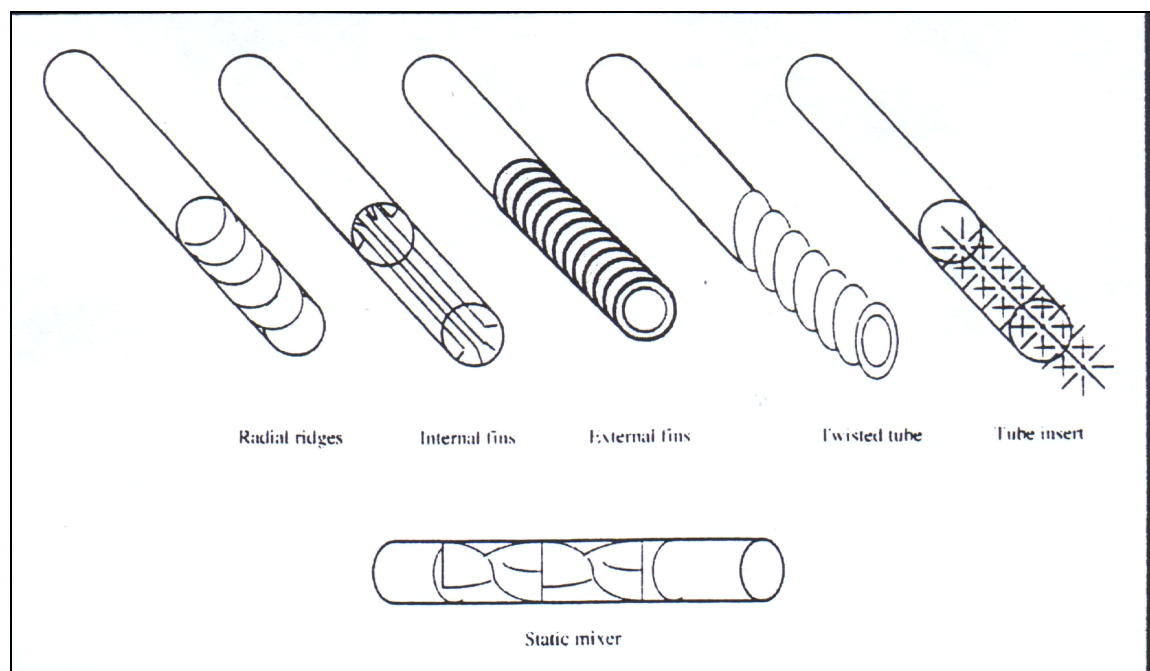
## 4 LÄMMÖNVAIHTIMIEN KÄYTÖN TEHOSTAMINEN

Lämmönvaihtimen käyttöä tehostettaessa on otettava huomioon seuraavia seikkoja:

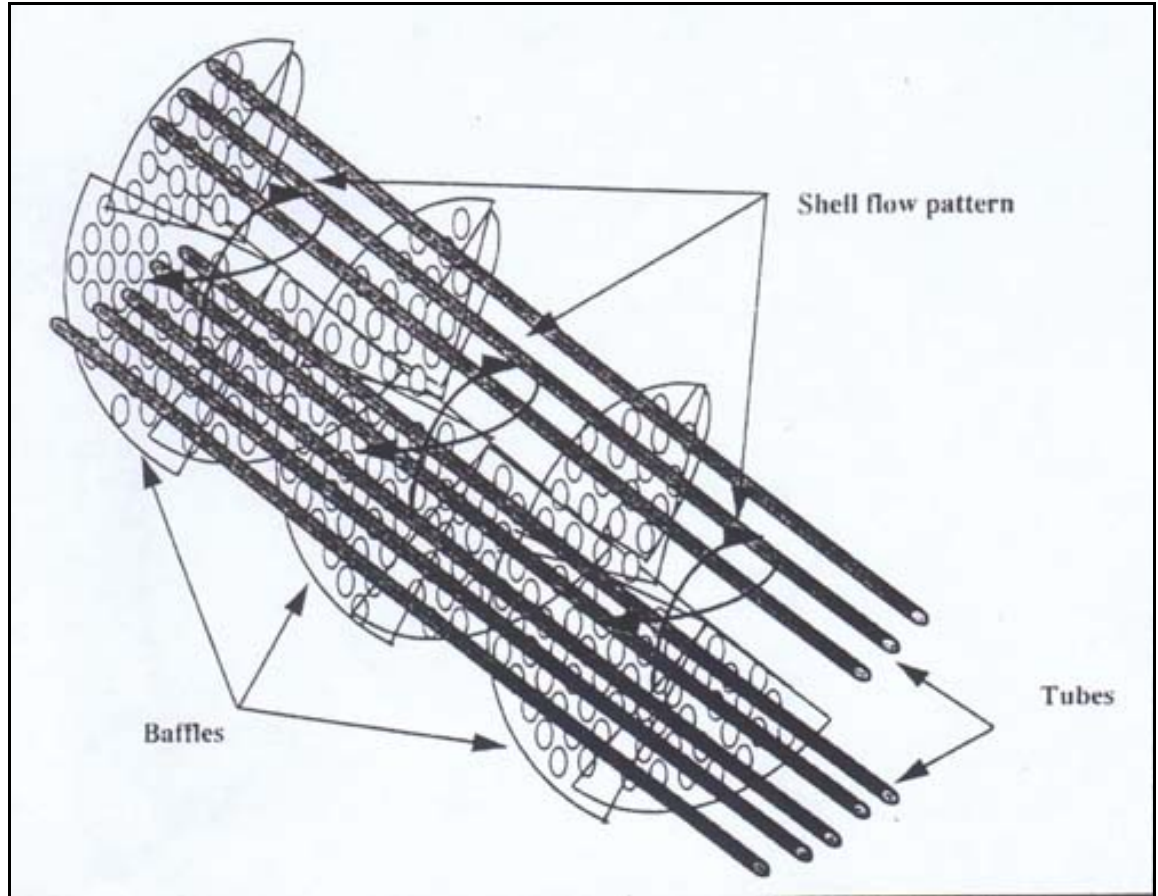
- On määriteltävä toimiiko lämmönvaihdin oikealla tavalla eli etsittävä mahdolliset vialliset liitokset ja putkistoasennukset, jotka voivat johtaa vääränlaisiin virtauksiin vähentäen näin ollen lämmönsiirron tehokkuutta.
- Arvioitava suurin mahdollinen painehäviö lämmönvaihtimelle, jotta vaihtimen lämmönsiirtoteho otettaisiin mahdollisimman tehokkaasti talteen.
- Pyritään määrittelemään likaantumiskerroin oikean suuruiseksi, sillä liian suuret likaantumiskertoimet johtavat liian suurien lämmönsiirtopintojen suunnitteluun, jolloin virtausnopeudet pienenevät. Liian pienet virtausnopeudet vain pahentavat likaantumisongelmaa ja lisäävät näin ollen turhia lämmönsiirtokuluja.

- Peruslämmönvaihdinten lisäksi voidaan ajatella lämmönsiirron tehostamista erilaisilla rakenteellisilla ratkaisuilla, esim. lämmönsiirtopintojen rivoitus, tuubien sisäkappaleilla, modifoiduilla tuubirakenteilla tai modifoiduilla väliseinien ja ohjauslevyjen rakenteilla.
- Eräs helppo vaihtoehto on tuubi- ja vaippapuolen virtausten vaihtaminen toisinpäin, sillä monesti lämmönsiirron tehokkuuteen vaikuttaa lämmönsiirron pinta-alaa enemmän prosessivirtojen virtausolosuhteet. Korkeampipaineinen virta sijoitetaan yleensä tuubipuolelle, halvempien rakennusratkaisujen takia, mutta korkeampi paine antaa yleensä tehokkaamman turbulenssin vaippapuolella, jolloin myös lämmönsiirto tehostuu.

Lämmönsiirtopintojen rivoituksella tarkoitetaan yleensä tuubien rivoittamista tai uurtamista sisä- tai ulkopuolelta. Tuubien sisäkappaleilla pyritään lisäämään tuubien sisäpuolisen virtauksen turbulenssia sekä ehkäisemään likaantumista. Tuubien muotoilulla pyritään turbulenssia lisäämään vaippapuolella. Myös väliseinien ja ohjauslevyjen rakenteita muuttamalla, esim. spiraalimaiset väliseinät, pyritään lisäämään turbulenssia lisäämään vaippapuolella. Tuubien erilaisia rakenneratkaisuja on esitetty kuvassa 8. Spiraalimainen ohjauslevyratkaisu on esitetty kuvassa 9.[9]



Kuva 8. Tuubien erilaisia rakenneratkaisuja.[6]



Kuva 9. Vaippapuolen ohjauslevyjen spiraalirakenne.[6]

## 5 LÄMMÖNVAIHTIMIEN LIKAANTUMINEN

Lämmönvaihdinten likaantuminen voidaan määritellä ei toivottujen materiaalien kerääntymiseksi lämmönsiirtopinnoille. Likaantumista tapahtuu käytännössä aina kun tapahtuu lämmönsiirtoa kahden virtaavan aineen välillä metalliseinän läpi. Likaantumisen suuruus vaihtelee virtaavien aineiden ja olosuhteiden mukaan. Likaantumista voi myös tapahtua joko molemmilla tai vain toisella puolella lämmönsiirtopintaa. Likaantuminen johtaa aina lämmönsiirron tehokkuuden alentumiseen ja sitä kautta lisääntyvän lämmönsiirtopinta-alan tarpeeseen. Likaantuminen myös kasvattaa virtausvastusta, aiheuttaen lisääntyviä painehäviötä.

Näistä painehäviö on vakavampi seuraus kuin lämmönsiirron tehokkuuden heikkeneminen. Lämmönsiirrin joudutaankin yleensä ottamaan huoltoon useammin pienentyneen virtauksen kuin vähentyneen lämpötehon takia. Likaantuminen lisää myös korroosio-ongelmia, aiheuttaa tukkeumia ja pahimmassa tapauksessa johtaa lämmönvaihtimen vaurioitumiseen. Kaasupuolella likaantuminen voi aiheuttaa myös tulipaloja. Mukherjeen [10] mukaan likaantumisen aiheuttamia ei toivottuja tapahtumia ovat:

1. kohonneet kustannukset suurempien laitevaatimusten takia,
2. lisääntyvä energian tarve: pumppaamisessa, lämmönsiirrossa ja lauhdutuksessa,
3. likaantumisen estoaineiden ja kemikaalien kunnossapitokustannukset,
4. likaantuneiden lämmönsiirrinten puhdistuskustannukset,
5. kokonaissyötön lasku,
6. alasajo kustannukset.

### **5.1 Likaantumistyytit**

Epsteinin [11] mukaan on olemassa seitsemän erilaista likaantumismekanismia:

1. Saostuminen; lämmönsiirtopinnoille kerääntyy virtaavasta aineesta partikkeleita, jotka muodostavat sakkoja. Kovettuneista sakoista puhuttaessa käytetään nimitystä kattilakiven muodostuminen ja pehmeästä sakasta käytetään nimitystä liete.
2. Hiukkaslikaantuminen; partikkeleista koostuva sakka laskeutuu painovoiman ansiosta lämmönsiirtopinnoille. Hiukkaslikaantumisessa partikkelit kertyvät nimenomaan painovoiman ansiosta, kun taas saostumisessa sakat voivat muodostua esimerkiksi virtauksien mutkakohtiin, jopa laitteistoiden yläpinnoille.
3. Kemiallinen likaantuminen; virtaavassa aineessa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden ansiosta muodostuu sakkoja, jotka kerääntyvät lämmönsiirtopinnoille.
4. Koksautuminen; krakkaus ja polymerisaatio ovat tästä hyvin tunnettuja esimerkkejä.

5. Korroosiolikaantuminen; lämmönsiirtopinta osallistuu korroosiotapahtumaan ja korroosiotuotteet, esim. ruoste, kerääntyvät lämmönsiirtopinnoille estäen lämmönsiirtoa ja jopa keräävät muita likaavia partikkeleita.
6. Biologinen likaantuminen; biologiset mikro- ja makro-organismit kerääntyvät lämmönsiirtopinnoille.
7. Jähmettyminen; nestemäisenä virtaava aine tai sen osaset jähmettyvät alijäähtyneille lämmönsiirtopinnoille esim. jäätyminen.

#### 5.1.1 Raakaöljyn esilämmityksen likaantuminen

Koska raakaöljyt koostuvat lukuisista eri hiilivedyistä, ovat myös eri raakaöljylaatujen likaavat ominaisuudet hyvin erilaisia. Raakaöljyissä on lukuisia eri epäorgaanisia yhdisteitä, jotka ovat usein liukenemattomia yhdisteitä. Nämä epäorgaaniset yhdisteet voivat aiheuttaa likaantumista mm. rautaoksideja, sulfaatteja, kovettuneita suoloja ja lietettä. Lisäksi raakaöljyissä on myös orgaanisia yhdisteitä, kuten asfalteenit ja polymeeriyhdisteet. Nämä yhdisteet poistuvat kuitenkin yleensä hyvinkin tehokkaasti suolanpoiston yhteydessä. [12]

Suolanpoiston jälkeen ovat lämpötilat ( $> 100^{\circ}\text{C}$ ) raakaöljyn esilämmityksessä hyvin otollisia eri likaantumistyypeille. Useat analyysit ympäri maailmaa eri raakaöljy-yksiköistä osoittavat, että suolanpoiston jälkeisessä esilämmityksessä esiintyy kolme eri likaantumistyyppiä:

1. asfalteeniyhdisteiden muodostuminen ja saostuminen,
2. polymeeriyhdisteiden muodostuminen ja saostuminen,
3. epäorgaanisten yhdisteiden laskeutuminen. [12]



## 5.2 *Likaantumiseen vaikuttavat tekijät*

Tärkein likaantumiseen vaikuttava tekijä on itse virtaava aine. Virtaavan aineen ominaisuudet vaihtelevat erittäin paljon, esim. kevyet hiilivedyt (benssiini) eivät juuri aiheuta likaantumista, kun taas raskaat hiilivedyt (pohjaöljy ja raskas kaasuöljy) ovat varsin likaavia virtoja. Likaavan virran muita likaantumiseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat:

- Virtausnopeus; korkeat virtausnopeudet vähentävät ja pienet virtausnopeudet lisäävät likaantumista. Liian suuret virtausnopeudet aiheuttavat kuitenkin kulumista. Ideaalisina virtausnopeuksina pidetään nesteille 1,5-2,1 m/s tuubipuolella ja 1,0-1,5 m/s vaippapuolella.
- Lämpötila; virtaavan aineen ja sakan välisen kosketuspinnan välinen lämpötila tärkeä tekijä likaantumisessa. Lämmitettäessä eivät liukoiset suolat juuri aiheuta ongelmia, mutta esimerkiksi jäähdytettäessä on eri suolojen liukoisuuslämpötilat otettava huomioon. Kuitenkin erittäin korkeissa lämpötiloissa eräät suolat (kalsiumkarbonaatti, magnesiumhydroksidi ja kalsiumsulfaatti) voivat myös saostua, jolloin lämmönsiirtopinnoille saostuu suolayhdisteitä (kattilakiven muodostuminen). Lämpötila vaikuttaa myös voimakkaasti kemialliseen likaantumiseen, sillä kemialliset reaktiot ovat yleensä voimakkaasti lämpötilasta riippuvaisia. Myös biologista likaantumista tapahtuu yleensä vain tietyillä lämpötila-alueilla (alle 0°C – 80°C), sillä liian korkeissa lämpötiloissa solurakenteet hajoavat ja liian matalissa lämpötiloissa eivät entsyymit toimi kovinkaan aktiivisesti.
- Laitteiston materiaali ja pintakäsittely; eräät materiaalit osallistuvat likaantumisen kemiallisiin reaktioihin (ruostuminen), kun taas toisilla materiaaleilla (kupari seokset) voidaan esim. biologinen likaantuminen estää. On myös selvää, että likaantumista tapahtuu paremmin karkeilla pinnoilla ja pintakäsittely on siksi tärkeä likaantumisen ehkäisykeino.[12]

Likaantumiseen vaikuttavat tekijät vaihtelevat myös virtaavan aineen olomuodon mukaan. Taulukoissa I ja II on esitetty eri likaantumistyyppisiin vaikuttavien tekijöiden nestemäisille virroille ja kaasuille. Taulukoissa nuolet kertovat vaikuttavatko eri tekijät

lisäävästi vai vähentävästi likaantumiseen. Viiva tarkoittaa ettei eri tekijöillä ole juuri vaikutusta tai on vain pieni vaikutus likaantumiseen. Tyhjä kohta tarkoittaa ettei eri tekijöiden vaikutusta likaantumiseen ole tutkittu tai siitä ei ole merkintöjä kirjallisuudessa.[12]

Taulukko I Lämmönvaihtimen eri likaantumistyyppihin vaikuttavia tekijöitä nestemäisillä virtauksilla.

	Saostu- minen	Hiukkan- likaantuminen	Kemiallinen likaantuminen	Korroosio likaantumien	Biologinen likaantuminen	Jähmettyminen
Lämpötila	↑↓	↑↓ -	↑↓	↑↓	↑↓ -	↓
Virtausnopeus	↓ -	↓	↓	↑↓	↑↓ -	↑↓
Kyllästymis- Piste	↑					↑
PH	↑	↑↓		↑↓	↑↓	
Epäpuhtaudet		↓				
Konsentraatio	↑	↑				↑
Pinnan karheus	↑	↑ -		↑ -	↑	↑
Paine	-		↑	↑	↑↓	-
Happi	-		↑	↑	↑↓	-

Taulukko II Lämmönvaihtimen eri likaantumistyyppihin vaikuttavia tekijöitä kaasumaisilla virtauksilla.

	Saostu- minen	Hiukkan- likaantuminen	Kemiallinen likaantuminen	Korroosio likaantuminen
Lämpötila	↑	↑↓	↑	↑↓ -
Virtausnopeus	↓	↓↓ -	↑↓ -	↑ -
Epäpuhtaudet	↓			
Konsentraatio	↑	↑		↑
Kaasu/neste- suhde		↑	↑	
Pinnan karheus		↑ -		↑ -
Happi	-	-	↑	
Rikki			↑	↑

### 5.3 Lämmönvaihtimien likaantumisen ehkäiseminen

Koska Raakaöljyn tislauksyksikön esilämmitysjunan lämmönvaihtimet ovat pääasiassa putkilämmönvaihtimia, keskitytään tässä työssä lähinnä putkilämmönvaihtimien likaantumisen ehkäisemiseen. Vaikka putkilämmönvaihtimet kestävät hyvin kulutusta ja korkeita paineita, niiden likaantumista on vaikea välttää. Putkilämmönvaihtimia käytettäessä onkin kiinnitettävä huomiota virtaavien aineiden ominaisuuksiin ja likaavampi virta pyritäänkin yleensä sijoittamaan tuubipuolelle, koska tuubipuoli on huomattavasti helpompi puhdistaa. Likaavat virrat ovat kuitenkin yleensä myös hyvin viskooseja virtoja, jolloin niiden lämmönsiirtokerroin on melko heikko johtuen laminaarista virtauksesta. Siksi onkin pyrittävä miettimään virtaavien aineiden kannattavaa sijoittelua, sillä lämmönsiirtopinta-alojen kasvaessa myös lämmönvaihtimien hinnat kasvavat. Monesti onkin kannattavampaa sallia tietyn suuruinen lämmön-siirtopintojen likaantuminen ja puhdistaa likaiset pinnat tietyin väliajoin. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat mm. käyttöpaine, lämpötila, korroosio-ominaisuudet ja virtausmäärät. Seuraavassa pyritään hieman valaisemaan lämmönvaihtimen virtojen sijoittelun erilaisia vaihtoehtoja likaavissa olosuhteissa.[13]

#### 5.3.1 Likainen virta tuubipuolella

Kun likaava virta on lämmönvaihtimen tuubipuolella voidaan käyttää seuraavia eri vaihtoehtoja:

- 1 Käytetään suurempia tuubihalkaisijoita; Likaaville virroille minimihalkaisijana pidetään 25 mm. Tällöin lämmönsiirto- ja painehäviöt ovat huomattavasti pienempiä, kuin 20 mm ulkohalkaisijaa käytettäessä. Tämä on tärkeää varsinkin raakaöljyn esilämmitysjunissa, joissa on useita lämmönvaihtimia peräkkäin ja likaantumisen aiheuttama kokonaispainehäviö voi vaikuttaa jopa raakaöljyn tislauksyksikön syöttömääriin.

- 2 Käytetään korkeita virtausnopeuksia; Korkeat virtausnopeudet vähentävät yleensä likaantumista. Koska painehäviö kasvaa virtausnopeuksien kasvaessa nopeammin kuin lämmönsiirtokerroin, joudutaan usein määrittelemään optimaalinen virtausnopeus, jolla on kannattavinta toimia. On myös muistettava, että liian korkeat virtausnopeudet aiheuttaman myös kulumista.
- 3 Jätetään riittävän suuri pelivara painehäviöille; Likaavissa olosuhteissa olisi painehäviölle jätettävä jopa 30-40 % pelivara lasketun ja todellisen painehäviön suhteen. Painehäviön vaikutuksen arvioiminen vaatii kuitenkin yleensä pitkäaikaista käytännön kokemusta ja todennäköiset painehäviöt arvioidaankin yleensä kokemuksien perusteella.
- 4 Varalämmönvaihdinten tai varatuubiston käyttäminen; Erittäin likaavissa olosuhteissa joudutaan lämmönvaihdin puhdistamaan niin usein, että varavaihtimen tai –tuubiston käyttäminen on kannattavaa.
- 5 Käytetään kahta vaippaa rinnakkain; Käytetään kahta vaippaa 60-70% teholla, jolloin toinen vaippa voidaan ottaa puhdistukseen, kun likaantuminen ylittää tietyn rajan.
- 6 Käytetään tuubiston sisäkappaleita; Tietynlaisten sisäkappaleiden käyttämisen on todettu vähentävän tuubipuolen likaantumista. Sisäkappaleita käytettäessä tuubiston sisäpuolisessa virtauksessa tapahtuu säteen suuntaista sekoittumista tuubien seinämiltä keskelle ja tämä pyörreliike minimoi sakkojen kertymistä tuubien sisäpinnoille.[14]

Joissain tapauksissa on mahdollista käyttää myös jatkuvia puhdistusmenetelmiä, kuten erilaisia harjoja ja palloja. Jatkuvilla puhdistusmenetelmillä voidaan vähentää alasajo kustannuksia sekä säästää energiakustannuksissa.[10]

### 5.3.2 Likainen virta vaippapuolella

Kun likaava virta on lämmönvaihtimen vaippapuolella voidaan käyttää seuraavia eri vaihtoehtoja:

- 1 Käytetään U-tuubistoja ja uivapäätysisiä lämmönvaihdin ratkaisuja; kiinteitä tuubistoja ei juurikaan kannata käyttää, koska tuubistojen ulkopintoja ei tällöin päästä puhdistamaan tehokkaasti. Jos tuubiston sisävirta on puhdas, voidaan U-tuubilämmönvaihtimia käyttää, mutta jos tuubiston sisävirtakin on likaava, voidaan ainoastaan uivapäättyinen lämmönvaihdin puhdistaa riittävän tehokkaasti molemmilta puolilta.
- 2 Käytetään neliö tai käännettyneliö tuubiston layout-mallia; neliö- ja käännettyneliömallit on tehokkaampi puhdistaa kuin kolmiomallit. TEMAn [1] mukaan kannattaa käyttää vähintään 6 mm rakoja tuubien välillä.
- 3 Minimoidaan virtausten ”kuolleet alueet” vaippapuolella oikealla väli- ja ohjauslevyjen suunnittelulla; koska välilevyjen korkeus ja sijoittelu määrittelevät vaippapuolen virtauksen, voidaan niillä vähentää vaippapuolen likaantumista. Väli- ja ohjauslevyjen leikkaus pitäisi olla 20-30%. Leikkausta ei myöskään saisi sijoittaa pystysuoraan, sillä tällöin kerrostumista tapahtuu herkimmin. Vaippapuolella saavutetaan korkein ristivirtaus ja pienimmät vuoto- ja ohivirtaukset, kun väli- ja ohjauslevyjen ja vaipan halkaisijan suhde on 0,3-0,6 välillä.
- 4 Pidetään suuret virtausnopeudet vaippapuolella; myös vaippapuolella korkeat virtausnopeudet vähentävät likaantumista.
- 5 Käytetään suurempia tuubien jakoväliä; myös tuubien suuremmalla jakovälillä voidaan likaantumista vähentää sekä tuubien ulkopinnan puhdistusta helpottaa.
- 6 Tarkistetaan vaippapuolen painehäviö; vaippapuolen likaantumisen edistyessä saattavat edellä mainitut vuotovirtaukset tukkeutua, jolloin myös vaippapuolen painehäviö kasvaa. Tällöin itse päävirtauksen aiheuttama lämmönsiirto saattaa tehostua.
- 7 Käytetään varatuubistoa; erittäin likaavissa olosuhteissa saattaa olla kannattavaa käyttää varatuubistoa, jolloin puhdistusajat pienenevät.[10]

Yksinkertaisia likaantumisen ehkäisykeinoista voidaan mainita seuraavat; pidetään tuubin seinämän lämpötila koksautumisen vaatiman kriittisen lämpötilan alapuolella ja korroosion tehokas ehkäisy, jolloin estetään sakkojen muodostuminen. [15]

Raakaöljyn esilämmityksessä käytetään lämmittävinä aineina kolonnin tuotevirtoja, joista varsinkin raskaat hiilivedyt (pohjaöljy ja raskas kaasuöljy) aiheuttavat vaikeimmat olosuhteet. Korkeissa lämpötiloissa raskaat hiilivedyt aiheuttavat hiiliteräs tuubistojen ja muiden osien korroosiota. Tämä korrosio johtuu rikkiyhdisteiden korroosiota aiheuttavasta vaikutuksesta. Korrosiotuotteet lisäävät likaavien sakkujen muodostumista, yleensä vaippapuolella, hyvin lyhyilläkin ajojaksoilla. Tämän tyyppisiä sakkuja on myös hyvin vaikea puhdistaa tehokkaasti ja usein joudutaankin sakat polttamaan tuubistoista irti. Tämän tyyppistä likaantumista voidaan ehkäistä käyttämällä korroosiota kestäviä tuubimateriaaleja. Nämä materiaalit ovat kuitenkin yleensä melko kalliita, joten halvempi vaihtoehto on pitää virtausnopeudet korkeina tällaisilla vaihtimilla. Muita teknisiä vaihtoehtoja ovat spiraalimaiset välilevyt tai kierteiset tuubirakenteet. Näillä aikaansaadaan pyörteinen virtaus vaippapuolella, joka vähentää vaippapuolen likaantumista. [16]

#### ***5.4 Erikoisrakenteiset lämmönvaihtimet likaavissa olosuhteissa***

Perinteisiä lämmönvaihtinratkaisuja käyttämällä likaavissa olosuhteissa joudutaan usein hyväksymään tietyt toiminta-ajat, joiden jälkeen vaihtimet on otettava puhdistukseen. Tutkittaessa vaikeita likaavia olosuhteita kannattaa joskus käyttää erikoisrakenteisia lämmönvaihtimia. Nämä lämmönvaihtimet tarjoavat parempaa lämmönsiirtotehoa ja vähentävät likaantumista. Myös lämmönvaihtimen koko, paino ja monimutkaisuus pienenevät. Näin ollen lämmönvaihtimen asennuskustannukset pienenevät.

Tässä kappaleessa tutkitaan esimerkin avulla erästä tapausta, jossa on erittäin likaavissa olosuhteissa päädytty käyttämään erikoisrakenteita lämmönvaihtimen tuubi- ja vaippapuolella. Lämmönvaihtimessa lämmitettiin raakaöljyä tyhjötislauksen pohjaöljyllä, jolloin likaantumista tapahtui sekä vaippa- että tuubipuolella. Perinteisen lämmönvaihtinratkaisun tilalle otettiin vaippapuolella käyttöön kierrukkamaiset väliseinät (ABB Lummus Heat Transfer) ja tuubipuolella käytettiin HiTran muottielementtejä (HiTran Thermal Systems Technology). Myös virtaukset vaihdettiin

niin, että viskoosimpi aine virtasi tuubipuolella. Puhdistettaessa voitiin kierrukkamaiset väliseinät helposti irrottaa yhtä helposti kuin tavalliset väliseinäratkaisut. Myös tuubipuolella HiTran elementit voitiin poistaa helposti. Käyttämällä näitä erikoisrakenteita saatiin aikaan huomattavia käytännön etuja verrattuna perinteisiin lämmönvaihdinratkaisuihin;

- tuubien sisäpuoliset lämmönsiirtofilmin kertoimet nousivat 5-7 kertaa suuremmiksi,
- tuubien ulkopuoliset lämmönsiirtofilmin kertoimet nousivat 10%,
- vähemmän tuubien läpikulkuja,
- tehokkaampi käytettävissä olevan painehäviön hyödyntäminen,
- pienempi vaippapuolen painehäviö,
- vakaat käyntiolosuhteet alasajovaiheessa,
- ”kuolleiden alueiden” eliminointi vaippapuolella,
- lämmönsiirtopinta-alan pieneneminen  $502 \text{ m}^2 \rightarrow 236 \text{ m}^2$ .

Kokonaiskustannukset laskivat myös huomattavasti (lämmönvaihtimen hinta 140 000\$  $\rightarrow$  12 000 \$), mutta lopullisia kustannuksia voidaan arvioida todellisuudessa vasta pitempien käyntijaksojen jälkeen.[17]

## 6 RAAKAÖLJYN TISLAUKSEN KORROOSIO-ONGELMAT

Raakaöljyn tislauksen korroosio-ongelmia on tutkittu hyvinkin tarkasti ja viimeisen viidenkymmenen vuoden aikana korroosionestoon on käytetty mm. seuraavia menetelmiä:

1. suolanpoiston ja lipeänsyötön yhdistelmä, jolla vähennetään tislauskolonnin ylimenon kloridipitoisuutta,
2. käytetään korroosionestoaineita, jotka muodostavat suojaavan kalvon korroosioherkille alueille,
3. pH:n säätö erilaisilla neutraloivilla aineilla,
4. erilaisten seosmateriaalien käyttö herkissä laitteissa.[18]

Jokainen edellä mainittu tekniikka on auttanut, mutta monessa tapauksessa korroosio-ongelmat ovat jatkuneet, aiheuttaen jalostamoille kohonneita käyttökustannuksia ja odottamattomia lisäinvestointeja. Korroosio-ongelmia esiintyy sekä kolonnien huipulla ja ylimenosysteemeissä että kiertopalautuksissa. Usein korroosio-ongelmat johtuvat tilanteeseen vääränlaisesta korroosionestosta ja siksi on tärkeää ymmärtää erilaiset korroosiolähteiden syyt ja alkuperät.

Perinteisen korroosio-ongelman muodostavat ylimenosysteemien osat, joissa tapahtuu kaasumaisten ylimenotuotteiden nesteytyminen ja varsinkin vesipitoisten kaasujen reagoiminen kloridien kanssa muodostaen suolahappoa. Kuitenkin myös ns. kuivat alueet kärsivät korroosio-ongelmista ja niinpä esim. BetzDearborn [17] on tutkinut neutraloinnin reaktioita. Näillä kuivilla alueilla on tutkittu syöpymien aiheuttamia kuoppia ja kuoppien pohjalta löytyneistä sakoista on löydetty kloridisuoloja. Nämä suolat ovat pääasiallisia korroosion aiheuttajia. Sakoista on löydetty myös amiineja, jotka ovat osoittautuneet korroosiota aiheuttaviksi eri teräs-seoksille. Tutkittaessa kuoppien pohjilta löytyneitä sakkoja todettiin että kuopan pohjalla on klorideja, jotka toimivat todennäköisenä korroosion aiheuttajina ja amiinit toimivat eräänlaisina suolojen kantajina.[18]

Suolojen muodostuminen tapahtuu prosessin tietyissä olosuhteissa, kuten korkeat pitoisuudet joko happoa (HCl) tai epäjaloa metallia, oikeat lämpötilat (lähellä veden kastepistettä) ja paineet. Nämä suolat aiheuttavat tietyillä lämpötiloilla korroosiota ja lämmönsiirtopintojen likaantumista.

### **6.1 Korroosio-ongelmat nafteenihappo- ja rikkipitoisilla syötöillä**

Raakaöljyjen laatujen muuttuessa ovat syötöiksi tulleet nafteenihappopitoiset raakaöljyt ja runsaasti rikkiä sisältävät raakaöljyt. Tällaisten syöttöjen korroosio-ongelmat ovat huomattavasti suurempia kuin perinteisten vähärikkisten raakaöljyjen kohdalla. Kun rikki on suurin epäpuhtaus, voidaan korroosion suuruus ennustaa ns.



McConomy-käyrien avulla. Myös käyttöolosuhteita voidaan ennustaa McConomy-käyrien avulla. Rikin eri yhdisteistä (merkaptaanit, disulfaatit, thiofeenit, polysulfaatit, alkuainerikki ja H<sub>2</sub>S) kokonaisrikkiä tärkeämpi tekijä on eri yhdisteiden taipumus muodostaa rikkivetyä. Joissain olosuhteissa rikkivedyn on huomattu pienentävän nafteenihappokorroosiota.[18]

Nafteenihappopitoisille raakaöljylaaduille korroosion ennustaminen on huomattavasti vaikeampaa. Nafteenihappopitoisilla raakaöljyillä on löydetty hyvin erilaisia korroosio-ongelmia, vaikka raakaöljyn koostumukset muistuttaisivatkin muutoin toisiaan. Nafteenihappokorroosio on luonteeltaan hyvin erilaista kuin rikkikorroosio ja nafteenihappo on erittäin syövyttävä suurilla virtausnopeuksilla tislaukolonnin eri osissa. Toisin kuin rikki, nafteenihappo ei muodosta osittain suojaavaa pintafilmiä korroosioalueille. Nafteenihappo aiheuttaakin korroosio-ongelmia myös seosmetalleissa, jotka kestävät hyvin rikkikorroosiota (12Cr, 316SS ja 317SS).[19]

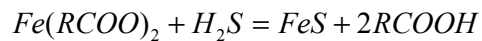
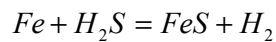
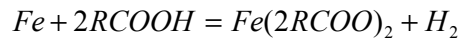
Nafteenihapot ovat orgaanisia happoja, joita esiintyy eri raakaöljylaaduissa. Nafteenihappojen yleinen kaava on  $R(CH_2)_nCOOH$ , missä R on syklopentaani ja n on tyypillisesti korkeampi kuin 12. Nafteenihappopitoisuus ilmaistaan yleensä TAN-luvulla (Total Acid Number) tai neut-luvulla (neutralisation number). TAN-luku määritetään titraamalla gramma raakaöljyä riittävällä määrällä kalium-hydroksidia ja ilmoitetaan pitoisuuksina mg KOH / g öljyä. Peukalosääntönä voidaan sanoa että jos TAN-luku on suurempi kuin 0,5 on raakaöljy korroosiota aiheuttavaa.[19]

Nafteenihappo aiheuttaa korroosiota lähinnä lämpötila-alueella 230 - 400°C. Alle 230 °C lämpötiloissa ei ole korroosiota juuri havaittu. Korroosionopeus saavuttaa maksimin noin 370°C lämpötilassa, mutta yli 400 °C lämpötilassa ei ole korroosio-ongelmia juuri havaittu. Tämä johtuu todennäköisesti siitä että näissä lämpötiloissa nafteenihapot alkavat hajota.[20]

Nafteenihappojen korroosiota ennustettaessa myös virtaavan aineen fysikaaliset ominaisuudet tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi konsentraatio ja virtausnopeus vaikuttavat korroosion kulkuun. Kulumispinnat voivat olla yleisesti ohentuneita tai pinnoilla voi esiintyä kuoppia. Kuopat ovat yleensä teräväreunaisia tai puolipallon

muotoisia ja niiden ympärillä on tavallisesti tumma rikin muodostama pintafilmi. Kolmas korroosiotapa on yleinen eroosikorrosio, jolloin varsinkin virtausnopeudella on merkittävä vaikutus.[20]

Korroosion suuruuteen vaikuttaa yleisesti hyvin paljon rikin ja nafteenihappojen välinen vuorovaikutus, sillä rikkikorrosio ja nafteenihappokorroosio ovat keskenään kilpailevia seuraavalla tavalla:



Ensimmäisessä kaavassa on esitetty nafteenihappokorroosio raudalle ja seuraavassa kaavassa vastaavasti rikkivetykorrosio raudalle. Tärkeä ero näiden kahden eri korroosion välillä on se, että korroosiotuotteista rautanafteeni on hyvin liukoinen öljyyn, kun rautasulfidi taas yleensä muodostaa suojaavan pintafilmin kuluvalle pinnalle. Viimeisestä kaavasta nähdään, että rikkivety reagoi taas liukoisen rautanafteenin kanssa muodostaen nafteenihappoa.[20]

## 6.2 Korroosionestoaineita nafteenihappopitoisille syötöille

Korroosiota voidaan ehkäistä tai vähentää seuraavilla keinoilla:

- Laimentaminen; syöttölaatuja tutkimalla voidaan päätellä millä laaduilla on korkea TAN-luku ja kun näitä laatuja laimennetaan matala TAN-lukuisilla laaduilla, ei korroosiota esiinny niin voimakkaana.
- Korroosionestoaineet; korroosionestoaineet toimivat jos niiden toimintaa seurataan tarkasti ja jos korroosioalueet tunnetaan tarkasti. Kuitenkin nafteenihappokorroosiota ei vielä tunneta riittävän hyvin, joten sitä vastaan ei toistaiseksi ole kehitetty tehokkaita korroosionestoaineita.

- Materiaalin valinta; yleisesti käytetään hiiliterästä, mutta yli 0,5 TAN-luvuilla ei hiiliterästä voi juuri käyttää. Materiaalit joissa esiintyy korkeita kromi- ja molybdeenipitoisuuksia ovat hyvin korroosiota kestäviä, mutta kalliita materiaaleja.
- Neutralointi; nafteenihapon neutralointia lipeällä käytetään joissakin jalostamoissa, mutta lipeä aiheuttaa muita ongelmia, kuten rakorossoiota hitsausaumoissa ja lipeän hajoamista muiksi haitallisiksi tuotteiksi. Liian suuri lipeäsyöttö voi aiheuttaa myös natriumin kulkeutumista pohjaöljyn mukana jatkoyksiköihin, missä se aiheuttaa ongelmia, esim. natriumin määrä polttoöljyssä ylittää vaaditut rajat.

Korroosionestokeinon valinta ei ole helppo tehtävä ja se vaatii yleensä pitkäaikaista syöttölaatuja analysoimista ja tutkimista. Toistaiseksi ei nafteenihappojen korroosiovaikutuksia ole vielä riittävästi tutkittu, joten korroosiovaikutuksia on vaikea etukäteen arvioida tai estää. Voidaan kuitenkin todeta, että tärkeimmät korroosion aiheuttajat raakaöljyn tislauksyksiköissä ovat: nafteenihappojen pitoisuus ja jakautuminen eri tisleisiin, rikkivedyn ja lämpötilan yhteisvaikutukset, metallin pintalämpötila ja rakennemateriaalit.[19]

### **6.3 Ylimenosysteemien korroosio-ongelmat**

Raakaöljyn tislauksen yleisin korroosio-ongelma on suolahapon aiheuttamat syöpymät ja tukkeumat. Suolahapon aiheuttama korroosio on vanhin ja parhaiten tunnettu korroosio-ongelma, joka kohdistuu lähinnä Raakaöljyn tislauksyksikön ylimenovaihtimien tuubistoihin sekä tislaukskolonnin ylimpiin pohjiin. Myös ylimenosysteemien mittauksissa, ulosottoyhteyksissä ja suuttimissa suolahappo aiheuttaa tukkeumia ja kulumista. Suolahapon ansiosta ylimenosysteemeihin kertyy korroosiotuotteita, jotka sisältävät kloridisuoloja, rautasulfideja ja ammoniumbisulfideja.[21]

### 6.3.1 Raakaöljyn suolanpoiston yhteys korroosio-ongelmiin

Suolahapon ja kloridisuolojen alkulähteenä toimii raakaöljyn mukana tulevat suolaiset vedet ja kiteiset suolat. Suurin osa suolaisen veden mukana tulevista suoloista on natriumkloridia ( $\text{NaCl}$ ), mutta mukana on myös huomattavia pitoisuuksia muita suoloja, kuten magnesiumkloridia ( $\text{MgCl}_2$ ) ja kalsiumkloridia ( $\text{CaCl}_2$ ). Sopivassa lämpötilassa ja oikeissa kosteusolosuhteissa nämä suolat muodostavat haitallista suolahappoa. Näistä suoloista  $\text{NaCl}$  on kaikkein lämmönkestävin ja  $\text{MgCl}_2$  kestää lämpöä vähiten. Tyypillisissä raakaöljyn tislauksen uunien olosuhteissa ( $>370\text{ °C}$ )  $\text{MgCl}_2$  hajoaa lähes täysin, kun taas suurin osa  $\text{NaCl}$ :stä säilyy muuttumattomana samoissa olosuhteissa.[21]

Tehokkain tapa vähentää suolahapon aiheuttamia korroosio-ongelmia on poistaa suolat jo ennen tislausta ja tämä tapahtuu yleensä raakaöljyn suolanpoistajilla. Normaali yksivaiheinen suolanpoisto poistaa noin 90 % raakaöljyn suoloista ja kaksivaiheinen suolanpoisto vastaavasti 99 % suoloista. Nämä väittämät johtavat harhauttaviin luuloihin siitä, että kaksivaiheinen suolanpoistaja poistaa myös korroosio-ongelmat myöhemmissä tislauksenvaiheissa. Tosiasiassa on kuitenkin paljon vaikeampaa poistaa raakaöljystä  $\text{MgCl}_2$  kuin  $\text{NaCl}$ . Koska  $\text{MgCl}_2$  hajoaa vielä paljon  $\text{NaCl}$ :ia helpommin, muodostuu ongelmia myöhemmissä jalostusvaiheissa. Esimerkiksi eräässä yksivaiheisessa suolanpoistajassa havaittiin seuraavia suolanpoisto tuloksia:

- 90 %  $\text{NaCl}$ :stä poistui
- 50 %  $\text{CaCl}_2$ :stä poistui
- vain 40 %  $\text{MgCl}_2$ :stä poistui.[21]

Kokemus on myös osoittanut, että suolanpoiston tehokkuus vaihtelee myös hyvin paljon, jopa 65 – 95 %, riippuen raakaöljysyötön laaduista ja yleensä suolanpoiston säätötavoista. Tavallisimpia ongelmia suolanpoistajien ajotavoissa ja säädöissä ovat:

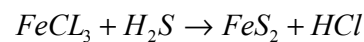
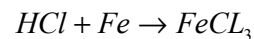
- pinnansäätöongelmat, jotka johtuvat esim. tukkeutuneista pinnanmittauksista
- vääränlainen apuaineiden annostelu tai jopa vääränlaiset lisäaineet sekä huono pH:n säätö

- suolanpoistoveden huono laatu
- sekoitusventtiilin väärä paine-ero
- liian pieni suolanpoistoveden määrä
- suolanpoistimessa tapahtuva höyrystyminen
- huono suolanpoiston paineen säätö
- kiintoainesakkojen kerääntyminen suolanpoistimeen.[21]

Useimmat suolanpoiston ongelmat johtuvat kuitenkin huonosta apuaineiden säädöstä ja suolanpoistimen väärästä käytöstä. Jos suolanpoiston tehokkuus kuitenkin vaihtelee välillä 0 – 95 %, ollen keskimäärin 85 %, aiheuttavat suolat myöhemmissä jalostusvaiheissa korroosio-ongelmia, syötettävistä korroosionestoaineista huolimatta.[21]

#### 6.4 ***Ylimenosysteemien korroosionestokeinoja***

Ylimenosysteemin tehokas pH:n säätö on eräs suolahappokorroosion tehokas estokeino. PH:n säätöön on olemassa useita tehokkaita kemikaaleja, joista yleisimmin on käytössä lipeä (NaOH). Vaikka ylimenon korroosion aiheuttaja usein on suolahappo (HCl), korroosiotuotteena ovat rautasulfidit ei rautakloridit. Tämä johtuu siitä, että ylimenotuotteessa on ylen määrin rikkivetyä (H<sub>2</sub>S). Näissä olosuhteissa suolahappo, rauta ja rikkivety reagoivat seuraavasti:



Reaktioissa suolahappo (HCl) uusiutuu rikkivedyn (H<sub>2</sub>S) ansiosta ja tällöin suolahappo toimii kuten katalyytti rautasulfidin muodostuksessa. Ylimenojärjestelmien suolahappo ei kuitenkaan ole korroosiota aiheuttavaa kaasua sellaisenaan, vaan se vaatii veden läsnäoloa, jolloin suolahappo kondensoituu ja aiheuttaa korroosiota ylimenosysteemien pinnoilla.

Tällöin pitää ottaa huomioon seuraavia asioita:

- veden kastepiste kohoaa, kun suolahappoa on läsnä
- veden pH on välillä 1-4, jos ylimenosysteemiin ei syötetä neutraloivaa kemikaalia
- vaikka ylimenon lämpötila olisi yli veden kastepisteen, voi kondensoitumista tapahtua, koska lämmönsiirtopintojen lämpötila voi paikallisesti olla huomattavastikin alempi. Tällöin voi ei toivottua suolahapon kondensoitumista tapahtua.[21]

Jotta edellä mainittua korroosiotapahtumaa ei pääsisi syntymään, pitää ylimenosysteemeihin syöttää jotain apuainetta, joka estää korroosiotapahtuman. Eri vaihtoehdoista mainittakoon seuraavat:

- Neutraloivaa amiinia jolla on korkea kiehumispiste.
- Filminmuodostaja inhibiittejä
- Lipeää, jolla säädetään pH:ta.

Lisäksi korroosionestoaineessa pitää olla tietynlainen molekyylirakenne, jotta se tarttuu hyvin metallipinnoille. Tämä tarkoittaa sitä, että molekyylirakenteessa pitää olla oikean kokoinen hydroksyyliiryhmä ja ns. radikaalisidoksia oikeissa asennoissa. Näissä radikaalisidoksissa tulee olla tyypeä, happea, rikkiä, fosfaattia tai muuta vastaavaa elementtiä, jotta aine muodostaisi halutun suojaavan pintakalvon ylimenosysteemien metallipinnoille. Lisäksi korroosionestoaineen tulee olla sekä kemiallisesti että termodynaamisesti tarpeeksi stabiilia. Aine ei myöskään saa aiheuttaa myrkyllisiä sivuvaikutuksia tai hajuhaittoja myöhemmissä vaiheissa.[22]

Syötettäessä jotain raskasta amiinia pitää kuitenkin muistaa, että amiinisuolat ovat niin raskaita, että ne voivat härmistyä tislaukskolonnin ylimmille pohjille. Nämä raskaat suolat ovat luonteeltaan kuivaavia ja ne voivat tällöin adsorboida kosteutta tislaukskaasuista muodostaen kerrostumia, joiden alla voi tapahtua kloridisuolojen korroosiota. Varsinkin välipohjien paluukaukaloiden alueet ovat erittäin alttiita tämän kaltaiselle korroosiolle. Useimmat amiinit ovat myös liian raskaita, jotta ne poistuisivat kolonnien huipuilta ja tällöin amiinien aiheuttamia sakkakerrostumia voikin löytyä yllättäen kolonnin keskitisleidien ulosottoyhteistä ja jopa lopputuotteista. Esimerkiksi tutkittaessa petrolin ulosottoyhteistä löydettyä sakkaa, oli sakasta 85 % kuivia

amiinisuoloja ja 15 % rautaklorideja. Jotta tällaisia amiinisuoloja ei pääsisi kertymään pitää neutraloivien apuaineiden syöttöä seurata jatkuvasti ja annostelu pitää olla oikealla tasolla. Tehokkain tapa pitää amiini- ja kloridisuolojen syntyminen minimissään on kuitenkin suolojen poisto jo prosessin alkuvaiheessa eli suolanpoistajalla. Tehokas suolanpoisto onkin kaikkein halvin ja yksinkertaisin tapa hallita raakaöljyn tislausyksikön ylimenosteemien korroosiota.[21]

## **7 RAAKAÖLJYN SUOLANPOISTON ONGELMIA**

Kuten aiemmin on todettu on raakaöljyn suolanpoistimen tarkoitus poistaa raakaöljystä suoloja ja kiintoainetta. Lisäksi raakaöljyn seassa on yleensä hieman suolavettä, jota siihen on sekoittunut jo pumpattaessa raakaöljyä maaperästä. Optimi suolanpoistolämpötila on Marscon [23] mukaan 120 - 150 °C ja paine on pidettävä raakaöljyn höyryn paineen yläpuolella eli n. 9810 kPa. Suolanpoistajilla raakaöljyn sekaan syötetään vettä ja eräitä ns. apuaineita ja suolanpoistokemikaaleja. Tämän jälkeen raakaöljy-vesisyöttö sekoitetaan erityisellä paine-eroventtiilillä sekaisin ja johdetaan suolanpoistajaan, jossa on korkea sähkökenttä. Sähkökentän vaikutuksesta paremmin sähköä johtava vesi erottuu raakaöljystä, muodostaen vesipisaroita ja laskeutuu raskaampana suolanpoistajan pohjalle. Veden sekaan raakaöljystä liukenee suoloja ja muita sakkoja. Raakaöljyn mukana kulkeutuvista yhdisteistä voidaan suolanpoistolla poistaa taulukossa III esitettäviä aineita.

Taulukko III. Suolanpoistossa raakaöljystä poistettavissa olevia yhdisteitä ja epäpuhtauksia.

Suolat	Vesiliukoiset alkalimetallien suolat Vesiliukoiset alkalimetallien karbonaatit Vesiliukoiset alkalimetallien sulfaattit Vesiliukoiset pieni moolimassaiset saippuat
Hapot	Raskasmetallien kloridit
Emäkset	Vesiliukoiset hydroksidit
Sedimentit	Suurikokoiset ei-vesiliukoiset epäorgaaniset ainekset
Suodatettavat sakat	Ei-vesiliukoiset alkalimetallien karbonaatit Ei-vesiliukoiset alkalimetallien sulfaattit Ei-vesiliukoiset metallien sulfaattit Ei-vesiliukoiset metallien oksidit Ei-vesiliukoiset metallien sulfaattit Piioksidit ja muut inertit materialit

Suolaveden mukana on raakaöljyyn lukuisia muitakin yhdisteitä kuin suoloja ja nämä on esitetty taulukossa IV.

Taulukko IV Suolavedessä olevia yhdisteitä ja epäpuhtauksia, tutkittaessa raakaöljyn suolanpoistoa.

<b>Anionit</b>	<b>Pitoisuus [mg/l]</b>
Bikarbonaatit	118,0
Boori	2704,5
Karbonaatit	0,0
<u>Kloori</u>	<u>169 000,0</u>
Fosfaatti	72,1
sulfaatti	146,0
<b>Kationit</b>	<b>Pitoisuus [mg/l]</b>
Alumiini	4,0
Barium	9,0
<u>Kalsium</u>	<u>16 410,0</u>
Kromi	0,0
Kupari	11,4
Rauta	0,0
Lyijy	0,0
Litium	50,4
Magnesium	1698,0
Mangaani	1,1
Nikkeli	49,3
Potassium	5263,0
Piidioksidi	0,0
<u>Natrium</u>	<u>88 290,0</u>
Strontium	1271,0
Vanadiini	0,0



Taulukosta III ja IV havaitaan, että varsinaisen suolanpoiston ohessa suolanpoistajasta poistuu myös lukuisia muita yhdisteitä ja alkuaineita. Taulukossa IV suuret ainepitoisuudet on alleviivattu havainnollisuuden vuoksi.[24]

Lisäksi raakaöljyn mukana kulkee hyvin paljon kiintoainetta, joka aiheuttaa myöhemmissä vaiheissa likaantumista, kuohuntaa, eroosiota, korroosiota, katalyyttien tukkeutumista, lopputuotteiden likaantumista ja jätevesien öljy-kiintoainelikaantumista. Tämän takia tulisi kiintoaineet poistaa jo prosessien alkuvaiheessa eli suolanpoistajalla. Kiintoaine voidaan Schantzin [25] mukaan jakaa eri luokkiin seuraavasti:

- Rautasulfidit; suurin suodatettavien kiintoaineiden luokka. Rautasulfideja tulee sekä kemiallisten prosessien muodostamana että korroosiotuotteina.
- Piidioksidi; pienien hiekkajyvästen muodossa. Piidioksidia on lähinnä raakaöljyissä, jotka tulevat hiekkamaa-alueilta. Piidioksidihiuksat ovat kuitenkin yleensä melko suuria, joten ne on suhteellisen helppo laskeuttaa raakaöljysäiliöissä tai suolanpoistajilla. Tällöin laskeutuneet sakat tulee kuitenkin poistaa prosessista eikä kierrättää eteenpäin.
- Hilsettä; kalsium- ja magnesiumkarbonaattien sekä kalsium- ja bariumsulfaatteja. Nämä sulfaatit muodostuvat yleensä kemiallisissa prosesseissa ja sekoitettaessa raakaöljyä, jotka sisältävät yhteen sopimattomia vesiä.
- Savea; raakaöljyn seassa on usein liunneena hieman maa-ainesta, josta raakaöljy on lähtöisin.
- Asfalteeniyhdisteitä; muodostuvat sekoitettaessa eri raakaöljyalaatua.
- Tuhkaa; muodostunut ajan mittaan luonnon kiertokulussa.
- Koksia ja katalyyttipartikkeleita; hylkysyöttöjen seassa voi olla erilaisien häiriöiden yhteydestä erilaisia kiintoaineita kulkeutunut myös hylkysäiliöihin.
- Muita pieniä kiintoaineita; kuparia, kromia, booria ja vanadiinia.

Yleensä suurin osa raakaöljyn kiintoaineista laskeutuu jo raakaöljyjen varastosäiliöissä, joista ne puhdistetaan tietyin väliajoin. Suolanpoistajaan asti kulkeutuu kuitenkin noin 0,05-0,1 % kiintoaineesta sekä pieniä pitoisuuksia (120-150 ppm) suodatettavia partikkeleita.[25]

Jotta nämä kiintoaineet saataisiin poistettua raakaöljystä veteen, on suolanpoistajaan syöttävien apukemikaalien oltava tarpeeksi vesiliukoisia, jotta partikkelit voisivat saostua veden mukaan. Kuitenkin on muistettava ettei raakaöljyn haluta samanaikaisesti kulkeutuvan veden mukaan. Tämän takia on oikea apuaineiden annostelu ja sekä vesien että raakaöljyjen analysointi tärkeää. Vesistä ja raakaöljyistä on perinteisesti tehty vesi-, kiintoaine- ja suolamäärytyksien perusteella erilaisia tasapainomäärytyksiä. Pesuveden puhtaus on myös eräs tärkeimmistä suolanpoistoon vaikuttavista tekijöistä.[26]

Kiintoaineet voivat myös kasautua suolanpoistajan pohjalle, jolloin suolanpoistajan aktiivinen tilavuus ja näin ollen mm. viipymääjat pienenevät. Normaali käyntijakson aikana voi, 2 tai 3 vuoden jälkeen, suolanpoistajan pohjalta löytyä jopa 0,9-1,5 m korkea kiintoainekerrostuma. Tällöin yleensä suolanpoiston tehokkuus kärsii huomattavasti ja vaarana on, että vesien mukana kulkee raakaöljyä tai suoloja kulkeutuu raakaöljyjen seassa myöhempiin prosessien vaiheisiin muodostaen siellä mm. korroosio-ongelmia. Tämän takia tulisi suolanpoistajalle kehittää tehokkaita suolanpoisto mekanismeja.[25, 27]

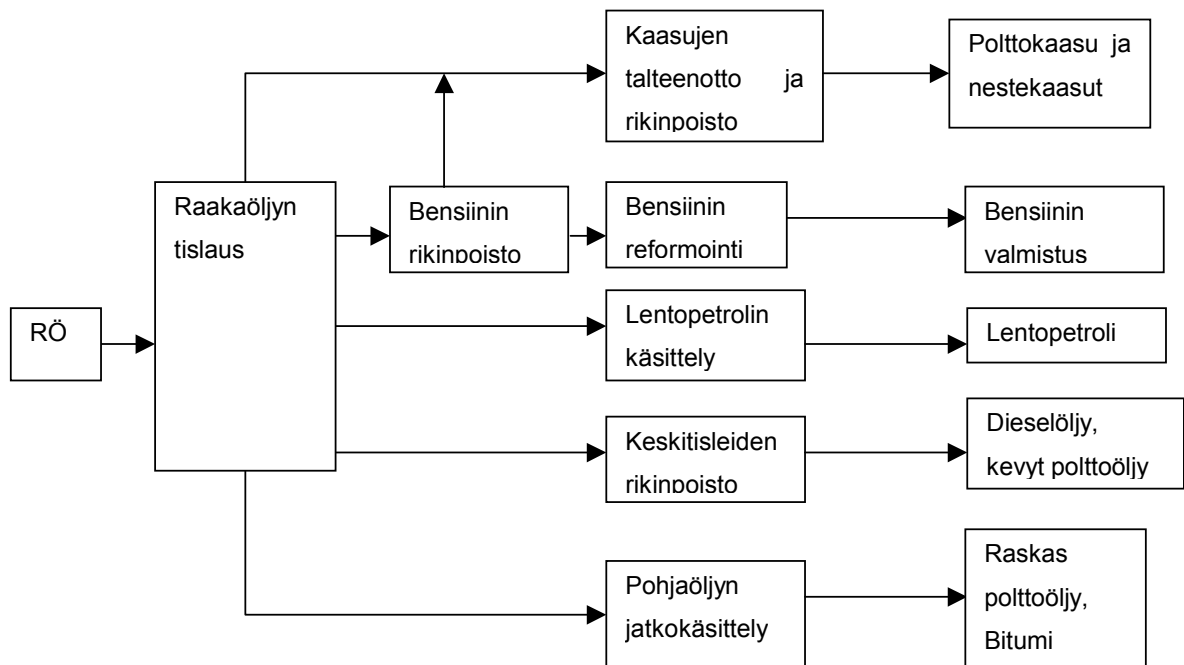
Suolanpoistajien rajapinnan säätö on myös eräs suolanpoiston tärkeimpiä operointisuureita, koska rajapinnalla tapahtuu varsinainen suolojen ja kiintoaineiden liukeneminen veteen. Perinteisesti on käytetty pinnansäätöön näkölaseja, erilaisia kelluvia ilmaisimia, paine-ero ja kapasiteettimittauksia. Yleensä suolanpoiston rajapinnan säätö voi olla harhaanjohtavaa tai jopa erheellistä. Vesi-raakaöljy-emulsion mittaaminen on erittäin hankala tehtävä, koska selvää rajapintaa ei monessa tapauksessa ole olemassa ja prosessi on hyvin herkkä erilaisille virtauksien, tiheyksien ja paineen muutoksille. Suolanpoistajan rajapinnalle saattaa myös muodostua ns. kiinteä emulsiorajapinta, huolimatta syötettävistä emulsionestoaineista ja tällöin pinnansäätö on huomattavan hankalaa. Kiinteän rajapinnan muodostuessa on myös vaarana, että vettä kulkeutuu öljyn mukana, koska kiinteäemulsio on veden ja öljyn muodostama tiukka sidos, joka ei hajoa vielä suolanpoiston olosuhteissa. Kiinteä emulsiorajapinta muodostuu Scherrerin [26] mukaan käytettäessä asfalteenipitoisia raakaöljyjä. Lisäksi hylkisyötöt lisäävät kiinteä rajapinnan muodostumismahdollisuutta. Asfalteeniyhdisteitä voi lisäksi

muodostua sekoittamalla yhteen sopimattomia raakaöljylaatuja. Asfalteenien muodostumista voidaan vähentää pitämällä pesuveden pH happaman puolella ( $\text{pH} < 6,5$ ). Jos suolanpoistajalla on lisäksi ns. vapaata lipeää, voi suolanpoistajan rajapinnalle muodostua asfaateenyhdisteistä ja lipeästä natriumnafteeneja eli saippuaa.[28,29]

## KOKEELLINEN OSA

### 8 Raakaöljyn tislauksyksikkö

Raakaöljyn tislauksyksikkö (RT3) sijaitsee Fortum Oil and Gas:in Porvoon Kilpilahden tuotantolaitoksilla tuotantolinja 3:lla. Raakaöljyn tislauksyksikössä erotetaan tislaamalla raakaöljystä eri jakeet haluttuina tuotelaatuina ja nämä jakeet syötetään edelleen muihin yksiköihin jatkokäsittelyä varten. Raakaöljyn tislauksyksikkö on varsinaisen öljynjalostuksen ensimmäinen yksikkö ja siitä saatuja jakeita käsitellään jatkojalostusyksiköissä kuvan 10 mukaan.



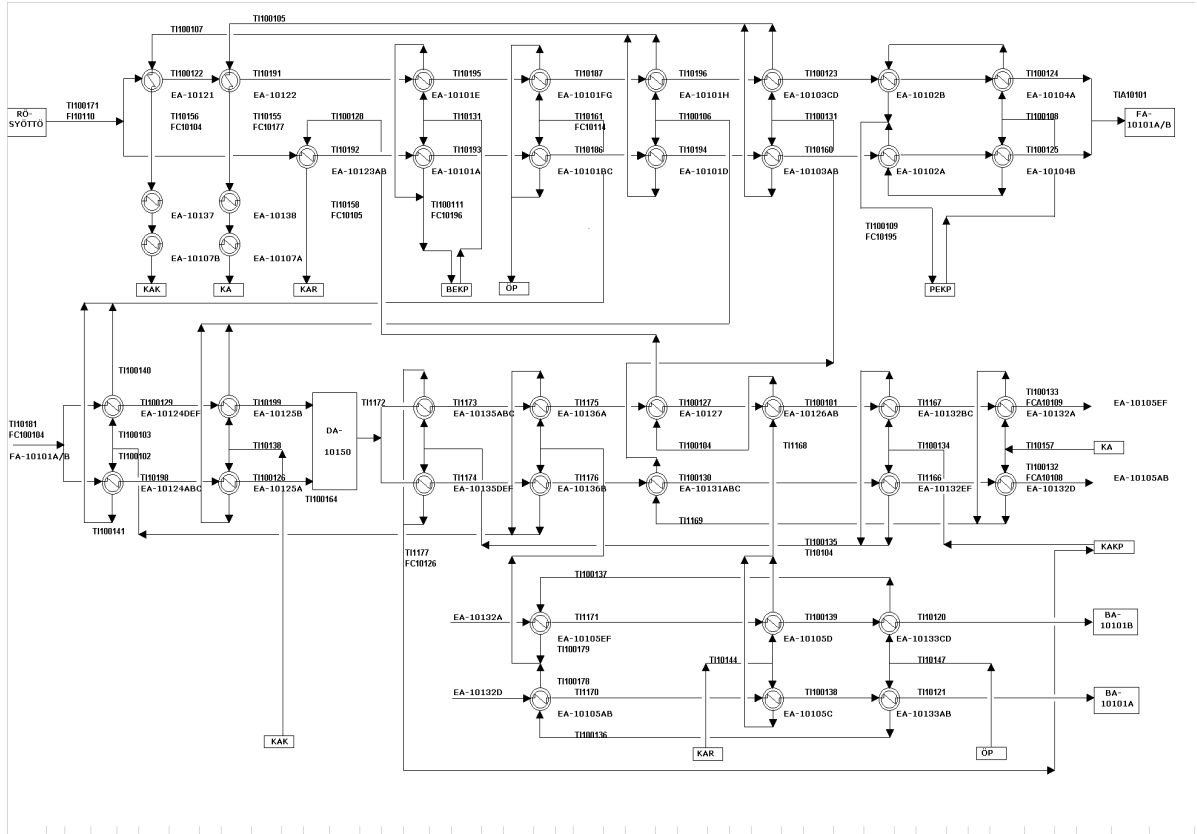
Kuva 10. Raakaöljyn tislauksen ja jatkojalostusyksiköiden periaatekaavio.

Itse raakaöljyn tislauksyksikkö voidaan jakaa seuraaviin osiin:

- raakaöljyn esilämmitys
- suolanpoisto
- esitislauk
- uunit
- tislauk.

Raakaöljyn esilämmitys jaetaan edelleen suolanpoistoa (FA-10101 A/B) edeltävään, suolanpoiston ja esitislauksen (DA-10150) väliseen sekä esitislauksen ja uunien (BA-10101 A/B) välisiin osiin. Raakaöljyn esitislauksessa syötöstä erotetaan kevyt bensiinijae, jolloin raakaöljyn syöttömääriä voidaan nostaa. Raakaöljyn esilämmitys koostuu 58:sta eri lämmönvaihtimesta, jotka ovat pääasiassa TEMA:n [1] tyyppiä BES. Raakaöljyn esilämmityksessä yksikköön tuleva syöttö lämmitetään yksikön tuotevirroilla ja kiertopalautuksilla noin 250 °C lämpötilaan. Tämän jälkeen raakaöljy johdetaan uuneille, joissa syöttö lämmitetään edelleen noin 370-375 °C lämpötilaan. Uunien jälkeen syöttö johdetaan suoratislauskolonniin (DA-10101), jossa eri tuotteet tislataan erilleen. [30]

Yhtenä tämän työn kokeellisen osan tarkoituksena oli tutkia raakaöljyn esilämmityksen lämmönvaihtimien toimintaa ja likaantumista. Työssä puhutaan usein lämmönvaihtimista pareina tai ryhmistä. Rinnakkain ja sarjassa olevat lämmönvaihtimet on erotettu siten, että rinnakkain olevat esitetään / -viivan avulla esim. EA-10136 A/B ja sarjassa olevat kirjoitetaan yhteen esim. EA-10133 CD. Työssä käytettiin laskentaohjelmaa, johon haettiin automaatiojärjestelmän mittaustietoja esilämmityksen eri kohdista. Raakaöljyn esilämmityksen lämmönvaihtimet ja lämmönsiirtolaskennassa käytetyt mittalaitteet ovat esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Raakaöljyn tislauksen esilämmityksen lämmönvaihtimet ja mittalaitteet.

Yksikkö on suunniteltu venäläiselle raakaöljysyötölle. Tämän lisäksi yksikön kapasiteetti on tarkastettu Ekofisk-raakaöljysyötöllä. Yksikön nimellinen syöttömäärä venäläiselle raakaöljylle on 1100 t/h ja Ekofisk-raakaöljylle 850 t/h. Yksikön syöttötason määrää pääsääntöisesti yksikön tislensaanto, jonka mukaan raakaöljystä saadaan eri tuotelaatuja. Raakaöljyn tislauksyksiköstä saadaan tuotteina :

- Lauhtumattomia kaasuja
- Stabiloimatonta esitislauksen- ja suoratislauksenbenssiiniä (BE)
- Petrolia (PE)
- Kevyttä kaasuöljyä (KAK)
- Kaasuöljyä (KA)
- Raskasta kaasuöljyä (KAR)
- Pohjaöljyä (ÖP)

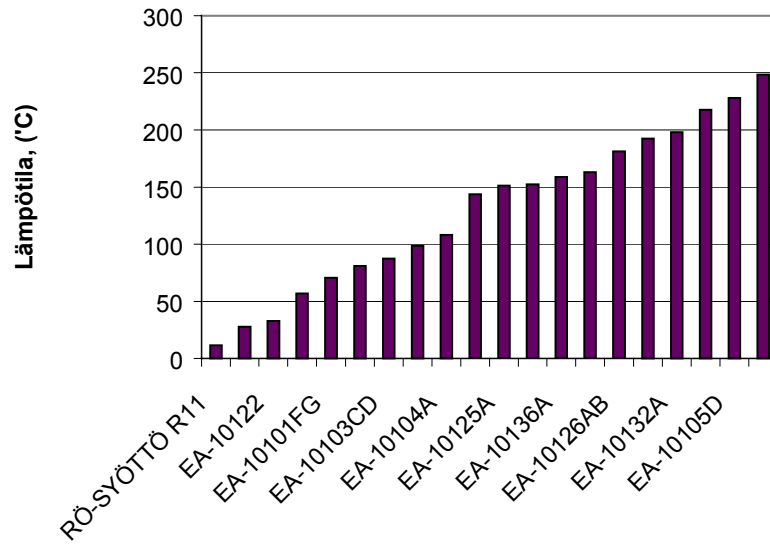
Lisäksi on olemassa mahdollisuus tuottaa ns. Odoker –laatua, joka on petrolin kiertopalautuksesta saatavaa, lähinnä petroliluokan tuotetta. Eri tuotteiden määrät, tiheydet ja lämpötilat ovat esitetty taulukossa V. [30]

Taulukko V. Raakaöljyn tislauksyksikön eri tuotteiden virtausmäärät, tiheydet ja lämpötilat.

	Virtausmäärä	Tiheys	Lämpötila
	[t/h]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[°C]
Kaasut	0,2...2,5	Vaihtelee	30
Bensiini	62+148	650...720	30...35
Petroli	66...100	800	40
Kevyt kaasuöljy	209...250	830	45
Kaasuöljy	80...200	860	45
Raskas kaasuöljy	130...140	880...900	45
Pohjaöljy	300...400	930...990	85

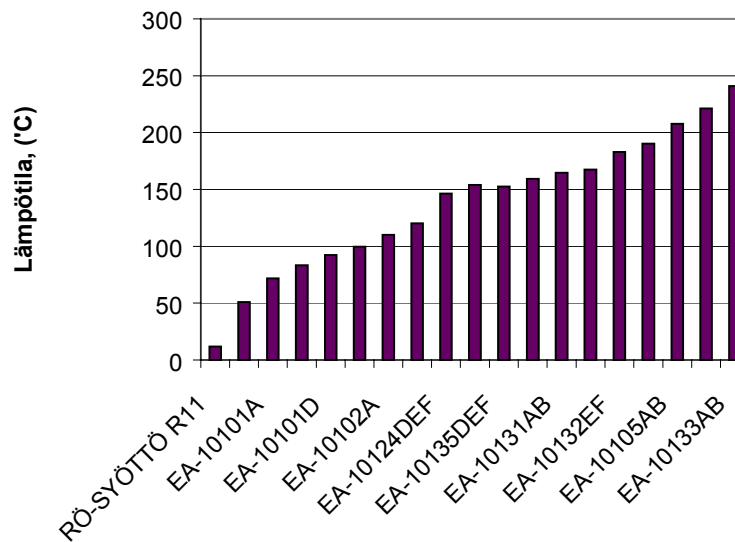
Määrät ja tiheydet ovat keskimääräisiä ajoarvoja ja saattavat poiketa tietyillä ajomalleilla hyvinkin paljon toisistaan. Lämpötila on tuotteen loppulämpötila, jolloin tuote on luovuttanut lämpöä raakaöljyn esilämmönvaihtimissa ja osittain tuotevaihtimissa. Raakaöljyn syöttösäiliönä toimii säiliö R11 ja syöttöpumpun GA-10101/S jälkeen raakaöljyvirta jakaantuu kahteen ei-identtiseen vaihdinhaaraan, joissa raakaöljy tai lämmittävä virta ei aina virtaa identtisesti. Tässä työssä puhutaan raakaöljyhaaroista erotuksen vuoksi ”ylemmästä”- ja ”alemmasta”- syöttöhaarasta, kuten syöttöhaarat on esitetty ohjaamon piirroissa. Raakaöljyn lämpötilankehitys esilämmönvaihtimissa ylemmälle syöttöhaaralle on esitetty kuvassa 12 ja vastaavasti alemmalle syöttöhaaralle kuvassa 13.

### Raakaöljyn esilämmityksen lämpötilaprofiili ylemmälle syöttöhaaralle



Kuva 12. Raakaöljyn tislauksen esilämmityksen lämpötilaprofiili ylemmälle syöttöhaaralle 1.1.2000

### Raakaöljyn esilämmityksen lämpötilaprofiili alemmalle syöttöhaaralle



Kuva 13. Raakaöljyn tislauksen esilämmityksen lämpötilaprofiili alemmalle syöttöhaaralle 1.1.2000.



Kuvista 12 ja 13 havaitaan, että ylemmässä syöttöhaarassa lämpötilan kasvu on alussa hieman hitaampaa ja tämä johtuu siitä, että ensimmäiset kaksi vaihdinta (EA-10121 ja EA-10122) ovat olleet osittain ohitettuna. Loppulämpötilat ovat molemmille haaroille lähelle 250 °C, koska lämmönvaihtimilla EA-10105 AB & EF sekä EA-10133 A-D on pohjaöljypuolella lämpötilan kompensointi, joka säätää pohjaöljyn virtauksen niin, että raakaöljyn loppulämpötilat olisivat samat. Tällöin uuneille BA-10101 A/B tulevien haarojen lämpötilan säätö on tasaisempaa.

## 9 LIKAANTUMISEN SEURANTAOHJELMA

Raakaöljyn esilämmitys koostuu siis 58:sta eri lämmönvaihtimesta ja tässä työssä tutkittiin näiden lämmönvaihtimien likaantumista likaantumisen seurantaohjelman avulla. Ohjelma on Microsoft Exceliin tehty laskentaohjelma, jonka avulla voidaan seurata raakaöljyn tislauksen esilämmityksen lämmönvaihtimien likaantumista ja saatujen tulosten perusteella arvioida lämmönvaihtimien puhdistustarvetta. Ohjelma on Excel-pohjainen tiedosto, johon haetaan prosessin tietojärjestelmästä (TOP-järjestelmästä) prosessidataa PMSQuery-tietokannan avulla. Laskentaohjelmatiedosto koostuu tauluista, jotka sisältävät tiedonhaku- ja -keruuosan, laskentaosan, tulostusosan sekä aikaseurantaosan taulukoituna. Ohjelman makrot on tehty Visual Basic- koodilla. [3]

Prosessitietojen pohjalta ohjelma laskee raakaöljylle ja lämmittäville virroille aineominaisuusarvot, jotka siirretään tämän jälkeen varsinaiseen lämmönsiirto-ohjelmaan. Aineominaisuustaulussa lasketut arvot perustuvat aiemmin laadittuihin tislaustuotteiden ja raakaöljyn aineominaisuusarvoihin, joita on esitetty graafisesti lämpötilan funktiona. Graafisen kuvaajan avulla kullekin virralle muodostetaan yhtälöt, joilla saadaan virtaavan aineen aineominaisuudet kyseisessä lämpötilassa. Aineominaisuuksista lasketaan tiheys, viskositeetti, lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus jokaiselle vaihtimelle erikseen. Aineominaisuuslaskennassa käytetyt kuvaajat raakaöljylle ovat esitetty liitteessä I. Saaduilla arvoilla voidaan laskea lämpöteho sekä putki- että vaippapuolella. [3]

Varsinainen lämmönsiirto-ohjelma on HTFS-pohjainen lämmönvaihdinohjelma TASC3, jonka avulla voidaan mm. suunnitella tai mitoittaa lämmönvaihtimia tai laskea valmiiden lämmönvaihtimien lämpötehoja. Lämmönsiirto-ohjelmaan syötetään myös jokaisen lämmönvaihtimen geometriatiedot, joiden perusteella ohjelma laskee lämpötehon puhtaalle ja likaiselle lämmönvaihtimelle sekä putki- että vaippapuolella. Vertaamalla puhtaan ja likaisen vaihtimen lämmönsiirtotehokkuutta voidaan arvioida lämmönvaihtimen likaisuus. Ohjelmassa joudutaan itse iteroimaan likaantumiskertoimen arvoja, joiden avulla ohjelma laskee likaisen vaihtimen lämpötehon. Iteroitaessa likaantumiskertoimen arvoja ohjelma suorittaa tietyn määrän laskurutiineja. Jos likaantumiskertoimen avulla lasketut lämpötehot eivät ole riittävän lähellä lämmönvaihtimelle annettuja lämpötehon arvoja, joudutaan laskenta käynnistämään uudelleen. Iterointia toistetaan kunnes lasketut ja annetut lämpötehot ovat virhemarginaalin rajoissa samat. Likaantumiskertoimen alkuarvoina on käytetty lämmönsiirtimien suunnittelussa annettuja arvoja (Datasheet).

HTFS-ohjelmaan tiedot siirretään ns. Input-tiedostosta, johon lämmönvaihtimen geometria-arvot ja virtaavien aineiden syöttöarvot on siirretty ohjelman vaatimassa koodimuodossa. Input-tiedosto on esitetty liitteessä II. Siirto tapahtuu Excelin makrojen avulla, joissa kutsutaan HTFS-ohjelmaa kyseisen lämmönvaihtimen makro-painikkeen avulla. Makro antaa HTFS-ohjelmalle input-tiedot (EAXX.TAI) ja siirtää laskennan tulokset haluttuun Output-tiedostoon (EAXX.TAV). Ohjelman antama Output-tiedosto on esitetty liitteessä III. Kun kaikki esilämmityksen vaihtimet ovat käyty makro-painikkeiden avulla läpi, siirretään laskennan tulokset laskentaohjelmaan ”tulosten siirto” -makron avulla. [3]

Ohjelman tulostustaulukon muotoa muutettiin hieman selkeämmäksi, jotta tuloksia luettaessa saataisiin nopeasti käsitys siitä, mikä tai mitkä lämmönvaihtimet ovat likaantuneet nopeimmin ja vaativat näin ollen puhdistusta. Ohjelman tulostus tapahtuu laskentataulukon, johon on lisätty makro-painike ”Tulosten lasku”, joka laskee ohjelman tulokset taulukon.

## 9.1 LASKENTAAN VAIKUTTAVIA MUUTTUJIA

Koska raakaöljy ei virtaa kahta identtistä syöttöhaaraa pitkin, ei virtaus esilämmityksen alkupäässä ole jakaantunut tasan. Lämmönvaihtimilla on lisäksi useita ohituksia, jotka vaikuttavat laskentatulokseen. Yhtenä vaikeutena on vuoden 1999 alussa raakaöljyn ”ylemmässä” vaihdinhaarassa jumittunut venttiili, joka on osittain kiinni. Tällöin raakaöljyvirtaus pyrkii virtaamaan ”alempaa” syöttöhaaraa pitkin. Ohjelman laskennassa ei ole tätä täysin voitu huomioida, sillä syöttöhaaroille ei ole ennen suolanpoistoa omia virtausmittauksia, vaan virtausmäärät on jouduttu arvioimaan lämpötilaerojen avulla. Ongelma tulee kuitenkin poistumaan seuraavan seisokin yhteydessä, kun rikkinäinen venttiili päästään korjaamaan. Raakaöljyvirtauksilla suolanpoistimien jälkeen on molemmissa haaroissa oma virtausmittauksensa ja näiden lämmönvaihtimien laskenta voidaan tehdä luotettavasti.

Raakaöljyn esilämmityksen ensimmäisiä lämmönvaihtimia on myös usein ohitettu käsiventtiileillä, koska tietyt tuotevirtaukset on haluttu ohjata jatkoyksiköihin kuumempina. Tällöin kyseisen lämmönvaihtimen lämpötehon laskenta on tietenkin vaikeaa, koska virtausmääriä lämmönvaihtimen ohi on vaikea arvioida.

Raakaöljyn esilämmityksen eri vaiheissa on myös joukko lämmönvaihtimien automaattiohituksia, jotka vaikuttavat ratkaisevasti laskennan tulokseen. Ohjelmassa huomioitavia lämmittävien virtauksien automaattiohituksia ja niiden aiheuttamia virheitä lämmönsiirron laskennassa on esitetty taulukossa VI.

Taulukko VI. Raakaöljyn esilämmityksen lämmönsiirtolaskuissa huomioitavia automaattiohituksia.

Lämmittävä virta	Ohitusventtiili	Mitä ohittaa?	Vaikutus laskentaan
KAKP	HC-10126	Ohittaa lämmönvaihtimet EA-10132 BC&EF	Todellinen kaasuöljyn kiertopalautuksen virtausmäärä pienempi kuin virtausmittaus FC-10126
KAKP	HC-10150	Ohittaa lämmönvaihtimet EA-10135 A-F	Todellinen kaasuöljyn kiertopalautuksen virtausmäärä pienempi kuin virtausmittaus FC-10126
Pohjaöljy (ÖP)	TC-10119	Ohittaa lämmönvaihtimet EA-10101 BC&FG	Todellinen pohjaöljyn virtausmäärä pienempi kuin virtausmittaus FC-10111
Pohjaöljy (ÖP)	TDC-10122 HS-10193	Määrittää ÖP-virtauksen suhteen lämmönvaihtimille EA-10133 A-D ja EA-10105 A-F	Virtausmäärät eivät jakaannu tasan vaan TDC:n määrittämässä suhteessa

Jokaiselle lämmönvaihtimelle on lisäksi olemassa omat käsiventtiilein varustetut ohitukset ja osalle lämmönvaihtimista ohitukset ovat välillä olleet auki. Lämpöä on myös yritetty siirrellä esilämmityksessä eri paikkoihin, sulkemalla joko lämmittävää virtaa tai raakaöljyvirtausta. Näiden ohitusten systemaattinen kirjaus esim. vuoroissa käytettävään TOSI- päiväkirjaan on paikoitellen ollut puutteellista, joten täyttä varmuutta vaihtimien ohituksista/kuristuksista ei jälkikäteen voi saada.

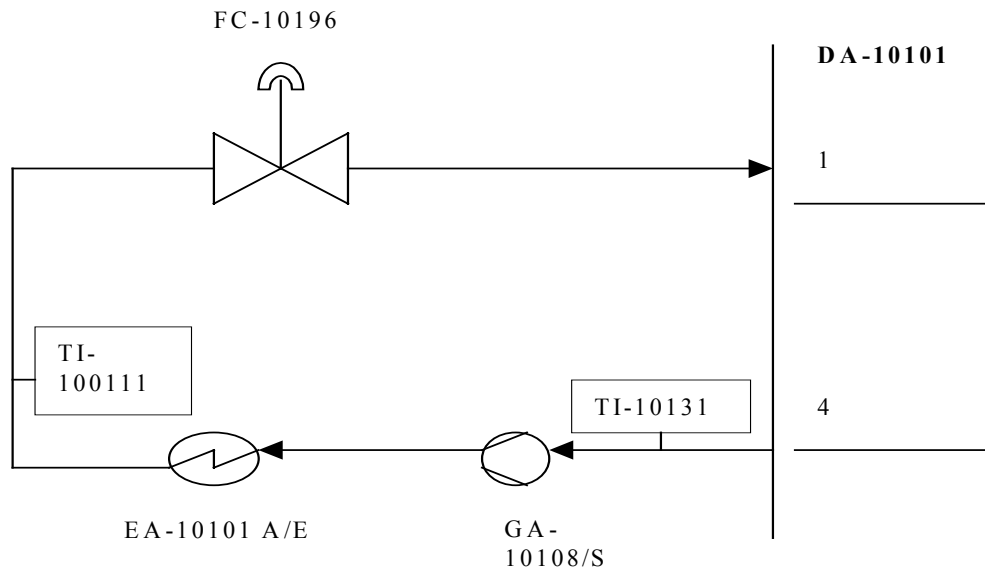
Ohjelmassa joudutaan myös arvioimaan eräille lämmönvaihdinpareille niiden laskennoissa käytettyjä lämpötilojen (TI-pisteiden) arvoja, koska raakaöljy virroissa tai lämmittävässä virroissa ei kyseisissä väleissä ole lämpötilamittausta. Näitä mittauspisteitä ovat:

- EA-10102 A&B ja EA-10104 A&B väliset raakaöljy- ja petrolin kiertopalautusvirrat
- EA-10132 A&B ja EA-10132C välinen raakaöljy- ja kaasuöljyvirrat, sillä EA-10132C on rakenteellisesti erilainen kuin EA-10132 A&B, jolloin varsinaisessa lämmönsiirto-ohjelmassa vaihtimet pitää laskea erikseen.

Lisäksi esimerkiksi kiertopalautusvirtauksissa on lämmittävän virtauksen TI-pisteiden sijoituksessa ohjelman laskennan kannalta virheellisiä mittauspisteitä. Näitä mittauspisteitä ovat mm:

- Kaasuöljyn kiertopalautus; TI-10104, KAKP:n tulo EA-10135 A-F, mittauspiste sijaitsee ennen pumppuja GAT-10104/S, jolloin varsinainen lämmönvaihtimen sisäänmenolämpötila on hieman korkeampi kuin mittauspisteen antama arvo
- Petrolin kiertopalautus; TI-100108, PEKP:n tulo EA-10104 A/B, mittauspiste sijaitsee ennen pumppuja GA-10134 A/B/S, jolloin varsinainen lämmönvaihtimen sisäänmenolämpötila on hieman korkeampi kuin mittauspisteen antama arvo.
- Bensiinin kiertopalautus; TI-10131, BEKP:n tulo EA-10101 A/E, mittauspiste sijaitsee ennen pumppuja GAT-10108/S, jolloin varsinainen lämmönvaihtimen sisäänmenolämpötila on hieman korkeampi kuin mittauspisteen antama arvo

Suoratislauskolonnin kiertopalautuksilla säädetään kolonnin lämpötiloja kolonnin eri kohdissa ja Porvoon jalostamon suoratislauskolonnissa näitä kiertopalautuksia on kolme; bensiinin, petrolin ja kaasuöljyn kiertopalautus. Kiertopalautuksissa siirretään raakaöljyn tislaukskolonnista saatavaa lämpötehoa esilämmityksessä raakaöljyyn ja muiden yksiköiden kolonnien pohjankiehutislämmönvaihtimiin. Kuvassa 14 on esitetty bensiininkiertopalautuksen raakaöljyvaihtimet ja niiden lämpötilojen mittauspisteet sekä kiertopalautuspumppu (GA-10108/S).



Kuva 14. Raakaöljyn suoratislauskolonnin bensiinin kiertopalautuskierto ja säätölaitteet raakaöljyn esilämmityksen lämmönvaihtimilla, sekä kierron mittalaitteisto.

Kuvassa 14 on esitetty bensiinin kiertopalautuksen kierto raakaöljy lämmönvaihtimilla, mutta täytyy kuitenkin muistaa että bensiinin kiertopalautus käy myös lämmönvaihtimilla EA-10205 A/B ja vesijäähdyttimillä EA-10109 A/B, joilla on omat säätölaitteensa. Kuvasta kuitenkin näkee, että lämpötilan mittauspiste TI-10131 sijaitsee ennen kiertopalautuspumppuja GA-10108/S ja todellisuudessa välimatka kolonnista DA-10101 on melko pitkä (noin 100 m), jolloin lämpötilan mittauspiste olisi järkevämpää sijoittaa lämmönvaihtimien EA-10101 A/E sisäänmenolinjaan. Edellä mainittujen petrolin- ja kaasuöljyn kiertopalautuksien lämpötilan mittauspisteiden virheellinen sijainti on lähes vastaava.

## 10 TULOKSET

Likaantumisen seurantaohjelmalla tehtiin kaikkiaan 6 eri ajoa ja ajankohdiksi pyrittiin valitsemaan ajankohdat, jolloin raakaöljysyöttö ja pohjaöljyvirtaus olivat likimain samalla tasolla. Tämä siksi, että laskettaessa esilämmityksessä siirtynyttä lämpötehoa, juuri pohjaöljyn määrä on ratkaiseva tekijä. Lisäksi ajankohdat valittiin kesällä 1999 tehtyjen lämmönvaihtimien EA-10133 CD ja EA-10133 AB pesujen yhteyteen (ennen ja jälkeen), jolloin voitiin laskea lämmönvaihtimien pesun vaikutus kyseisen lämmönvaihtimen lämmönsiirtotehokkuuteen. Likaantumisen seurantaohjelman ajopäivät olivat tällöin seuraavat:

- 1 1-2.1.1999
- 2 3-4.6.1999 (ennen EA-10133 CD pesua)
- 3 15-16.6.1999 (EA-10133 CD pesun jälkeen)
- 4 17-18.7.1999 (EA-10133 AB pesun jälkeen)
- 5 20-21.12.1999
- 6 6-7.2.2000

Laskentaohjelman ajot ovat tehty vuoden 1999 alun jälkeen, sillä ohjelmassa käytetään 8 tunnin mittauksen keskiarvoja ja tätä vanhempia mittaustietoja ei löydy PMSQuery-tietokannasta. Myöhemmin työssä esitetyt vuoden 1998 lämmönsiirtotehot ovat laskettu PMSQueryn ja Excel ohjelman avulla 24 tunnin tai 1 viikon mittaustietojen keskiarvoista. Tulostustaulukko ajalta 1-2.1.1999 on esitetty taulukossa VII ja muiden ajojen tulostukset ovat esitetty liitteessä IV.

Taulukko VII. Raakaöljyn tislauksen esilämmityksen lämmönvaihtimien seurantaohjelman tulostustaulukko, jossa on esitetty eri lämmönvaihtimien toiminta kuvaavia suureita.

	LÄMV.	Likakerroin	Likakerroin	Kok.kerroin	Kok.Kerroin	$\eta$	Lämpöteho
	TUOTE	$R_v/W/m^2K$	$R_p/W/m^2K$	Clean/ $W/m^2K$	Dirty/ $W/m^2K$	%	Q/kW
<b>EA-10121</b>	KAK	0.000010	0.000026	323.97	320.27	98.9	5013
EA-10122	KA	0.001500	0.002184	319.82	146.83	45.9	1091
EA-10101E	BEKP	0.000800	0.001541	330.16	186.21	56.4	5489
EA-10101FG	ÖP	0.004000	0.002569	188.09	84.13	44.7	3287
EA-10101H	KAK	0.000100	0.000514	217.57	191.94	88.2	2525
EA-10103CD	KA	0.000200	0.000300	236.77	211.72	89.4	2607
EA-10102B	PEKP	0.000300	0.000642	355.19	266.12	74.9	3575
EA-10104A	PEKP	0.000400	0.000771	337.97	242.15	71.6	3429
EA-10123AB	KAR	0.000450	0.000989	328.28	222.95	67.9	9234
EA-10101A	BEKP	0.000800	0.001285	387.52	214.36	55.3	6938
EA-10101BC	ÖP	0.006000	0.003854	202.08	67.56	33.4	2845
EA-10101D	KAK	0.000600	0.001285	231.34	161.1	69.6	2895
EA-10103AB	KA	0.000600	0.000959	249.68	179.71	72.0	3286
EA-10102A	PEKP	0.000600	0.001285	398.2	227.49	57.1	3851
EA-10104B	PEKP	0.001500	0.003211	378.03	135.93	36.0	3938
<b>SUOLANPOISTO</b>							
EA-10124ABC	ÖP	0.000060	0.000032	214.25	210.11	98.1	12653
EA-10125A	KAK	0.000150	0.000385	305.8	262.78	85.9	3085
EA-10124DEF	ÖP	0.000100	0.000064	220	212.33	96.5	13888
EA-10125B	KAK	0.000040	0.000103	306.98	294.09	95.8	3152
<b>ESITISLAUS</b>							
EA-10135ABC	KAKP	0.000650	0.000642	352.21	242.04	68.7	1478
EA-10136A	ÖP	0.002170	0.002209	133.59	84.28	63.1	2960
EA-10127	KAR	0.002000	0.003083	352.79	126.3	35.8	1686
EA-10126AB	KAR	0.002000	0.003083	408.26	132.76	32.5	6746
EA-10132BC	KAKP	0.001000	0.001927	405.44	185.42	45.7	4065
EA-10132A	KA	0.000800	0.001541	289.18	172.43	59.6	4028
EA-10105EF	ÖP	0.003000	0.001798	318.61	125.99	39.5	8118
EA-10105D	KAR	0.002000	0.001285	324.37	157.05	48.4	5586
EA-10133CD	ÖP	0.003900	0.002312	328.73	108.06	32.9	9096
EA-10135DEF	KAKP	0.002530	0.001914	351.62	137.21	39.0	1354
EA-10136B	ÖP	0.002170	0.002209	140.81	87.1	61.9	3161
EA-10131AB	KA	0.002000	0.003854	347.36	114.51	33.0	3127
EA-10131C	KA	0.002530	0.002376	232.66	108.64	46.7	3127
EA-10132EF	KAKP	0.000800	0.001541	399	206.28	51.7	6475
EA-10132D	KA	0.000800	0.001541	288.75	172.27	59.7	4480
EA-10105AB	ÖP	0.006500	0.003854	318.46	74.11	23.3	6249
EA-10105C	KAR	0.001300	0.000771	309.45	188.6	60.9	6567
EA-10133AB	ÖP	0.003900	0.002312	335.99	108.83	32.4	10240
<b>Huom! EA:n ohitus auki</b>							

Taulukossa VII ensimmäisessä sarakkeessa on ilmoitettu laskettavan lämmönvaihtimen tunnus. Toisessa sarakkeessa lämmittävä virta. Kolmannessa ja neljännessä sarakkeessa arvioidut likakertoimet vaippa- ja tuubipuolella ( $R_v$  ja  $R_p$ ). Viidennessä ja kuudennessa sarakkeessa kokonaislämmönsiirtokertoimet puhtaalle ja likaiselle vaihtimelle. Sarakkeessa seitsemän ovat likaisen ja puhtaan



lämmönvaihtimen laskennallinen hyötysuhde. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty lämmönsiirto-ohjelman laskema lämpöteho kyseiselle lämmönvaihtimelle. Lisäksi tummennetut sarakkeet tarkoittavat sitä, että lämmönvaihdin on joko osittain tai kokonaan ohitettuna, jolloin laskenta ei anna oikeaa tulosta.

Ohjelman tuloksista voidaan päätellä, että eräät lämmönvaihtimet toimivat jopa alle 30% hyötysuhteella verrattuna lämmönvaihtimien suunniteltuun lämmönsiirtotehoon. Tällöin lämmönvaihtimien likaisuuskertoimet ovat jopa 4-6 kertaa suuremmat kuin lämmönvaihtimien suunnittelussa käytetyt likaisuuskertoimet. Tästä johtuen lämmönvaihdin toimii yleensä erittäin huonosti ja lämmönsiirrossa saatu hyöty saattaa olla jopa niin pieni, ettei lämmönvaihdinta kannata pitää linjassa lisääntyvien painehäviöiden rajoittaessa raakaöljysyöttöä. Raakaöljyn esilämmityksessä lämmönvaihtimen optimaalisen käytön kannalta täytyy tarkastella myös painehäviöitä lämmönvaihtimen yli, jolloin kasvavat painehäviöt voivat olla niin korkeita, että vaihdin kannattaa ottaa pesuun jo paljon ennen kuin vaihtimen lämmönsiirtoteho on oleellisesti pienentynyt. Yleensä kuitenkin painehäviöt kasvavat lämmönsiirron heikkenemisen kanssa samanaikaisesti, jolloin lämmönsiirron heikkeneminen on tehokkaampi tapa löytää likaantunut lämmönvaihdin.

Ohjelmalla laskettaessa on kuitenkin muistettava, että likaantuminen voi tapahtua joko vaippa- tai tuubipuolella ja ohjelma ei itsessään tätä huomioi. Ohjelmassa likakertoimet vaippa- ja tuubipuolelle annetaan vaihtimen suunnitteluarvoista ja tämän jälkeen likaantumiskertoimia kasvatetaan/pienennetään samassa suhteessa. Jos kuitenkin haluttaisiin arvioida kumpi puoli lämmönvaihtimesta on likaisempi, joudutaan lämmönvaihtimen likaantumiskertoimia kasvattamaan arvioidun likaantumisen suhteessa. Tällöin käytännön kautta saatu tieto lämmönvaihtimien likaantumisesta on todella tärkeää.

Tuloksista voidaan päätellä myös, että pohjaöljy- ja raskas kaasuöljy-vaihtimet olivat yleensä likaisimpia ja lämmönvaihtimista kannattaisi ottaa puhdistukseen esim. EA-10105 AB ja EF tai EA-10136 A/B. Toisaalta esim. ohitettuna olevien pohjaöljyvaihtimien EA-10136 A/B puhdistus siirtäisi lämmitystehoa esilämmityksen loppupäähän, jolloin lämpötilat ennen esitislaukolonnin laskisivat. Tällöin esitislaukolonnin pohjavirran määrä kasvaa ja jatkosyöttöpumpun virtaukset

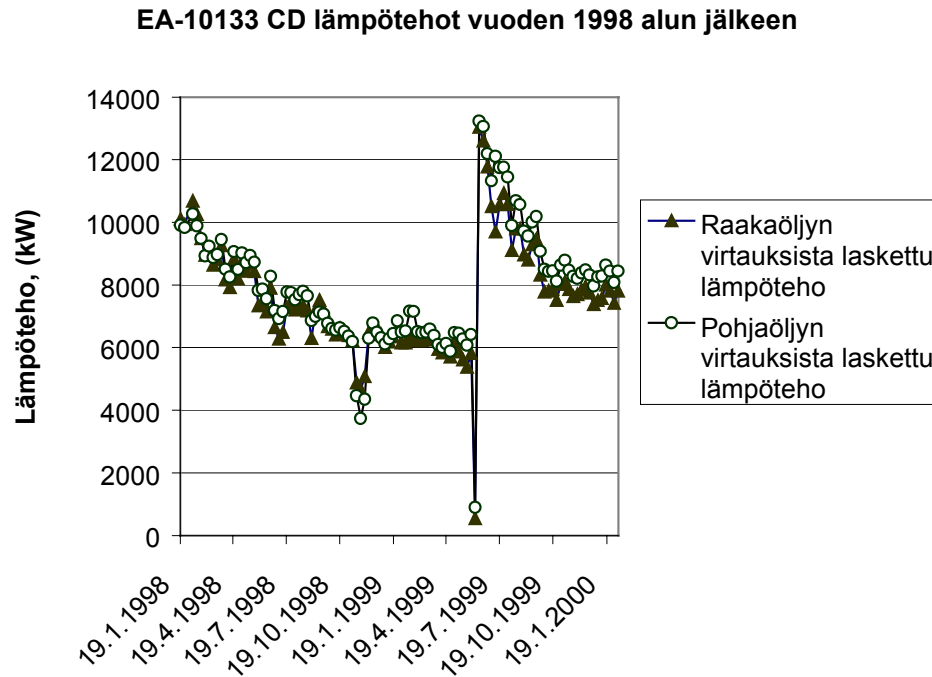
suurenevat, jolloin jatkosyöttöpumppu saattaisi rajoittaa syöttöä. Optimoitaessa syöttötasoa joudutaankin ottamaan huomioon myös muut syötön rajoitteet kuin lämpötila tai uunien tehot. Esimerkiksi jatkosyöttöpumpun GA-10102/S kierrosnopeus vaikuttaa pumpun ottamaan virranmäärään ja sitä kautta ampeerimäärään. Keväällä 1999 juuri jatkosyöttöpumpun korkeat ampeerit olivat eräs raakaöljyntislauksen rajoite. Tällöin ohitettiin pohjaöljyvaihtimet EA-10136 A/B, jotta lämpöä saatiin siirrettyä esilämmityksen alkuosaan ja pumpun kuormaa voitiin keventää.

Tuloksista nähdään myös, että suolanpoiston ja esitislauksen välisten lämmönvaihtimien EA-10124 A-F ja EA-10125 A/B kokonaislämmönsiirtokertoimet likaiselle ja puhtaalle vaihtimelle ovat lähes samat. Tällöin voisi olettaa, että lämmönvaihtimet ovat lähes puhtaita. Näin hyvät lämmönsiirtokertoimet eivät kuitenkaan ole aivan todellisia, sillä kyseisillä lämmönvaihtimilla raakaöljystä on jopa 10 %höyrystynyt ja tällöin laskentaohjelma laskee lämmönvaihtimille liian suuret lämmönsiirtokertoimet. Tämä johtuu siitä, että laskentaohjelmassa raakaöljyvirtaus oletetaan olevan yksifaasinen nestevirtaus ja todellisuudessa virtaus on osittain kaasufaasissa, jolloin laskennalliset lämmönsiirtokertoimet ovat todellisia lämmönsiirtokertoimia suurempia. Näille lämmönvaihtimille pitäisi virtauksien koostumus analysoida erikseen ja lämmönvaihtimien syöttötietoja pitäisi muuttaa vastamaan todellisia syöttöarvoja. Tähän ei tämän työn puitteissa ole kuitenkaan ryhdytty.

### **10.1 Lämmönvaihtimien EA-10133 CD PESU**

Raakaöljyn tislauksyksikön uunien sisäänmenolämmöt olivat laskeneet voimakkaasti syksyn -97 seisokin jälkeen. Tämän takia kesällä 1999 puhdistettiin raakaöljyn esilämmityksestä lämmönvaihdinpari EA-10133 CD, joissa lämmittävänä virtana toimii pohjaöljy. Nämä lämmönvaihtimet valittiin puhdistettavaksi sen takia, että niissä virtaa vaippapuolella kuuma pohjaöljy, joka on oletettavasti likaavin virta esilämmityksessä. Lisäksi vaihtimet sijaitsevat raakaöljyn esilämmityksessä viimeisinä ennen uuneja BA-10101 A/B. Lämmönvaihtimien pesu, lämmönvaihtimen

ohituksesta takaisin linjaan ottamiseen, kesti noin yhden viikon ja tuona aikana ei syöttöä jouduttu ratkaisevasti laskemaan. Lämmönvaihtimien EA-10133 CD lämpötehot ja pesun vaikutus lämpötehoihin ovat esitetty kuvassa 15.

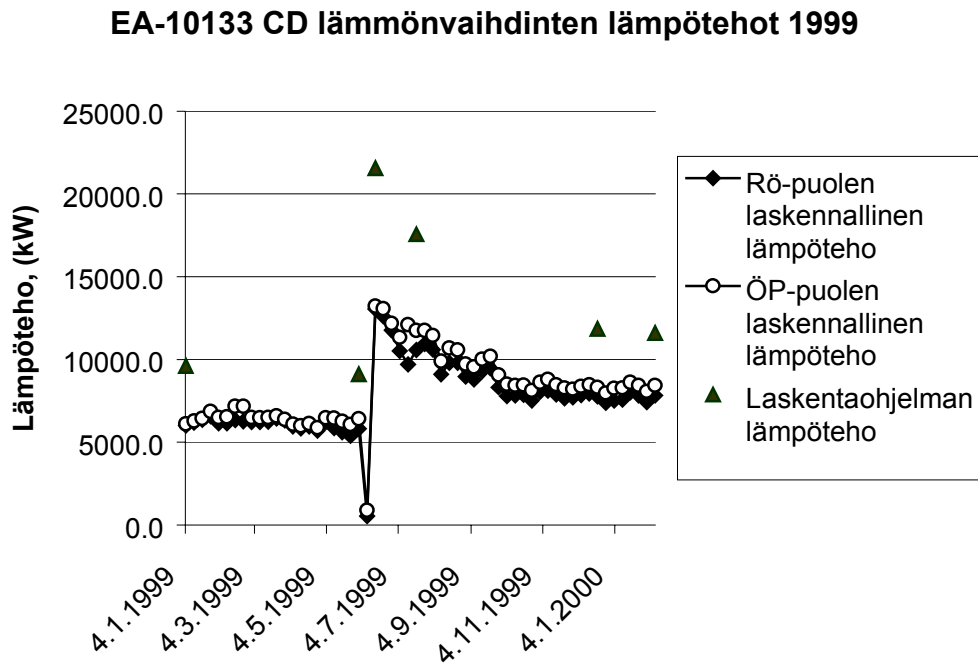


Kuva 15. Lämmönvaihtimien EA-10133 CD lämpötehot vuoden 1998 alun jälkeen laskettuna lämmönsiirtoyhtälöstä (1) sekä raakaöljyvirtauksille että pohjaöljyvirtauksille.

Kuvassa 15 lämpötehot on laskettu vuoden 1998 alusta, koska PMSQuery-tietokannassa on mittausdataa vain kahden viime vuoden ajalta. On kuitenkin muistettava, että lämmönvaihdin otettiin käyttöön seisokin jälkeen lokakuussa 1997, jolloin voidaan olettaa, että lämpötehot lokakuussa 1997 ovat olleet likimain samanlaiset kuin kesän 1999 pesun jälkeen ja lämmönvaihdin on likaantunut ensimmäisten 3 kuukauden aikana vuoden 1998 alussa olevaan tilaan.

Kun samoille lämmönvaihtimille laskettiin laskentaohjelman avulla lämpötehot vuoden 1999 alun jälkeen havaittiin, että ohjelman laskemat lämpötehot olivat huomattavasti suuremmat, mutta seurasivat loogisesti ennen ja jälkeen pesua

saatuja laskennallisia arvoja. Erot lämpötehoissa johtuvat siitä, että kaavassa 1 ei ole käytetty logaritmista lämpötilaero, kun taas lämmönvaihdinohjelma TASC3 käyttää logaritmista lämpötilaeroa. Lämmönvaihdinohjelmaan TASC3 ei kuitenkaan ole syötetty logaritmiselle lämpötilaerolle korjauskerrointa, joka ilmoittaisi lämmönvaihtimilla tapahtuvaa lämpöhäviötä ja ohivirtauksia. Kuvassa 16 on esitetty lämmönvaihtimen EA-10133 CD laskennallisesti saadut lämpötehot sekä raakaöljypuolella että pohjaöljypuolella ja lisäksi laskentaohjelman antamat lämpötehot 6 eri mittauspisteessä.



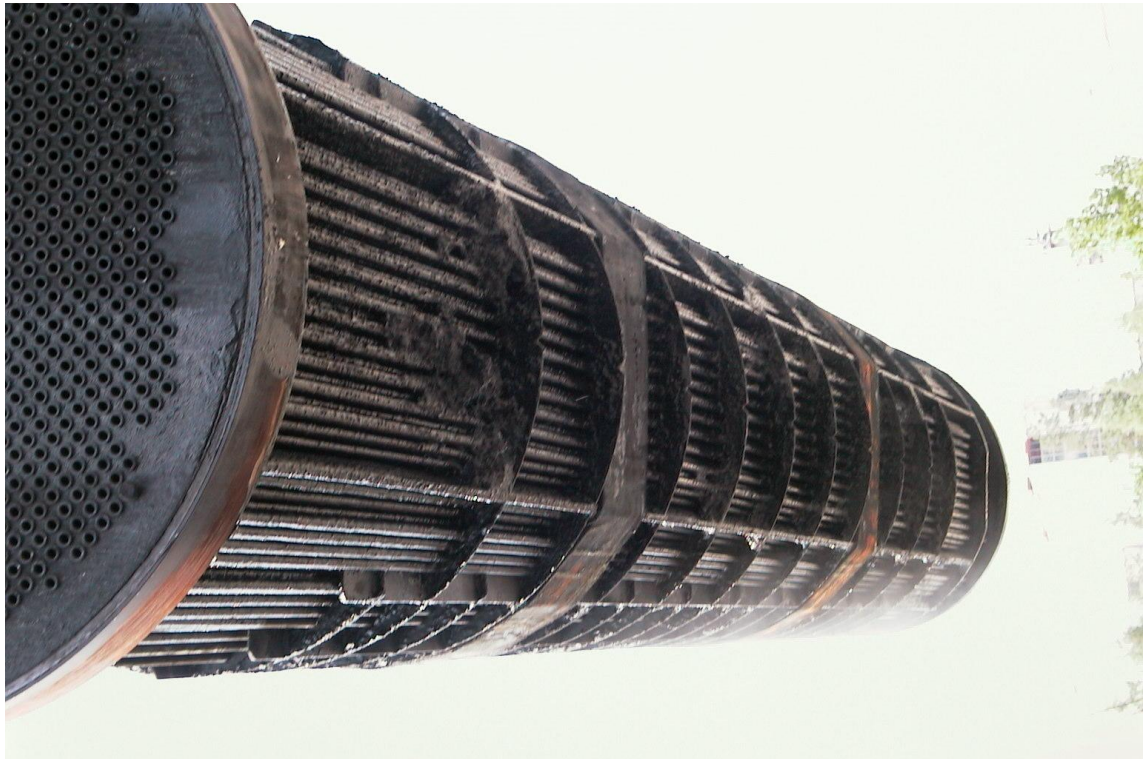
Kuva 16. EA-10133 C/D lämmönvaihtimien lämpötehot vuoden 1999 alusta, lämmönsiirtoyhtälöstä (1) laskettuna ja lämmönsiirto-ohjelmalla laskettuna.

Kuvista 15 ja 16 havaitaan, että lämmönvaihtimien EA10133 CD lämpötehot ovat pienentyneet vuoden 1998 alun jälkeen melko tasaisesti ja pesun jälkeen lämpötehot ovat nousseet jopa yli kaksinkertaisiksi. Lämpötehot laskevat kuitenkin pesun jälkeen melko nopeasti ja lämmönvaihtimien likaantuminen tasoittuu melko pian tietylle tasolle. On kuitenkin huomattava, että lämmönvaihtimien lämpötehot ovat vielä reilun puolen vuoden jälkeenkin korkeammalla tasolla kuin ennen pesua. Odotettavaa

onkin, että nykyisellä likaantumisen nopeudella lämmönvaihtimia ei kannata pestä ennen seuraavaa seisokkia vuonna 2001.

## 10.2 *Lämmönvaihtimien EA-10133 CD sakkujen analysointi*

Lämmönvaihtimien tyhjennysvaiheessa otettiin talteen lämmönvaihtimiin kertynyttä sakkua ja sakat analysoitiin. Lämmönvaihtimien sakat sekä tuubi- että vaippapuolelta otettiin vaihtimien jäähdytys-, höyrystys- ja tuubisarjojen ulosvetovaiheessa. Vaihtimien EA-10133 CD tuubisarjat ulosveto vaiheessa ovat esitetty kuvassa 17 ja 18.



Kuva 17. Raakaöljyn esilämmityksen lämmönvaihtimen EA-10133 C tuubisarjat ennen vaihtimen puhdistusta kesällä 1999.



Kuva 18. Raakaöljyn esilämmityksen lämmönvaihtimen EA-10133 D tuubisarjat ennen vaihtimen puhdistusta kesällä 1999.

Kuvista 17 ja 18 nähdään että varsinkin tuubisarjojen vaippapuolella on kerääntynyt likakerroksia, jotka aiheuttavat lämmönsiirron heikentymistä. Kuvista on kuitenkin huomioitava, että tuubisarjat on jo höyrystetty ja osittain huuhdeltu ulosvetovaiheessa, joten lämmönsiirtopinnoilla näkyvä likakerros on jo osittain pienentynyt.

Sakoille tehtiin sekä kvalitatiivinen että puolikvantitatiivinen analyysi. Analysointi suoritettiin pyyhkäiselektronimikroskoopilla (SEM), johon on kytketty elektronidiffraktiivinen spektrofotometri (EDS). Analysoinnissa näytteet tuhkattiin ja tuhkausjäännökset jauhettiin homogeenisiksi. Näytettä otettiin hiiliteipille ja pintaan höyrystettiin ohut kerros hiiltä vähentämään varautumisilmiöitä elektronimikroskoopissa. [31]

Elektronimikroskoopissa (JEOL JSM 820) näytteeseen kohdistetaan kapeaksi fokusoitu 20 keV:n elektronisuihku, mikä aiheuttaa röntgensäteilyn emittoitumista näytteestä. Pyyhkäiselektronimikroskooppien yhteydessä toimivat

röntgenalkuainedetektorit mittaavat elektronisuihkun aiheuttamaa röntgensäteilyemissiota. Röntgensäteilyssä on taustasäteilyä ja eri alkuaineiden karakteristisia röntgenviivoja. Alkuaineiden karakteristinen säteily muodostaa spektriin piikkejä, joiden perusteella näytteessä olevat alkuaineet voidaan tunnistaa. EDS-analyysin spektri vaihtimien EA-10133 CD tuubi- ja vaippapuolien sakoille on esitetty liitteessä V. [31]

Alkuaineiden röntgenviivojen intensiteetit eivät ole suoraan verrannollisia pitoisuuteen, mutta intensiteeteistä voidaan laskea näytteen koostumus hieman monimutkaisen matematiikan avulla. Puolikvantitatiivinen EDS-analyysi suoritetaan tietokoneohjelmalla, joka laskee havaittujen alkuaineiden röntgenviivojen intensiteettien perusteella näytteen alkuainepitoisuudet. Ohjelma ratkaisee iteratiivisella laskennalla kyseistä spektriä vastaavan koostumuksen. Menetelmän ongelmana on, että natriumia kevyemmät alkuaineet näkyvät vain heikosti, eikä niitä voida ottaa mukaan laskentaan. Tulokset ovat pienien pitoisuuksien (n. < 5 %) osalta melko epäluotettavia.[31]

Analyysitulokset on esitetty taulukossa VIII.

Taulukko VIII. Lämmönvaihtimien EA-10133 CD sakkujen puolikvantitatiivisen EDS-analyysin tulokset (happipitoisuus laskettu stoikiometrian mukaan).

	Vaippapuoli	Tuubipuoli
Fe	38 %	29 %
S	12 %	16 %
Si	5 %	1,8 %
Ca	3 %	1,6 %
Na	< 0,5 %	8 %
Al	2 %	2 %
Zn	1,3 %	1,7 %
Mg	0,6 %	< 0,5 %
P	< 0,5	0,5 %
Cu	0,5 %	0,5 %
Cl	< 0,5 %	2 %
K	< 0,5 %	< 0,5
Ti	< 0,5 %	< 0,5 %
O	38 %	39 %

Taulukosta VIII havaitaan, että suurimpia pitoisuuksia molemmissa virroissa ovat rauta, rikki ja happi. Raudan esiintyminen viittaa yleensä jo tapahtuneeseen korroosioon raakaöljyn kuljetus-, varastointi- ja pumppausvaiheissa sekä raakaöljyn esilämmityksessä. Raakaöljypuolella (tuubipuoli) löytyy pohjaöljypuoleen verrattuna suurempia pitoisuuksia mm. natriumia, klooria ( $MgCl$ ,  $NaCl$  ja  $CaCl_2$ ) ja rikkiä ( $H_2S$  ja merkaptanit). Näiden alkuaineiden suurempi pitoisuus on selitettävissä sillä, että alkuaineet ovat joko keveitä yhdisteitä tai vesiliukoisia suoloja, jolloin ne kulkeutuvat suoratislauskolonnin ylempiin tuotevirtoihin ja eivät näin ollen esiinny pohjatuotteessa. Tämä aiheuttaa mm. suoratislauskolonnin ylimenossa esiintyvää korroosiota. Pohjaöljyvirrassa vastaavasti esiintyy suurempia pitoisuuksia mm. sinkkiä, kalsiumia ja alumiinia. Näitä raskaampia yhdisteitä esiintyy mm. hiekassa ja muissa epäorgaanisissa yhdisteissä. Pohjaöljyketjuissa kyseiset alkuaineet aiheuttavat yleensä eroosikorroosiota ja tukkeutumia myöhemmissä vaiheissa. Pohjaöljypuolelta ei natriumia ole juuri löytynyt, mutta tämä johtunee siitä että lämmönvaihtimia on höyrystetty voimakkaasti pohjaöljypuolelta ennen näytteenottoa.



### 10.3 Lämmönvaihtimien EA-10133 CD pesusta saatu hyöty

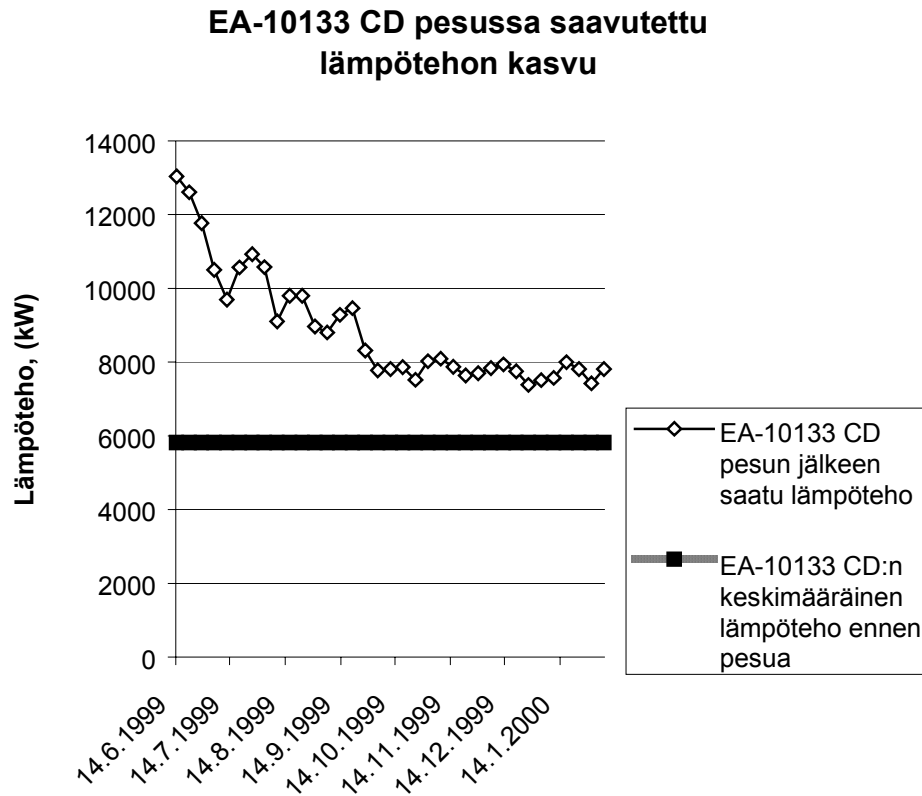
Lämmönvaihtimien EA-10133 CD tehon lisäys oli hetkellisesti jopa noin 5-6 MW, mutta vaihtimien lämpötehot laskivat ensimmäisien kuukausien aikana melko rajusti, jopa 1 MW kuukaudessa. Tämän jälkeen likaantuminen tasoittuu ja lämpötehot laskevat noin 100 kW kuukaudessa. Kuvasta 15 nähdään, että lämpötehot vuoden 1998 alun jälkeen olivat laskeneet kesäkuuhun -99 mennessä noin 10 MW:sta 5,8 MW:iin, jolloin vaihtimien keskimääräinen likaantuminen oli 250 kW kuukaudessa.

Lämmönvaihtimien EA-10133 CD pesun jälkeen vaihtimien lämpötehot olivat aluksi jopa 13 MW, mutta lämpötehot laskivat varsin voimakkaasti (jopa 1-3 MW per kuukausi). Tämän jälkeen lämpötehot ovat olleet kuitenkin huomattavasti korkeammalla tasolla kuin ennen pesua. Lämmönvaihtimen lämpötehot ennen pesua olivat luokkaa 5800 kW ja pesun jälkeen kuukauden keskimääräiset korkeammat lämpötehot ja pesussa voitettu lämpötehon kasvu on esitetty taulukossa IX.

Taulukko IX. Lämmönvaihtimien EA-10133CD pesun jälkeiset korkeammat lämpötehot ja voitettut lämpötehot kuukausien keskiarvoina.

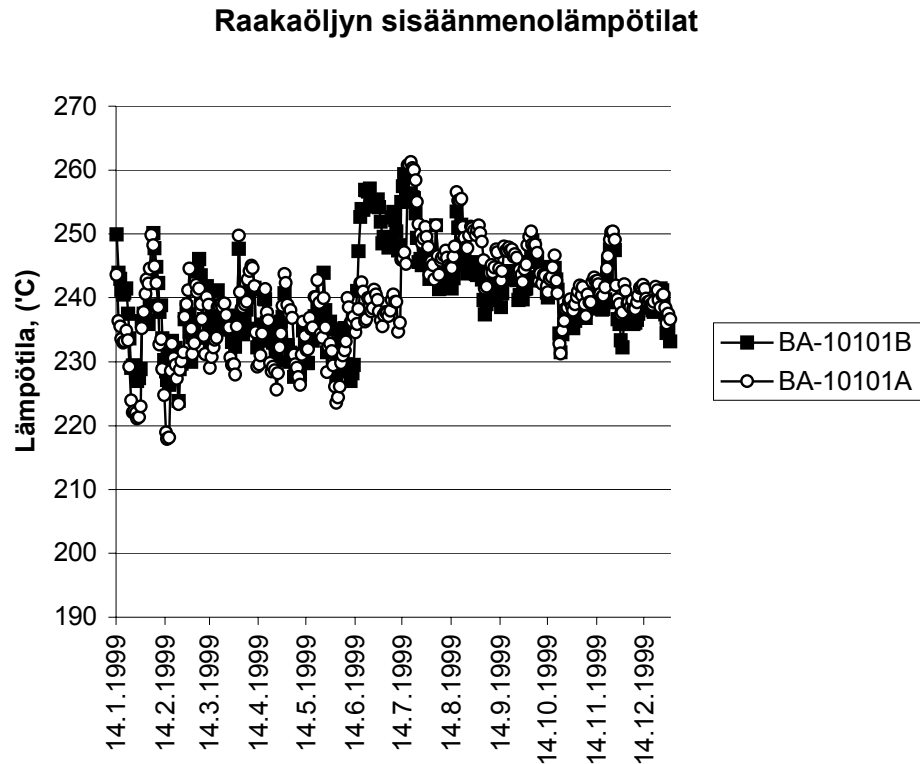
	Pesun jälkeinen korkeampi lämpöteho	Pesussa voitettu Lämpöteho
	KW	KW
Heinäkuu	10427	4609
Elokuu	9825	4007
Syyskuu	8971	3153
Lokakuu	7746	1928
Marraskuu	7911	2093
Joulukuu	7730	1911
Tammikuu	7668	1850

Lämmönvaihtimien EA-10133CD pesun jälkeinen lämpötehojen kehitys (lasku) ja lämpöteho ennen pesua ovat esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Lämmönvaihtimien EA-10133 CD lämpöteho kehitys vaihtimien pesun jälkeen ja keskimääräinen lämpöteho ennen pesua.

Lämmönvaihtimien pesusta saatu hyöty näkyy ensimmäisenä yksikön uuneilla raakaöljyn sisäänmenolämpötiloissa. Lämmönvaihtimienpesun vaikutus uunien BA-10101 A/B raakaöljyn sisäänmenolämpötiloissa on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Uunien BA-10101 A/B raakaöljyn sisäänmeno lämpötilat.

Kuvasta 20 nähdään, että lämmönvaihtimien EA-10133 CD pesun jälkeen (8-15.6.1999) raakaöljyn lämpötilat uunien BA-10101A sisäänmenossa nousivat selvästi. Kuvasta 20 havaitaan myös että uunin BA-10101B raakaöljyn sisäänmenolämpötilat nousivat heinäkuun puolenvälin jälkeen. Tämä johtuu siitä, että alemman raakaöljyhaaran lämmönvaihtimet EA-10133 AB pestiin heinäkuussa. Kuvasta 20 nähdään että raakaöljyn sisäänmeno lämpötilat nousivat kummankin pesun jälkeen noin 15- 20 °C tai jopa hetkellisesti enemmänkin. Uunien sisäänmenolämpötilan nousun taloudellista vaikutusta voidaan arvioida esimerkiksi uunien polttoaasun määrän vähenemisestä.

Raakaöljyn tislausyksikön uunien BA-10101 A/B lämpötehot ovat luokkaa 65 MW, josta esimerkiksi heinäkuun keskimääräinen voitettu lämpöteho 4609 kW on noin 7,1 %. Laskettaessa polttoaasun säästöä tämä merkitsee normaalisyötoillä (5,5 t/h per

uuni)  $0,07 \cdot 5,5 \text{ t/h} = 0,385 \text{ t/h}$ . Nykyisillä polttokaasuhinnoilla tämä merkitsee noin 205 000 mk/kuukausi.

Lämmönvaihtimen pesussa tulee lisäksi kustannuksia kulutetusta höyrystä, typestä ja muista käyttöhyödykkeistä. Lisäksi pesun työkulut olivat noin 80 000 mk lämmönvaihdinparille. Tällöin lämmönvaihtimenpesun kokonaiskustannukset olivat noin 120 000 mk ja pesun takaisinmaksuaika on alle 1 kuukausi.

#### **10.4 Lämmönvaihtimien lämpötehojen jakautuminen**

Lämmönvaihtimien pesun jälkeen näyttäisi pestyjen lämmönvaihtimien teho todella nousevan ja lämmönsiirto kasvavan. Raakaöljyn esilämmityksessä täytyy kuitenkin muistaa, että jos lämmittävä virta luovuttaa lämpötehoa esilämmityksen alkupäässä tehokkaammin kuin aikaisemmin, se todennäköisesti tarkoittaa sitä, että kyseinen lämpöteho on pois jostain esilämmityksen myöhemmästä vaiheesta. Työssä tutkittiin myös miten lämpötehot jakoutuivat pohjaöljylämmönvaihtimilla lämmönvaihtimien EA-10133 C/D pesun jälkeen. Raakaöljyn esilämmityksen pohjaöljyketjun lämmönvaihtimet ovat suoratislauskolonnista lähtien seuraavat:

Ylempi raakaöljyhaara;

EA-10133 CD → EA-10105EF → EA-10136A → EA-10124DEF → EA-10101FG

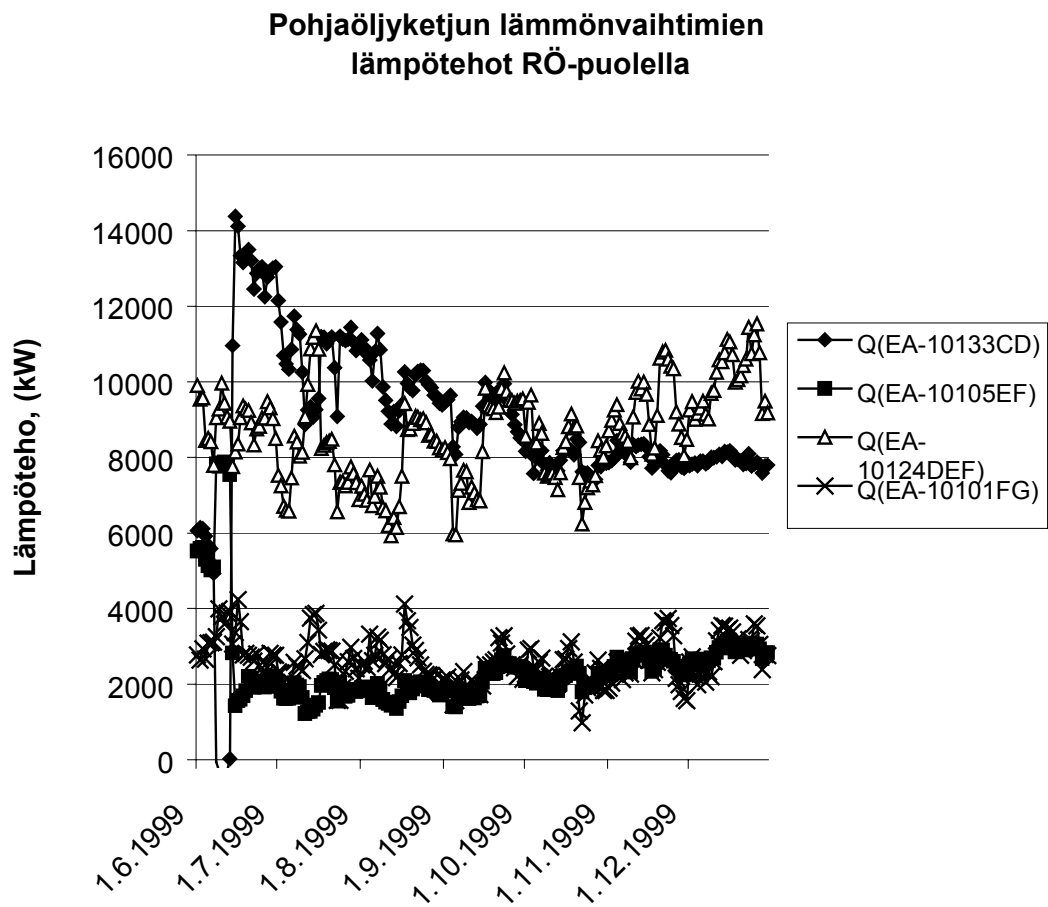
Alempi raakaöljyhaara;

EA-10133 AB → EA-10105AB → EA-10136B → EA-10124ABC → EA-10101BC.

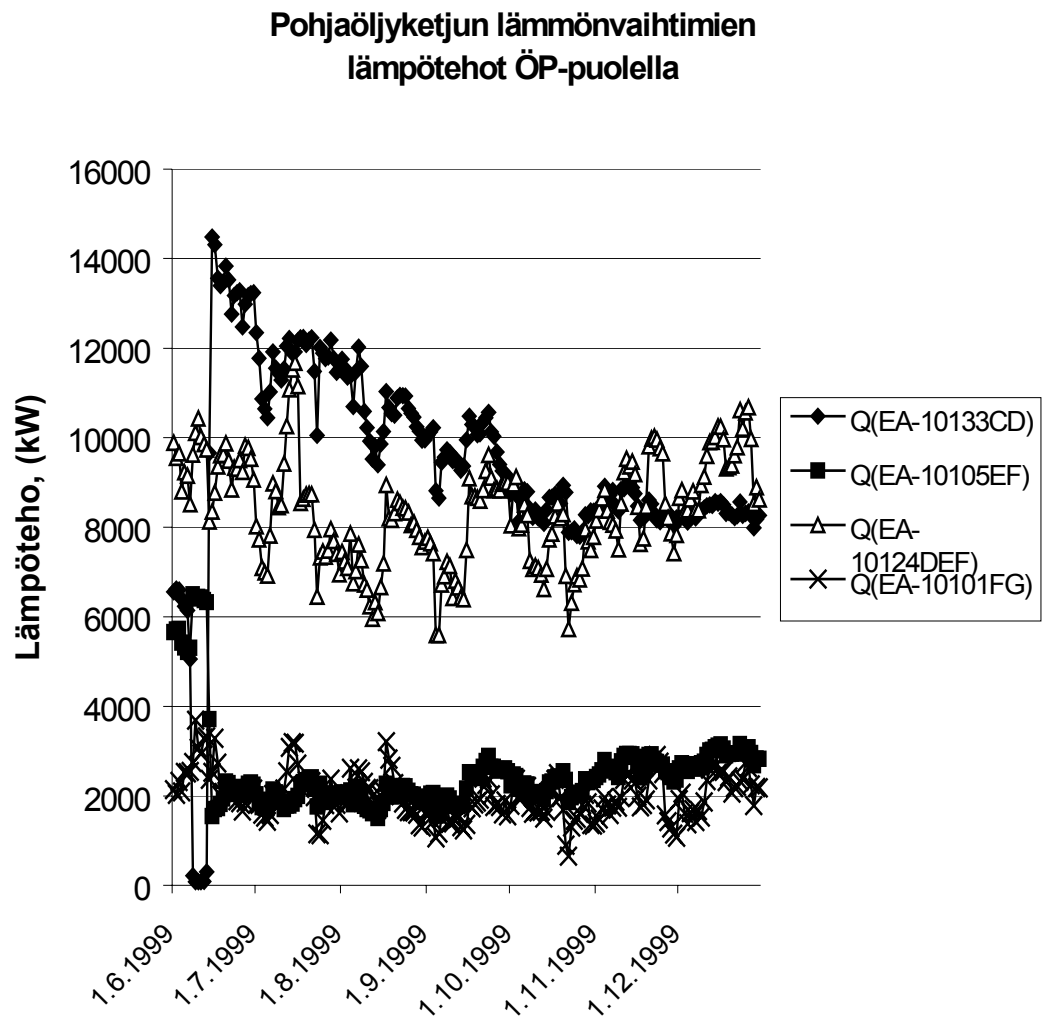
Työssä tutkittiin lähinnä ylempää raakaöljyhaaraa, koska molempien haarojen oletetaan olevan lähes identtiset. Tämän lisäksi lämmönvaihtimet EA-10136 A/B jätettiin pois lähemmästä tarkastelusta, koska kyseiset vaihtimet ovat heinäkuun 1999 jälkeen olleet ohitettuina. Lämmönvaihtimet EA-10136 A/B ohitettiin, sillä

lämpöä haluttiin siirtää raakaöljyn esilämmityksen alkuosaan ennen esitislauskolonnia, jolloin jatkosyöttöpumppujen GA-10102/S tehon tarve väheni.

Tutkittaessa raakaöljyn esilämmityksen pohjaöljyketjun lämpötehojen muuttumista kesäkuun 1999 alun jälkeen raakaöljypuolella saatiin ylemmälle syöttöhaaralle kuvan 21 ja vastaavasti pohjaöljypuolella kuvan 22 mukainen kuvaaja.



Kuva 21. Raakaöljyn esilämmityksen pohjaöljyketjun lämmönvaihtimien lämpötehot raakaöljypuolella kesäkuun 1999 jälkeen.



Kuva 22. Raakaöljyn esilämmityksen pohjaöljyketjun lämmönvaihtimien lämpötehot pohjaöljypuolella kesäkuun 1999 jälkeen.

Kuvista 21 ja 22 havaitaan, että lämmönvaihtimien EA-10133 CD lämpötehot ovat laskeneet vaihtimien pesun jälkeen aluksi melko voimakkaasti. Sen jälkeen lämpötehojen lasku on hieman pienentynyt. Kuvista 21 ja 22 huomataan myös, että lämmönvaihtimien EA-10124DEF lämpötehot ovat samanaikaisesti hieman nousseet ja tämä johtuu juuri siitä, että lämmönvaihtimien EA-10133CD likaantuessa lämpöä alkaa siirtyä pohjaöljyketjun loppupäähän eli vaihtimiin EA-10124DEF. Lämpötehon kohoaminen vaihtimilla EA-10105EF on huomattavasti pienempää, mikä johtuu kyseisten lämmönvaihtimien voimakkaasta likaantumisesta. Lämmönvaihtimien EA-

10105EF lämpötehojen lasku nähdään vertaamalla aiempia lämmönsiirtolaskennassa saatuja tuloksia, jotka ovat esitetty liitteessä IV. Liitteestä IV voidaan havaita, että lämmönvaihtimien EA-10105 EF lämpötehot ovat laskeneet vuoden 1999 alusta 8505 kW:ista 4525 kW:iin ja samalla likaantumiskertoimien arvot ovat nousseet noin kolminkertaisiksi.

Vaihtimien EA-10101 F/G lämpötehojen muutos ei myöskään ole kovin huomattava, koska vaihtimien lämpötiloihin vaikuttaa kyseisten lämmönvaihtimien automaattiohitus TC-10119, jolla säädetään pohjaöljyn lämpötilaa ennen jatkoyksiköitä (Tyhjötilaus).

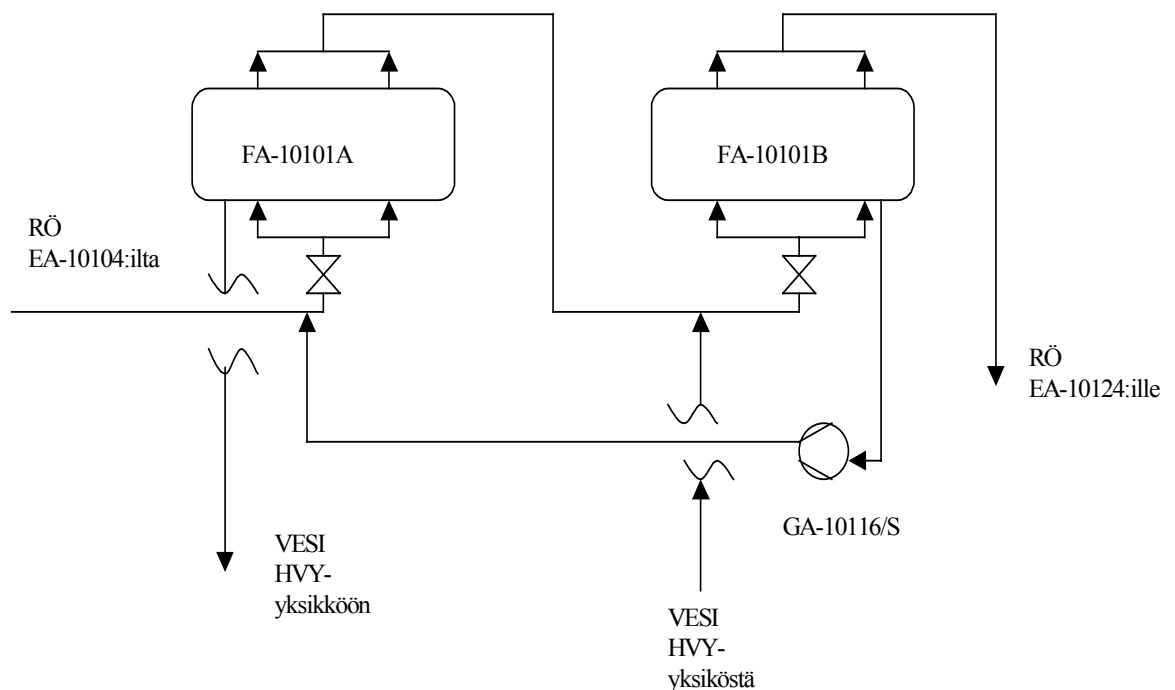
Tutkittaessa raskaan kaasuöljyn tuote/raakaöljy –lämmönvaihtimia havaitaan ainoastaan lievää likaantumista. Muille raakaöljyn tislauksen tuotelämmönvaihtimille ei selvää muutosta ole havaittavissa, koska tuotteiden virtausmäärät vaihtelevat hyvinkin paljon eri ajotapojen mukaan. Raakaöljy/tuotelämmönvaihtimien lämpötehojen muutokset vuoden 1999 alusta ovat esitetty liitteessä VI.

Raakaöljyn tislauksen kiertopalautukset kiertävät myös muiden yksiköiden kolonnien pohjanlämmitysvaihtimissa. Tällöin raakaöljyn esilämmityksessä kiertävien kiertopalautusvirtojen lämpötehojen tutkiminen ei aina anna selvää viitettä mihin suuntaan lämpötehot ovat kehittyneet. Kiertopalautuksien virtauksissa on kuitenkin raakaöljyn esilämmityksessä huomattavissa lievää lämpötehon heikkenemistä varsinkin bensiini- ja petrolikiertopalautuksissa. Kaasuöljyn kiertopalautuksessa ei raakaöljyvaihtimilla ole lämpötehojen muutoksissa olemassa selvää trendiä, koska lämpöä on siirretty kiertopalautuksen eri lämmönvaihtimiin. Kiertopalautuksien lämpötehojen muutokset ovat esitetty liitteessä VII.

## 11 SUOLANPOISTON JA YLIMENOKORROOSION TUTKIMINEN

### 11.1 Raakaöljyn suolanpoiston analysointi

Raakaöljyn suolanpoistimien tarkoitus on poistaa raakaöljystä suoloja ja muita epäpuhtauksia sekä kiintoainetta. Suolanpoiston tyypillisiä olosuhteita ovat 100 – 150 °C ja 1100...1300 kPa. Suolanpoiston periaatekaavio on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Raakaöljyn suolanpoiston periaatekaavio.

Suolanpoisto tapahtuu kaksivaiheisesti suolanpoistimissa (FA-10101 A/B). Suolanpoisto perustuu siihen, että raakaöljyn sekaan johdetaan vettä, johon raakaöljyssä olevat suolat liukenevat. Raakaöljy johdetaan ensin suolanpoistimelle FA-10101A. Vesi pumpataan ensin suolanpoistimelle FA-10101B ja sen jälkeen suolanpoistimelle FA-10101A. Vesi pumpataan raakaöljyn sekaan ennen ns.



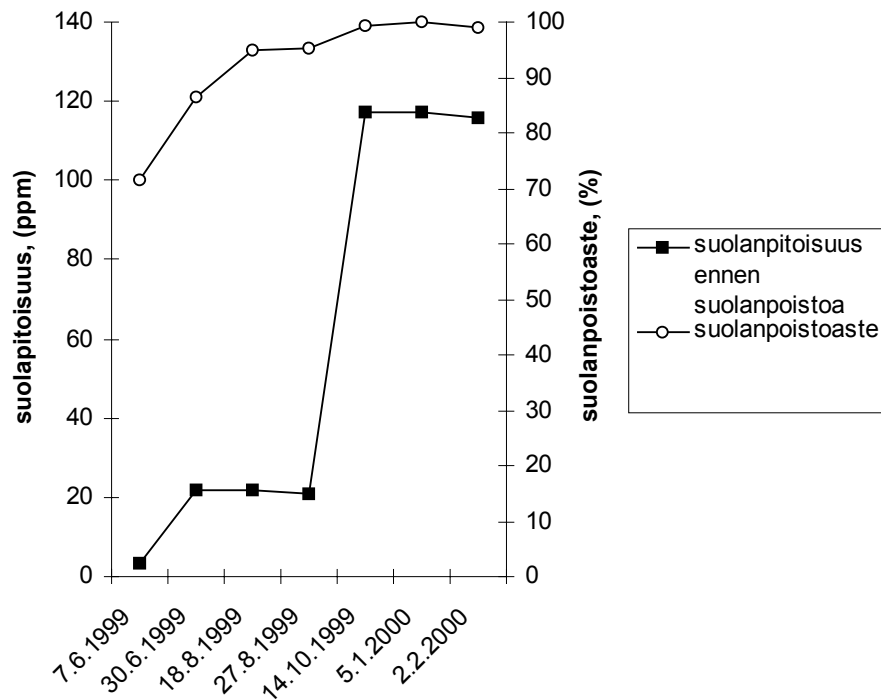
sekoitusventtiileitä, jonka jälkeen raakaöljy-vesiseos johdetaan suolanpoistimiin. Suolanpoistimissa vallitsee korkea sähkökenttä, jonka vaikutuksesta vesipisarat yhtyvät, jolloin vesi ja veteen liuenneet suolat laskeutuvat raakaöljyä raskaampina suolanpoistimien pohjalle. Raakaöljy poistuu suolanpoistimista yläkautta.

Suolanpoiston toimintaa kuvaavien ns. rutiini-näytteiden analysointi aikataulu on seuraava:

- Joka päivä klo 8.00. Raakaöljy suolanpoiston jälkeen; rikki, tiheys ja suolapitoisuus
- Keskiviikkona klo 8.00. Raakaöljy suolanpoiston jälkeen; vesi, tiheys, ja hapetusluku
- Keskiviikkona klo 8.00. Raakaöljy ennen suolanpoistoa; hapetusluku
- Ma, ke, pe klo 8.00. Suolanpoistimien vesi; DOC ja DIC. (liennut orgaaninen ja epäorgaaninen aine)
- Kenttäanalyysit: joka päivä klo 2, 10 ja 18. Suolanpoistimien vesi; pH ja öljy. Raakaöljy; emulsionestoaineen ja lipeän syöttömäärä.

Suolanpoistimien toimintaa seurataan myös ns. suolanpoiston ja ylimenon tarkkailuraporteilla, joita tehdään keskimäärin kerran kuussa. Näissä raporteissa huomioidaan raakaöljysyötön koostumus, syöttöolosuhteet ja määrät sekä mm. apuaineiden syöttömäärät. Suolanpoiston tarkkailuraportissa huomioidaan myös suolanpoistovesien syöttömäärät sekä syötettävän ja lähtevän veden koostumus. Myös suolanpoistimen rajapinnat ja näytteenottoapaikat tarkastetaan seurantaraporteissa. [32]

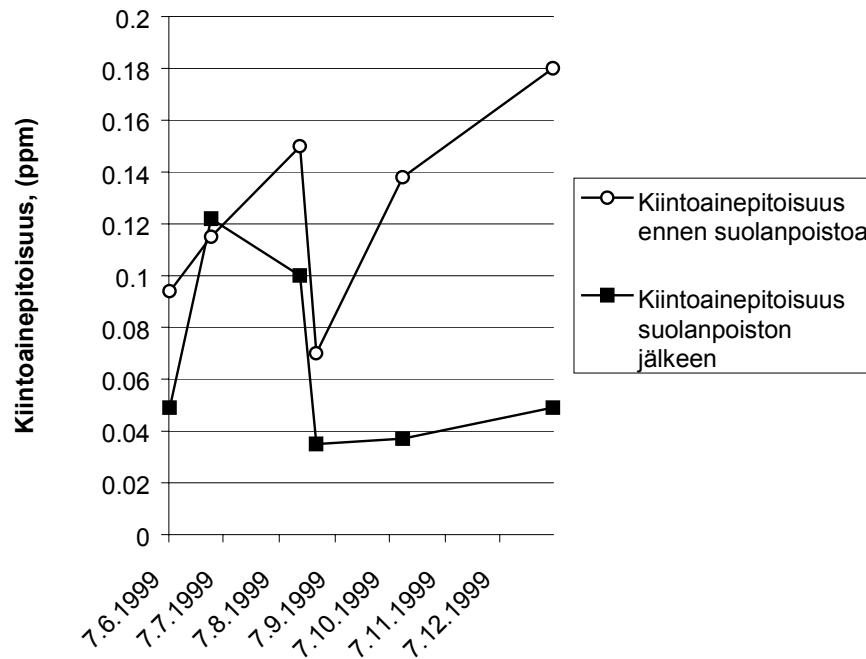
Suolanpoistimien raakaöljyt analysoidaan ennen suolanpoistimia, suolanpoistimien välistä ja suolanpoiston jälkeen. Raakaöljystä analysoidaan mm. veden erottumisnopeus raakaöljystä, kiintoainepitoisuus ja suolapitoisuus. Suolapitoisuuksista ennen ja jälkeen suolanpoistimien saadaan suolanpoistoaste, joka on eräs tärkeimmistä suolanpoistoa kuvaavista tekijöistä. Raakaöljyn suolapitoisuudet ennen suolanpoistimia ja suolanpoistimien suolanpoistoaste ovat esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Raakaöljyn suolanpitoisuus ennen suolanpoistoa ja suolanpoistimien suolanpoistoaste, tutkittaessa suolanpoistoa Raakaöljyn tislauksyksikössä.

Kuvasta 24 nähdään että raakaöljyn suolanpoistoaste on ollut varsinkin suuremmilla suolanpitoisuuksilla erittäin hyvä ja pienemmilläkin pitoisuuksilla hyvä. Pienempien pitoisuuksien heikompi suolanpoistoaste tosin ei kuvaa raakaöljyn lopullista suolanpitoisuutta kovin hyvin, sillä suolanpitoisuudet ovat olleet jo ennen suolanpoistoa erittäin pieniä, jolloin varsinainen suolanpoistoaste voi olla huonompi. Raakaöljyn suolanpitoisuudet suolanpoiston jälkeen ovat kuitenkin olleet kesäkuun –99 alun jälkeen melko pieniä (0,09-1,8 ppm), verrattuna raakaöljysyötön suolanpitoisuuksiin (jopa 117 ppm). Tällöin voidaan olettaa että suolanpoistimet ovat toimineet varsin hyvin.

Raakaöljyn suolanpoistimien kiintoainepitoisuudet ennen ja jälkeen suolanpoistoa ovat esitetty kuvassa 25.

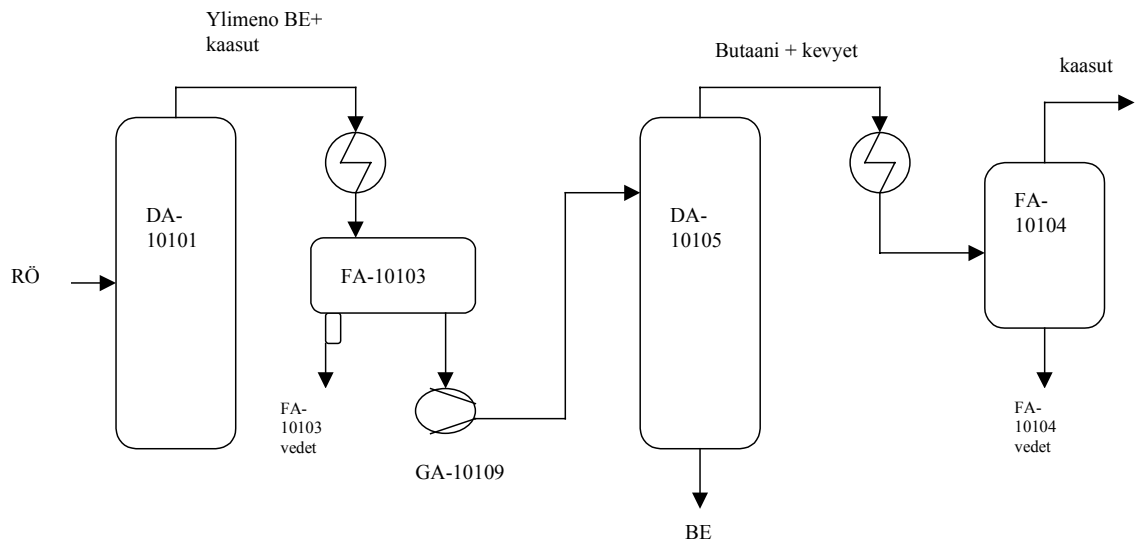


Kuva 25. Raakaöljyn tislausyksikön suolanpoistimien kiintoainepitoisuus ennen ja jälkeen suolanpoiston, tutkittaessa suolanpoistimien toimintaa.

Kuvasta 25 nähdään, että kiintoainepitoisuudet ennen ja jälkeen suolanpoistimia ovat olleet varsin pieniä ja varsinkin alkuvuodesta 2000 suolanpoistimet ovat poistaneet raakaöljystä myös kiintoaineita kohtalaisesti. Kiintoaineanalyysin ”pienet” pitoisuudet ovat kuitenkin hieman harhaanjohtavia, sillä esimerkiksi 1000 t/h raakaöljyysytöllä ja 0,18 ppm kiintoainepitoisuudella kiintoainesakkaa tulee syötön mukana 0,118 kg/h, mikä merkitsee vuositasolla 1577 kg/a. On selvää, että näin suuri kiintoainesakka muodostaa ongelmia sekä raakaöljyn suolanpoistimilla että jatkokäsittelyssä. Tästä selviä viitteitä on saatu otettaessa hylkysyöttöä yksikköön, jolloin suolanpoistimen (FA-10101A) jännitteet heittelevät rajusti. Jännitteiden heilahtelu on melko varma merkki suolanpoistimeen kertyneestä sakasta, joka ei poistu veden mukana. Kiintoaineanalyysistä täytyy kuitenkin muistaa se, että kiintoaineet raakaöljyistä analysoidaan suodattamalla raakaöljy kuumana suodoksena, jolloin kiintoaineeseen saattaa tosin jäädä myös hieman suoloja.

## 11.2 Ylimenokorroosion tutkiminen

Raakaöljyn tislauksen ylimenosta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä suoratislauskolonnin (DA-10101) ylimenojärjestelmää, mutta ylimenovesien tutkimisessa pitää tutkia myös ns. butaaninpoistokolonnin (DA-10105) ylimenojärjestelmää. Tämä siksi että butaaninpoisto on suoratislauskolonnin keveiden (bensiniin) jatkotislausta. Tällöin kevyet ja korroosiota aiheuttavat kaasut kulkeutuvat myös butaaninpoistokolonnin ylimenojärjestelmiin. Kuvassa 25 on esitetty raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmä ja sen jälkeisen butaaninpoistokolonnin ylimenojärjestelmän periaatteellinen virtauskaavio ja ylimenovesien näytteenottoaikat. Kuvassa on esitetty vain ylimenojärjestelmän kannalta oleellimmat virrat, laitteet ja säiliöt.



Kuva 26. Raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän periaatteellinen virtauskaavio ja ylimenovesien näytteenottoaikat.

Ylimenojärjestelmän vesiä analysoidaan seuraavasti:

- Torstai klo 8.00. FA-10103 ja FA-10104:en vedet; pH, kloridit ja H<sub>2</sub>S.
- Joka päivä klo 18.00. FA-10103 veden pH.

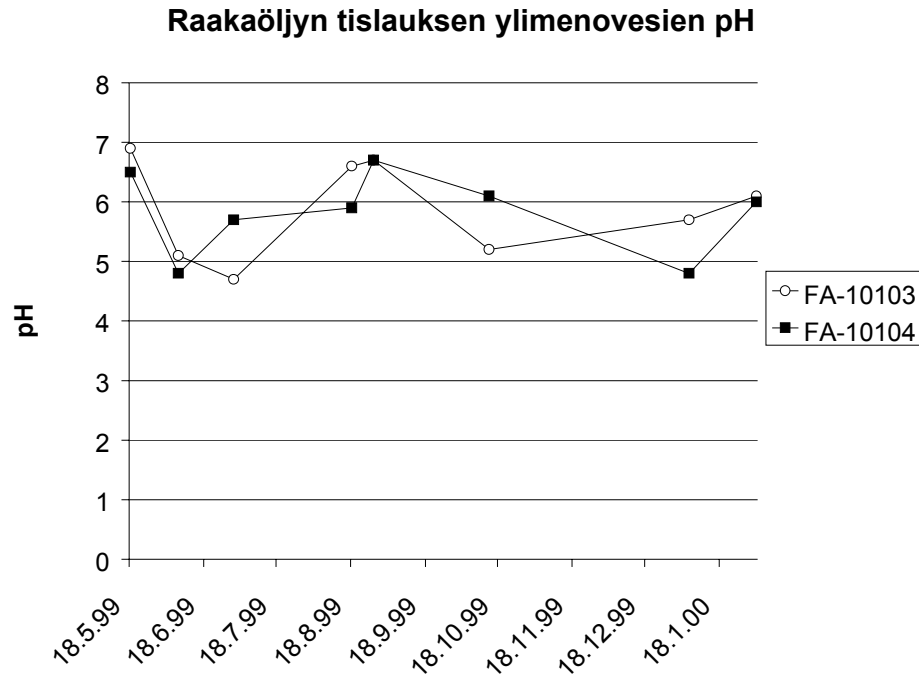
FA-10104:n vesiä ei analysoida rutiinianalyseissä, koska säiliöön ei normaalioloissa tule jatkuvasti vettä, vaan vettä kertyy säiliöön lähinnä silloin kun butaanipoistokolonin lisäsyötoissä on vettä.

Raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän toimintaa seurataan myös tarkkailuraporteilla, joita tehdään keskimäärin kerran kuussa. Näissä raporteissa huomioidaan raakaöljysyötön koostumus, syöttöolosuhteet ja määrät sekä mm. apuaineiden syöttömäärät. Ylimenojärjestelmästä analysoidaan ylimenosäiliöiden FA-10103 ja FA-10104 vesiä ja analyysitulokset 18.5.1999 ovat esitetty taulukossa X. [32]

Taulukko X. Raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän vesien eri analyysit kuukausittaisissa tarkkailuraporteissa.

	CL-	PH	H <sub>2</sub> S	Fe	Johtokyky	Ulkonäkö
	[ppm]		[ppm]	[ppm]	[mS/m]	
FA-10103	4	6,9	69	0	25	Ok
FA-10104	9	9	460	0	59	Ok

Ylimenojärjestelmän analysoinneista tärkeimpänä voidaan pitää pH:n mittausta. Korroosiota pyritäänkin ehkäisemään juuri pH:n säädön avulla, koska korrosio tapahtuu yleensä tietyllä pH:n alueella. Kloridikorroosiossa matalat pH:n arvot tarkoittavat yleensä kloridien pitoisuuden nousua, jolloin ylimenojärjestelmässä alkaa muodostua suolahappoa. Raakaöljyn tislauksyksikön ylimenojärjestelmän pH:n alueelle annetaan joskus jopa erittäin tiukkoja rajoja (5,6...6,5), mutta yleensä pH-alue on yksikkökohtainen ja riippuu hyvin paljon syötettävistä raakaöljylaaduista.[21] Porvoon jalostamolla on pH:n säädössä pyritty yleensä pitämään pH neutraalilla alueella n. 5,5...6,5, minimoimalla samanaikaisesti syötettävän lipeän määrää, koska lipeä aiheuttaa ongelmia pohjaöljyketjun jatkoyksiköissä. Raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän tarkkailuraporttien pH-tulokset ovat esitetty kuvassa 27.

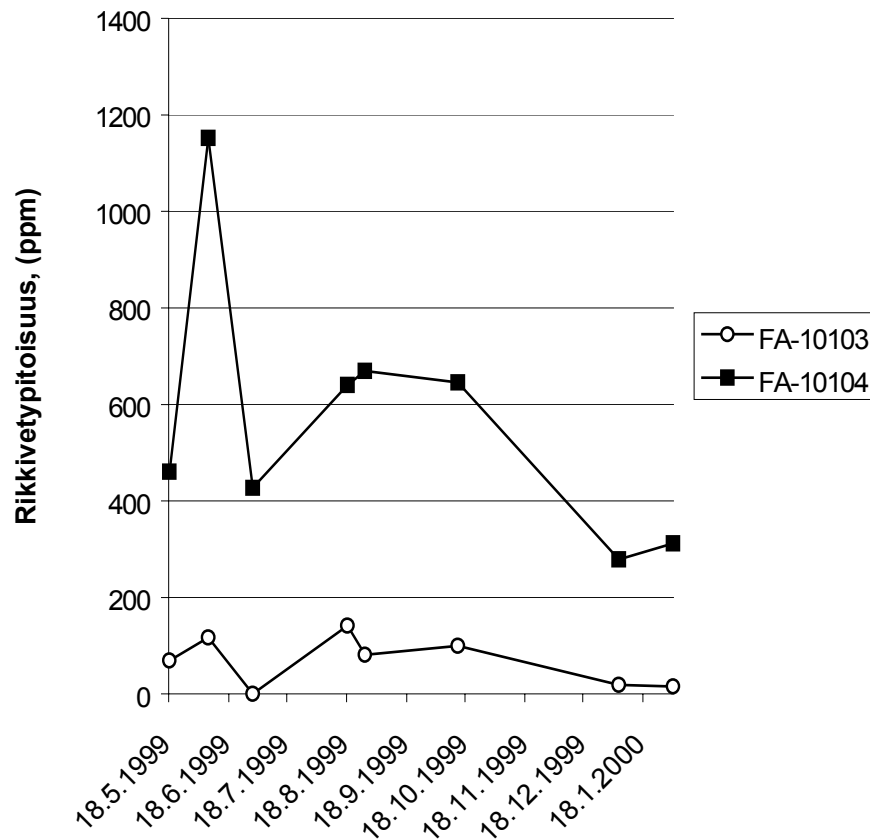


Kuva 27. Raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän vesien pH kuukausittaisten tarkkailuraporttien perusteella.

Kuvasta 27 nähdään, että ylimenovesien pH on vaihdellut, kesäkuun –99 jälkeen kuukausittaisissa tarkkailuraporteissa välillä 4,8...6,9. Tällöin voidaan olettaa pH:n säädön olevan melko hyvin hallittua. Kuukausittaista raporteista voidaan myös mainita, että kloridipitoisuudet ovat olleet yleensä melko pieniä 0...13 ppm. Suurempia kloridipiikkejä ei ainakaan seurantaraporteissa ole havaittu.

Rikkivedyn pitoisuudet ylimenojärjestelmän vesissä ovat yleensä olleet myös varsin pieniä, mutta selviä piikkejä melko korkeista pitoisuuksistakin löytyy kesäkuun –99 jälkeen tehdyistä analyyseistä. Rikkivetypitoisuudet raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän vesissä on esitetty kuvassa 28.

### Ylimenovesien rikkivetypitoisuudet



Kuva 28. Raakaöljyn tislauksen ylimenojärjestelmän vesien rikkivetypitoisuudet kuukausittaisten tarkkailuraporttien perusteella.

Kuvasta 28 nähdään, että suoratislauskolonnin ylimenosäiliön (FA-10103) vesien rikkivetypitoisuudet ovat olleet yleensä melko pieniä, mutta butaanipoistokolonnin ylimenosäiliön (FA-10104) rikkivetypitoisuudet ovat olleet selvästi korkeampia. Lisäksi FA-10104:n vesien rikkivetypitoisuuksista löytyy korkeita piikkejä esim. 7.6.1999 rikkivetypitoisuus oli 1152 ppm. Tällaiset rikkivetypitoisuuksien heilahtelut johtuvat yleensä rikkipitoisista raakaöljylaaduista. On selvää, että tämän kaltaiset pitoisuuksien heilahtelut aiheuttavat ongelmia ylimenojärjestelmän korroosionestossa ja niiden ehkäisemiseksi joudutaan apuaineiden syöttöä yleensä nostamaan huomattavasti. Rikkipitoisilla raakaöljylaaduilla pitääkin ottaa huomioon apuaineiden syötön reilu lisäys ja sen vaikutuksien seuraaminen sekä yksikössä että jatkokäsittely-yksiköissä.

## 12 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMINPITEET

Lämmönvaihtimien likaantumisen seurantaohjelmalla voidaan seurata lämmönvaihtimien likaantumista, vaikkakin ohjelma laskee osalle lämmönvaihtimista liian suuret lämpötehon arvot. Lämpötehojen korkeammat arvot johtuvat lähinnä siitä, että virtaavista nesteistä on osa kaasufaasissa, vaikka ohjelmassa oletetaan, että virtaavat nesteet ovat yksifaasisia nestevirtoja. Tällöin ohjelman antamat lämmönsiirtokertoimet saattavat olla liian suuria. Kuitenkin jos ohjelmalla on laskettu lähtötaso, esimerkiksi seisokin jälkeen, mihin lämpötehoja voidaan verrata, saadaan ohjelman avulla seurattua lämmönvaihtimien likaantumista pitkänkin ajan kuluttua. Lisäksi ohjelma antaa hyödyllistä tietoa erilaisista tilanteista esim. eri raakaöljysyöttöjen likaavista ominaisuuksista. Tällöin on helpompi käytännössä ennustaa mikä/mitkä lämmönvaihtimet ovat likaisimpia ja tarvitsevat tällöin puhdistusta. Kuten aiemmin on jo ilmennyt, ei yksikäsitteistä rajaa puhdistustarpeelle voida antaa. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että jos lämmönvaihtimen kokonaislämpöteho on alle 30 % suunnitellusta on lämmönvaihtimen puhdistus kannattavaa.

Lämmönvaihtimien likaantumista laskettaessa havaittiin varsinkin pohjaöljyvaihtimien pesulla olevan myös pidempiaikaista hyötyä. Tarkasteltaessa lämmönvaihtimien pesujen vaikutusta lämmönsiirron tehostamiseksi, pitää kuitenkin tarkastella koko esilämmitysketjua ja kaikkia siihen vaikuttavia suureita. Tällöin ohjelma antaa kyllä muutoksen suunnan, muttei välttämättä tarkkaa arvoa lämmön tehokkuuden kasvuun. Yleensä jokaiselle tuoteketjulle voidaan olettaa tietty vakio lämpöteho, jonka tuotevirta luovuttaa raakaöljylle. Tällöin lämpötehon suuruus ei muutu, vaikka tuoteketjun lämmönvaihtimia pestään, vaan ainoastaan paikka, jossa lämpötehoa luovutetaan, vaihtuu. Lämmönvaihtimien likaantumista kannattaa kuitenkin seurata eri tuoteketjuina, esim. pohjaöljyketju, koska tällöin nähdään onko lämmönvaihtimien pesulla todellista hyötyä pidemmällä aikavälillä. Yleisesti voidaan sanoa, että pohjaöljylämmönvaihtimet ovat herkimmin likaantuvia ja niiden säännöllisellä puhdistuksella voidaan säästää polttokaasukustannuksissa. Tällöin varsinkin uuneja edeltävien pohjaöljylämmönvaihtimien puhdistus on kannattavaa.



Raakaöljyn tislauksen suolanpoistoaste on seurantajakson aikana ollut varsin hyvä, mutta suolanpoistimiin kertynyt kiintoaine on aiheuttanut ongelmia suolanpoistimien toiminnassa. Suolanpoistimien jännitteiden heilahtelut eivät vielä ole näkyneet varsinaisesti suolanpoistoasteessa, koska yleensä jännitteet laskevat ensin FA-10101 A:ssa, joka on järjestyksessä ensimmäisenä. Tämä johtunee siitä, että suurin osa kiintoaineesta on kertynyt A-suolanpoistimeen. Tällöin FA-10101 B vielä poistaa suoloja tehokkaasti, vaikka A-suolanpoistimen suolanpoistoaste olisikin heikompi.

Nykyisessä tilanteessa suolanpoistimien raakaöljysyöttö on noin 1100 t/h, kun suolanpoistimet on suunniteltu 800 t/h raakaöljysyötölle. Tämä tarkoittaa sitä, että suolanpoistimien viipymäajat ovat laskeneet suunnitellusta 15 minuutista jopa alle 10 minuuttiin, vaikka suolanpoistimet olisivat täysin puhtaita. On selvää, että jos suolanpoistimiin on vielä kertynyt 1-1,5 metriä sakkaa, viipymäajat suolanpoistimilla ovat minuuttien luokkaa ja suolanpoistimet eivät toimi riittävän tehokkaasti. Suolanpoistimen toiminnan kannalta olisi tärkeää suunnitella tehokas menetelmä kiintoaineiden poistamiseksi. Nykyään käytännössä kiintoainetta poistetaan tietyin väliajoin tyhjentämällä suolanpoistimet (varsinkin FA-10101 A) ja imemällä imuautolla kiintoaineet pois suolanpoistimesta. Käytännössä tämä kuitenkin yleensä tarkoittaa sitä, että tällöin osa kiintoaineesta on jo kulkeutunut suolanpoistimelta eteenpäin. Tämän takia suolanpoistimille olisi järkevää suunnitella tehokas kiintoaineen poistomenetelmä (ns. mud-washing).[ 25, 27]

Raakaöljyn ylimenokorroosion seurannassa kannattaa huomioida eri raakaöljyjen syöttölaatuojen muutokset ja varsinkin nykyisin yleistyvässä olevien nafteenihappopitoisten raakaöljyalaatujen ennalta tutkiminen olisi tällöin tärkeää. Eri raakaöljyalaadut eivät välttämättä ole keskenään yhteensopivia ja tällöin ne saattavat aiheuttaa suolanpoistimilla ongelmia rajapinnan säädössä ja ylimenossa paikoin erittäin kovaakin korroosiota. Raakaöljyalaatujen tutkintaan ei tämän työn puitteissa ole kuitenkaan ryhdytty. Eri raakaöljyalaatujen korroosiovaikutuksista antaa viitteitä kuitenkin pH:n vaihtelut ja tällöin ylimenovesien seurannan korostaminen onkin tärkeää.

## **12.1 Likaantumisen seurantaohjelman parannusehdotuksia**

Lämmönsiirtolaskennassa käytetyn ohjelman toiminnan kannalta ensiarvoisen tärkeää on syöttää laskettavien lämmönvaihtimien geometriatiedot oikein. Ohjelman geometriatietoja on kuitenkin jouduttu tarkistelemaan lämmönvaihtimien Datasheeteistä ja rakennekuvista, jolloin varsinkin Datasheetit osoittautuivat erittäinkin puutteellisiksi ja jopa ristiriitaisiksi. Tällöin ohjelmaan annetut geometriatiedot eivät välttämättä ole oikeat ja laskenta saattaa olla väärässä. Ohjelman toiminnan kannalta olisi ensiarvoisen tärkeää, että lämmönvaihtimien Datasheetit olisivat ajan tasalla. Lisäksi ohjelmassa oletetaan, että lämmönvaihtimien virtauksen ovat yksifaasivirtauksia nesteelle, vaikka tietyissä vaihtimissa on virtaavasta nesteestä melko suuri osa jo kaasuuntunut. Tästä johtuen ohjelman antamat lämmönsiirtotehot ovat oikeita lämpötehoja suurempia.

Myös lämmönvaihtimien ohituksien systemaattinen kirjaus Tosi-päiväkirjaan olisi tärkeää, jotta ohjelmalla voitaisiin tarkistaa jälkikäteenkin eri lämmönsiirtotilanteita. Esilämmityksen automaattiohitukset voidaan kyllä tarkistaa esimerkiksi TOP-järjestelmän piirroista, mutta lämmönvaihtimen käsiventtileillä tehtyjä ohituksia ei jälkikäteen pystytä tarkistamaan.

Työn kokeellisen osan tarkoituksena oli lämmönsiirto-ohjelman toimintaan tutustuminen ja ohjelmassa esiintyneiden vikojen korjaaminen. Tavallisimmat mittapisteiden virheelliset positiot ja osa lämmönvaihtimien geometrisista tiedoista on korjattu, mutta monet ohjelman vaatimat muutokset voidaan tehdä vasta seuraavassa seisokissa, esim. TI-pisteiden muutokset, virtausmittaukset ja viallisen käsiventtiin korjaus.

Työssä pohdittiin myös ohjelman muuntamista ns. ONLINE-tyyppiseksi, jolloin ohjelmalla voitaisiin helposti seurata lämmönvaihtimien likaantumista. Ongelmana on kuitenkin ohjelmassa suoritettava likaantumiskertoimien iterointi, joka tällä hetkellä on ohjelmassa tehtävä käsin suunnitteluarvojen perusteella. Ohjelmaan pystynee kuitenkin helposti lisäämään iterointisilmukan, joka muuttaa likakertoimia halutulla tavalla. Tällöin ohjelma voitaisiin muuttaa ONLINE-tyyppiseksi. Kuitenkin työssä

käytetty HTFS-ohjelmassa TASC3 on jo työssä tehtyjen kuuden eri ajon aikana esiintynyt hieman epäjohdonmukaisia ongelmia, jotka ovat aiheuttaneet ohjelman kaatumisen. Näihin vikoihin ei tässä työssä ole tarkemmin perehdytty. HTFS-ohjelman uudemmissa versioissa ei tämän kaltaisia ongelmia ole kuitenkaan ilmeisesti esiintynyt ja ohjelmaa käytetäänkin tehokkaasti suunnittelun apuna mm. Fortum Engineering:issä.

## 13 KIRJALLISUUS

---

1. Byrne, R. C., Standards of the tubular exchanger manufacturers association (TEMA), 7<sup>th</sup> ed., TEMA INC, New York, 1998
2. Mukherjee, R., Effectively Design Shell and Tube Heat Exchangers, *Chem. Eng. Prog.*, **94** (1998), Feb No 2, ss 21...37
3. Jehkonen, L., RT3:n lämpöjunan likaantumisen seurantaohjelma, Neste Oy, Kehitysosasto, 1998, ss 1...11
4. Barletta, A., F., Revamping crude units, *Hydrocarbon Proc*, Feb 1998 issue, ss 51...57
5. Främling, t., Ohjekirja, Tutkimusraportti, 2p., Neste Engineering, 1990, ss 0...26
6. Greene., B., BASF Corp., Mt. Olive, New Jersey, A practical guide to shell and tube heat exchangers, *Hydrocarbon Proc*, **78** (1999), Jan No1, ss 79...88
7. Neste D101, Painesäiliöt ja lämmönsiirtimet, suunnittelu, valmistus ja tarkastus, 2.p., Neste teknologia, 1990, ss 0...17
8. Tinker, T., Shellside Characteristics of Shell and tube Heat exchangers: A Simplified Rating System for Commercial Heat Exchangers, *Trans. ASME*, **80** (1958), ss. 36...52
9. Lundsford, K., M., Bryan Research & Engineering, Inc.,USA, Increasing heat exchanger performance, *Hydrocarbon Proc.*, **3** (1998),Mar No 3, ss 55...61

- 
10. Mukherjee, R., Conquer heat exchanger fouling, *Hydrocarbon Proc*, **75** (1996), Jan No 1, ss 121...127
  11. Epstein, N., Fouling in heat exchangers, Proc. Sixth International Heat Transfer Conf., Keynote Papers, **6** (1978), Toronto, Hemisphere Publishing Corp., New York, ss. 235...253
  12. Gerhartz, W., Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5 th Completely Revised Edition, Vol B3, Unit Operations II, ss 2-101...2-103
  13. Chaffee, B. A., Comer, D. G., de Jong, A., Sigmon, J. L., Reducing energy costs, *Hydrocarbon Proc*, **1** (1998/99), Jan 1, ss 55...59
  14. Gough, M. J., and Rogers, J. V., Reduced fouling by enhanced heat transfer using wire matrix radial mixing elements, AIChE Symposium Series, **83** (1987), No 257, ss. 16...21
  15. Joshi, H. M., Mitigating fouling to improve heat exchanger reliability, *Hydrocarbon Proc*, **78** (1999), Jan 1, ss 93...95
  16. Mukherjee, R., Broaden Your Heat Exchanger Design Skills, *Chem. Eng. Prog*, **98** (1998), Mar No 3, ss 35...43
  17. Storey, D., van der ploeg, R., Compact exchanger to reduce refinery fouling, *Petroleum Technology quaterly*, Aut 1997, ss. 88...89
  18. Strong, R., Vanhove, A., Field history with low-salting crude unit neutralizers, *National Petroleum Refiners Association*, Annual meeting, 1998 NPRA, Mar 15-17, San Francisco, California, ss 1...9

- 
19. Tebbal, S., Kane, R., Hau, J. L., Mirabal, E. J., Critical factors affecting crude corrosivity, *Petroleum Technology quarterly*, Spring 1997, ss 85...91
  20. Babaian-Kibala, E., Lee, C., Rusk, G., Blanchard, K., Rose, T., Uehlein, B., Quinter, R., Summers, M., Identify and prevent refinery naphthenic acid corrosion, *Fuel Reformulation*, Jan/Feb 1994, ss 43...48
  21. Lieberman, N., P., Four steps solve crude-tower overhead corrosion problems, *Oil&Gas Journal*, **91** (1993), July No 27, ss 47...50
  22. Tang, S., Jiang, Z., Mao, Q., New inhibitor reduces corrosion in crude tower overhead, *Oil&Gas Journal*, Sept. 1994 No 27, ss 68...70
  23. Marsco International Ltd. Electrical Desalting Unit, Operating/Maintenance manual, Lummus Nederland BV for Neste Oy, Finland,
  24. Barnett, J., W., Desalters can remove more than salts and sediment, *Oil & Gas Journal*, **86** (1988), Apr No 15, ss 43...49
  25. Schantz, S., Elliott, P., Economic implications of solids in crude and their ultimate fate in the refining process, NPRA Annual meeting, (1994), March 20-22, San Antonio, Texas, National Petroleum Refiners Association (AM-94-37), Washington, ss 1...7
  26. Scherrer, C., Durrieu, M., Richmond, J., R., A technique to alleviate heat transfer loss due to fouling of crude preheat exchangers, NPRA Annual meeting, (1979), March 25-27, San Antonio, Texas, National Petroleum Refiners Association (AM-79-50), Washington, ss 1...25
  27. Barnett, J., W., Beteer way to clean storage tanks and desalters, *Hydrocarbon Proc (Maintenance)*, **60** (1980), Jan No 1, ss 82...86

- 
28. Helm, L., Spencer, C., van der Dungen, R.T., Minimize wastewater contamination, *Hydrocarbon Proc*, **54** (1998), June No 3, ss 91...100
  29. NPRA Q&G-Conclusion, Optimizing desalter operations can help refiners cope with heavy crudes, *Oil & Gas Journal*, **95** (1997), Oct 27 No 43, ss 71...75
  30. Markkanen, V., *RT3:n käyttökäsikirja*, Fortum Oil and Gas, Porvoon jalostamo, 10.7.1997, pp 1..51
  31. Mikkola, A., *EDS (Energy Dispersive x-ray Spectrometry) tutkimustiedote*, 11.2.2000, pp 1...2
  32. Holappa, A., *Ylimenon ja suolanpoiston tarkkailuraportit RT3:ssa*, Prochem Oy, 1999/2000.

---

## LIITELUETTELO

- Liite I Aineominaisuuslaskennan kuvaajia raakaöljylle
- Liite II Laskentaohjelman Input-tiedosto
- Liite III Laskentaohjelman Output-tiedosto
- Liite IV Lämmönvaihtimien likaantumisen seurantaohjelman tulostustaulukko
- Liite V EDS-analyysin spektrit vaihtimien EA-10133 CD sakoille
- Liite VI Raakaöljyn esilämmityksen tuotevaihtimien lämpötehot vuoden 1999 alusta
- Liite VII Raakaöljyn tislauksen kiertopalautuksien lämpötehojen muuttuminen raakaöljyn esilämmityksessä