

Netta Herranen

HAPPIVAIHEEN JA PESUN UUDET MITTAUKSET ERÄÄLLÄ KUITULIN- JALLA

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Biotuotetekniikka

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimi	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Netta Herranen
Työn nimi	Happivaiheen ja pesun uudet mittaukset eräällä kuitulinjalla
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy, Kuitulaboratorio
Vuosi	2024
Sivut	65 sivua
Työn ohjaajat	Ritva Käyhkö (Xamk), Riku Kopra ja Jari Käyhkö (Kuitulaboratorio)

TIIVISTELMÄ

Työssä on dokumentoitu erään sellutehtaan kuitulinjan happidelignifioinnin ja sen ympärillä olevien DD-pesureiden uusien mittausmenetelmien kehitys, asennus ja käyttöönotto. Työssä on myös havainnollistettu, miten mittauksia on hyödynnetty ja tullaan hyödyntämään prosessitutkimuksissa kuitulinjalla.

Mittausten ja työn mahdollistamiseksi tarvittiin tehdasinvestointeja, jotka toteutettiin työn alkuvaiheessa yhdessä tehtaan ja laitetoimittajan kanssa.

Kuitulinjalla mitattiin kaasukuplia Pixactin ja Kuitulaboratorion yhteistyönä kehitetyllä kuplamonitorointijärjestelmällä happidelignifiointireaktoreiden syötöistä, molempien happireaktoreiden yläpäästä sekä DD-pesureiden syötöistä. Lisäksi pesureilta ja reaktoreiden syötöistä mitattiin liuenneiden aineiden pitoisuutta Vaisalan prosessirefraktometreilla. Refraktometrit kalibroitiin perustuen kuitulaboratoriolla analysoituihin prosessinäytteisiin. Lämpötila- ja virtausmittaukset tehtiin prosessiin lisättyllä Echowise-anturilla. Kaasupitoisuusmittareilla saatiin mitattua happi-, hiilidioksidi- ja hiilimonoksidipitoisuuksia. Kyseessä oleva mittausdata ja tehtaalta saatu prosessidata yhdistettiin ja analysoitiin Wedge-ohjelmalla.

Tutkimusten myötä parannettiin perusymmärrystä erityisesti happivaiheen toiminnasta, minkä myötä tehtaalla tehtiin investointeja kaasunpoistojen parantamiseksi sekä valmistelleille jäi investointeja reaktoreiden hapensyötön parantamiseksi. Lisäksi tehtaalla on tehty ja meneillään erinäisiä prosessia parantavia ajotapamuutoksia lähinnä happivaiheen ympärillä.

Tutkimukset jatkuvat eri muodoissa pääasiassa perustuen nyt tehtyihin prosessiparannuksiin sekä tehtyihin laajoihin mittausinstallaatioihin. Jatkotutkimuksissa tavoitteena on kehittää edelleen eri mittausmekaniikoita sekä parantaa perusymmärrystä prosessin eri vaiheiden toiminnasta. Nämä luovat geneerisiä mahdollisuuksia saavuttaa merkittäviä säästöjä tehtaiden energian, materiaalien ja veden kulutuksessa. Selkeitä mahdollisuuksia on esimerkiksi vähentää jätevesilaitosten kuormitusta, haihdutuksen energiankulutusta sekä höyryn kulutusta kuitulinjalla ja näin muun muassa lisätä tehtaiden sähkön tuotantoa.

Asiasanat: happidelignifiointi, online-mittaukset, opinnäytetyö, raportointi, ruskean massan pesu

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Netta Herranen
Thesis title	New measurements of oxygen phase and washing on a fiber line
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences, FiberLaboratory
Time	2024
Pages	65 pages
Supervisors	Ritva Käyhkö (Xamk), Riku Kopra and Jari Käyhkö (FiberLaboratory)

ABSTRACT

This study presents the documentation of the development, installation, and introduction of new measurement methods for the oxygen delignification of a fiber line and the surrounding DD-scrubbers at a pulp mill. This thesis also describes the present and future use of the measurements in process research on the fiber line.

The study and measurements required factory investments to be carried out at the outset of the study in cooperation with the factory and equipment supplier.

Gas bubbles were measured on the fiber line with a bubble monitoring system developed in collaboration between Pixact and the FiberLaboratory for measuring oxygen delignification reactor feeds, the upper end of both oxygen reactors, and DD-scrubber feeds. In addition, the concentration of dissolved substances was measured from scrubbers and reactor feeds by Vaisala process refractometers. Temperature and flow measurements were taken using an Echowise sensor added to the process. Gas concentration meters were used to measure oxygen, carbon dioxide, and carbon monoxide concentrations. Both the measurement data and the process data received from the factory were combined and analyzed using the Wedge program.

The research gave better understanding especially of the operation of the oxygen phase, which encouraged the factory to invest in improving gas removals and to plan for investments to improve the reactors' oxygen supply. In addition, the plant is actively making various changes in the driving style to improve the process, mainly around the oxygen phase.

The research continues in various forms, mainly based on the completed process improvements and extensive measurement installations. In further research, the goal is to develop different measurement techniques and to improve the basic understanding of the operation of the different stages of the process. These create generic opportunities to significantly save energy, material, and water consumption in factories. There are clear possibilities, for example, to reduce the load on wastewater plants, the energy consumption of evaporation, and the consumption of steam on the fiber line, and thus, among other things, increase the production of electricity in factories.

Keywords: oxygen delignification, online measurements, thesis, reporting, brown mass washing

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

1	JOHDANTO	8
2	RUSKEAN MASSAN PESU	9
2.1	Pesutehokkuuden mittaukset.....	10
2.2	Vaahdonestoaineiden käyttö kuitulinjalla	15
3	HAPPIDELIGNIFIOINTI.....	15
3.1	Kemiallinen reaktio	18
3.2	Hapen aineensiirto.....	18
3.3	Happivaiheen mallinnus.....	21
4	MITTAUSLAITTEET	22
4.1	Kuplakuvauskamera	23
4.2	Kaasupitoisuusmittarit.....	24
4.2.1	Testo 350 -savukaasuanalysointilaite	24
4.2.2	Geotech G110	25
4.3	Prosessirefraktometrit.....	26
4.4	Echowise	28
5	WEDGE-JÄRJESTELMÄ.....	30
	KOKEELLINEN OSUUS	31
6	KUPLAKUVAUKSET HAPPIVAIHEESSA	32
6.1	Happireaktoreiden syöttö.....	33
6.2	Happireaktoreiden yläpäät.....	34
7	KAASUNPOISTOJEN LÄMPÖTILAMITTAUKSET	37
8	TÄRINÄMITTAUS REAKTORILLA 1	39
9	HAPPI- JA HIILIMONOKSIDIMITTAUKSET	40
9.1	Happimittaukset.....	40
9.2	Reaktoreiden kaasunpoistojen jatkuvatoiminen mittaus	43

9.3	Hiilimonoksidimittaukset	44
10	ECHOWISE-KAASUOSUUS	45
11	KUPLAMITTAUKSET DD-PESUREILLA.....	48
12	PROSESSIREFRAKTOMETRIT.....	50
13	MUUT MITTAUKSET.....	55
14	JOHTOPÄÄTÖKSET	55
	LÄHTEET.....	58
	KUVALUETTELO	62

Symboliluettelo

A	hapen aineensiirtokertoimen korjauskerroin	[-]
A*	kaasukuplan pinta-ala	[m ²]
C _{O2}	liuennan hapen pitoisuus	[g/l]
C _{O2} *	happisaturaatiovakio, laskettuna Henrin lain perusteella	[g/l]
d _b	kuplan halkaisija	[m]
D _O ²	hapen diffuusiovakio	[m ² /s]
D _O ^{2*}	hapen diffuusionopeus	[5,7 * 10 ⁻⁹ m ² /s]
ΔK	kappareduktio	[%]
K	kappaluku	[-]
k _L ^a	hapen aineensiirtokerroin	[1/s]
k _L ^{a*}	massan siirtonopeus	[1/s]
L ₀	pesemätön kuituvirtamassa	[m ³ /ADt]
L ₁	pesty kuituvirta	[m ³ /ADt]
L _{0, st}	standardoitu syöttövirta	[m ³ /BDt]
L _{1, st}	standardoitu poistovirtaus pesurilta	[m ³ /BDt]
N	hapen aineensiirto	[g/l]
N+	ionin vaihdon vastaioni	[-]
OH -	hydroksidi-ionien konsentraatio	[mol/l]
ppb	parts per billion	[-]
ppm	parts per million	[-]
s	hapen diffundoitumisetäisyys	[m]
Δt	ajan muutos	[s]
t	aika	[s]
T	lämpötila	[K]
v	järjestelmän tilavuus	[m ³]
V ₁	suodosvirta	[m ³ /ADt]
V ₂	pesunestevirta	[m ³ /ADt]
Vol.-%	tilavuusprosentti	[%]
x	liuennan aineiden pitoisuudet kuitumassassa	[m ³ /ADt]
x ₀	liuennan aineen massaosuus L ₀ :ssa	[m ³ /BDt]
x _{0, st}	liuennan aineen osuus L _{0, st} :ssa	[m ³ /BDt]
x ₁	liuennan aineen osuus L ₁ :ssa	[m ³ /BDt]
x _{1, st}	liuennan aineen osuus L _{1, st} :ssa	[m ³ /BDt]
X _g	kaasun tilavuusosuus	[%]
y	liuennan aineiden pitoisuudet nestevirrassa	[m ³ /ADt]
y ₁	liuennan aineen osuus V ₁ :nä (todellinen suodosvirtaus)	[m ³ /BDt]
y ₂	liuennan aineen osuus V ₂ :na (pesunesteen virtaus)	[m ³ /BDt]
Y _{C0, st}	pesusaanto standardoidulla syöttösakeudella	[m ³ /BDt]

Käsitteet ja määritelmät

ADt	(eng. air dry tonne of pulp) eli ilma-kuiva sellutonni (sisältäen il-mankosteuden).
AOX	(eng. adsorbable organic halogen) eli adsorboituvat orgaaniset halogenidit. Halogeenimäärän mitta, menettely mittaa klooria, bromia ja jodia, mutta ei fluoripitoisuuksia.
BDt	(eng. bone-dry ton) eli täysin kuiva sellutonni, uunikuiva
BOD	Biologinen hapenkulutus (eng. Biological Oxygen Demand). Suure kuvaa kuluvan hapen määrää bakteerien hajottaessa or-gaanista ainesta jätevedestä.
COD	Kemiallinen hapenkulutus (eng. Chemical Oxygen Demand). Suure kuvaa kuluvan hapen määrää kemiallisen hapettimen hajot-taessa orgaanista ainesta jätevedestä.
DF	(eng. dilution factor) laimennuskerroin, käytetyn pesuveden yli-määrä
DR	(eng. displacement ratio) eli syrjäytyssuhde
E	E-arvo, pesutehokkuuskerroin (Norden-luku)
Kappa	Indikaattori, joka kuvaa sellumassan ligniinipitoisuutta/valkaista-vuutta. Eräs kappaluvun määrittämisen standardi on ISO 302:2015.
nD	Taitekerroin. Taitekerroinluku kertoo siitä, kuinka voimakkaasti linssi taittaa valoa.
R	pesuvesikerroin
TDS	(eng. total dissolved solids) eli liuenneiden aineiden määrän para-metri pesutehokkuuden mittauksessa.
Y	Pesusaanto. Pesusaanto Y ilmaisee suodoksen mukana poistu-vien liuenneiden aineiden suhdetta pesemättömän sellun mukana tulleisiin aineisiin.

1 JOHDANTO

Kuitulaboratoriolla on jo useiden vuosien ajan tehty prosessitutkimuksia erään sellutuotetehtaan happidelignifioinnissa sekä ruskean massan pesussa pääasiassa kehittämällä ja hyödyntämällä uusia jatkuvatoimisia mittauksia. Tutkimusten tavoitteena oli kehittää happidelignifiointimallinnusta sekä myös hyödyntää mallinnusta kyseisen prosessin toiminnan ymmärtämiseen. Tutkimukset alkoivat hapen kuplakoon määrittämisellä reaktoreiden syötössä. Pääasiallinen tavoite oli saada tietoa, onko kyseessä olevalla linjalla koivumassalla hapen kuplakoko niin iso, että tämä hidastaa delignifiointia. Kyseisellä linjalla tuotetaan koivu- ja havumassaa, jolloin prosessissa tapahtuu paljon muutoksia. Siten tavoitteena oli myös yleisestikin kerätä mahdollisimman paljon tietoa happidispersiosta ja sen merkityksestä prosessissa. Vähitellen tehtaalta löytyi erinäisiä kaasuihin liittyviä potentiaalisia kehityskohteita, jotka johtivat tutkimusten laajentamiseen. Muun muassa ensimmäisen reaktorin jäännöskaasut aiheuttavat tärinäongelmia ja happivaiheen jäännöskaasut aiheuttivat yleisestikin ongelmia happivaiheen jälkeisessä prosessissa ja erityisesti pesussa. Nämä asettavat rajoituksia happivaiheen ajotapoihin. Yhtenä esimerkkinä on, että happivaiheen jättölämpötilaa joudutaan manuaalisesti säätämään niin, että se on hieman yli 100 °C, jolloin veden höyrystyminen purkaimen jälkeen poistaa massasta jäännöskaasuja. Säätöön käytetään välipainehöyryä ja jos höyry voitaisiin käyttää sähköntuotantoon, niin tämä lisäisi tuotantotehoa noin kaksi megawattia sekä vähentäisi kattilaveden kulutusta.

Tässä opinnäytetyössä on dokumentoitu happidelignifioinnissa sekä ruskean massan pesussa tehtyjen tutkimusten mittausten kehitys, asennus ja käyttöönotto. Opinnäytetyöhön on myös koostettu, kuinka näitä mittauksia on hyödynnetty ja tullaan hyödyntämään kyseisissä prosessitutkimuksissa. Opinnäytetyöhön kuului mittausten kehityksen ja käyttöönoton lisäksi mittalaitteiden hyödyntämistä prosessiseurannassa ja tehdaskoeajoissa. Käyttöön otettuja mittauksia olivat kupla- ja liuenneen kuiva-aineen mittaukset happivaiheessa ja pesureilla, lämpötila, happi- ja häkämittaukset happidelignifioinnin kaasunpoistoissa sekä kaasuosuusmittaukset pesureilla. Työhön liittyi myös tutkimusten tulosten perusteella tehtaan tekemien kaasunpoistoinvestointien toiminnan parantaminen sekä näiden toiminnan ja vaikutusten arviointi.

Työn kokeellinen osuus koostui tehdaskoeajoista sekä laboratoriokokeista. Ensimmäisessä vaiheessa keskityttiin tehdaskoeajoihin kaksivaiheisen happidelignifioinnin ympärillä, joista saatiin kerättyä ja analysoitua reaaliaikaista tulosdataa DD-pesureilta ja happireaktoreilta yhdessä tehdasdatan kanssa. Toisessa vaiheessa tehtiin asennussuunnitelmat prosessirefraktometreistä reaaliaikaiseen pesutuloksen mittaukseen ruskean massan pesemön keittimen ja happivaiheen jälkeisille DD-pesureille. Asennukset toteutettiin yhteistyössä tehtaan sekä mittalaite- ja pesulaitetoimittajan kanssa. Mittalaitteet kalibroitiin ottamalla kyseessä olevista paikoista näytteitä ja näytteistä analysoitiin laboratoriossa liuennut kuiva-aine.

2 RUSKEAN MASSAN PESU

Ruskean massan pesu on keiton ja valkaisuun välinen pesuvaihe massan puhdistamiseksi. Pesun pääasiallisena tarkoituksena on erottaa ja ottaa talteen sellusta liuennut jäteliemi ja saada massa riittävän puhtaana seuraaviin prosesseihin. Jäteliemi sisältää mahdollisimman paljon liuennutta puuainesta ja jäljelle jääneitä keittokemikaaleja. Pesu pitäisi suorittaa käyttämällä mahdollisimman vähän pesunestettä, koska se suurentaa haihduttamoon menevää kuiva-ainepitoisuutta. Toisaalta massa on kuitenkin saatava riittävän puhtaana happivaiheeseen ja valkaisuun. Tämän takia ruskean massan pesu onkin optimointitehtävä veden käytön ja puhtauden suhteen. Siksi on hyvä, jos tehtaalla on mahdollisemman paljon reaaliaikaisia mittauksia. (KnowPulp 2023.)

Ruskean massan pesun optimoinnin avulla voidaan prosessoida ja nostaa mustalipeän kiintoainepitoisuutta, joka menee haihduttamon kautta soodakattilalle poltettavaksi ja siten energian tuotantoon. Kuva 1 esittää ruskeaa massaa pesemättömänä ja pestynä sekä pesussa erotettua mustalipeää. (KnowPulp 2023.)

Mustalipeä erotetaan massasta sellun pesussa



Kuva 1. Havainnekuva ruskean massan pesusta (Knowpulp 2023)

Hyvän pesun tavoitteena on ottaa mahdollisimman paljon talteen liuennutta orgaanista ainetta energiantuotantoon ja epäorgaanisia keittokemikaaleja regenerointiin, jolloin kemikaalihävikki pienenee kemikaalikierrosten edetessä. Mitä paremmin massa pestään, sitä vähemmän kemikaaleja tarvitaan valkaisuissa. Ruskean massan pesu vaikuttaa tärkeänä prosessina koko sellutehtaan kannattavuuteen sekä tehtaan ympäristökuormaan. (ForestBioFacts 2023.)

Tutkittavana olevassa sellutehtaassa pesureina käytetään kaksivaiheisia Drum-Displacer-pesureita eli DD-pesureita, joiden toimintaperiaate on syrjäytyspesu vastavirtaperiaatteella. Syrjäytyspesussa on ajatuksena, että massaa puhtaampi pesuneste johdetaan massasulpun läpi, jolloin massasta syrjäytyy likaisempi neste. Tästä saatava suodos johdetaan syrjäytysnesteeksi edelliseen likaisempaan vaiheeseen. Syrjäytyspesussa käytetään viimeisimmässä pesuvyöhykkeessä mahdollisimman puhdasta prosessinestettä. Viimeisen imukohdan jälkeen massakakku irrotetaan rummusta paineilmalla ja johdetaan purkuruuvilla seuraavaan prosessivaiheeseen. (Seppälä ym. 2007, 101–105.)

2.1 Pesutehokkuuden mittaukset

Pesuhäviö on keiton ja happidelignifoinnista peräisin olevien yhdisteiden määrä, joka on jäljellä massasulpussa. Sitä voidaan vähentää käyttämällä paljon pesunestettä. Pesun tehokkuutta taas ilmaistaan pesutuloksen suhteena

käytettyyn vesimäärään. (Kopra 2004, 18, 25.) Onnistunut ruskean massan pesu on edellytys sellutehtaan taloudelliselle toiminnalle ja sillä vaikutetaan myös jätevesikuormaan. Tehokkaat pesuprosessit ja hyvin suunniteltu järjestelmä auttavat vähentämään pesuhäviötä ja tehostavat tuotantoprosessia. Pesuhäviö lisää myös jätevesien kemiallista ja biologista hapenkulutusta eli COD- ja BOD-kuormitusta. (Kopra 2023, 146.)

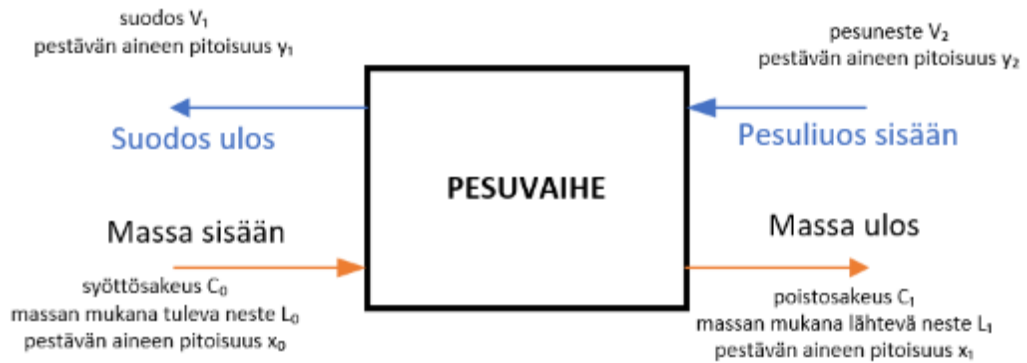
Pesuhäviötä on ennen mitattu natriumin määränä ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{Adt}$). Menetelmä ei kuitenkaan huomioi ligniiniä tai muita orgaanisia aineita massassa, vaan määrittelyksellä on saatu vain selville lähinnä keittokemikaalien häviön suuruus. Tämä menetelmä on vanhentunut vuonna 2003. (Kopra 2015, 22.)

Happivaiheiden yleistyttyä alettiin seuraamaan enemmän orgaanisen pesuhäviön osuutta ja siirryttiin COD:n mittaamiseen. COD tarkoittaa kemiallista hapenkulutusta, joka kuvaa liuoksessa olevan orgaanisen aineen määrää. Määrittely tehdään laboratoriokokeella standardin ISO 15705:2002(E) mukaisesti. Se kuvaa hyvin ympäristöä kuormittavan ja valkaisukemikaaleja kuluttavan yhdisteiden määrää. Sen heikkoutena on mittauksen huono toistettavuus. COD koetuloksiin vaikuttaa myös suodattaminen, pH, lämpötila sekä sakeus. Se on riippuvainen näytteenoton ja analyysin teon välisestä varastointiajasta. COD-pesuhäviö ilmoitetaan usein yksikössä kg COD/t abs. kuivaa sellua. (Dahl ym. 2002; Karjalainen 2008, 20.)

Pesuhäviö voidaan ilmaista myös liuenneena kuiva-aineena, jonka yksikkönä käytetään prosenttia kuiva-ainetta nesteessä. Tämä menetelmä on edullinen, yksinkertainen ja helposti toistettavissa. Se määritetään standardin ISO 638-1:2022 mukaan. Punnittu suodosmäärä haihdutetaan 105 celsiusasteessa lämpökaapissa kuivaksi ja jäljellä oleva määrä punnitaan. Liunneen kuiva-aineen pitoisuus voidaan mitata jatkuvatoimisesti liuoksen taitekertoimen mittaamiseen perustuvalla prosessirefraktometrillä, jonka toiminta esitellään luvussa 4.4. (Karjalainen 2008, 20; Kopra 2004, 29.)

Pesulaitteiston tehokkuutta pystytään mittaamaan erilaisilla tunnusluvuilla. Näiden tarkoitus on saada laskettua erilaisten pesulaitteistojen tehokkuus poistaa massasta ja pesunesteestä epäpuhtauksia. Pesutehokkuuteen vaikuttavia te-

kijöitä ovat laimennuskerroin, syöttösakeus, massan ilmapitoisuus, massakakun muodostus pesutasolle, massakakun pinnalle pesunesteen muodostuminen ja pesurin poistosakeus. Kuvassa 2 on esitetty pesuvaiheen neste- ja kiintoainevirrat. Pesuvaihe voi olla joko yksi pesuri tai koko pesulinja. (Karjalainen 2008, 26; KnowPulp 2024.)



Kuva 2. Kaaviokuva pesuvaiheesta (mukaillen Kovasin 2002)

Pesurin toimintaa voidaan seurata reaaliaikaisesti ja optimoida mittaamalla sen neljästä sisääntulosta kolmen tai kaikkien liuenneiden aineiden pitoisuudet, massojen sakeudet ja pesunestemäärät. Näiden tietojen avulla voidaan tehdä erilaisia pesutehokkuuslaskelmia. (Kopra 2023, 132.)

Pesutehokkuuksia laskettaessa on erityisen tärkeää, että kaikkien pestävien aineiden pitoisuuksien arvot ovat samoissa yksiköissä massatonna kohden, kuten m^3/BDt tai m^3/ADt . (Karjalainen 2008, 22.)

Pesuvaiheen neste- ja ainetaseet lasketaan seuraavasti:

$$L_0 + V_2 = L_1 + V_1 \quad (1)$$

jossa	L_0	pesemätön kuituvirtamassa
	L_1	pesty kuituvirta
	V_2	pesunestevirta
	V_1	suodosvirta

Laimennuskerroin DF (Dilution Factor) on suhde, joka kuvaa kuinka paljon vettä lisätään tai poistetaan massasta pesun aikana. DF:n arvo voi olla negatiivinen, nolla tai positiivinen. DF:n ollessa positiivinen nestettä lisätään enem-

män kuin massan mukana poistuu pesurilta. Korkealla DF:lla saadaan puh-
taampaa massaa, mutta toisaalta haihdutuskustannukset nousevat. Optimaali-
nen laimennuskerroin on 1,5–3,5. (Sellukurssi 2017.)

DF voidaan laskea seuraavasti:

$$DF = V_2 - L_1 = V_1 - L_0 \quad (2)$$

jossa	V_1	pesusuodoksen virtaus ulos
	V_2	pesusuodoksen virtaus sisään
	L_0	pesemättömän massan mukana olevan nesteen määrä
	L_1	poistomassan mukana olevan nesteen määrä

Pesuvesikerroin R tarkoittaa pesuvesimäärän suhdetta massan mukana pois-
tuvan veden määrään (Karjalainen 2008, 23), mikä lasketaan seuraavasti:

$$R = V_2/L_1 \quad (3)$$

Syrjäytyssuhde DR (Displacement Ratio) on pesussa poistettujen epäpuh-
tauksien määrä. Se ei ota huomioon pesunestemäärää tai laimennuskerrointa.
(Karjalainen 2008, 21.) Se lasketaan seuraavasti:

$$DR = (x_0 - x_1)/(x_0 - y_1) \quad (4)$$

jossa	x_0	liuennneiden aineiden pitoisuudet syötön kuitumas- sassa
	x_1	liuennneiden aineiden pitoisuudet poistuvassa kuitu- massassa
	y_1	liuennneiden aineiden pitoisuudet nestevirrassa

Pesun tehokkuuskerroin E-arvo (Norden-luku) on yleisimmin käytetty suure.
E-arvo kertoo sarjaan kytkettyjen ideaalisten laimennus-sekoitusvaiheen pe-
surin tai pesemön lukumäärän. (Karjalainen 2008, 22.) E-arvo lasketaan seu-
raavasti:

$$E = \ln \left(\frac{L_0(x_0 - y_1)}{L_1(x_1 - y_2)} \right) / \ln \left(\frac{V_2}{L_1} \right) \quad (5)$$

Pesureiden reaaliaikaiseen laskennan helpottamiseksi on yleistä, että laskennassa käytetään 10 %:n vakiosakeustasoa (Karjalainen 2008, 25). E_{10} lasketaan seuraavasti:

$$E_{10} = \frac{\ln \frac{L_0(x_0 - y_1)}{L_1(x_1 - y_2)}}{\ln \left[\left(1 + \frac{DF}{9} \right) \right]} \quad (6)$$

Pesusaanto (Yield) ilmaisee suodoksen mukana poistuvien liuenneiden aineiden suhdetta pesemättömän sellun mukana tulleisiin aineisiin (Karjalainen 2008, 24). Y saadaan seuraavasti:

$$Y = 1 - (L_2 \cdot x_2) / (L_1 \cdot x_1) \quad (7)$$

Myös Y -arvo voidaan laskea standardoiduilla sakeuksilla Y_{10} :ksi. Jotta pesulaitteiden tehokkuuksien vertaaminen olisi helpompaa, pesurin todellinen poistosakeus muutetaan vastaamaan vakiosakeustasoa. Pesurin syöttösakeuden vaikutuksen laskentaan säädetään sakeus 10 %:iin eri pesureiden vertailun helpottamiseksi. (Kopra 2023, 132.) Y_{10} lasketaan seuraavasti:

$$Y_{C_{0,st}} = 1 - \frac{L_{1,st}(X_{1,st} - y_2)}{L_{0,st}(X_{0,st} - y_2)} = 1 - \frac{L_1(x_1 - y_2)}{L_0(x_0 - y_1) + L_{0,st}(y_1 - y_2)} \quad (8)$$

jossa	$Y_{C_{0,st}}$	pesusaanto standardoidulla syöttösakeudella
	L_0	pesemätön kuituvirtamassa
	L_1	pesty kuituvirta
	$L_{0,st}$	standardoitu syöttövirta
	$L_{1,st}$	standardoitu poistovirtaus pesurilta
		- kaikki nämä on esitetty nesteen massavirtana suhteen uunikuivaa kuitua sellutonnaan
	x_0	liunneen aineen massaosuus L_0 :ssa
	$x_{0,st}$	liunneen aineen osuus $L_{0,st}$:ssa
	x_1	liunneen aineen osuus L_1 :ssa
	$x_{1,st}$	liunneen aineen osuus $L_{1,st}$:ssa
	y_2	liunneen aineen osuus V_2 :na (pesunesteen virtaus)

y_1 liuenneen aineen osuus V_1 :nä (todellinen suodosvir-
taus)

(Kopra 2004, 18–25; Kopra ym. 2008, 250.)

2.2 Vaahdonestoaineiden käyttö kuitulinjalla

Sulfaattisellun valmistuksessa muodostuu runsaasti vaahtoavia aineita, jotka vaikeuttavat sellun pesua ja lajittelua. Tämän vuoksi on kehitetty vaahdonestoaineita, joista nykyään yleisin sellutehtaiden käyttämistä vaahdonestoaineista on vesi- ja silikonipohjainen aine. Myös öljypohjaisia vaahdonestoaineita käytetään. Puhdas neste ei yksin vaahtoa, vaan vaahdon muodostumiseen tarvitaan neste, kaasu ja liuennut ainesosa. Vaahdon pysyvyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat pinnan viskositeetti, pinta-ala, lämpötila ja pH.

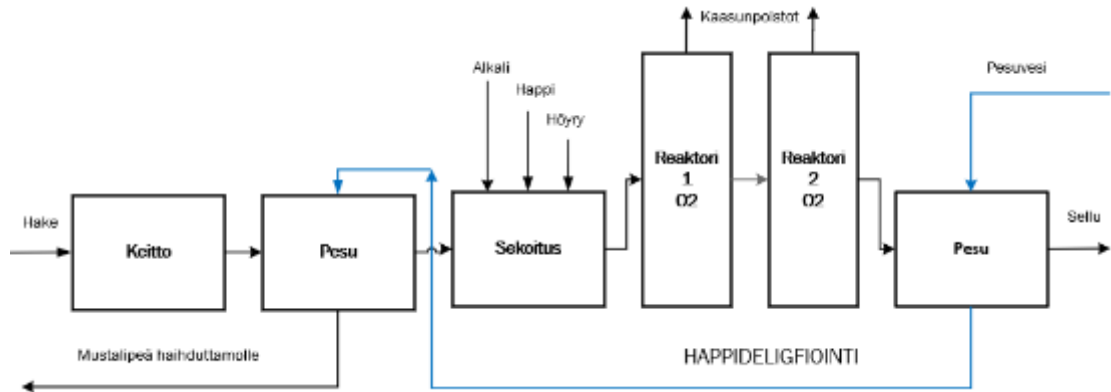
Ruskean massan pesussa ilmenee paljon vaahtoamista, sillä mustalipeä sisältää paljon pinta-aktiivisia aineita. Liuennut aine pinta-aktiivisena konsentroituu kaasunesteen rajapinnalle, jolloin nesteen pintajännitys alenee ja vaahtoa pääsee syntymään. Vaahdonestoaineiden tarkoituksena ruskean massan pesussa on vähentää kaasuja, jonka vuoksi massakakku pesurilla muodostuu paremmin. Tällöin myös suotautuvuus parantuu, pesulaitteen kapasiteetti kasvaa ja pesuri toimii mahdollisimman tehokkaasti.

Vaahdonestoaineen annostelussa onkin tärkeää kohdistaa vaahdonestoaineiden annostelu suoraan vaahtoavaan kohtaan tai juuri ennen sitä. On myös huomioitava, että vaahdonestoaineen annostelulla vaikutetaan kuplan muodostukseen happivaiheessa. Annostelukohtia on usein useita, sillä sekoituksen täytyy olla tehokasta esimerkkinä pesureiden suihkut tai laimennus-suodoslinjat. (KnowPulp 2023; Kopra ym. 2019, 250.)

3 HAPPIDELIGNIFIINTI

Happidelignifiointi eli happivaihe on tärkeä prosessi, jossa hapen ja emäksen avulla poistetaan jäännösligniini ennen varsinaista valkaisua. Se on taloudellinen ja tehokas tapa vähentää valkaisun jätevesien ympäristökuormitusta sekä vähentää kalliiden valkaisukemikaalien käyttöä. (ForestBioFacts 2023a.)

Happidelignifiointi sijoittuu yleensä ruskean massan pesulinjan keskelle ennen valkaisua. Kuten kuvassa 3 on esitetty, lisätään alkali, happi ja höyry keiton jälkeisestä pesusta tulevan ruskean massan sekaan, jolloin sellusta poistuu jäännösligniiniä. Happivaiheita on olemassa yksi- sekä kaksivaiheisena, riippuen halutusta kappareduktiosta. (KnowPulp 2024.)



Kuva 3. Happidelignifioinnin sijoittuminen pesuvaiheisiin (mukaillen Knowpulp 2024)

Happidelignifioinnissa syötettävä massan sakeus on tavallisesti 10–14 %. Kaksivaiheisessa happivaiheessa ensimmäinen reaktiovaihe on nopeampi ja matalalampi lämpötilaltaan kuin toinen reaktiovaihe, joka on hitaampi ja lämpötilaltaan suurempi. (ForestBioFacts 2023.)

Kaksivaiheisessa delignifioinnissa ensimmäisessä reaktorissa normaali lämpötila on 80–95 °C paineen ollessa reaktorin alapäässä 8–10 baaria. Massan viipymäaika ensimmäisessä reaktorissa on noin 30 minuuttia. Painetta reaktorissa saadaan säädettyä venttiilin avulla. Painetta nostamalla voidaan parantaa reaktiossa hapen liukoisuutta. Toisessa reaktorissa lämpötila on tyypillisesti 90–105 °C, paine 3–8 baaria ja viipymäaika noin 60 minuuttia. Korkeamman reaktiolämpötilan takia massaa joudutaan lämmittämään. Lämmittäminen tapahtuu suoraan massaan syötettävällä välipainehöyryllä, johon voidaan myös syöttää osa hapesta paremman prosessin ajettavuuden saavuttamiseksi. Delignifioitumisaste on normaalisti välillä 65–70 %. (KnowPulp 2024.)

Alkalina happivaiheessa käytetään hapetettua valkolipeää tai natriumhydroksidia. Alkali onkin tärkein säätöparametri happivaiheessa. Alkalilla on olennainen osa happidelignifioinnissa, sillä sen tarkoituksena on saada ligniinin hapetusreaktio aikaiseksi, sekä se neutraloi happivaiheessa syntyneet reaktiotuotteet. pH:n täytyy olla riittävän korkea koko happidelignifioinnin ajan. Jos alkali

kuluu loppuun, loppuu hapetusreaktio, vaikka liuoksessa olisikin vapaata hapetta jäljellä. Lämpötila happidelignifioinnissa suhteutetaan alkaliannokseen. Alkalin laskennassa tulevan massan kappaluku tai kappareduktio ja tavoite poistuvan massan kappaluvulle ilmoittaa alkalin tarpeen. (KnowPulp 2024; Sepäälä 2007, 99.)

Tarvittavaa happidelignifioinnin alkaliannosta voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$\begin{aligned} \text{Alkaliannos (NaOH)} = \\ (\text{valkaisuettoman massan kappaluku} - \text{tavoitekappaluku}) \cdot \\ \text{kappakerroin} \end{aligned} \quad (9)$$

Esimerkki:

Koivun kappakerroin yleensä 2,0–3,0.

Alkaliannos = $(20-10) \cdot 2,5 = 25 \text{ kg/t}$

(KnowPulp 2023.)

Happiannos on sidoksissa alkaliannokseen, joka saadaan laskettua yhtälöllä:

$$\text{Happiannos (O}_2\text{)} = \text{kerroin} \cdot \text{mitattu alkaliannos} \quad (10)$$

Esimerkki:

Yleensä kerroin on 0,8–1,0.

Happiannos = $1,0 \cdot 25 \text{ kg/t} = 25 \text{ kg/t}$

(KnowPulp 2023.)

Tutkittavalla sellutehtaalla on oma happilaitos, jossa happi tehdään ilmasta adsorptioon perustuvalla erotusmenetelmällä. Valmistetun hapen puhtaus on parhaimmillaan 95,7 %, mutta käytännössä adsorptiomenetelmällä tehdyn kaasun happipitoisuus on 93–94 %. (Biotuotetehtaan ympäristölupapäätös 2015.)

Happidelignifioinnin tulosta arvioidaan kappaluvulla, joka kuvaa jäljellä olevan ligniinin määrää massassa. Toinen käytettävä määritelmä on viskositeetti, joka

mittaa selluloosamolekyylin pituutta ja jonka avulla voidaan arvioida massan lujuutta. (KnowPulp 2024.)

Happidelignifioinnin edut yhteenvetona ovat:

- Alhaisemmat kustannukset valkaisu- ja keittokemikaaleihin verrattuna
- AOX:n väheneminen tai poistuminen massan valmistusprosessista
- Pienempi BOD ja COD sekä vähemmän väriä jätevesissä
- Parempi saanto
- Mahdollistaa kloorittoman (TCF) ja alkuainekloorittoman (ECF) sellun tuotannon
- Pienemmät jätevesikustannukset
- Ligniinin poistaminen erinomaisella hyötysuhteella
- Soveltuu sekä lehtipuusellun kuin havupuusellun valmistukseen

(Linde 2024.)

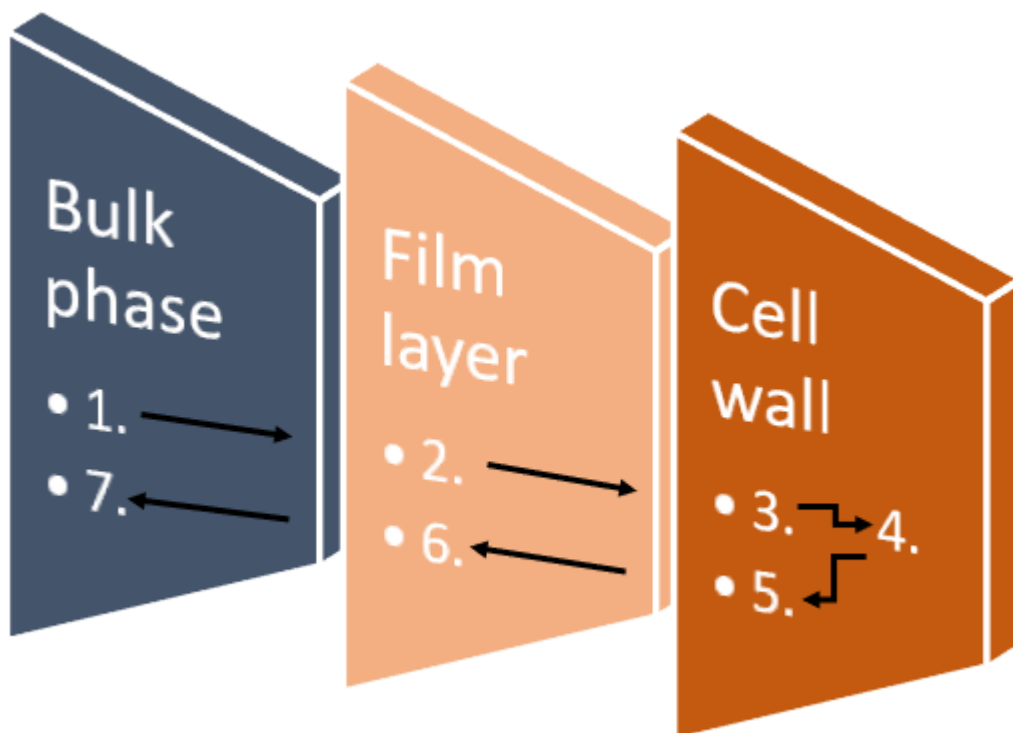
3.1 Kemiallinen reaktio

Happivalkaisun kemia koostuu hapen liukenemisestä ja diffuusiosta vedessä sekä hapen muodostamien yhdisteiden kemiallisista reaktioista alkalisissa olosuhteissa ja korkeassa lämpötilassa. Kun lämpötila ja alkaliniteetti ovat korkeat, hapesta muodostuu happi-, peroksidi- ja hydroksyyli- radikaaleja, jotka reagoivat sellussa olevan ligniinin ja hiilihydraattien kanssa. Hapesta muodostuvat yhdisteet reagoivat pääasiassa anionisten fenolisten ligniiniyryhmien kanssa pH:n ollessa yli 10,5. Liukenemisen jälkeen syntyneet molekyylit, pääasiassa anioniset radikaalit, reagoivat ligniinin ja hiilihydraattien kanssa. Tämä johtaa ligniinin hajoamiseen ja liukenemiseen kuidusta. (van Heiningen 2017.)

3.2 Hapen aineensiirto

Happidelignifioinnin aineensiirto tapahtuu kolmen faasin välillä: neste-, kaasu- ja kiinteällä olomuotoalueella. Näistä prosessin kannalta määräävä on hapen diffuusio kuplan pinnalta nestefaasin läpi kuidun pinnalle (Käyhkö ym. 2023). Delignifointi kaasumaisten aineiden kanssa tapahtuu niin, että kaasu liukenee nestefaasiin ennen reagoimista ligniinin kanssa. Hapen liukoisuus on riippuvainen paineesta ja lämpötilasta. Delignifointiprosessissa pyritäänkin pitä-

mään paine mahdollisimman suurena happikaasun liukoisuuden edistämiseksi. Koska happi on nesteeseen liuetessaan niukkaliukoinen, se dispergoidaan happidelignifioinnissa massaan mahdollisimman pieninä kuplina. Kun kuplakoko pienenee, kaasun aineensiirto kasvaa. Näin ollen hapen aineensiirto voi olla määräävä tekijä happidelignifioinnin kannalta. Prosessissa pilkkoutuneet ligniiniyksiköt siirtyvät nesteeseen. Tämä aineensiirto tapahtuu diffuusion avulla. Diffuusio tarkoittaa faasin sisällä tapahtuvaa komponentin liikettä korkeammasta konsentraatiosta alempaan konsentraatioon. (Mutikainen 2011, 2–14.)



Kuva 4. Hapen ja ligniinin aineensiirto happidelignifioinnissa (mukaiillen Mutikainen 2011)

Kuvassa 4 nähdään happidelignifioinnin aineensiirto- ja reaktiovaiheet. Ensimmäisessä vaiheessa happi liukenee ja tämän jälkeen diffundoituu kuituseinämän pinnalle ja kuituseinämään. Diffuusio kuituseinämään on erittäin nopeaa verrattuna edellisiin vaiheisiin, joten sillä ei ole merkitystä prosessin kannalta (van Heiningen ym. 2003) ja hapen aineensiirto kuituseinämään riippuu siten vain hapen kuplakoosta ja kaasupitoisuudesta x_g . Viidennessä vaiheessa reaktiotuote diffundoituu kuituseinämän läpi. Kuudennessa vaiheessa reaktiotuote diffundoituu filmin läpi ja seitsemännessä reaktiotuote siirtyy filmistä nestefaasiin. (Mutikainen 2011, 13.)

Hapen aineensiirtonopeuden määräävän kertoimen k_{La}^* laskenta perustuu aineen siirron perusyhtälöön:

$$k_{La}^* = \frac{D_{O_2} A}{SV} \quad (11)$$

jossa	k_{La}^*	aineen siirtonopeus	[1/s]
	D_{O_2}	hapen diffuusionopeus	
	s	hapen diffundoitumisetaisyys	[m]
	A	kaasukuplan pinta-ala	[m ²]
	v	järjestelmän tilavuus	[m ³]

(Käyhkö ym. 2023.)

Kun tiedetään happikuplan halkaisija ja kaasun tilavuusosuus, k_{La} voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä 12:

$$k_{La} = (12 \cdot D_{O_2} X_g) / (A \cdot [(\frac{1}{X_g})^{\frac{1}{2}} - 1] \cdot d_b^2) \quad (12)$$

jossa	k_{La}	hapen aineensiirtokerroin	[1/s]
	D_{O_2}	happen diffuusionopeus	[m ² /s]
	X_g	kaasun tilavuusosuus	[%]
	d_b	kuplan halkaisija	[m]
	A	hapen aineensiirtokerroimen korjauskerroin	[-]

(Käyhkö ym. 2021, 253.)

Näitä yhtälöitä tarvitaan happidelignifioinnin mallinnuksessa. Yhtälöitä käyttäen saadaan Excel-pohjaan perustuvalla laskentamallilla varioitua happidelignifioinnin muuttujia ja mallinnuksen laskentaparametrejä. Mallista ja sen parametreista saadaan koottua tietämys prosessista, ja sillä voidaan muun muassa helposti laskea eri toimenpiteiden vaikutuksia prosessissa. (Mutikainen ym. 2014; Käyhkö ym. 2021, 251–256.)

3.3 Happivaiheen mallinnus

Happidelignifikaatioon ja happidelignifikaatioprosessin mallintamiseen liittyviä tutkimuksia on tehty tähän mennessä paljon. Näissä tutkimuksissa ei ole juuri-kaan todella yritetty mallintaa olemassa olevia happidelignifointiprosesseja. Esteenä on ollut se, että hapen kuplakokoa ja siten liunneen hapen pitoisuutta määrittävää hapen aineensiirtoa ei ole tiedetty. Mallinuksissa on käytetty perusparametrejä, kuten lämpötilaa, kappalukua, alkalipitoisuutta ja happipitoisuutta, mutta näillä ei ole pystytty kunnolla huomioimaan kaikkia delignifointiin vaikuttavia asioita.

Viimeisimmät tutkimukset delignifikaatioprosesseissa ovat keskittyneet happikuplien kokoon ja sen vaikutukseen hapen massansiirrossa ja kulutuksessa. Tämä on merkittävää, koska hapen massansiirto ja kulutus määrittävät liunneen hapen pitoisuuden prosessissa, joka puolestaan vaikuttaa delignifointinopeuteen. Toisin sanoen happikuplien koko voi vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti ligniini voidaan poistaa delignifikaatioprosessissa. Lisäksi happikuplan koko ja massansiirron välinen suhde tarjoavat mahdollisuuden mallintaa todellisia happidelignifointiprosesseja tarkemmin. Tämä tarkempi mallinnus voi auttaa parantamaan delignifikaatioprosessin tehokkuutta ja ennustettavuutta. Hapen mallintamisessa on otettu nyt huomioon nämä pienemmätkin asiat. Perusmalli ja sen parametrit ovat määritetty kirjallisuudesta sekä laboratoriossa ja sekoituskokeissa tehdyillä delignifioinneilla. Olennaisena osana näissä tutkimuksissa on reaktorin yläpäästä mitattu jäännöskaasusta saatu tieto. Tämän mittauksen perusteella on pystytty määrittelemään tarkemmin hapen kulutus ja osapaine, jotka määräävät liunneen hapen konsentraation reaktiossa. Sekoituskokeilla muodostettiin malli, joka ennustaa hapen toimintaa delignifointiprosessissa. Mallin avulla voidaan ennustaa, kuinka paljon ligniiniä poistuu eri olosuhteissa ja kuinka prosessia voidaan parantaa muuttamalla hapen annostelua. Mallinnuksen tarkoituksena on käyttää sitä työkaluna, joka muuttaa sekoitus- tai laboratoriokokeiden tulokset perusparametreiksi, jotka määrittävät delignifointinopeuden. (Käyhkö ym. 2023.)

Tämä mallinnus perustuu pääosin van Heiningenin ja Käyhkön aiempaan mallinnukseen. Hapen aineensiirto N lasketaan aineensiirtokertoimen avulla seuraavasti:

$$N = k_L a (C_{O_2^*} - C_{O_2}) \Delta t \quad (13)$$

jossa	N	hapen aineensiirto	[g/l]
	$k_L a$	hapen aineensiirtokerroin	[1/s]
	$C_{O_2^*}$	happisaturaatio, laskettuna Henrin lain perusteella	[g/l]
	C_{O_2}	liuenneen hapen pitoisuus	[g/l]
	t	aika	[s]

Delignifikaatioaste eli kappareduktio ΔK lasketaan seuraavasti:

$$\Delta K = -A \left(3 \cdot \frac{10^6}{60} \right) e^{-\frac{51000}{8,314T}} \cdot ([OH^-])^{0,7} (C_{O_2})^{0,7} (K)^2 \Delta t \quad (14)$$

jossa	ΔK	kappareduktio	[%]
	A	hapen aineensiirtokerroimen korjauskerroin	[-]
	T	lämpötila	[K]
	OH^-	hydroksidi-ionien konsentraatio	[mol/l]
	CO_2	liuenneen hapen konsentraatio	[mol/l]
	K	kappaluku	[-]
	Δt	ajan muutos	[s]

Kaasudispersioiden käyttäytyminen ja niiden vaikutukset ovat kriittisiä prosessin toiminnan ja tuotannon kannalta. Kaasudispersioiden mallinnus ja ymmärrys ovat tärkeitä monissa prosesseissa biotuotetehtaalla, kuten valkolipeän hapetuksessa sekä happi- ja otsonivalkaisuissa. Mallinnusta voidaan hyödyntää myös muissa prosesseissa, joissa on tärkeänä prosessin toiminnan kannalta kaasudispersio. Tämä osaaminen auttaa parantamaan prosessien tehokkuutta ja luotettavuutta. (Käyhkö ym. 2021, 257.)

4 MITTAUSLAITTEET

Opinnäytetyössä on esitelty tutkittavana olleella sellutehtaalla käyttämämme mittalaitteet, joiden avulla on koottu tulokset tehdasdataa hyväksi käyttäen.

Kun online-data yleistyy, voidaan tehtaan hyötysuhteessa, energian kulutuksessa, laadussa ja kilpailukyvyssä saavuttaa merkittäviä parannuksia.

4.1 Kuplakuvauskamera

Pixact-Kuitulaboratorio-yhteistyönä kehitetty Pixact-kuplamonitorointijärjestelmä on suunniteltu kuplasuspensioiden online-analysointiin. Kuplamonitorointijärjestelmä tunnistaa kuplat, joiden koko on 10–2000 μm , ja ilmoittaa niiden määrät kokoluokat reaaliajassa. Kuvan analysointi tunnistaa kuplat ja määrittää niiden halkaisijat. Halkaisijatietoja käytetään laskemaan aritmeettiset, Sauterin ja tilavuuspainotteiset kokojakaumat. Kuplakuvausmittausjärjestelmä koostuu kuvausyksiköstä, jossa on korkean suurennusobjektiivin kamera ja valaisuun tarvittavat valokuidut sekä pääyksiköstä, jossa on mittaus-tietokone ja laseri. Kuvassa 5 on kuvattu Pixactin mittausjärjestelmä. (Pixact 2023.)



Kuva 5. Pixact kuplakuvauskamera ja tietokone (Pixact 2023)

Mittausjärjestelmä perustuu kuplia sisältävän suspension kuvantamiseen ja sitä seuraavaan kuva-analyysiin kuplien tunnistamiseksi ja niiden koon mittaamiseksi. Kuvaus suoritetaan räätälöidyllä mittapäällä, joka on suunniteltu käy-

tettäväksi Vaisalan (entinen K-Patents) asennusmekaniikan kanssa. Kuplasuspensio kulkee anturin etulasin läpi ja suspensiosta otetaan kuvia etuvalaistusasetuksella. (Pixact 2023.)

Mittausjärjestelmää ohjaa mittaustietokone, jossa on Pixact-ohjelmisto. Kun järjestelmän virta on päällä, mittaus on valmiustilassa ja ohjelmisto näyttää suspension live-kuvan. Kun mittaus on käynnistetty, kuvatiedot analysoidaan reaaliajassa. Tulokset näkyvät näytöllä ja ne tallennetaan Excel-muodossa työaseman kovalevylle. (Pixact 2023.)

4.2 Kaasupitoisuusmittarit

Kaasupitoisuusmittareiden pitoisuudet määritetään yleensä prosenttiosuuk-
sina vertailuaineeseen. Korkeat pitoisuudet ilmoitetaan tilavuusprosentteina
(tilavuus %). Tämä vastaa tiettyä määrää ainetta 100 osassa ainetta. Esimer-
kiksi kun ilma koostuu 21 tilavuusprosentista happea, niin 100 osaa ilmaa si-
sältää 21 osaa happea.

	Vol.-%	ppm	ppb		g/L	mg/L	mg/m ³
Vol.-% = 10 L/m ³ 1 cL/L	1	10 ⁴	10 ⁷	g/L = 10 L/m ³ 1 cL/L	1	10 ³	10 ⁶
ppm = mL/m ³ μL/L	10 ⁻⁴	1	10 ³	mg/L = mL/m ³ μL/L	10 ⁻³	1	10 ³
ppb = μL/m ³ nL/L	10 ⁻⁷	10 ⁻³	1	mg/m ³ μL/m ³ nL/L	10 ⁻⁶	10 ⁻³	1

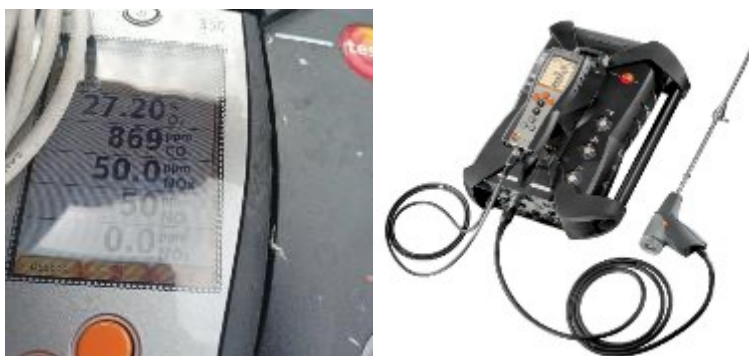
Kuva 6. Kaasumaisten komponenttien muuntotaulukko (Dräger 2023)

Pienillä pitoisuuksilla mittayksiköinä käytetään miljoonasosia: ppm tai ml/m³ tai miljardiosia: ppb tai μL/m³. Ppm tarkoittaa yksi osa ainetta yhteen miljoonasosaan ilmaa ja ppb tarkoittaa yksi osa ainetta yhteen miljardiosaan ilmaa, kuten kuvassa 6 on todennettu. (Dräger 2023.)

4.2.1 Testo 350 -savukaasuanalysaattori

Testo 350 on kannettava savukaasuanalysaattori teollisuuden päästöjen mit-
taukselle. Ohjausyksikössä on irrotettava käyttö-/näyttöyksikkö värillisellä gra-
fiikalla. Mittaussetti koostuu ohjausyksikön lisäksi analysaattorista ja anturista.

Analysaattorissa on Bluetooth-käyttömahdollisuus. Mittaustiedot voidaan tallentaa ohjausyksikön sisäiseen muistiin tai tallentaa ohjelmoituun tietokoneeseen, jolloin myös etäyhteyden käyttö on mahdollista. Savukaasuanalyysaattori pystyy mittaamaan happipitoisuuden (O_2), hiilimonoksidin eli häkäkaasun (CO), NOx -yhdisteiden typpioksidit yhdessä sekä (NO) ja (NO₂) erikseen kuten kuvasta 7 näkyy. (Humitec 2023.)



Kuva 7. Testo 350 savukaasuanalyysaattori

Kerättyjä tietoja voidaan tarkastella kaavioina tai numeraalisina arvoina. Analyysaattorissa on laimennusjärjestelmä, joka on osoittautunut välttämättömäksi korkeita pitoisuuksia mitatessa. Järjestelmä pidentää laitteen käyttöikää vähentämällä pitoisuuksia ja näyttää automaattisesti korjatut mittausravot, näin ei pääse syntymään ristiherkkyysongelmia. (Humitec 2023.)

4.2.2 Geotech G110

Geotech G110 on kuvassa 8 kuvattu kannettava kaasuanalyysaattori, jolla mitataan happi (O_2) ja hiilidioksidi (CO_2) pitoisuudet tutkittavasta kaasulinjasta. Siinä on sisään rakennettu kaasunkuivausputki kosteudenpoistoon. G110:ssä on sisäinen tallennustila sekä tietokoneohjelmisto datan purkua varten. (Melmach 2023.)



Kuva 8. Geotech 110 kaasuanalysointilaitteisto

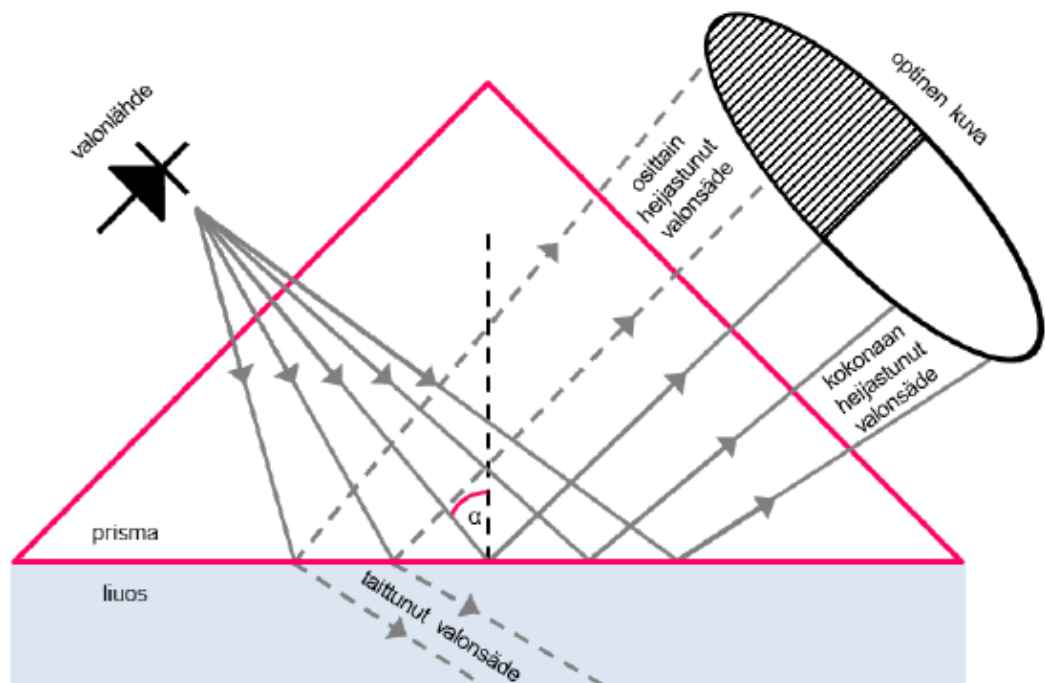
Kaasuanalysointilaitteen toiminta perustuu mittarin sisäänrakennettuun infrapuna-antennin. Hiilidioksidilla on ominainen absorptiojuova infrapuna-alueella, siksi muutoksia voidaan käyttää mittarina kaasupitoisuuksien määrittämiseen. Tämä ominaisuus liittyy hiilidioksidimolekyyleihin, kun mittaustilanteessa infrapunasäteily kulkee hiilidioksidia sisältävän kaasun läpi eikä mittaustilanteessa muiden kaasujen läsnäolo vaikuta mittaustuloksiin. (Saarinen 2011, 39.)

4.3 Prosessirefraktometrit

Prosessirefraktometrillä mitataan liuoksen aineen pitoisuutta prosessiliuoksesta taitekertoimen mittaukseen perustuen. Pitoisuus ilmoitetaan useimmiten yksikössä prosentti, mutta liuoksen tiheys voidaan laskea pitoisuudesta. Refraktometri mittaa, kuinka paljon valo taipuu, kun se kulkee eri aineiden välillä. Esimerkiksi, kun valo kulkee ilmasta veteen, se taipuu hieman. Tämä taipuminen riippuu aineen taitekertoimesta, joka on luku, joka kuvaa aineen optisia ominaisuuksia. Refraktometri mittaa taitekerrointa mittaamalla valon kulmaa, kun se tulee ulos liuoksesta. Liuoksen taitekerroin kertoo, kuinka väkevää liuos on, eli kuinka paljon siinä on liuenneita aineita. Liuoksessa olevat kuplat tai muut partikkelit eivät vaikuta taitekertoimeen, sillä menetelmä mittaa rajapinnasta takaisin heijastunutta valoa. Iso kupla voi kuitenkin aiheuttaa tilanteen, jolloin mittapää ei hetkellisesti näe nestettä. Koska mittaussäiliö on taaja,

tämä ei kuitenkaan haittaa mittaustulosta. Liuoksen taitekerroin muuttuu lämpötilan mukaan, joten refraktometri mittaa myös lämpötilan, jotta se voi korjata sen vaikutuksen. Sensorin mittauseriaate on taitekertoimen nD mittauksessa. (Kontram 2023; Kopra 2024.)

Kuvassa 9 on kuvattu refraktometrin mittauseriaate. Refraktometrillä mitattaessa valoa johdetaan prismalle, joka on kosketuksissa tutkittavaan prosessinesteeseen. Eri kulmista valonsäteet heijastuvat eri lailla. Kun valo kohtaa prosessiliuoksen terävässä kulmassa, osa valosta heijastuu ja osa taittuu. Silloin kuin kulma on tylppä, kaikki valo heijastuu nesteeseen pinnasta. Heijastuneista säteistä muodostetaan optinen kuva. Kun valonsäde saapuu rajapintaan kulmassa, jota kutsutaan kokonaisheijastuksen rajakulmaksi, se heijastuu kokonaan takaisin. Tämä näkyy vaaleana alueena kuvassa. Jos valonsäde saapuu rajapintaan pienemmässä kulmassa, se pääsee läpi rajapinnasta. Tämä näkyy tummana alueena kuvassa. (Karjalainen 2008, 49–50; Vaisala 2020.)



Kuva 9. Taitekerroinmittaus, jossa α on kokonaisheijastuksen rajakulma (mukaillen Vaisala 2020)

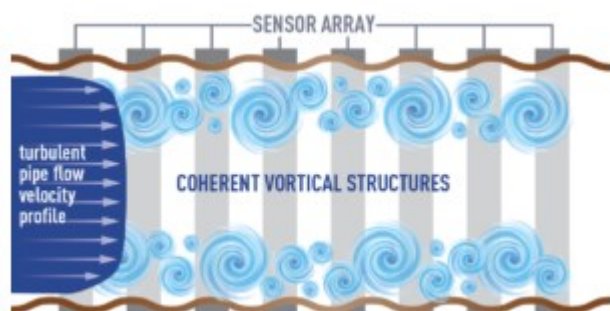
Kun liuoksen konsentraatio kasvaa, kokonaisheijastuksen rajakulma kasvaa myös. Tämä tarkoittaa, että vähemmän valonsäteitä heijastuu kokonaan takaisin ja enemmän valonsäteitä pääsee läpi rajapinnasta. Tämän seurauksena vaalean alueen ala kuvassa pienenee ja tumman alueen ala kuvassa kasvaa.

Kokonaisheijastuksen rajakulmasta voidaan siten määrittää taitekerroin n_D , koska se on yhteydessä prosessiliuoksen konsentraatioon ja lämpötilan muuttumiseen. Konsentraation kasvaessa myös taitekerroin normaalisti kasvaa. Matalissa lämpötiloissa taitekerroin on suurempi kuin korkeimmissa lämpötiloissa. Vaalean ja tumman alueen välisen rajan paikka optisessa kuvassa havaitaan refraktometrissa digitaalisella CCD-kameralla. Kamera muuntaa optisen kuvan refraktometrissa sähköiseksi signaaliksi. Liuenneiden aineiden reaaliaikainen kokonaismäärä (total dissolved solids) on osoittautunut helposti toistettavaksi ja toimivaksi parametriksi pesutehokkuuden mittauksessa, koska se huomioi sekä epäorgaaniset että orgaaniset komponentit. (Karjalainen 2008, 49–50, Vaisala 2020.)

Tärkeimmät TDS-mittauskohdat pesurilla ovat massan sisääntulossa, massan ulostulossa, pesunesteen syötössä ja pesusuodoksessa. Refraktometrit voidaan muuttaa näyttämään myös COD:ta. Tämä tehdään ottamalla näytteitä, joista COD määritetään laboratoriossa ja COD:n ja kuiva-aineen välille asetetaan kalibrintikäyrä mittalaitteen lähettimelle. Refraktometriin sijoituspaikat prosessissa on huomioitava tarkasti, sillä pesuhäviön laskemiseksi on tiedettävä sekä sakeus että konsentraatio. E-arvon laskemiseksi on tiedettävä lisäksi virtaukset pesuvaiheeseen sekä tuotanto. (Kopra 2023, 133–134.)

4.4 Echowise

Massa- ja suodosvirroista Echowisellä voidaan mitata kaikuluotainmenetelmällä kaasuosuuksia ja virtausnopeutta. Virtausnopeusmittaus käyttää kahta erillistä, mutta synergististä mittaustekniikkaa. Ensimmäinen tekniikka mittaa virtausnopeutta tarkkailemalla turbulenttisia pyörteitä prosessin virtauksessa, kuten kuvassa 10 on esitetty. Toinen mittaustapa perustuu äänennopeuden määrittämiseen virtauksen suuntaan ja tätä vastaan, jolloin näistä voidaan laskea virtauksen nopeus. (Buckman 2023.)



Kuva 10. Turbulentteja virtauksessa (Buckman 2023)

Putken ulkopinnalle asennetaan anturi, joka detektoi prosessimelua. Sen perusteella tekniikka laskee nopeuden, jolla ääni etenee massan läpi. Äänennopeus on verrannollinen massan kaasupitoisuuteen ja näin saadaan määritettyä kaasun osuus virtauksessa. Echowise-anturi (kuvassa 11) lähettää mitaustiedon mittausyksikölle, josta se voidaan purkaa dataksi tehdasjärjestelmään. (Kopra ym. 2020,12.)



Kuva 11. Echowise-anturi vasemmalla ja mittausyksikkö oikealla

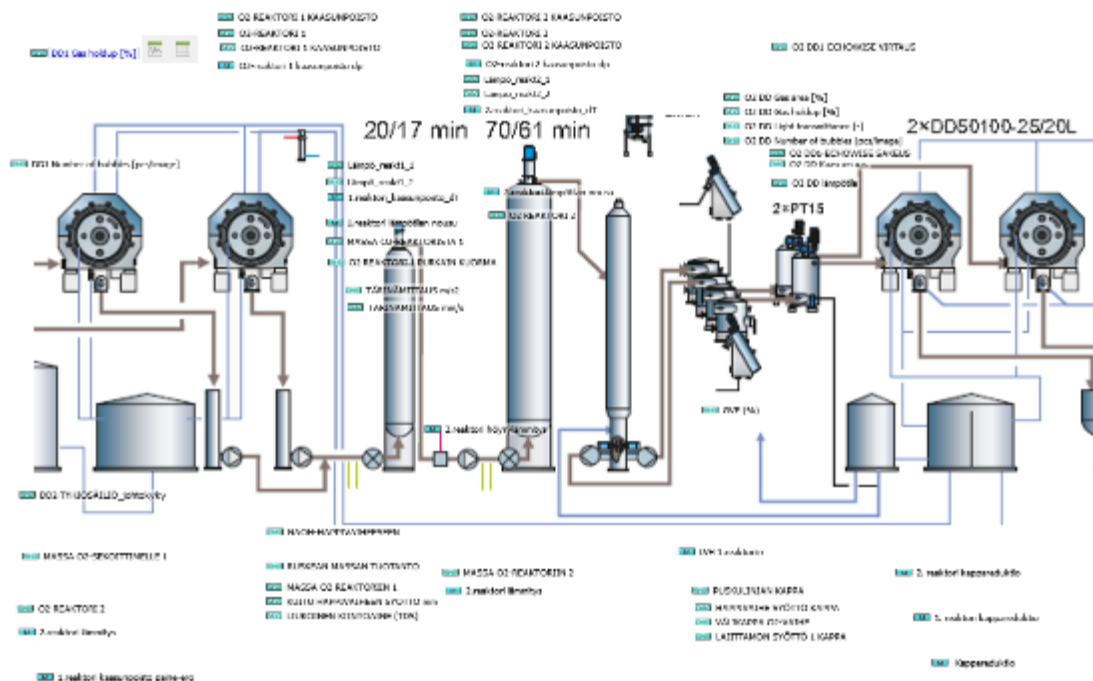
Sellun tuotannossa kuitulinjalla Echowise-kaasupitoisuusmittausta käytetään esimerkiksi määrittämään pesuvaiheiden kaasupitoisuuksia. Sen voi asentaa hyvin useaan eri prosessilinjaan tutkimaan kulkeutuneiden kaasujen vaikutusta. Menetelmää hyödyntämällä on voitu muun muassa lisätä prosessin tuotantonopeutta, pienentää valkaisu kustannuksia ja vähentää höyryn käyttöä talteenotossa. (Buckman 2023.)

5 WEDGE-JÄRJESTELMÄ

Wedge on prosessianalyysointijärjestelmä, joka on käytössä Suomessa laajasti paperi- ja biomassateollisuudessa, kuten myös tutkittavalla sellutehtaalla. Se on ohjelmistotyökalu, joka kerää ja jolla voidaan analysoida prosessidataa. (Kärkkäinen ym. 2019, 274.)

Wedge liitetään tehtaan omaan tietojärjestelmään, jolloin sillä saadaan reaaliaikaista tietoa prosessien eri vaiheista. Se on aina räätälöity jokaisen tehtaan omia tarpeita täyttämään. Sen etuja ovat nopeus ja käyttäjäystävällisyys, sillä on helppo päästä reaaliaikaiseen tietoon, se on rajoituksista vapaa, siinä on laaja valikoima erilaisia muokkausmahdollisuuksia ja se mahdollistaa nopean vianmäärityksen. (Savcor Forest 2009.)

Kuvassa 12 on esimerkki Wedge-kaaviosta, joka vastaa mallia todellisesta prosessista.



Kuva 12. Wedge-kaavio esimerkki

Kaavio koostuu kuva- ja mittauskomponenteista. Prosessikaaviossa komponentit voidaan jakaa omiksi mittausryhmiksi, jolla helpotetaan datan katselua ja analysointia. (Savcor Forest 2009.)

Wedgessä on olemassa erilaisia työkaluja, jolla voidaan analysoida prosessin syy-seuraussuhteita. Näitä voidaan käyttää esimerkiksi ajotavan yksilöimiseen tuotteen laadun parantamiseksi tai prosessin tehostamiseksi. (KnowPulp 2023.)

Wedge-asiakasohjelma on ohjelma, joka auttaa käyttäjää näkemään ja tutki-
maan prosessidatan muutoksia. Ohjelma näyttää datan graafisesti erilaisina
käyriä, joita voi tarkastella yhdessä tai erikseen. Data esitetään visuaalisessa
muodossa eli trendeinä. Ohjelma myös mahdollistaa ohjelmoituna datan esi-
käsitteilyn, muokkaamisen ja raportoinnin. (Kärkkäinen ym. 2019, 275.)

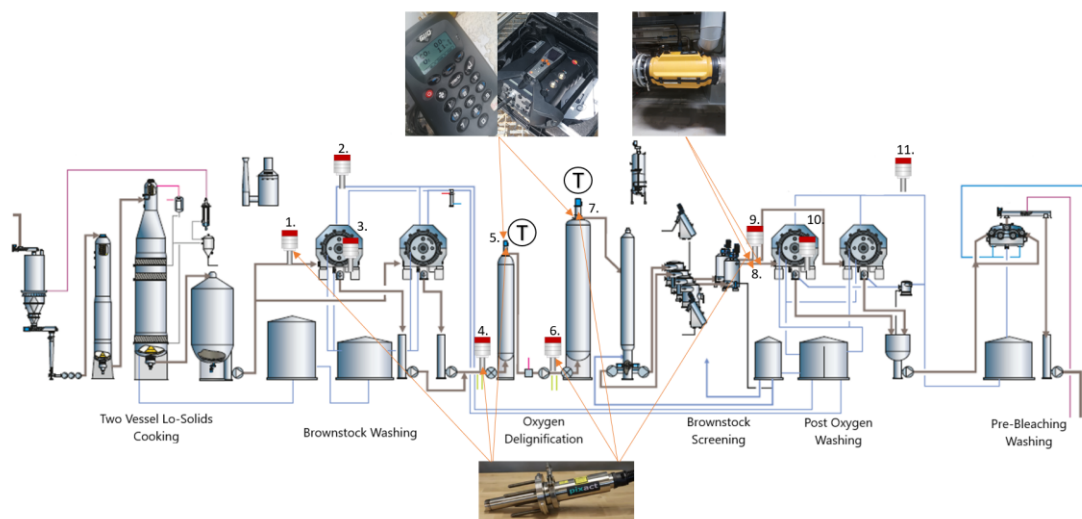
Trendi tarkoittaa tietynä ajanjaksona yhden mittauksen peräkkäisten pisteiden
graafista esitystä, jonka pisteet on yhdistetty viivalla. Näin voidaan analysoida
haluttuja prosessin tapahtumia. (Savcor Forest 2009.)

Wedgen käyttö on erittäin hyödyllinen tehdasdatojen ja koeajojen tulosten sel-
vittämisessä ja tulokinnassa sekä prosessin toiminnan havainnollistamisessa.
Ohjelmalla voidaan analysoida yhtä tai suurempaa signaalijoukkoa, mutta il-
man ohjelmointia se ei esikäsittele tietoa automaattisesti. Eikä se myöskään
lajittele tietoa. Kuitenkin se tarjoaa oivan avun korrelaatioiden löytymiseen,
joita ei ilman ohjelmaa välttämättä löytyisi. (Kärkkäinen ym. 2019, 280–281.)

Wedgeä voidaan hyödyntää myös datan jakamiseen. Haluttu data on helppo
määritellä ja kerätä ja jakaa esim. Excel-muodossa eteenpäin.

KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellinen osuus perustui erilaisiin mittauksiin kuitulinjalla happidelignifioin-
nissa ja sen ympärillä olevilla DD-pesureilla. Happidelignifiointireaktoreiden
syötöistä ja reaktoreiden yläpäästä mitattiin kuplia. Lisäksi pesureilta ja reaktio-
reiden syötöistä mitattiin liuenneiden aineiden pitoisuutta Vaisalan prosessiref-
raktometreilla. Kaasuosuus-, lämpötila- ja virtausmittaukset tehtiin prosessiin
lisätyllä Echowise- mittauksella. Kaasupitoisuusmittareilla saatiin mitattua
happi-, hiilidioksidi- ja hiilimonoksidipitoisuuksia. Tehtaalta saatiin olennainen
prosessidata, jolloin saatiin aineistot yhdistettyä ja analysoitua Wedge-ohjel-
malla.



Kuva 13. On-line-mittausten asennuspaikat prosessissa

Kuvassa 13 on esitetty kaikkien online-mittausten asennuspaikat prosessissa. Online-mittauspisteitä oli yhteensä 27 kappaletta. Kuplakuvauskameroiden asennusjalat olivat asennettavissa samoihin yhteisiin prosessirefraktometrien kanssa, mikä helpotti asennuksia oleellisesti. Taulukossa 1 on lueteltu kuvan 13 mittalaitteet numeroituna prosessiin sijainnin mukaan.

Taulukko 1. Mittalaite- ja sijaintiluettelo

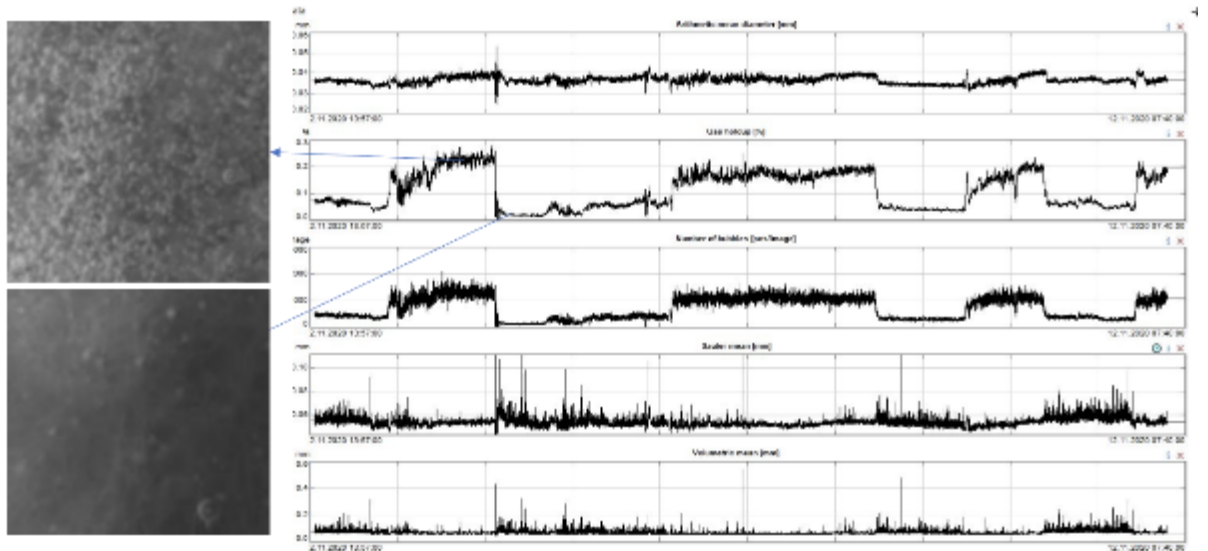
Mittalaite luettelo		Sijainti luettelo		
Mittalaite	Sijainti nro	Nro	Sijainti	Mittauksia
Kuplakuvauskamera	1, 4, 5, 6, 7, 9.	1.	Keittimen jälkeisen DD-1 pesurin syöttö	2 kpl
Prosessirefraktometri	1, 2, 3, 4, 6, 9, 10,11.	2.	Keittimen jälkeisen DD-1 pesurin puhtaampi pesuneste	1 kpl
Lämpötila	5, 7, 8, 9.	3.	Keittimen jälkeisen DD-1 pesurin palautussuodos	1 kpl
Echowise	8, 9.	4.	Happivaiheen 1 syöttö	2 kpl
Happi ja hiilimonoksidi	5, 7.	5.	Happireaktori 1	5 kpl
		6.	Happivaiheen 2 syöttö	2 kpl
		7.	Happireaktori 2	6 kpl
		8.	Happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin syöttö alakerta	1 kpl
		9.	Happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin syöttö	5 kpl
		10	Happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin pesuneste	1 kpl
		11.	Happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin palautussuodos	1 kpl
			Mittauksia yhteensä	27 kpl

6 KUPLAKUVAUKSET HAPPIVAIHEESSA

Kuplakuvauskamerat olivat mittaamassa kuudessa eri mittauspisteessä siten, että parhaimmillaan oli kolme eri kameraa kuvaamassa kuitulinjalla yhtä aikaa ja niihin kaikkiin oli etäkäyttömahdollisuus. Kameroiden paikkoja vaihdeltiin myös halutun tutkittavan kohteen mukaan.

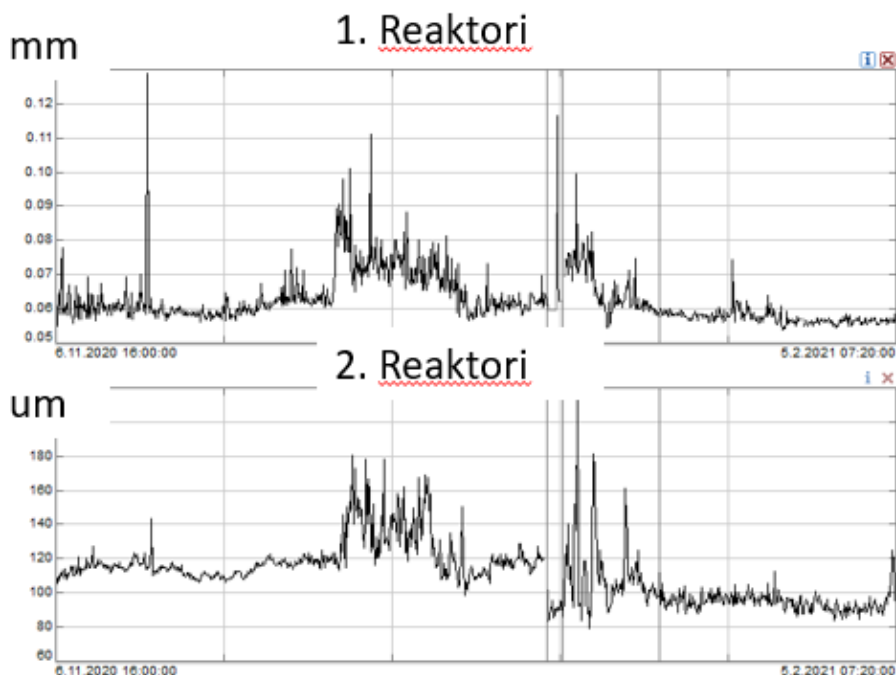
6.1 Happireaktoreiden syöttö

Happireaktoreiden syötöistä pystyi havaitsemaan kuplien koon ja kaasun määrän reaaliaikaisesti. Kuvan 14 mukaisesti happireaktori 1 syötössä kuplakuvaus osoitti, että kuplat olivat halkaisijaltaan pääasiassa hyvin pieniä, alle 0,1 millimetrin kokoisia.



Kuva 14. Reaktori 1 syöttö

Havulla kuplat olivat pienempiä kuin koivulla ja reaktorissa 1 kuplat olivat pienempiä kuin reaktorissa 2 (kuva 15). Reaktorin 1 sekoittimen moottorin teho on myös suurempi verrattuna reaktoriin 2.



Kuva 15. Kuplakoko 1 ja 2 reaktoreiden syötössä

Yhteenvedona reaktoreiden syötöstä todettiin, että kuplien havaittiin olevan hyvin pieniä eikä noin vuoden mittausjaksolla havaittu tilanteita, joissa kuplat olisivat olleet merkittävästi suurempia. Mallinnusten mukaan (Käyhkö ym. 2023) molemmilla reaktoreilla hapen aineensiirto on niin nopeaa, että jos happi ei kokonaan loppu prosessissa niin molempien reaktoreiden liuosfaasi on saturoituneena hapesta.

6.2 Hapereaktoreiden yläpäät

Molempien hapereaktoreiden yläpäähän oli asennettu kuplakuvauksille sopivat yhteet, joista saatiin kuvattua kuplien määrää ja kokoa. Kuvassa 16 on Pixact-kuplamonitorointijärjestelmä mittaamassa reaktori 1 ja kuvassa 17 reaktori 2 päällä.

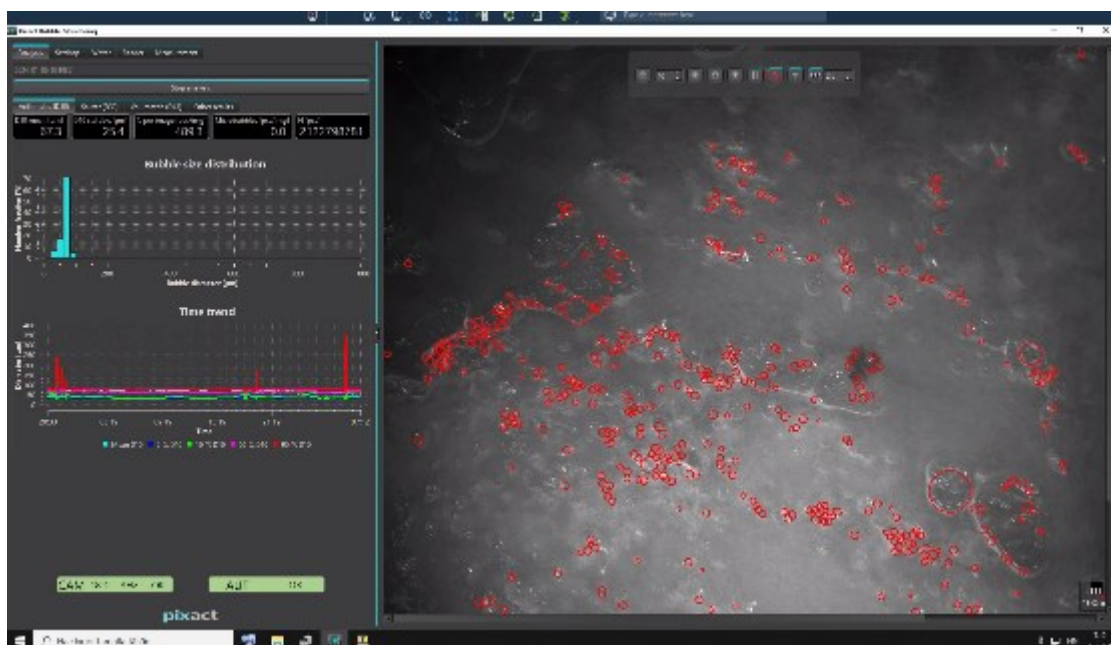


Kuva 16. Kuplakuvaus reaktori 1 päällä



Kuva 17. Reaktori 2 yläpään kuplakuvaus

Kuvassa 18 on tietokonekuva reaktori 2 yläpään mittauksesta, jossa kyllä havaitaan kuplia olevan, mutta suhteellisen pieniä.



Kuva 18. Kuplakuvauskameran kuva reaktori 2 yläpäässä

Reaktori 1:ssä havaittiin kuplien olevan pienempiä kuin reaktori 2:ssa. Myös jäännöskaasun määrä reaktori 2:ssa oli suurempi kuin reaktori 1:ssä ja havulla

jäännöskaasun määrä oli isompi kuin koivulla. Jäännöskaasun määrissä havaittiin paljon hidasta vaihtelua. Mittaukset osoittivat, että reaktoreissa ei tapahtunut hapen aineensiirron kannalta merkittävää kuplien yhdentymistä.

Mallituksen mukaan (Käyhkö ym. 2023) kyseessä olevassa tapauksessa reaktoreiden pitäisi olla saturoituneena hapesta, vaikka kuplien määrä reaktoreiden yläpäässä olisi olemattoman pieni. Tehdaskokeissa hapen syötön vähentäminen kuitenkin alensi kappareduktiota ja reaktoreiden yläpäässä havaittiin olevan vielä merkittävä määrä jäännöskaasua (Käyhkö ym. 2023.)

Tehtaalla käytetään on-site-valmistettua happea, jonka happipitoisuus on 93 %. Kuplakuvausyhteestä oli mahdollista saada suodosnäyte, josta erotettiin kaasufaasi ja tästä mitattiin kaasun happipitoisuus, joka havaittiin hyvin alhaiseksi (kuva 19).



Kuva 19. Reaktori 1 yläpään jäännöskaasun happipitoisuuden mittaus

Siten jäännöskaasun määrän arviointi kuplakuvauksilla reaktoreiden yläpäästä havaittiin pääasiassa hyödyttömäksi, koska olennaista ei ole jäännöskaasun määrä vaan sen happipitoisuus.

Reaktoreiden yläpään purkaimilla on jäännöskaasun poistot, mutta nämä eivät ole olleet järjestelmän tukkeutumisen vuoksi käytössä. Havaintojen myötä tehdas rakensi kaasunpoistoon säätöventtiilit, joiden avulla kaasunpoistolinjaa

voidaan puhdistaa suodoksella valvomosta käsin manuaalisesti tai automaattisekvenssillä. Samalla tehtiin kaasunpoistolinjoihin näytteenottoyhteet.

7 KAASUNPOISTOJEN LÄMPÖTILAMITTAUKSET

Reaktoreiden kaasunpoiston toimintaa on mahdollista seurata lämpötilamittauksilla. Sijoittamalla kaksi mittausta heti purkaimen jälkeen putken ylä- ja alapinnalle, saadaan tietoa kaasunpoiston toiminnasta. Mittausten tulkinta ei ole aivan yksiselitteistä, mutta pääsääntöisesti mitä korkeampi putken yläpinnan lämpötila on, sen enemmän kaasuja poistuu. Kun alapinnan lämpötila on korkeampi kuin yläpinnan, niin purkaimelta tulee myös massaa ja/tai suodosta ja tällöin kaasunpoistolinja on vaarassa tukkeentua. Lisäksi säätöventtiilin jälkeen asennettu kolmas mittaus antaa lisätietoa kaasunpoiston toiminnasta.

Molemmille happireaktoreille lisättiin kaasunpoistolinjaan kolme kappaletta online-lämpötilamittauksia varustettuna tiedonkeruulla ja etäyhteydellä. Kuvissa 20 ja 21 on molempien happireaktoreiden kaasunpoistojen lämpötilamittaukset, jotka koostuvat lämpötila-antureista USB-liitännöllä yhdistettynä tietokoneisiin.



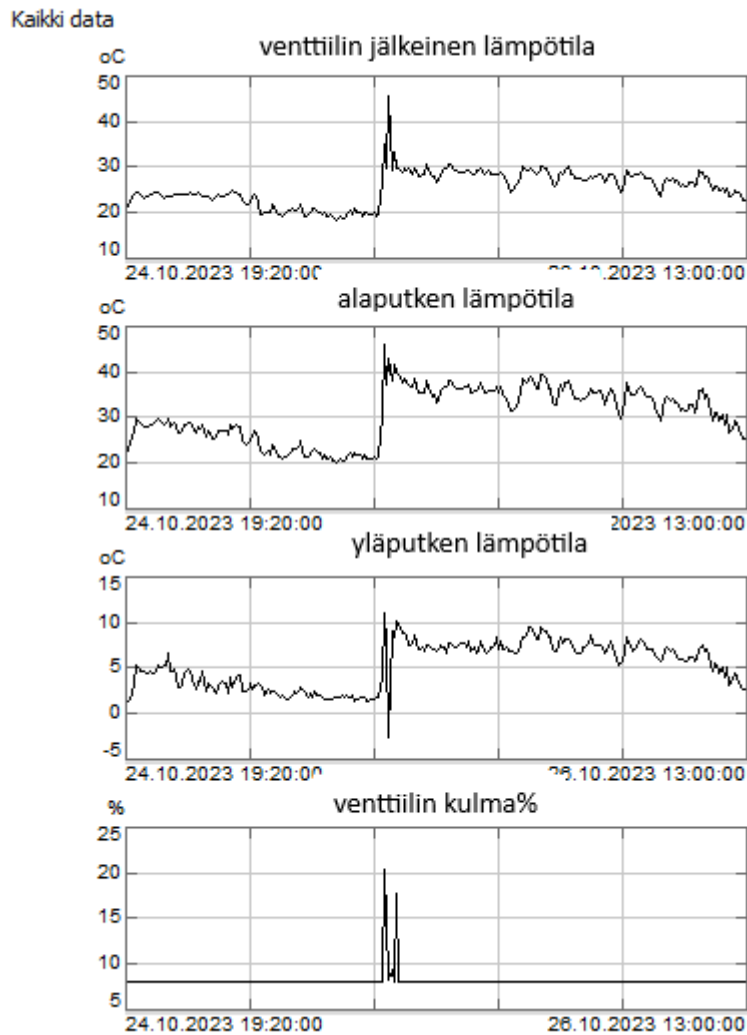
Kuva 20. Lämpötilamittaus reaktori 1



Kuva 21. Lämpötilamittaus reaktori 2

Kuvassa 22 on havainnollistettu lämpötilamittausten toimintaa. Säätöventtiilin piikkien kohdalla on tapahtunut kaasukanavan puunaus, jonka jälkeen putken ylä- ja alapinnan lämpötila on noussut. Lämpötila ero on kasvanut eli kanava

on ollut ainakin osin tukossa ja puunauksen jälkeen kaasua poistuu enemmän.



Kuva 22. Esimerkki kaasunpoistoputken lämpötilamittausten toiminnasta

Kuvassa 23 on tietokoneen ruudulta reaktori 2 kaasunpoistojärjestelmän lämpötilamittaukset. Ensimmäinen sarja kertoo venttiilin jälkeisen putken lämpötilan, toinen sarja kaasunpoistoputken alapinnan lämpötilan ja kolmas sarja kaasunpoistoputken yläpinnan lämpötilan. Näin ollen kaasua poistui mittaushetkellä.

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4
14.06	25.87	13.06	
14.06	25.69	13.13	
14.13	25.62	13.06	
13.88	25.37	13.06	
13.56	25.25	13.06	
13.38	25.31	13.06	
13.31	25.19	13.06	
13.50	25.25	13.06	
14.00	25.69	13.06	
14.31	25.94	13.13	
14.25	26.00	13.13	
13.88	26.06	13.13	
13.56	25.87	13.13	
13.44	25.87	13.13	
13.88	26.25	13.13	
14.13	26.37	13.13	
14.19	26.50	13.19	
14.44	26.69	13.19	
14.69	26.81	13.19	
14.69	26.94	13.25	
14.50	26.94	13.25	
14.31	26.94	13.25	13.25
14.13	26.87	13.25	

Kuva 23. Lämpötilamittauskuva tietokoneen näytöltä

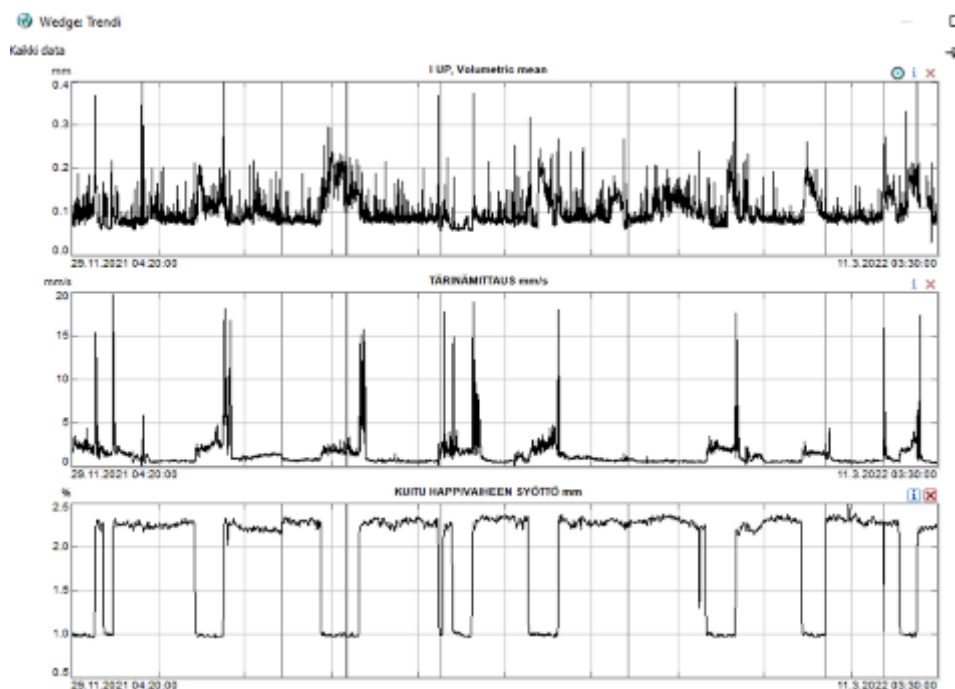
Tehdas asensi myös yhden lämpötilamittaukset kaasunpoistoihin ja näistä tieto menee suoraan tehdasjärjestelmään. Reaktorin 2 lämpötilamittaus oli asennettu liian lähelle yhdistettyä kaasujen purkausputkea, jolloin mittari detektoi pääasiassa purkausputkessa virtaavaa kuumaa kaasua eikä siitä saanut tietoa kaasun poiston toiminnasta. Kyseessä oleva mittaus ohjastettiin siirtämään kaasunpoiston seurannan kannalta optimaaliseen paikkaan.

Lämpömittauksia hyödynnettiin ja tullaan hyödyntämään koeajoissa, joissa tavoitteena on ymmärtää kaasunpoiston toimintaa niin, että poistiventtiilin kulmaa ja puunausekvenssejä voitaisiin jatkossa säätää automaattisesti toimimaan optimaalisesti kaasunpoiston maksimoimiseksi.

8 TÄRINÄMITTAUS REAKTORILLA 1

Reaktori 1:llä esiintyy välillä pääasiassa koivuajojen yhteydessä hyvin voimakasta tärinää reaktorilta alaspäin lähtevässä massan poistoputkessa. Tämä johtuu poistoputkeen kerääntyvistä kaasutaskuista, joissa massa romahtelee alaspäin aiheuttaen kovia tärähdyksiä. Tärähtely saa myös koko reaktorin välillä huojumaan voimakkaasti. Kyseessä oleva ilmiö on vakava ja vaarantaa rakenteiden kestävyyttä ja tämän takia muun muassa reaktorin huipulle tulevaan laimennussuodolinjaan on tullut vuotoja, jolloin linja on jouduttu sulkemaan korjausten ajaksi. Tämä ilmiö rajoittaa myös jossain määrin hapen syöttoa reaktoriin.

Tutkimusten aikana tehdas asensi reaktori 1:lle tärinäanturin. Tärinädatan analysointi osoitti, että tärinää tapahtuu tosiaan enemmän koivuajon aikana. Lisäksi tärinää esiintyy erityisesti lajinvaihdossa ja erityisesti kun laji vaihtuu koivulta havulle (kuva 24).



Kuva 24. Ylin kuva kuplakoko reaktorin huipulla, keskimäinen kuva tärinätaaso ja alin kuva kuidunpituus mikä osoittaa ajettavan lajin ja lajinvaihtojen ajankohdan

Kuplamittauksissa havaittiin, että koivulla kuplat ovat isompia kuin havulla, mikä selittää voimakkaamman tärinän koivuajon aikana. Lisäksi voimakas tärinä havukoivu-lajinvaihdossa selittyy sillä, että havulla happiannos kasvaa noin kaksinkertaiseksi, mutta kierrossa on vielä jonkun aikaa koivun suodosta, johon happi dispergoituu huonommin.

9 HAPPI- JA HIILIMONOKSIDIMITTAUKSET

9.1 Happimittaukset

Tehdas teki suositellut investoinnit kaasunpoistojen tukkeumien puhdistamiseksi eli puunaamiseksi vuosiseisakissa keväällä 2023. Samalla tehtiin kaasunpoistolinjoihin näytteenottoyhteet happimittauksia varten. Kuvissa 25 ja 26 on kuvat molempien reaktoreiden kaasunpoistoista.



Kuva 25. Reaktori 1 kaasunpoisto



Kuva 26. Reaktori 2 kaasunpoisto

Happikonsentraatiomittauksia suoritettiin tehtaan normaalin ajon puitteissa sekä erillisissä hapen lisäys tehdaskoeajoissa. Tämä antoi prosessista uutta olennaista tietoa, jota pystytään hyödyntämään mallinnuksessa. Happipitoisuus kertoi mikä on hapen osapaine reaktorin yläosassa, josta määritetään mallinnusta varten liuennon hapen määrä. Kuvissa 27 ja 28 happikonsentraatiomittaukset molempien reaktoreiden päällä.

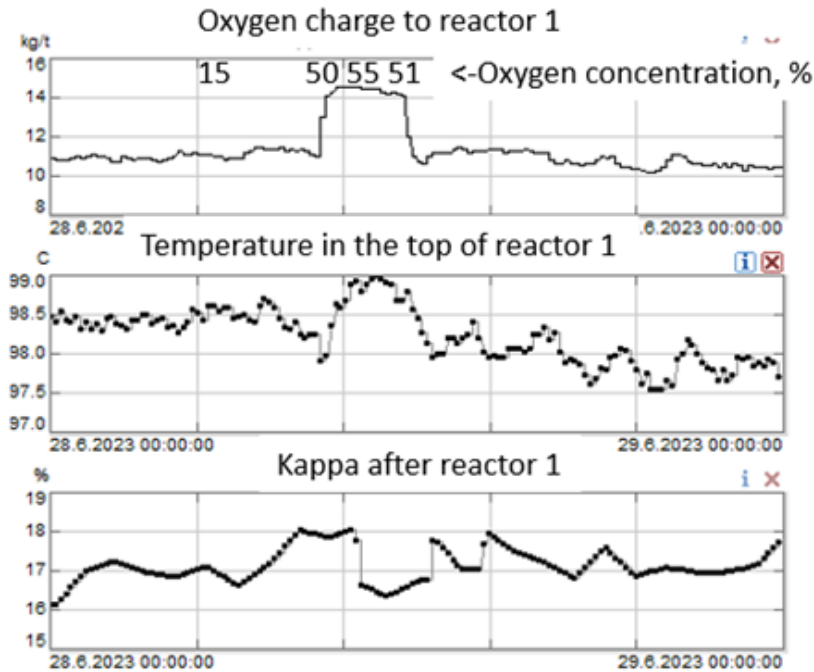


Kuva 27. Reaktori 1 happikonsentraatiomittaus



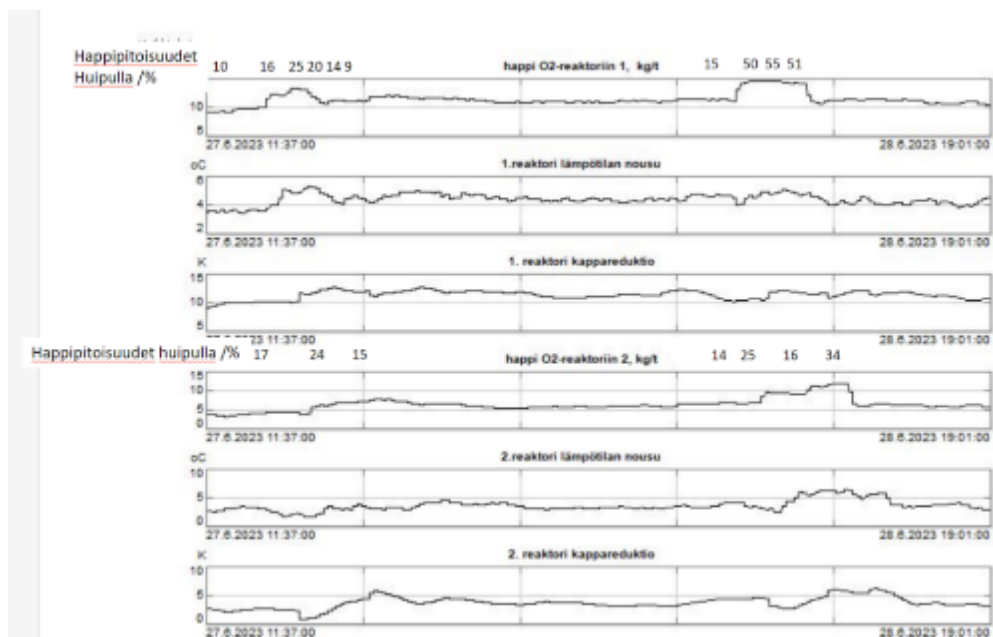
Kuva 26. Reaktori 2 happikonsentraatiomittaus

Tehdaskoeajossa tehtiin reaktorissa 1 hapenlisäys arvosta 11 kg/tonnista 14 kg/tonniin. Samaan aikaan mitattiin happikonsentraatio mittausyhteestä reaktorin yläpäästä. Kuvan 29 tehdasdatan perusteella huomataan, että happikonsentraatio nousi 15 %:sta 55 %:iin. Reaktorin lämpötila nousi yläosassa 0,7 °C ja kappa laski noin 1,3 kappayksikköä.



Kuva 29. Tehdaskoeajon hapenlisäyksen vaikutus

Kuvassa 30 näkyy kerättyä dataa samasta tehdaskoeajosta molemmilta reaktoreilta.

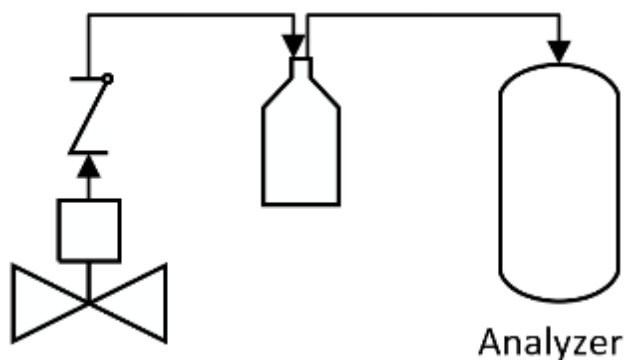


Kuva 30. Happikonsentraation mittaukset koeajossa

Päätuloksena tehdaskokeissa oli, että mallinnus toimii hyvin ja jäännöskaasun happimittaus antaa tärkeää oleellista tietoa mallinnukseen ja reaktorin toiminnan arviointiin. Lisäksi tulokset indikoivat, että hapen syötöissä ja erityisesti reaktori 2:lla esiintyy prosessin toiminnan kannalta merkittävää epähomogeenisuutta. Tätä epäiltiin jo aiemmin, koska hapen syöttöputket ovat syöttömääriin nähden liian isot, jolloin massa voi välillä tukkia hapen syötön. Tavoitteena on seuraavassa seisakissa saada syöttöputket pienennettyä. Tehdaskokeiden tulokset koottiin julkaisuksi. (Käyhkö ym. 2023.)

9.2 Reaktoreiden kaasunpoistojen jatkuvatoiminen mittaus

Happireaktoreiden kaasunpoistoon rakennettiin testimittaus happikonsentraation jatkuvatoimiseen mittaukseen. Suurin ongelma kyseessä olevassa mittauksessa on se, että kaasun mukana voi tulla suodosta ja massaa. Linjan puhdistuksen yhteydessä näitä tulee vielä kovalla paineella. Toimiva mittaus vaatisi siten tehdastietojärjestelmään kytketyn suhteellisen monimutkaisen järjestelmän rakentamisen. Testimittaus on toteutettu suhteellisen yksinkertaisesti kuvan 31 mukaisesti.



Kuva 31. Hapen konsentraation jatkuvatoimisen mittauksen periaate

Kuvassa 32 on jäännöskaasumittauksen varsinainen toteutus.



Kuva 32. Jäännöskaasun happipitoisuus reaktorilla 2

Linjassa on automaattiventtiili, joka avautuu synkronoidusti happimittauksen kanssa kahden tunnin välein 30 sekunnin ajaksi. Venttiilin jälkeen on takaiskuventtiili, joka päästää kaasun lävitse mutta estää virtauksen, jos linjaan tulee paineellista nestettä. Tämän jälkeen on nesteen erotus ja paineentasaussäiliö, josta kaasu kulkeutuu nestesuodattimen läpi mittarille. Mittaus otettiin käyttöön talvella ja pääasiassa pakkasten takia tämän oli hieman haasteellista ja mittaus pysyi toiminnassa vain hyvin lyhyitä aikoja. Lisäksi massa oli usein tukkinut takaiskuventtiilin. Mittauksen kehitystyö jatkuu.

9.3 Hiilimonoksidimittaukset

Kaasunäytteiden saaminen prosessista mahdollistaa myös hiilimonoksidin pitoisuuden mittauksen. Kyseinen mittaus voisi olla prosessin kannalta olennaista, koska hiilimonoksidia muodostuu pääasiassa hiilihydraattien ja hapen välisissä reaktioissa. Tällöin hiilimonoksidimittauksella voisi olla mahdollista saada tietoa, kuinka paljon prosessissa tapahtuu saantoa ja viskositeettia alentavia reaktioita.

Mittauksia tehtiin happireaktori 2:lla hönkäpiipusta, reaktori 2:n kaasunpoistosta sekä happivaiheiden välissä olevan boosteripumpun kaasunpoistosta.

Myös tämä mittaus saatiin kesällä toimimaan hetkellisesti etäyhteydellä ja jatkuvatoimisesti, joten sitä pystyttiin seuraamaan reaaliaikaisesti. Ongelmana mittauksessa oli se, että pitoisuus ylitti usein mittarin mittausalueen, jolloin mittaus pysähtyi. Jatkuvatoiminen mittaus vaatisi siten erillisen näytteen laimennusyksikön tai mittarin, jonka mittausalue on suurempi. Tällaisia hiilimonoksidimittauksia on kuitenkin hyvin hankalasti saatavilla.



Kuva 33. Hiilimonoksidimittaukset hönkäpiipusta



Kuva 34. Savukaasuanalysointilaitteisto

Kuvassa 33 on kuvattu hiilimonoksidimittaukset hönkäpiipusta, mihin johdetaan happireaktoreilta sekä valkolipeän hapetuksesta tulevat jäännöskaasut sekä kuvassa 34 savukaasuanalysointilaitteisto mittaamassa kyseistä kohtaa.

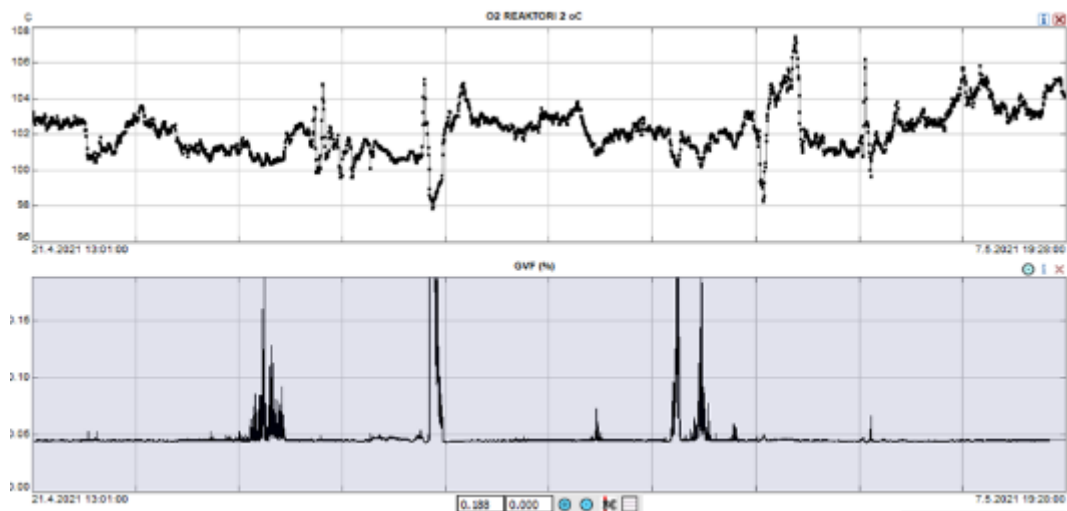
10 ECHOWISE-KAASUOSUUS

Echowise kaasunosuus, lämpötila ja virtausmittaus suoritettiin kahdesta eri paikasta. Ensimmäiseksi Echowise DN -600 anturilla asennettiin happivaiheen jälkeisen pesuriin syöttöön tehtaan alatasolle, jossa mittauskohdassa oli ylipainetta noin 3,4 baaria (kuva 35).



Kuva 35. Echowise DN600 anturi asennettuna alatasolle DD-pesurin syöttöön

Paikka ei ollut kuitenkaan ihanteellinen kaasuosuusmittaukselle, sillä mittaus näytti lähinnä nollaa. Mittaus sinänsä toimi, sillä havaitut suuremmat kaasupitoisuudet ajoittuivat kohtiin, joissa happireaktorin jättölämpötila oli alhainen ja siten kaasujen poisto flässäyksellä heikompaa (kuva 36).



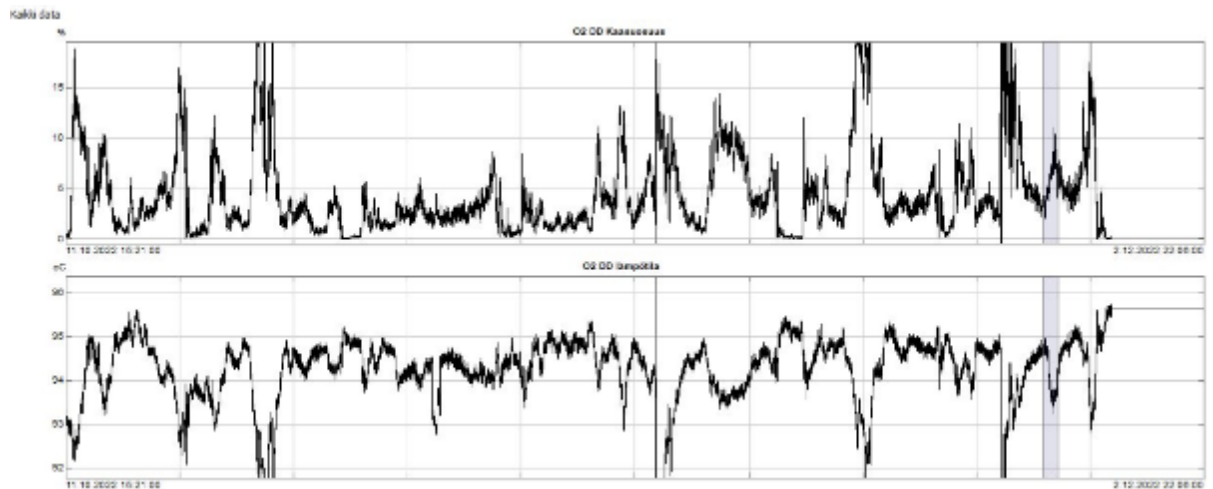
Kuva 36. Happivaiheen jättölämpötila, ylempi kuva, ja pesurin syötöstä mitattu kaasupitoisuus, alempi kuva

Pesurin syötöstä löydettiin asennuspaikka DN 300 -anturille, joka Kuitulaboratoriolla sattui olemaan käytössä ja vapaana. Echowise asennettiin happivaiheen jälkeiselle DD1-pesurin syöttölinjaan kuvan 37 mukaisesti.



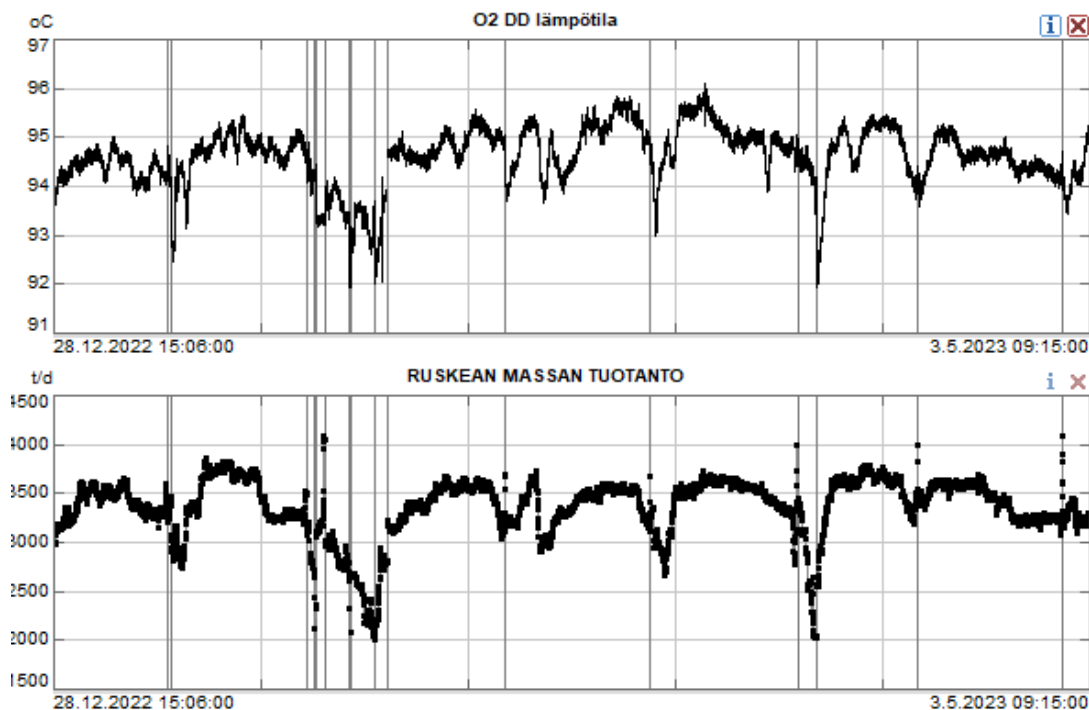
Kuva 37. Echowise-prosessissa happivaiheen jälkeisessä DD1-pesurin syöttölinjassa

Kyseessä olevassa kohteessa Echowise toimi erinomaisesti ja esimerkiksi negatiivinen korrelaatio kaasupitoisuuden ja pesurille syötettävän massan lämpötilan kanssa oli hyvin selkeä (kuva 38).



Kuva 38. DD-pesurin syöttömassan kaasuosuuden sekä Echowisella mitatun syöttömassan lämpötilan negatiivinen korrelaatio

Pesurille syötettävän massan lämpötila määräytyy happivaiheen poistolämpötilan mukaan, mikä puolestaan määrää happivaiheen jäännöskaasujen poiston tehokkuuden. DD-pesurin syöttömassan kaasupitoisuuden vaikutusta pesurin toimintaan yritettiin etsiä vertaamalla tätä pesurin toimintaa kuvaaviin suureisiin, kuten pesurin rummun pyörintänopeus ja momentti. Tämä oli kuitenkin hyvin hankalaa, koska pesurin syöttömassan lämpötila ja tuotanto korreloivat hyvin vahvasti (kuva 39). Tuotanto puolestaan vaikuttaa voimakkaasti pesurin toiminta-arvoihin.



Kuva 39. DD-pesurin syöttömassan kaasuosuuden sekä havumassan tuotannon korrelaatio

Kaasuosuuden vaikutusta pesurin toimintaan on tehtaalla jatkossa tarkoituksena selvittää hyödyntämällä pesurille asennettujen refraktometrien antamaa tietoa pesutehokkuudesta sekä tekemällä tehdaskokeita, joissa pesurin syötön kaasupitoisuutta muutetaan tuotannosta riippumatta.

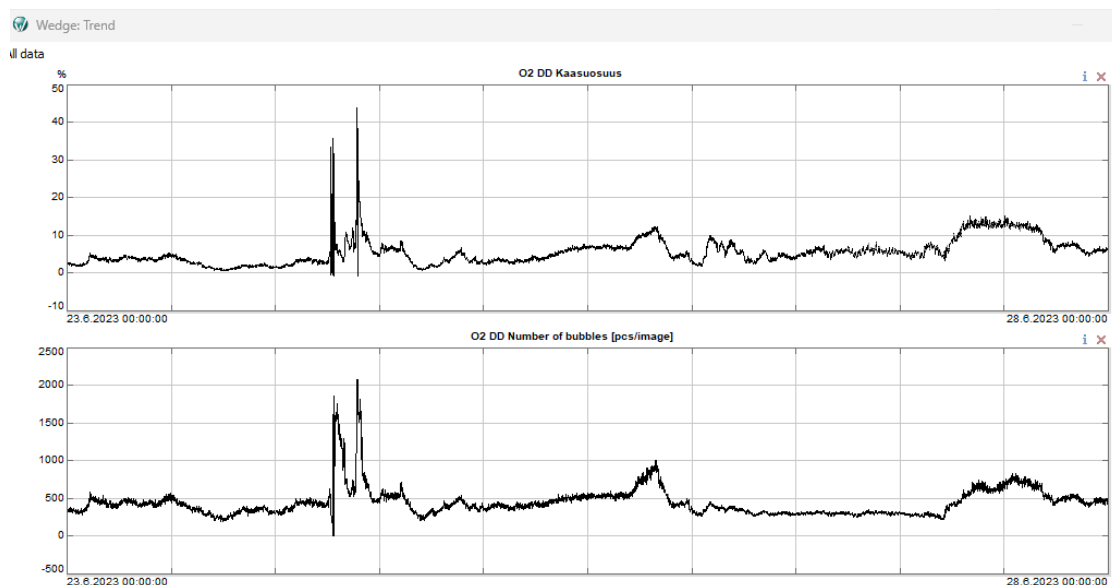
11 KUPLAMITTAUKSET DD-PESUREILLA

Kuvassa 40 kuplakuvausjärjestelmä mittaamassa happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin kuplakokoja ja määrää.



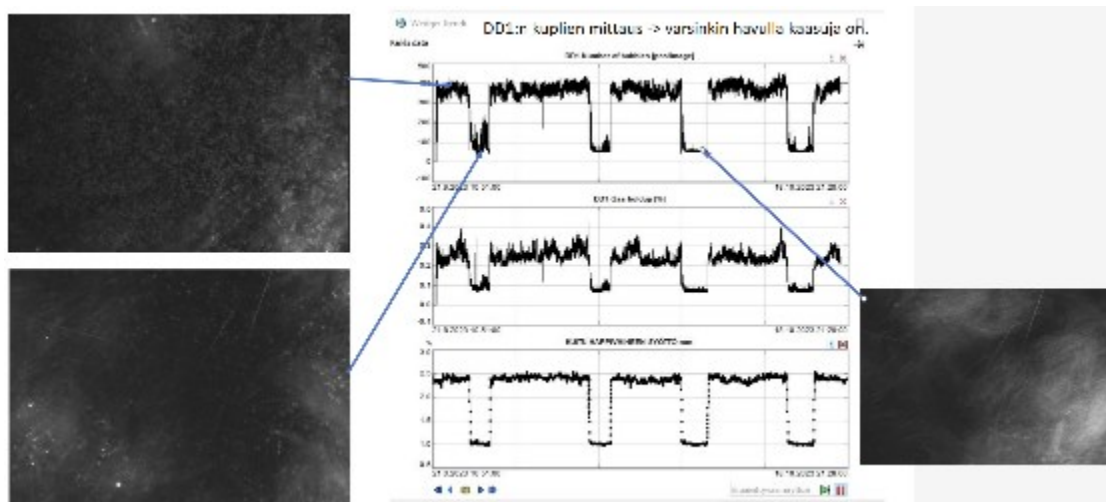
Kuva 40. Pixact kuplakuvausjärjestelmä

Kuvassa 41 on esitetty happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin kaasupitoisuus Echowisellä ja kuplakuvantamisella mitattuina. Vahva korrelaatio indikoi, että kuplakuvantamisella voidaan melko hyvin mitata MC-massan kaasupitoisuutta.



Kuva 41. Happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin kaasuosuus ja kuplakuvausmittaukset

Kuvassa 42 näkyy happivaihetta edeltävän DD1-pesurin kuplien mittaus, josta Wedge-datan sekä kuplakuvauskameran otosten perusteella havaitaan, että kaasuja on ja niitä esiintyy etenkin havuajossa. Kyseessä olevassa kohteessa kuplakuvausta olisi mahdollista hyödyntää esimerkiksi vaahdonestoaineiden annostelun optimoinnissa.



Kuva 42. Happivaihetta edeltävän DD1 pesurin kuplien mittaus

12 PROSESSIREFRAKTOMETRIT

Koetehtaalle lisättiin prosessirefraktometreja yhteistyössä tehtaan ja laitetoimittajien kanssa. Asennusyhteiden asennukset tapahtuivat vuosiseisakin aikana tehtaan toimesta, jonka jälkeen prosessirefraktometreille kaapeloitiin sähköt ja järjestettiin yhteys tehdasjärjestelmään.

Prosessirefraktometrien paikat on lueteltu tekstissä kuvan 13 (sivu 32) prosessikaavion mukaan. Kuvissa 43 sekä 44 nähdään keittimen jälkeisen DD1-pesurin syöttömassa (1) ja happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin syöttömassa (9) olevat prosessirefraktometrit.



Kuva 43. Keittimen jälkeisen DD-1 pesurin syöttömassan prosessirefraktometri



Kuva 44. Happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin syöttömassan prosessirefraktometri

Kuvassa 45 on kuvattu syöttömassojen yhteinen lähetin. Lähettimestä saadaan luettua lämpötila sekä liuenneen aineen konsentraatio ja halutessa muita parametrejä, sekä saadaan tarvittaessa muutettua arvoja.



Kuva 45. Syöttömassojen yhteinen lähetin

Asennuksien jälkeen tehtiin refraktometrien kalibrointi, joka toteutettiin ottamalla jokaisesta mittauspisteestä suodos- tai massanäytteitä. Massalinjoista otetuista näytteistä puristettiin suodosnäyte näytepuristimella heti näytteenoton jälkeen. Suodosnäytteestä määriteltiin liuennut kuiva-aine Kuitulaboratorion laboratoriossa standardin ISO 638-1:2022 mukaan. Otetuista näytteistä laboratoriossa määritetyistä TDS-arvoista laskettiin keskiarvo lukema kullekin mittauspisteelle. Laboratoriomääritysten perusteella säädettiin lähettimien TDS-lukema vastaamaan laboratorioarvoja. Näytekierroksia kalibrointeja varten otettiin kolme muutaman viikon välein, viikoilla 50/2023, 5/2024 ja 10/2024. On huomioitu kuitenkin, että mittauksen kalibrointi ei ole täysin oikea, jos tuotanto ja massan puhtaus muuttuvat paljon. Tämän vuoksi koejaksoilta on hyvä ottaa vielä lisää näytteitä, että lopulliset kalibrointitiedot voidaan vielä tarkistaa jälkikäteen.

Kuvissa 46 ja 47 on kuvattu keittimen jälkeisen DD1-pesurin puhtaamman pesunesteen (2) ja happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin pesunesteen pesupuristimen (10) prosessirefraktometrit sekä näiden yhteinen lähetin (kuva 48). Lähettimet kaapeloitiin käytännön syistä niin, että kaksi prosessirefraktometriä saatiin aina yhteen lähettimeen.



Kuva 43. Prosessirefraktometri keittimen jälkeisen DD-1 pesurin puhtaampi pesuneste



Kuva 44. Prosessirefraktometri happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin pesuneste pesupuristimelta



Kuva 48. Pesuneste lähettin

Kuvissa 49 ja 50 on asennetut prosessirefraktometrit keittimen jälkeiseltä DD1-pesurin palautussuodoksesta (3) sekä happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin palautussuodoksesta (11) näiden yhteisen lähettimen kanssa (kuva 51).



Kuva 49. Prosessirefraktometri keittimen jälkeisen DD-1 pesurin palautussuodos



Kuva 50. Prosessirefraktometri happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin palautussuodos



Kuva 51. Palautussuodosten yhteinen lähetin

Kuvissa 52 ja 53 prosessirefraktometrit ovat mittaamassa happivaiheen yksi (4) ja kaksi (6) syöttömassoja yhteisellä lähettimellä (kuva 54).



Kuva 52. Happivaiheen 1 prosessirefraktometri



Kuva 53. Happivaiheen 2 prosessirefraktometri



Kuva 54. Happivaiheen syöttöjen yhteinen lähetin

Edellä esitettyjen online-mittausten avulla yhdessä tehtaan muiden mittausten (esimerkiksi sakeus, virtaus, DF ja tuotanto) kanssa voi luvussa kaksi esitettyjen kaavojen avulla laskea tehokkuusarvoja pesureille. Seuraavaksi tehtaan DCS-järjestelmään tuodaan Y_{10} -laskelmat. Tätä kyseistä online-laskelmaa tul- laan hyödyntämään, kun myöhemmin 2024 tulevissa koeajoissa etsitään opti- mia ajotapaa pesureille muun muassa sakeuksien suhteen.

13 MUUT MITTAUKSET

Happivaiheeseen saattaa tulla merkittäviä määriä kaasuja syöttömassan mukana, jolloin nämä tulisi myös huomioida happivaiheen mallinnuksessa. Tätä arvioitiin ajamalla havumassaa näytteenottimelta suoraan muoviputkeen, jonka tilavuus oli mitattu vedellä, punnitsemalla putki ja laskemalla tästä massan tiheys. Kuvassa 55 on esitetty kyseinen mittausmenetelmä.



Kuva 55. Reaktori yhden syöttömassan kaasupitoisuuden mittaus tiheyden perusteella

Massan kaasupitoisuudeksi saatiin kaksi prosenttia, mikä on niin pieni lukema, että tätä ei tarvitse huomioida mallinnuksessa. Menetelmää on mahdollista hyödyntää myös muissa mahdollisissa kohteissa MC-massan kaasupitoisuuden mittaamiseksi.

14 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena ollut mittauksien kehittäminen, käyttöönotto ja hyödyntäminen prosessitutkimuksissa onnistui hyvin. Tulosten arviointia, ongelmien ratkaisuja ja dokumentointia vaikeutti vertailutulosten puuttuminen, sillä tämänkaltaista tutkimusta vastaavan tasoilla laitteilla sellutehtaan kuitulinjalla happidelignifioinnissa ja sen ympärillä olevilla DD-pesureilla kokonaisvaltaisesti ei ole aikaisemmin tehty.

Kaasujen tutkiminen kuitulinjalla on hyvin tärkeää, sillä ylimääräisten kaasujen läsnäolo heikentää keiton ja pesuvaiheiden toimintaa. Se voi myös muilla tavoin merkittävästi haitata tehtaan ajettavuutta esimerkiksi suovan erotuksessa ja säiliöiden pintojen hallinnan kautta.

Prosessirefraktometrien pohjalta rakennettu online-tehokkuusseuranta mahdollistaa optimi ajotavan etsimisen pesulaitteelle ja tarvittaessa säätämään ajoparametreja. Optimoinnilla voidaan parantaa massan laatua ja säästää energiaa.

Mittauksia tehdessä kävi siis ilmi, että tämä tehdas ei käytä nestemäistä happea. Tehtaalla on oma happilaitos ja kaasu tuotetaan kaasumaisena suoraan tehtaan putkilinjoihin. Hapen puhtaus on 93 +/- 0,5 prosenttia, joten kaasun typipitoisuus on noin seitsemän prosenttia. Koska reaktorien yläosassa on aina jäännöskaasua, jonka happipitoisuus vaihtelee, ei kuplamittausten käyttäminen jäännöshapen mittaamiseen reaktoreiden yläpäässä tässä tapauksessa toiminnut, sillä jäännöskaasu oli typpeä.

Sellutehtaalle on jo ehdotettu jatkotoimenpiteitä mittausten ja tuotannon parantamiseksi. Jatkuvatoimisia kaasupitoisuusmittauksia voitaisiin käyttää myös kaasupohjaisten pesuongelmien hallinnassa.

Tulosten perusteella hapen syötössä oli epätasaisuutta molemmilla reaktoreilla, joten tehtaalle on suositeltu hapensyöttöputkien pienentäminen seuraavassa vuosiseisakissa. Nyt liian pienillä nopeuksilla isoon syöttöputkeen tulee liikaa virtausvaihtelua, josta syntyy tukkeutumisongelmia. Putken mitoituksessa on otettava huomioon itsesyttymisen vuoksi hapen nopeus, joka ei saa ylittää 30 m/s.

Tehtaalle on asennettu omat kaasupoistolinjan lämpötilamittaukset meidän tutkimuslämpötila-antureiden lisäksi. Suosituksena on vaihtaa reaktori 2:n lämpötilamittauksen paikkaa, sillä lämpötilamittaus on asennettu nyt liian lähelle isoa höyrypurkauspiippua, jonka vuoksi lämpötila vääristyy ja näin ollen lämpötilamittausta ei voida hyödyntää kaasupoistimen toiminnassa.

Hankkeessa on kehitetty ja hyödynnetty laajasti uudenaikaisia mittauksia, mallinnusta sekä digitaalisia etäseuranta- ja analysointimenetelmiä. Samalla edesautettiin mallinnus- ja mittausmenetelmien käyttöönottoa teollisuudessa. Laboratoriokokeita ja mallinnusta kuitenkin jatketaan. Vielä jäi tutkittavaa ja kehitettävää mittalaitteisiin ja tulosdatan reaaliaikaiseen analysointiin, jotta voitaisiin tehostaa sellutehtaan prosesseja niin, että saavutetaan merkittäviä säästöjä energian, materiaalien ja veden kulutuksessa. Tällöin voitaisiin säästää haihdutuksen energiakustannuksissa sekä vähentää jätevesilaitosten kuormitusta.

LÄHTEET

Biotuotetehtaan ympäristölupapäätös. 2015. PDF-dokumentti.

Buckman. 2023. Ackumen Echowise Pro. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.buckman.com/smart-technology/echowise/> [viitattu 26.9.2023].

Dahl, O., Saari, J. & Sillanpää, M. 1999. Sellun pesun perusmekanismit. Raportti 236. Oulu: Oulun yliopisto.

Dahl, O., Vuorenvirta K., Vuorinen, T., Sonni, H., Lähteenmäki, E., Kekkonen, J., Tervola, P. & Ala-Kaila K. Massan pesu. PDF-dokumentti. KCL Notes 35. Seminaari 22.5.2002. Saatavissa: <https://research.aalto.fi/en/publications/pesu-vaiheiden-ja-niiden-yhteenkytkeytymisen-vaikutukset-vaikaisur> [viitattu 2.1.2024].

Dräger. 2023. Dräger's Guide to Portable Gas Detection. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://draeger-mo.com/media/files/9046736_infoflip_pgd_en.pdf [viitattu 10.10.2023].

Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. 2009. Pulp and Paper Chemistry and Technology Volume 2. Walter de Gruyter GmbH & Co. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5597689/mod_resource/content/1/Pulping%20Chemistry%20and%20Technology%20-Vol%202-%20De%20Gruyter.pdf [viitattu 2.11.2023].

ForestBioFacts. 2023a. Oxygen-alkali delignification. Päivitetty 19.05.2021. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/pulping-and-biorefining/oxygen-alkali-delignification/> [viitattu 26.12.2023].

ForestBioFacts. 2023b. Oxygen delignification. Päivitetty 14.11.2020. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/process-control-and-automation/fibre-process-automation/bleach-plant-control/oxygen-delignification/> [viitattu 26.12.2023].

Humitec. 2023. Testo 350. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://clea-nairengnew.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2020/12/testo-350-brochure.pdf> [viitattu 10.10.2023].

ISO 638-1:2022. Paper, board, pulps and cellulosic nanomaterials
Determination of dry matter content by oven-drying method.

ISO 15705:2002(E). Water quality — Determination of the chemical oxygen demand index (ST-COD) — Small-scale sealed-tube method.

Karjalainen, S. 2008. DD-pesurin ajomallin kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. Kemian ja materiaalitieteiden tiedekunta. Puunjalostustekniikka. Diplomityö.

Knowpulp. 2023 Happidelignifointi. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/oxygen_delign/1_general/frame.htm [viitattu 2.1.2024].

Knowpulp. 2024. Pesun periaate ja tunnusluvut. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/washing/2_washing_theory/frame.htm?zoom_highlightsub=ruskean+massaan+pesu [viitattu 5.1.2024].

Knowpulp. 2023. Wedge. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/automation/process_analysis/1_wedge/frame.htm?zoom_highlightsub=wedge [viitattu 27.12.2023].

Kontram. 2023. Prosessirefraktometrit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kontram.fi/laitteet/analysointilaitteet-ja-naytteenkasittely/prosessirefraktometrit.html> [3.11.2023].

Kopra, R. 2024. TKI-asiantuntija. Suullinen tiedoksianto 8.1.2024. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Kuitulaboratorio.

Kopra, R. 2015. Application of the refractometer in the measurement and monitoring of brown stock washing. Aalto-yliopisto. Puunjalostustekniikan laitos. Väitöskirja. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/series/api/core/bitstreams/7b5503c3-5f0a-46d0-a778-699b2c7b29ca/content> [viitattu 5.1.2024].

Kopra, R. 2004. Pesemökartoitus viidelle sulfaattiselluloosatehtaalle. Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. Diplomityö.

Kopra, R. 2023. Sellutehtaan ruskean massan pesu ja on-line tds-mittausjärjestely. Teoksessa Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia: Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä: vuosijulkaisu 2023. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 128–135. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/814483/URNISBN9789523445550.pdf?sequence=5&isAllowed=y> [viitattu 4.1.2024].

Kopra, R., Käyhkö, J. & Kärkkäinen, K. 2020. Hankkeessa käytetyt jatkuvatoimiset on-line-mittaukset sekä näihin liittyvä kehitystyö. Teoksessa Kopra R. (toim.) Gasopti: Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset biojalostamo- ja vesiprosessissa. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 6–66. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/340264/URNISBN9789523442511.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [viitattu 26.9.2023].

Kopra, R., Käyhkö, J. & Peltonen, K. 2019. Kuha-hankkeessa merkittäviä tuloksia kuitulinjan toimintojen kehittämiseksi. Teoksessa Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia: Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä: vuosijulkaisu 2019. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 132–145. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/788712/URNISBN9789523445024.pdf?sequence=5&isAllowed=y> [viitattu 26.12.2023].

Kopra, R., Käyhkö, J. & Peltonen, K. 2019. Vaahdonestoaineen vaikutus ilmapitoisuuteen ja happivaiheen pesureiden toimintaan sellutehtaan kuitulinjalla. Teoksessa Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia: Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä: vuosijulkaisu 2019. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 250–254. Saatavissa:

<https://www.tappi.org/content/Events/19PEERS/19PEE37.pdf> [viitattu 3.1.2024].

Pixact. 2023. User manual ver. 20.09.2023. PDF-dokumentti.

Remtec. 2023. Lämpötilan mittaus teollisuuden prosesseissa onnistuu luontevasti laadukkailla laitteilla. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://remtec.fi/lampotilan-mittaus-teollisuuden-prosesseissa-onnistuu-luotettavasti-laadukkailla-laitteilla/> [viitattu 3.11.2023].

Saarinen, T. 2011. Hiilidioksidin fysikaalisen erotusprosessin prosessiolosuhteet. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Ympäristöteknologia. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/39376/Saarinen_Tuire.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 12.10.2023]

Savcor Forest Oy. 2009. Wedge-käyttöopas. PDF-dokumentti.

Sellukurssi. 2017. Massan pesu, happivaihe ja valkaisu. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://maarjansellukurssi.blogspot.com/2017/01/massan-pesu-happivaihe-ja-valkaisu.html> [viitattu 15.1.2024.]

Seppälä, M., Klemetti, U., Kortelainen, V-A., Lyytikäinen, J., Siitonen H. & Siironen, R. 2005. Kemiallinen metsäteollisuus 1: paperimassan valmistus. Helsinki: Opetushallitus.

SFS 3008. 1990. Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määräitys.

Vaisala. 2020. Vaisala K-PATENTS® Semicon Refractometer PR-23-MS. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/PR-23-MS-Semicon-Refractometer-B211893EN.pdf> [viitattu 9.11.2023].

Van Heiningen, A. 2017. State of knowledge of oxygen delignification. University of Maine, Orno, ME, USA. PDF-tiedosto. Saatavissa: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/3.4.Bleaching_Oxygen_delignification.pdf [viitattu 30.12.2023].

KUVALUETTELO

Kuva 1. Havainnekuva ruskean massan pesusta. Knowpulp. Ruskean massan pesu. 2024.

Kuva 2. Kaaviokuva pesuvaiheesta. Kovasin, K. 2002. Sellun pesun ja kemiikaikierron laskenta. Sellun pesu mustalipeäprosessin osana. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. Mukailen Herranen, N. 31.12.2023.

Kuva 3. Happidelignifioinnin sijoittuminen pesuvaiheisiin. Knowpulp. Happidelignifioinnin sijoittuminen pesuvaiheisiin. Mukailen Herranen, N. 2.1.2024.

Kuva 4. Hapen ja ligniinin aineensiirto happidelignifioinnissa. Mutikainen, H. 2011. Happidispersion karakterisointi laboratoriosekoittimessa. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. LUT Kemia. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/67437/nbnfi-fe201103091313.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [viitattu 31.12.2023]. Mukailen Herranen, N. 31.12.2023.

Kuva 5. Pixact kuplakuvauuskamera ja tietokone. Pixact. 2023. User manual ver. 20.09.2023. PDF-dokumentti.

Kuva 6. Kaasumaisten komponenttien muuntotaulukko. Dräger. 2023. Dräger's Guide to Portable Gas Detection. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://draeger-mo.com/media/files/9046736_infoflip_pgd_en.pdf [viitattu 10.10.2023].

Kuva 7. Testo 350 savukaasuanalysaattori. Testo 350 savukaasuanalysaattori. Herranen, N. 10.10.2023.

Kuva 8. Geotech 110. Herranen, N. 29.9.2023.

Kuva 9. Taitekerroinmittaus, jossa α on kokonaisheijastuksen rajakulma. Vaisala. 2020. Vaisala K-PATENTS® Semicon Refractometer PR-23-MS. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/PR-23-MS-Semicon-Refractometer-B211893EN.pdf> [viitattu 9.11.2023]. Mukailen Herranen, N. 9.11.2023.

Kuva 10. Turbulentteja virtauksessa. Buckman. 2023. Ackumen Echowise Pro. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.buckman.com/smart-technology/echowise/> [viitattu 26.9.2023].

Kuva 11. Echowise-anturi vasemmalla ja mittausyksikkö oikealla. Herranen, N. 26.9.2023.

Kuva 12. Wedge-kaavio esimerkki. Herranen, N. 27.12.2023.

Kuva 13. On-line-mittausten asennuspaikat prosessissa. Herranen, N. 23.1.2024.

Kuva 14. Reaktori yhden syöttö Herranen, N. 14.9.2023.

Kuva 15. Kuplakoko ykkös- ja kakkosreaktoreiden syötössä. Käyhkö, J. 22.9.2023.

Kuva 16. Kuplakuvaus reaktori yhden päällä. Käyhkö, J. 15.4.2023.

Kuva 17. Reaktori kahden yläpään kuplakuvaus. Herranen, N. 16.9.2023.

Kuva 18. Kuplakuvauskameran kuva reaktori kahden yläpäässä. Herranen, N. 3.1.2024.

Kuva 19. Reaktori yhden yläpään jäännöskaasun happipitoisuuden mittaust. Käyhkö, J. 16.6.2023.

Kuva 20. Lämpötilamittaukset reaktori ykkösellä. Herranen, N. 17.1.2024

Kuva 21. Lämpötilamittaukset reaktori kakkosella. Herranen, N. 17.1.2024

Kuva 22. Esimerkki kaasunpoistoputken lämpötilamittausten toiminnasta. Herranen, N. 5.1.2024

Kuva 23. Lämpötilamittauskuva tietokoneen näytöltä. Herranen, N. 5.1.2024

Kuva 24. Ylin kuva kuplakoko reaktorin huipulla, keskimäinen kuva tärinätaso ja alin kuva kuidunpituus mikä osoittaa ajettavan lajin ja lajinvaihtojen ajankohdan. Käyhkö, J. 23.2.2024.

Kuva 25. Reaktori yhden kaasunpoisto. Herranen, N. 17.10.2023.

Kuva 26. Reaktori kahden kaasunpoisto. Herranen, N. 29.8.2023.

Kuva 27. Reaktori yhden happikonsentraatiomittaukset. Herranen, N. 17.10.2023.

Kuva 28. Reaktori kahden happikonsentraatiomittaukset. Herranen, N. 17.10.2023.

Kuva 29. Tehdaskoeajon hapenlisäyksen vaikutus. Käyhkö, J. 5.7.2023.

Kuva 30. Happikonsentraation mittaukset koeajossa. Herranen, N. 8.1.2024.

Kuva 31. Hapen konsentraation jatkuvatoimisen mittauksen periaate. Herranen, N. 23.2.2024.

Kuva 32. Jäännöskaasun happipitoisuus kakkosreaktorilla. Käyhkö, J. 20.2.2024.

Kuva 33. Hiilimonoksidimittaukset hönkäpiipusta. Herranen, N. 5.7.2023.

Kuva 34. Savukaasuanalysointilaite. Herranen, N. 5.7.2023.

Kuva 35. Echowise DN600 anturi asennettuna alatasolle DD pesurin syöttöön. Käyhkö, J. 13.10.2022.

Kuva 36. Happivaiheen jättölämpötila, ylempi kuva, ja pesurin syötöstä mitattu kaasupitoisuus, alempi kuva. Käyhkö, J. 13.10.2022.

Kuva 37. Echowise prosessissa happivaiheen jälkeisellä DD1-pesurin syöttölinjassa. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 38. DD-pesurin syöttömassan kaasuosuuden sekä Echowisella mitatun syöttömassan lämpötilan negatiivinen korrelaatio. Käyhkö, J. 13.6.2023.

Kuva 39. DD-pesurin syöttömassan kaasuosuuden sekä havumassan tuotannon korrelaatio. Käyhkö, J. 13.6.2023.

Kuva 40. Pixact kuplakuvausjärjestelmä. Herranen, N. 7.9.2023.

Kuva 41. Happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin kaasuosuus ja kuplakuvausmitaukset. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 42. Happivaihetta edeltävän DD1 pesurin kuplien mittaaminen. Käyhkö, J. 5.7.2023.

Kuva 43. Keittimen jälkeisen DD1-pesurin syöttömassan prosessirefraktometri. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 44. Happivaiheen jälkeisen DD-1 pesurin syöttömassan prosessirefraktometri. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 45. Syöttömassojen yhteinen lähetin. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 46. Prosessirefraktometri keittimen jälkeisen DD1-pesurin puhtaampi pesuneste. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 47. Prosessirefraktometri happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin pesuneste pesupuristimelta. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 48. Pesuneste lähetin. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 49. Prosessirefraktometri keittimen jälkeinen DD1-pesurin palautussuodos. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 50. Prosessirefraktometri happivaiheen jälkeisen DD1-pesurin palautussuodos. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 51. Palautussuodosten yhteinen lähetin. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 52. Happivaiheen 1 syöttömassa prosessirefraktometri. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 53. Happivaiheen 2 syöttömassa prosessirefraktometri. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 54. Happivaiheen syöttöjen yhteinen lähetin. Herranen, N. 2.2.2024.

Kuva 55. Reaktori yhden syöttömassan kaasupitoisuuden mittaus tiheyden perusteella. Käyhkö, J. 13.10.2022.