



**SUOVAN EROTTAMISEN OPTIMOINTI SULFAATTISELLUTEHTAAN
HAIHDUTTAMOLLA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Santeri Honga

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Santeri Honga

Suovan erottamisen optimointi sulfaattisellutehtaan haihduttamalla

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

31 sivua, 12 kuvaa

Tarkastaja: Prof. E.V

Avainsanat: suopa, suovan erottaminen, mustalipeä, syöttölipeä, mäntyöljy, haihduttamo

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan suovanerotukseen vaikuttavia tekijöitä sulfaattisellutehtaan haihduttamalla. Mäntyöljysuovan erottaminen mustalipeästä perustuu mustalipeän ja suovan väliseen tiheyseroon. Suopa erottuu säiliön pinnalle, joten se voidaan ottaa talteen ylikaatona.

Suovan erottamisen tehokkuuteen vaikuttaa suovan nousunopeus mustalipeässä ja suovan liukoisuus mustalipeään. Nousunopeuteen vaikuttaa mustalipeän viskositeetti, suopapartikkelin ja mustalipeän välinen tiheysero ja suopapartikkelin halkaisija. Suovan liukoisuuteen vaikuttaa kuiva-aine, rasvahappo-hartsihapposuhde eli FA:RA-suhde, jäännösalkali ja lämpötila. Lisäksi suovanerotuksessa vaikuttavat erilaiset säiliöiden suunnitteluun ja ajotapaan liittyvät tekijät, kuten mustalipeän viipymisaika syöttö- ja välilipeäsäiliöissä.

Mustalipeän jäännösuopapitoisuudella on merkittävä vaikutus erityisesti haihdutinyksiköiden likaantumiseen ja haihdutustehoon. Lisäksi suovasta valmistetaan mäntyöljyä, josta voidaan jalostaa tuotteita, joiden myynti tuottaa sellutehtaalte lisätuloja.

Työ sisältää kokeellisen osan, jossa tutkitaan suovanerotusta sulfaattisellutehtaan haihduttamalla. Tässä ensisijaisena mielenkiinnon kohteena on syöttölipeän kuiva-aineen nosto ajamalla siihen lisää vahvistuslipeää, ja sen vaikutus suovanerotukseen sekä haihduttamon toimintaan. Lisäksi työssä lasketaan viipymäajat tehtaan laihalipeäsäiliöille ja välilipeäsäiliöille. Työn julkaistava versio ei sisällä kokeellista osaa, eikä viipymäaikojen laskentaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Santeri Honga

Optimization of soap separation in evaporation plant of kraft process

Bachelor's thesis, Energy Technology

2022

41 pages, 16 figures, 12 tables

Examiners: Prof. E.V

Keywords: black liquor, evaporation plant, feed black liquor, soap, soap separation, tall oil

In this bachelor's thesis, the factors affecting soap separation efficiency at evaporation plant of kraft process are studied. The separation of tall oil soap from black liquor is based on the difference in density between black liquor and soap. The soap separates on the surface of the black liquor tank, so it can be recovered as an overflow.

The separation is affected by the rising velocity of soap in black liquor and the solubility of the soap in black liquor. The rising velocity is affected by the viscosity of the black liquor, the difference in density between soap particle and black liquor, and the diameter of soap particle. Solubility is affected by dry matter, fatty acid-resin acid ratio, i.e., FA:RA ratio, residual alkali, and temperature. In addition, several factors related to the design and operation of the tanks, such as the residence time of the black liquor in the feed and intermediate liquor tanks affects the separation process.

The residual soap content of the black liquor has a significant effect on the fouling and evaporation efficiency of the evaporator units. In addition, soap is used to make tall oil, which can be used to process products that generate additional income for the pulp mill.

The work includes an experimental part, in which the separation of the soap at evaporation plant is studied. The primary interest is to increase solids content of the feed liquor by adding strong liquor to feed liquor and study its effect on the separation and the operation of the evaporator plant. In addition, the residence times for the weak liquor tanks and intermediate tank are calculated. Residence time calculations and experimental part are not included in published version of this thesis.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
d_p	suopapartikkelin halkaisija	[m]
g	putoamiskiihtyvyys	[m/s ²]
h	pinnankorkeus	[m]
t_{res}	viipymäaika	[h]
q_v	mustalipeän tilavuusvirta	[m ³ /s]
v_{ML}	mustalipeän laskunopeus	[m/s]
v_s	suovan nousunopeus	[m/s]

Kreikkalaiset

μ	mustalipeän dynaaminen viskositeetti	[Pas]
$\Delta\rho$	tiheysero mustalipeän ja suovan välillä	[kg/m ³]

Lyhenteet

COD	kemiallinen hapen kulutus (chemical oxygen demand)
FA:RA-suhde	rasvahappo-hartsihappo-suhde
ADt	ilmakuiva tonni (air dry tonne)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1. Johdanto.....	6
2. Suovan erottamisen syitä.....	8
2.1. Erottamattoman suovan vaikutus haihdutustehoon.....	8
2.2. Vaahtoaminen ja jätevesien myrkyllisyyden lisääntyminen	11
2.3. Erottamattoman suovan vaikutus soodakattilalla.....	11
2.4. Erottamattoman suovan vaikutus kaustistamalla	12
2.5. Mäntyöljyn myynnin tuoma taloudellinen lisämotivaatio suovanerotukseen.....	13
3. Mäntyöljyn koostumus ja alkuperä	13
3.1. Rasva- ja hartsihapot	14
4. Suovan erotukseen laihalipeäsäiliöistä vaikuttavat tekijät	15
4.1. Suovan liukoisuus	16
4.2. Suovan nousunopeus	21
4.3. Mustalipeäsäiliön muotoilu ja lipeän laskunopeus	22
4.4. Muita tapoja suovanerotuksen tehostamiseen	27
4.5. Suopapartikkelin koko ja rakenne	28
4.6. Mustalipeän kuitupitoisuuden vaikutus suovan säiliöerotukseen	29
5. Johtopäätökset	30
Lähteet	32

1. Johdanto

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan suovanerotukseen liittyviä tekijöitä sulfaattisellutehtaan mustalipeän haihdutusprosessissa. Suovan erottaminen on välttämätöntä haihduttamon toiminnan kannalta, sillä erottamatta jäänyt suopa aiheuttaa monia ongelmia sellutehtaan kemikaalien talteenoton prosesseissa. Lisäksi suovanerotus on tänä päivänä tärkeä aihe, sillä suovasta voidaan valmistaa mäntyöljyä, josta voidaan jalostaa useita tuotteita.

Työn tärkeimpänä tavoitteena on tunnistaa suovan säiliöerotukseen vaikuttavat päämuuttajat, ja vertailla niiden vaikutusta suovan erotukseen. Työssä käsitellään myös mustalipeän jäännösuovan vaikutuksia sellutehtaan kemikaalikierron prosessiin, ja erityisesti haihduttamon toimintaan. Liika suopapitoisuus likaa haihdutinyksiköitä, ja vähentää haihdutustehoa. Tämän vuoksi suovan erottaminen on erittäin tärkeää etenkin silloin, kun haihduttamoprosessi on sellutehtaan tuotantoa rajoittava tekijä. Erityisenä mielenkiinnon kohteena on suovanerotuksen kannalta optimaalisen kuiva-aineen selvittäminen kirjallisuutta hyödyntämällä. Työn teoriaosuudessa perehdytään työn kannalta olennaisin osin myös mäntyöljysuovan koostumukseen.

Työ sisältää myös tehdasmittakaavassa toteutetun kokeellisen osuuden, jossa tarkastellaan Kaukaan sellutehtaan suovan erotuksen nykytilaan vaikuttavia tekijöitä ja pyritään selvittämään, voidaanko suovan säiliöerotusta parantaa vahvistamalla syöttölipeää ajamalla sen joukkoon vahvamustalipeää, ja selvitetään optimaalinen kuiva-aine syöttölipeälle. Lisäksi työssä esitellään yksi syöttö- ja välilipeäsäiliöiden ajomalli, ja arvioidaan laskemalla mustalipeän viipymäaika säiliöissä tällä ajomallilla. Kokeellinen osa ja viipymäajan laskut on jätetty pois julkaistusta versiosta.

Työ on rajattu siten, että pääpaino on suovanerotuksessa haihduttamon laihalipeäsäiliöistä, ja sen optimoinnissa, sekä huonon suovanerotuksen seurauksissa pääasiassa haihduttamalla. Tämän vuoksi työssä käsitellään vain vähän esimerkiksi suovan jatkojalostusta, ja mäntyöljyn käyttöä. Myös sellutehtaan ja haihduttamon muiden prosessien toimintaa käsitellään tässä vain tutkimuskohteen kannalta olennaisissa määrin.

2. Suovan erottamisen syitä

Mäntyöljysuopa mustalipeässä aiheuttaa monia ei-toivottuja seurauksia. Näitä seurauksia ilmenee haihduttamon lisäksi soodakattilalla ja kaustistamalla. On arvioitu, että suovan aiheuttamat ongelmat voivat aiheuttaa 8 euron kulut tuotettua sellutonna kohden (Tikka 2008, 360). Tämän vuoksi suovan erottaminen on tärkeä tutkimuskohde. Lisäksi suovasta voidaan valmistaa mäntyöljyä, jonka myynnistä saadaan tehtaalle tuloja.

2.1. Erottamattoman suovan vaikutus haihdutustehoon

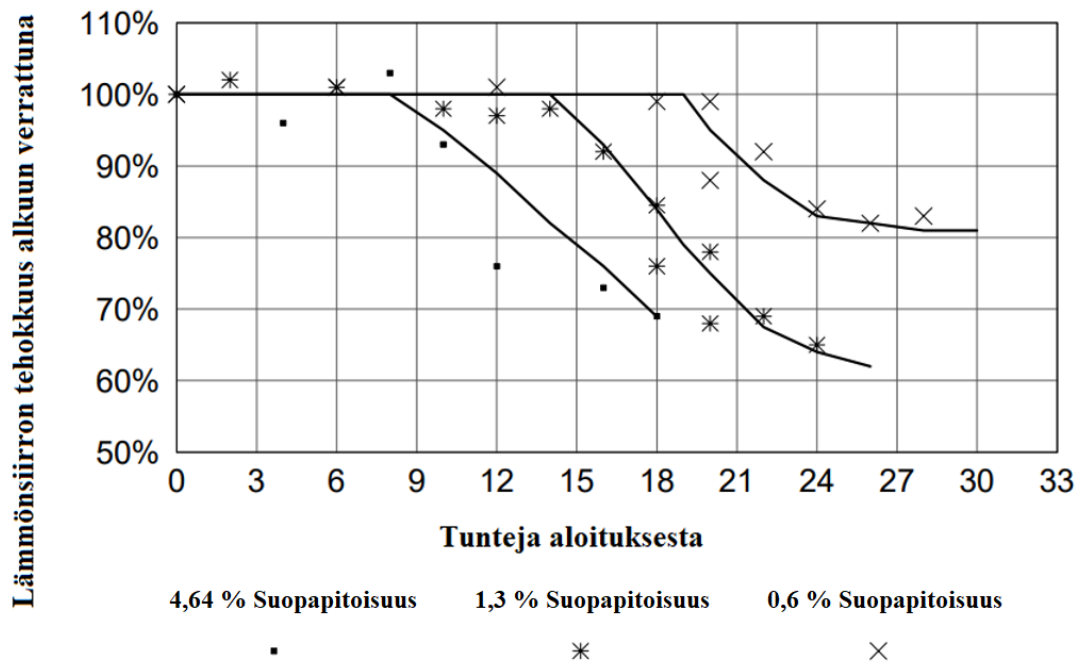
Liian suuren mäntyöljyn jäännöspitoisuuden vaikutuksesta haihdutinyksiköiden lämmönsiirtopinnat likaantuvat helpommin, jolloin haihduttamon lämmönsiirto heikkenee, ja haihdutusteho laskee. Suopa itsessään ei saostu lämmönsiirtopintoihin. Se kuitenkin sisältää muita ainesosia, jotka likaavat pintoja. Lisäksi on mahdollista, että suopa tarttuu olemassa oleviin saostumiin (KnowPulp 2022).

Suopa sisältää suuremman määrän kalsiumia ja kuituja kuin mustalipeä. Kalsium aiheuttaa haihdutinyksiköiden likaantumista. Kuidut eivät suoraan aiheuta lämmönsiirtopintojen likaantumista, mutta mustalipeän matalilla kuiva-aineilla ne ovat mustalipeää tiheämpiä, ja näin voivat kasaantua. Näihin kasaantumiin kerääntyy muita likaavia aineita, kuten kalsiumkarbonaattia, lisäksi kasaantumat haittaavat mustalipeän virtausta. Suovan aiheuttamaa likaantumista voidaan vähentää ainoastaan parantamalla suovanerotusta. (Clay 2006.) Jos mäntyöljykeittimen kalsiumpitoinen emävesi palautetaan haihduttamon alkupäähän, kulkeutuu sen mukana kalsiumia. Tämän vuoksi emävesi tulisiikin palauttaa haihduttamolle vahvempaan lipeään, tai poistaa kierrosta kokonaan. (KnowPulp 2022.)

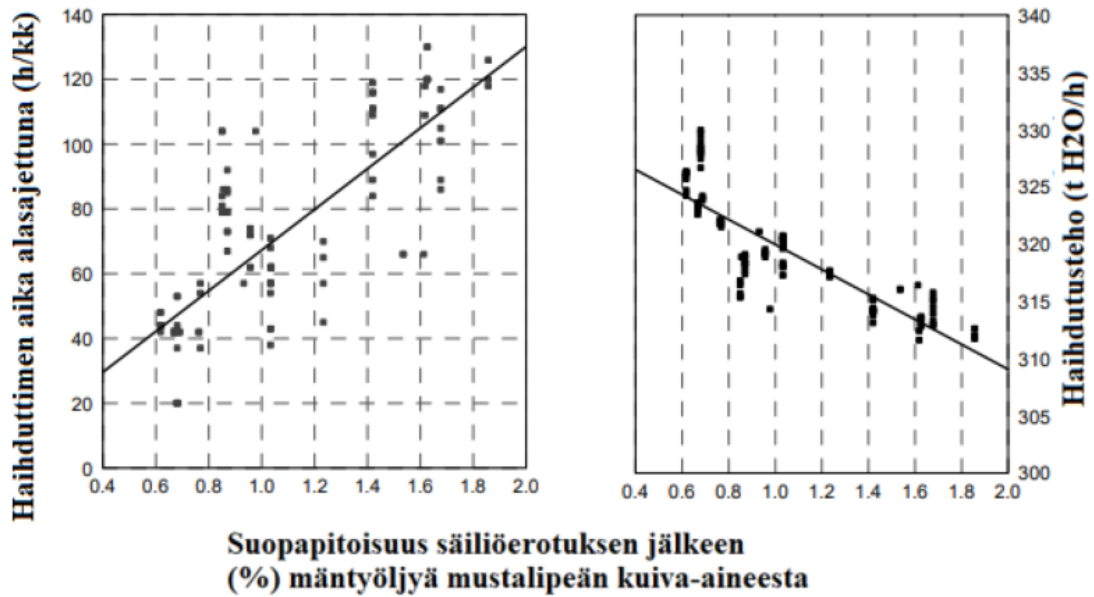
Likaantumisen takia yksiköitä joudutaan pesemään tiheämmin. Pesujen väliä voidaan jonkin verran pidentää nostamalla haihduttimelle tulevan höyryn lämpötilaa (Tikka 2008, 367).

Tällä tavoin voidaan tiettyyn pisteeseen asti kompensoida likaantumisen vaikutusta, joskin haihduttamon energiatehokkuus tällöin laskee.

Lähteen Foran, 2006 mukaan vuonna 1975 tehdyssä tutkimuksessa (Grace 1975, A Survey of Evaporator Scaling in The Alkaline Pulp Industry) tutkittiin mustalipeän mäntyöljypitoisuuden vaikutusta haihdutinyksikön likaantumiseen ja haihdutustehoon. Kuvat 1 ja 2, sekä taulukko 1 perustuvat edellä mainittuun tutkimukseen. Kuvissa näkyy suopapitoisuuden vaikutus haihduttimen lämmönsiirtopintojen likaantumiseen ja pesutarpeen lisääntymiseen sekä haihdutustehoon.



Kuva 1. Suopapitoisuuden vaikutus koehaihduttimen lämmönsiirron tehokkuuteen. (Foran 2006.) Kuvaa muokattu.



Kuva 2. Suopapitoisuuden vaikutus haihduttimen haihdutustehoon ja aikaan, jolloin haihdutin on alas ajettuna. (Foran 2006) Kuvaa muokattu.

Kuvista 1 ja 2 nähdään, että mustalipeän suopapitoisuudella suovan säiliöerotuksen jälkeen on merkittävä vaikutus haihdutinyksiköiden likaantumiseen ja haihdutustehoon. Tämä näkyy sekä koehaihduttimella (kuva 1), että tehtaalla täydessä mittakaavassa tehdyistä kokeista (kuva 2).

Taulukko 1. Suovanerotuksen vaikutus haihduttamon tehokkuuteen. (Foran 2006)

	Hyvä suovanerotus	Huono suovanerotus
Suovan jäännöspitoisuus mustalipeässä (%)	0,6	1,1
Haihdutin pois ajosta (h/kk)	45	75
Haihdutusteho (t H ₂ O/h)	323	315

Taulukosta 1 nähdään haihdutustehon paraneminen, kun suovanerotus paranee 1,1 prosentin jäännöspitoisuudesta 0,6 prosentin jäännöspitoisuuteen mäntyöljyä. Lisäksi kuukausittainen aika, kun haihdutin on pois käytöstä vähenee. Tämä johtuu siitä, että likaantuminen on hitaampaa, jolloin pesuntatarve pienenee.

2.2. Vaahtoaminen ja jätevesien myrkyllisyyden lisääntyminen

Suopa mustalipeän seassa voi myös lisätä tehtaalta poistuvien jätevesien myrkyllisyyttä, sillä suovan sisältämät hartsihapot ovat myrkyllisiä (Aro & Fatehi 2017, 469–480). Suopa mustalipeän sisällä aiheuttaa vaahtoamista mustalipeäsäiliöissä. Tämä vaikeuttaa säiliöiden pinnanmittausta, ja haittaa näin haihduttamon ajettavuutta. Vaahtoaminen aiheuttaa lisäksi lauhdeiden likaantumista ja COD-arvon lisääntymistä (Tikka 2008, 367). COD tarkoittaa kemiallista hapenkulutusta, eli sitä, kuinka paljon happea tarvitaan jäteveden orgaanisten aineiden hajoamiseen. Se kuvaa siis eloperäisten yhdisteiden määrää jätevedessä. Vaahtoamista tavallisesti vähennetään haihduttamoilla vahvistamalla sarjoille menevää lipeää, eli syöttölipeää, ajamalla siihen vahvistuslipeää (KnowPulp, luettu 2022). Suovanerotuksen tehokkuuden lisääminen on tärkeä tekijä vaahtoamistapumuksen vähentämisessä.

2.3. Erottamattoman suovan vaikutus soodakattilalla

Soodakattilalle polttoon päätyvä mäntyöljy aiheuttaa lisääntyneitä rikki päästöjä, sekä ongelmia kattilan ajettavuudessa (Aro et al. 2017, 469–480). Lisäksi jos soodakattilaprosessi on tuotannon rajoittava tekijä, sen kuormaa ei kannata lisätä entisestään suopaa polttamalla. Jos suovasta ei haluta tehdä mäntyöljyä myytäväksi, voidaan se myös polttaa soodakattilassa. Kuitenkin myös tällöin suopa kannattaa jalostaa mäntyöljyksi, koska suovan polttaminen sellaisenaan on vaikeaa sen epätasaisen koostumuksen vuoksi. Mäntyöljy voidaan syöttää kattilaan tasaisesti.

Soodakattilalla voi mustalipeän polton rajoittava tekijä olla poltettava kuiva-aine, tai vaihtoehtoisesti tuotetun höyryn määrä. Kuiva-aineen ollessa rajoittava tekijä, suopa korvaa oman massavirtansa verran mustalipeää. Tuotetun höyryn ollessa rajoittava tekijä suopa korvaa kaksinkertaisen massavirran mustalipeää. (Foran 2006.) Soodakattilan ollessa sellutehtaan tuotannon ”pullonkaula”, on suovalla suora vaikutus sellun tuotantoon.

Suopa ei sekoitu tasaisesti polttolipeäsäiliössä, joten suopaa poltettaessa lipeän lämpöarvo vaihtelee. Tämä aiheuttaa epätasaista palamista, ja operaattori joutuu lisäämään tulipesään syötettävän primääri-ilman määrää (Foran 2006). Tämä on ei-toivottu tilanne, sillä keossa tapahtuva pelkistymisreaktio tapahtuu tällöin huonommin, eli reduktioaste laskee. Eräällä tehtaalla parannettiin suovanerotusta 20 kilogrammasta 35 kilogrammaan mustalipeäkuiva-ainetonna kohti. Reduktioaste parani tällöin 84 prosentista noin 92 prosenttiin. Myös haihduttamon läpi pystyttiin ajamaan 10 % enemmän. (Foran 2006.) Tämä viittaisi siihen, että suovan jäännöspitoisuuden vaikutus mustalipeässä on merkittävä myös soodakattilalla.

2.4. Erottamattoman suovan vaikutus kaustistamalla

Suovan läsnäololla on kuormittava vaikutus myös kaustisoinnin puolella. (Aro et al. 2017, 469–480) Viherlipeän sisältämät pääasialliset kemikaalit ovat natriumkarbonaatti Na_2CO_3 ja natriumsulfidi Na_2S . Kaustisoinnissa poltetun kalkin kalsiumoksidi CaO reagoi viherlipeän veden kanssa sammutusreaktiossa, jolloin muodostuu kalsiumhydroksidia Ca(OH)_2 .

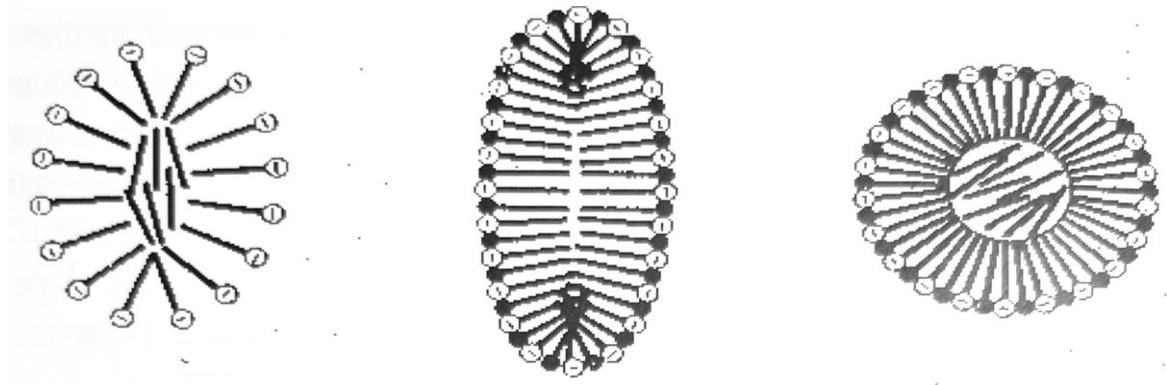
Kalsiumhydroksidi reagoi viherlipeän toisen pääkemikaalin, natriumkarbonaatin kanssa, jolloin muodostuu natriumhydroksidia NaOH ja kalsiumkarbonaattia. (KnowPulp, 2022) Suopa muodostaa palaessaan viherlipeän toista pääkemikaalia, natriumkarbonaattia. Mustalipeän kuiva-aine taas muodostaa soodakattilassa palaessaan sulaa, joka sisältää natriumkarbonaattia ja natriumsulfidia (Foran 2006). Natriumsulfidi ei vaadi kaustisointia liuetessaan viherlipeään, natriumkarbonaatti taas vaatii. Suopa kuormittaa siis kaustisointia enemmän kuin sama massa mustalipeää. Kaustisoinnin ollessa sellutehtaan tuotannon ”pullonkaula”, on suovalla suora vaikutus sellun tuotantoon.

2.5. Mäntyöljyn myynnin tuoma taloudellinen lisämotivaatio suovanerotukseen

Mäntyöljyn saanto on keskimäärin 30–50 kg tuotettua sellutonnia kohden. Tämä on 50–75 % puun alkuperäisestä mäntyöljypitoisuudesta. (Aro et al. 2017, 469–480.) Meillä Suomessa saadaan mäntyöljyä talteen keskimäärin 35 kg sellutonnia kohden (Riistama et al. 2003, 137). Mäntyöljyn myynnin osuus tehtaan kokonaistuloista on noin 1–1,5 %. Mäntyöljystä jalostettavaa pikiöljyä voidaan hyödyntää myös samalla tehtaalla meesauunin polttoaineena. (Gullichsen & Fogelholm 1999, 378.)

3. Mäntyöljyn koostumus ja alkuperä

Mäntyöljy on peräisin puun sisältämistä uuteaineista, rasvahapoista, hartsihapoista, sekä erilaisista saippuoitumattomista neutraaleista yhdisteistä. Mäntyöljy sisältää tyypillisesti 38–53 % rasvahappoja, 38–53 % hartsihappoja ja 6,5–20 % saippuoitumattomia neutraaleja yhdisteitä. (Aro et al. 2017, 469–480) Mäntyöljyn raaka-ainetta, mäntysuopaa muodostuu sellunkeittoprosessissa, kun rasva- ja hartsihapot muodostavat niiden natriumsuoloja. Nämä natriumsaippuat miselloituvat, ja keiton jälkeen haihduttamalla nämä saippuamisellit yhdistyvät toisiinsa (Virkola 1983, 1335). Koska nämä saippuamisellit ovat mustalipeää kevyempiä, ne nousevat säiliöiden pintaan ja suopa voidaan erottaa mustalipeästä.



Kuva 3. Suopamiselleja, joihin on liuennut erilaisia neutraaleja.

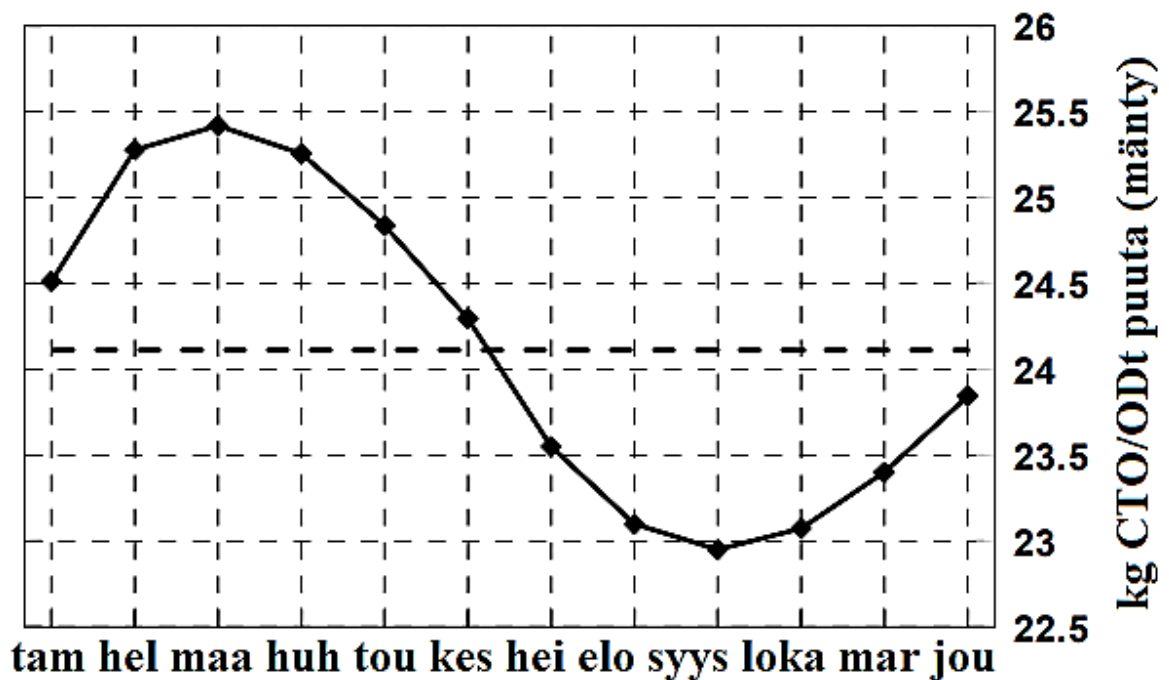
Kuvassa 3 näkyy erilaisia suovan muodostamia misellejä. Miselleihin on liuenneena puusta peräisin olevia neutraaleja ainesosia, jotka eivät muuten olisi liukoisia mustalipeään. Mäntyöljyn laadun tärkein mittari on happoluku, joka kuvaa suoraan rasva- ja hartsihappojen määrää. Happoluku määritellään KOH-määränä (mg), joka tarvitaan yhden mäntyöljygramman neutralointiin. Tyypillisiä happoluvun arvoja ovat raakamäntyöljyllä 155–165 ja koivuöljyllä 90–120. (Riistama et al. 2003, 137) Sekapuuta käyttävillä tehtailla happoluku on näiden välistä, tyypillisesti 125–135 (Tikka 2008, 360).

3.1. Rasva- ja hartsihapot

Taulukko 2. Pohjoismaisen mäntyöljyn koostumus eri puulajeilla (Gullichsen et al. 1999).

	Hartsihapot [%]	Rasvahapot [%]	Neutraalit yhdisteet [%]
Mänty	30-35	50-55	5-10
Kuusi	20-30	35-55	18-25
Koivu	-	76	24

Rasva- ja hartsihapot ovat mäntyöljyn arvokas osa. Taulukosta 2 nähdään, että mäntypuiden pihka sisältää hartsihappoja ja rasvahappoja, sekä neutraaleja aineita. Koivupuussa on hapoista ainoastaan rasvahappoja. Hartsihappojen sijaan koivu sisältää neutraaleja aineita, kuten hiilivetyjä, steroleja ja terpeenialkoholeja (Riistama et al. 2003, 136). Tästä syystä koivupuusta saatava mäntyöljy on laadultaan huonompaa. Myös kuusipuun osuuden lisääntyminen huonontaa mäntyöljyn saantoa ja laatua (Virkola 1983, 1338).



Kuva 4. Erotettavan suovan määrä eri vuodenaikoina. (Foran 2006.) Kuvaa muokattu.

Erotettavissa olevan suovan määrä vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Kuvassa 4 näkyy vuodenajan vaikutus erotettavaan suovan määrään. Kuvassa käytetty data on peräisin Yhdysvaltojen lounaisosassa sijaitsevalta tehtaalta. Sellutehtaan maantieteellisellä sijainnilla on huomattava merkitys mäntyöljyn koostumukseen.

Lisäksi puun varastoinnin aikana, erityisesti varastoinnin ensimmäisinä kuukausina syntyy mäntyöljyhäviötä. Ensimmäisen kahden kuukauden aikana puun varastoinnissa syntyy jopa 50–65 % mäntyöljyhäviö. Jos puu haketetaan pyöreiksi lastuiksi, on mäntyöljyhäviö pienempi. (Foran 2006.)

4. Suovan erotukseen laihalipeäsäiliöistä vaikuttavat tekijät

Suovan erottaminen mustalipeästä perustuu suovan ja mustalipeän tiheyseroon. Koska suopa on mustalipeää kevyempää, se nousee säiliön pinnalle, ja voidaan näin ottaa talteen. Tässä

luvussa käsitellään suovan säiliöerotusta ja sen tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Suovan säiliöerotuksen tehokkuus on määritelty yhtälössä 1 (Gullichsen et al. 1999, 85).

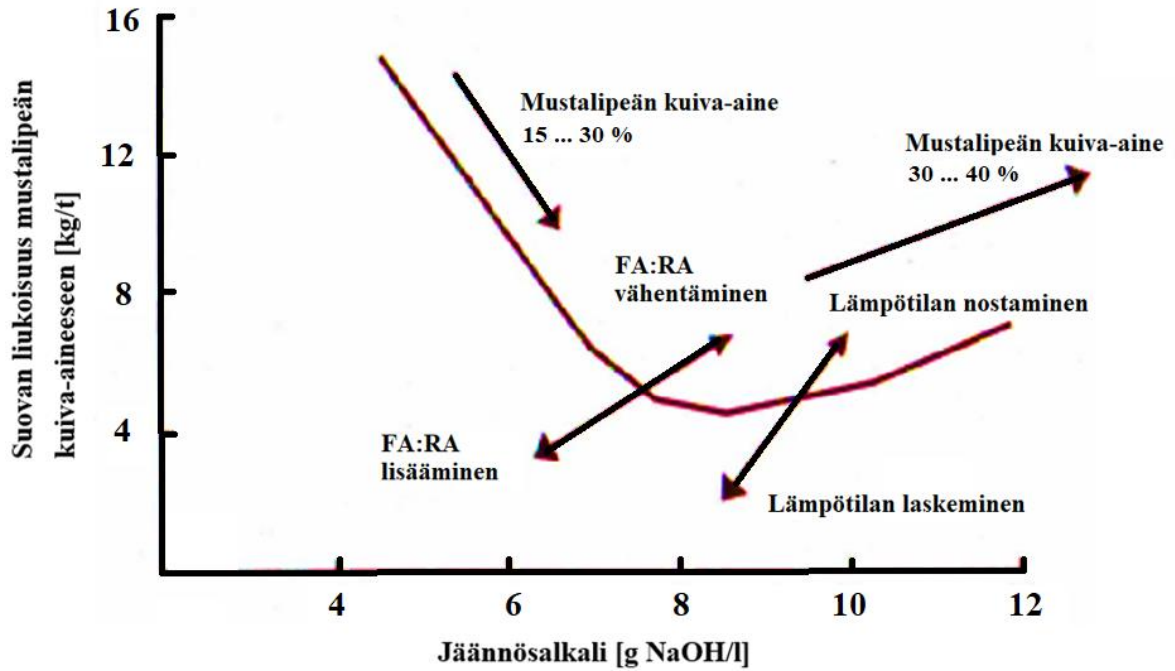
$$\text{Suovan säiliöerotuksen tehokkuus} = \frac{\text{sisääntuleva suopa} - \text{ulostuleva suopa}}{\text{sisääntuleva suopa} - \text{suovan liukoisuus}} \quad (1)$$

Suovan säiliöerotukseen vaikuttavia tekijöitä ovat suovan liukoisuus mustalipeään, säiliöiden muotoilu ja suovan nousunopeus. Suovan liukoisuuteen vaikuttaa kuiva-aine, FA:RA-suhde, jäännösalkali ja lämpötila. Suovan nousunopeuteen mustalipeässä vaikuttaa mustalipeän viskositeetti, mustalipeän ja suovan välinen tiheysero, sekä suopapartikkelin koko.

4.1. Suovan liukoisuus

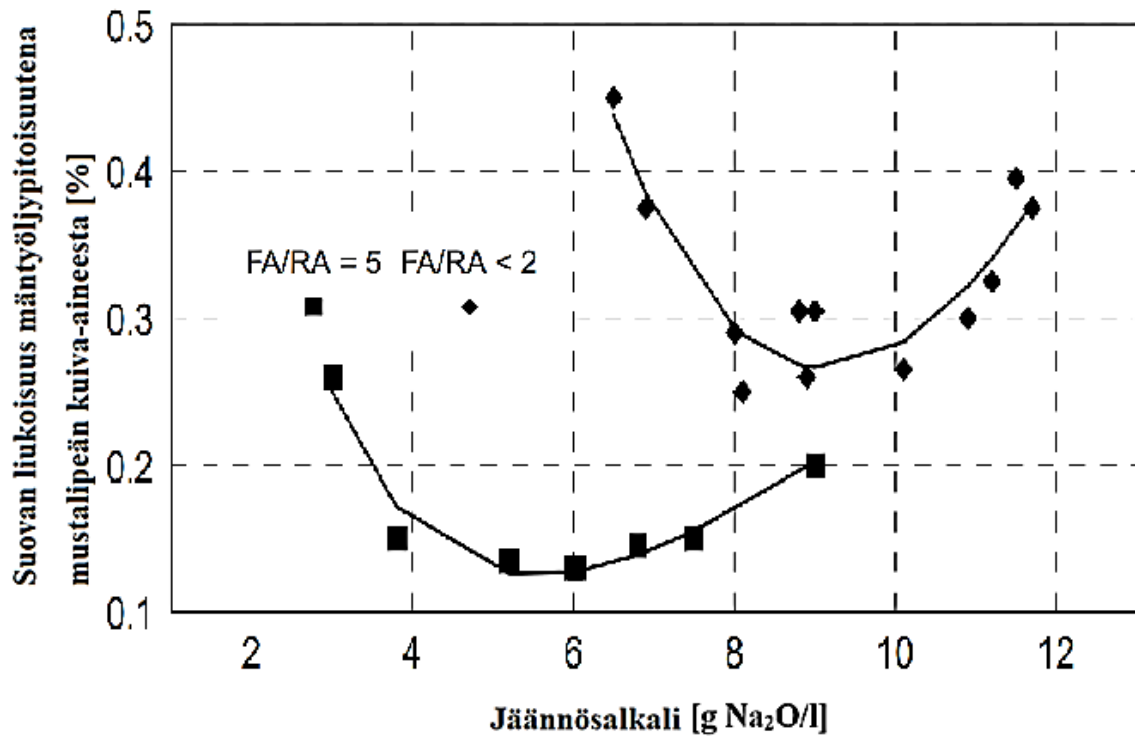
Suovan liukoisuus riippuu mustalipeän lämpötilasta, kuiva-aineesta, rasva- ja hartsihappojen suhteesta eli FA:RA-suhteesta ja jäännösalkalipitoisuudesta g NaOH/l (Gullichsen et al, 1999, 83–84). Minimiliukoisuus on tyypillisesti 2–5 kg mäntyöljyä kuiva-ainetonnin lipeää kohden (Tikka 2008, 367). Tämä määrä mäntyöljyä menee häviöksi kaikissa tapauksissa, sillä liuennutta suopaa ei voida nykyisillä menetelmillä erottaa lipeästä. Liukoisuuden takia häviöksi päätyvän suovan osuus on nykyisillä menetelmillä 20–40 % (Aro et al. 2017, 469–480). Yleisesti hyväksytty mäntyöljypitoisuus syöttölipeälle on 1 % mustalipeän kuiva-aineesta (Tikka 2008, 367).

Lämpötilan nostaminen lisää suovan liukoisuutta mustalipeään, kun kuiva-ainepitoisuus on alle 34 %. Sekalipeää käytettäessä suovan liukoisuus lisääntyy merkittävästi, kun koivun osuus on yli 60 % (Gullichsen et al. 1999, 83). Koivulipeän osuutta voidaan lisätä noin 50 prosenttiin ilman suurta vaikutusta suovanerotukseen (Foran 2006).



Kuva 5. Jäännösalkalin, FA:RA-suhteen, lämpötilan sekä kuiva-ainepitoisuuden vaikutus suovan liukoisuuteen. (Tikka 2008, 363.) Kuvaa muokattu.

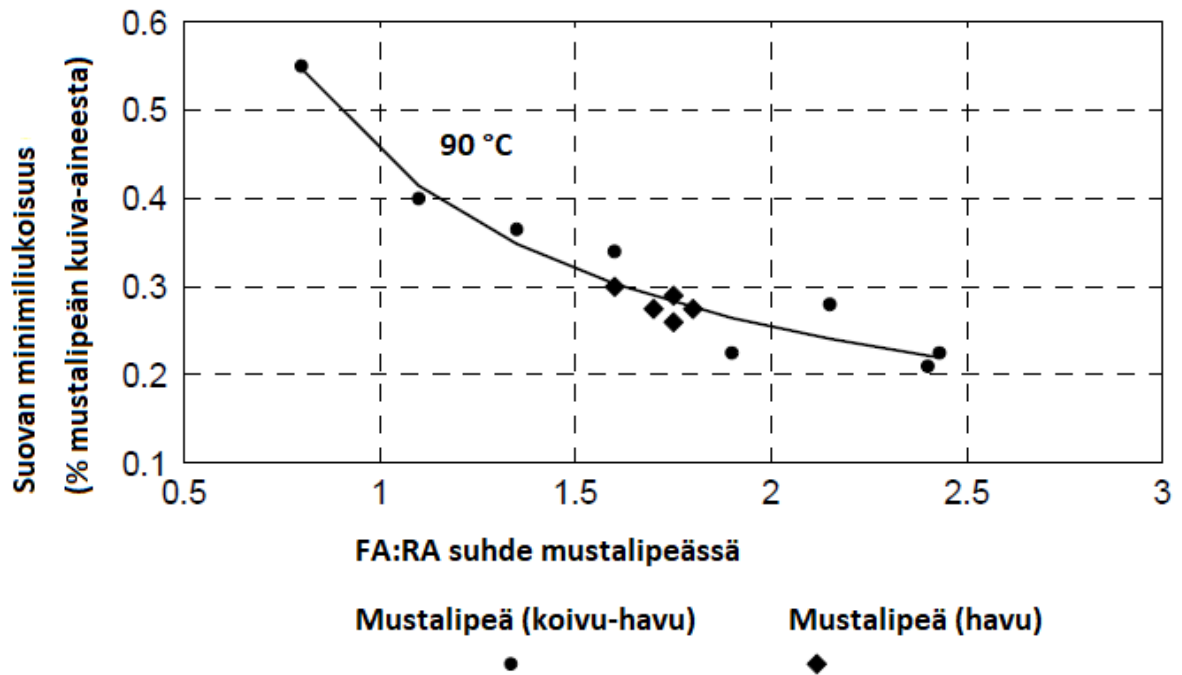
Kuvassa 5 näkyy jäännösalkalin, FA:RA:n, lämpötilan ja kuiva-ainepitoisuuden yhteisvaikutus suovan liukoisuuteen. Suovan liukoisuus on vähäisintä jäännösalkalipitoisuudella 8–11 g NaOH/l, eli 6,2–8,5 g NaO₂ riippuen FA:RA-suhteesta (Tikka 2008, 363).



Kuva 6. FA:RA-suhteen ja jäännösalkalin yhdistytty vaikutus suovan liukoisuuteen. (Foran 2006.) Kuvaa muokattu.

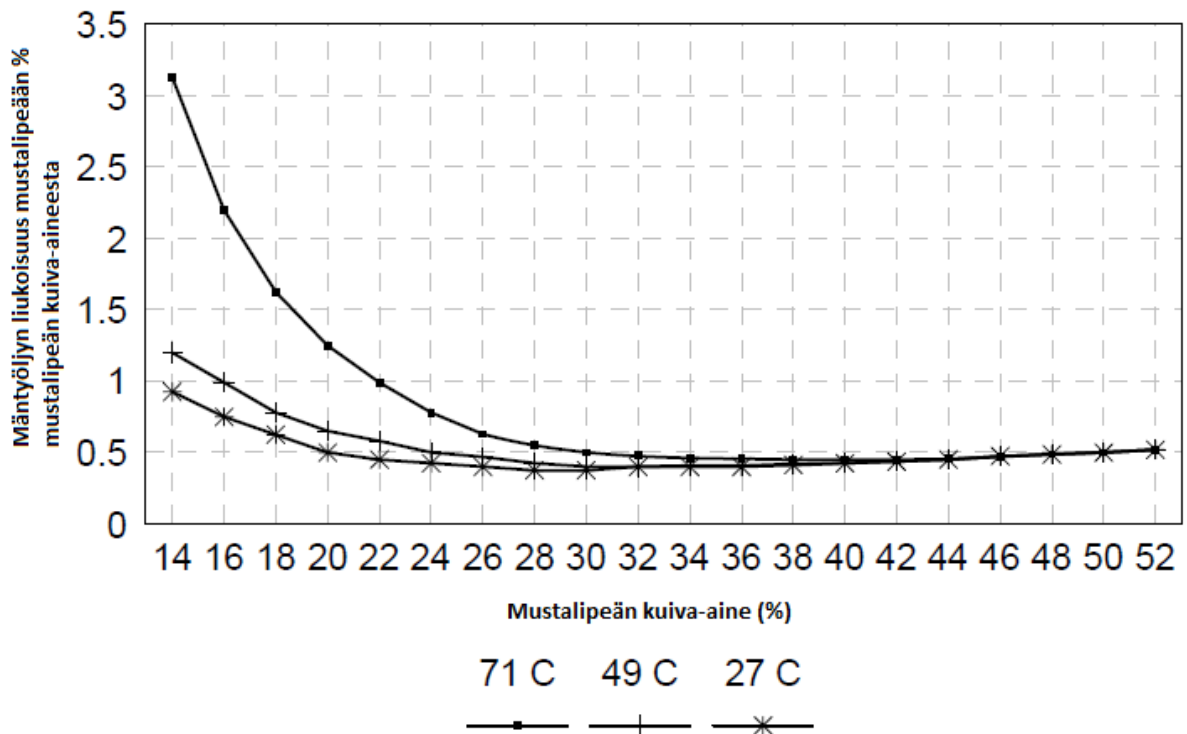
Kuvassa 6 näkyy edellistä kuvaa (5) tarkemmin FA:RA-suhteen vaikutus liukoisuuteen. Alemmassa kuvaajassa FA:RA-suhde on 5, ja ylemmässä 2. FA:RA-arvolla 5 suopa on vähemmän liukoista kuin FA:RA-suhteella 2. Kuvia tarkastellessa tulee huomata eri jäännösalkalipitoisuuden yksikkö.

Optimaalinen jäännösalkalipitoisuus on 8–11 g NaOH/l (Tikka 2008, 363). Se vastaa noin 6,2–8,5 g NaO₂/l. Muutoskerroin natriumhydroksidista natriumoksidiksi on 0,775. Kerroin perustuu näiden yhdisteiden natriumkonsentraation eroon. (KnowPulp, luettu 2021.) Kuvan 6 perusteella optimaalinen jäännösalkali on alle kahden FA:RA-suhteella noin 8–10 g NaO₂/l, eli 10–13 g NaOH/l.



Kuva 7. FA:RA-suhteen vaikutus suovan minimiliukoisuuteen prosentteina mäntyöljyä mustalipeän kuiva-aineessa 90 °C lämpötilassa (Foran 2006). Kuvaa muokattu.

Kuvasta 7 nähdään, että FA:RA-suhteen kasvaessa suovan minimiliukoisuus mustalipeään pienenee. Eräs suovan liukoisuutta käsittelevä tutkimus osoittaa myös, että suurin osa polttoon päätyneestä suovasta koostuu nimenomaan hartsihapoista (Foran 2006).



Kuva 8. Lämpötilan ja kuiva-aineen vaikutus suovan liukoisuuteen. (Foran 2006) Kuvaa muokattu.

Suovan liukoisuuteen vaikuttaa mustalipeän kuiva-ainepitoisuus. Suovan liukoisuus vähenee lipeän kuiva-aineen noustessa noin 32 % asti, jonka jälkeen se ei juurikaan nouse kuiva-aineen lisääntyessä (Gullichsen et al. 1999, 84).

Kuvasta 8 nähdään, että suovan liukoisuus kasvaa, kun lämpötila kasvaa. Lämpötilan laskeminen ei kuitenkaan todennäköisesti auta suovanerotuksessa, koska lämpötilaa laskiessa viskositeetti kasvaa, ja suovan nousunopeus laskee (Foran 2006). Suovan liukoisuuteen vaadittavia olosuhteita on vaikea optimoida haihdutusprosessissa. Lämpötila määräytyy paljolti prosessiolosuhteiden mukaan, ja FA:RA-suhde määräytyy aina puun laadun mukaan. Jäännösalkalipitoisuuteen voidaan jonkin verran vaikuttaa muuttamalla keitto-olosuhteita. Myös lipeän kuiva-ainepitoisuuteen voidaan vaikuttaa hieman vahvistamalla lihamustalipeää vahvemmillä mustalipeällä. (Tikka 2008, 363–364.)

4.2. Suovan nousunopeus

Syöttölipeässä 20 % kuiva-aineella tyypillisiä suovan nousunopeuden arvoja ovat 4–8 m/h ja välilipeässä 30 % kuiva-aineella 2-3 m/h. (Tikka 2008, 368) Suovan nousunopeutta voidaan kuvata Stokesin yhtälöllä (2).

$$v = \frac{d_p^2 \Delta \rho g}{18 \mu} \quad (2)$$

jossa v on suovan nousunopeus [m/s], d_p on suopapartikkelin halkaisija [m], $\Delta \rho$ on tiheysero mustalipeän ja suovan välillä, g on putoamiskiihtyvyyys [m/s^2], μ on mustalipeän dynaaminen viskositeetti [Pas]. (Tikka 2008, 367–368.)

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden kasvattaminen lisää tiheyseroa $\Delta \rho$ mustalipeän ja suovan välillä, mutta toisaalta lisää myös viskositeettia μ , joten on olemassa tietty kuiva-ainepitoisuus, jolla suovan nousunopeus on suurin. Tämä ei ole sama kuiva-ainepitoisuus, jolla suovanerotus on tehokkainta. Tehokkuuteen vaikuttaa myös suovan liukoisuus mustalipeään, ja optimaalinen kuiva-aine löydetäänkin näiden kahden yhteisvaikutuksesta.

Stokesin yhtälö soveltuu kuitenkin melko huonosti käytännön kokeisiin, sillä lasketuissa nousunopeuden arvoissa esiintyy suurta heittoa silloinkin, kun alkuarvoja muutetaan vain hieman (Sirén 2007, 11). Stokesin yhtälö on liian yksinkertaistettu myös sen vuoksi, että suopahiukkaset ovat pyöreän sijaan usein monesta suopapartikkelista muodostuneita agglomeraatteja. Pyöreän hiukkasen tapausta voidaan kuitenkin käyttää vertailukohtana. (Sirén 2007, 47.)

Suopa nousee mustalipeässä tyypillisesti nopeudella 1,2–7,6 m/h, ja nousunopeus on suurimmillaan mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden ollessa 18–22 %. (Gullichsen et al. 1999,

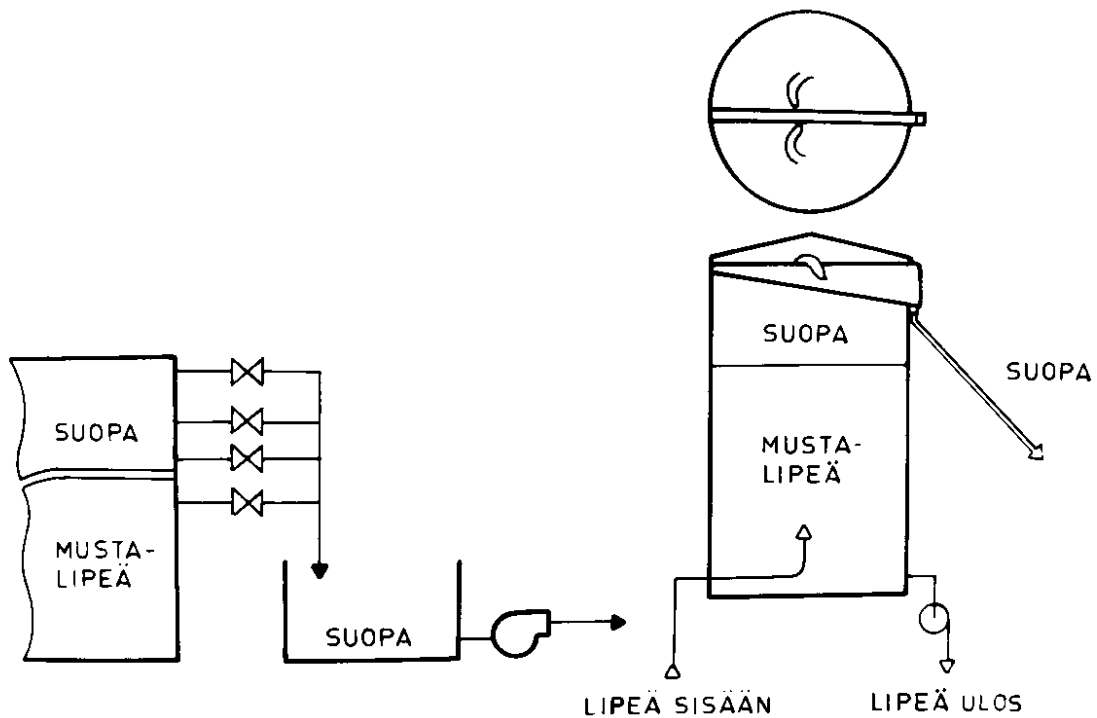
85) Suovan erotuksessa on kuitenkin otettava huomioon myös suovan liukoisuus mustalipeään (kuva 7), joten optimaalinen kuiva-ainepitoisuus suovan erotukseen on hieman tätä suurempi, noin 28–32 % (Tikka 2008, 367). Tätä suuremmissa kuiva-ainepitoisuuksissa mustalipeän viskositeetti nousee liian suureksi ja vaikeuttaa suovan erottumista, pienemmissä pitoisuuksissa mustalipeän liukoisuus kasvaa. Yleensä suurin osa suovasta erotetaan haihduttamon alkupäässä syöttölipeäsäiliöistä, joissa kuiva-ainepitoisuus on noin 18–21 %. Loppuosa erotetaan välilipeäsäiliöstä, jossa kuiva-ainepitoisuus on noin 30–35 %. (Tikka 2008, 370.)

4.3. Mustalipeäsäiliön muotoilu ja lipeän laskunopeus

Jotta suopa nousee säiliön pinnalle, on suovan nousunopeuden oltava suurempi kuin mustalipeän pumppaamisesta johtuva laskeutumisenopeus. Säiliöiden suunnittelulla ja muotoilulla voidaan vaikuttaa suovan säiliöerotuksen tehokkuuteen. Lisäksi säiliön pinta tulisi pitää mahdollisimman vakiona, ja säiliöön tuleva mustalipeävirta tasaisena.

Kun säiliön pinta pidetään tasaisena, pysyy suopapeti sopivan korkeana. Liian korkea suopapeti voi aiheuttaa suovan kulkeutumista mustalipeän joukkoon. Liian matala suopapeti voi aiheuttaa mustalipeän kulkeutumista suovan joukkoon suopaa kuorittaessa, sekä mahdollisesti myös suovan kulkeutumista mustalipeän lähtöyhteeseen. Jos säiliön pintaa nostetaan äkkinäisesti, suopapedin korkeus vähenee, ja kestää kauan ennen kuin suopapeti on muodostunut uudestaan. Tällöin suopaa päätyy häviöksi. Lämpötilamittaukset säiliön yläosassa ovat hyvä indikaattori suopapedin paksuudelle, sillä suopa on yleensä 10–15 astetta mustalipeää viileämpää. (Foran 2006.)

Suovanerotusta parannettaessa ensimmäiseksi tulisikin optimoida säiliöön syötettävän mustalipeän kuiva-aine, mustalipeän tuloyhteen paikka, pinnansäätö, sekä suopapedin paksuus. Näillä tekijöillä pitäisi päästä 0,6 % jäännösmäntyöljypitoisuuteen viipymäajan ollessa yli 3 tuntia. (Foran 2006.)

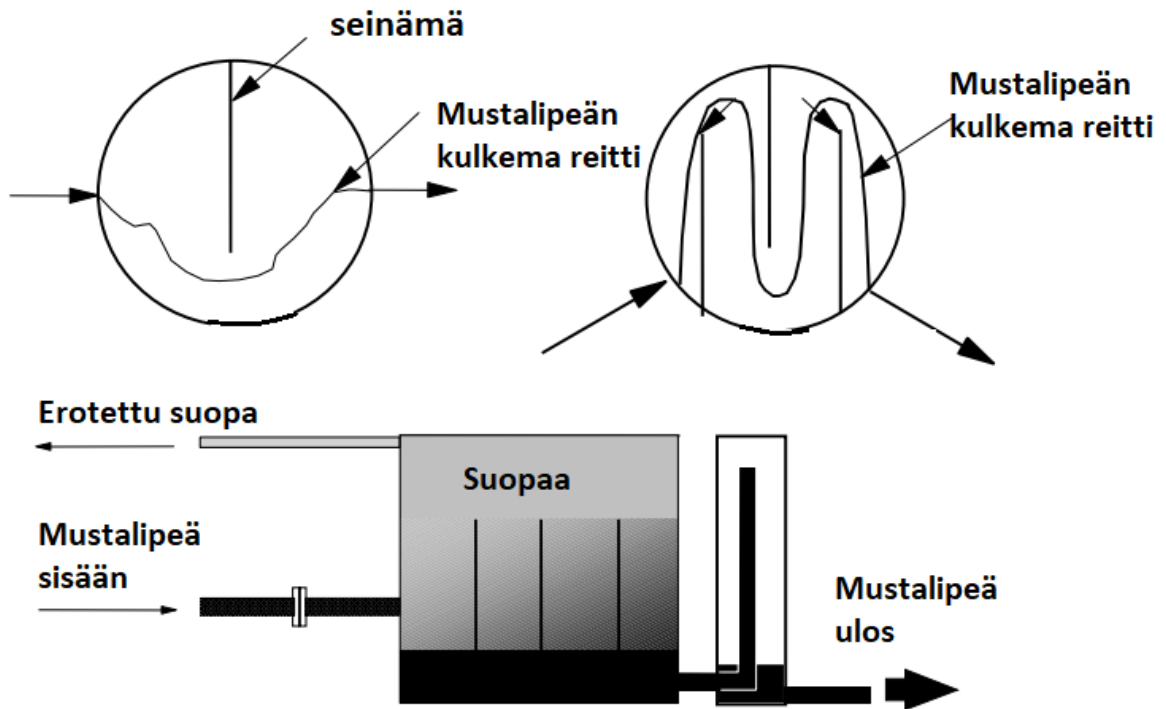


Kuva 9. Laiha- ja välilipeäsäiliöiden suovanerotuslaitteistoa. (Virkola 1983, 1338.)

Kuvassa 9 nähdään suovan säiliöerotuksen erilaisia tapoja. Vasemmanpuoleisessa säiliössä on säiliön kylkeen tehty suovanerotusputkia eri korkeuksille. Näin voidaan suopaa erottaa riippumatta sen hetkisestä ajomallista ja pinnankorkeudesta. Oikeanpuoleisessa säiliössä on hieman viistoksi rakennettu katto, joka mahdollistaa suovan ottamisen voidaan talteen kourua pitkin, kun suopaa pusketaan kattoa vasten säiliön pinnankorkeutta nostamalla (Virkola 1983, 1338). Säiliöltä erotetun suopavirran lämpötilaa seuraamalla voidaan päätellä, milloin kuoritun suovan mukana menee liian paljon mustalipeää, koska mustalipeän lämpötila on suovan lämpötilaa suurempi (Tikka 2008, 369). Tämän lämpötilamittauksen perusteella operaattori voi päätellä, milloin kaikki suopa on kuorittu säiliön pinnalta.

Mustalipeän virtaus tulisi olla mahdollisimman hallittu ja tasainen, koska tällöin suopa nousee paremmin säiliön pinnalle. Säiliöiden suunnittelussa pitää myös välttää mustalipeän ohivirtausta suoraan tuloyhteestä poistoyhteeseen, koska myös tällöin suopaa päätyy häviöksi (Gullichsen et al. 1999, 381). Tämän vuoksi tuloyhde sijoitetaan vastakkaiselle puolelle lähtöyhdeksi. Isommissa säiliöissä voi olla kolme tuloyhde, jotka on sijoitettu vastakkaisille puolille säiliötä. Tällöin lähtöyhde on säiliön keskellä. Säiliö ja lipeän reitti

säiliön läpi tulisi suunnitella siten, että saadaan mahdollisimman suuri viipymäaika. (Gullichsen et al, 1999, 87.)



Kuva 10. Suovan ohivirtausta estävät seinämärakenteet säiliön sisällä. (Foran 2006) Kuvaa muokattu.

Mustalipeän ohivirtausta voidaan ehkäistä myös erilaisella säiliön sisälle tehdyillä seinärakenteilla, jotka ohjaavat lipeän kulkua säiliössä (Tikka 2008, 369). Kuvassa 10 näkyy esimerkki seinärakenteista. Kuvan oikeanpuoleisessa säiliössä seinämärakenteet estävät tehokkaammin suovan ohivirtausta. Seinämärakenteita ei kuitenkaan saa olla liikaa, sillä lipeän reitin liika pyörteisyys huonontaa suovanerotusta (Foran 2006).

Seuraavalla yhtälöllä (3) voidaan kuvata mustalipeän tilavuusvirran ja säiliön pinta-alan suhteen vaikutusta mustalipeän laskunopeuteen, eli säiliön pintakuormaan (Tikka 2008, 369).

$$v_{ML} = \frac{q_v}{A} \quad (3)$$

$$v_s > v_{ML}$$

Jossa v_{ML} on mustalipeän laskunopeus, q_v on mustalipeän tilavuusvirta [m^3/s], A on säiliön pohjan pinta-ala [m^2] ja v_s on suovan nousunopeus [m/s]. Suovan nousunopeuden on oltava suurempi kuin lipeän laskunopeus, jotta suovan erotus on mahdollista.

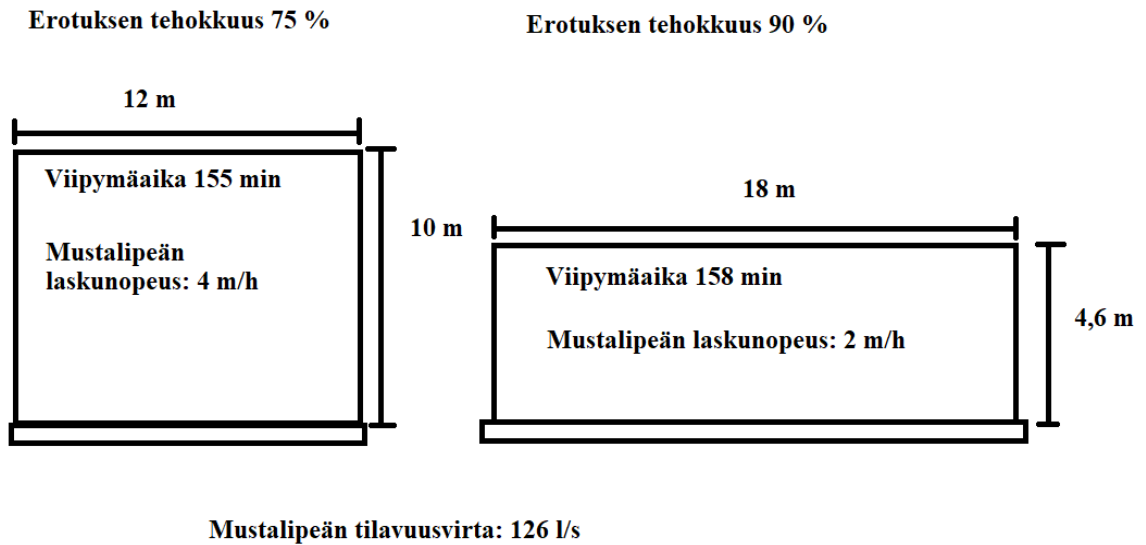
Toisaalta mustalipeän laskunopeus määritellään myös seuraavasti:

$$v_{ML} = \frac{h_{\text{säiliö}}}{t_{\text{res}}} \quad (4)$$

Missä $h_{\text{säiliö}}$ on pinta [m], jolla säiliötä ajetaan, ja t_{res} on viipymäaika [h].

Yhtälöitä 2 ja 3 käyttämällä voidaan tarkastella laskennallisesti säiliön pintakuormaa ja viipymäajan riittävyyttä, kun tiedetään tilavuusvirta, säiliön pohjan pinta-ala ja pinta, jolla säiliötä ajetaan. Säiliön pinnankorkeudesta ja mustalipeän tilavuusvirrasta voidaan laskennassa käyttää keskiarvoa tietyltä ajanjaksolta, kun halutaan arvioida suovanerotuksen tehokkuutta pidemmällä aikavälillä.

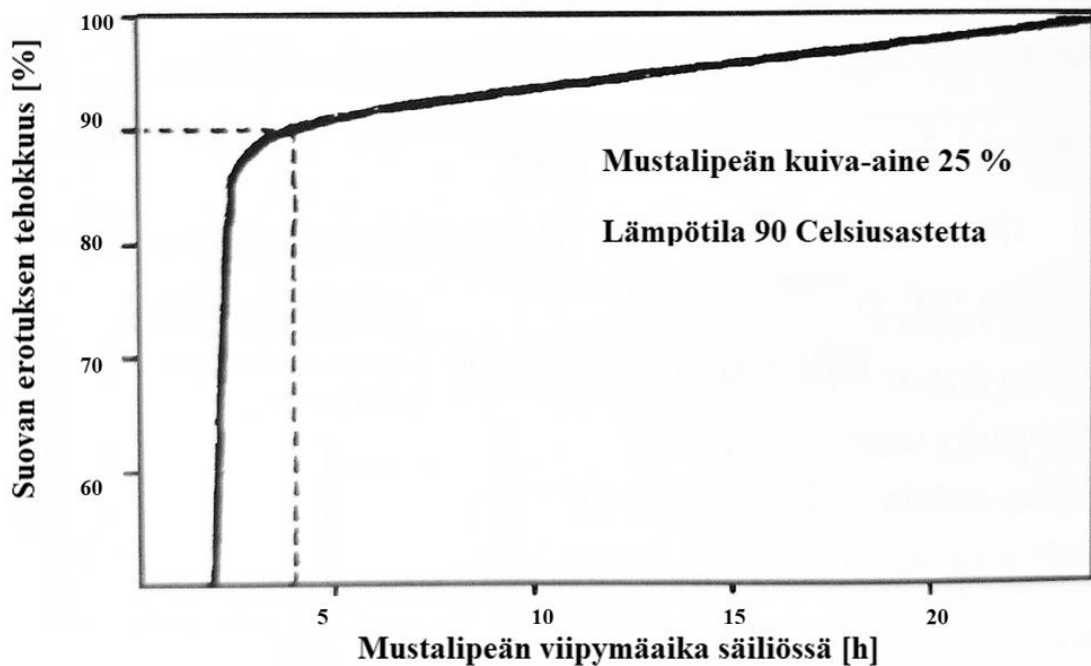
Mustalipeän laskunopeudelle, eli säiliön pintakuormalle suositeltuja arvoja ovat syöttölipeäsäiliölle korkeintaan 2,8 m/h ja välilipeäsäiliölle 2,2 m/h. (Räsänen 2003, 15) Säiliön pohjan pinta-alan tulisi siis olla mahdollisimman suuri suhteessa säiliön tilavuuteen. Kun lisäksi säiliöön menevän lipeän tilavuusvirta ei ole liian suuri, saadaan mahdollisimman pieni laskunopeus eli pintakuorma ja suuri viipymäaika. Tämä toteutuu huonosti silloin kun haihduttamon kapasiteettia on jälkikäteen lisätty, ja tästä seurauksena lipeän tilavuusvirta on kasvanut säiliöiden koon ja muodon pysyessä ennallaan.



Kuva 11. Säiliön pinta-alan vaikutus erotustehokkuuteen saman tilavuuden säiliöissä. (Tikka 2008, 369.) Kuvaa muokattu.

Kuvassa 11 nähdään, että mustalipeän laskunopeus nousee, kun säiliön pinta-ala kasvaa, ja tilavuus pysyy samana. Tämän näkee helposti yhtälöstä 3.

Viipymäaika on hyvä mittari suovanerotukselle, sitä tarkastellessa pitää ottaa huomioon lisäksi säiliön korkeus, sillä samalla viipymäajalla matalammassa säiliössä suopa erottuu paremmin. Tämän näkee helposti yhtälöstä 4. Suuntaa antavana esimerkkinä 80–90 °C lämpötilassa olevalle noin 30 % kuiva-aineen välilipeälle voidaan sanoa, että hyvään suovanerotukseen riittää minimiviipymisajaksi 0,5 tuntia säiliön korkeusmetriä kohden (Virkola 1983, 1157).



Kuva 12. Säiliön viipymisajan vaikutus suovanerotuksen tehokkuuteen 25 % kuiva-aineella 90 celsiusasteen lämpötilassa. (Gullichsen et al, 1999, 380.) Kuvaa muokattu.

Kuten kuvasta 12 nähdään, välilipeälle noin neljän tunnin viipymisaikaa voidaan pitää miniminä, kun pyritään hyvään suovanerotukseen (Gullichsen et al. 1999, 382) Välilipeäsäiliölle tyypillinen viipymisaika on seitsemän tuntia kuiva-ainepitoisuuden ollessa 25–30 %. Laihalipeälle tyypillinen viipymisaika on 12 tuntia kuiva-aineella 15–18 % (Gullichsen et al. 1999, 82). Kuvasta 12 nähdään, että suurin osa suovasta nousee säiliön pintaan melko nopeasti. Jäljelle jäänyt suopa taas nousee hyvin hitaasti suopapartikkelin koon ollessa pieni, tai ei nouse ollenkaan, kun se on liennut mustalipeään.

4.4. Muita tapoja suovanerotuksen tehostamiseen

Tarkasti hajotetulla paineilmalla voidaan tehostaa suovan nousua säiliön pinnalle, kun sitä syötetään säiliöön tulevaan mustalipeään (Tikka 2008, 369). Tämä perustuu siihen, että paineilma vähentää suopapartikkeleiden tiheyttä, jolloin niiden nousunopeus kasvaa. Useimmilla tehtailla tämä paineilma syötetään lipeää säiliöön syöttävän pumpun imupuolelle. Ilmavirran ollessa 7–7,5 l/m³ ei pumpun kavitointi yleensä muodostu

ongelmaksi. Mustalipeään voidaan myös lisätä erilaisia suovanerotuskemikaaleja. Näillä kemikaaleilla on saatu merkittäviä parannuksia suovanerotukseen. (Foran 2006.)

Suovan erotusta voidaan lähteen mukaan tehostaa myös varaamalla suopartikkeleita sähköisesti. Näin tekemällä on mahdollista edesauttaa pienimpien suopartikkeleiden agglomeroitumista suuremmiksi, jolloin ne nousevat paremmin pintaan (Foran 2006). Tällainen menetelmä on kuitenkin harvinainen, eikä tämän työn kannalta oleellinen.

4.5. Suopartikkelin koko ja rakenne

Kuten yhtälöstä Stokesin yhtälöstä (2) nähdään, suopartikkeleiden koko vaikuttaa suovan nousunopeuteen. Suuremmat partikkelit nousevat säiliön pintaan nopeammin. Mustalipeää pumpattaessa suopartikkeleiden rakenne muuttuu. Hiukkaset voivat hajota pienemmiksi pumppaamisen seurauksena, tai agglomeraatit hajota yksittäisiksi partikkeleiksi. Tällöin nousunopeus vähenee.

Hiukkaset voivat myös agglomeroitua lipeää pumpattaessa, eli juuttua kiinni toisiinsa, tai yhdistyä yhdeksi hiukkaseksi. Molemmissa tapauksissa nousunopeus kasvaa. Hiukkasten yhdistymistä tapahtuu säiliöissä viipymäajan ollessa riittävän pitkä. (Sirén 2007) Kun isommat suopartikkelit nousevat kohti säiliön pintaa, ne keräävät pienempiä partikkeleita mukaansa. Näin myös ne partikkelit, joiden nousunopeus on riittämätön, voivat suurempien hiukkasten mukana päätyä säiliön pinnalle.

Suomen Soodakattilayhdistyksen teettämässä raportissa tutkittiin suopartikkeleita mustalipeässä mikroskoopilla, ja hiukkaskoko vaihteli huomattavasti eri tehtaiden, sekä eri säiliöiden välillä. Esimerkiksi pumpattaessa pesulipeää pitkän linjan läpi ennen syöttölipeäsäiliötä tapahtui hyvin tehokkaasti suopartikkeleiden hajoamista pienemmiksi. (Sirén 2007.)

4.6. Mustalipeän kuitupitoisuuden vaikutus suovan säiliöerotukseen

Liian suuri kuitujen määrä mustalipeässä haittaa suovan erottumista (Tikka 2008, 367). Suopartikkelit takertuvat kuituihin, jolloin partikkelista tulee tiheämpi, eikä se nouse säiliön pintaan. Mustalipeän suuri kuitupitoisuus lisää myös kuitujen määrää erotetussa suovassa. Tämä heikentää raakasuovan laatua, ja aiheuttaa häviöitä mäntyöljykeittämöllä. (Räsänen 2003, 15.) Suovanerotuksen tehokkuuden lisäksi kuitujen kasaantumisella on vaikutusta haihduttimien likaantumiseen, kuten mainittiin aiemmin luvussa 2.1.

5. Johtopäätökset

Suopa mustalipeässä aiheuttaa monia ei-toivottuja seurauksia. Mustalipeän suopapitoisuudella suovan säiliöerotuksen jälkeen on merkittävä vaikutus erityisesti haihdutinyksiköiden likaantumiseen ja haihdutustehoon. Tämä on usein tärkein syy suovan erottamisen tärkeyteen. Suovasta voidaan valmistaa mäntyöljyä, jonka myynnistä saadaan tehtaalte tuloja. Mäntyöljystä voidaan valmistaa monia tuotteita, ja sillä voidaan korvata fossiilisista valmistettuja polttoaineita. Mäntyöljyn myynnin osuus tehtaän kokonaistuloista on noin 1–1,5 %. Mäntyöljyn jatkojalostetta pikiöljyä voidaan hyödyntää myös samalla tehtaalla meesauunin polttoaineena.

Suovan säiliöerotukseen vaikuttavia päämuuttujia ovat suovan liukoisuus mustalipeään, säiliöiden muotoilu ja suovan nousunopeus. Suovan nousunopeuteen vaikuttaa pääasiassa mustalipeän ja suovan välinen tiheysero, suopartikkelin koko ja mustalipeän viskositeetti. Säiliöiden suunnittelulla ja muotoilulla voidaan lisäksi vaikuttaa suovan säiliöerotuksen tehokkuuteen, keinot tähän ovat kuitenkin rajalliset tehtaän rakennusvaiheen jälkeen. Suovanerotusta parannettaessa ensimmäiseksi tulisi optimoida säiliöön syötettävän mustalipeän kuiva-aine, mustalipeän tuloyhteen paikka, suovattavan säiliön pinnansäätö, sekä suopapedin paksuus. Kun lisäksi säiliön viipymäaika on yli 3 tuntia, pitäisi näillä toimilla päästä 0,6 % jäännössuopapitoisuuteen.

Suovan liukoisuuteen vaikuttaa mustalipeän kuiva-ainepitoisuus. Suovan liukoisuus vähenee lipeän kuiva-aineen noustessa noin 32 % asti, jonka jälkeen se ei juurikaan nouse kuiva-aineen lisääntyessä. Vastaavasti suovan nousunopeus on suurimmillaan mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden ollessa 18–22 %. Optimaalinen kuiva-ainepitoisuus suovan erotukseen on muun muassa näiden kahden tekijän yhteisvaikutuksesta noin 28–32 %. Syöttölipeäsäiliöiden kuiva-aine on tyypillisesti reilusti tämän alle. Suovanerotusta

syöttölipensäiliöissä voidaan siis yrittää parantaa vahvistamalla syöttölipettä vahvemalla lipellä.

Suovan liukoisuus kasvaa, kun lämpötila kasvaa. Lämpötilan laskeminen ei kuitenkaan todennäköisesti auta suovanerotuksessa, koska lämpötilaa laskiessa mustalipeän viskositeetti kasvaa, ja suovan nousunopeus laskee. Suovan liukoisuuteen vaadittavia olosuhteita on vaikea optimoida haihdutusprosessissa. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuteen voidaan vaikuttaa hieman vahvistamalla laihamustalipeää vahvemalla mustalipeällä. Näin voidaan parantaa suovan erotusta esimerkiksi syöttölipensäiliöissä. Rajoittavana tekijänä tässä on haihdutinyksiköiden tehokas toiminta.

Jotta suopa nousee säiliön pinnalle, on suovan nousunopeuden oltava suurempi kuin mustalipeän pumppaamisesta johtuva laskeutumisenopeus. Säiliöiden suunnittelulla ja muotoilulla voidaan vaikuttaa suovan säiliöerotuksen tehokkuuteen. Säiliön pohjan pinta-alan tulisi siis olla mahdollisimman suuri suhteessa lipeän tilavuusvirtaan, jotta saadaan mahdollisimman pieni laskunopeus eli pintakuorma ja suuri viipymäaika. Tämä toteutuu huonosti silloin kun haihduttamon kapasiteettia on jälkikäteen lisätty, ja tästä seurauksena lipeän tilavuusvirta on kasvanut säiliöiden koon pysyessä samana.

Lähteet

Aro, T. Fatehi, P. 2017. Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities. Separation and purification technology, 469–480. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.027>

Clay, David T. 2008. Evaporator Fouling. TAPPI Kraft Recovery Operations Course. Saatavissa <https://www.tappi.org/content/events/08kros/handouts/3-3.pdf>

Foran, C. Douglas. 2006. Tall Oil Soap Recovery. TAPPI Kraft Recovery Operations Course. Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/3-7.pdf>

Gullichsen, J., Fogelholm, C.-J (eds.). 1999. Papermaking science and technology. Book 6, B, Chemical pulping. Fapet, Helsinki.

KnowPulp 19.0. Prowledge Oy. [sellunvalmistuksen oppimisympäristö] [Verkkoaineisto. Viitattu 2021.] Saatavilla rajoitetusti.

Niemelä, Klaus. 2007. Sulfate soap separation and acidulation 30.10.2007 - Part 2. Composition of the soaps. (16A0913-E0091) Suomen Soodakattilayhdistys ry (Finnish Recovery Boiler Committee). Report 10/2007 (16A0913-E0091).

Riistama, K., Laitinen, J., Vuori, M. 2003. Suomen kemianteollisuus, 5th ed. Chemas, Helsinki.

Räsänen, Urho. 2003. Suopaselvitys. Suomen Soodakattilayhdistys ry (Finnish Recovery Boiler Committee). Report 5/2003 (16A0913-E0050).

Sirén, Kurt. 2007. Mechanisms and rate of soap separation 30.10.2007. (16A0913-E0092) Suomen Soodakattilayhdistys ry (Finnish Recovery Boiler Committee). Report 11/2007 (16A0913-E0092).

Tikka, P. 2008. Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy, 2nd ed. Finnish Paper Engineers' Association, Helsinki.

Virkola, N.-E. 1983. Puumassan valmistus. Osa 2, 2nd ed. Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, Helsinki.