

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT  
LUT School of Engineering Science  
Kemiantekniikka

*Ossi Junnonen*

**MÄNTYÖLJYN KÄSITTELYN VAKUUMIJÄRJESTELMÄN TARKASTELU JA  
KEHITTÄMINEN**

Työn tarkastajat:      Professori Tuomas Koiranen  
                                 FT Risto Kotilainen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT School of Engineering Science  
Kemiantekniikka

Ossi Junnonen

### **Mäntyöljyn käsittelyn vakuumijärjestelmän tarkastelu ja kehittäminen**

Diplomityö

2020

72 sivua, 22 kuvaa, 8 taulukkoa ja 14 liitettä

Tarkastajat: Professori Tuomas Koironen  
FT Risto Kotilainen

Hakusanat: biojalostamo, bioöljy, vakuumi, ejektori, simulointi

Tämän diplomityön aiheena oli biojalostamon syötön käsittelyn vakuumijärjestelmän kartoitus ja mahdolliset kehitystoimenpiteet. Tutkimuksessa vakuumijärjestelmä kartoitettiin ja pyrittiin löytämään vakuumijärjestelmän pullonkaulat ja tätä kautta mahdolliset potentiaaliset kehityskohteet.

Työssä kuvattiin vakuumijärjestelmään kuuluvien laitteiden toiminta ja niihin liittyvät haasteet. Ejektoreiden mitoitusta ja toimintaa käsiteltiin mitoitussyhtälöiden ja ejektorin toimintaa kuvaavien simulaatiomallien kautta.

Vakuumijärjestelmästä luotiin Aspen Plus V10 simulointiohjelmistolla malli. Tämän kautta pyrittiin löytämään järjestelmän pullonkaulapaikat massavirtauksiin perustuen. Malliin kuvattiin ejektorit ja muut vakuumijärjestelmän laitteet. Vakuumijärjestelmän syöttöainetiedot kerättiin aiemmin toteutetuista haihdutinmalleista. Näiden mallien antamien tietojen pohjalta koostettiin vakuumijärjestelmän mallin syöttötiedot.

Simuloinnin perusteella saatiin vahvistusta toimenpiteille, jotka voivat vakauttaa vakuumijärjestelmän toimintaa. Mitään selkeää yksittäistä vikaa järjestelmästä ei löytynyt. Simuloinnin kautta saatiin kuitenkin vahvistusta sille, että mahdollisimman tasalaatuiset syöttöaineet ovat myös vakuumijärjestelmän toiminnan kannalta kriittisiä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT  
LUT School of Engineering Science  
Chemical Engineering

Ossi Junnonen

### **Review and development of a vacuum system of treatment of tall oil**

Master's thesis

2020

72 Pages, 24 Figures, 8 Tables, and 14 Appendices

Inspectors: Professori Tuomas Koiranen  
Ph.D. Risto Kotilainen

Keywords: biorefinery, bio-oil, vacuum, ejector, simulation

The subject of this Master's Thesis was the review of the talloil treatment unit's vacuum system and possible development actions. The study mapped the vacuum system and look for to identify bottlenecks in the vacuum system and thereby identify potential potential areas for development.

The work described the operation of the vacuum system equipment and the related challenges. The dimensioning and operation of the ejectors were discussed through dimensioning formulas and models describing the operation of the ejector.

The vacuum system was modeled using the Aspen Plus V10 simulation software. Through this, efforts were made to find bottlenecks in the system based on mass flows. The model describes the ejectors and other vacuum system devices. Vacuum system feedstock data were collected from previously implemented evaporator models. Based on the data provided by these models, the vacuum system model input data was compiled.

The simulation provided confirmation of measures that could stabilize the operation of the vacuum system. No clear single fault in the system was found. However, simulation confirmed that feed materials of the highest quality are also critical to the operation of the vacuum system

## **Alkusanat**

Diplomityö on toteutettu vuoden 2019 aikana biojalostamolla. Työn toteuttaminen omien töiden ohessa tehtynä osoittautui odotetun haasteelliseksi. Työ saatiin kuitenkin toteutettua ja sen kautta pääsin henkilökohtaisesti syventymään melko syvällisestikin vastuullani olevan prosessiyksikön toimintaan.

Kiitokset työn tarkastajille professori Tuomas Koiraselle ja Risto Kotilaiselle. Haluan myös ilmaista erityiskiitollisuuteni Aspen-simulointiin liittyen Esko Lahdenperälle, sekä Nina Halmeelle, joiden ansiosta pääsin simuloinneissa eteenpäin. Kati Viloselle kuuluu kiitokset laboratorioanalytiikkaan ja muutenkin diplomityön valmiiksi saattamiseen liittyvästä tuesta. Opiskelukavereistani kiitokset kuuluvat Mikko Saariselle ja Juuso Aaltovirrälle, joiden kanssa suoriudimme yhdessä yliopisto-opintojen haasteista.

Ossi Junnonen

6.1.2020 Lappeenranta

## Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO.....	10
1.1.	Työn tavoite .....	10
I	TEORIAOSA .....	11
2.	BIOJALOSTAMO .....	11
2.1.	Biojalostamo ja sen syöttöaine .....	11
2.2.	Erilaiset syöttöainetyypit .....	13
2.3.	Esikäsittelymenetelmät .....	14
2.3.1.	Biojalostamon syötön käsittelyn eri jakeet.....	15
2.4.	Syötön käsittelyn laitteisto .....	15
2.5.	Syötön käsittelyn vakuumijärjestelmä.....	16
2.6.	Vakuumijärjestelmän rajoitteet ja sen ongelmat .....	17
2.7.	Syötön käsittelyprosessin kehitystoimet.....	20
2.7.1.	Vakuumijärjestelmien revamp.....	20
3.	VAKUUMIJÄRJESTELMÄT .....	21
3.2.	Vakuumin tekemisen teoria.....	21
3.3.	Prosessiyksikön vakuumilaitteistot .....	22
3.4.	Nesterengaspumppu .....	22
3.5.	Ejektorit .....	24
3.6.	Lauhduttimet.....	27
3.7.	Kylmäerottimet.....	28
3.8.	Vakuumijärjestelmän ylösajo .....	28
3.8.1.	Heliumtestauksen periaatteet.....	29
3.9.	Ejektoreiden toiminta ja testaus.....	30
3.9.1.	Ejektoreiden tehdastestaus.....	32
3.9.2.	Vakuumijärjestelmän tarkastukset.....	33
4.	KÄSITTELYPROSESSIN TASEET JA TASETÄSMÄYS.....	34
4.1.	Käsittelyprosessin taseet .....	34
4.2.	Tasetäsmäyksen teoria .....	34
4.3.	Tasetäsmäyksen hyödyntäminen työssä .....	35
5.	MITOITUSYHTÄLÖIDEN MÄÄRITTÄMINEN.....	35
5.1.	Ejektorin mitoittaminen .....	35

5.2.	Mitoitusyhtälöt.....	38
5.3.	Ratkaisumallit .....	40
II KOKEELLINEN OSA.....		42
6.	SIMULOINTI.....	42
6.1.	Vakuumijärjestelmän simulointi .....	42
6.2.	Simulointiohjelmisto .....	44
6.2.3.	Haihduinmallit.....	45
6.2.4.	Vakuumiyksikön simulointimalli .....	46
6.2.5.	Stage-1 ja nesterengaspumppu .....	47
6.2.6.	Stage-2.....	49
6.2.7.	Stage-3.....	51
6.3.	Simulointimallin termodynaaminen malli .....	52
6.4.	Mallin verifiointi ja validointi .....	53
7.	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU .....	54
7.1.	Mallin syötteet ja simuloinnin kulku haihduinmallissa.....	54
7.2.	Simuloinnin kulku vakuumijärjestelmän mallissa.....	55
7.3.	Koeajosarjojen havaintoja .....	57
7.4.1	Käyttöhöyryn paineen nostaminen .....	59
7.4.2	Vakuumijärjestelmien erottaminen toisistaan .....	60
7.4.3.	CT 3 & 4 analyysit .....	61
7.4.4.	Kylmäerottimien tyhjentymisongelmat ja hartsihapot .....	61
7.4.5.	Suihkulauhduttimet ja ejektorihöyryt .....	62
7.4.6.	Käyttöhöyryn paineen muuttaminen .....	64
7.4.7.	Syöttöainelaatujen vaikutus vakuumijärjestelmään.....	64
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	66
9.	YHTEENVETO .....	67
Lähdeluettelo .....		69
LIITTEET .....		72

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Lyhenteet

EK	esikäsittely
VK	vetykäsittely
RMÖ	raakamäntyöljy
PMÖ	puhdistettu mäntyöljy
CT	kylmäerotin
SL	suihkulauhdutin
LRP	nesterengaspumppu
FAT	laitteiston tehdastestaus
KS18	Suurseisokki 2018
STEP1	esikäsittelyn pullonkaulojen poistoprojekti 2017-2018
GCMMSD	kaasukromatografimassaspektrometri

### Dimensiottomat yksiköt

CR	kompressiosuhde	[-]
ER	massavirtasuhde	[-]
Ma	Machin luku	[-]
$f_t$	lämpötilan korjauskerroin	[-]
$f_m$	moolimassan korjauskerroin	[-]
$M_{p2}$	käyttöhöyryn paisuntakerrointa kuvaava Machin-luku	[-]
w	sekoittumissuhde	[-]
$\gamma$	isentrooppinen paisuntakerroin	[-]
$\eta_n$	höyrysuuttimen tehokkuuskerroin	[-]

$M_{e2}$	imukaasun paisuntakierroin imukammiossa	[-]
$M^*$	paikallisen nopeuden suhde äänennopeuteen kriittisissä olosuhteissa	[-]
$\eta_d$	diffuusorin tehokkuus	[-]
$a_i$	aktiivisuus	[-]
$f_i$	liuoksen fugasiteetti	[-]
$f_i^0$	puhdas liuos	[-]

### Yksiköt

$p$	paine	[kPa]
$p_c$	kompressoidun kaasun poistopaine	[kPa]
$p_e$	imupaine	[kPa]
$p_p$	käyttöhöyryn paine	[kPa]
$Q_L$	Vuodon määrä	[mbar l/s]
$V$	Astian tilavuus	[l]
$\Delta p$	Paine-ero	[mbar]
$t$	aika	[s]
$q_{m,e}$	imuvirta prosessista	[kg/s]
$q_{m,s}$	Käyttöhöyryvirta ejektorille	[kg/s]
$q_{m,red}$	reduoitu massavirta	[kg/s]
$q_m$	todellinen massavirta	[kg/s]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/h]
$\dot{m}$ sisään	massavirta sisään	[kg/h]
$\dot{m}$ ulos	massavirta ulos	[kg/h]



$\Delta P$	Sähkö ja mekaanisen energiantehon muutos	[kW]
$\Delta Q$	Lämpöenergian tehon muutos	[kW]
$\dot{m}$	Systeemin läpikulkeva massavirtaus	[kg/s]
$\Delta h$	Massavirtauksen ominaisenergian muutos	[kJ/kg]
$\rho$	Massavirtauksen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta v$	Massavirtauksen nopeus	[m/s]
$\Delta z$	Massavirtauksen korkeus	[m]
$m_p$	käyttöhöyryn virtaus	[kg/h]
$m_e$	imukaasun virtaus	[kg/h]
$m_c$	kompressoidun höyrykaasuseoksen virtaus	[kg/h]
$p_2$	paine höyrysuuttimen ulostulossa	[kPa]
$A$	Pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$P$	teho	[kW]
$H$	entalpia	[kJ/kg]

## 1. JOHDANTO

Biojalostamo on perustettu tuottamaan uusiutuvia polttoaineita. Jalostamo tuottaa syöttöaineesta uusiutuvaa dieseliä ja naftaa. Uusiutuvat polttoaineet ovat käyttöominaisuuksiltaan verrannollisia normaaleihin fossiilisiin polttoaineisiin. Jalostamon syöte vaatii käsittelyn, ennen kuin siitä tehdään biopolttoaineita. Ensimmäisessä vaiheessa syöttöaine puhdistetaan, jotta se voidaan syöttää vetykäsittelyosaan (UPM, UPM Biopolttoaineet, 2019). Syötön käsittely tapahtuu matalassa paineessa, koska muuten haihdutuksessa päädyttäisiin korkeisiin lämpötiloihin, mitkä johtavat helposti öljykomponenttien hajoamiseen (Hiltunen, 2016).

Syötön käsittely toimii erilaisissa olosuhteissa ja ne vaihtelevat prosessivaiheittain. Laitoksella on ollut haasteena säilyttää vakuumit riittävän matalassa paineessa erilaisissa ajotilanteissa.

Alipaineen heikentyminen aiheuttaa ongelmia yksikössä. Käytännössä haihdutus heikkenee ja loppuu tietyssä paineessa kokonaan. Tämä aiheuttaa syötön puhdistuksen loppumisen ja tätä kautta huonoimmassa tapauksessa tuotantotappioita, kun vetykäsittelyyn syötettäväksi kelpaavan puhdistetun syötön tuotanto loppuu.

Yksikön optimaalisen syöttötason saavuttaminen on osoittautunut haasteelliseksi. Lisäksi myös yksikön likaantuminen, varsinkin vakuumijärjestelmän osalta on ongelma. On myös havaittu, että likaantumista selkeästi edesauttaa vakuumitasojen voimakkaat vaihtelut.

Yksikön vakuumien heikkenemiseen on lukuisia erilaisia syitä. Niitä käsitellään työn kirjallisessa osassa ja pyritään myös tätä kautta löytämään juurisyyt vakuumien heikkenemiselle.

### 1.1. Työn tavoite

Tässä työssä on tarkoituksena kartoittaa ja kuvata vakuumijärjestelmän nykyinen tila. Tavoitteena on myös löytää mahdollisia kehityskohteita, joiden kautta järjestelmän toimintavarmuutta saataisiin parannettua. Eli pyritään löytämään ne mekanismit, jotka aiheuttavat ongelmia käsittelyprosessille vakuumijärjestelmän ongelmien vuoksi.

Vakuumijärjestelmän toimintaa erilaisissa olosuhteissa on tarkoitus simuloida. Simulointien perusteella on tarkoitus luoda ejektorimalli ja tehdä tällä pullonkaulojen tarkastelua vakuumijärjestelmän osalta. Tarkoituksena on selvittää ejektoreiden mitoitusyhtälöt ja simulointi suoritetaan Aspen Plus-simulointiohjelmistolla.

Simulointien perusteella pyritään pääsemään kiinni siihen, miten vakuumlaitteisto käyttäytyy erilaisissa ajotilanteissa. Tätä kautta pyritään selvittämään myös se, että onko nykyisellä vakuumlaitteistolla mahdollista ajaa eri tavalla, jotta laitos toimisi vakaammin. Työssä hyödynnetään aiemmin Aspen-ohjelmistolla toteutettuja käsittelyprosessin haihduttimia kuvaavia malleja. Näistä malleista on tarkoitus saada lauhtumattomien komponenttien lähtöainetiedot ejektorimalliin.

Työn tavoitteena on myös osaltaan havainnollistaa syötteen käsittelyn ja eritoten sen vakuuminjärjestelmän toimintaa. Soveltuvia osia työstä on tarkoitus käyttää esimerkiksi biojalostamolle tulevien uusien työntekijöiden perehdytyksessä. Konkreettisenä esimerkkinä yksikön vuototesauksen kuvaus ja siinä löydettyjen vuotojen havainnollistaminen.

## **I TEORIAOSA**

### **2. BIOJALOSTAMO**

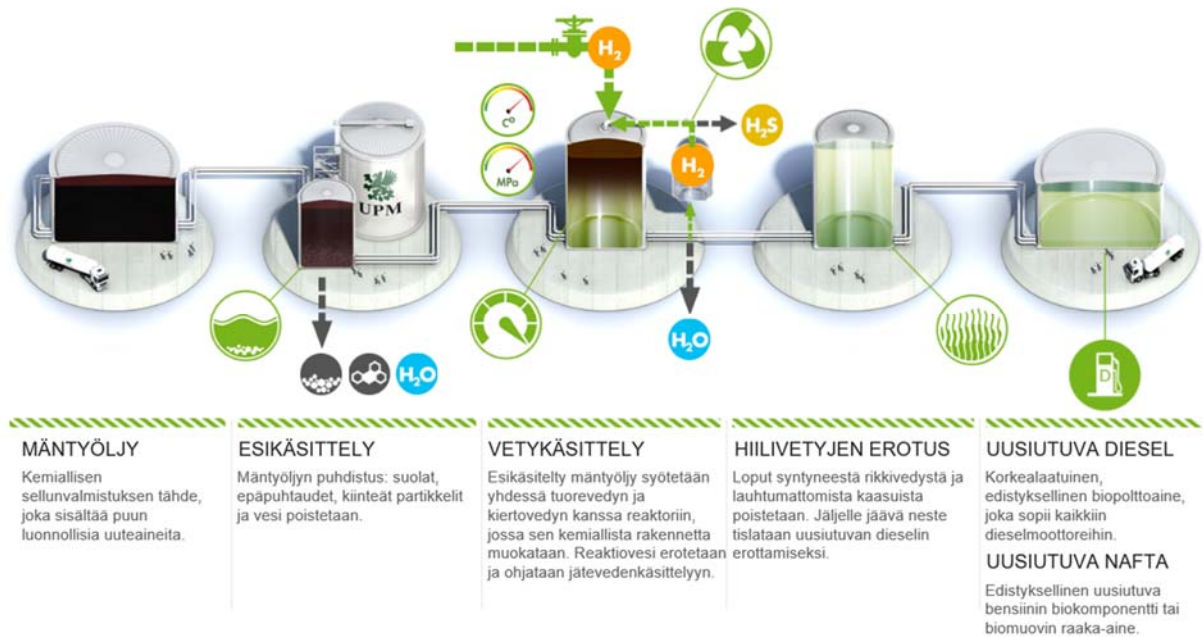
#### **2.1. Biojalostamo ja sen syöttöaine**

Biojalostamo on ensimmäinen kaupallisen mittakaavan laitos, joka tuottaa uusiutuvaa dieseliä ja naftaa puupohjaisesta raaka-aineesta. Jalostamo sijaitsee metsäteollisuuden tehdasintegraatin yhteydessä. Laitoksen vuosittainen tuotantokapasiteetti on yli 100 000 tonnia uusiutuvia biopolttoaineita vuodessa. Biojalostamo työllistää noin 80 henkilöä ja koko liiketoiminta noin 100 henkeä. (UPM, UPM Biopolttoaineet, 2019)

Biojalostamon syöttöaineena toimii selluntuotannon sivuvirta, jota saadaan yhtiön omilta tehtailta ja ulkopuolisilta toimijoilta. Sivuvirta on selluntuotannon tähde ja se syntyy, kun puun uuteaineet erotellaan kuiduista. (UPM, UPM Biopolttoaineet, 2019)

Syötön konvertointi biopolttoaineiksi tapahtuu jalostamon vetykäsittelyosassa korkeassa paineessa ja -lämpötilassa. Ennen vetykäsittelyprosessia syöttö on kuitenkin puhdistettava. Tämä tapahtuu syöttöaineen käsittelyosassa, jossa syötöstä erotetaan epäpuhtaudet ja vetykäsittelyn kannalta ei-toivotut aineet. Syötön käsittelyprosessi toimii erittäin matalassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa.

Muita osia jalostamolla ovat säiliöalue lastaus- ja purkualueineen, käyttöhyödykkeet, sekä hii-livetyjen erotus. Biojalostamon perusidea on nähtävissä kuvasta 1.



Kuva 1 Uusiutuvia polttoaineita tuottavan biojalostamon prosessi, (UPM, UPM Biopolttoaineet, 2019)

Biojalostamon syöttöaineena toimiva syöttö syntyy sellutehtaiden sulfaattiselluloseprosessin sivutuotteena. Syöttöaine koostuu puun uuteainesta ja sen pääasiallisena lähteenä ovat havupuut, tärkeimpänä nimensä mukaisesti mäntypuut. Useilla sellutehtailla raaka-aineena on sekä havu- että lehtipuita. Monen sellutehtaan keittämöllä valmistetaan havu- ja lehtipuuöljyä. Nämä öljyt erotetaan keittämön haihduttamalla erotetusta suovasta (Tapanen, 2009).

Syötön pääkomponentit ovat tärpätti, rasva- ja hartsihapot, sekä neutraaliaineet. Syötön komponenttien koostumus vaihtelee sen mukaan, mistäpäin aine on peräisin. Syöttestä yleisesti seurattuja suureita ovat myös happoluku, saippuoitumisluku ja suopaluku.

Happoluku kertoo, kuinka paljon tarvitaan kaliumhydroksidia neutraloimaan näyte. KOH:n määrä on suoraan verrannollinen syötteen vapaiden rasvahappojen määrään. Suopaluvusta nähdään, kuinka paljon syöttöaineeseen on jäänyt suopaa hapotuksen jäljiltä. Saippuoitumisluku taas kertoo, kuinka paljon tarvitaan kaliumhydroksidia yhden kilogramman rasvojen neutralointiin ja estereiden saippuoitumiseen (Stenius, 2000).

Havupuista valmistetun syöttöaineen happoluku vaihtelee noin 155 – 165 välillä. Koivupuiden öljyn happoluku on vastaavasti matalampi, noin 90 – 120. Havusellua valmistettaessa syöttöainetta saadaan noin 35 kg/t sellua. Sekakeitolla saanto laskee noin 30 kg/t sellua (Riistama;Laitinen;& Vuori, 2003, ss. 135-138).

Syöttöaineen koostumukseen vaikuttaa niin puulaji, kasvupaikka, kuin sellutehtaan käsittelyprosessi. Puun varastoinnilla on myös selkeä vaikutus puun uuteaineiden koostumukseen ja saantoon. (Riistama;Laitinen;& Vuori, 2003, ss. 135-138). Myös syötön käsittelyprosessissa on havaittu ja oletettu tapahtuvan selkeää vaihtelua vuodenaikojen perusteella esimerkiksi neutraaliaineiden määrässä. Tämä taas näkyy kasvavana pikimääränä erityisesti loppukesästä, kun kevään ja alkukesän aikana auringossa varastoituna olleet hakkeet keitetään selluksi.

Syöttöaine ei ole sellaisenaan soveliaista vetykäsittelyn syötteenä. Siitä täytyy poistaa vesi, tärpättijakeet ja hivenaineet. Erityisesti tietyt hivenaineet aiheuttavat ongelmia jalostamon vetykäsittelyosassa. Tunnettuja aineita ovat esimerkiksi natrium ja fosfori (Patenttintro US 8,022,258 B2, 2011, ss. 6-14). Syöttöaineen puhdistus tapahtuu haihdutukseen perustuvassa käsittelyprosessissa. Prosessiyksikön toiminta perustuu fysikaalisiin yksikköoperaatioihin ja siellä ei ole suunniteltu tapahtuvan kemiallisia reaktiota.

## **2.2. Erilaiset syöttöainetyypit**

Jalostamolle tuotava syöttöaine ei ole homogeenista. Sen ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti. Syöttöaineen ominaisuuksiin vaikuttavat eri asiat. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi sellutehtaiden prosessit ja se, mistä puulajista ja millaisista puun kasvuolosuhteissa sellunkeittossa käytetty puuainekas on peräisin. Eri maanosissa kasvaneet puut sisältävät eri määrän eri tyyppisiä puun uuteaineita (Pönni, 2007).

Uuteaineet ovat yhdisteitä, jotka liukenevat puusta poolittomiin tai polaarisiin liuottimiin. Tyyppillinen uuteaineiden pitoisuus puun kuiva-aineesta on 1-5 %. Saippuaimattomat yhdisteet jaetaan eri pääryhmiin eli terpeenit, terpenoidit, rasva-alkoholit ja sterolit. Biopoltoaineiden valmistuksen kannalta kiinnostavimpia ovat rasvat, vahat ja niiden komponentit (Hirsilä, 2005).

Lisäksi uuteaineeksi voidaan katsoa myös puun fenoliset yhdisteet, jotka liittyvät puun sideaineeseen ligniiniin. Männyn uuteaineista voidaan selkeästi erotella rasvahapot, hartsihapot, triglyseridit ja pinosylviini + monometyylieetteri (Pönni, 2007).

Diplomityössä käsitellään kolmea erilaista syöttöainetyyppiä. Suurimmat eroavaisuudet ovat havaittavissa happoluvun, rasva- ja hartsihappojen, sekä neutraaliaineiden pitoisuuksien välillä. Liitteestä VI nähdään, että jalostamon syöttöainetyypit voidaan näiden ominaisuuksien perusteella erotella kolmeen eri perustyyppiin (Halme, 2019).

Käytännössä yksikön syöttöaine on sekoitus markkinoilta saatavilla olevista syöttöaineista. Yleensä jokin syöttöainetyypeistä on hallitsevana komponenttina syötössä. *Halme (2019)* on käsitellyt diplomityössään syöttöaineen käyttäytymistä esikäsitelyssä eri olosuhteissa. Työssä tutkittiin syöttöaineen käyttäytymistä simuloimalla haihduttimien toimintaa. Työn kirjallisessa osuudessa tutkittiin erilaisten syöttöainetyyppien koostumusta. Näiden perusteella pysyttiin koostamaan kolme erilaista perustyyppiä syöttöaineelle.

Tutkimuksen perusteella saatiin määritettyä syöttöaineiden komponentit haihdutinmalleille. Haihdutussimulaatioita tekemällä saatiin myös kerättyä lähtöaineet vakuumiyksikön simulointia varten. Vakuumiyksikön syöttödata kerättiin haihduttimien lauhtumattomista syöttöainejakeista.

### **2.3. Esikäsitelymenetelmät**

Syöttö puhdistetaan esikäsitelyssä, ennen sen varsinaista hyödyntämistä vetykäsitelyssä. Syöttöaine sisältää monia ainesosia, jotka estävät sen käytön raakana vetykäsitelyssä. Metallit ja muut epäpuhtaudet ovat pääasiallisesti peräisin sellun keitossa käytettävästä mustalipeästä. *Hiltunen (2016)* on käsitellyt diplomityössään erityyppisiä mahdollisuuksia syötön esikäsitelyyn. Esikäsitelyltä vaaditut ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, mihin jatkokäyttöön syöttöaine on menossa. Dieselin valmistuksessa käytettävälle syöttöaineelle on tiukemmat puhtausvaatimukset, kuin esimerkiksi hartsi- ja rasvahappojen tislaukseen käytettävällä. Varsinkin epäorgaanisiin metalleihin liittyen puhtausvaatimukset ovat varsin tiukat. Myllyjoja *et al.* suosittavat myös patentissaan erittäin matalia pitoisuuksia. Maa-alkali- ja alkalimetalleille, sekä muille metalleille suositellaan 1 – 10 ppm pitoisuuksia ja fosforille 5 – 30 ppm pitoisuuksia (Patenttinro US 8,022,258 B2, 2011, ss. 7-8).

Syötön käsittely voidaan toteuttaa eri tavoin. Yleisiä esikäsitelymalleja Syöttöaineelle ovat happokäsittely, hiilidioksidikäsitely, degumming-, valkaisu- ja lämpökäsittelymenetelmä. *Hiltunen (2016)* toteaa työssään degumming-, valkaisu- ja laimean happopesumenetelmän soveliaimmiksi esikäsitelymenetelmiksi, kun esikäsitelty syöttöaine menee tislaukseen. Hiilidioksidikäsitely on yleensä sijoitettu sellutehtaan yhteyteen. Sitä ei varsinaisesti ole käytetty pelkän syötön esikäsitelyn yhteydessä (*Hiltunen, 2016*).

Syötön esikäsitelyssä voidaan myös hyödyntää neste-nestenestesysteemeitä. Tällaisissa prosesseissa hyödynnetään esimerkiksi dispersiota, pisaroiden yhdistymistä, suspensiota, lämmön-

ja aineensirtoa ja erilaisia kemiallisia reaktioita. Käytännössä neste-nestesysteemeissä hyödynnetään sekoitusta, laskeutusta ja uuttoa (Hiltunen, 2016).

### **2.3.1. Biojalostamon syötön käsittelyn eri jakeet**

Biojalostamon syötön käsittelyssä syöttöaine käsitellään vetykäsittelyn syöttöaineeksi soveltuvaksi. Liitteestä XIII on nähtävissä prosesseista ulos otettavat jakeet.

### **2.4. Syötön käsittelyn laitteisto**

Syötön käsittelyprosessin toiminta perustuu haihdutukseen erityyppisillä haihduttimilla eri painetasoissa ja lämpötiloissa. Ensimmäisessä vaiheessa syötöstä poistetaan vesi ja tärpätti. Samassa painetasossa olevalla haihduttimella haihdutetaan loput vesi- ja tärpättijakeet pois syötöstä. Lauhtumattomat kaasut ohjataan lauhduttimelle ja sieltä vakuumijärjestelmään (Hiironen, 2015).

Syöttöaine johdetaan 2.- ja 3.-vaiheissa seuraaville haihduttimille. Syötöstä haihdutetaan kevyemmät rasvahappojakeet, jotka lauhdutetaan, kerätään talteen ja ohjataan säiliöön. Raskaampi syöttöjake johdetaan seuraavaan vaiheeseen, jossa syöttö käsitellään vetykäsittelyyn sopivaksi puhdistetuksi syöttöaineeksi. Haihdutuksessa erotettu raskain jake ohjataan haihduttimelta piki kierron kautta varastosäiliöön.

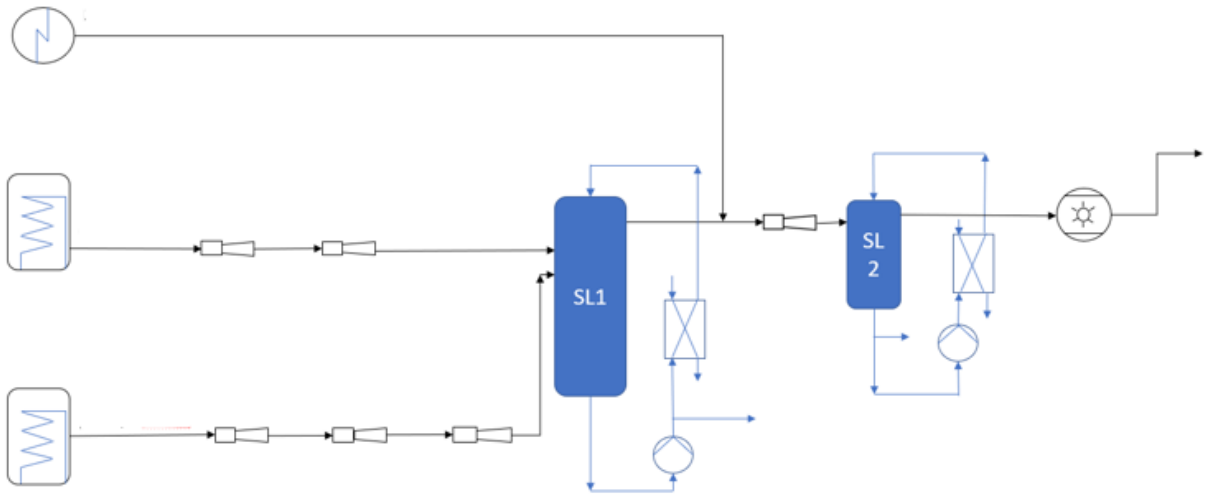
Lauhtumattomat kaasut ohjataan vakuumijärjestelmään cold trap - kylmäerottimien kautta. Erottimella suurin osa lauhduttimista rasvahapoista nesteytyy lauhduttimen sisällä olevan jäädytysvesikierukan pinnalle ja valuu erottimen pohjalle. Täältä ne pumpataan pois lauhduttimen nestepinnan noustua riittävän korkealle.

Vetykäsittelyn katalyyteille haitalliset hivenaineet pyritään syöttöaineen käsittelyssä ohjamaan käsittelyssä erotettavaan raskaimpaan jakeeseen.

Hiltusen mukaan tavallisimpia syöttöaineessa olevia metalleja ovat alkalimetallit (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) eli näiden suolat ja -saippuat. Lisäksi muita alkuaineita ja yhdisteitä ovat maaalkalimetallien (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) suolat ja -saippuat, siirtymämetallit, kuidut ja ligiiniyhdisteet.

## 2.5. Syötön käsittelyn vakuumijärjestelmä

Biojalostamon syötön käsittely toimii syvässä vakuuissa. Vakuumi saadaan aikaiseksi ejektoreilla, sekä nesterengaspumpulla. Vakuumijärjestelmän periaatekuva on nähtävissä kuvasta 2.



Kuva 2 Vakuumijärjestelmän tyypillinen virtauskaavio

Järjestelmä on jaettu kolmeen eri vaiheeseen painetasojen mukaan. Ensimmäisen vaiheen eli kuivausosan vakuumi saavutetaan nesterengaspumpulla ja yhdellä ejektorilla. Prosessivaihe 2 & 3:n painetasot saavutetaan ejektoreilla, joiden käyttöhöyrynä toimii matalapainehöyry. Vaihe 2:n vakuumijärjestelmän kohdalla puhutaan 2-vaiheen ejektoreista. Tässä vaiheessa on kaksi ejektoria sarjassa kylmäerottimen jälkeen. Seuraavan haihduttimen vakuumijärjestelmästä puhutaan 3-vaiheena. Tämä vaihe sisältää kolme ejektoria. Näillä pyritään saavuttamaan prosessivaiheelle riittävän syvä alipaine.

Kaikille ejektoreille ajetaan vakiomäärä höyryä. Ejektoreiden suuttimien mitoitus ja halkaisijat vaihtelevat käyttökohteen mukaan. Suuttimien halkaisijat ovat nähtävissä liitteestä VII. 3-vaiheen viimeisellä höyrysuuttimella höyryn määrää on mahdollista säätää. Sädöllä on tarkoitus vähentää höyrynkulutusta ajanjaksona jäähdytysveden ollessa kylmempää, kuin 17 °C. Tässäkin kohteessa höyryä on ajettu pääasiallisesti vakiomäärä. Kohteessa ei ole virtausmittausta, jonka perusteella höyryn määrää voitaisiin luotettavasti säätää. Tämä aiheuttaa ongelmia, jos höyrymääriä halutaan säätää vaihe 3:n suutin 3:lle ajettaessa.

Kuvassa 3 on 3. prosessivaiheen 3. höyrysuutin irrotettuna. Suutin joudutaan irrottamaan, kun ejektoriputket takia pestään.





Kuva 3 Ejektorin höyrysuutin

## 2.6. Vakuumijärjestelmän rajoitteet ja sen ongelmat

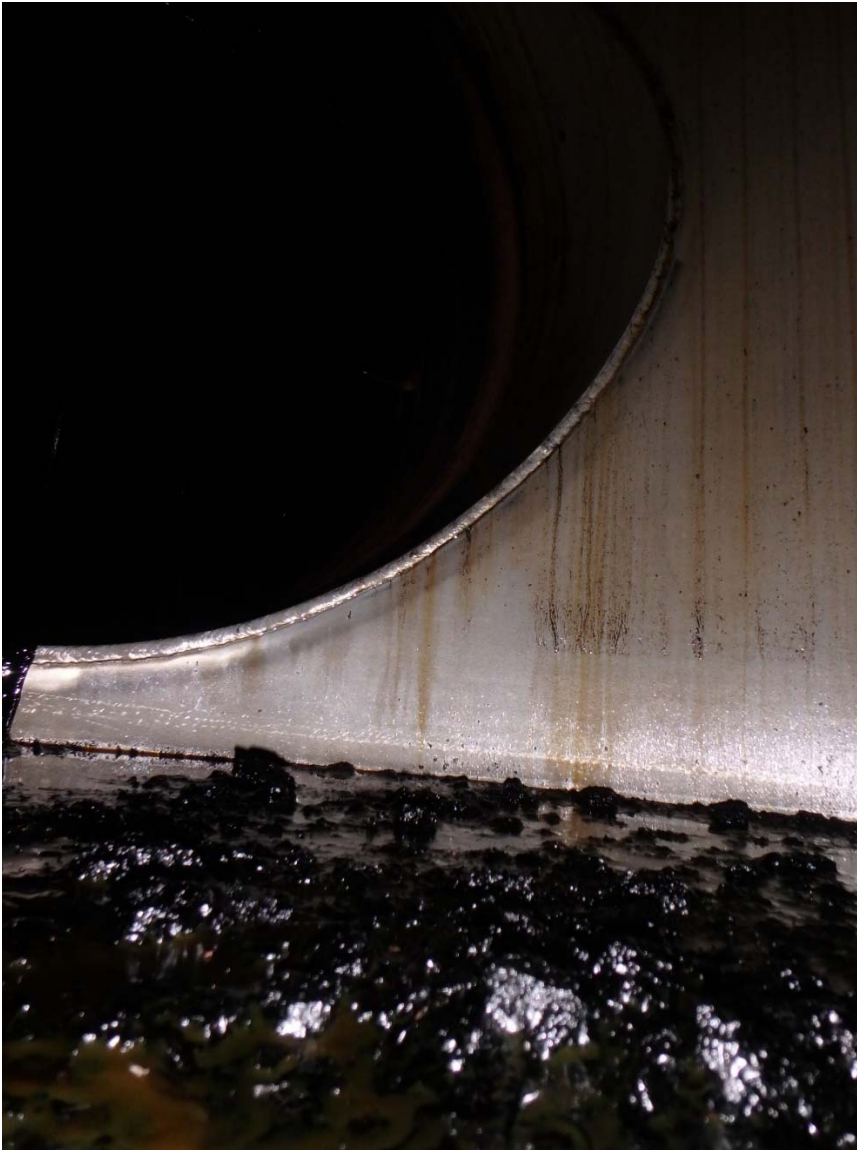
Vakuumijärjestelmän pullonkauloina on tällä hetkellä havaittu olevan useammassa kohdassa. Nämä ovat paikkoja, jotka ovat erityisen alttiita likaantumiselle. Likaantumista esiintyy erityisesti, kun prosessissa tapahtuu jotain odottamatonta. Useimmiten tämä johtaa siihen, että vakuumit heikkenevät voimakkaasti ja vakuumijärjestelmään kulkeutuu likaavia aineita. Ongelmat ovat paikallistuneet useasti kylmäerottimille ja suihkulauhduttimille.

Liitteestä VIII on nähtävissä suunnitteluarvot ja toteutuneet arvot vakuumiyksikön suhteen. Se miksi arvoista on jääty, on monen tekijän summa. Kuvassa 4 näkyy lämmönsiirtopintoja, joiden pinnalle on kiteytynyt syöttöainejakeita. Tämä heikentää kaasujen lauhdutustehoa.



Kuva 4 Kylmäerotin 3 likaantuneena

Lämmönsiirtopinnoille muodostuva kiintoaine syntyy syöttöaineen virtauksen laskiessa lämpöpinnoilla niin voimakkaasti, että syöttöaine pääsee palamaan kiinni haihduttimen lämpöpin-toihin. Tämä aineen irrotessa pinnoilta, se on hyvin kiinteää ja helposti paikat tukkivaa. Kuvasta 5 on nähtävissä prosessivaihe 3:n ejektorin pohjan likaantuminen. Kyseisen kaltainen kiintoaine ja rasvahapot muodostavat suihkulauhduttimien jäähdytyslämmönvaihtimille tehokkaasti jär-jestelmää tukkivaa materiaalia.



Kuva 5 Kylmäerottimien 3 & 4 jälkeisen ejektorin pohja

Liitteessä VIII on nähtävissä, että suunnittelu- ja toteutuneet prosessiarvot.

Yksikön käyttöhöyryn ominaisuuksiin on kohdistunut haasteita. Tarkemmin asiasta löytyy liitteestä VII. Höyryn paineen laskiessa liian alas on havaittu, tämän vaikuttavan vakuumitasoon heikentävästi. Lisäksi lauhtuva höyry voi aiheuttaa vaurioita tai kuluttaa ejektoreiden höyrystintimmiä. Heikentynyt vakuumitaso johtaa syöttötason laskemiseen alaspäin.

Raaka-ainetyyppien vaihtelusta johtuvia haasteita on myös havaittu. Näistä löytyy lisää liitteestä VII. Eri tehtaiden tuottamat syöttöaineet käyttäytyvät selkeästi eri tavoilla

Kemiallisten reaktioiden on havaittu aiheuttavan ongelmia vakuumille. Lisää tietoa ongelmista löytyy liitteessä VII. Reaktioiden aiheuttamia vakuumiongelmia ei ole käsitelty tähän työhön

liittyvässä simuloinnissa. Simulointi vaatisi myös reaktioiden mallintamisen. Nämä täytyisi rakentaa haihduttimien simulaatiomalleihin. Tätä kautta voitaisiin päästä paremmin kiinni yksikön selkeää selitystä vailla oleviin vakuumiheittoihin. Reaktioiden mallintaminen vaatii oman selvityksensä.

## **2.7. Syötön käsittelyprosessin kehitystoimet**

Syötön käsittelyprosessiin on tehty monia muutoksia vuoden 2014 käynnistämisen jälkeen. Merkittävimmät niistä löytyvät liitteestä IX. Kirjallisuudessa on tunnistettu, että epävakaata höyryn paine altistaa ejektoriputket ja erityisesti höyrystimet eroosiolle (Birgenheir;Butzbach;Bolt;& Bhatnagar, 1993).

Laitokselle tehtiin mittava tutkimus ja suunnitelma sen suorituskyvyn ja luotettavuuden parantamiseksi. Kyseistä tutkimusta ja suunnitelmaa ei sellaisenaan kokonaisuudessaan toteutettu. Sieltä kuitenkin otettiin edellä mainittuja helposti toteutettavia ja toimintaa parantavia elementtejä toteutukseen.

### **2.7.1. Vakuumijärjestelmien revamp**

Vakuumijärjestelmien uudelleen järjestelyistä eli revampingista löytyy esimerkkejä öljyteollisuuden tyhjiötislauskolonnien ja niiden vakuumijärjestelmien osalta. Esimerkiksi lauhduttimet ovat vakuumijärjestelmien kalleimpia osia, ne siis kannattaa käyttää uudelleen, jos mahdollista. Ejektorit on suunniteltu toimimaan tietyssä toimintapisteessä, tämä rajoittaa ejektoreiden ja sen lauhduttimien käyttöä. *Lines* toteaaakin artikkelissaan tislauskolonnin halutun leikkauspisteen vaikuttavan suoraan vakuumijärjestelmän suunnitteluvaatimuksiin.

Tapauksessa, jossa käytettyjä laitteita olisi mahdollista hyödyntää esimerkiksi uudessa prosessiyksikössä, niin on huomioitava esimerkiksi lauhduttimien suorituskyky ja niiden aiheuttama vastapaine ejektoreille. Uusia laitteita hankittaessa vanhaan yksikköön on huomioitava myös muut kustannukset. Esimerkiksi tyhjiötislauskolonnin leikkauspisteen nosto voi vaatia lisää strippaushöyryä. Tämä vaatii lisää kapasiteettia vakuumijärjestelmältä ja johtaa ejektoreiden ja lauhduttimien dimensioiden kasvuun. Tämä lisää kustannuksia, sekä hankintahinnan, että esimerkiksi höyryn- ja jäähdytysveden kulutuksen kasvaessa. Täten on löydettävä optimipiste, mihin esimerkiksi tislauskolonnin leikkauspistettä kannattaa nostaa (*Lines*).

Tämä pätee myös tarkasteltavan vakuumiyksikön osalta. Laitoksen kapasiteettia nostettaessa on huomioitava vakuumijärjestelmään kohdistuva kuorman nousu. Tämä koskee myös eri tyyppisiä syöttöaineita. Syötteen laatu vaikuttaa yksikön toimintaan, koska yksikkö on suunniteltu toimivaan tiettyjä komponentteja tietyn määrän sisältävän syötön kanssa.

### **3. VAKUUMIJÄRJESTELMÄT**

#### **3.2. Vakuumin tekemisen teoria**

Prosessiteollisuudessa vakuumitekniikkaa hyödynnetään monessa eri kohteessa. Tyypillisiä kohteita ovat jäähdytyslaitteistot ja erilaiset erotusovellukset, kuten uutto, tislaus tai haihdutus. (Ryans & Roper, 1986) Biojalostamolla vakuumitekniikka on käytössä esimerkiksi käsittelyprosessin haihduttimilla, sekä tislausalueella.

Vakuumia käyttämällä alennetaan käsiteltävien aineiden kiehumispistettä, tällöin jakeiden erotelu helpottuu. Erityisesti tyhjiötekniikkaa hyödynnetään raskaammissa korkeamman kiehumispisteen omaavien aineiden erottelussa. Raskaiden aineiden vaatimat korkeat lämpötilat aiheuttavat helposti ei toivottua aineiden hajoamista, hiilivetyjen kohdalla kuten esimerkiksi krakkautumista. Tällöin matalammassa paineessa- ja lämpötilassa tehtävä tislaus tai haihdutus toimii huomattavasti paremmin verrattuna ilmakehän paineessa suoritettuun erotukseen (AG, Jet ejectors for the oil industries, 2019). Syöttöaineen kohdalla on havaintoja erilaisten yhdisteiden hajoamisesta tietyissä lämpötiloissa. Biojalostamon syötön käsittelyn on myös todettu toimivan sitä paremmalla saannolla, mitä matalampana vakuumi kestää. Vakaalla matalalla vakuumilla on myös todettu olevan selvä yhteys energian kulutukseen (Halme, 2019)

Absoluuttisessa tyhjiössä ei ole ainetta eikä painetta. Käytännön tasolla teollisissa sovelluksissa tyhjiöllä tarkoitetaan tilaa, josta kaasut on poistettu tarpeeksi matalalle tasolle. Vakuumin aikaansaamiseksi käytetään erilaisia laitteistoja. Yleisimpiä keinoja vakuumin saavuttamiseksi teollisessa mittakaavassa ovat ejektorit ja vakuumpumput. (Ryans & Roper, 1986)

Tarkastellun vakuumiyksikön tehtävänä on ylläpitää haluttua vakuumitasoa yksikössä. Tällöin syöttö saadaan käsiteltyä sopivassa lämpötilassa ja paineessa vetykäsittelyn vaatimukset täytäväksi. Vakuumin vedolla ja yksikön typpi-atmosfääriin saattamisella saadaan myös yksikkö inertoitua happivapaaksi ennen syötön ottamista sisään yksikköön. Tällä varmistetaan, ettei korkean lämpötilan olosuhteet ja syttyvät aineet yhdessä hapen kanssa aiheuta vaaratilanteita.

### 3.3. Prosessiyksikön vakuumlaitteistot

Vakuumlaitteistossa ollaan keskitytty mäntyöljyn tislauksessa käytettyihin laitteisiin. Näitä on käytössä myös laajemmalti teollisuudessa ympäri maailman. Vakuumlaitteisto koostuu ejektoreista, nesterengaspumpusta, suihkulauhduttimista, tärpätin lauhduttimesta sekä kylmäerottimista.

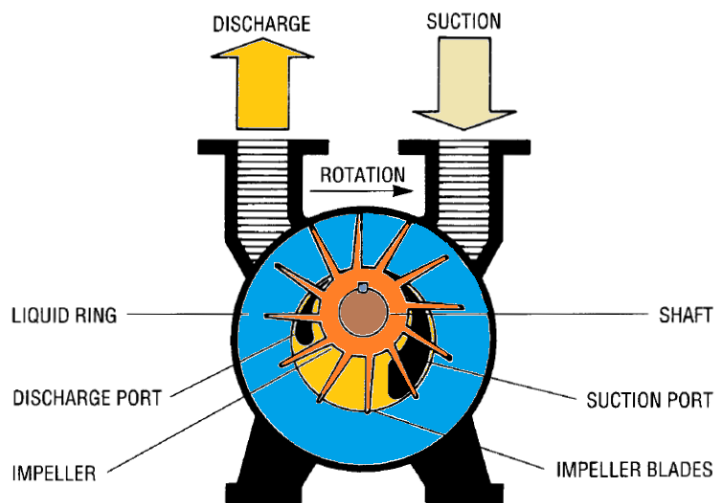
Vakuumiyksikön ejektorit ovat monivaiheisia. Ne ovat haihdutinkohtaisesti sarjaan kytkettyjä. Ejektoreiden kokoluokka vaihtelee huomattavasti prosessissa käyttökohteen mukaan. Käytännössä, mitä matalampaan paineeseen mennään, sitä suurempi haihtuvien kaasujen määrä on. Tällöin myös ejektoreiden dimensiot kasvavat. Vakuumijärjestelmä on nähtävissä kuvasta 2.

### 3.4. Nesterengaspumppu

Nesterengaspumppuja- ja kompressoreja käytetään teollisuudessa laajalti kosteita kaasuja pumppaessa. Niiden etuna ovat kompakti koko ja tehokkuus. Tyypillinen nesterengaspumpulla saavutettava painealue on 1 mbar – 30 mbar (abs.) (YTM-Industrial, 2019).

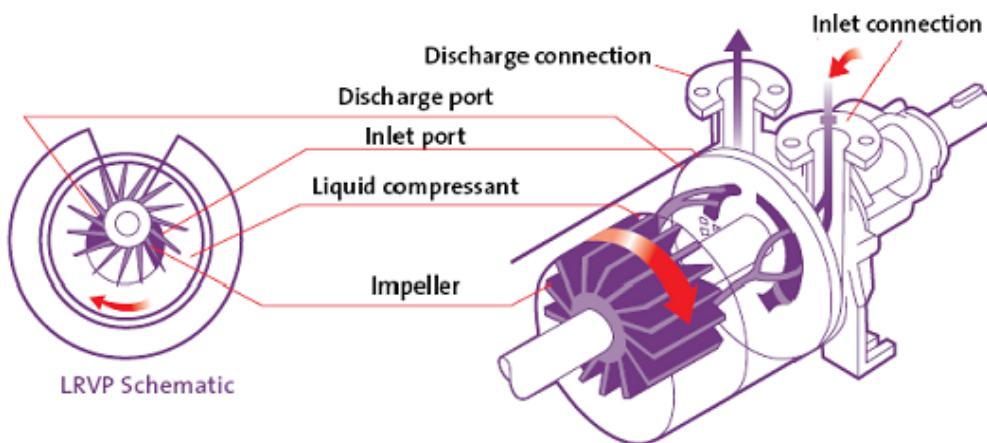
Energiatehokkuudeltaan mekaaniset nesterengaspumput ovat ejektoreita parempia tietylle painealueelle asti. Kuitenkin vaaditun vakuumin painetason laskiessa alle 1,3 mbar:n muuttuvat energiakulut enemmän höyryejektoreita suosivaksi (Ryans & Roper, 1986, ss. 229, 261).

Nesterengaspumpun toiminta perustuu pumpun pesän seinämille syntyvään tiivistävään nesterenkaaseen. Pumpun pesässä on pesään nähden epäkeskeisesti asennettu siipipyörä, joka keskipakovoiman vaikutuksesta muodostaa tiivistävän nesterenkaan pesän seinämille. Rakenne on nähtävissä kuvasta 6. Neste tiivistää siipipyörän väliset tilat, jotta kaasu ei pääse virtaamaan tätä kautta. Nesteellä on myös jäähdyttävä vaikutus, joten sitä on kierrätettävä jäähdyttimen kautta. Vesi likaantuu kaasun mukana kulkeutuvista aineista ja sitä on aktiivisesti vaihdettava. Kuvasta 8. nähdään vastaavanlainen tyypillinen jäähdytysjärjestely, joka on erittäin yleinen vakuumijärjestelmissä.



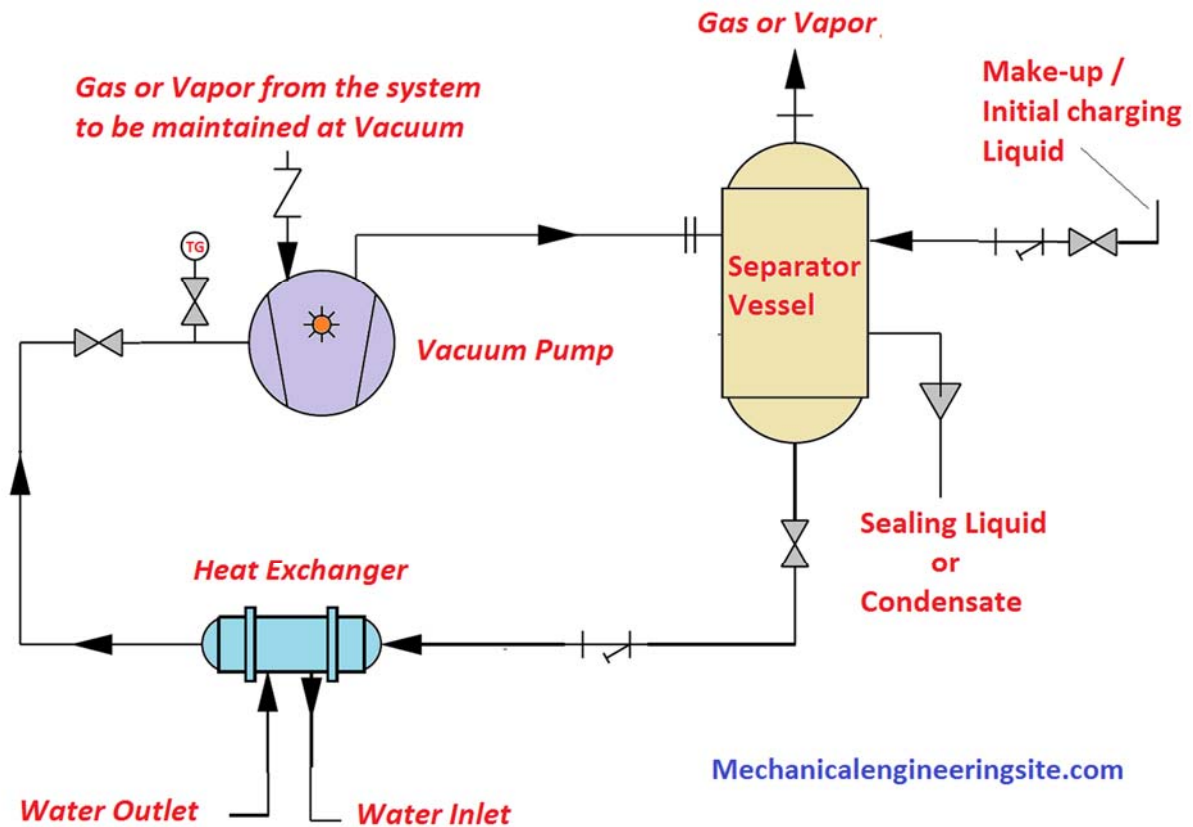
Kuva 6 Nesterengaspumpun rakenne päädyistä katsottuna (MES, 2019)

Siipipyörien keskiosaan muodostuu tila, jossa kaasu pääsee liikkumaan. Imupuolella siipipyö-  
rän siipien väliset tilat suurenevät ja painepuolella pienenevät. Imuvaiheessa kaasu kulkeutuu  
siipien väliin ja poistopuolella kaasu puristuu poistopuolen putkeen. Tämä on nähtävissä ku-  
vasta 7.



Kuva 7 Kaasun kulkeutuminen pumpun läpi (EnggCyclopedia, 2019)

Käsittelyprosessin nesterengaspumpulla pyritään saavuttamaan oikea painetaso, jotta ensim-  
mäinen ejektorilla saadaan toiminta-alueelleen. Ejektorilla paine saadaan laskettua operointipai-  
neeseen prosessiyksikön kuivausosaa varten. Pumpun kautta kulkevat myös muista prosessi-  
osista kulkeutuvat lauhtumattomat kaasut, jotka ovat kulkeutuneet suihkulauhduttimien läpi.  
Näiden kaasujen määrä on kuitenkin melko pieni. Kaasut sisältävät lähinnä typpeä ja happea,  
sekä pieniä määriä hiilidioksidia ja keveitä hiilivetyjä C1 – C6 (LIMS-järjestelmä, 2019).



Kuva 8 Tyypillinen nesterengaspumpun jäähdytysjärjestely (MES, 2019)

Höyryejektoreilla on määrätty toiminta-alue. Ne on mitoitettu siten, että ne vaativat tietyn lähtötason paineen suhteen, jotta ne saadaan toimimaan oikeassa toimintapisteessä. Vakuumiyksikössä tarvitaan nesterengaspumppu, jolla määrätty painetaso saavutetaan, jotta seuraava ejektorit saadaan toimimaan. Tämän jälkeen voidaan ejektorit ottaa yksi kerrallaan käyttöön, aina kun ejektorin toiminta-alueen vaatima vakuuimitaso on saavutettu.

### 3.5. Ejektorit

Ejektorit ovat laitteina yksinkertaisia ja erittäin tehokkaita laitteita tyhjiön saavuttamiseen. Perusideana on poistaa kaasut tietyistä tilasta ja saattaa tietyn tilan vallitseva paine tätä kautta halutulle tasolle. Ne eivät sisällä liikkuvia osia, joten niitä pidetään erittäin luotettavina laitteina. Ejektorit kestävät paremmin likaavia- ja korrodoivia aineita verrattuna mekaanisiin nesterengaspumppuihin. Niiden kapasiteetin säätömahdollisuudet ovat rajalliset, kuitenkin melko rajalliset (Ryans & Roper, 1986, s. 229).

Energiatehokkuudeltaan ejektorit eivät ole kovin hyvällä tasolla. Niillä on varsin huono termien hyötysuhde ja ne ovat suunniteltu toimimaan vain yhdessä tietyssä toimintapisteessä.



Optimipisteestä poikkeaminen aiheuttaa merkittävää heikkenemistä ejektorin suorituskykyyn (El-Dessouky;Ettonuney;Alatiqi;& Al-Nuwaibit, 2002).

Käyttövoima ejektorille saadaan käyttöfluidin – esimerkiksi vesihöyryn dynaamisesta paineesta (Blatchley, 2019). Ejektoreiden kuormakaasuna toimii haihduttimilta purkautuvat lauhtumattomat jakeet. Haihdutusvaiheen mukaan, kaasuseoksen sisältö vaihtelee. Arviot eri vaiheiden kaasuseoksista perustuvat laitteistotoimittajan suunnitelmiin, sekä eri syöttölaaduille tyhjötislauskella tehtyjen haihdutuskokeiden tuloksiin. Näiden perusteella kaasujen eri komponenttien määrää on kuitenkin hankala arvioida tarkemmin. Tästä johtuen kaasujen oikeanlaisen koostumuksen rakentamiseksi vakuumisimulaatiota varten, työssä hyödynnetään aiemmin toteutettua haihdutinsimulaatiota.

Liitteestä X nähdään vakuumijärjestelmän suunnittelun pohjana olleet arviot kaasun koostumuksista. Arvot ovat hyvin karkeita, eikä niissä ole eritelty komponentteja erikseen. Järjestelmän simulointia varten kaasun koostumuksia täytyykin tarkentaa. Koostumuksessa on eroavaisuuksia myös eri syöttölaatuojen välillä. Tällöin kaasuille täytyy hakea erilaisia koostumuksia, joita järjestelmän simuloinnissa voidaan käyttää (Vilonen, , Kylmäerottimen hiilivetyjen kirjastohakujen laboratorioanalyysin yhteenveto, 2019). Liitteessä X ilmoitetut arvot kuvaavat vakuumijärjestelmään kulkeutuvia virtoja lauhtuttimilta. Eli täpätinlauhduttimelta, sekä kylmäerottimilta 1 – 4.

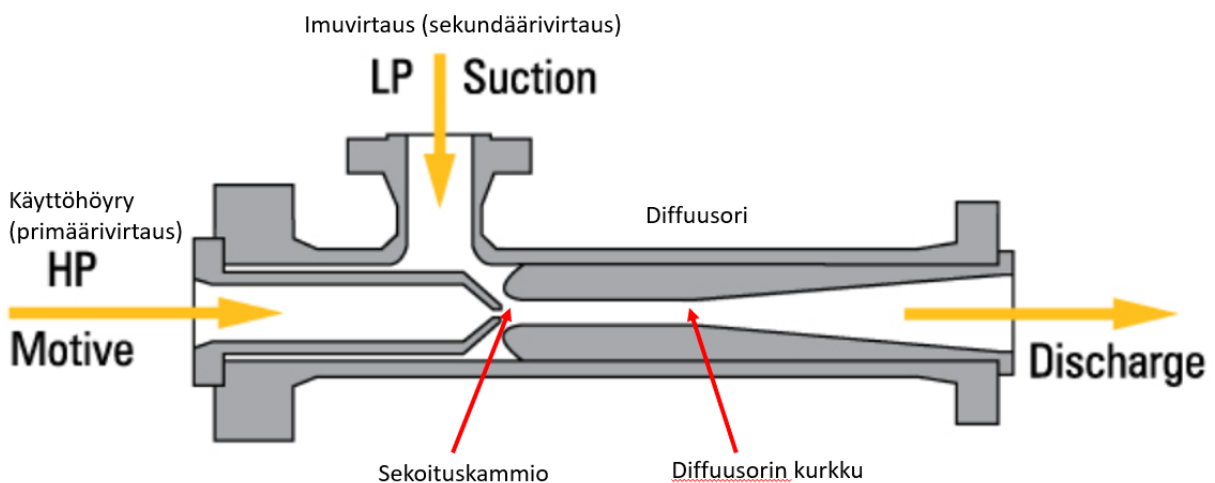
Arviot vakuumikaasujen koostumuksesta eivät olleet kovin spesifisiä. Lähtökohtana on ollut, että esimerkiksi haihdutuksessa mahdollisesti tapahtuvat reaktiot eivät ole merkittävä kuormittaja vakuumiyksikölle. Käytäntö on kuitenkin osoittanut asian olevan eri tavalla ja reaktioita eittämättä tapahtuu haihduttimilla (Vilonen, Reaction of tall oil components in pretreatment, 2019).

Pelkästään valmistajan spesifikaation pohjalta simulointia on hankala lähteä toteuttamaan. Paras arvio kaasujen koostumuksesta saatiin siis aiemmin toteutetusta haihdutinsimulaatiosta. Näiden mallien pohjalta saatiin kolme erilaista syöttötyyppiä, joiden käyttäytymistä tutkittiin myös vakuumijärjestelmän simulaatiossa. Haihdutinmallien syöttöaineen koostumukset on rakennettu kirjallisuustutkimuksen perusteella ja näitä on verrattu myös prosessiin syötettävien syöttöjen analyyseihin (Halme, 2019).

Tyypillisen ejektorin rakenne ja toimintaperiaate on nähtävissä kuvasta 9. Ejektorin pääperiaate on muuttaa primäärivirtauksen eli käyttöhöyryn (HP-Motive) paine-energia liike-energiaksi

ajamalla virtaus suuttimen läpi, jossa virtauskanavan poikkipinta-ala pienenee. Tämä johtaa virtausnopeuden kasvuun eli staattinen paine muuttuu dynaamiseksi paineeksi. Virtaus purkautuu sekoituskammioon, jossa virtaus sekoittuu imuvirtauksen kanssa.

Tämä johtaa paineen voimakkaaseen laskuun käyttöhöyryn suuren virtausnopeuden takia. Sekoituskammion ja imuvirtauksen välinen paine-ero saa aikaiseksi imun, joka aiheuttaa imukaasun (LP-suction) kiihtyvän liikkeen ylisooniseksi suppenevassa-laajenevassa diffuusoriosassa. Tällöin käyttöhöyryn suuttimen jälkeinen paine on imuvirtauksen painetta pienempi. (Hammoud, 2006). Virtausten sekoittuminen tapahtuu täydellisesti samassa staattisessa paineessa diffuusorin kurkun kohdalla (Chandra & Ahmed, 2014). Virtausnopeus hidastuu voimakkaasti tiivistysaaltojen takia, jotka nostavat painetta ja kaasuseoksen virtaus hidastuu. Tällöin imukaasuvirtauksen paine nousee halutulla tavalla ja virtauksen dynaaminen paine muuttuu takaisin staattiseksi paineeksi ejektorin laajenevassa ulostulo-osassa.



Kuva 9 Tyypillinen teollisuudessa käytettävä ejektor (*Transvac Systems Ltd., 2019*)

Vakuumiyksikössä on useita ejektoreita käytössä. Niiden sijoittumiset ovat nähtävissä kuvasta 2. Vakuumiyksikön ejektoreiden käyttöhöyrynä toimii tulistettu matalapaineinen vesihöyry.

Ejektoreilla on määrätty toiminta-alue eli ne on määritetty toimimaan yhdessä suunnittelupisteessä (El-Desouky et. al. 2002). Kyseisen pisteen ulkopuolella, laitteet eivät käytännössä lähde toimimaan. Esimerkiksi vakuumiyksikön ejektoreita ei saada toimimaan, ellei nesterengaspumppu ja suihkulauhduttimien välissä oleva ejektor ole käynnissä ja oikealla painealueella. Tämä on huomioitava yksikköä ja ejektoreita käyttöön otettaessa. Asia on todettavissa esimerkiksi laitteistoimittajan tekemistä suorituskykytesteistä ja laitoksen käyttökokemuksista (AG, Report Performance Test (sisäinen dokumentti), 2013).

Valuumiyksikössä ejektoreita on asennettu sarjaan ja rinnan. Yhden vakuuimitason laitteet ovat aina sarjassa olevien ejektoreiden perässä. Eli esimerkiksi kolme ejektoria voi olla sarjassa. Kokonaisuutena katsottuna stage 1 – 3 ovat rinnakkain

Tällä pyritään saavuttamaan haluttu painetaso ja rinnan asennuksella korotetaan poistokaasujen kapasiteettia. Poistokaasujen määrä ja painetaso vaihtelee huomattavasti riippuen haihduttimesta, mistä kaasuja ollaan imemässä pois. Tämän takia ejektoreiden dimensiot vaihtelevat huomattavasti prosessivaiheen mukaan. Samoin ejektoreiden lukumäärä / prosessivaihe vaihtelee. Ejektoreiden lukumäärä ja putkien dimensiot ovat nähtävissä kuvasta 2.

### **3.6. Lauhduttimet**

Ejektoreilta purkautuvat kaasut lauhdutetaan tyypillisesti sekoittavalla lauhduttimella tai putkilämmönvaihtimella eli pintalauhduksella. Pintalauhduksella käytetään erityisesti, kun halutaan pitää lauhdutettava tuote ja jäähdytysvesi erillään. Lauhtuminen tapahtuu lauhduttimen tuubin pinnalla (Ryans & Roper, 1986, ss. 181-184).

Sekoittavassa lauhduksessa jäähdytysvesi ja ejektoreilta purkautuva kaasu-höyryseos kohtaa- vat ja lauhtumien tapahtuu jäähdytysveden pinnalla. Tällöin lauhduttava vesi ja lauhdutettava aine ovat kosketuksissa toistensa kanssa. Tällä saavutetaan tehokas ja pienempi painehäviö verrattuna pintalauhdukseseen. Pintalauhdukseseen verrattuna sekoittava lauhdutin on vähemmän altis likaantumiselle. Tämä tukee suihkulauhduksimien käyttöä vakuuimiyksikössä, koska lauhduttimille kantautuu syöttöjakeita ejektoriputkiston kautta. (Ryans & Roper, 1986, ss. 181-184).

Kaasujen lauhdutus voidaan toteuttaa molemmilla tavoilla. Putkilämmönvaihdin eli pintalauh- dutin on hyvin yleinen tapa lauhduttaa kaasuja. Lauhduttimella voidaan lauhduttaa esimerkiksi vesi- ja tärpättijakeet. Pintalauhduksella on valittu käyttöön tässä prosessissa, koska tärpättijakeita ei haluta kosketukseen jäähdytysveden kanssa, vaan ne halutaan ottaa talteen.

Toinen vaihtoehto on käyttää sekoittavaa lauhdutusta. Kaasumäärien ollessa suuri ja vakuuimi- taso matala toimii sekoittava lauhdutus hyvin. Kaasu saatetaan kosketuksiin vesikierron kanssa ja lauhtuminen tapahtuu tässä kohtaa.

Lauhduttimella lauhtunut höyry poistetaan lauhduttimen pinnanmittauksen perusteella automa- tiikan ohjaamana pois kierrosta. Lauhtumattomat kaasut ohjataan seuraavalle ejektorille, joka toimii myös nestereengaspumpun tukena. Ejektorin läpi kulkevat kaasut ohjataan suihkulauhdu- tin 2:lle, joka toimii kuten aiempi sekoittava lauhdutin. Lauhduttimen dimensiot saattavat olla

tässä kohtaa kuitenkin merkittävästi pienemmät. Lauhduttimelta purkautuvat kaasut johdetaan yleensä nesterengaspumpulle, joka nostaa kaasujen paineen hieman ilmakehän painetta korkeammaksi ja johtaa kaasut turvalliseen paikkaan.

Sekoittavien lauhduttimien vesikierto jäähdytetään tyypillisesti levylämmönvaihtimilla. Lauhduttimen vesikiertoon lauhtuu esimerkiksi orgaanisia jakeita ja nämä jakeet aiheuttavat ongelmia lauhduttimen vesikierrrossa ollessaan. Osa jakeista saattaa kiehua lauhduttimen pumpun imuissa ja tämä nostaa painetta lauhduttimella ja heikentää vakuumia.

### **3.7. Kylmäerottimet**

Kylmäerottimilla pyritään lauhduttamaan jakeet, jotka purkautuvat kaasujen syntymiskohteista. Kaasut ohjautuvat kylmäerottimille, jossa ne pyritään lauhduttamaan mahdollisimman tehokkaasti. Kylmäerottimien kokoluokassa on hieman vaihtelua niiden lauhdutustarpeesta riippuen.

Lauhdutus-tilassa kylmäerottimen sisällä olevassa kierukassa virtaa jäähdytysvesi. Tällä pyritään saamaan kohteista tulevat kevyet rasvahapot lauhdutettua ja otettua talteen. Lauhtumattomat kaasut poistuvat lauhduttimen alaosasta kylmäerottimilta ejektoreille. Lauhtuneet jakeet valuvat erottimen pohjaputkeen, josta ne pumpataan hyötykäyttöön kylmäerottimen siirryttyä sulatustilaan.

Kylmäerottimien sulatus voidaan toteuttaa siten, että jäähdytysvesikierukkaan ajetaan veden sijasta höyryä. Tällä pyritään sulattamaan kierukan pinnalle kiteytyneet rasvahapot ja muut mahdolliset lauhtuneet jakeet. Kyseiset jakeet pumpataan erottimilta hyötykäyttöön. (Hiironen, 2015).

### **3.8. Vakuumijärjestelmän ylösajo**

Vakuumijärjestelmän käynnistäminen kuuluu ensimmäisiin toimenpiteisiin, kun lähdetään ajamaan syötön käsittelyprosessia ylös. Vakuuminvedon yhteydessä yksikölle suoritetaan myös inertointi typpikaasulla. Tällä varmistetaan, että yksikön sisältä on saatu poistettua ilma, jota on joutunut yksikköön, kun laitteisto on avattu huoltotoimenpiteitä varten. Täysin tiivistä systeemiä ei pystytä saavuttamaan, eikä tarvitse saavuttaakaan. Vakuumin on kuitenkin säilyttävä tietty aika tietyssä painetasossa. Vakuumiyksikön kohdalla ei ole määritelty sitä, kuinka paljon vakuumitaso saa heikentyä tietyssä ajanhetkessä.

Potentiaalisia vuotokohteita ovat laipat ja muut liitokset, joiden tiivisteissä voi olla epäpuhtauksia tai naarmuja. Myös huokokset, joita esiintyy kaikenlaisissa materiaaleissa aiheuttavat vuotoa vakuuminjärjestelmään päin. Erilaiset muovikalvot ovat alttiita permeaatiolle, jolloin tietyt kaasut siirtyvät diffuusion kautta muovien läpi (YTM-Industrial, 2019).

### 3.8.1. Heliumtestauksen periaatteet

Suurempien huoltotöiden jälkeen yksikölle suoritetaan heliumtestaus, jonka avulla päästään kiinni pienimpiinkin vuotoihin. Vuodot yksikön tiiveydessä ovat yksi merkittävimmistä vakuu- miongelmien aiheuttajista. Lisäksi ilmavuodot vakuumin suuntaan aiheuttavat merkittävän turvallisuusriskin, koska yksikön sisällä olevat aineet ovat prosessin käyttölämpötilassa syttyviä.

Helium soveltuu vuotojen etsintään johtuen sen pienestä pitoisuudesta ilmakehässä. Lisäksi sen molekyylipaino on hyvin pieni ja se on helppo tunnistaa massaspektrometrillä. Helium myös leviää ympäristöönsä tehokkaasti, niin ilmakehään, kuin vakuumiin. Kyseessä on inertti kaasu, joten sen käyttö on turvallista. Se ei likaa paikkoja, eikä aiheuta käyttäjilleen vaaraa (YTM-Industrial, 2019).

Heliumtestauksella on helppo havaita pienemmätkin vuodot. Sen avulla voidaan määrittää laitteen tai putkilaipan kokonaisvuotonopeus. Mittayksikkönä vuodon määrän suhteen  $Q_L$  käytetään 1 mbar l/s. Käytännössä tämä kertoo, kuinka paljon paine muuttuu 1 litran vetoisessa astiassa 1 sekunnin aikana. Havainnollistettuna tämä vastaa 1 cm<sup>3</sup>/s virtausta NTP-olosuhteissa. Vuotomäärä saadaan selvitettyä yhtälön 1. perusteella. (Pfeiffer Vacuum, 2019)

$$Q_L = V * \frac{\Delta p}{t} \quad (1)$$

$Q_L$	Vuodon määrä	[mbar l/s]
$V$	Astian tilavuus	[l]
$\Delta p$	Paine-ero mittauksen alkupisteen ja loppupisteen välillä	[mbar]
$t$	aika	[s]

Prosessiyksikön tiiveys on varmistettava ennen, kuin syöttö voidaan ottaa sisään yksikköön. Heliumtestauksella päästään kiinni huomattavan pieniinkin vuotoihin, jotka ovat havaittavissa laippojen kautta. Työn yhtenä tavoitteena on selventää myös käytännön tasolla heliumtestauksen toimintaa ja tehdä siitä helpommin ymmärrettävää. Tämä on merkittävää varsinkin vuotojen

määrän ja voimakkuuden ymmärtämiseksi. Esimerkkinä voidaan käyttää 100 mbar l/s vuotoa. Käytännön tasolla tämä tarkoittaa, että tämän kokoinen vuoto vastaisi järjestelmässä olevaa halkaisijaltaan 1 mm:n reikää (Koliseva, 2020).

Yleisimmät vuotopaikat ovat olleet erilaisilla laipoilla. Haihduttimiin kohdistuu suuria lämpötilamuutoksia erityisesti alas- ja ylösajotilanteissa, sekä häiriöissä. Vuodon määrä on vaihdellut merkittävästä haitasta – juuri ja juuri heliumtestauksessa havaittavaan.

### 3.9. Ejektoreiden toiminta ja testaus

Ejektoreiden toimintaa arvioidessa ja mitoitettaessa oleellisia lukuja ovat kompressiosuhde  $CR$  (compression ratio) ja massavirtasuhde  $ER$  (entrainment ratio). Näiden kautta voidaan nähdä ejektoreiden toimintakapasiteetti. Kyseiset luvut ovat dimensiottomia ja jokaisella ejektorilla on oma käyränsä. Kompressiosuhde kertoo ejektorin tuottaman paineenkorotuksen imukaasulle. Massavirtasuhde kertoo ejektorin imukaasun siirtokapasiteetin.

$$CR = \frac{p_c}{p_e} \quad (2)$$

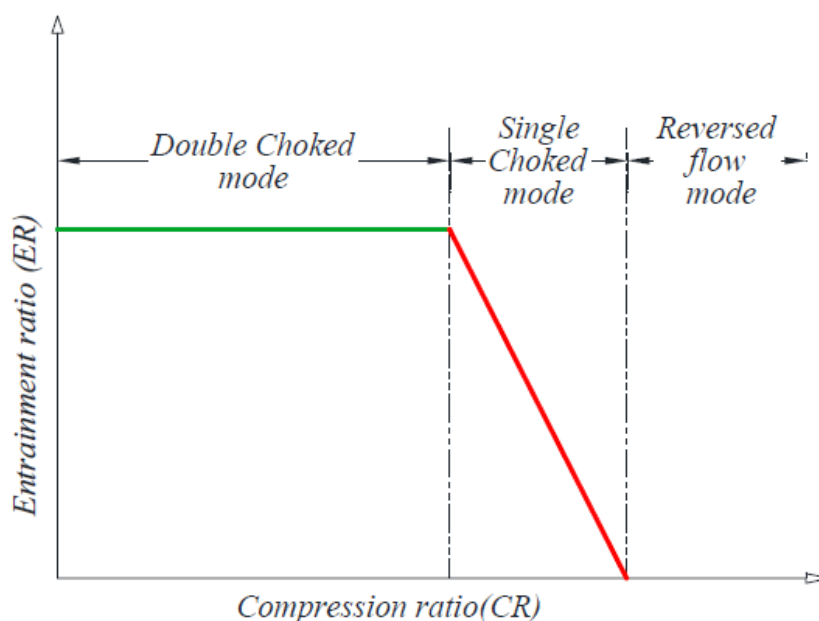
$CR$	kompressiosuhde	[-]
$p_c$	poistopaine	[mbar]
$p_e$	imupaine	[mbar]

$$ER = \frac{q_{m,e}}{q_{m,p}} \quad (3)$$

$ER$	massavirtasuhde	[-]
$q_{m,e}$	imuvirta prosessista	[kg/s]
$q_{m,s}$	Käyttöhöyryvirta ejektorille	[kg/s]

Ejektoreiden kapasiteettia voidaan tarkastella dimensiottoman toimintakäyrä kautta. Kuvaajalla on esitetty ejektorin massavirtauksen suhde kompressiosuhteen funktiona. Esimerkki toimintakäyrästä on nähtävissä kuvasta 10. Ejektorin toimintakäyrän alue jakaantuu kolmeen eri alueeseen. Kaksoiskuristetulla alueella virtaus on kuristettu käyttöhöyryn suuttimella ja diffuusorin kurkulla. Tämä rajoittaa diffuusorin läpi kulkevaa virtausmäärää. Kompressiosuhteen aleneminen ei siis enää tässä kohtaa enää vaikuta lisäävästi virtausmäärään (Shafae;Tavakol;Riazi;& Sharifi, 2015).

Toiminta pysyy kaksoiskuristetulla alueella niin kauan, kunnes vastapaine diffuusorin jälkeen kasvaa. Tämä johtaa kompressiosuhteen nousemiseen nousuun ja toiminta siirtyy yksinkertaisen kuristuksen alueelle, missä kompressio- ja massavirtasuhde ovat kääntäen verrannollisia keskenään. Tässä kohtaa saavutetaan kriittinen vastapaine ja ejektorin toiminta häiriintyy. Kompressio suhteen kasvaessa edelleen ajautuu ejektori pois toiminta-alueeltaan. Paineen kasvaessa imukammiossa samalle tasolle imukaasun paineen kanssa, kääntyy virtaus väärään suuntaan. Tällöin ollaan käänteisen virtauksen alueella ja pois toiminta-alueelta. Tämä tarkoittaa käytännössä ejektorin ajautumista toimintakyvyttömäksi.



Kuva 10 Toimintakäyrällä näkyvät alueet, eli kaksoiskuristettu alue käyttöhöyryn suuttimella ja diffuusorin kurkulla. Vastapaineen nousun myötä diffuusorin jälkeen kompressiosuhde nousee ja siirrytään yksinkertaisen kuristuksen alueelle. Kriittisen vastapaineen saavuttamisen jälkeen ejektori ajautuu toimintahäiriöön. Käänteisen virtauksen alueelle jouduttaessa paine kasvaa imukammiossa imukaasun kanssa samalle tasolle ja ejektori ajautuu kokonaan pois toiminta-alueeltaan. (Shafae;Tavakol;Riazi;& Sharifi, 2015)

Ejektorit mitoitetaan halutun vakuumitason mukaisesti. Ejektorin kapasiteetti on sidottu sen dimensioihin. Yhden ejektorin mitat kasvaisivat liian suuriksi. Tämän takia halutun vakuumitason saavuttamiseksi, ejektoreita kytketään sarjaan. Tällöin vakuumijärjestelmä on mahdollista rakentaa järkevällä tavalla (Birgenheir;Butzbach;Bolt;& Bhatnagar, 1993, ss. 116-117).

Yleisesti vakuumilaitteistoa mitoitettaessa voidaan olettaa, että kaasut noudattavat ideaalikaasujen lakia ja Daltonin osapainelakia. Poikkeamat ideaalikaasujen laista tapahtuvat korkeissa paineissa ja korkeissa lämpötiloissa, sekä molekyylin dissosiaatiossa tai assosiaatiossa. Tämä

helpottaa tarvittavien vakuumlaitteiden mitoittamista. Tämä oletus on mahdollinen, koska ope-  
rinti tapahtuu hyvin matalissa paineissa ja kohtalaisen korkeassa lämpötilassa. Paineen vaiku-  
tusta ei täten huomioida ja lämpötilan vaikutus otetaan huomioon kylmäerottimen tai lauhdut-  
timen mitoituksessa (Ryans & Roper, 1986, ss. 13-18)

Merkittävä suunnittelu-arvo on imukaasujen massavirta. Kaasujen ja höyryjen koostumukset  
kuitenkin vaikuttavat ejektoriin toisistaan eroavilla tavoilla. Vakuumijärjestelmän simuloin-  
nissa on kuitenkin huomioitava imukaasujen poikkeavuus ideaalikaasuista, koska painetasot  
yksikössä ovat hyvin matalat (Ryans & Roper, 1986, ss. 18-19).

### **3.9.1. Ejektoreiden tehdastestaus**

Vakuumiyksikön ejektoreiden suorituskyky on testattu valmistuksen jälkeen laitoksen laitteis-  
tontoimittajan ja ejektorin valmistajan tehdastestillä eli FAT-testauksella. Testillä on tarkoitus  
varmistaa valmistetun laitteiston luvattu suorituskyky. Ejektoreiden tehdastestaus toteutettiin  
noin kaksi vuotta ennen biojalostamon käynnistämistä. Testissä syötöstä haihtuvat hönkäkaasut  
oli korvattu vesihöyrvirtauksella 4,5 bar(a).

Testi on toteutettu DIN 28430-standardin mukaisesti. Standardi määrittää oikeat mittaustavat  
höyryejektoreiden ja vakuumpumppujen suorituskyvyn mittaamiselle. Prosessiolosuhteita ja  
lähtöaineita ei pystytty tuomaan testitapahtumaan ejektorin valmistajan tehtaalle. Tällöin imu-  
kaasut redusointiin mitoituspisteessä vallitsevien ominaisuuksiensa ja lähtölämpötilansa perus-  
teella vastaamaan tehdastestin imukaasua. Virtausten ominaisuudet muutetaan vastaaviksi ar-  
voiksi, jotka ilmalla on 20 °C lämpötilassa. Kaasuvirrat voidaan muuntaa uudestaan vastaavaa  
tehdastesteissä käytettyä ilmaa tai höyryä vastaavia arvoja. Yhtälöstä 4 nähdään redusoinnin  
toteutus. Massavirran redusoinnissa on huomioitava, sekä kaasun moolimassa, että lämpötila  
(AG, Report Performance Test (sisäinen dokumentti), 2013), (Skogberg, 2019).



$$q_{m,red} = \frac{q_m f_{T2} f_{M2}}{f_{T1} f_{M1}} \quad (4)$$

$q_{m,red}$	reduoitu massavirta	[kg/s]
$q_m$	todellinen massavirta	[kg/s]
$f_t$	lämpötilan korjauskerroin	[-]
$f_m$	moolimassan korjauskerroin	[-]

Korjauskertoimet määritetään erikseen niille standardoiduilla korrelaatioilla. Moolimassan tai lämpötilan eroavaisuus kaasun tai höyryn arvoista, joihin reduointi tehdään nostaa eroa redusoidun ja mitatun virtauksen välillä (Deutsches Institut für Normung, 2017).

Testauksessa käytetään standardin määrittämää suutinta, jonka perusteella määritetään massavirtaukset käyttöhöyrylle ja imukaasulle. Standardissa DIN 28340 määritetään suutintyyppi HEI-suutin. Suutin kuristaa imukaasuna käytettävän höyryn paineen matalampaan paineeseen. Absoluuttisen paineen ollessa suuttimen ulostulossa alle puolet siitä, mitä se on sisääntulossa, voidaan päätellä ylikriittisen painehäviön olevan vallitseva. Tällöin massavirta riippuu suuttimen pienimmästä poikkileikkauksesta, sekä paineesta- ja lämpötilasta ennen suutinta (AG, Report Performance Test (sisäinen dokumentti), 2013).

Testipöytäkirjojen mukaan stage-2 ja stage-3 ejektorit täyttivät suunnitteluarvot. Pöytäkirjoja ja valokuvia testijärjestelyistä lukuun ottamatta itse testitapahtumasta ei ollut tarkempaa kuvausta saatavissa.

### 3.9.2. Vakuumijärjestelmän tarkastukset

Vakuumijärjestelmän osalta tarkastukset nähtäisiin tärkeimmäksi ejektoriputkistossa. Erityisesti ejektoreiden läpi virtaavat kiintoaineet ja märän höyryn mukana kulkeutuvat vesipisarat voivat aiheuttaa eroosiota.

Ejektoriputkistoon on tehty paksuusmittaus. Tavoitteena oli nähdä, onko ejektoriputkistossa kulumia mahdollisten kiintoaineiden tai vesipisaroiden johdosta. Mittauksessa ei havaittu mitään merkittävää kulumista ejektoriputkiston osalta. Irrotettuina olleissa höyrystimissä ei myöskään ole havaittu kulumia visuaalisen tarkastelun perusteella.

## 4. KÄSITTELYPROSESSIN TASEET JA TASETÄSMÄYS

### 4.1. Käsittelyprosessin taseet

Ainetaseesta nähdään eri komponenttien määrä prosessivirroissa. Syöttöaineen käsittelyprosessin ainetasetta pystytään arvioimaan nestemäisten jakeiden osalta (Heikkilä;Malmen, 2019). Kaasumaisia lauhtumattomia jakeita ei kuitenkaan saada mitattua tällä hetkellä virtausmittauksilla, niiden puutumisen takia. Myös haasteet liittyen eri virtauksien näytteenottoapaikkoihin vaikeuttavat osaltaan asiaa. Tämä tekee realistisen ainetaseen laatimisen hankalaksi.

Massataseeseen sisältyvät kaikki prosessiin syötettävät ja ulos tulevat aineet. Eli huomioidaan hyödykkeet, raaka-aineet, tuotteet ja jätteet (Heikkilä;Malmen, 2019).

Energiatase kuvaa prosessiyksikössä siirtyviä energiavirtoja (Heikkilä;Malmen, 2019). Energiankulutuksen tarkka mittaaminen on hankalaa. Laitoksen kuuma- ja jäähdytysöljykierroista puuttuvat virtausmittaukset. Höyrynkulutuksen mittaaminen ei myöskään ole mahdollista höyryvirtauksen perusteella, koska siitäkin puuttuvat mittaukset.

### 4.2. Tasetäsmäyksen teoria

Tasetäsmäyksellä pyritään minimoimaan satunnaisten mittavirheiden aiheuttamat häiriöt. Käytännössä mittausdatassa on pieniä virheitä, jolloin tase ei täsmää. Tasetäsmäyksen kautta saadaan laskettua arvot, jotka toteuttavat taseen oikein. Tasetäsmäyksellä on mahdollista saada tietoa virtauksista, joilla ei ole virtausmittausta (Karaiste, 2016) (Mäkelä, 2018).

Tasetäsmäys perustuu järjestelmän, esimerkiksi prosessiyksikön ainetaseeseen. Tase muodostuu yksikön mittaustietoihin perustuen. Tällä hetkellä yksikön syötön nestevirtauksista on olemassa mittaukset. Kaasuvirtauksista ei kuitenkaan ole mittaustietoja. Tällä hetkellä olemassa olevien mittaustietojen perusteella yksiköstä ei pysty muodostamaan ainetasetta. Ainetase muodostuu seuraavasti yhtälön 5 mukaisesti.

$$\sum \dot{m} \text{ sisään} - \sum \dot{m} \text{ ulos} = 0 \quad (5)$$

$\dot{m} \text{ sisään}$       massavirta sisään      [kg/h]

$\dot{m} \text{ ulos}$       massavirta ulos      [kg/h]

Energiataseen muodostaminen on myös haastavaa, koska yksikön käyttämän lämpöenergian mittaaminen on hankalaa puutteellisten virtausmittausten kuuma- ja jäähdytysöljyn osalta. Yksikön haihduttimen käyttämää höyrymäärää kuten myöskään ejektorihöyryn määrää ei myöskään mitata. Täten energiatasetta ei pysty muodostamaan luotettavasti. Energiataseen yleinen yhtälö on nähtävissä yhtälöstä 6.

$$\sum \Delta P + \sum \Delta Q = \sum \dot{m}(\Delta h + \frac{1}{2}\rho v^2 + g\Delta z) \quad (6)$$

$\Delta P$	Sähkö ja mekaanisen energiantehon muutos	[kW]
$\Delta Q$	Lämpöenergian tehon muutos	[kW]
$\dot{m}$	Systeemin läpikulkeva massavirtaus	[kg/s]
$\Delta h$	Massavirtauksen ominaisenergian muutos	[kJ/kg]
$\rho$	Massavirtauksen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta v$	Massavirtauksen nopeus	[m/s]
$\Delta z$	Massavirtauksen korkeus	[m]

### 4.3. Tasetäsmäyksen hyödyntäminen työssä

Yksikön kaasuvirtausten massavirtoja ei mitata prosessissa. Vakuumiyksiköstä poistuvien nestevirtausten määrää ei myöskään mitata. Tämä vaikeuttaa ja käytännössä tekee tasetäsmäyksen luotettavan rakentamisen vakuumiyksikön osalta mahdottomaksi.

## 5. MITOITUSYHTÄLÖIDEN MÄÄRITTÄMINEN

### 5.1. Ejektorin mitoittaminen

Ejektorin kapasiteetti määräytyy sen osien halkaisijoiden ja pituuden perusteella. Tärkeimmät osat mitoituksen kannalta ovat höyrysuutin, diffuusori ja imukammio. Nämä sekä virtavaan aineen virtausmäärä ja ominaisuudet määrittävät ejektorin kapasiteetin ja suorituskyvyn. Asettamalla useampi ejektorin sarjaan, saavutetaan suurempi operointialue ja parannetaan koko systeemin kokonaistehokkuutta (El-Dessouky;Ettonuney;Alatiqi;& Al-Nuwaibit, 2002, ss. 551-553).

Ejektorin mitoittaminen voidaan toteuttaa matemaattisen mallin kautta. *El-Dessouky et al.* ovat määrittäneet mallin, jonka kautta mallinnus ja ejektorin suunnittelu tapahtuu. Ejektorin mallinnukselle on tässä tutkimuksessa kaksi erilaista lähestymistapaa ejektorianalyysiin. Malleissa höyryn ja imukaasun sekoittuminen tapahtuu joko vakio paineessa tai vakio pinta-alalla. Vakio paineessa tapahtuvat mallit ovat yleisempiä ja niitä pidetään vakioalumenetelmää parempana, koska saadut tulokset ovat olleet vakio painemallilla parempia.

Ejektori määritetään toimimaan tietyssä toimintapisteessä. Ejektorin kapasiteetti määräytyy käyttöhöyryn ja imuvirtauksen summasta, joka siis kuvaa kompressoitujen kaasujen virtausta. Käytännössä höyry ajetaan ejektorille virtausta kuristavan suuttimen läpi, jossa sen nopeus kasvaa ja staattinen paine pienenee. Suutin laajenee höyryn ulostulopisteessä. Tämä johtaa siihen, että höyryn purkautuessa sen nopeus nousee yli äänennopeuden. Höyrysuuttimen paine on ejektorille imettävien imukaasujen painetta pienempi. Tällä saadaan aikaiseksi imukammioon imettävien kaasujen liike imukammioon. Ejektorin virtaukset ja niiden nopeus ja paine on nähtävissä kuvasta 12 (*El-Dessouky;Ettonuney;Alatiqi;& Al-Nuwaibit, 2002*).

Imukammiossa aineiden paineet ja nopeudet tasaantuvat. Tämä johtaa niiden sekoittumiseen. Diffusoriosan kapenevassa alkuvaiheessa kaasut sekoittuvat ja niiden virtausnopeus laskee. Toisin kuin reaali maailmassa, staattisen paineen odotetaan pysyvän tässä kohtaa vakiona matemaattisessa mallinnuksessa. Käytännön sovelluksissa staattinen paine kuitenkin kasvaa, kun virtausnopeus laskee. Diffusoriosan kurkulla virtaus ja paine pysyvät vakiona, ennen kuin paineallot hidastavat virtauksen alle äänennopeuden (*Skogberg, 2019*).

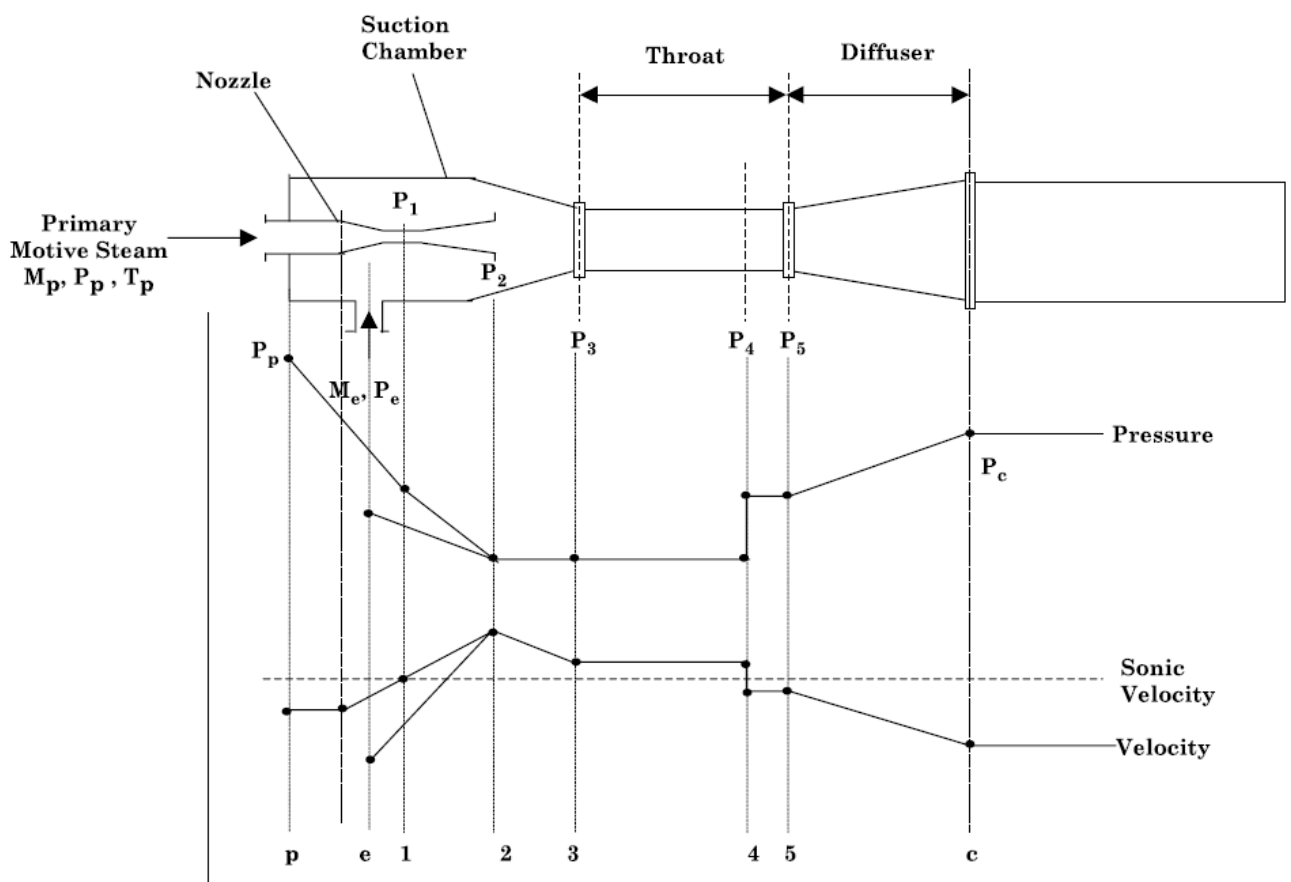
*El-Dessouky et al.* ovat tutkineet yksinkertaisen empiirisen matemaattisen mallin luomista, jota voitaisiin hyödyntää ejektorin suunnittelussa ja suorituskyvyn arvioinnissa. Malli perustuu laajaan ejektorivalmistajien tietokantaan, josta tärkeimmät tiedot ovat poimittu. Lisäksi mallin luonnissa on hyödynnetty aiheesta tehtyjä kirjallisia tutkimuksia.

Käyttöhöyry laajentuu isentrooppisesti suuttimella. Käyttöhöyryn ja imukaasun seos käyttäytyy myös isentrooppisesti diffusorilla. Näiden kaasujen oletetaan sekoittuvan sekoituskammiossa. Kaasut ovat kyllästyneessä muodossa ja niiden virtausnopeudet ovat merkityksettömiä, koska kaasu virtausnopeudella ei ole merkitystä sen purkautuessa ulos ejektorilta (*El-Dessouky;Ettonuney;Alatiqi;& Al-Nuwaibit, 2002*).

Isentrooppinen paisuntaeksponentti on vakio. Kaasujen oletetaan olevan ideaalisia ja virtauksen adiabaattinen. Ejektoreilla tapahtuvat kitkahäviöt määritetään suuttimen, diffusorin ja

sekoituskammion isentrooppisten hyötysuhteiden perusteella. Käyttöhöyryllä ja imukaasulla oletetaan olevan sama molekyylipaino ja ominaislämpökapasiteetti. Ejektorivirtaus on yksiulotteinen ja se tapahtuu vakaisissa olosuhteissa (El-Dessouky;Ettonuney;Alatiqi;& Al-Nuwaibit, 2002).

Kuvasta 11 nähdään eri pisteiden sijoittuminen ejektorille. Kuvasta on myös nähtävissä eri ejektorin osat ja kaasun paine ja virtausnopeuden muutokset. Kyseiseen kuvaan viitataan kaavoissa, joiden perusteella saadaan tehtyä ejektorin mallinnus ja mitoitus.



Kuva 11 Paineen ja nopeuden vaihtelu ejektorin eri vaiheissa (El-Dessouky;Ettonuney;Alatiqi;& Al-Nuwaibit, 2002)

## 5.2. Mitoitusyhtälöt

Ejektorin massatase rakentuu yhtälöllä 7.

$$m_p + m_e = m_c \quad (7)$$

$m_p$  käyttöhöyryn virtaus [kg/h]

$m_e$  imukaasun virtaus [kg/h]

$m_c$  kompressoidun höyrykaasuseoksen virtaus [kg/h]

Sekoittumissuhde lasketaan yhtälöllä 8.

$$w = m_c/m_p \quad (8)$$

Kompressiosuhde lasketaan yhtälöllä 9.

$$Cr = p_c/p_e \quad (9)$$

$p_c$  kompressoidun kaasun paine [kPa]

$p_e$  imukaasun paine [kPa]

Massavirtasuhde lasketaan yhtälöllä 10.

$$Er = P_p/P_e \quad (10)$$

*El-Dessouky et al* (2002) kuvaavat julkaisussaan ejektorin mitoitukseen käytettävät yhtälöt. Käyttöhöyryn isentrooppista paisuntaa suuttimen ulostulossa kuvataan Machin-luvulla, joka lasketaan yhtälöllä 11.

$$M_{p2} = \sqrt{\frac{2\eta_n}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{p_p}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (11)$$

$M_{p2}$  käyttöhöyryn paisuntakerrointa kuvaava Machin-luku

$p$  paine [kPa]

$p_2$  paine höyrysuuttimen ulostulossa [kPa]

$\gamma$  isentrooppinen paisuntakerroin

$\eta_n$  höyrysuuttimen tehokkuus, joka on määritetty suhteena todellisen entalpiamuutoksen ja isentrooppisen prosessin entalpia muutoksen välillä

Imukaasun isentrooppinen paisunta lasketaan yhtälöllä 12.

$$M_{e2} = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{p_e}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (12)$$

$M_{e2}$  imukaasun paisuntakierroin imukammiossa

Sekoittumisprosessia mallinnetaan yksiulotteisilla jatkuvuus-, liikemäärä- ja energiayhtälöillä. Yhtälöt yhdistetään kriittisen Mach-luvun määrittelemiseksi ejektorin kurkun ja diffusorin rajalla pisteessä 5. suhteessa höyryn ja imukaasujen kriittisen Mach-lukuun ejektorin imukammiossa pisteessä 2. Sekoittumisprosessin malli lasketaan yhtälöllä 13.

$$M_4^* = \frac{M_{p2}^* + w M_{e2}^* \sqrt{T_e/T_p}}{\sqrt{(1+w)(1T_e/T_p)}} \quad (13)$$

$w$  sekoitussuhde

$M^*$  paikallisen nopeuden suhde äänennopeuteen kriittisissä olosuhteissa

Mach-luvun  $M$  ja  $M^*$  suhde saadaan seuraavalla yhtälöllä.  $M_{e2}^*$ ,  $M_{p2}^*$ ,  $M_4$  arvot on laskettu yhtälöllä 14.

$$M^* = \sqrt{\frac{M^2(\gamma+1)}{M^2(\gamma-1)+2}} \quad (14)$$

Mach-luku lasketaan paineaallon jälkeen sekoittuneelle virtaukselle yhtälöllä 15. Ejektorin ulostulon vastapaine määrittää paineaallon sijainnin ejektorin kurkulla.

$$M_5 = \frac{M_4^2 + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} M_4^2 - 1} \quad (15)$$

Paineen nousu ejektorin kurkulla ennen diffusoria pisteessä 4. Pisteestä 2 pisteeseen 4 paine pysyy vakiona. Tämä siis tarkoittaa  $p_2 = p_3 = p_4$ . Paineen nousu määritetään yhtälöllä 16.

$$\frac{p_5}{p_4} = \frac{1+\gamma M_4^2}{1+\gamma M_5^2} \quad (16)$$

Paineen nousu diffusorilla ilmenee yhtälöstä 17.

$$\frac{p_c}{p_5} = \left[ \frac{\eta_d(\gamma-1)}{2} M_5^2 + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (17)$$

$\eta_d$  diffusorin tehokkuus

Suuttimen kurkun alue lasketaan yhtälöllä 18.

$$A_1 = \frac{m_p}{P_p} \sqrt{\frac{RT_p}{\gamma \eta_n}} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \quad (18)$$

Suuttimen kurkun ja diffuusorin vakio-pinta-alan suhde lasketaan yhtälöllä 19.

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{p_c}{p_p} \left(\frac{1}{(1+w)(1+w\left(\frac{T_e}{T_p}\right))}\right)^{1/2} \frac{\left(\frac{p_2}{p_c}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_c}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right)^{1/2}}{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(1 - \frac{2}{\gamma+1}\right)^{1/2}} \quad (19)$$

Suuttimen kurkun ja suuttimen ulostulon suhde lasketaan yhtälöllä 20.

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{1}{M_{p_2}^2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p_2}^2\right)\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (20)$$

Kylläisen höyryn lämpötilan korrelaatio saadaan määritettyä yhtälöllä 21. Yhtälön korrelaatio pätee painealueella 10 – 1750 kPa.

$$T = \left(42,6776 - \frac{3892,7}{\left(\ln\left(\frac{P}{1000}\right) - 9,48654\right)}\right) - 273,15 \quad (21)$$

$T$  höyryn lämpötila [°C]

$p$  höyryn paine [kPa]

Kylläisen vesihöyryn paineen korrelaatio ilman ominaisuuksiin 20 °C lämpötilassa määritetään yhtälöllä 22. Yhtälön korrelaatio pätee lämpötila alueella 5 – 200 °C.

$$\ln\left(\frac{P}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T+273,15} - 1\right) \times \sum_{t=1}^8 f_t (0,01(T + 273,15 - 338,15))^{(t-1)-1} \quad (22)$$

$T_c$  647,286 K

$p_c$  22089 kPa

*Korjauskertoimet vesihöyryn kylästymispaineen määrittämiseksi.*

$f_1 = -7,419242$   $f_2 = 0,29721$   $f_3 = -0,1155286$   $f_4 = 0,008685635$

$f_5 = 0,001094098$   $f_6 = -0,00439993$   $f_7 = 0,002520658$   $f_8 = -0,000521868$

(El-Dessouky; Ettonuney; Alatiqi; & Al-Nuwaibit, 2002).

### 5.3. Ratkaisumallit

*El-Dessousky et al.* esittävät kaksi erilaista ratkaisumallia otsikon 5.2. alla olevaan malliin. Molemmat ratkaisumallit vaativat iteratiivista laskentaa. Ensimmäinen menetelmä soveltuu systeemin suunnitteluun, jossa systeemin paineet ja sekoittumissuhde ovat määritetty. Iteraatiota



tarvitaan höyrysuuttimen ulostulopainetta, joka antaa saman vastapaineen. Tuloksena saadaan pinta-alasuhte.

Ratkaisumalli alkaa suunnitteluparametrien määrittämisellä, jotka sisältyvät sekoittumissuhteeseen ( $w$ ), kompressoitujen kaasujen virtaukseen ( $m_c$ ) ja imukaasun-, kompressoitujen kaasujen ja käyttöhöyryn paineeseen ( $p_c, p_e, p_p$ ).

Seuraavassa vaiheessa määritetään höyrysuuttimen ja diffuusorin tehokuudet ( $\eta_n$ ) ja ( $\eta_d$ ). Määritetään kyllästymislämpötilat kompressoidulle kaasulle, imukaasulle ja käyttöhöyrylle ( $T_c, T_e, T_p$ ). Tämä tapahtuu kaavojen 21 ja 22 kautta. Imukaasun virtaus ( $m_e$ ) ja käyttöhöyryn virtaus ( $m_p$ ) saadaan laskettua kaavoilla 7 ja 8.

Höyrysuuttimen ulostulon eli pisteen 2 ( $p_2$ ) paine on arvioitu ja yhtälöt 9 – 15 on ratkaistu peräkkäin ja sitä kautta on määritetty kompressoidun kaasun paine ( $p_c$ ). Tätä painetta verrataan suunnitteluarvoon. Uusi arvo pisteelle 2 ( $p_2$ ) on arvioitu ja aiemmat vaiheet tehdään uudestaan, kunnes haluttu kompressoidun kaasun paine ( $p_c$ ) on saavutettu.

Toista ratkaisumallia käytetään ejektorin suorituskyvyn arviointiin. Tuloksena tästä mallista saadaan laskettua sekoittumissuhde. Tätä mallia varten poikkipinta-alat, imukaasun- ja käyttöhöyryn paineet on tiedettävä. Iteraatiota käytetään tässä mallissa sekoittumissuhteen määrittämiseen, joka määrittää ejektorin kapasiteetin.

Ensimmäisessä vaiheessa tässä ratkaisumallissa määritetään suorituskyvyn parametrit, jotka kertovat poikkipinta-alan ( $A_1, A_2, A_3$ ). Lisäksi määritetään imukaasun ( $p_e$ ) ja käyttöhöyryn ( $p_p$ ) paineet. Määritetään myös höyrysuuttimen ja diffuusorin tehokuudet ( $\eta_n$ ) ja ( $\eta_d$ ). Määritetään kyllästymislämpötilat imukaasulle ja käyttöhöyrylle ( $T_e, T_p$ ).

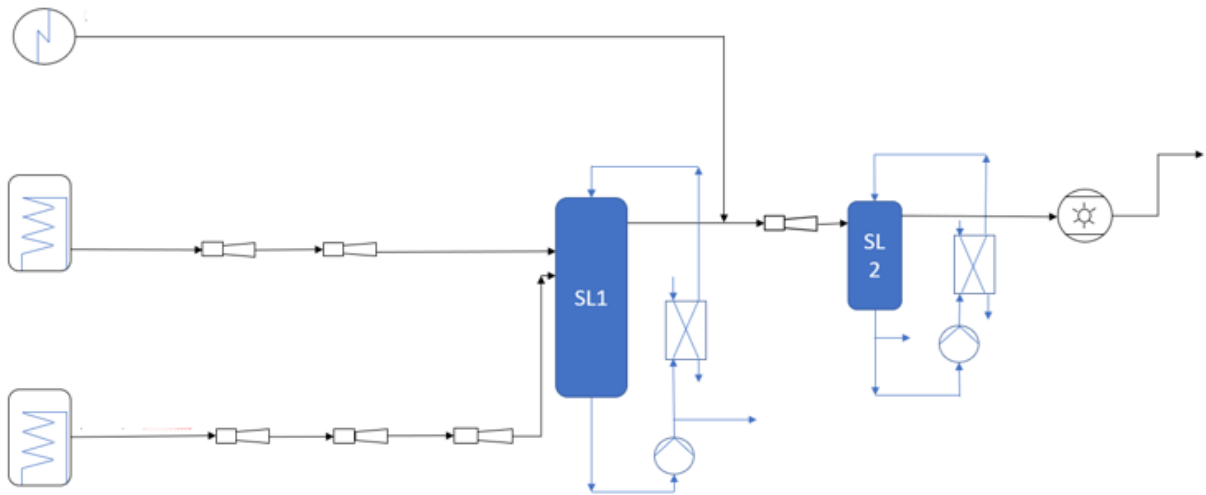
Määritetään käyttöhöyryn virtaus ja höyrysuuttimen ulostulon ominaisuudet. Tämä sisältää ( $m_p, p_2, M_{e2}$  ja  $M_{p2}$ ). Näiden arvojen ratkaisemiseksi käytetään kaavoja 9, 10, 17 ja 15. Tämän jälkeen on saatu estimaatti sekoittumissuhteesta ( $w$ ).

Saatua arvoa ( $w$ ) käytetään systeemin muiden parametrien määrittämiseen kaavoilla 11 - 15. Nämä sisältävät seuraavat parametrit  $M^*_{e2}, M^*_{p2}, M^*_4, M_4, M_5, p_5, p_c$ . Tämän jälkeen uusi estimaatti sekoittumissuhteesta ( $w$ ) saadaan yhtälöstä 19. Jos arvossa ( $w$ ) havaitaan virhettä, toistetaan iteraatio. Kompressoidun- ja imukaasujen virtausmäärät lasketaan kaavoilla 7 ja 8.

Liitteestä I. löytyy taulukoituna ratkaisumallit matemaattisen mallin käyttämiseksi.

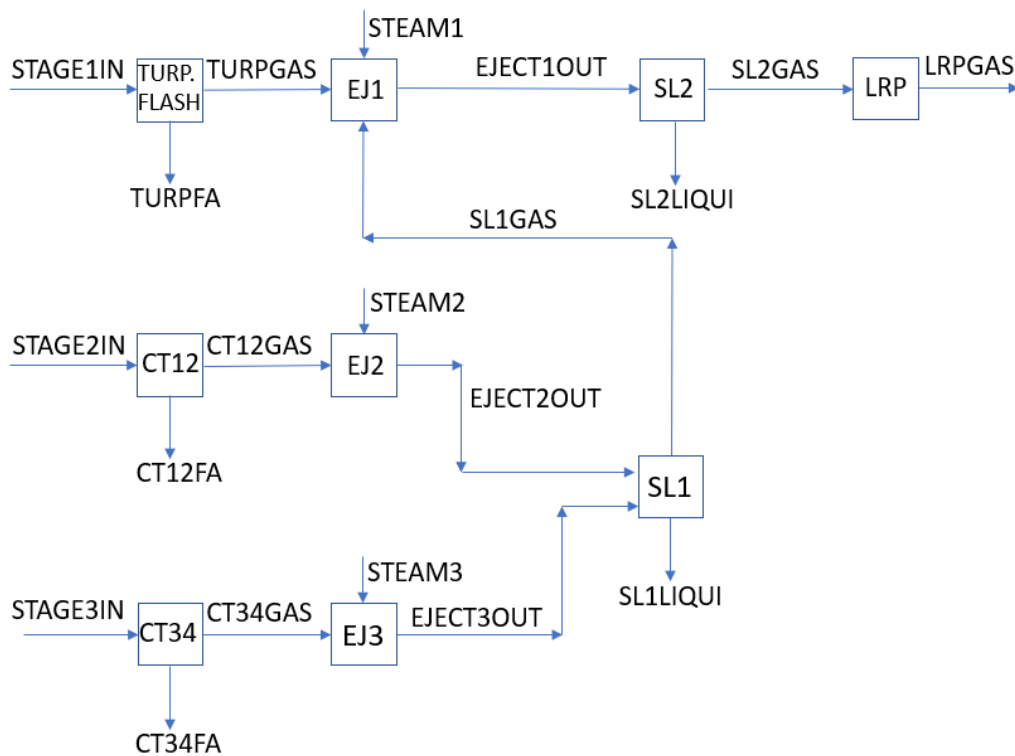
## II KOKEELLINEN OSA

### 6. SIMULOINTI



Kuva 12 Vakuumijärjestelmän virtauskaavio, johon simulointimalli pohjautuu

#### 6.1. Vakuumijärjestelmän simulointi



Kuva 13

Vakuumijärjestelmän simulointimalli lohkokaaaviona esitettynä

Työn tavoitteena oli saada rakennettua vakuumijärjestelmää kuvaava simulaatiomalli. Mallin perusteella oli tarkoitus löytää pullonkaulakohtia järjestelmästä. Pullonkaulat pyrittiin paikallistamaan massavirtausten muutosten perusteella ja vertaamalla mallin olosuhteita käytännön olosuhteisiin. Kuva 12 esittää vakuumijärjestelmän todellisen virtauskaavion laitteineen. Kuvasta 13 nähdään lohkokaaviona, kuinka vakuumijärjestelmä on toteutettu simulointijärjestelmään. Päävirrat ovat nimetty samalla tavoin, kuin simulointimallissa.

Prosessiyksikön toimittaja ei ole eritellyt toimituksessaan syötön tarkempaa koostumusta mitenkään. Varsinkin vakuumijärjestelmän kohdalla oli ilmoitettu suurpiirteiset arviot järjestelmään kulkeutuvista komponenteista. Lähinnä tiedoissa oli ilmoitettu molekyylipaino ja arvio onko kyseessä rasvahappo vai neutraaliaine. Ejektorimallin lähtötietoina hyödynnettiin aiemmin toisessa diplomityössä (Halme, 2019) tehtyjen käsittelyprosessin haihdutinmallien antamia lähtötietoja. Tietoja käytettiin oikeanlaisen syöttöaineen rakentamiseen vakuumiyksikön mallille.

Syöttövirtaustasona käytettiin kolmea eri massavirtausta. Syöttöjakeet saatiin jaoteltua kolmen erityyppisen syötön perusteella. Painetasoina käytettiin neljää eri painetasoa. Kunkin syötteen painetasot ovat nähtävissä taulukosta 1. Erilaisilla syötetyypeillä ja painetasoilla pyrittiin havaitsemaan muutoksia prosessin eri osien massavirtauksissa.

Taulukko 1. Simulointimallissa käytetyt painetasot

		p1	p2	p3	p4	mbar
1	FEED11	20	50	65	100	mbar
2	FEED12	20	50	65	100	mbar
3	FEED13	20	50	65	100	mbar
4	FEED21	0,1	1	15	40	mbar
5	FEED22	0,1	1	15	40	mbar
6	FEED23	0,1	1	15	40	mbar
7	FEED31	0,01	0,1	10	20	mbar
8	FEED32	0,01	0,1	10	20	mbar
9	FEED33	0,01	0,1	10	20	mbar

Lisäksi haluttiin simuloida käyttöhöyryn paineen muuttamista. Eli saavutettaisiinko tällä simuloinnilla selkeästi havaittavaa parannusta vakuumitasoon. Käyttöhöyryn paineen nostaminen testattiin 4,5 bar ja 10,5 bar paineilla.

Käsittelyprosessiin aiemmin toteutetussa tutkimuksessa suositettiin Stage-1:n ja Stage-2 & -3 vakuumijärjestelmien erottamista. Käytännössä tämä tarkoittaisi, että prosessivaihe 1:n haihduttimet ovat oman nesterengaspumpun kehittämässä vakuumissa. Vastaavasti prosessivaiheet 2 & 3 toimisivat nykyisen käytössä olevan vakuumijärjestelmän piirissä. Tätä mallia haluttiin myös testata erottamalla vakuumijärjestelmät omiksi yksiköikseen.

## 6.2. Simulointiohjelmisto

Simulointi toteutettiin AspenPlus V10:n prosessisimulointiohjelmistolla. Ohjelmisto on kehitetty erityisesti kemianteollisuuden käyttöön. Prosessin toimintaa simuloidaan kemialliseen tasapainoon, massa- ja energiataseisiin, sekä reaktiokinetiikkaan perustuen. Ohjelmalla rakennettiin vakuumijärjestelmän malli, joka kuvaa ejektoreita, nesterengaspumppua ja muita järjestelmään kuuluvia laitteita. Ohjelmisto on valittu käytettäväksi työssä, koska sen kautta on lopulta mahdollista saada koko syötön käsittelyprosessin kattava simulointimalli aikaiseksi.

Aspen ei tarjoa valmiina komponenttina ejektoria, vaan se täytyy rakentaa ohjelmistossa saatavissa olevilla komponenteilla. Syöttövirtojen komponenttien perusteena mallille käytettiin laitteistotoimittajan suunnitteluarvoja ja aiemmin toteutetuista haihdutinmalleista saatuja syöttöarvoja.

Vakuumiyksikön erilaisia syöttö- ja painekombinaatioita syntyi yhteensä 27 kappaletta. Vakuumiyksikköön syötetään virtoja kolmesta eri pisteestä. Kuhunkin pisteeseen tulee kolmen eri laadun syöttö, jotka on haihdutinmallissa ajettu kolmella eri syöttönopeudella.

Varsinaiseen ejektoreiden ja sen laitteiden, kuten lauhduttimien suunnitteluun Aspen-ohjelmisto ei ole parhaimmillaan. Ejektoreiden toimintaa simuloidaan tyypillisesti ejektorivalmistajien omilla ohjelmistoilla, joissa on otettu vaaditut oikeat mallinnustarpeet huomioon. Esimerkiksi lauhduttimien suunnittelussa on oltava riittävä ymmärrys, jotta lämmönsiirtotarpeet ja sisäiset painehäviöt pystytään mallintamaan riittävän tarkasti. Tätä varten jokaisella ejektorivalmistajalla on omat ejektoreiden mitoituskehitetyt ohjelmistonsa (Lines, ss. 2-3).

Ejektorijärjestelmän mitoitus on siis täysin oma suunnittelualansa. Valmistajilla on omat empiirisiin tutkimuksiin perustuvat kirjastonsa liittyen ejektoreiden mitoituskehitetyt ohjelmistonsa (Lines, ss. 2-3). Tästä johtuen

ejektoritoimittajat tarjoavat yleensä ejektoreita hankittaessa suunnittelun koko vakuuminjärjestelmälle (Eriksson, sähköpostikeskustelu, 2019).

Aspen-ohjelmistolla pystytään kuitenkin mallintamaan nykyisen järjestelmän toimintaa. Ohjelmistolla voidaan mallintaa nykyisiä laitteita ja niiden käyttäytymistä erilaisilla syötteillä ja vakuumitasoilla. Tässä kohtaa ohjelmiston tarkoituksena ei ole mitoitaa ejektoreita uudestaan, vaan löytää järjestelmän pullonkaulakohtia.

### 6.2.3. Haihdutinmallit

Syöttöaineet ja niiden syöttönopeudet haihdutinmalliin ovat nähtävissä taulukosta 2. Erilaiset syöttötyypit perustuvat *Halmeen* (2019) diplomityössään tekemään kirjallisuustutkimukseen. Tutkimuksen perusteella rakennettiin syöttöainekombinaatiot, joilla kuvataan eri syöttötyyppejä. Kutakin syöttötyyppiä ajettiin kolmella eri syöttönopeudella. Vesi- ja tärpättipitoisuuden prosenttiosuudet pidettiin jokaisessa ajossa vakioina. Lämpötila- ja paineolosuhteet olivat myös vakio-olosuhteissa simulointien välillä. Termodynaamisena mallina käytettiin myös haihdutinsimulaatioissa NRTL-mallia. Haihduttimien simulaatiomalleista kerättiin keveiden lauhtumattomien jakeiden tiedot. Näiden jakeiden perusteella rakennettiin syöttövirrat ejektorimalliin.

Taulukko 2. Vakuumiyksikön mallin syötteenä haihdutinmallista kerätyt syötöt

Syöttötyyppi 1	Syöttötyyppi 2	Syöttötyyppi 3
matala x 3 eri ulosottoa	matala x 3 eri ulosottoa	matala x 3 eri ulosottoa
keski x 3 eri ulosottoa	keski x 3 eri ulosottoa	keski x 3 eri ulosottoa
korkea x 3 eri ulosottoa	korkea x 3 eri ulosottoa	korkea x 3 eri ulosottoa

Malli on jaettu kahteen eri tiedostoon. Ensimmäisessä on mallinnettu stage-1:n haihduttimet. Tässä vaiheessa erotetaan tärpätti- ja vesijakeet syötöstä. Tästä mallista kerättiin tiedot ejektorimallin kuivausosan eli stage-1 vakuumiosan syöttötietoja varten. Vakuuminjärjestelmän mallin päävirtaukset ovat nähtävissä kuvasta 13. Eli haihdutinmallista saadaan yksi virta, jota hyödynnetään vakuumiyksikön mallissa. Prosessivaihe 1:n syötön ulostulosta kerättiin tiedot syötön rasva- ja hartsihapoista, sekä neutraaliaineista. Näitä tietoja tarvitaan prosessivaihe 2 & 3 mallin syöttökomponenttien tietoihin. Prosessivaihe 1:n malli on nähtävissä liitteestä II.

Prosessivaihe-2- ja 3-mallista kerätään dataa haihduttimilta lähtevistä kevyistä lauhtumattomista komponenteista, jotka päätyvät vakuuminjärjestelmään. Tästä mallista saadaan tiedot vakuumiyksikön mallin stage-2 ja -3 virroille. Tässä mallissa käytettiin samoja syöttönopeuksia,

mitä prosessivaihe 1:n haihdutinmallissa. Myös paine- ja lämpötilat pidettiin prosessivaihe 2 & 3 mallissa vakiona. Malli on nähtävissä liitteestä III.

Haihdutinmallit ovat rakennettu pääasiallisesti lämmönvaihtimien ja flash-säiliöiden kautta. Aspen ei tarjoa suoraan sopivia haihduttimia kuvaavia komponentteja käytettäväksi.

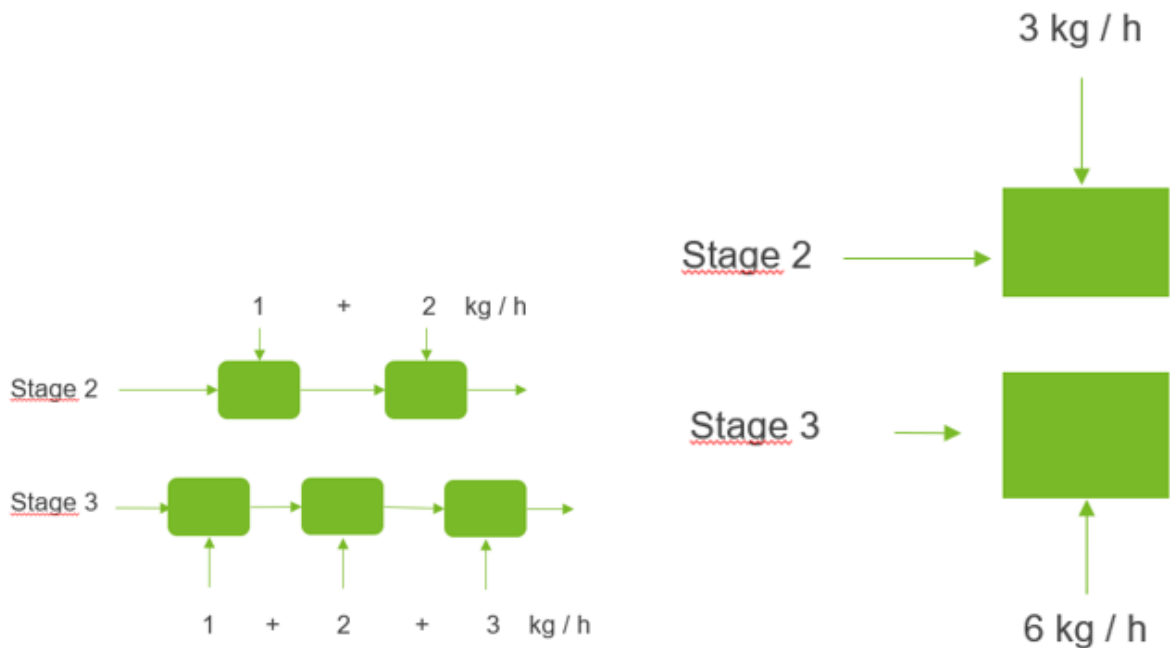
#### **6.2.4. Vakuumiyksikön simulointimalli**

Vakuumiyksikön simulointimallin luominen oli yksi diplomityön tavoitteista. Suurinta osaa vakuumiyksikön laitteista ei löydy suoraan Aspenin tarjoamana. Laitteisto täytyy määrittää käyttämällä saatavissa olevia komponentteja. Yksikön mallintamisessa käytettiin flash-säiliöitä, miksereitä, lämmönvaihtimia ja kompressorimalleja. Mallista pyrittiin luomaan yksinkertainen. Tässä vaiheessa sillä pyritään näkemään muutokset massavirtauksissa erilaisissa paineolosuhteissa. Myös virtojen komponenttien koostumukset ovat tutkinnan alla.

Vakuumiyksikön mallin syöttökomponenttien tiedot kerättiin haihdutinmalleista. Näiden perusteella rakennettiin syöttövirtaukset kuhunkin vakuuulinjaan. Jokainen linjasto toimii eri painetasossa, kuten yksikkö oikeastikin. Jokaisesta syöttölaadusta rakennettiin haihdutinmallin kolmen eri syöttönopeuden perusteella kolme erilaista syöttövirtaa vakuumiyksikköön kolmeen eri syöttöpisteeseen.

Ejektorin rakentamisessa Aspeniin oli siis haasteena oikeanlaisten komponenttien löytäminen, koska valmista ejektorimallia ei löydy. Myös monivaiheiset ejektorit tuovat mallinnukseen oman haasteensa. Useampi vaiheinen ejektorilinja esimerkiksi stage-3:lla päädyttiin mallintamaan yhtenä laitteena mallin selkeyden säilyttämiseksi.

Ejektori on toteutettu kompressorimallilla. Kompressorin laskee paineen haluttuun tasoon. Tämän jälkeen ulostuleva kaasu jäähdytetään määrättyyn pisteeseen. Ejektorikaasun lauhdutus tapahtuu flash-säiliössä, joka kuvaa stage-3:n tilanteessa suihkulauhduksen 2:sta. Kuvasta 14 ilmenee ajatus höyryn syötöstä ejektorille. Kaikki höyry syötetään mallissa yhdestä pisteestä. Yksittäisiä ejektorivaiheita ei oteta mallissa huomioon, vaan niitä kuvataan yhdellä laitteella. Ejektorille syötettävä höyryn määrä on siis ejektorihöyryjen mitoitusvirtausten summa.



Kuva 14 Periaate höyryjen syötöstä ejektorille simulointimallissa

### 6.2.5. Stage-1 ja nesterengaspumppu

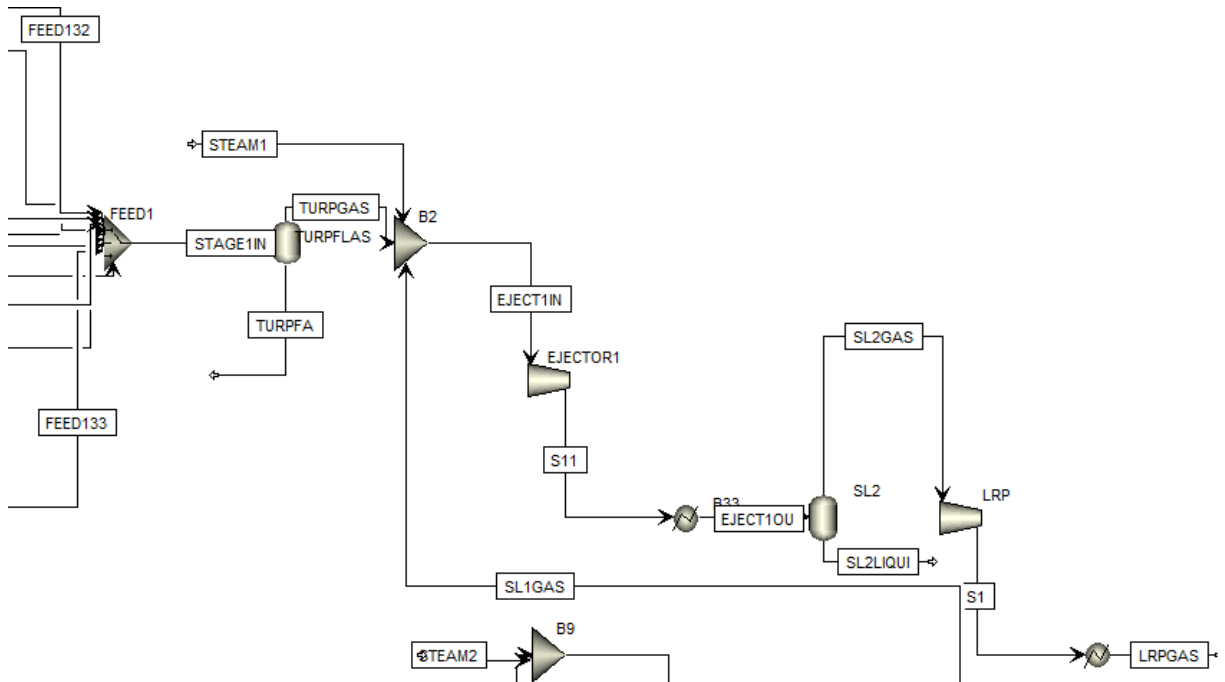
Stage-1 kuvaa kuivausvaiheen lauhtumattomien kaasujen ajoa vakuumijärjestelmään. Syöttö kerätään mikserille, josta on valittavissa haluttu syöttövirta vakuumiyksikköön päin. Stage-1:n periaate on nähtävissä kuvasta 15. Kaasusta erotetaan neste TURPFLAS-säiliössä, poistuvan nesteen massavirtaus on yksi seurattavista pisteistä. Tässä mallissa tärpätti oli jo erotettu aiemmassa haihdutinmallissa.

Kaasut johdetaan mikserille, johon tuodaan myös ejektorin käyttöhöyry ja SL1:n suunnasta tulevat kaasujakeet. Käyttöhöyryn määränä käytettiin arvoa 249 kg/h. Tämän jälkeen kaasut johdetaan kompressoriohjelmalle, jossa paine lasketaan alas. Tämän jälkeen joudutaan vielä malliin lisäämään lämmönvaihdin, jolla kompressorin nostama lämpötila tuodaan takaisin oikeaan pisteeseen. Nämä laitteet kuvaavat ejektori 1:tä.

Tältä ejektoria kuvaavalta laiteyhdistelmästä kaasut johdetaan suihkulauhdutin 2:lle, jossa kaasut pyritään lauhduttamaan mahdollisimman tehokkaasti. SL2:sta kuvaa flash-säiliö, johon on määritetty paine- ja lämpötilaolosuhteet, joissa lauhdutus tapahtuu. Poistuvan nesteen massavirtaus on yksi mallissa seurattavista ulosottopisteistä.

SL2:n kaasut johdetaan nesterengaspumpulle, jota myös kuvaa kompressoriohjelma. Kaasujen virtauksesta nähdään nesterengaspumpun kapasiteetin riittävyys. Nesterengaspumppu nostaa

kaasujen paineen hieman ilmakehän painetta korkeammaksi. Objektin jälkeen kaasu jäädytetään lämmönvaihtimella haluttuun lämpötilaan. Nesterengaspumpun ulostulo on yksi seurattavista ulosottopisteistä.



Kuva 15 Stage-1 ejektorimalli ja nesterengaspumppu

Stage-1-mallissa käytetyt Aspen-komponentit.

- FEED1 (Selector)  
Kyseisellä komponentilla määritettiin haluttu syöttövirta. Käytännössä valittiin haluttu syöttövirta, jonka komponentit oltiin kerätty haihdutinmallin simulaatiosta. Esimerkkinä syöttövirta FEED132 tarkoittaa kuivausosalta tulevia lauhtumattomia hönkiä. Kyseessä on syöttötyyppi 3 syöttönopeudella 2.
- TURPFLAS (Flash) 2)  
Erotussäiliö, jossa erotetaan nesteet kuivausosan höngistä eli FEED1 virtauksesta. Tässä säiliössä määritetään STAGE1:n painetaso. Kaasut ohjataan tästä pisteestä ejektori 1.:lle.
- B2 (Mixer), EJECTOR1 (Compressor) ja B33 (Heater)  
Nämä komponentit muodostavat ejektorin. Höyry ja imuvirtaus sekoitetaan mixer B2:lla. Paineen lasku on toteutettu kompressorilla. Tämä komponentti nostaa virtauksen lämpötilaa, joten lämpötila tuodaan alas lämmönvaihtimella B33.



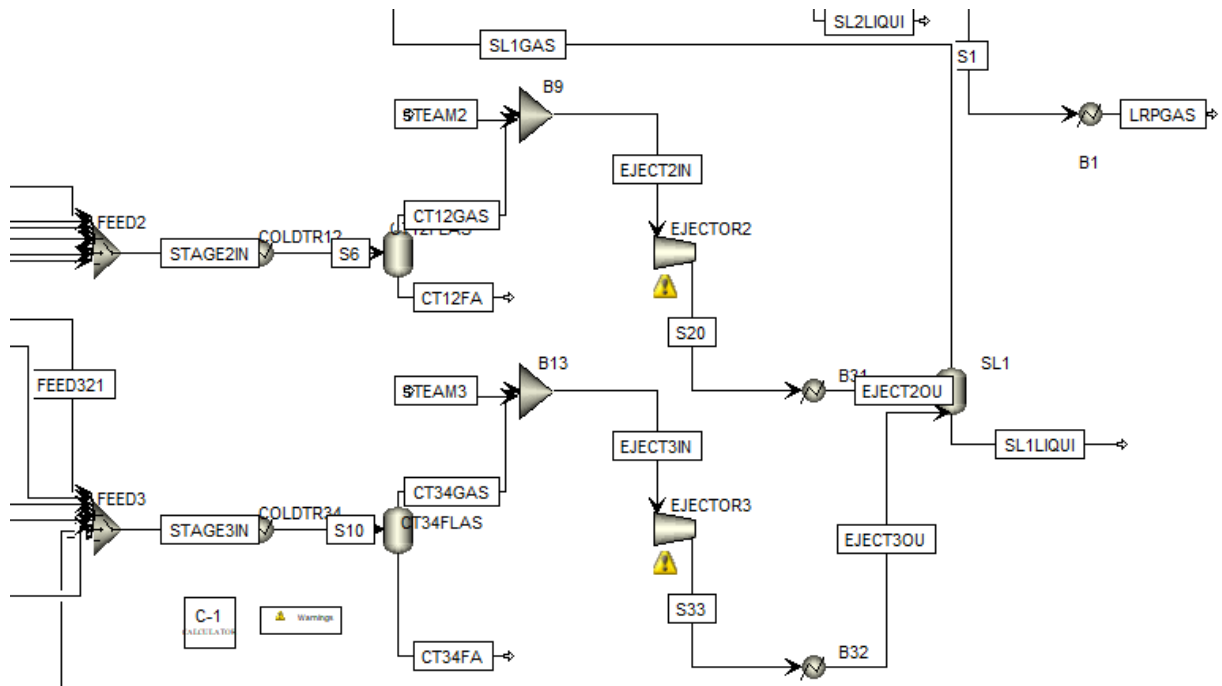
- SL2 (Flash 2)  
Suihkulauhdutin 2:ta kuvaava Flash2-säiliö, nesteen ja kaasun erotus. Tässä pisteessä määritetään kyseisen säiliön- ja nesterengaspumpun paine.
- LRP (Compressor) ja B1 (Heater)  
Nämä komponentit muodostavat nesterengaspumpun. Kompressori komponentti nostaa paineen, jonka seurauksena myös virtauksen lämpötila nousee. Lämpötila tuodaan kompressorin jälkeen matalammalle lämmönvaihtimella.

### 6.2.6. Stage-2

Stage-2 kuvaa mallissa prosessivaihe 2:n lauhtumattomia kaasuja. Syöttöperiaate on samanlainen, kuin Stage-1:llä. Ensimmäisenä linjassa on lämmönvaihdin, joka kuvaa coldtrap 1 & 2:n jäähdytysvesikierukkaa. Varsinaista kylmäerotinta kuvaa flash-säiliö. Säiliön alaosasta poistuu rasva- ja hartsihappo ja neutraaliainepitoinen nestevirtaus. Tämä virtaus on yksi seurattavista pisteistä. Säiliön yläosasta poistuu kylmäerottimella lauhtumattomat jakeet. Näiden virtaus kertoo ejektorikuormituksen tasosta.

Tämän jälkeen kaasut johdetaan mikserille samaan tapaan, kuin Stage-1:llä. Tässä pisteessä lisätään myös ejektorin käyttöhöyry 210 kg/h virtaukseen. Ejektori on toteutettu samalla mallilla, kuin Stage-1:llä. Stage-2:n toimintaidea on nähtävissä kuvasta 17.

Lauhdutus tapahtuu SL1:llä. Kyseisessä pisteessä poistetaan lauhtuneet ejektorihöyryt ja valtaosa kylmäerotin 1 & 2:lta peräisin olevista syöttöjakeista. SL1:llä lauhtumattomat jakeet johdetaan Stage-1:n ejektorille ja siitä eteenpäin vakuuminjärjestelmään. Tämä kohta systeemistä on nähtävissä kuvasta 16.



Kuva 16 Stage-1 ja Stage-2 laitteistoon

Stage 2- ja Stage-3 mallissa käytetyt Aspen-komponentit.

- FEED2 (Selector)
 

Kyseisellä komponentilla määritettiin haluttu syöttövirta. Käytännössä valittiin haluttu syöttövirta, jonka komponentit oltiin kerätty haihdutinmallin simulaatiosta. Esimerkkinä syöttövirta FEED232 tarkoittaa proosevaihe 2:lta tulevia hönkiä. Kyseessä on syöttötyyppi 3 syöttönopeudella 2.
- COLDTR12 (Heater) ja CT12FLAS (Flash2)
 

Komponentit muodostavat kylmäerottimet 1 & 2. Stage-2:n painetaso määritetään molemmilla komponenteilla vastaamaan kylmäerottimen lämpötila- ja paineolosuhteita. Kylmäerottimella erotetaan kaasu ja neste toisistaan. Neste otetaan ulos ja kaasut ohjataan ejektorille 2:lle.
- B9 (Mixer), EJECTOR2 (Compressor) ja B34 (Heater)
 

Nämä komponentit muodostavat ejektorin. Höyry ja imuvirtaus sekoitetaan mixer B13:lla. Paineen lasku on toteutettu kompressorilla EJECTOR2. Tämä komponentti nostaa virtauksen lämpötilaa, joten lämpötila tuodaan alas lämmönvaihtimella B31.
- SL1 (Flash2)
 

Suihkulauhdutin 1:tä kuvaava Flash2-säiliö, nesteen ja kaasun erotus. Neste otetaan

tässä pisteessä ulos ja kaasut ohjataan ejektorille 1:lle. Paine määritetään tällä komponentilla erikseen.

### 6.2.7. Stage-3

Stage-3 kuvaa mallissa prosessivaihe 2:n lauhtumattomia kaasuja. Syöttöperiaate on samanlainen, kuin Stage-1 ja -2:lla. Ensimmäisenä linjassa on lämmönvaihdin, joka kuvaa coldtrap 3 & 4:n jäähdytysvesikierukkaa. Varsinaista kylmäerotinta kuvaa flash-säiliö. Säiliön alaosasta poistuu rasva- ja hartsihappo ja neutraaliainepitoinen nestevirtaus. Tämä virtaus on yksi seurattavista pisteistä. Säiliön yläosasta poistuu kylmäerottimella lauhtumattomat jakeet. Näiden virtaus kertoo ejektorikuormituksen tasosta.

Tämän jälkeen kaasut johdetaan mikserille samaan tapaan, kuin Stage-1:llä. Tässä pisteessä lisätään myös ejektorin käyttöhöyry 2441 kg/h virtaukseen. Ejektorilla on toteutettu samalla mallilla, kuin Stage-1 ja -2:lla. Stage-3:n toimintaidea on nähtävissä kuvasta 17.

Lauhdutus tapahtuu SL1:llä. Kyseisessä pisteessä poistetaan lauhtuneet ejektorihöyryt ja valtaosa kylmäerotin 3 & 4:ltä peräisin olevista syöttöjakeista. SL1:llä lauhtumattomat jakeet johdetaan Stage-1:n ejektorille ja siitä eteenpäin vakuuminjärjestelmään. Tämä kohta systeemistä on nähtävissä kuvasta 16.

Stage-3-mallissa käytetyt Aspen-komponentit.

- FEED3 (Selector)  
Kyseisellä komponentilla määritettiin haluttu syöttövirta. Käytännössä valittiin haluttu syöttövirta, jonka komponentit oltiin kerätty haihdutinmallin simulaatiosta. Esimerkkinä syöttövirta FEED332 tarkoittaa prosessivaihe 3:lta tulevia hönkiä. Kyseessä on syöttötyyppi 3 syöttönopeudella 2.
- COLDTR34 (Heater) ja CT34FLAS (Flash2)  
Komponentit muodostavat kylmäerottimet 3 & 4. Painetaso määritetään molemmilla komponenteilla vastaamaan kylmäerottimen lämpötila- ja paineolosuhteita. Kylmäerottimella erotetaan kaasu ja neste toisistaan. Nesteet otetaan ulos ja kaasut ohjataan ejektorille 3:lle.

- B9 (Mixer), EJECTOR3 (Compressor) ja B34 (Heater)

Nämä komponentit muodostavat ejektorin. Höyry ja imuvirtaus sekoitetaan mixer B13:lla. Paineen lasku on toteutettu kompressorilla EJECTOR3. Tämä komponentti nostaa virtauksen lämpötilaa, joten lämpötila tuodaan alas lämmönvaihtimella B32.

### 6.3. Simulointimallin termodynaaminen malli

Simuloinnin termodynaamisen mallin oikea valinta on erittäin tärkeää mallin toimivuuden kannalta. Mallissa täytyy ottaa huomioon molekyylien väliset vuorovaikutussuhteet. Vaikutus riippuu siitä, millaisia aineita mallissa on käsiteltyssä. Vakuuminjärjestelmän mallissa käsitellään polaarisia yhdisteitä, kuten vettä ja orgaanisia happoja. Lisäksi painetaso on matala ja järjestelmässä käsitellään keveitä kaasuja. Tällöin selkein vaihtoehto on valita sopiva aktiivisuuskerroinmalli (Hussein, 2019).

Komponenttien fugasiteetti erottaa epäideaalisen nesteliuoksen ideaalisesta yhdisteestä. Fugasiteetti kuvaa yhdisteen höyrystymistäipumusta. Liuoksen fugasiteetin ja puhtaan komponentin välinen suhde määritellään aktiivisuudeksi kaavalla 23.

$$a_i = \frac{f_i}{f_i^0} \quad (23)$$

$a_i$  aktiivisuus

$f_i$  liuoksen fugasiteetti

$f_i^0$  puhdas liuos

Aktiivisuus voidaan määrittää aktiivisuuskertoimesta ( $\gamma$ ) kaavalla 24.

$$a_{i,L} = \gamma_{i,L} x_i \quad (24)$$

Yleensä aktiivisuuskerroin on suurempi, kuin yksi. Tämä tarkoittaa seosliuoksen fugasiteetin olevan korkeampi, kuin puhtaan komponentin. Tämä johtaa siihen, että samalla nesteellä voi olla taipumus höyrystyä helpommin seoksessa ollessaan, verrattuna puhtaassa muodossa olevaan muotoon. Tämä johtuu seoksen molekyylien välisestä torjunnasta, jolloin niiden vuorovaikutus vähenee. Joissain tapauksissa aktiivisuuskerroin on alle yksi. Tällöin se indikoi molekyylien välisten vuorovaikutusten kasvamista. Tällöin höyrystymistäipumus laskee (Hussein, 2019).

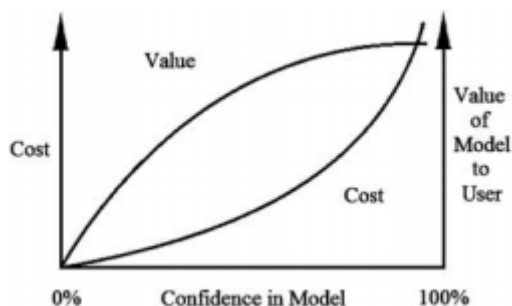
Yleisin aktiivisuuskerroinmalli on NRTL (non-random-two-liquid model). Se ottaa huomioon yhdisteiden epäideaalisuuden ja toimii polaaristen yhdisteiden kanssa. Näiden mallien nesteominaisuuksien laskemiseen käytetään aktiivisuuskerrointa ja höyryfaasinominaisuudet määritetään tilayhtälöllä (Hussein, 2019).

Vakuumiyksikön mallissa kokeiltiin myös Peng-Robinsonin termodynaamista mallia. Tämä malli on tarkoitettu erityisesti suoraketjuisille hiilivedyille. Malli aiheutti ongelmia vesihöyryn lauhtumisen suhteen suihkulauhduttimella. Höyryä ei saatu lauhtumaan määritetyissä olosuhteissa, vaan höyry päätyi eteenpäin väärässä olomuodossa väärään paikkaan. Ongelma korjautui, kun siirryttiin takaisin aiemmin käytössä olleeseen NRTL-malliin.

#### 6.4. Mallin verifiointi ja validointi

Simulointimallin verifiointi ja validointi on selkeä osa mallin kehittämistä. Mallin perustana olivat laitteistotoimittajien varsin suurpiirteiset spesifikaatiot, varsinkin vakuumijärjestelmän osalta. Käytännössä mallia rakennettaessa pyrittiin prosessiolosuhteisiin, jotka vastaavat todellisuutta. Tämä on tärkeää, jotta mallia voidaan hyödyntää mahdollisissa ongelmanratkaisu- ja kehitystehtävissä.

Verifiointi- ja validointimalleja on *Sargent* käsitellyt tutkimuksessaan. Yleensä mallin absoluuttinen verifiointi on liian aikaa vievää ja kallista. Kuvasta 17 ilmenee mallin kehittämiskustannuksen ja siitä saadun hyödyn suhde. Testejä ja arviointeja mallin suhteen jatketaan, kunnes riittävä luottamustaso katsotaan saavutetuksi (Sargent, 2013).



Kuva 17 Mallin luotettavuuden verifiointin kustannukset ja siitä saatu hyöty (*Sargent, 2013*)

Vakuumiyksikön mallissa validointi tehtiin mallia rakentaessa. Haihdutinmallista saadut syöttömäärät ovat suurempia, kuin laitteistotoimittajan vakuumiyksikölle antamat lukemat. Malli kuitenkin antaa tarkemman syöttövirran koostumuksen, kuin laitteistotoimittajat.

Haihdutinmalli on myös verifioitu ja validoitu, joten sen antamiin tuloksiin voidaan lähtökohteisesti luottaa (Halme, 2019).

Vakuumiyksikön mallia ajettiin satoja kertoja ja ajojen aikana huomattiin lukuisia virheitä, jotka aiheuttivat epäluotettavuutta mallille. Tätä kautta mallille saatiin haettua todellisuutta vastaavia prosessiarvoja.

Kylmäerottimilta on otettu näytteitä, niitä tyhjennettäessä. Näistä on tehty GCMSD-analyysit. Näiden analyysien perusteella näyttäisi, että malli ja analyysit kohtaavat sen perusteella, mitä virtauksia erottimilla kulkee nestejakeessa. Vakuumitason vaihteluita laskentablokin avulla, tällä saatiin määritettyä vakuumitasot luotettavasti prosessin eri vaiheisiin.

Nesterengaspumpun normaali massavirtaus korreloi kattilalaitoksen toimittajan mitoituksen kanssa. Kattilan suuntaan pumpattava kaasuvirtaus näyttäisi olevan oikeassa oletetussa määrässä. Painetason laskiessa tietyn pisteen alapuolelle nesterengaspumpun imussa, havaittiin massa- ja tilavuusvirtauksen pumpulle kasvavan suuremmaksi, mitä pumppu pystyy käsittelemään. Vastaava tilanne on havaittu myös käytännön tasolla vakuumiongelmien ilmetessä.

Samaan lopputulemaan nesterengaspumpun kanssa on tultu myös prosessisuunnittelussa. Yksinään nesterengaspumpun vaihtamisella suurempitehoiseen ei odoteta olevan vakuumitasoa parantavia vaikutuksia (Kallio-Meriluoto, Projektikokous, 2019).

## **7. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU**

### **7.1. Mallin syötteen ja simuloinnin kulku haihdutinmallissa**

Syöteinä on käytetty kolmea erilaista syöttötyyppiä. Syöttötyypit on koostettu *Halmeen* (2019) diplomityössä haihdutinmallin syöttöaineiksi. Lähtöaineet eroavat merkittävimmin toisistaan happoluvun, neutraaliaineiden määrän ja rasva- sekä hartsihappojakauman perusteella. Liitteestä VI. ilmenee eri syötteiden yleiset ominaisuudet. Syöttökomponentit ovat peräisin Aspenin datakirjastosta, lukuun ottamatta pseudokomponentteja.

Kyseisiä komponentteja on jouduttu lisäämään haihdutinsimulaatioon, jotta simulaation tuottamat tislaukkyärit kohtaavat RMÖ-näytteiden analyysien perusteella koostetut tislaukkyärit. Haastavimpia olivat neutraalikomponentit. Yhteensä komponentteja koostettiin kuusi erilaista tyyppiä. Nämä olivat hartsialkoholit (RES-OH), hartsialdehydit (RES-CHO), muut terpeenit (TERPENES), steroidit (STEROIDS) ja isommat molekyylit (ST-C3040, ST-C4050).

Pseudokomponentit on rakennettu niiden kesimääräisen kiehunta-asteen ja molekyylipainon perusteella. Tarkempi erittely komponenteista löytyy liitteestä VI.

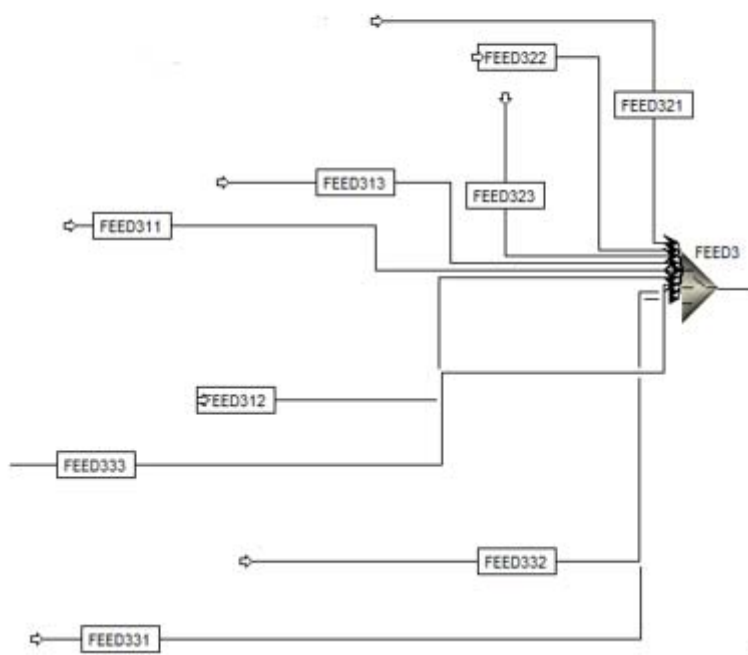
Kutakin syötettä ajettiin kolme erillistä ajoa kolmella eri syöttötasolla. Syöttönopeuksina käytettiin matala-, keski- ja korkean virtauksen massavirtoja. Termodynaamisena mallina käytettiin NRTL-mallia. Haihdutinmallit on jaettu kahteen eri malliin ja mallit täytyi ajaa kahdessa osassa, järjestyksessä prosessivaihe 1 ja tämän jälkeen prosessivaihe 2 & 3. Ensimmäisenä ajettiin siis prosessivaihe 1:n simulointi. Tämän perusteella saatiin täpätinerotuksesta poistuvat keveät jakeet, jotka päätyvät stage-1:lle ejektorimalliin.

Prosessivaihe 1:n haihduttimilta poistuvien rasva- ja hartsihappojakeiden komponenttien data otettiin talteen. Dataa käytetään prosessivaihe 2 & 3 mallin syöttökomponentteina. Molempien prosessivaiheiden lautumattomista kaasuista kerättiin tiedot ylös kunkin öljyn ja syöttötason kohdalta. Painetaso ja lämpötilat pidettiin haihdutinmallissa vakiona eri syöttöaineiden ja -tasojen välillä.

Lopputulena saatiin kolmen erilaisen syötön komponenttijakauma kolmesta eri kohteesta. Nämä kaikki vietiin ejektorimallin lähtötiedoiksi. Ejektorimallissa on kolme eri vaihetta ja näihin jokaiseen menee kolmelta eri syöttötasolta saadut kolmen eri tyyppisen syöttöaineen keveiden jakeiden komponentit.

## **7.2. Simuloinnin kulku vakuuminjärjestelmän mallissa**

Syötöt tuotiin syötönjakajille, jonka avulla oli mahdollista nopeuttaa syötön vaihtoja simulointien välillä. Järjestely on nähtävissä kuvasta 18, johon on esimerkkinä kuvattu FEED3:n syötöjärjestely. Termodynaamisena mallina simuloinnissa käytetään NRTL-mallia. *Halmeen* (2019) työssä oli haihduttimien osalta käytössä Peng-Robinsonin malli. Tässä diplomityössä mallina on käytetty NRTL-mallia myös haihdutinsimulaation kohdalla.



Kuva 18 Syötön järjestely mallissa (stage-3 ejektoreille)

Ejektorimallia ajettiin neljällä eri painetasolla. Tällä pyrittiin saamaan eroja massavirtauksiin ja näiden kautta löytämään pullonkauloja systeemistä. Painetaso täytyy säätää läpi koko systeemin realistiselle tasolle. Eli pelkkä syötön paineensäätö ei riittänyt, vaan säätö tehtiin laitekohtaisesti. Tämä onnistui käyttämällä erillistä calculator-ohjelmaa, jolla eri alueiden paineensäätö onnistuu selkeästi. Käytännössä laskenta asettaa painearvot halutulle tasolle ennen simulointia. Ohjelma perustuu Fortran-ohjelmointikieleen. Paine säädettiin ohjelmalla kylmäerotin 1 – 4:lle, tärpättiflashille, ejektoreille 1 – 3, suihkulauhduttimille 1 – 2. FEED1 kohdalla painetaso määritetään tärpätinerotuksen kohdalla, FEED2 cold trap 12, FEED3 cold trap 34.

Laskentaohjelma toteutettiin käyttämällä calculator-blokkia. Tätä kautta määritettiin Fortran laskentalohko, johon oli sisällytetty viittaukset haluttuihin prosessisuureisiin. Käytännössä tällä viitattiin ejektoreihin ja flash-säiliöihin. Jokainen prosessisuure on määritettävä erikseen, viitattut prosessisuureet löytyvät taulukosta 3. Kaikkien Ohjelman kautta saatiin järjestelmän painetaso määritettyä huomattavasti helpommin, mitä laitekohtaisesti suoraan malliin määrittäen. Kaikkien lohkomuuttujien muuttuvaksi prosessisuureeksi määritettiin paine (mbar).



Taulukko 3. Calculator-laskentablokin lohkot

EJ1P	ejektori 1
SL2P	suihkulauhdutin 2
EJ2P	ejektori 2
SL1P	suihkulauhdutin 1
EJ3P	ejektori 3
TURPFLAS	täpätinerotus
CT12	kylmäerotin 1 & 2 jäähdytys
CT34	kylmäerotin 3 & 4 jäähdytys
CT12FLAS	kylmäerotin 1 & 2 nesteen ja kaasun erotus
CT34FLAS	kylmäerotin 3 & 4 nesteen ja kaasun erotus

### 7.3. Koeajosarjojen havainnot

Koeajoja tehtiin useita kertoja, koska mallissa löytyi virheitä, jotka täytyi korjata. Tämän jälkeen sarjat täytyi ajaa uudestaan ja tämä oli melko aikaa vievää toimintaa. Tulokset, joita kerättiin, jaettiin kahteen osaan. Toisessa on kaikki yksiköstä ulos tulevat jakeet ja toisessa taulukossa merkittävimmät virtauskohteet, joista pyritään näkemään suurimmat vaihtelut massavirroissa eri syötteiden ja olosuhteiden välillä. Simuloinnin laitteet löytyvät kuvan 13. virtauskaaviosta.

Verrattaessa esimerkiksi CT34 ulos tulevia nestejakeita näytteen (GCMSD-analyysi) tuloksiin, joka kyseisestä paikasta oli otettu, kun yksikön syöttö vastasi noin syöttönopeus 2:ta ja vakuuolosuhteet normaaleissa vakio arvoissa. Havaittiin selkeää yhdenmukaisuutta näytteen ja simulaation tuloksen välillä. Taulukosta 4 on nähtävissä yksiköstä poistuvat virtaukset painetasolla 2. Painetasojen määritelmä on nähtävissä taulukosta 1.

Taulukosta 9. havaitaan, että nesterengaspumpun eli virtauskaavion LRP-blokin massavirtausmäärä on lähellä kattilalaitoksen toimittajan antamaa arviota nesterengaspumpuilta (EK & tislaualueen nesterengaspumput) massavirrasta. Näyttäisi, että nesterengaspumppu ei ole pullonkaula. Sinne ei kaasuja kantaudu siinä määrin, että sen valmistajan antamat maksimi arvot ylittyisivät. Pumpun kuorma ei noussut korkeammallakaan painetasolla kovin suureksi. Eli esimerkiksi pumpun vaihdolla tehokkaampaan ei oletettavasti olisi vakuumia parantavaa vaikutusta.

Taulukko 4. Yksikön kaasuvirtoja syöttöainetyyppi 3 painetasolla 2 keskimmaisella syöttönopeudella

FEED3 keski	paine 2	TURPFA	CT12FA	CT34FA	SL1LIQU I	SL2LIQU I	LRP- GAS
Mass Flows	kg/hr	225,16	84,45	1103,23	2549,56	272,06	15,14

Eri painetasojen välillä merkittävin havainto on se, että painetasolla 1 suihkulauhdutin 1:n kuorma siirtyi selkeästi suihkulauhdutin 2:n puolelle. Eli SL1 ei lauhduta riittävästi ja kaasut kulkeutuvat lauhtumattomana SL2:lle, joka pyrkii ne lauhduttamaan. SL2 on kuitenkin merkittävästi pienempi ja kaasu lisää sen kuormaa huomattavasti. Sen jäähdytyslämmönvaihdin on huomattavasti SL1:n vastaavaa pienempitehoisempi. Normaalissa tilanteessa SL1 kaasuvirtaus SL2:n suuntaan on vain joitain kymmeniä kilogrammoja tunnissa. Taulukosta 5. on nähtävissä virtausten suihkulauhduttimille aiheuttamat kuormitukset. Matala painetaso johtaa voimakkaaseen höyrystymiseen, sekä Stage-1:llä, että Stage-3:lla. Tämä johtaa suihkulauhduttimien korkeaan kuormitukseen ja korkeista kaasuvirtauksista johtuvaan vakuumiongelmaan.

Taulukko 5. Syöttöainetyyppi 3 painetasolla 1 suihkulauhduttimien kuormitus keskimmaisella syöttönopeudella

FEED3 keski	paine1	EJECT1 OUT	EJECT2 OUT	EJECT3 OUT	SL1GAS	SL2GAS	SL2 LIQUID
Mass Flows	kg/hr	2785,88	211,07	2530,43	233,33	1,66	2784,22

Poistuvan nesteen virtaus nousee noin kymmenkertaiseksi keskimääräiseen virtaukseen verrattuna. Tässä kohden voidaan olettaa, että kaasut tukkivat myös nesterengaspumpun. Myös tärpätinerotuksessa veden poistuminen nesteenä vähenee huomattavasti ja sitä kantautuu vesihöyryn muodossa SL2:lle. Liian matala painetaso yksikössä on siis selkeä ongelman aiheuttaja. Taulukosta 6. nähdään painetaso vaikutus stage-1:n tärpätin kaasu-neste-erotukseen. Stage-1:n komponentit höyrystyvät selvästi herkemmin painetasolla 1 verrattuna painetasoon 2.

Taulukko 6. Paineen vaikutus stage-1:n kaasun ja nesteen erottumiseen

syöttönopeus: keski	painetaso 1	TURPGAS	TURPFA
kaasun massavirta	kg/hr	203,56	22,36
syöttönopeus: keski	painetaso 2	TURPGAS	TURPFA
kaasun massavirta	kg/hr	0,75	84,45

CT34 yritettiin löytää mahdollista muutosta ulos lähtevän nestevirran koostumuksesta paineen laskiessa ja lämpötilan pysyessä samana. Teorian oli, että kylmäerottimille kulkeutuu tässä vaiheessa sinne kuulumattomia jakeita, varsinkin hartseja, sekä raskaampia jakeita. Tätä ei kuitenkaan saa kiinni suoraan vakuumisimulaatiossa, vaan tässä tapauksessa täytyy hyödyntää prosessivaihe 2- ja 3-mallia, jotta komponenttijakauman muutos voidaan havaita. Vakuumiyksikön simuloinnissa havaintona oli kuitenkin loogisesti, että cold trapin nesteen tyhjennysvirrassa massavirtaus vähenee kaikkien aineiden kohdalla paineen laskiessa. Vastaavasti kaasuvirtaus kylmäerottimelta ulos kasvaa, kun paine laskee. Nämä nähdään taulukosta 7. Matalampi painetaso eli painetaso 1, edistää selkeästi komponenttien haihtumista verrattuna painetasoon 2.

Taulukko 7. Paineen vaikutus CT34 kaasun ja nesteen erottumiseen

syöttönopeus: keski	painetaso 1	CT34GAS	CT34FA
kaasun massavirta	kg/hr	179,43	948,83
syöttönopeus: keski	painetaso 2	CT34GAS	CT34FA
kaasun massavirta	kg/hr	25,02	1103,23

#### 7.4.1 Käyttöhöyryn paineen nostaminen

Käyttöhöyryn paineen nostaminen oli myös yksi asia, mitä tutkittiin. Ensimmäisissä ajoissa massavirrassa ejektoreiden jälkeen ei näkynyt nousua, kun höyryn painetta nostettiin. Virtausmäärät suihkulauhduttimien kaasuissa ilmenevät taulukosta 8. Tästä nähdään, ettei kaasun simuloitu massavirta juurikaan muutu höyryn paineen nousun myötä. Tilavuusvirtaus nousi kyläkin ja nesterengaspumpun massavirrassa havaittiin hienoista laskua. Vaikutusta vakuumitasoon ei pysty varmasti simulaatiolla todentamaan.

Teorian mukaan imuvirtaus heikkenee, koska suuremman käyttöhöyryn paineen myötä höyryn virtaus suurenee ja tällöin se vie tilaan enemmän haihduttimelta tulevalta imuvirralla. Tällöin

vakuumi ennemminkin heikkenee. Tämä korostuu varsinkin yllättävissä tilanteissa, kun haihduttimilta vapautuu jostain syystä suuria määriä kaasua. Käyttöhöyryn pienempi massavirta mahdollistaa suuremman imuvirran diffuusorin kurkun läpi kulkevan kuristuneen massavirran pysyessä ennallaan (Skokberg, 2018). Höyryn painetta nostettiin 4,5 bar ja 10,5 bar. Höyryn paineen muutoksen simuloinnit tehtiin syöttöaine 3:lle yhdellä syöttötasolla. Paineeltaan ja lämpötilaltaan korkeamman höyryn entalpia on myös suurempi, kuin 3,5 bar höyryllä. Tämä vaatii myös lisää lauhdutustehoa suihkulauhduttimien jäähdyttimiltä.

Taulukko 8. Suihkulauhduttimien kaasujen virtausmäärä käyttöhöyryn eri painetasoilla

syöttönopeus: matala	painetaso 2	SL1GAS 3,5 bar(g)	SL2GAS 3,5 bar(g)
kaasun massavirta	kg/hr	21,24	13,54
syöttönopeus: matala	painetaso 2	SL1GAS 4,5 bar(g)	SL2GAS 4,5 bar(g)
kaasun massavirta	kg/hr	21,24	13,53
syöttönopeus: matala	painetaso 2	SL1GAS 10,5 bar(g)	SL2GAS 10,5 bar(g)
kaasun massavirta	kg/hr	21,23	13,52

#### 7.4.2 Vakuumijärjestelmien erottaminen toisistaan

Aiemmin prosessiyksikköön tehdyn selvityksen perusteella, suositeltiin prosessivaihe 1:n ja prosessivaihe 2 & 3:n vakuumijärjestelmää erotettaviksi toisistaan. Mallissa erotettiin vakuumijärjestelmät, prosessivaihe 1 eli stage-1 pelkän nesterengaspumpun perään. Stage-2 ja -3 olivat omassa mallissaan.

Tämä keventää vakuumijärjestelmän kuormaa ja vähentää häiriömahdollisuuksia. Kuivausosan kaasujen määrä sen verran matala, että mallin perusteella järjestelmien erottaminen ei kuitenkaan vaikuta kapasiteettiin merkittävästi. Toki, jos paine lasketaan kovin alas, niin kaasuuntumista tapahtuu myös kuivausosassa enemmän. Normaaleilla syöttönopeuksilla ei ongelmia vakuumijärjestelmän kapasiteetissa.

Mahdolliset häiriötilanteet ovat asia erikseen. Tätä ei pääse nykyisellään testaamaan, koska kemiallisia reaktioita ei ole mihinkään simulointeihin mallinnettu. Tästä ei siis pysty johtopäätöksiä vielä tekemään.

Haihdutinmallista lähtevät rasvahapot otettiin lisäksi mukaan tärpätinerotuksen hönkiin. Niitä ei kantaudu edelleen lisäyksen jälkeenkään tärpätinerotussäiliöltä vakuumijärjestelmään. Ne menevät pitkälti TURPFA-virtauksen kautta poistuviin nesteisiin.

#### **7.4.3. CT 3 & 4 analyysit**

Kylmäerottimilta ulostulevan nesteen koostumuksesta noin puolet oli rasvahappoja. Hartsihappoja oli noin 30 % ja loput neutraaliaineita. Mallista saadun tuloksen perusteella koostumus on rasvahappoja noin 54 %, hartsihappoja 27 % ja neutraaliaineita 19 %. Taulukosta 14. nähdään aineiden jakauma kylmäerottimien 3&4 ulostulossa CT34FA.

Prosessiyksikön ajotilanne vastasi noin syöttönopeutta 2 ja syöttöaineena toimi syöttöainetyyppi 3 hartsihappopitoinen syöttöaine ja syöttöainetyyppi 1:n seos. Cold trap 1 & 2 tyhjenyksestä otettiin myös näyte. Tämä analysoitiin samaan tapaan, mitä CT 3 & 4 näyte. Tulokset olivat samansuuntaisia analyysin ja simulaation välillä. Esimerkkinä otetaan dehydroabietiinihappo, jonka sulamispiste on huomattavasti korkeammalla, mitä kylmäerottimilla vallitsevat lämpötila- ja paineolosuhteet ovat.

Liitteessä XI vertaillaan CT34 ulostulevaa CT34FA-virtaa ja kylmäerotin 3:n tyhjennyksestä otettua näytettä. Yhdenmuotoisuutta simulointimallin ja GCMSD-analyysin välillä on selkeästi havaittavissa. Taulukkoon on merkattu punaisella aineet, joiden korkean sulamispisteen epäillään aiheuttavan kylmäerottimien tukkeutumista.

Komponentit, joiden sulamispiste on yli 100 °C aiheuttavat todennäköisesti ongelmia kylmäerottimilla.

Liitteessä XII ilmenevä säiliöt olivat käytössä kylmäerottimien tyhjennysongelmien ilmetessä. Tämä tukee olettamusta säiliön sisällön vaikutuksesta vakuumijärjestelmän häiriöihin.

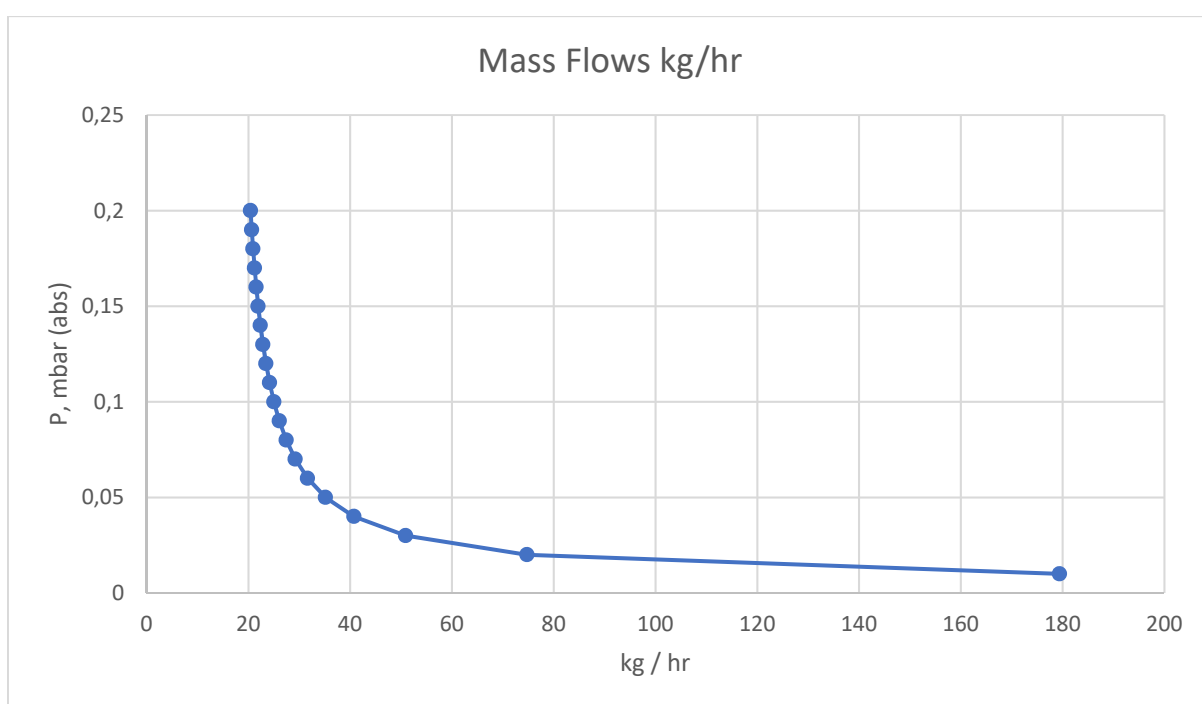
#### **7.4.4. Kylmäerottimien tyhjentymisongelmat ja hartsihapot**

Kylmäerottimilla oli ennen näytteenottoa ollut tyhjenemisongelmia. Hartsihappojen korkean sulamispisteen vuoksi, niiden suuri määrä trapeilla edesauttaa erottimien tukkeutumista. Hartsit kiteytyvät helposti kylmäerottimien kylmille lämmönsiirtopinnoille.

Yksi kysymys oli, että lisääntykö hartsihappojen määrä paineen laskiessa haihduttimilla ja lämpötilan pysyessä samana. Simuloinnin mukaan näyttäisi, että näin tapahtuu. CT3&4

poistokaasujen määrät lisääntyvät paineen laskiessa. Tämä on luonnollinen suuntaus ja nähtävissä selkeästi kuvasta 19.

Tällöin myös virtaus kasvaa, virtaus moninkertaistuu matalimmilla painetasoilla. Tällainen tilanne syntyy, jos yksikön syöttö joudutaan yllättäen katkaisemaan tai se katkeaa. Tilanne on toki hetkellinen, mutta käytön aikana on havaittu selvä yhteys yksikön likaantumisen ja laitoksen hallitsemattomien pysäytysten välillä. Ongelmat nousivat esille varsinkin laitoksen ensimmäisinä käyttövuosina, kun vielä haettiin oikeita ajoarvoja ja operointitapoja. Ongelman seurauksia on kuvailtu myös tämän työn luvussa 2.6.



Kuva 19 Simuloitu paineen nousu CT34 kaasuvirtauksen pienentyessä

#### 7.4.5. Suihkulauhduttimet ja ejektorihöyryt

Simuloinnin perusteella vakuumiyksikön mitoituksessa ei ole ongelmaa. Ongelmia saattaa ilmetä, jos yksikön paine laskee liian alas, varsinkin suihkulauhduttimien osalta. Tällöin kaasut pääsevät lauhtumatta SL1:n läpi ejektori 1:lle ja siitä SL2:lle, jonka kapasiteetti on merkittävästi pienempi. Tällöin SL2 on toimintakykynsä rajoilla.

Virtaukset suihkulauhduttimilta ulos ovat muissa tapauksissa melko samalla tasolla, riippumatta syöttöaineen laadusta. Tällä hetkellä suihkulauhduttimen kiertoveteen (josta ulos lähtevä

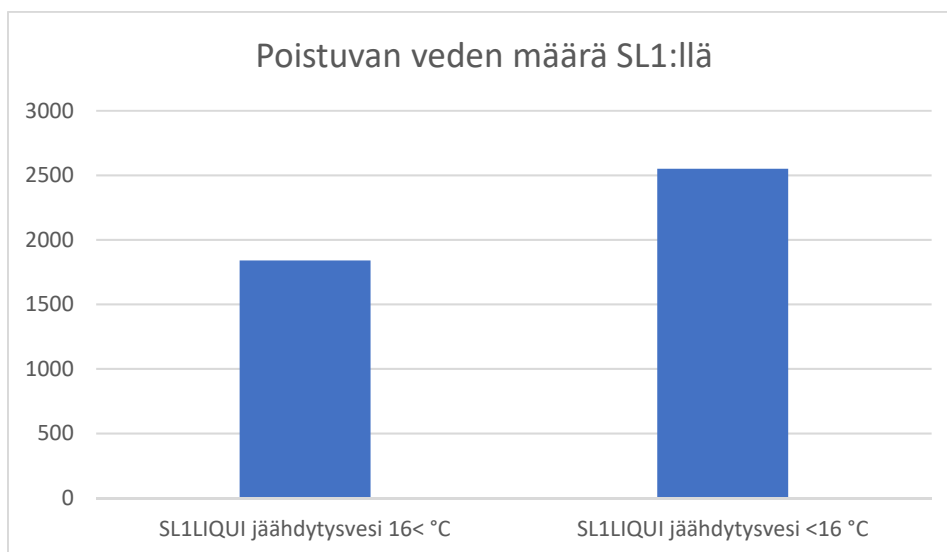
nestevirta poistuu) ajetaan lisävetä. Tämä edesauttaa SL1:n jäähdyttimen puhtaana pysymistä. Kiertoveden sekaan lauhtuu siis selkeästi syöttöainekomponentteja joitain kiloja tunnissa. Syöttöainetyyppi 3:n kohdalla ero on selkeä kahteen muuhun laatuun verrattuna. Lauhtuneet jakeet kuormittavat jalostamon hapanvesiyksikköä.

Tässä kohtaa olisi myös mahdollista vähentää kuormaa, koska höyryn määrä stage-3:n ejektori 3:lle on mahdollista tiputtaa selkeästi kylmän kauden ajaksi, jäähdytysveden ollessa riittävän viileää. Tällöin lauhtuvan höyryn määrä olisi myös pienempi. Tämä lisäisi suihkulauhduttimen lauhdutuskapasiteettia ja vakuumiyksikön häiriön sietoa.

Muualle vakuumisysteemiin höyryn määrän muuttamisella ei ole suurempia vaikutuksia. Tällä hetkellä käyttöhöyrylinjoista kuitenkin puuttuu virtausmittaukset. Tämän takia höyryn määrän säätöä ei voida toistaiseksi kokeilla. Laskennallisesti höyryn määrän tiputtaminen vähentää lauhdutustehontarvetta noin 545 kilowatilla. Tämä on noin 29 % kyseisen lämmönvaihtimen tehosta. Tehon tarve on laskettu kaavalla 25. Kuvassa 20 on vertailtu poistuvan veden määrää eri höyrymäärillä.

$$P = \frac{H \times \dot{m}}{3600} \quad (25)$$

$P$	teho	[kW]
$H$	entalpia	[kJ/kg]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/h]



Kuva 20  
puen

Suihkulauhdutin 1:n vedenmäärän muutos, höyryn syöttömäärästä riip-

Nesterengaspumpun kuorma nousee, kun sen imupaine laskee riittävästi (mallissa noin 100 mbar:iin). Ongelmat johtivat useaan otteeseen yksikön pysähtymiseen paineen noustessa liian korkeaksi. Nesterengaspumpun virtauksen komponentit ovat pitkälti samoja, kuin pumpulta otetun näytteen analyysissä. Hallitsevana komponentteina ovat vesi, typpi ja CO<sub>2</sub> (LIMS-järjestelmä, 2019).

#### **7.4.6. Käyttöhöyryn paineen muuttaminen**

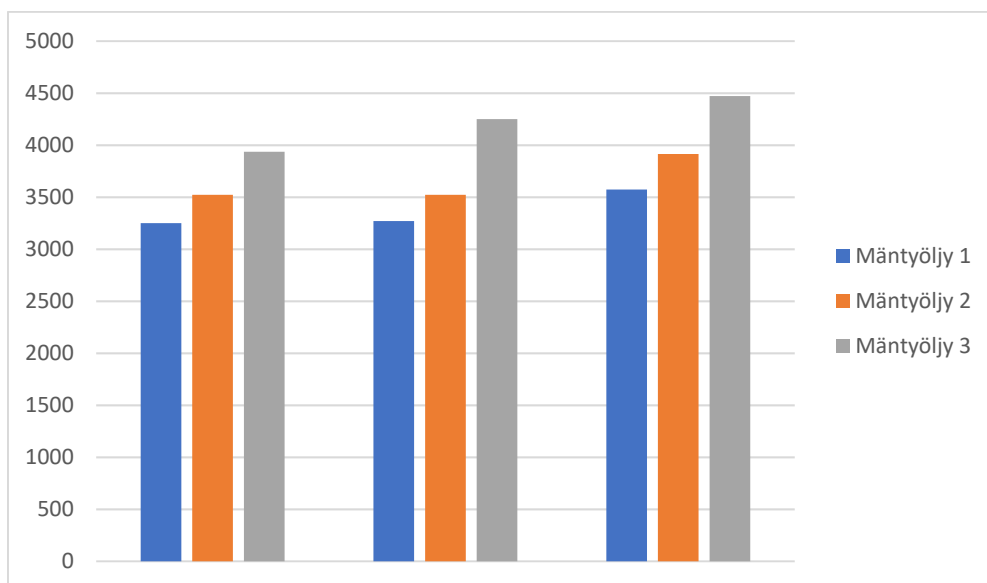
Käyttöhöyryn paineen nostamista simuloitiin. Huomattiin, että tilavuusvirtaus ejektorilla nousee. Massavirtauksessa ei havaintoa noususta. Teorian mukaanhan imuvirtaus heikkenee, koska suuremman käyttöhöyryn paineen myötä höyryn virtaus kasvaa ja tällöin se vie tilaan enemmän haihduttimelta tulevalta imuvirralla.

Tällöin vakuumi ennemminkin heikkenee, varsinkin yllättävissä tilanteissa, kun haihduttimilta vapautuu jostain syystä suuria määriä kaasua. Käytännössä tämä tarkoittaa, sitä että ejektoreiden saaminen oikealla toiminta-alueelle vaikeutuu. Tästä on käyty keskustelu, myös ejektoritoimittajan edustajan kanssa. Heidän mukaansa ejektorit ovat suunniteltu toimimaan nykyisellä käyttöhöyryn paineella ja paineen muuttaminen radikaalisti saattaisi tehdä halutun vakuumitaason saavuttamisen hankalammaksi (Eriksson, e-mail, 2019).

#### **7.4.7. Syöttöainelaatujen vaikutus vakuumijärjestelmään**

Eri tyyppisten syöttöaineiden välillä on selkeää vaihtelua. Tyypin 3 syöttöainetta kulkeutuu vakuumisysteemiin selkeästi enemmän, mitä tyypin 1 tai tyypin 2. Tämä on nähtävissä selkeästi varsinkin CT3&4 poistuvissa nestevirtauksissa kuvassa 21.





Kuva 21 Eri syöttöainetyyppien aiheuttama kuorma haihduttimilta vakuumisysteemiin eri syöttönopeuksilla (matala-, keski- ja korkea syöttönopeus).

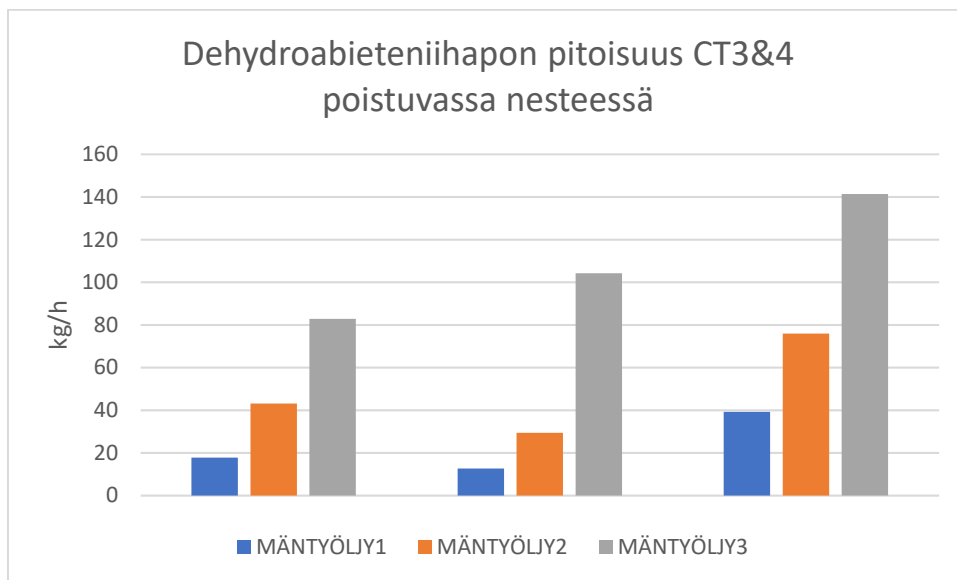
Syöttöainetyypin 3 neutraaliainepitoisuus on merkittävästi kahta muuta öljytyyppiä pienempi. Myös sen hartsihappopitoisuus on selkeästi kahta muuta öljyä korkeampi. Nämä ominaisuus on havaittu myös käytännössä. Liitteessä XII päiväkirjaote marraskuulta 2019, jossa mainittu tyhjenemisongelma.

Esimerkiksi kylmäerottimien kannalta hankalasta hartsihaposta käy dehydroabietiinihappo. Kyseinen aine lukeutuu hartsihappoihin. Sen sulamispistealue on 174 – 176 °C (Chemicalbook.com, 2019). Tällöin voidaan päätellä, että aine kiteytyy kylmäerottimen olosuhteissa. Kuvasta 22 on nähtävissä dehydroabietiinihapon pitoisuudet eri syöttöainetyypeissä eri syöttönopeuksilla.

Polymeerien muodostuminen tislauksessa ja haihdutuksessa on myös mahdollista. Dimeerejä on todettu löytyneen laboratoriokokeissa hartseista ja -piestä. Esimerkiksi konjugoitujen dienoidihappojen on todettu muodostavan dimeerejä ja trimeerejä Diels-Alder-reaktion kautta (Holmblom, 1978, s. 879).

Dehydroabietiinihapolle on ominaista reagoida polymeerimuotoon, tämä myös edesauttaa kylmäerottimen tukkeutumista. *Holmblomin* (1978) mukaan kaikki hartsihapot, lukuunottamatta aromaattisia yhdisteitä voivat reagoida esimerkiksi dimeereiksi tai trimeereiksi-

Liitteestä IV on nähtävissä GCMSD-graafi, johon on eritelty kylmäerottimen 3 tyhjennystilanteesta otettu näyte. Näyte on analysoitu kaasukromatografimassaspektrometrilla. Ajossa ollut öljy ei ollut täysin identtinen syöttöainetyyppi 3:n kanssa.



Kuva 22 Dehydroabietiniinihapon määrä CT3&4 erisyöttönopeuksilla

Tämä puoltaa sitä, että syöttöainelaatujen miksaaminen olisi saatava mahdollisimman hyvin toimivaksi. Tätä asiaa puoltaa monet muutkin asiat laitoksen ajettavuuteen liittyen, mutta käytännön kannalta myös vakuumiyksikön toimintavarmuus.

## 8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Vakuumijärjestelmä itsessään toimii, kuten pitää. Mitään yhtä selkeää vikakohtaa ejektoreilta tai muilta järjestelmän laitteilta ei löytynyt simuloinnin, eikä muidenkaan tutkimusten perusteella. Kaasumäärät ovat varsin suuria, erityisesti prosessivaihe-3:n puolella. Tämä on tiedostettu jo aiemminkin ja esimerkiksi luvussa 2.7. mainittuja toimenpiteitä virtausten helpottamiseksi.

Suurin yksittäinen tekijä vakuumiongelmien vaikuttaa simuloinnin perusteella paikallistuvan syöttöaineen laadun vaihteluun. Korkeat hartsipitoisuudet tiedetään ongelmallisiksi varsinkin kylmäerottimien kohdalla. Huoltoseisokeissa ja -pysäytyksissä vakuumijärjestelmän laitteille tehdyissä tarkastuksissa ei ole havaittu odottamattomia kulumia tai vikoja. Näin ollen mahdolliset kiintoaineet eivät ole aiheuttaneet vaurioita ejektoriputkistolle (Paksuusmittauspöytäkirja, 2019).

Syöttöaineen laatu vaikuttaa myös vakuumijärjestelmän toimintaan. Selkein ero syntyi syöttöainelaatu 3:n ja syöttöainelaatujen 1 – 2 välille. Syöttöainelaatu 3 on tyypiltään voimakkaammin hartsihappopitoista verrattuna laatuihin 1 ja 2. Myös neutraaliaineiden määrä on laadussa 3 muita selkeästi malampi. Stage-3:n vakuumijärjestelmä on selkeästi raskaimmalla kuormalla. Tämä ilmenee simuloinneista, sekä myös käytännön kokemusten kautta. Eritoten likaantumisen kautta.

## 9. YHTEENVETO

Suosituksena on yhdistää kaikki haihdutinmallit ja ejektorimalli. Tällöin syöttöaineen käsitteilyprosessista saataisiin yksi selkeä malli. Virtausmäärien oikeellisuuden määrittämistä vakuumiyksikön suuntaan kannattaa vielä tarkentaa. Simulointien perusteella virtaukset ovat suurempia, mitä prosessin laitetoimittaja on alun perin mitoittanut.

Myöhemmin myös erityisesti neutraaliaineille tapahtuvien kemiallisten reaktioiden lisääminen malliin parantaisi mallin hyödynnettävyyttä. Tämä tosin vaatii lisää laboratoriokokeiden tekoa, jotta saadaan teorit reaktioiden toteutumisesta näytettyä toteen. Reaktioiden tutkimista on syytä jatkaa, jotta ymmärrys syötön käyttäytymisestä haihdutuksessa lisääntyisi. Haihdutuksen pitäisi lähtökohtaisesti olla fysikaalinen yksikköoperaatio, käytännössä paineet ja lämpötilat luovat yksikköön olosuhteet, joissa reaktioiden syntymistä ei voida välttää. Vakuumijärjestelmän mallin tarkempaa säätämistä esimerkiksi lämpötilojen suhteen tulisi myös jatkaa.

Mallien yhdistäminenkin helpottaisi yksikön simulointia ja siellä tapahtuvien ilmiöiden ymmärtämistä. Tähän kannatta panostaa, koska tätä kautta päästäisiin nopeammin kiinni mahdollisiin ongelmiin. Tämä tosin vaatii lisää seuranta ja syötön analysointia.

Syöttöaineiden laatu pyrittävä pitämään mahdollisimman tasaisena. Tällöin esimerkiksi syöttöainetyyppi kolme ei pääse liian hallitsevaksi tietyssä säiliössä. Tällä vähennetään kuormitusta kylmäerottimille, varsinkin stage-3:n osalta. On myös mietittävä, miten teknisesti olisi mahdollista välttää hartsihappojen kulkeutuminen kylmäerottimille. Eli haihdutuksen hallintaan varsinkin prosessivaihe 3:n osalta on syytä panostaa. Esimerkiksi lauhdutuksen tehostamisella voisi olla mahdollista päästä parempiin tuloksiin vakuumiyksikön ja tätä kautta koko yksikön toiminnan kannalta.

Tutkimuksen alla olevan vakuumijärjestelmien erottaminen toisistaan ei ole selvityksen perusteella välttämätöntä vakuumiyksikön kapasiteetin takia. Tällä kuitenkin saavutettaisiin

toimintavarmuutta yksikköön. Yksikön kuivausosassa tapahtuvat voimakkaat vesi- tai tärpättihöyryjen haihtumiset kuormittaisivat vähemmän koko vakuumijärjestelmää.

Vakuumitestaukseen ennen yksikön käynnistämistä tulisi miettiä tarkennuksia. Vuototestaukset tehdään tällä hetkellä heliumtestauksella. Se on osoittautunut toimivaksi menetelmäksi. Menetelmän käyttöä on syytä jatkaa ja kehittää myös uusia nopeampia tapoja vuotojen toteamiseksi.

### Lähdeluettelo

- AG, K. H. (2013). Report Performance Test (sisäinen dokumentti). Hannover.
- AG, K. H. Jet ejectors for the oil industries. Körting Hannover AG. Saatavilla: <https://www.koerting.de/en/petrol-refineries.html> [Haettu 13 kesäkuu 2019]
- Aspen Plus. 2020, Tammikuu 21. Kirjastohaku APV110 PURE37.
- Birgenheir, D., Butzbach, T., Bolt, D., & Bhatnagar, R. (1993). Designing steam-jet vacuum system. *Chemical Engineering*, 116-121.
- Blatchley, C. G. Schutte & Koerting. Retrieved from [https://www.s-k.com/technical-references/ejector\\_performance.pdf](https://www.s-k.com/technical-references/ejector_performance.pdf) [Haettu 22 toukokuu 2019]
- Chandra, V. V., & Ahmed, M. R. (2014). Experimental and computational studies on a steam jet refrigeration. *Energy Conversion and Management*, 377-386.
- Chemicalbook.com. 1740-19-8(DEHYDROABIETIC ACID) Product Description. Saatavilla: [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_US\\_CB6424042.aspx](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_US_CB6424042.aspx) [Haettu 16 joulukuu 2019]
- Deutsches Institut für Normung. (2017, June). DIN 28430. DIN 28430 Vacuum technology – Rules for the measurement of steam jet vacuum pumps and steam jet.
- El-Dessouky, H., Ettonuney, H., Alatiqi, I., & Al-Nuwaibit, G. (2002). Evaluation of steam jet ejectors. *Chemical Engineering and Processing*, 551-561.
- EnggCyclopedia. (2019, May 1). EnggCyclopedia. How liquid rings vacuum pumps work. Saatavilla: <https://www.enggcyclopedia.com/2012/02/liquid-ring-vacuum-pumps-work/> [Haettu 1 toukokuu]
- Eriksson, T. (2019, Huhtikuu 1). Sähköpostikeskustelu.
- Eriksson, T. (2019, helmikuu 28). Sähköpostikeskustelu.
- Gordon, M. H., & Firman, C. (2001). Effects of heating and bleaching on formation of stigmastadienes in olive oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1530-1532.
- Halme, N. (2019). Optimization of Crude tall oil evaporation. Diplomityö. Aalto-yliopisto.
- Hammoud, A. H. (2006). Effect of design and operational parameters on jet pump performance. *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics*, (pp. 245-252). Elounda, Greece.
- Heikkilä, A-M, Malmen, Y. Turvallisuus prosessien suunnittelussa ja käyttöönotossa. VTT. Saatavilla: <https://docplayer.fi/19227449-Turvallisuus-prosessien-suunnittelussa-ja-kayttoonotossa.html> [Haettu 10 lokakuu 2019]
- Hiironen, K. (2015, Syyskuu 24). Prosessikuvaus. Sisäinen dokumentti.
- Hiltunen, R. (2016). Mäntyöljyn tislauksen esikäsittely. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

- Hirsilä, M. (2005). Männyn (*Pinus sylvestris*) ja kuusen (*Picea abies*) kaupallisesti hyödynnettävissä olevat pienimolekyyliset yhdisteet. Pro gradu. Jyväskylän yliopisto.
- Holmblom, B. (1978). The Behavior of Resin Acids during Tall Oil Distillation. *Journal of the American oil chemists' society*, 876-880.
- Hornhofer, C. (2016). Plant visit and discussions. Sisäinen dokumentti.
- Hussein, Y. Jordan University of Science and Technology. Thermodynamic Models & Physical Properties. Saatavilla: <http://www.just.edu.jo/~yahussain/files/Thermodynamic%20Models.pdf> [Haettu 30 lokakuu]
- Kallio-Meriluoto, M. (2019, marraskuu 28). Haastattelu. (O. Junnonen, haastattelija)
- Kallio-Meriluoto, M. (2019). Sähköpostikeskustelu.
- Karaiste, J. (2016). Öljynjalostamon pohjaöljy-yksikön höyrytaseen täsmäys matemaattisella menetelmällä. Diplomityö.
- Koliseva, S. (2020, tammikuu 7). (O. Junnonen, haastattelija)
- Körting Hannover AG. (2013). Report Performance Test. Hannover. UPM-Kymmene Oyj Sisäinen dokumentti.
- LIMS-järjestelmä. (2019, maaliskuu 26). Laboratorioanalyysi. Lappeenranta: UPM-Kymmene Oyj. UPM-Kymmene Oyj sisäinen dokumentti.
- Lines, J. R. (n.d.). Options Analysis Of Vacuum Columns and Ejector systems. *Hydrocarbon Asia*, 1-7.
- MES. Mechanical Engineering Site. Retrieved from Liquid Ring Vacuum Pump Working Principle and Pumping System. Saatavilla: <http://www.mechanicalengineeringsite.com/liquid-ring-vacuum-pump-working-principle-and-pumping-system/> [Haettu 1 toukokuu 2019]
- Myllyoja, J., Aalto, P., Savolainen, P., Purola, V.-M., Alopaeus, V., & Grönqvist, J. (2011). Patent No. US 8,022,258 B2.
- Mäkelä, T. (2018). Kiertokaasukompressorin monitorointi simulointimallilla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Paksuusmittauspöytäkirja, D89676 (Lokakuu 2, 2019).
- Pfeiffer Vacuum. Basics of Helium Leak Detection. Saatavilla: [http://www.netesnosti.informacie.sk/2007\\_prispevky/basics\\_leak\\_detection.pdf](http://www.netesnosti.informacie.sk/2007_prispevky/basics_leak_detection.pdf) [Haettu 3 huhtikuu 2019]
- Pönni, R. Puunjalostuksen kemia. Puun uuteaineet. TKK. Saatavilla: <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L11.pdf> [Haettu 30 maaliskuu 2019]
- Riistama, K., Laitinen, J., & Vuori, M. (2003). Suomen kemianteollisuus. Tampere: Chemas Oy.
- Ryans, J. L., & Roper, D. L. (1986). *Process Vacuum System Design & Operation*. McGraw-Hill book company.

- Sargent, R. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 12-24.
- Shafae, M., Tavakol, M., Riazi, R., & Sharifi, N. (2015). An investigation on the supersonic ejectors working with mixture of air and steam. *Journal of Mechanical Science and technology* 29, 4691-4700.
- Skogberg, W. (2019). Ejektorijärjestelmän vajaatoiminnan vianetsintä. Diplomityö.
- Stenius, P. (2000). *Forest Products Chemistry*. Helsinki. Fapet Oy.
- Tapanen, R. (2009). Sellutehtaan sekundäärilämmön käytön tehostaminen. Diplomityö
- Transvac Systems Ltd. (2019, helmikuu 15). How do ejectors work? Retrieved from How do ejectors work?: <https://www.transvac.co.uk/howanejectorworks.php> [Haettu 15 helmikuu 2019]
- UPM. (2014). Vetykäsittelyn prosessikuvaus. UPM-Kymmene Oyj sisäinen dokumentti.
- UPM. UPM Biopolttoaineet. Retrieved from UPM Biopolttoaineet tuotanto: <https://www.upmbiofuels.com/fi/upm-biopolttoaineet/tuotanto/> [Haettu 1 helmikuu 2019]
- Vilonen, K. (2019, maaliskuu 16). Kylmäerottimen hiilivetyjen kirjastohakujen laboratorioanalyysin yhteenveto. Sisäinen dokumentti.
- Vilonen, K. (2019). Reaction of tall oil components in pretreatment. Lappeenranta.
- YTM-Industrial. Prosessitekniikka katalogi. YTN-Industrial. Saatavilla: <https://www.ytm.fi/tuotteet/prosessitekniikka/tyhjiotekniikka-ja-tyhjiopumput/> [Haettu 10 helmikuu 2019]

**LIITTEET**

LIITE I Ratkaisumallit matemaattisiin ejektorimalleihin

LIITE II Haihdutinmallit

LIITE III Vakuumiyksikön malli

LIITE IV Kylmäerotin 3:n GCMSD-graafi

LIITE V Ejektorimallin syöttökomponentit

LIITE VI Mäntyöljyn komponenttien jakaumat ja sen vakuumijärjestelmälle aiheuttamat haasteet

LIITE VII Ejektoreiden höyrystimien halkaisijat

LIITE VIII Vakuumijärjestelmän suunnitellut- ja toteutuneet prosessiarvot

LIITE IX Vakuumijärjestelmän suunnitellut- ja toteutetut parannukset

LIITE X Laitetoimittajan suunnittelun perusteena olleet kaasun koostumukset

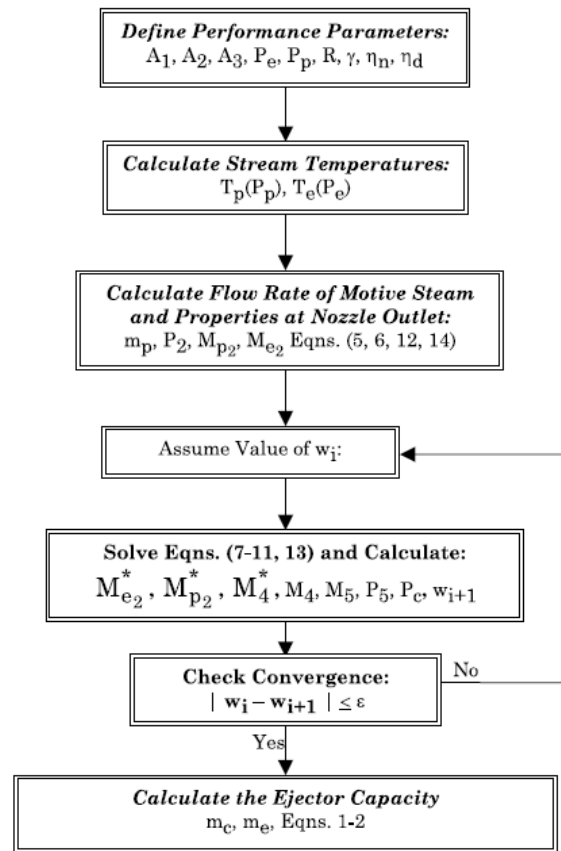
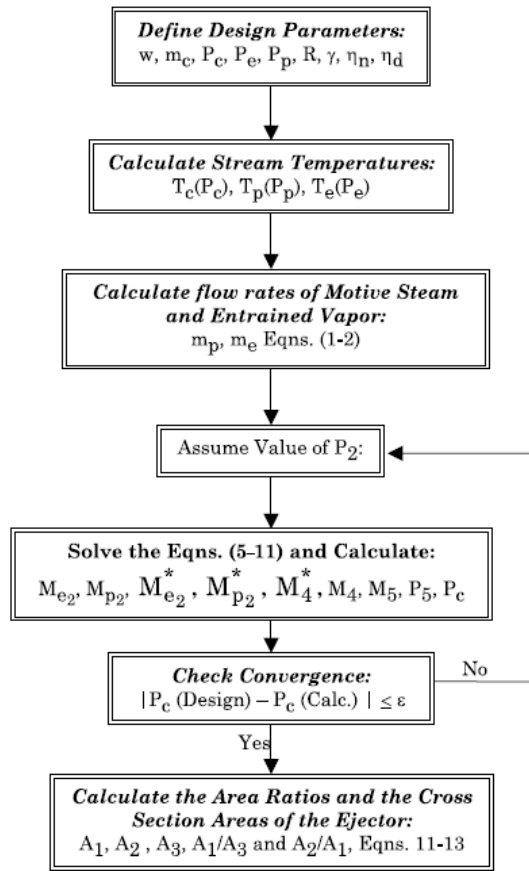
LIITE XI Simuloinnin ainejaukauma ja GCMSD-analyysi vetäiltuna

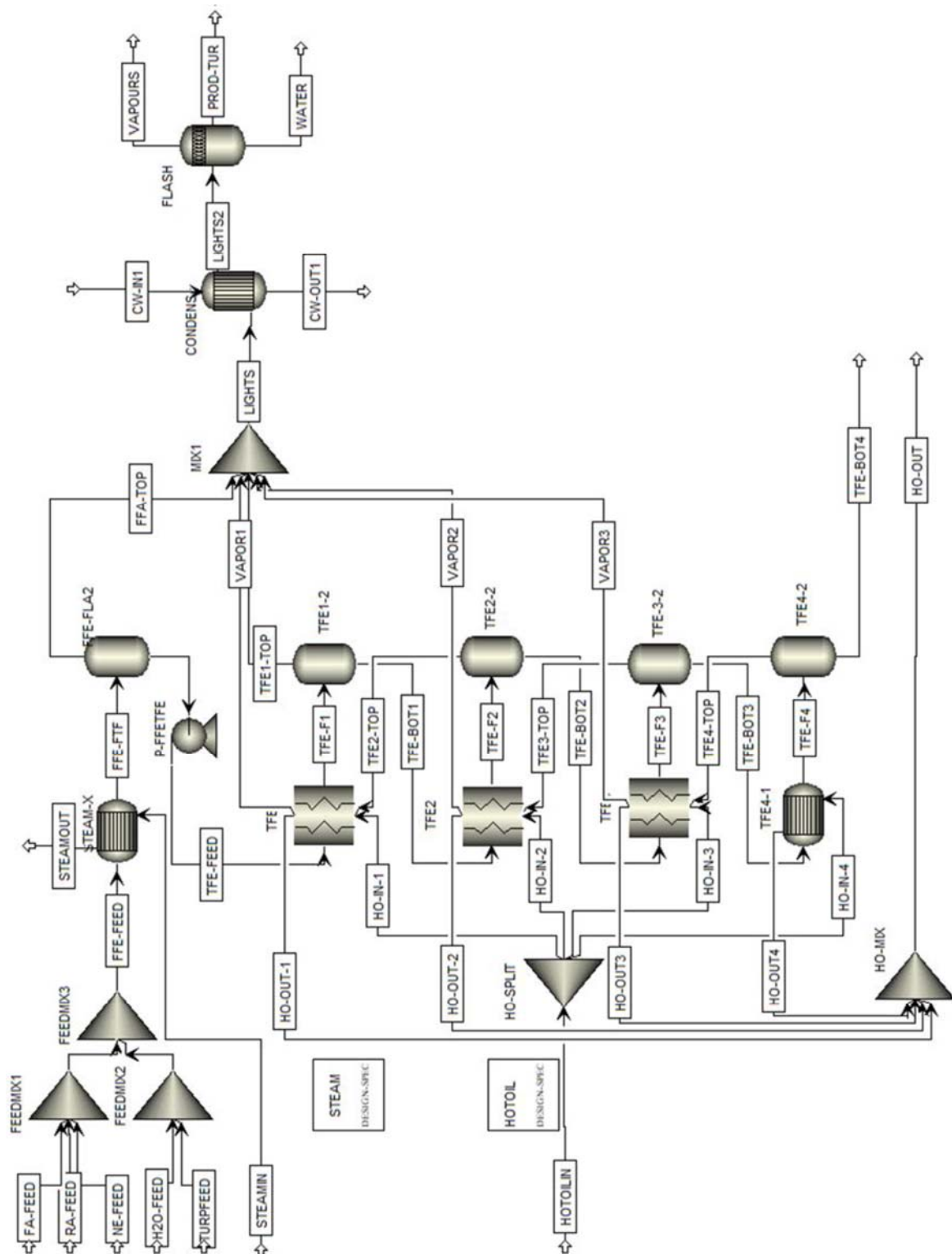
LIITE XII RMÖ:n laadun vaikutus kylmäerottimien toimintaan

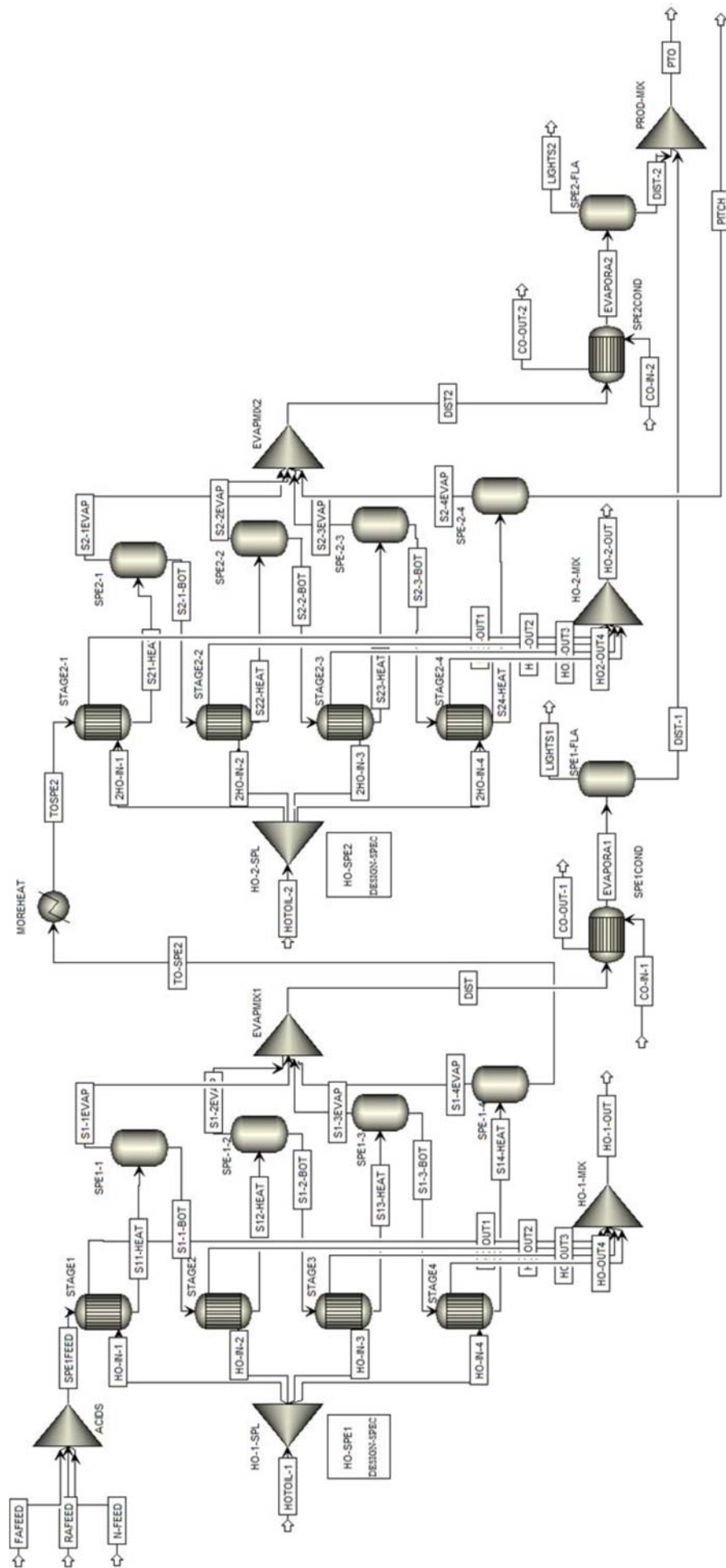
LIITE XIII Prosesseista ulos otettavat jakeet

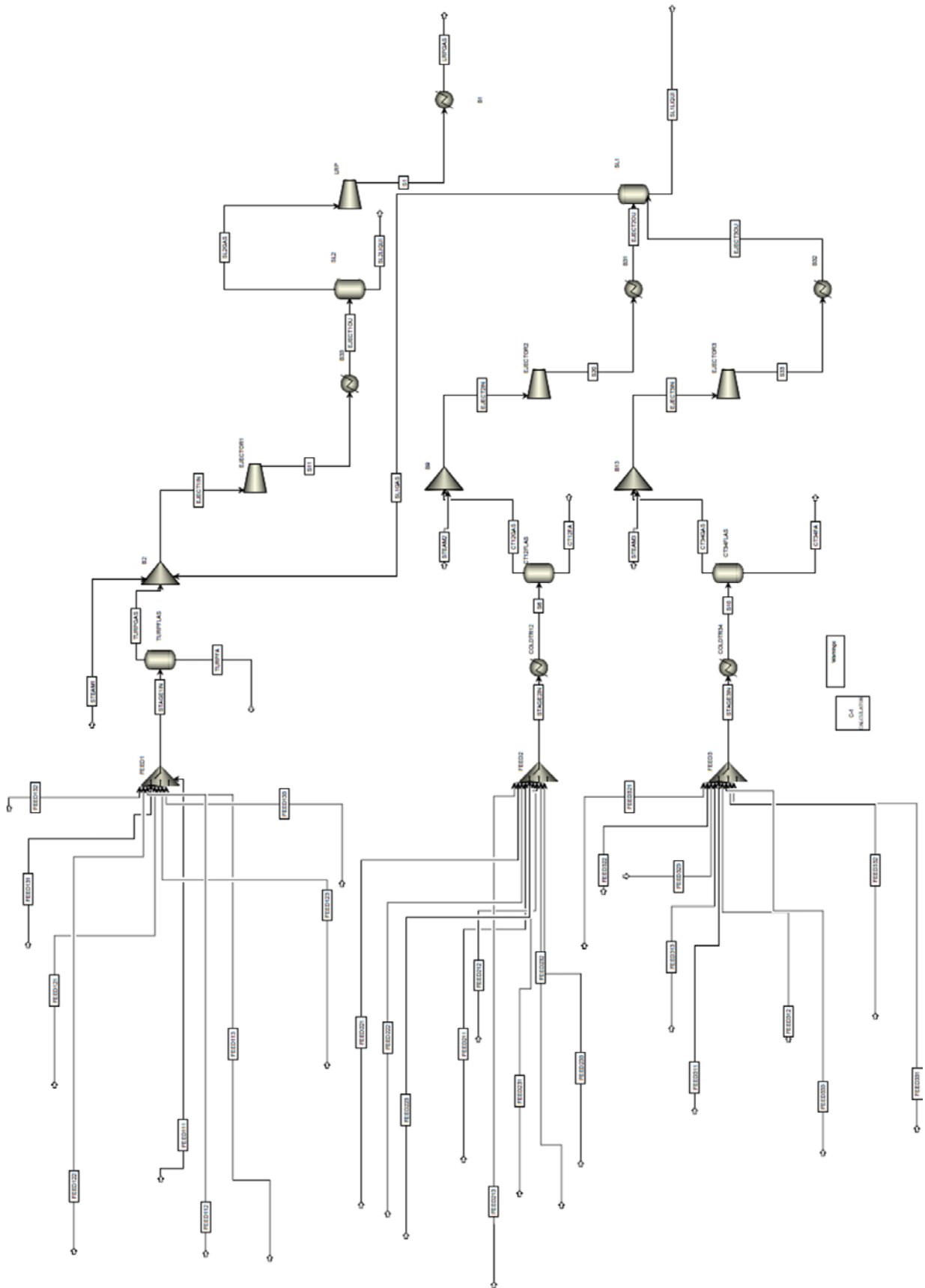
LIITE XIV Suositellut toimenpiteet





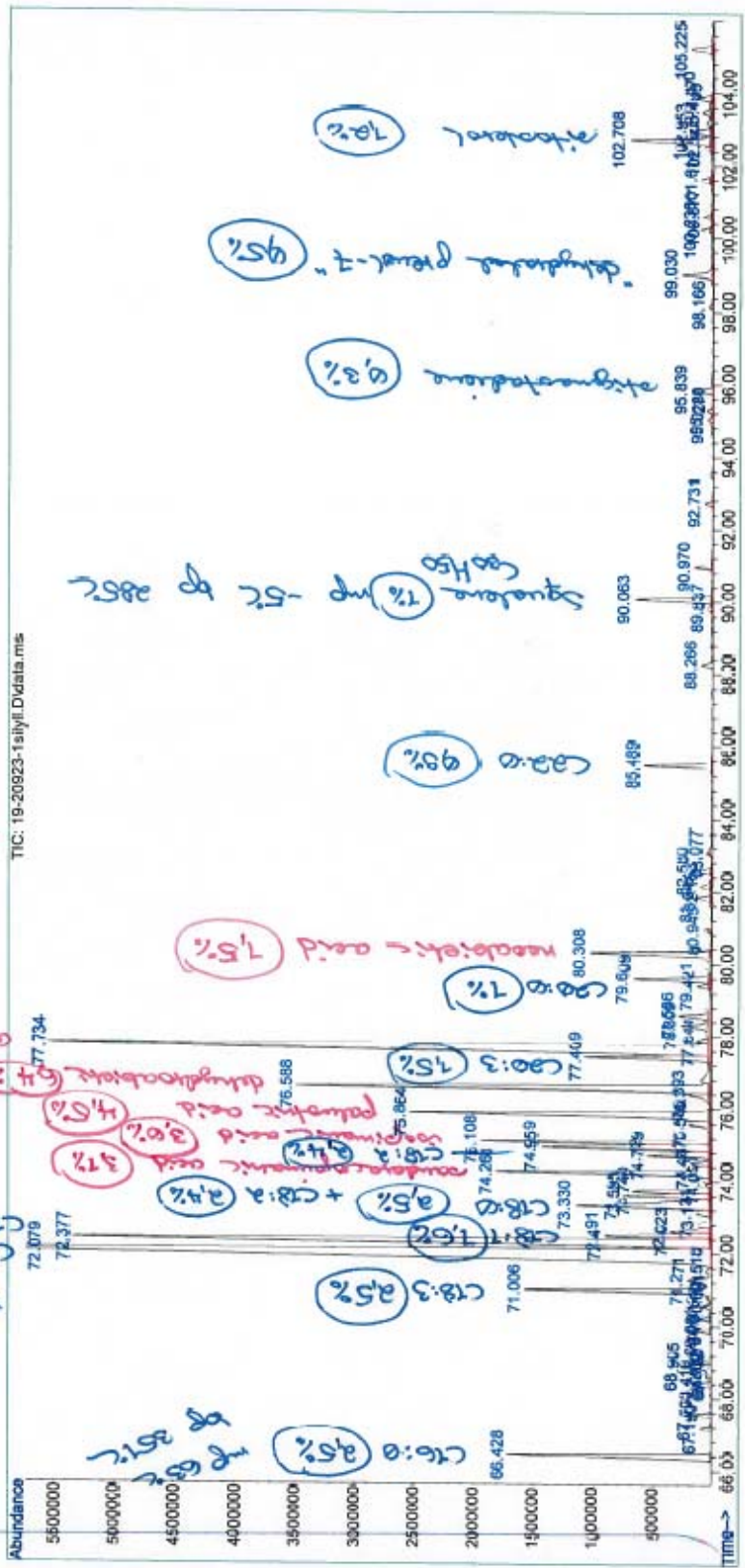






Kylmäerotin 3 tulokset

File : C:\msdchem\1\data\BrDC2019\19-20923-1silyi\1.D  
 Operator : MAS  
 Acquired : 15 Nov 2019 12:47  
 Instrument : INS-0688  
 Sample Name : 19-20923-1silyi  
 Misc Info :  
 Vial Number : 1



→ parhaat näytteistä rosolattopojia  
 subamigipien 50 - 60°C

→ 7/3 van vartiopojia tai jopa enemmän  
 pöytäiden kilaiden. subamigipien 88-75°C

PALMAC	Conventional	N-HEXADECANOIC-ACID	C16H32O2
FORMAC	Conventional	FORMIC-ACID	CH2O2
ALPHA-PI	Conventional	ALPHA-PINENE	C10H16-D2
WATER	Conventional	WATER	H2O
AIR	Conventional	AIR	AIR
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
GUAIA-01	Conventional	GUAIACOL	C7H8O2-E1
3-CAR-01	Conventional	3-CARENE	C10H16-N45
FURAN	Conventional	FURAN	C4H4O
FURFU-01	Conventional	FURFURAL	C5H4O2
ACETI-01	Conventional	ACETIC-ACID	C2H4O2-1
BETA--01	Conventional	BETA-PINENE	C10H16-D3
LIMON-01	Conventional	D-LIMONENE	C10H16-D1
3-CAR-02	Conventional	3-CARENE	C10H16-N45
CAMPH-01	Conventional	CAMPHENE	C10H16-E1
ABIET-01	Conventional	ABIETIC-ACID	C20H30O2
PALUS-01	Conventional	PALUSTRIC-ACID	C20H30O2-D4
DEHYD-01	Conventional	DEHYDROABIETIC-ACID	C20H28O2
NEOAB-01	Conventional	NEOABIETIC-ACID	C20H30O2-D1
ISOPI-01	Conventional	ISOPIMARIC-ACID	C20H30O2-D3
PIMAR-01	Conventional	PIMARIC-ACID	C20H30O2-D2
N-DOD-01	Conventional	N-DODECANOIC-ACID	C12H24O2
N-TET-01	Conventional	N-TETRADECANOIC-ACID	C14H28O2
PENTA-01	Conventional	PENTADECANOIC-ACID	C15H30O2
N-HEX-01	Conventional	N-HEXADECANOIC-ACID	C16H32O2
CIS-9-01	Conventional	CIS-9-HEXADECENOIC-ACID	C16H30O2-N4
N-HEP-01	Conventional	N-HEPTADECANOIC-ACID	C17H34O2
STEAR-01	Conventional	STEARIC-ACID	C18H36O2
OLEIC-01	Conventional	OLEIC-ACID	C18H34O2
LINOL-01	Conventional	LINOLEIC-ACID	C18H32O2
LINOL-02	Conventional	LINOLENIC-ACID	C18H30O2
NONAD-01	Conventional	NONADECANOIC-ACID	C19H38O2
N-EIC-01	Conventional	N-EICOSANIC-ACID	C20H40O2
CIS-1-01	Conventional	CIS-11,14-EICOSADIENOIC-ACID	C20H36O2-N2
N-DOC-01	Conventional	N-DOCOSANOIC-ACID	C22H44O2-N1
ERUCI-01	Conventional	ERUCIC-ACID	C22H42O2
TRICO-01	Conventional	TRICOSANOIC-ACID	C23H46O2-N1
TETRA-01	Conventional	TETRACOSANOIC-ACID	C24H48O2
TETRA-02	Conventional	TETRACOSYL-ALCOHOL	C24H50O
BEHEN-01	Conventional	BEHENYL-ALCOHOL	C22H46O
1-EIC-01	Conventional	1-EICOSANOL	C20H42O
CERYL-01	Conventional	CERYL-ALCOHOL	C26H54O
JUNIP-01	Conventional	JUNIPENE	C15H24-N3
AGATH-01	Conventional	AGATHADIOL	C20H34O2

ISOAG-01	Conventional	ISOAGATHOLAL	C20H32O2
BETUL-01	Conventional	BETULIN	C30H50O2-N1
C30H4-01	Conventional	C30H48O3-N2	C30H48O3-N2
BENZY-01	Conventional	BENZYL-ALCOHOL	C7H8O-2
P-CHL-01	Conventional	P-CHLOROPHENOL	C6H5CLO-E3
TRANS-01	Conventional	TRANS-3,5-DIMETHOXYSTILBENE	C16H16O2
SITOS-01	Conventional	SITOSTEROL	C29H50O
ERGOS-01	Conventional	ERGOSTEROL	C28H44O
SQUAL-01	Conventional	SQUALENE	C30H50-N1
CETYL-01	Conventional	CETYL-STEARATE	C34H68O2
CHOLE-01	Conventional	CHOLESTERYL-CAPRATE	C37H64O2
PALMI-01	Conventional	PALMITYL-BEHENATE	C38H76O2
CHOLE-02	Conventional	CHOLESTERYL-LINOLEATE	C45H76O2
RES-OH	Pseudocomponent		RESINALCOHOL
RES-CHO	Pseudocomponent		RESINALDEHYD
TERPENES	Pseudocomponent		TERP
L-STEROI	Pseudocomponent		STEROIDS
ST-C3040	Pseudocomponent		LARGER1
ST-C4050	Pseudocomponent		LARGER2

	Component	Property method	Average NBP	API gravity	Specific gravity	Liquid density	Molecular weight
			C			lb/cuft	
▶	RES-OH	ASPEN	452,8		1,01		329,464
▶	RES-CHO	ASPEN	392		1,01		326,44
▶	TERPENES	ASPEN	350,5		1,01		312,456
▶	L-STEROI	ASPEN	458,68		1,01		470
▶	ST-C3040	ASPEN	600		1,01		500
▶	ST-C4050	ASPEN	700		1,01		600