

GASOPTI

– Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset
biojalostamo- ja vesiprosesseissa

Riku Kopra (toim.)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Riku Kopra (toim.)

GASOPTI

– Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset
biojalostamo- ja vesiprosesseissa

**BUSINESS
FINLAND**



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

XAMK KEHITTÄÄ 113

**KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2020**

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Jari Käyhkö

Taitto- ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-254-2 (nid.)

ISBN: 978-952-344-251-1 (PDF)

ISSN: 2489-2467 (nid.)

ISSN: 2489-3102 (verkkójulkaisu)

julkaisut@xamk.fi

LUKIJALLE

GasOpti – Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset biojalostamo- ja vesiprosesseissa -hanke toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -vakuusosalalla Savonlinnan Kuitulaboratoriossa ja Mikkelin ympäristöturvallisuuden tutkimusryhmässä. Hanketta rahoittivat Business Finland Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR 2014–2020), Andritz Oy, Janesko Oy, Carbonreuse Finland Oy, Pixact Oy, Solenis Finland Oy, Juvan Bioson Oy ja Metsäsairila Oy. Hankkeen virallinen hankenumero on A73401, Dnro 3950/31/2017.

GasOpti-hankkeen toteutusaika oli 1.1.2018–31.12.2019. Hankkeen projektipäällikkönä työskenteli TkT Riku Kopra. Savonlinnan osiossa oli Kopran lisäksi työntekijöinä TkT Jari Käyhkö, TkT Marko Rasi, DI Kari Kärkkäinen, DI Teijo Linnanen, AMK insinööri Antti Pappinen ja laborantti Anu Pihlajaniemi. Mikkelin osiossa oli tutkimusinsinööreinä FT Sami Mörsky, DI Tuomas Vanhanen ja DI Tiina Saario. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi tutkimusjohtaja, FT Lasse Pulkkinen. Hankkeen toteutukseen ovat osallistuneet myös hankeasiantuntija Tiina Heikkinen sekä FT Yrjö Hiltunen.

Hanketyön etenemistä ohjasi ja valvoi ohjausryhmä, jonka jäseniä olivat Kari Peltonen (Andritz Oy), Hannu Eloranta (Pixact Oy), Tatu Kumpulainen (Solenis Finland Oy), Timo Juutilainen (Carbonreuse Finland Oy), Juha Jääskeläinen (Janesko Oy), Sami Hirvonen (Metsäsairila Oy), Heikki Teittinen (Juvan Bioson Oy), Riku Kopra (Xamk/Kuitulaboratorio), Lasse Pulkkinen (Xamk/Kuitulaboratorio), Jari Käyhkö (Xamk/Kuitulaboratorio), Yrjö Hiltunen (Xamk/Kuitulaboratorio), Hanne Soininen (Xamk/Metsä, ympäristö ja energia/Mikkeli). Hankkeen ohjausryhmän kokouksiin on rahoittajan edustajana osallistunut Kari Koskela ja myöhemmin Markku Lämsä Business Finlandista.

Tekijät kiittävät hankkeen rahoittajia kehittämistyön mahdollistamisesta sekä hankkeen sisäisten työryhmien jäseniä ja hankkeeseen osallistuneita yrittäjiä aktiivisesta ja kehitysmyönteisestä osallistumisesta hanketyöhön.

Savonlinnassa ja Mikkelissä 15.4.2020

Tekijät

TEKIJÄT

RIKU KOPRA, TkT, TKI-asiantuntija, projektipäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

JARI KÄYHKÖ, TkT, TKI-asiantuntija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

TEIJO LINNANEN, DI, projektitutkija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

KARI KÄRKKÄINEN, DI, projektipäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

ANTTI PAPPINEN, AMK insinööri, projektitutkija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

HANNE SOININEN, TkT, tutkuspäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

TIINA SAARIO, DI, projektipäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

YRJÖ HILTUNEN, FT, tutkuspäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| LUKIJALLE..... | 3 |
| TEKIJÄT | 4 |
| KAASUJEN HALLINNAN ÄLYKKÄÄT SOVELLUKSET BIOJALOSTAMO- JA VESIPROSESSEISSA - JOHDANTOA AIHEESEEN | 6 |
| Riku Kopra & Jari Käyhkö & Tiina Saario & Hanne Soininen | |
| HANKKEESSA KÄYTETYT JATKUVATOIMISET ON-LINE-MITTAUKSET SEKÄ NÄIHIN LIITTYVÄ KEHITYSTYÖ..... | 9 |
| Riku Kopra & Jari Käyhkö & Kari Kärkkäinen | |
| ON-LINE-MITTAUS- JA KOEJÄRJESTELYT TEHTAILLA..... | 16 |
| Riku Kopra & Jari Käyhkö | |
| TEHDAS- JA MITTAUSDATAN SIIRTO JA ANALYSOINTI | 21 |
| Jari Käyhkö & Kari Kärkkäinen | |
| KUPLANMUODOSTUKSEEN LIITTYVÄT LABORATORIOKOKOET | 28 |
| Jari Käyhkö & Antti Pappinen | |
| TDS-KOKEIDEN TULOKSET..... | 31 |
| Riku Kopra | |
| KUPLA- JA KAASUPITOISUUSTUTKIMUKSET ERI TEHTAILLA | 42 |
| Jari Käyhkö | |
| KUPLAKOLONNEILLA TEHDYT KAASUVIRTAUSKOKEET | 68 |
| Teijo Linnanen | |
| BIOKAASUPROSESSIN KAASUNTUOTANNON OPTIMOINTI..... | 72 |
| Tiina Saario & Hanne Soininen | |
| BIOKAASUPROSESSIEN OPTIMOINTI ÄLYKÄSTÄ MONITOROINTIA KEHITTÄMÄLLÄ..... | 79 |
| Tiina Saario & Hanne Soininen & Yrjö Hiltunen | |
| HANKKEESSA SYNTYNEET JULKAISUT, OPINNÄYTETYÖ JA KÄYDYT KONFERENSSIT | 85 |

KAASUJEN HALLINNAN ÄLYKKÄÄT SOVELLUKSET BIOJALOSTAMO- JA VESIPROSESSEISSA – JOHDANTOA AIHEESEEN

Riku Kopra & Jari Käyhkö & Tiina Saario & Hanne Soinen

Projekti jakautui kahteen osioon (sellutehtaan kuitulinja sekä biokaasulaitos), joita yhdisti kaasumaisten aineiden mittaaminen, analysointi ja tutkimus. Sellutehdasosiossa hankkeessa kehitettiin ja otettiin käyttöön uusia laboratoriokoe-, datankäsittely- ja on-line-mittaustekniikoita ja näitä hyödynnettiin kuitulinjalla tehtävissä tehdastutkimuksissa ja tehdaskokeissa. Mittausdatan avulla kehitettiin happivaiheen mallinnusta tieteellisesti uudelle tasolle. Datan siirtoon ja käsittelyyn suunniteltiin ja toteutettiin myös uusia ratkaisuja. Näillä kehitettiin jo olemassa olevaa Xamk Kuitulaboratorion mittaus- ja datankäsittelyosaamista. Työvaiheet toteutuivat laajasti, ja muun muassa mallinnuksessa päästiin maailmanlaajuisesti merkittävään lopputulokseen.

Biokaasuosiossa tehtiin selvitys märkämenetelmään pohjautuvien biokaasulaitosten sekoitusvaihtoehtoista. Tämän pohjalta tehtiin demonstraatiokoe biokaasulaitoksella. Kaasuntuotannon optimointia tutkittiin laboratoriossa panoskokein, joissa testattiin sekoituksen ja syötemateriaalien vaikutusta kaasuntuotantoon sekä biohajoavien materiaalien käyttäytymistä märkämädätysolosuhteissa. Monitorointiosiossa tehtiin kysely muun muassa laitosten monitoroinnista suomalaisille ja eurooppalaisille biokaasulaitoksille. Osiossa seurattiin kuiva- ja märkämenetelmään perustuvien biokaasulaitosten reaktorien toimintaa ja saatujen tulosten perusteella tutkittiin erilaisia tapoja ennakoita laitosten käyttäytymistä. Monitoroitujen tulosten pohjalta tehtiin mallinnus, jolla pyrittiin löytämään korrelaatio alkaliteetin, johtokyvyn ja pH:n välillä.

Sellutehdasosiossa toteutettiin maailman mittakaavassa ainutlaatuinen mittausympäristö, joka mahdollisti kaasujen käyttäytymisen ja vaikutusten karakterisoinnin eräällä kuitulinjalla. Kyseessä olevan toiminnan ja tutkimusten myötä muun muassa tehtiin seuraavaa:

- Uusia mittausteknologioita otettiin käyttöön, hyödynnettiin niitä käytännössä ja luotiin pohjaa uusien jatkuvatoimisten mittausten kehittämiseksi. Mittauksia olivat muun muassa kuplakokojakauman mittaaminen, kaasuosuuden Echowise-mittaus, uusi sähkökemiallinen kaasuosuuden mittaaminen, kuiva-aineen mittaaminen refraktometrillä sekä näytteenottoon perustuva kaasuosuuden sekä molekyylikoostumuksen mittaaminen.

- Merkittävää uutta tietoa saatiin kaasujen käyttäytymisestä ja vaikutuksista kuitulinjan happidelignifonti- sekä pesuvaiheissa. Pystyttiin muun muassa osoittamaan, kuinka kyseisessä tapauksessa happivaiheen tehokkuutta olisi mahdollista lisätä ja samalla optimoida vaahdonestoaineen käyttöä, mikä on linjan toiminnan ja talouden kannalta merkittävää. Eri kuitulinjoilla tehtyjen mittausten ja laboratoriokokeiden perusteella todennettiin, että merkittävää parannuspotentiaalia voisi löytyä erityisesti lyhytkuitusellua tuottavilta kuitulinjoilta.
- Kyseessä olevan tehtaan sekä havu- että koivulinjan pesussa tehtiin askelvastekokeita ja etsittiin optimeja ajotapoja pesureille hyödyntäen on-line-mittaustuloksia. Pesua optimoimalla tehostettiin vedenkäyttöä, jolla oli vaikutus haihduttamoon menevän kuiva-aineen tasoon ja täten energiansästöön.
- Yhteistyössä Mainen yliopiston kanssa kehitettiin happivaiheen fysikaalista mallinnusta lisäämällä tähän happidispersion kuplakokoon perustuva hapen aineensiirtokertoimen laskenta.

Wedge-tiedonkeruu- ja analysointiohjelman käyttöönoton myötä mahdollistettiin tehtaalta kerättävän datan analysointi. Tämä mahdollistaa jatkossa laajojen prosessitutkimusten toteutuksen. Lisäksi kehitettiin kaasuihin liittyvää laboratoriokoe- ja mittausteknologiaa (reaktoritekniikan kehitys sekä uuden kuplakokomittauksen käyttöönotto) ja kehitettiin ja mahdollistettiin mittausrajapinta kuplatehdasmittauksesta Kuitulaboratorion Honeywell-tiedonkeruujärjestelmään. Tällä mahdollistetaan jatkossa datan automatisoitu jatkuvatoinen keruu ja seuranta Kuitulaboratoriolle.

Biokaasutyöpaketin kaasuntuotannon optimointi -osion yksi pääaiheista oli sekoitusmenetelmien selvitys ja tämän pohjalta tehty laitosmittakaavan demonstraatiokoe. Aihetta on esitelty EUBCE-konferenssissa 2019, ja siitä on kirjoitettu artikkeli Xamkin TKI-vuosijulkaisuun 2019.

Osiossa tehdyssä laboratoriomittakaavan panoskokeessa seurattiin sekoituksen ja syötemateriaalin esikäsittelyn vaikutusta biokaasun ja metaanin tuotantoon. Aiheesta on tehty artikkeli Xamkin TKI-vuosijulkaisuun 2019. Toisessa panoskokeessa seurattiin biohajoavien materiaalien käyttäytymistä märkämädätysolosuhteissa. Kokeessa todettiin paperipussin hajoavan täysin normaalin 21 päivää kestävä kierron aikana, mutta biohajoavalle muovipussille ei tuona aikana tapahtunut käytännössä mitään.

Optimointi monitoroimalla -osiossa tehtiin kysely suomalaisille ja eurooppalaisille biokaasulaitoksille laitosten monitoroinnista ja haasteista. Suomalaisen laitosten vastauksien pohjalta kirjoitettiin artikkeli Xamkin TKI-vuosijulkaisuun 2019. Eurooppalaisten laitosten vastauksia täydennettiin aikaisempien selvitysten avulla. Biokaasulaitoksen monitoroinnin vaikutusta laitoksen optimointiin esiteltiin EUBCE-konferenssissa 2018.

Osiossa seurattiin kahden eri biokaasulaitoksen toimintaa monitoroimalla kaasupitoisuuksia sekä mädätteen ominaisuuksia. Kuivämädättämön toimintaa seurattiin noin kaksi kuukautta ja märkämädättämöä yli 1,5 vuoden ajan. Tulosten pohjalta tehtiin mallinnus, jolla pyrittiin löytämään korrelaatio märkämädättämön alkaliteetin, johtokyvyn ja pH:n välillä. Osiossa vertailtiin myös kahta erilaista alkaliteettimenetelmää (Ripley vs. FOS/TAC). Aiheista on kirjoitettu artikkelit Xamkin TKI-vuosijulkaisuun 2019. Lisäksi selvitettiin mahdollisuutta hyödyntää biokaasulaitoksen monitorointijärjestelmän keräämää dataa entistä tehokkaammin laitoksen optimoinnissa.

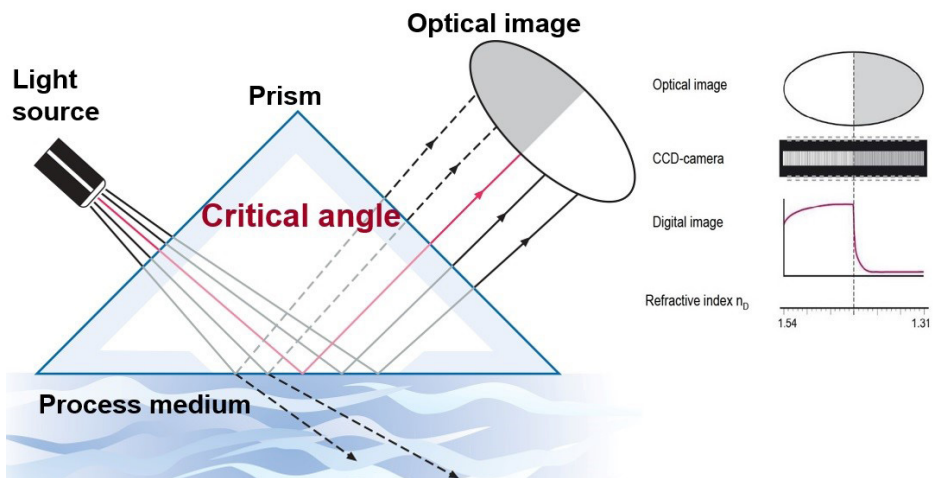
HANKKEESSA KÄYTETYT JATKUVATOIMISET ON-LINE- MITTAUKSET SEKÄ NÄIHIN LIITTYVÄ KEHITYSTYÖ

Riku Kopra & Jari Käyhkö & Kari Kärkkäinen

LIUENNEEN KUIVA-AINEEN (TDS) MITTAAMINEN PROSESSIREFRAKTOMETRILLA PERUSTUEN TAITEKERROINMITTAUKSEEN

Modernin sukupolven täysin digitaaliset prosessirefraktometrit mittaavat prosessiliuosten konsentraatiota (väkevyyttä) jatkuvatoimisesti. Digitaalinen mittausperiaate eliminoi prosessissa mahdollisesti esiintyvien häiriötekijöiden aiheuttamat mittausvirheet. Massavirrassa tällaisia tekijöitä ovat kuplat, liukenemattomat epäpuhtaudet, värimuutokset ja kuidut prosessinesteessä. Prosessirefraktometrin toiminta perustuu valon taittumiseen ja kokonaisheijastuksen rajakulmaan. Prosessiaineen pintaan heijastettu valo taittuu eri tavalla eri aineiden pinnasta, ja taittumisen jyrkkyys riippuu aineen konsentraatiosta. Mittaamalla taittumisen optinen kulma voidaan mitata minkä tahansa aineen väkevyys. Taittumiskulmaan vaikuttaa vain ainesos. Kuplat, väri tai kuidut eivät vaikuta.

Ilmiötä hyödynnetään prosessirefraktometrissa valolähteen, prisman ja digitaalisen CCD-kameran eli kuvantunnistimen avulla. Eri kulmissa valonlähteestä lähtevät säteet muuttavat nopeutta ja suuntaa kohdatessaan ilmaa tiheimmän liuoksen (kuva 1). Osa valonsäteistä tunkeutuu liuokseen, ja osa heijastuu takaisin aineen rajapinnasta. Heijastuneet säteet muodostavat optisen kuvan CCD:lle. Säteistä muodostuu optinen kuva tummasta ja vaaleasta sektorista. ”Varjoaluetta” vastaavaa kulmaa kutsutaan kokonaisheijastuksen kriittiseksi kulmaksi. Kriittinen kulma on taitekertoimen funktio ja tässä liuoksen konsentraatio.



KUVA 1. Refraktometrin mittausperiaate (kuva K-Patents Oy).

Digitaalinen CCD-kamera havaitsee optisen kuvan ja varjorajan. Kamera muuntaa optisen kuvan piste pisteeltä elektroniseksi signaaliksi. Näin saadaan tarkasta varjorajasta määritettyä taitekerroin n_D . Sisäänrakennettu lämpötilasensori mittaa lämpötilan prosessinestein pinnasta. Indikoiva lähetin muuntaa taitekertoimen ja lämpötilan konsentraatioyksiköksi. On-line-tehdasmittauksen lisäksi projektissa käytettiin samaa mittausta laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriomittauksessa on tärkeää vakioda näytteen lämpötila esimerkiksi lämpöhauteen avulla. Kuvassa 2 on esitetty mittauskokoontalo laboratorio-olosuhteissa.



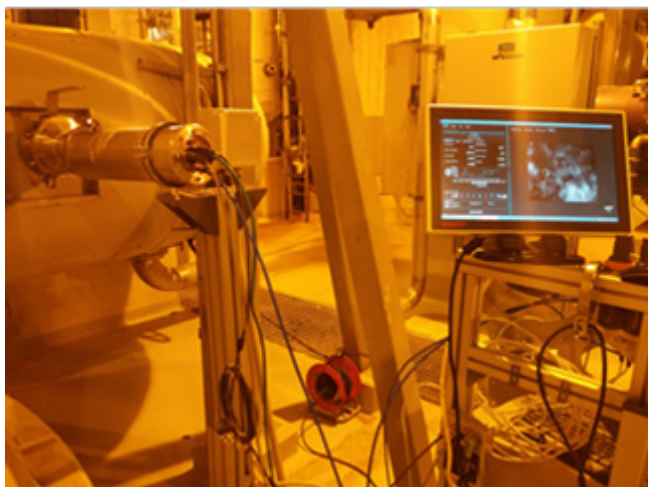
KUVA 2. Liuennan kuiva-ainemittausjärjestelyt laboratorio-olosuhteissa (kuva Riku Kopra).

KUPLAKOKOJAKAUMAN MITTAUS

Kuplakokojakauma mitattiin Kuitulaboratorion ja Pixact Oy:n aiemmin yhteistyössä kehittämällä mittalaitteella (kuva 3).

Laitetta käytetään nesteessä olevien kuplien kokojakauman määrittämiseen. Jatkuvatoinista in-line-mittausta käytetään pääasiassa kuitulinjan kaasujen karakterisointiin. Laitetta voidaan käyttää myös laboratoriomittauksessa.

Laitteisto sisältää mittauspään, jossa on kamera ja laservalaisu, sekä näiden ohjausyksikön, prosessitietokoneen, näytön ja mittausohjelman. Laitteisto tunnistaa kuvista kaasukuplat ja näiden halkaisijan, tallentaa tiedot csv- ja Excel-taulukkoon sekä laskee valmiiksi keskimääräiset kuplakoot (aritmeettinen sekä pinta- ja tilavuuspainotettu) sekä havaitun kuplien kokonaistilavuuden (gas hold up). Mittausalue on 30–3000 μm .



KUVA 3. Kuplakokomittauslaitteisto (Käyhkö et. al. 2019 a).

Hankkeella oli tehdasmittauksissa käytössä kaksi kuplakokomittauslaitteistoa, joista toinen oli Andritzin ja Stora-Enson kustantama. Projektin loppupuolella saatiin käyttöön myös kolmas ”matkamalli”, jota käytettiin laboratoriotutkimuksissa.

KAASUPITOISUUDEN MITTAUS ECHOWISE-MITTARILLA

Kaasuosuus massa- ja suodosvirroista mitattiin jatkuvatoimisella Echowise in-line -mittauksella (kuva 4). Menetelmässä putken ulkopinnalle asennetaan anturi, joka detektoi prosessimelua ja sen perusteella laskee äänennopeuden putkessa. Tämän perusteella puolestaan saadaan määritettyä virtauksessa olevan kaasun osuus. Tämän lisäksi mittauksella voidaan todentaa virtausnopeus putkessa. Kuitulaboratoriolla oli aiemmin jo käytössä yksi mittari. Tämän lisäksi kemikaalitoimittaja Buckman antoi projektin käyttöön yhden mittausyksikön sekä kaksi eri putkikokoon soveltuvaa anturia.



KUVA 4. Kaasuosuusmittauksen Echowise-anturi ja mittausyksikkö (kuva Jari Käyhkö).

HAPEN, HIILIDIOKSIDIN JA HIILIMONOKSIDIN MITTAUS HAPPIREAKTORIN JÄÄNNÖSKAASUSTA

Mitattava kaasunäyte saatiin joko purkaimen jälkeisen pH-mittauksen suodosnäytteestä tai kuplamittausyhteen paineenpudotusventtiilistä. Kaasun erottamiseksi suodoksesta sekä vesihöyryn erottamiseksi kaasusta rakennettiin tähän soveltuva erotinlaitteisto (kuva 5). pH-mittauksesta saatavan suodosnäytteen määrä oli hyvin pieni, noin 1 litra tunnissa, joten suodoksesta saatavan kaasunäytteen määrä oli myös hyvin alhainen. Kuplamittausyhteeltä saatavan suodosnäytteen määrä (kuva 6) oli noin 20 kertaa suurempi, mutta näytteenottoaika tukkeutui ajan myötä ja se puhdistettiin irrottamalla kuplakamera prosessista. Kaasunäytettä yritettiin myös saada purkaimen kaasunpoistolinjaan Andritzin toimesta aiemmin asennetusta näytteenottoventtiilistä, mutta tässä oli ongelmana se, että kaasunpoistovenktiili oli normaaliajossa kiinni, ja vaikka se aukaistiin manuaalisesti, purkaimelta ei kuitenkaan havaittu poistuvan kaasua.



pH mittarilta
tuleva
kaasupitoinen
suodos

Suodoksen
erotin+
kylmäloukku

Kylmäloukku II

KUVA 5. Reaktorin yläpäähän rakennettu kaasun keräys- ja käsittelyjärjestelmä sekä hiilidioksidi- ja happimittauksessa käytetty mittari (kuva Jari Käyhkö).



Näytteenottoyhde

KUVA 6. A) Kuplakameran paineenpoistiventtiilit, joista saatiin suodos-kaasunäyte suoraan reaktorista. B) Kaasunäytteenottoventtiili purkaimen poistokaasulinjassa (kuvat Jari Käyhkö).

Happireaktorin jäännöskaasun happi- ja hiilidioksidi mitattiin kuvassa 5 näkyvällä mittarilla ja hiilimonoksidi Kuitulaboratorion savukaasuanalysaattorilla (kuva 7).



KUVA 7. Hiilimonoksidin pitoisuuden mittaukseen käytetty savukaasuanalysaattori (kuva Jari Käyhkö).

KAASUOSUUDEN MITTAUS SÄHKÖKEMIALLISESTI

Hankkeessa testattiin Coresto Oy:n sähkökemiallisen mittaustekniikan soveltuvuutta massan kaasuosuuden määrittämiseen. Coreston mittaustekniikkaan perustuen toteutettiin anturi, joka on yhteensopiva refraktrometri- ja kuplamittausyhteiden kanssa, mikä mahdollistaa anturin kytkemisen Mark-reaktoriin sekä tehtailla mittausyhteisiin. Anturi on suunniteltu kestävään vaadittu olosuhteet jatkuvatoimisessa käytössä.



KUVA 8. K-Patentsin refraktrometriyhteeseen soveltuva sähkökemiallinen ilmapitoisuuden mittaustanturi sekä anturi kytkettynä Mark-reaktoriin (kuvat K. Kärkkäinen).

LÄHTEET

Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Eloranta, H., Honkanen, M., and Pesonen A., The State and Effect of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process. Paper Week 2019, March 24-26, 2019, Montreal, Canada.

ON-LINE-MITTAUS- JA KOEJÄRJESTELYT TEHTAILLA

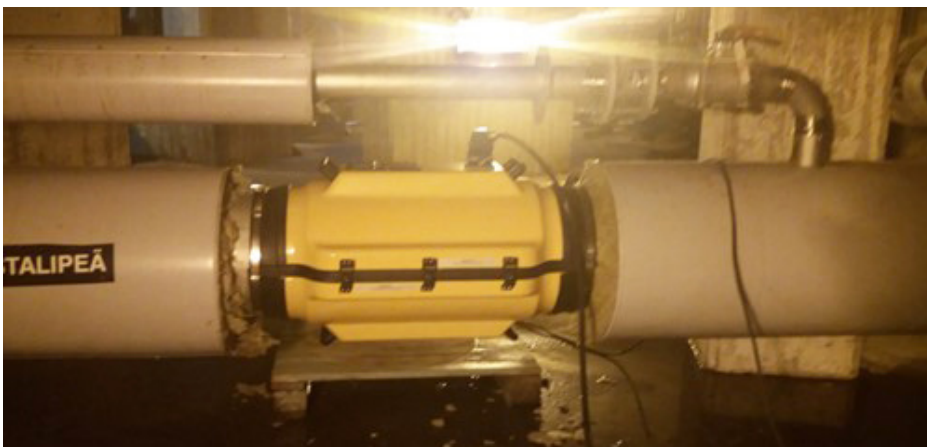
Riku Kopra & Jari Käyhkö

KOETEHIDAS A

Mustalipeän pumppauslinjaan asennettiin kuplakuvausjärjestelmä linjassa olevan refraktometrin paikalle (kuva 1) sekä kaasupitoisuuden Echowice-mittaus (kuva 2).



KUVA 1. Mustalipeän pumppauslinja, johon kuplakuvausjärjestelmä asennettiin refraktometrin paikalle, sekä esimerkki linjassa olevista kaasukuplista (kuvat Jari Käyhkö).

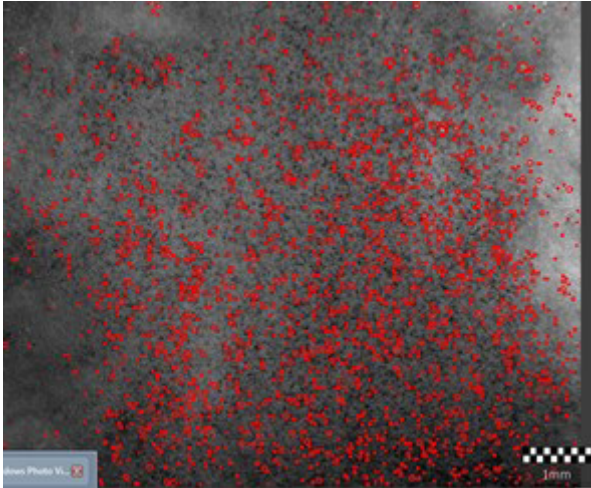


KUVA 2. Mustalipeän pumppauslinjaan asennettu kaasupitoisuuden Echowice-mittaus (kuva Jari Käyhkö).

Mittaukset olivat asennettuina prosessiin muutaman kuukauden ajan ja ajanjaksolta saatiin tehtaalta myös analysoitavaksi tarpeellinen prosessidata.

KOETEHIDAS B

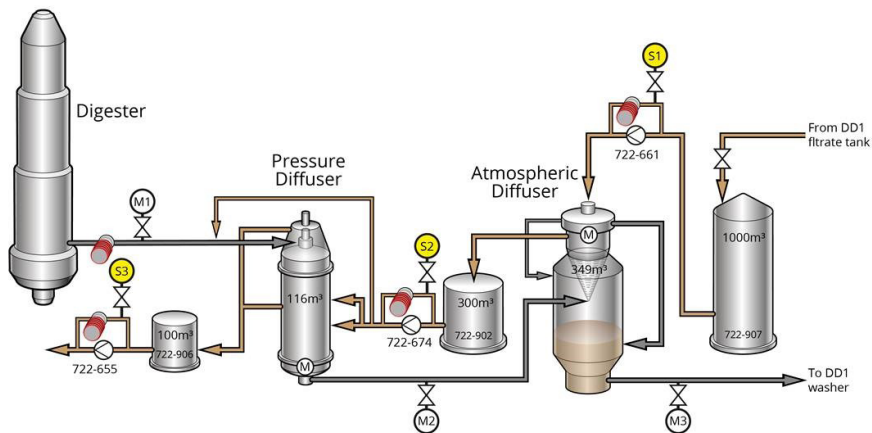
Tehtaalla on käytössä kaksivaiheinen happidelignifointi. Kuplamittaus asennettiin linjaan ennen kakkosvaihetta hapen syötön ja sekoituksen jälkeen olevaan refraktrometriyhteeseen. Kuvassa 3 on esimerkki linjalta kuvatusta kaasudispersiosta.



KUVA 3. Esimerkki linjalta kuvatusta kaasudispersiosta. Punaiset pisteet ovat ohjelman tunnistamia kuplia.

KOETEHIDAS C, PITKÄKUITULINJAN DIFFUSÖÖRIPESU

Tutkimuksen koejärjestelyt jakautuivat uusien mittalaitteiden käyttöönottoon ja niiden toiminnan arviointiin sekä tehokkuuslaskennan tekoon Excelissä. Kokeita suoritettiin, jotta löydettiin optimit operointiparametrit diffusööripesureille ja jotta ne pystyisivät toimimaan mahdollisimman taloudellisesti. Puskumassalinjassa olevan mittauksen lisäksi keitintä seuraavan painediffusöörin sekä vuopesurin pesu- ja poistosuodoksiin lisättiin refraktrometrimittaukset (kuva 4). Mittausjärjestelyt tehtiin niin, että diffusöörin toimintaa voitiin monitoroida reaaliajassa ja laskea E_{10} - ja Y_{10} -arvot.



KUVA 4. Koejärjestelyt diffusööripessoreilla KL2-linjalla. Suodosmittauspisteet merkitty keltaisella.

Koesuunnitelmat koeajoviikoille I ja II on esitetty seuraavissa taulukoissa 1 ja 2. Koeajoviikolla I tutkittiin syöttö- ja poistosakeuden vaikutusta painediffusöörin (PD) tehokkuuteen muuttamalla syöttö- ja poistosakeuden asetusarvoja. Sihtipaketin alasetonopeus oli asetettu arvoon 1,2 m/s.

Taulukko 1. Tehdaskokeet testiviikolla I

| PD syöttösakeus (%) | PD poistosakeus (%) |
|---------------------|---------------------|
| 7,6 | 7,7 |
| 8,0 | 7,7 |
| 8,0 | 7,9 |
| 8,0 | 8,1 |
| 8,4 | 7,7 |

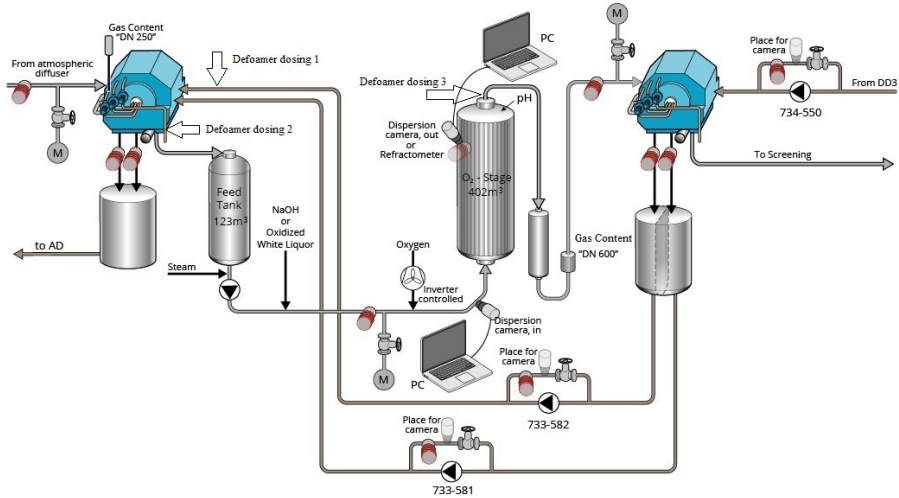
Koeajoviikolla II syöttö- ja poistosakeuden vaikutusta painediffusöörin pesutehokkuuteen tutkittiin muuttamalla poistosakeuden asetusarvoja. Syöttösakeus pidettiin vakiona. Lisäksi tutkittiin sihtipaketin alasetonopeudet 1,1 m/s ja 1,2 m/s.

Taulukko 2. Tehdaskokeet testiviikolla II

| PD Syöttösakeus (%) | PD Poistosakeus (%) | PD:n sihtipaketin alasetonopeus (m/s) |
|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 8,25 | 7,7 (tuotanto 650 adt/d) | 1,2 |
| 8,25 | 7,7 (tuotanto 700 adt/d) | 1,1 |
| 8,25 | 7,5 (tuotanto 725 adt/d) | 1,2 |
| 8,25 | 7,5 (tuotanto 725 adt/d) | 1,1 |
| 8,25 | 7,7 (tuotanto 725 adt/d) | 1,2 |

KOETEHIDAS C, LYHYTKUITULINJAN HAPPIVAIHEEN YM- PÄRISTÖ

Kyseinen koivulinja koostui jatkuvatoimisen keiton Hi-heat-pesusta, atmosfäärisestä diffu-
sööristä (AD), yhdestä DD-pesurista ennen 1-vaiheista happivaihetta sekä toisesta DD-pe-
surista happivaiheen jälkeen sekä kolmannelta DD-pesurista ennen valkaisun syöttöä.
Kappatavoite keiton jälkeen on 17 ja valkaisun syötössä 11 (hexan osuus oli noin 6). Koi-
vulinjan happivaiheen mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Mittausjärjestelyt sellutehtaan koivulinjan happivaiheessa.

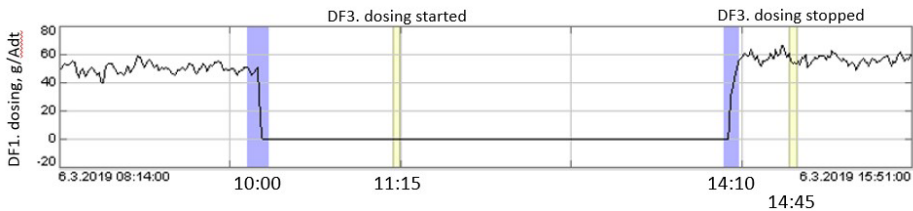
Linjalle asennettiin yhteensä kymmenen refraktometriin perustuvaa kuiva-ainemittausta
siten, että nämä mahdollistivat happivaihetta edeltävän (DD1) ja happivaiheen jälkeisen
(DD2) pesurin pesutehokkuuden jatkuvatoimisen mittauksen. Kuplakokomittaukset olivat
happireaktorin syötössä ja yläpäässä. Kaasupitoisuutta mitattiin DD1:n sisäisestä suodos-
kierrosta sekä DD2:n syöttömassasta. Lisäksi happireaktorin yläpäässä testattiin erilaisia
jäännöskaasun määrän (sähköinen sekä suodosnäytteestä erottuvan kaasun määrän off-li-
ne-mittaus) ja koostumuksen (happi, hiilidioksidi ja hiilimonoksidi) mittausmenetelmiä.

Koetahtaalla tehtiin kahdet eri koeajot kyseisillä pesulaitteilla. Ensimmäinen koski vaah-
donestoaineen laadun ja annostelupaikan muutoksen vaikutusta ilmapitoisuuteen ja DD1-
ja DD2-pesulaitteiden toimintaan. Toinen koeajo koski DD-pesureiden pesusakeutta,
vaiheistusta ja pesunestejakoa. Tämän lisäksi happivaiheessa tehtiin erilaisia muutoksia
lähinnä kemikaaliannosteluihin.

VAAHDONESTOAINEKOKEET 6.3.2019

Vaahdonestoaineen laatua ja annostelupistettä muutettiin askelvastekokeissa. Normaalilla ajotavalla vaahdonestoaine annostellaan pisteisiin 1 ja 2 (kuva 5). Annostelupiste 1 on viimeinen pesusuodos DD1:lle, ja piste 2 on vakuumsuodos DD1-pesurilta. Tavallisesti käytetään öljypohjaista vaahdonestoainetta. Tässä kokeessa testattiin annostelupisteeseen 3 silikonipohjaista kemikaalia. Kaasupitoisuutta seurattiin DD2-pesurin syöttömassassa olevalla Echowise™-kaasupitoisuusmittarilla. Myös pesurin rummun momenttia ja kierrosnopeutta, sakeuksia ja TDS-pitoisuuksia seurattiin eri tehdasjärjestelmän avulla. Vaahdonestokemikaalin muutokset toteutettiin seuraavasti:

- 1) Kello 10:00, öljypohjainen vaahdonestokemikaali annostelupisteisiin 1 ja 2 lopetettiin. Öljypohjainen korvattiin silikonipohjaisella pisteeseen 2.
- 2) Kello 11:15, silikonipohjaisen annostelu pisteeseen 3 aloitettiin.
- 3) Kello 14:10, annostelupisteiden 1 ja 2 annokset palautettiin normaalille ajomallille (öljypohjainen).
- 4) Kello 14:45, annostelu pisteeseen 3 lopetettiin.



KUVA 6. Vaahdonestoaineiden annostelun aikataulu pisteisiin 1 ja 3 askelkokeissa.

Koesuunnitelma ja näytteiden otto on esitelty tarkemmin artikkelissamme (Kopra et. al. 2019).

DD-PESURIEN PESUSAKEUS, VAIHEISTUS JA PESUNESTEJAKOKOKEET

Lokerosakeuksiksi valittiin DD1-pesurille 11 %, 12 % ja 13 % ja DD2-pesurille 11 %, 12,5 % ja 14 %. Vaiheistuksiksi valittiin 1,2, 1,45 ja 1,7. Näiden lisäksi kokonaispesuvesimäärää (180 l/s) jaettiin sekä tasan ala- ja yläpesuvaiheeseen (90 l/s ja 90 l/s) ja alapainotteisesti (135 l/s ja 45 l/s). Näistä tehtiin 9 pisteen testimatriisi, joka toteutettiin tehtaan ajotilanteen sallimissa rajoissa. Reaaliaikaisia TDS-mittauksia hyödynnettiin laskennassa. Lisäksi kerättiin suodos- ja massanäytteitä on-line-mittausten oikeellisuuden varmistamiseksi.

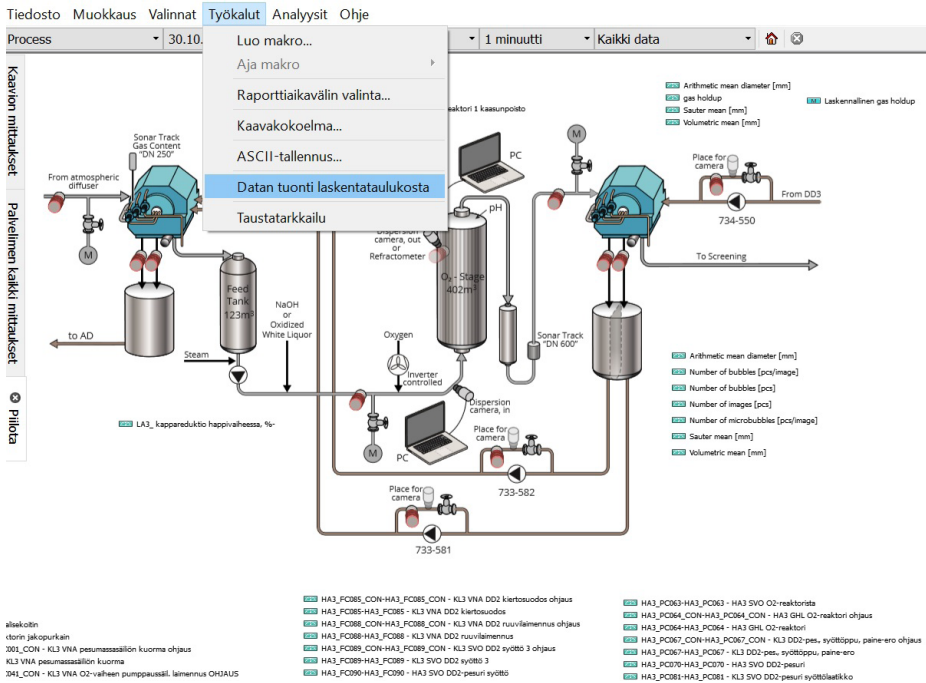
TEHDAS- JA MITTAUSDATAN SIIRTO JA ANALYSOINTI

Jari Käyhkö & Kari Kärkkäinen

WEDGE™-OHJELMA

Prosessidatan Wedge™-analysointijärjestelmä on kehitetty aikoinaan Suomessa, ja se on levinnyt maailmanlaajuisesti prosessiteollisuuteen ja on tällä hetkellä aktiivisessa päivittäisessä käytössä lähes kaikissa suomalaisissa paperi- ja massatehtaissa. Wedge™-ohjelma mahdollistaa tehokkaan signaalien silmämääräisen ja tilastollisen tarkastelun. Ohjelma sisältää myös erikoisominaisuuksia, joiden avulla voidaan analysoida joko yksittäistä signaalia tai yleensä pikemminkin suurempaa signaalijoukkoa tarkemmin. Wedge™ ei kuitenkaan automaattisesti (ilman ohjelmointia) esikäsittele tai lajittele tietoa millään tavalla, vaan se on tehokas työkalu prosessin toiminnan havainnointiin ja analysointiin.

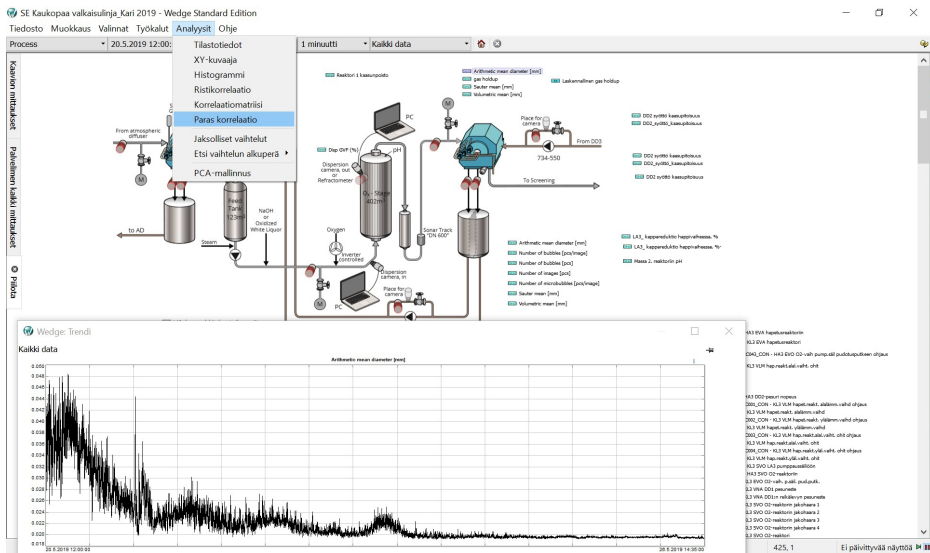
Projektin testeissä käytämä data tuotiin Wedge™-ohjelmaan siinä olevan Excel import-toiminnon avulla. Datan tuontiaika Excel import -toiminnolla riippuu luonnollisesti taulukon sisältämästä tietomäärästä. Laajan taulukon tuonti (satoja prosessitietoja pitkältä jaksolta) saattaa kestää useita tunteja. Kun halutut tiedot on tuotu tietokantaan joko aikaisempaan tai uuteen luotuun tietolähteeseen, ne voidaan poimia johonkin jo luotuun tai uuteen piirtokenttään. Kuvassa 1 näkyy esimerkkinä tehtaan valkaisuvaiheesta luotu pohjakuvaaja, sen päälle tuodut mittauksiedot (tägit) sekä ohjelman Työkalut-valikosta löytyvä Excel import -toiminto, jolla projektin koedata tuotiin ohjelmaan.



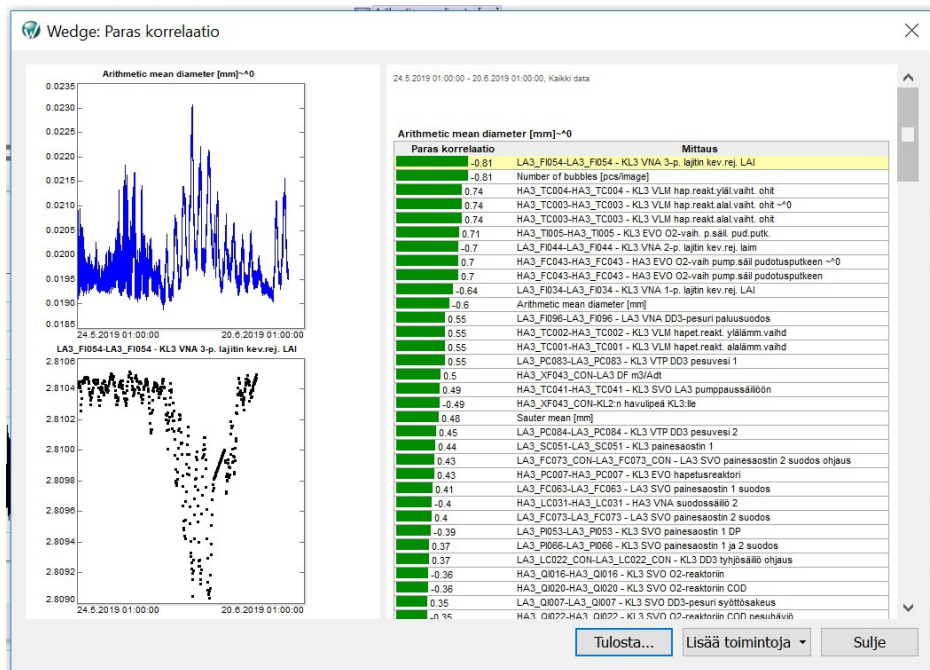
KUVA 1. Datan tuonti laskentataulukosta Wedge™-tietokantaan (Kärkkäinen 2019).

Kun halutut tiedot on tuotu tietokantaan, joko aikaisempaan tai uuteen luotuun tietolähteeseen, ne voidaan poimia johonkin jo luotuun tai uuteen piirtokenttään. Kuvassa 1 näkyy esimerkkinä tehtaan valkaisu vaiheesta luotu pohjakuvaaja ja sen päälle tuodut mittaustiedot (tägit).

”Paras korrelaatio” on tehokas toiminto (kuva 2), ja sen avulla löydetään nopeasti jotain muuttujaa vasten olevat eniten korreloivat muuttujat, minkä jälkeen korreloivaa etsintää voidaan tehostaa pienemmällä muuttujamäärällä (kuva 3).



KUVA 2. Paras korrelaatio -toiminto (Kärkkäinen 2019).



KUVA 3. Wedge™:n Paras korrelaatio -toiminnon poiminta tietolähteen otoksesta (Kärkkäinen 2019).

Huomattavaa on, että korrelaatiokertoimen avulla voidaan vertailla vain signaalien samankaltaisuutta eli korrelaatiokerroin ei tutki signaalien syy-seuraus-suhdetta, vaan ainoastaan antaa arvion kertoimen muodossa, kuinka yhtenevät signaalit ovat toisiinsa nähden. Vaikka korrelaatio ei tutkikaan kausaalisuutta, menetelmän avulla on helppo löytää signaaleita, joiden välillä on kausaalisuussuhde. (Niemelä 2011.)

Muuttujia (tägejä) voidaan poimia yksittäiseen ikkunaan 1–n kpl ja tehdä visuaalisia aikajanan vertailuja. Ikkunasta voidaan helposti leikata aikajanaa tai leikata esimerkiksi yksittäisen muuttujan mitta-alueetta. Ominaisuus on ollut tähän mennessä erittäin hyödyllinen tehdasdatan sekä koeajojen tulosten tulkinnassa ja erityisesti näiden visualisoinnissa.

Hankkeen aikana Kuitulaboratoriolle hankittiin Wedge™-ohjelma tarpeellisine lisensseineen ja otettiin järjestelmä käyttöön muun muassa järjestämällä useita koulutustilaisuuksia henkilökunnalle sekä opiskelijoille. Prosessidata saatiin tehtaalta Excel-muodossa sähköpostilla tai useimmiten tiedoston suuren koon takia pilvilyhteyden kautta ja se siirrettiin Kuitulaboratorion Wedge™-järjestelmään Excel import -toiminnon avulla. Samalla tavalla Wedge™-ohjelmaan syötettiin Kuitulaboratorion prosessiin toimittamien jatkuvatoimisten mittauksen data, jota ei ollut viety suoraan tehtaan järjestelmään. Data kerättiin mittauskoneilta joko etänä tai lataamalla se tehtaalla tikulle. Wedge™-ohjelman käyttöönotto mahdollisti prosessidatan ja -mittauksen analysoinnin tutkijoiden toimesta. Wedge™-ohjelma tulee todennäköisesti olemaan myös jatkossa olennainen osa Kuitulaboratorion prosessitutkimuksia.

Hankkeen aikana selvitettiin myös proseduuri, jolla Kuitulaboratorio saisi etäyhteyden suoraan tehtaan Wedge™-järjestelmään tutkimusten kannalta olennaiselle rajatulle alueelle. Tämä voisi edistää tutkimusten tekoa huomattavasti. Etäyhteyden toteutus ei vaadi tehtaan puolelta juurikaan panostusta, ja vaadittavat toimenpiteet voidaan tehdä pääosin Wedge™-järjestelmää toimittavan Trimble-yrityksen toimesta. Lisäksi tämä vähentäisi tehtaan henkilöstön työmäärää, koska dataa ei tarvitsisi kerätä ja lähettää manuaalisesti. Hankalinta on saada tehtaalta tähän lupa, koska tämä vaatisi ylemmän tason ja IT-osaston hyväksyntää/toimia. Luvan hankintaan tulisi kehittää kattavampi proseduuri, koska tämä ei välttämättä onnistu suoraan tutkimuksissa mukana olevan tehdashenkilöstön kautta.

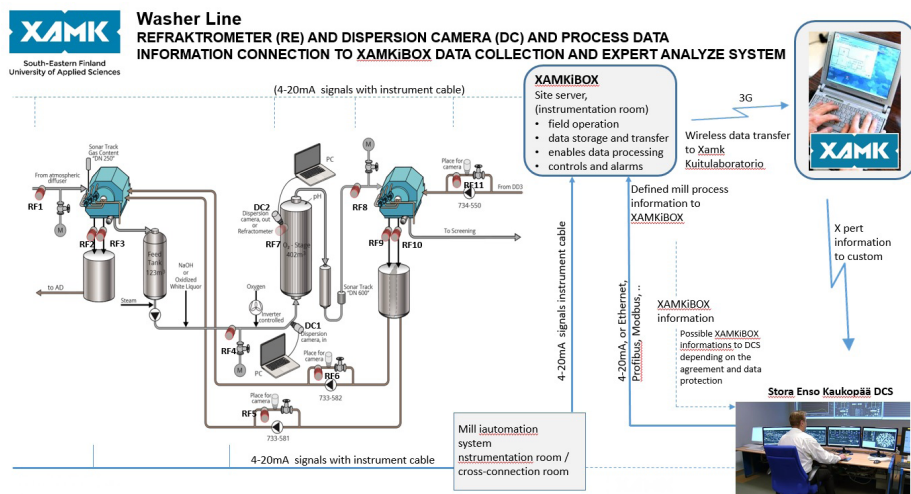
XAMKIBOX

Xamk Savonlinnan Kuitulaboratoriolla on käytettävissään hajautettuihin koe- ja pilot-mittauksiin soveltuva langattoman tiedonsiirron sisältävä mittaus- ja tiedonsiirtoyksikkö, josta käytetään nimitystä XAMKiBOX (kuva 4). Kaapin mittaustekniikka on toteutettu Siemens S7-1200 -logiikalla (Mikro PLC SIMATIC HMI, jossa on touch screen -näyttö) ja siihen liittyvillä IO-mittausteknologiamoduuleilla. Logiikassa on hajautettuihin analogiamittauksiin (mm. tehtaalle asennetut refraktrometrit) ja niiden kytkentään tehty mittaussovellus. Mittaukset liitetään yleensä 4–20 mA:n virtaviestein XAMKiBOXille,

josta tiedot siirretään edelleen langattomalla 3G-yhteydellä Siemensin pilvipalvelimelle ja sieltä edelleen Xamk OPC UA -palvelimelle (kuva 5). Näin kaikki XAMKiBOX yksikköön liitetyt mittaustiedot ovat käytettävissä Xamk Savonlinnan Kuitulaboratorion Honeywell automaation -tietokannassa sekä esimerkiksi Xamk Savonlinnan Kuitulaboratorion Metris IOT -järjestelmässä. XAMKiBOXiin liitettynä eli sen kautta voidaan välittää myös esimerkiksi tehtaan prosessidataa Kuitulaboratorion Honeywell-tiedonkeruujärjestelmään. Xamk Savonlinnan Kuitulaboratorion OPC-UA-palvelin mahdollistaa järjestelmään liitettyjen tietojen on-line-kytkennän tulevaisuudessa myös esimerkiksi Wedge™-järjestelmään.



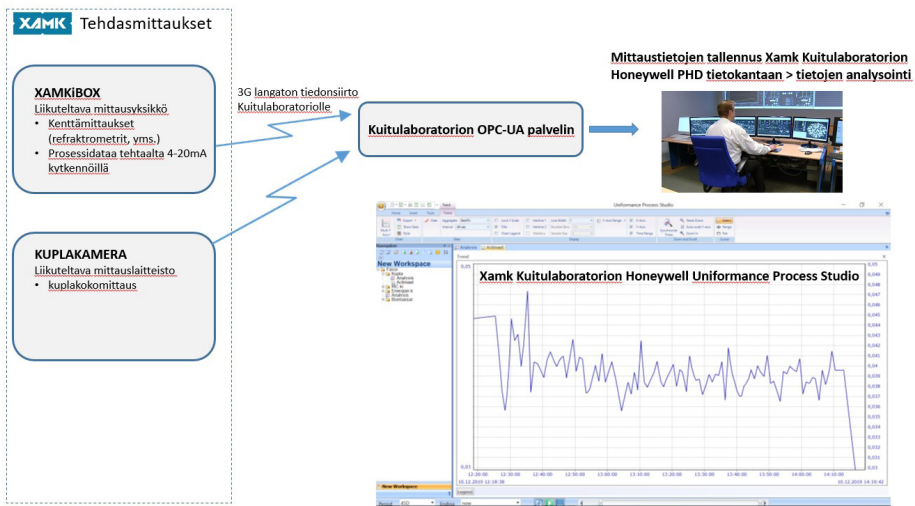
KUVA 4. XAMKiBOX, langaton mittaus- ja tiedonsiirtoyksikkö (kuva K. Kärkkäinen).



KUVA 5. Skemaattinen kuva XAMKiBOXin langattomasta mittaus- ja tiedonsiirtojärjestelmästä (Kärkkäinen 2019).

KUPLAMITTAUSDATAN SIIRTO HONEYWELL-JÄRJESTELMÄÄN

Kuplakokomittausta käytetään nesteessä olevien kuplien kokojakauman määrittämiseen. Kyseessä on jatkuvatoiminen in-line-mittaus, jota käytetään pääasiassa kuitulinjan kaasujen karakterisointiin. Kuitulaboratorion uusiin kuplakuvantamislaitte on ns. Matkamalli, joka sisältää anturiyksikön ja kannettavan lap-top-tietokoneen. Tietokoneessa on myös integroitu SIM-kortti, joka mahdollistaa 3G-tiedonsiirron. Laite on kytketty OPC-UA-yhteydellä Xamk Savonlinnan Kuitulaboratorion OPC-UA-palvelimelle ja edelleen Honeywell PHD automaation -tiedonkeruu- ja analysointijärjestelmään. Samoin kuin edellä kuvattu XAMKi-BOX, kuplakokomittauslaite voidaan asentaa nopeasti käyttöön periaatteessa mihin tahansa tehtaalle niin koti- kuin ulkomailla ja mittauksien tiedot saadaan analysoitavaksi Honeywell PHD -järjestelmän kautta TKI-asiantuntijoiden käytettäväksi. Laitetta voidaan toki käyttää myös laboratoriomittalaitteena.



KUVA 6. XAMKiBOX ja kuplakuvantamiskameran langaton tiedonsiirto Honeywell PHD -järjestelmään (Kärkkäinen 2019).

LÄHTEET

Kari Kärkkäinen, Jari Käyhkö, Wedge järjestelmän käyttöönotto sekä soveltaminen Kuitulaboratorion tutkimustyössä. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Markku J. Niemelä, Teollisuusprosessien signaalien automaattinen analysointi, diplomityö 2011, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

KUPLANMUODOSTUKSEEN LIITTYVÄT LABORATORIOKOKKEET

Jari Käyhkö & Antti Pappinen

Kahdelle eri laboratoriosekoittimelle rakennettiin yhteet kuplakokmittauksen asennusta varten (kuva 1). Tämä mahdollisti kuplakokoon vaikuttavien tekijöiden sekä kuplakoon vaikutusten tutkimisen laboratorio-olosuhteissa tehtaan toimintoja vastaavassa kuitusakeudessa, mitä ei ole tiettävästi aikaisemmin tehty maailmassa.



A)

B)

KUVA 1. Kuplakokmittauksen mahdollistavat yhteet laboratorioreaktoreilla. A) Karbonaattori. B) Mark-reaktori (kuvat Antti Pappinen).

Reaktoreilla tutkittiin pääasiassa erilaisten vaahdonestoaineiden sekä massan laadun vaikutusta kuplan muodostukseen.

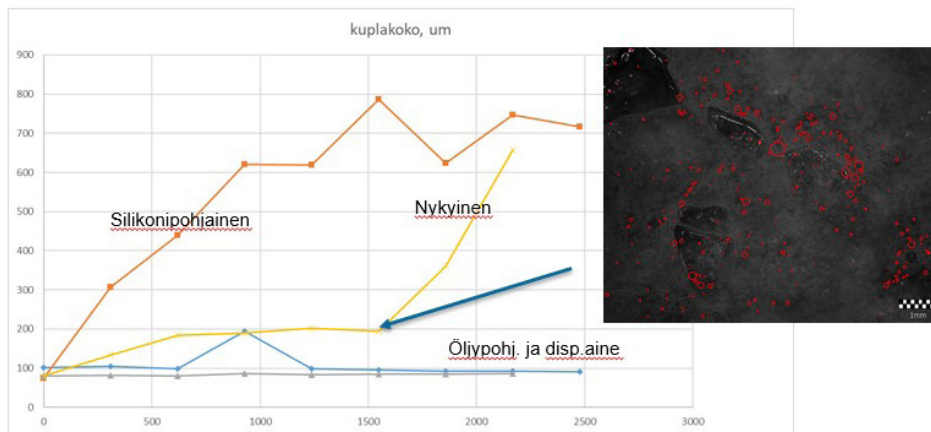
Karbonaattorilla tehdyissä kokeissa (kuva 2) tehtaalla nykyisin käytössä oleva vaahdonestoaine kasvatti kuplakokoa selkeästi eniten, ja tämän jälkeen tulivat silikonipohjaiset tuotteet. Öljypohjaisilla ja dispergointiaineella ei ollut juurikaan vaikutusta kuplanmuodostukseen. Suunnilleen vastaavat tulokset saatiin myös Markilla (kuva 3), mutta nykyisin käytössä olevan vaahdonestoaineen vaikutus näytti jäävän vähäisemmäksi. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että tällöin muodostui paljon suuria epäsäännöllisiä kuplia, joita kuplamittaus ei tunnistanut, eli nykyinen vaahdonestoaine kasvatti kuplakokoa voimakkaasti.

Tulosten perusteella ei voida vetää johtopäätöstä, minkä vaahdonestoaineen käyttö olisi edullisinta happidispersiön muodostuksen ja siten happivaiheen toiminnan kannalta. Lähinnä tulos indikoi, kuinka hyvin eri aineet toimisivat linjalla vaahdonestoaineena, ja tuloksen perusteella silikonipohjaiset voisivat toimia hyvin.

Dispergointiaineita käytetään yleisesti kuitulinjoilla pihkaongelmien estämiseen. Näissä kokeissa dispergointiaine oli mukana, jotta saataisiin kuvaa, voisiko tehtaan dispergointiaineen käytöllä olla vaikutusta happivaiheen kuplan muodostukseen vai voitaisiinko dispergointiainetta jopa käyttää happidispersioon kuplakoon pienentämiseen. Tässä tapauksessa dispergointiaineella ei havaittu vaikutusta kuplan muodostukseen.

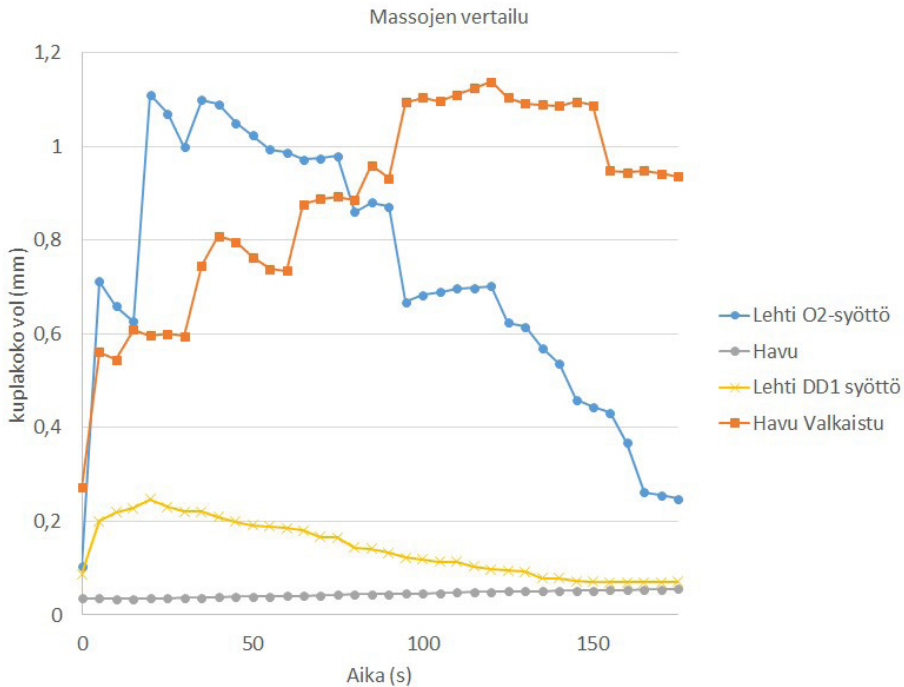


KUVA 2. Tehtaalla käytössä olevan sekä Solenikselta saatujen erilaisten vaahdonestoaineiden sekä yhden dispergointiaineen vaikutus kuplan muodostukseen testattuna karbonaattorilla. Kokeissa käytettiin happivaiheen syötöstä otettua massaa. Vaahdonestoaineen lisäyksen jälkeinen sekoitus 2000 rpm 10 sekuntia ja tämän jälkeen sekoitusnopeus 750 rpm-1. Massan sakeus 6 %. Tulokset kirjattiin 11 minuutin kuluttua vaahdonestoaineen lisäyksestä.



KUVA 3. Tehtaalla käytössä olevan sekä Solenikselta saatujen erilaisten vaahdonestoaineiden sekä yhden dispergointiaineen vaikutus kuplan muodostukseen testattuna Mark-reaktorilla. Kokeissa käytettiin happivaiheen syötöstä otettua massaa. Massan sakeus oli 10,5 %. Vaahdonestoaineen lisäyksen jälkeen sekoitusnopeus oli 560 rpm 10 sekunnin ajan, ja tämän jälkeen sekoitusnopeus oli 80 rpm. Tulokset kirjattiin ylös 8 minuuttia vaahdonestoaineen lisäyksestä.

Kuvasta 4 nähdään hyvin massan laadun ja sen sisältämien liuenneiden aineiden vaikutus kuplanmuodostukseen. Keiton jälkeisellä havumassalla kuplakoko putoaa heti pieneksi. Myös ennen happivaihetta olevan DD1-pesurin syötöstä otetulla massalla kuplakoko pienenee huomattavasti nopeammin ja pienemmäksi kuin pesurin jälkeisellä happivaiheen syöttömassalla. Valkaistulla havumassalla kuplien muodostuminen on taas olematonta pinta-aktiivisten aineiden puutteen vuoksi.



KUVA 4. Kuplakoon kehittyminen ajan myötä Mark-reaktorilla. Käytetyt massat: koivu O2-syötöstä, havu keiton jälkeen, koivu DD1-pesurin syötöstä, havu valkaistu. Alussa sekoitusnopeus 2400 rpm^{-1} 10 s, tämän jälkeen sekoitusnopeus 120 rpm^{-1} . Massan sakeus 10,5 %. Kaasufraktio 0,1. (Pappinen ja Käyhkö 2019.).

LÄHTEET

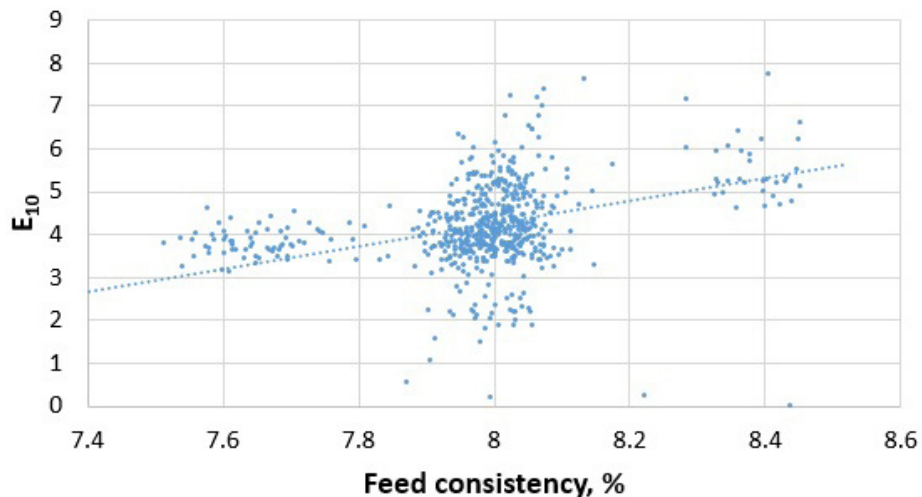
Pappinen, A., Käyhkö, J., Mark reaktorin modifointi kaasumaisten kemikaalien dispergoitumisen sekä tehokkuuden määrittämiseen. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

TDS-KOKEIDEN TULOKSET

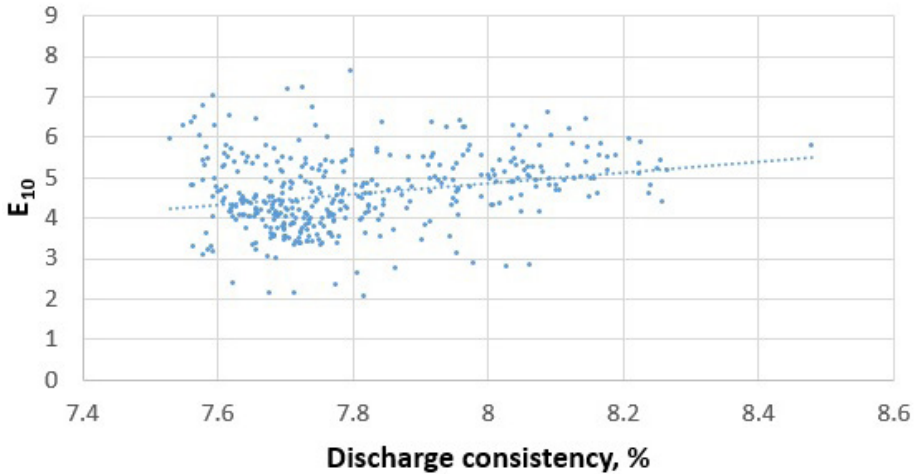
Riku Kopra

KOETEHIDAS C: PITKÄKUITULINJAN DIFFUSÖÖRIEN KOEAJOT

Kuvista 1 ja 2 (koeajoviikko I) voidaan nähdä, että korkeammalla syöttö- ja poistosakeudella painediffusöörin pesutehokkuus kasvaa. Kuvasta 1 nähdään, että nostamalla syöttösakeus arvosta 7,6 % arvoon 8,4 % lisääntyy E_{10} -arvo noin 1,5 yksikköä. Esitetyt on-line-arvot ovat hiukan korkeampia kuin laboratorionäytteistä saadut arvot johtuen yhden syöttömasmittauksen virheellisestä on-line-tuloksesta. Mittari kalibroitiin uudelleen kokeen jälkeen. Yli 8,4 %:n syöttösakeuksia emme testanneet, koska sitä korkeammilla syöttösakeuksilla ja etenkin poistosakeuksilla pohjakaavarin kuorma nousee aiheuttaen ajo-ongelmia. Viikon I tuloksiin perustuen valittiin toiselle koeajoviikolle korkein mahdollinen normaalilla ajotavalla pitkään ajettava syöttösakeus.



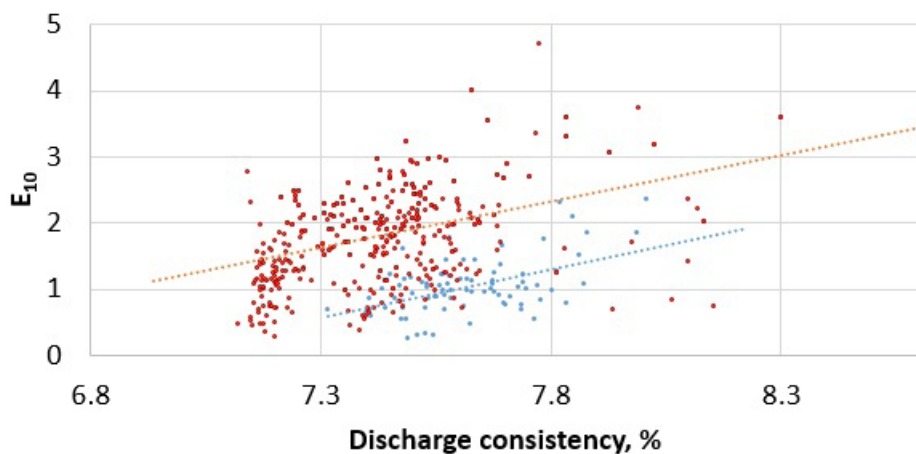
KUVA 1. Painediffusöörin syöttösakeuden vaikutus pesutehokkuuteen (Kopra et al. 2018).



KUVA 2. Painediffusöörin poistosakeuden vaikutus pesutehokkuuteen (Kopra et al. 2018).

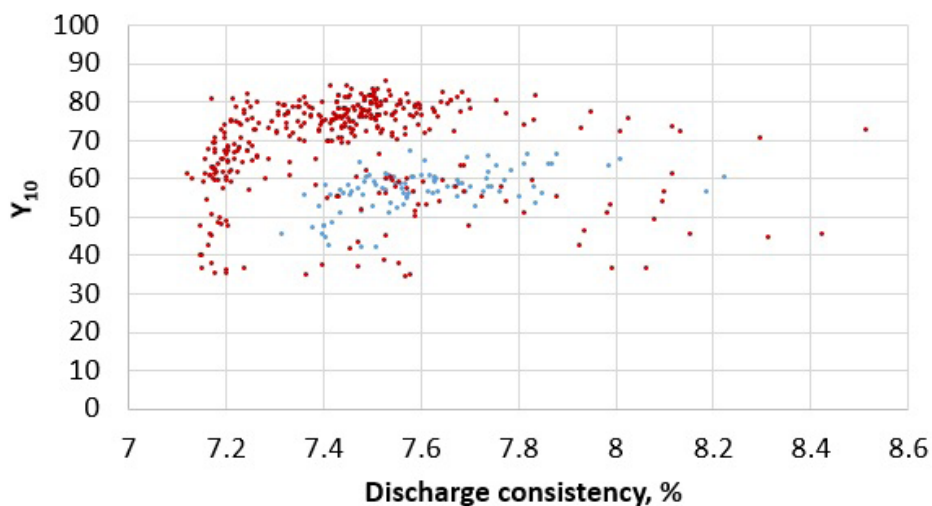
Poistosakeuden vaikutus E_{10} -tehokkuuteen kahdella eri sihtipaketin alasetonopeudella on esitetty kuvassa 3 ja vaikutus Y_{10} -arvoon on esitetty kuvassa 4 (koeajoviikko II). Kuten voidaan havaita, viikon II tulokset ovat alhaisempia kuin viikon I. Nyt E_{10} -luvut olivat samalla tasolla kuin laboratoriotuloksista lasketut. Voidaan kuitenkin havaita, että mitä korkeampi syöttösakeus on, sitä tehokkaampaa on pesu. E_{10} -arvot ovat suhteellisesti alhaisempia kuin laitevalmistajan ja kirjallisuuden ilmoittamat arvot. Yleisesti ottaen syöttösakeuden pitäisi olla tasolla 10 prosenttia. Alhaisen syöttösakeuden lisäksi toinen syy alhaisiin E_{10} -arvoihin saattoi olla sihtipaketin kunto, reikien tukkoisuus, hydrauliset ongelmat tai muut syyt liittyen laitteen asetusarvoihin. Kyseisen painediffusöörin maksimikapasiteetti on noin 1600 adt/d. Alhaisesta tuotannosta (noin 700 adt/d) johtuen pesuri ei toiminut optimialueella. Tällaisissa tapauksissa massakakku saattaa saostua liikaa.

Tässä tapauksessa painediffusöörin sihtipaketin alasetonopeus 1,2 m/s antoi 1 E_{10} -yksikön korkeampia tehokkuusarvoja kuin 1,1 m/s. Edellisessä tutkimuksessamme (Kopra et al. 2012) saimme samansuuntaisia tuloksia. Todettiin, että kun nopeussuhde massan ja sihdin välillä on optimilla alueella, painediffusööri toimii hyvin. Korkeammilla nopeuksilla pesutehokkuus romahtaa nopeasti. Lysen (1987) on todennut pesutehokkuuden kasvun johtuvan siitä, kun muodostunut massakakku pidetään homogeenisena säätämällä sihtipaketin alasetonopeus oikein. Jos sihtipaketin nopeus on liian suuri, muodostunut massakakku painautuu kasaan, minkä johdosta syrjäytyspesu häiriintyy. Siten on liian vähän aikaa tasaiselle pesuveden syrjäytykselle kakun läpi. (Kopra 2015.)



- Downward velocity of the screen 1.1
- Downward velocity of the screen 1.2

KUVA 3. Painediffusöörin poistosakeuden vaikutus E_{10} -pesutehokkuuteen kahdella eri sihtipaketin alasvetonopeudella (Kopra et al. 2018).

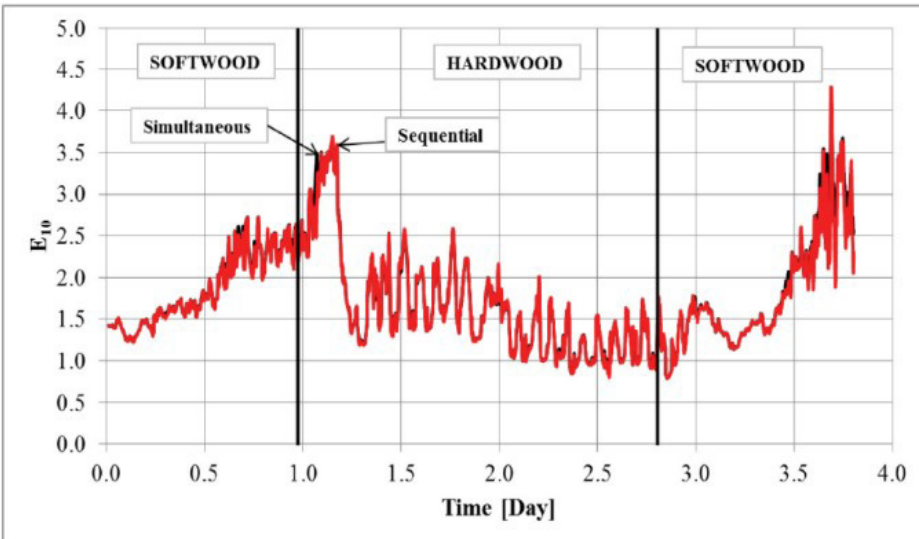
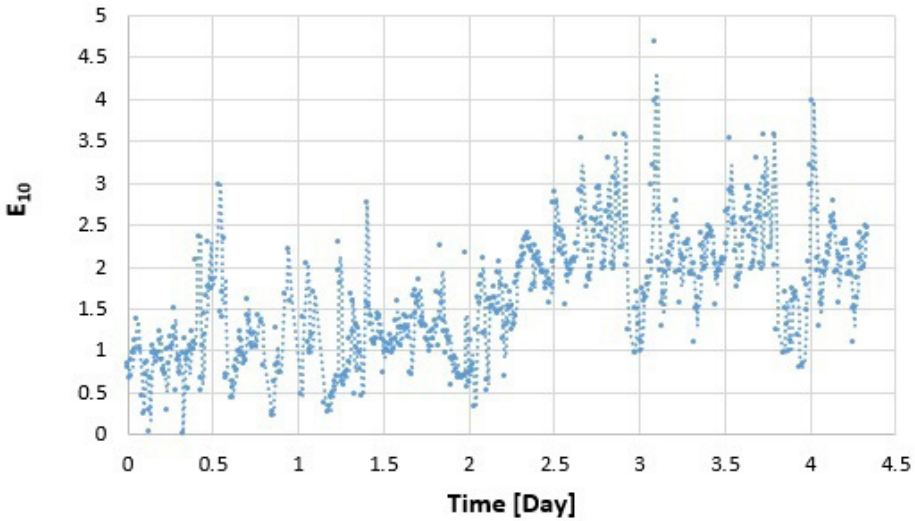


- Downward velocity of the screen 1.1
- Downward velocity of the screen 1.2

KUVA 4. Painediffusöörin poistosakeuden vaikutus Y_{10} -arvoihin kahdella eri sihtipaketin alasvetonopeudella (Kopra et al. 2018).

Kuvassa 5 (a) voidaan nähdä on-line E_{10} -arvot laskettuna Tervolan tavalla (Tervola 2018) testiviikolta II. Kuvasta voidaan nähdä, että painediffusöörin tehokkuus vaihtelee huomattavasti. Mittaamalla pesutehokkuutta hyödyntäen jatkuvatoimisia TDS-mittauksia ja säätämällä ajoparametreja oikeaan suuntaan voidaan vähentää tehottomia pesurin ajohetkiä.

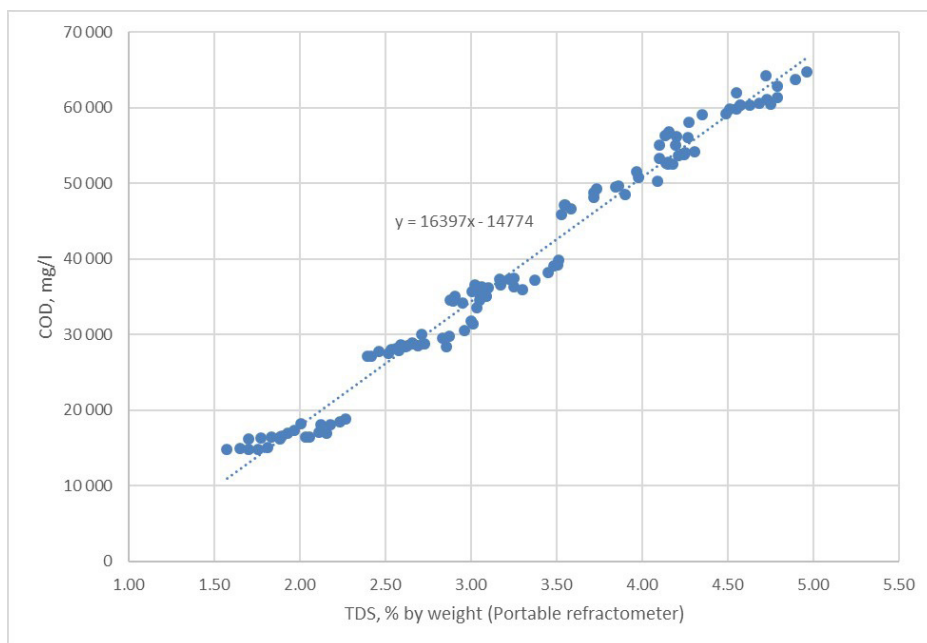
Kuvasta 5 (b) nähdään Tervolan julkaisema jatkuvaan TDS-mittaukseen perustuva E_{10} -tulos eräältä toiselta tehtaalta koskien painediffusööriä. Vaihtelu hänen tuloksissaan on hyvin samankaltaista kuin tässä esitetyt tuloksemme.



KUVA 5. (a) On-line E_{10} -arvot testiviikolta II laskettu Tervolan tavalla [5] ja (b) Tervolan [5] oman tutkimuksen tulokset "sequential"- ja "simultaneous"-tavalla.

PAINEDIFFUSÖÖRIN SUODOSMITTAUKSET

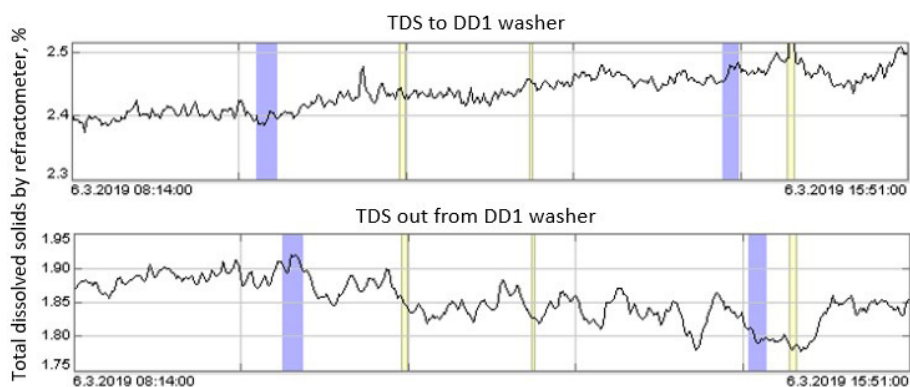
Kuvasta 6 voidaan nähdä COD-pitoisuuden korrelaatio kannettavalla refraktometrillä mitattuun TDS-pitoisuuteen paine- ja atmosfääriseen diffusööriin suodoksista mitattuna havulinjalla. Tulokset näyttävät, että COD:lla ja refraktometrillä on erinomainen paikka-kohtainen korrelaatio (R^2 0,988). Asettamalla kulmakerroin refraktometrin kalibrointiin voidaan refraktometriä käyttää myös COD-mittauksena tehtaalla. On kuitenkin tärkeää tarkistaa kalibrointi säännöllisesti, esimerkiksi muutaman kerran vuodessa. Lisäksi kyseisellä tehtaalla käytetään kahta eri alkalia (hapetettua valkolipeää ja NaOH:a), ja tämä voi vaikuttaa kalibrointeihin.



KUVA 6. Diffusööripesureiden suodosfraktioiden COD-pitoisuus analysoituna laboratoriossa verrattuna kannettavalla refraktometrillä mitattuun TDS-arvoon (Testiviikko I), (Kopra et al. 2018).

KOETEHIDAS C: LYHYTKUITULINJALLA ILMAPITOISUUDEN VAIKUTUS DD-PESUUN

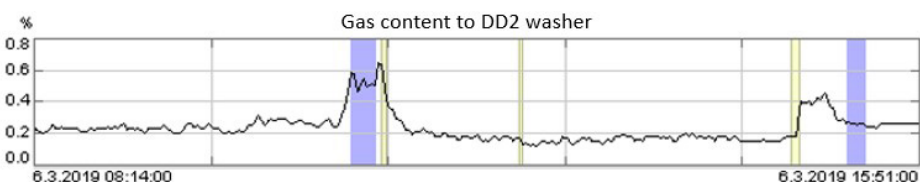
Koivulinjan ruskeanmassan pesulinja oli likaantumassa, ja kuiva-aine pitoisuus DD1-pesurin syöttömassan suodososassa oli nousussa. Kun vaahdonestoaine ja annostelupaikka muutettiin, TDS-pitoisuus DD1-pesurilta alkoi laskea (kuva 7). DD1-pesuri pesi siis liuenutta kuiva-ainetta tehokkaammin.



KUVA 7. TDS-pitoisuus DD1-pesurille ja pesurilta koeajon aikana (Kopra et al. 2019 PEERS).

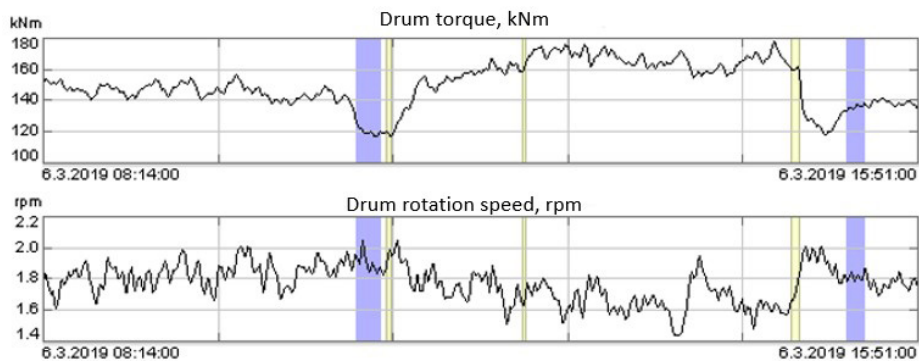
MUUTOSTEN VAIKUTUKSET DD-PESURIIN

Kun vaahdonestoaineen annostelu pisteeseen 1 lopetettiin ja massa ilman vaahdonestoainetta tuli O2-reaktorin läpi, kaasupitoisuus DD2-pesurin syöttömassassa nousi 0,2 %:sta 0,6 %:iin. Kun annostelu pisteeseen 3 aloitettiin, kaasupitoisuus laski tasolle 0,16–0,17 %, joka oli alhaisempi kuin referenssitaso, (kuva 8). On huomioitava, että mittaus oli noin 3 bar paineessa ja pesurilla paine oli huomattavasti alhaisempi ja tällöin todellinen kaasuosuus suurempi. Annostelulla pisteeseen 3, joka oli lähempänä DD2-pesuria, saatiin parempia tuloksia silikonipohjaisella kemikaalilla kuin normaalilla ajotavalla. Pidempiaikaisia koekteita silikonipohjaisella kemikaalilla ja uudella annostelupisteellä kuitenkin tarvitaan, jotta muutokset kaasupitoisuudessa koetilanteessa verrattuna normaaliin ajotapaan saadaan dokumentoitua ja vaikutukset happivaiheeseen ja alueen pesureihin nähdään täysin.



KUVA 8. Kaasupitoisuus DD2-pesurille kokeiden aikana (Kopra et al. 2019 PEERS).

Kun kaasupitoisuus DD2-pesurille laski, rummun momentti kasvoi ja pyörimisnopeus laski (kuva 9). Kaiken kaikkiaan pesurin toiminta rauhoittui ja ajoparametrit asettuivat paremmalle tasolle. Tuloksena oli pesurin tehokkaampi toiminta.



KUVA 9. DD2-pesurin rummun momentti ja pyörimisnopeus koeajojen aikana (Kopra et al. 2019 PEERS).

Lisäksi DD2-pesurin poistosakeus nousi, mikä voitiin havaita syöttöventtiilin kulman säädössä seuraavassa lajitteluprosessissa sekä suodossäiliöiden pinnannousuna.



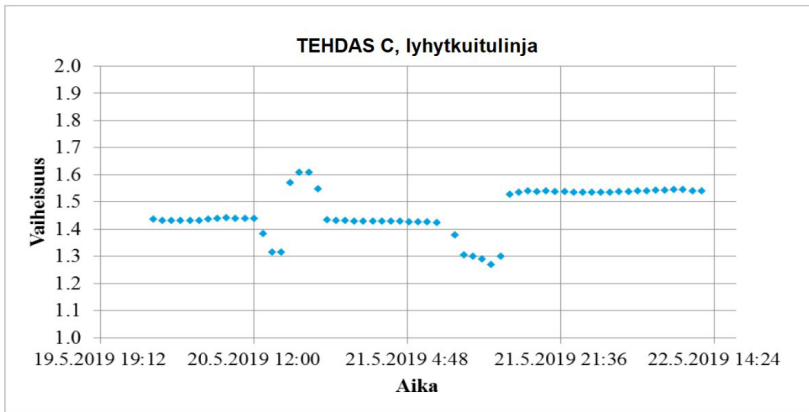
KUVA 10. Happivaiheen jälkeisen lajittelun sakeussäätö (Kopra et al. 2019 PEERS).

Tulokset osoittivat, että vaahdonestokemikaalien laadulla ja annostelupisteellä on selkeä vaikutus pesun onnistumiseen happivaiheen alueella. Aiemmassa tutkimuksessamme (Käyhkö et al. 2018) löydettiin, että vaahdonestokemikaalilla on selkeä vaikutus happikuplan kokoon happivaiheen syötössä. Jos kyseisellä koetehtaalla annostelupaikka siirrettäisiin happivaiheen jälkeen, kaasukuplat olisivat pienempiä ja täten saataisiin lisää reaktiopintaa. Hyödyntämällä reaaliaikaisia kaasupitoisuus- ja TDS-mittauksia pesun tilaa voitaisiin seurata paremmin. Mittaukset mahdollistaisivat myös säätösystemin rakentamisen.

KOETEHIDAS C: DD-PESURIN VAIHEISTUKSEN, PESUSAKEUDEN JA PESUVEDEN PAINOTUKSEN VAIKUTUS PESUTEHOKKUUTEEN

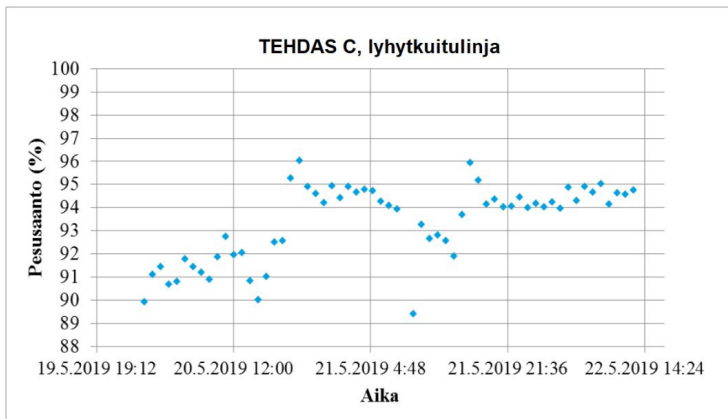
Kuvista 11 ja 12 voidaan havaita, että loppuviikolla vaiheistuksen ollessa korkeampi pesusaantona ilmoitettu pesu on tehokkaampi.

DD2, VAIHEISUUS



KUVA 11. DD2-pesurin vaiheisuus koeajoviikon aikana (kuva Pekka Tervola).

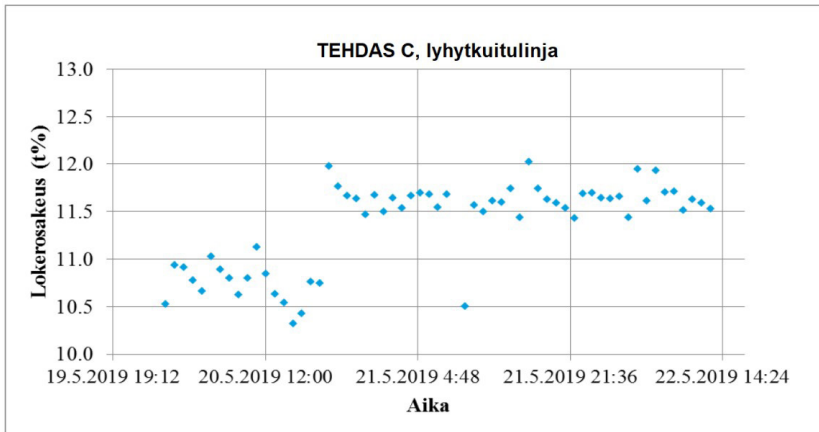
DD2, PESUSAANTO



KUVA 12. DD2-pesurin pesusaanto koeajoviikon aikana (kuva Pekka Tervola).

Kuvasta 13 nähdään lokerosakeuden muutokset koeajoviikolla. Muutokset seuraavat lähes identtisesti pesusaantoa: mitä korkeampi pesu/lokerosakeus saadaan ja mitä suurempi vaiheistus, sitä tehokkaammin pesuri pesee kyseisessä tapauksessa.

DD2, LOKEROSAKEUS

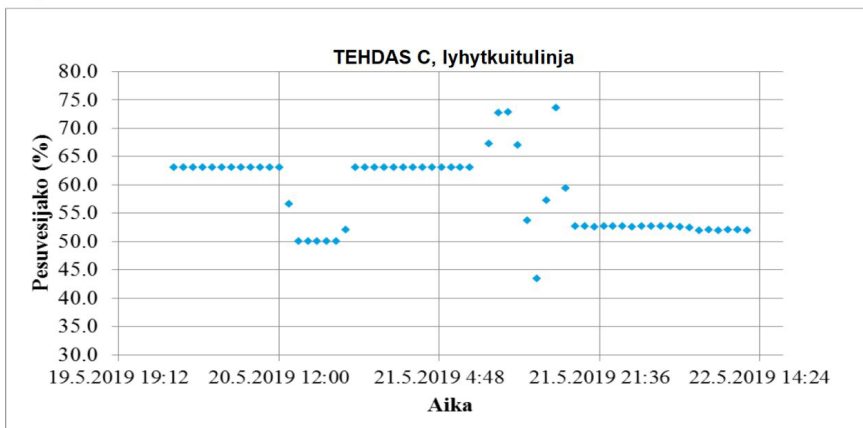


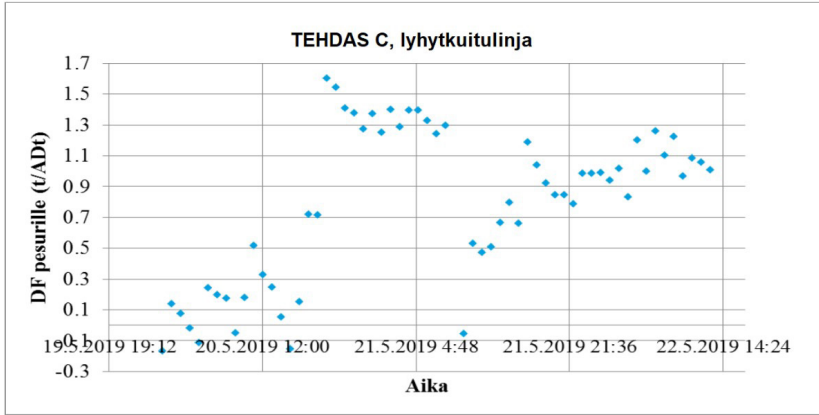
KUVA 13. DD2-pesurin lokerosakeus koeajoviikon aikana (kuva Pekka Tervola).

On-line-TDS-seurannan avulla voidaan hakea pesurin tehokkuuden kannalta paras ajotapa. Muun muassa tuotantotasolla, puulajilla ja linjan nestetaseella on vaikutusta siihen, mikä on optimiajotapa kulloinkin. Tulevaisuudessa pesurin ohjaus voisi olla mittauksen mukaan. Mittauksen on kuitenkin oltava suhteellisen huoltovapaa ja mittapään likaantuminen on estettävä.

Pesuvesijako koeajoviikolla tehtiin kuvan 14 mukaisesti, ja laimennuskerroin (DF) on esitetty kuvassa 15. Arvo 50 % tarkoittaa, että pesuvesi on ajettu tasaisesti pesurin ala- ja yläpesuvyöhykkeisiin, ja yli 50 % tarkoittaa, että pesuvesi on jaettu alapainotteisesti. Tulokset osoittavat, että pesuveden jako tasan oli paras vaihtoehto koeajoviikolla.

DD2, PESUVESIJAKO





KUVA 15. DD2-pesurin laimennuskerroin (DF) koeajoviikon aikana (kuva Pekka Tervola).

Yhteenvedona DD-pesurin koeajoista voidaan todeta, että korkea lokerosakeus, laimennuskerroin ja pesuvaiheiden määrä nostavat pesusaantoa ja pesuvesijako 50/50 vaikuttaisi edullisimmalta.

YHTIENVETO

Hankkeen aikana loimme sekä pitkäkuitulinjalle että lyhytkuitulinjalle on-line-TDS-mittaustekniikkaan perustuvan pesureiden monitorointi- ja tehokkuuslaskentamittausjärjestelmän. Reaaliaikaiset mittaukset auttavat seuraamaan pesun tilaa ja tekemään tarvittaessa ajoparametrimuutoksia. Mittausten perusteella voidaan myös kehittää pesun automaattista säätöä. Täten voidaan säätää pesuvien määrää, saada kulloisenkin tilanteen sallimissa rajoissa mahdollisimman puhdasta massaa seuraaviin osaprosesseihin ja lisäksi saada haihduttamoon menevä laihalipeä mahdollisimman korkeassa kuiva-ainepitoisuudessa. Tällä on merkittävä vaikutus tehtaan energia- ja materiaalitalouteen. Näin laajoja on-line-mittausjärjestelyjä ei ole aiemmin maailmalla juurikaan esitelty, ei edes uusimmilla tehtailla. Tässä työssä on esitetty myös, kuinka pesun ja happivaiheen toiminta kytkeytyy toisiinsa. Jos pesu ennen happivaihetta on puutteellinen, happivaiheessa tapahtuu ligniinin reaktioiden lisäksi paljon epätoivottuja reaktioita. Happivaiheen reduktiot laskevat ja tapahtuu myös laatu- ja saantotappioita. Löysimme myös ilman vaikutuksen yhteyden sekä pesuun että happivaiheen toimintaan. Tämän johdosta vaahdonestoainekemikaalien annostelu pitää miettiä tapauskohtaisesti siten, että sekä pesu- että happivaihe toimivat.

LÄHTEET

Kopra, R., Pesonen, A., Käyhkö, J. and Dahl O., How to use TDS measurements for evaluating the performance of the washers – mill study, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 28–31, 2018, Portland, OR, USA.

Kopra, R., Kari, E., Harinen, M., Tirri, T. and Dahl, O. Improving brown stock washing by using on-line measurement – mill investigations, O PAPEL 73(1):79–85 (2012).

Lysén, C. Control of screen velocity – the key to pressure diffuser washing efficiency. Proc. of Pulp washing '87 Symposium, Marienhamn, Finland, 321–332 (1987).

Kopra R. (2015), Application of the refractometer in the measurement and monitoring of brown stock washing, doctoral dissertation, Aalto University, Espoo, Finland, 51 p.

Tervola, P. New method for estimating chemical pulp washer efficiency using online data reconciliation, Appita Journal, 71(2): 136–149 (2018)

Kopra, R., Käyhkö, J., Pesonen, A., Effect of Defoamer on the Gas Content and Performance of O2 washers – Mill Case Study, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 27–30, 2019, St Louis, MO, USA.

Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M., and Honkanen, M., The state and role of gas dispersion in the oxygen delignification process, Proc of the Paper week 2019, February 4–7, 2019, Montreal, QC, Canada.

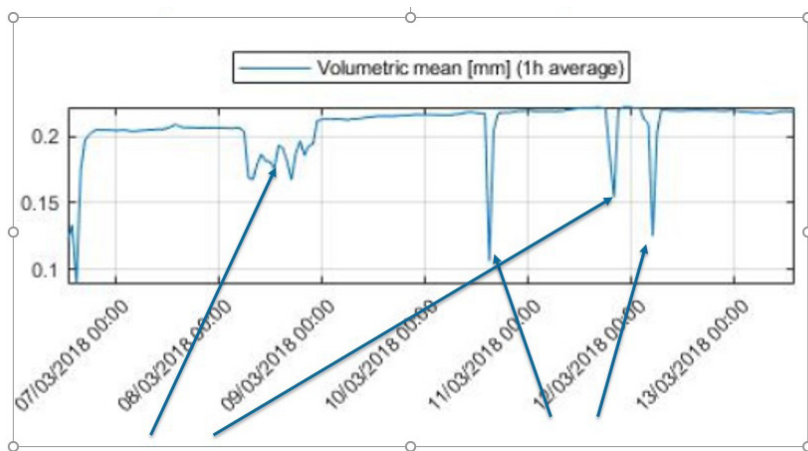
KUPLA- JA KAASUPITOISUUS- TUTKIMUKSET ERI TEHTAILLA

Jari Käyhkö

Hankkeessa tehtiin erilaisia kaasuihin liittyviä mittauksia eri tehtailta. Pääasiassa tavoitteena oli saada kuvaa happivaiheen toiminnasta, mutta samalla myös testattiin ja kehitettiin mittaustekniikkaa, datan keruuta ja käsittelyä sekä näiden hyödynnettävyyttä erilaisissa käytännön tutkimuksissa.

KOETEHIDAS A: KUPLAKOKO- JA KAASUPITOISUUSMITTAUKSET

Tehtaalla mustalipeää ja suopaa pumpataan käsiteltäväksi viereiselle tehtaalle. Saavutettava pumppausteho on usein alhainen, ja tämän johdosta tehtaan tuotantoa joudutaan rajoittamaan. Pumppaustehon vaihtelun epäiltiin johtuvan linjan kaasupitoisuuden vaihteluista. Kuplakuvauksissa havaittiin linjalla esiintyvän vaihtelevia määriä kaasuja (kuva 1), ja lisäksi havaitun kaasun kuplakoko oli erittäin pieni, jolloin kaasukuplia on myös hankalaa erottaa esimerkiksi pumppauksessa. Mittaustapa ei kuitenkaan soveltunut prosessin pitkäaikaisempaan seurantaan, koska mittauskohdassa paine oli 12 bar, jolloin mustalipeässä olevat kaasut ovat mittauskohdassa täysin tai lähes täysin liuenneessa muodossa. Mittaus kuitenkin osoitti, että prosessissa on todennäköisesti merkittäviä määriä kaasuja ja lisäksi näiden kaasujen kuplakoko on pieni, mikä hankaloittaa niiden erottumista prosessista. Lisäksi todennettiin, että kuplamittausta voidaan soveltaa myös mustalipeässä esiintyvien kaasujen havainnointiin. Aiemmin kuplamittauksia on sovellettu ainoastaan kuplien havainnointiin keskisakeusmassasta.

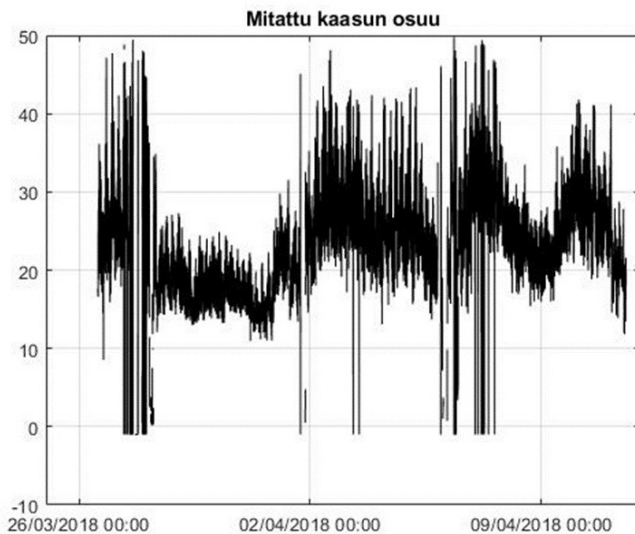


Näissä kaasukuplia

Näissä paljon vaahdosta kaasua

KUVA 1. Kuplakuvauksella havainnointu kaasujen esiintyminen pumppauslinjassa. Paine mittauskohdassa 12 bar.

Tulosten perusteella päätettiin asentaa pumpun imupuolelle Echowise™-ilmapitoisuusmittaus. Kuvassa 2 on esitetty linjalta mitattu kaasuosuus noin kahden viikon ajalta.

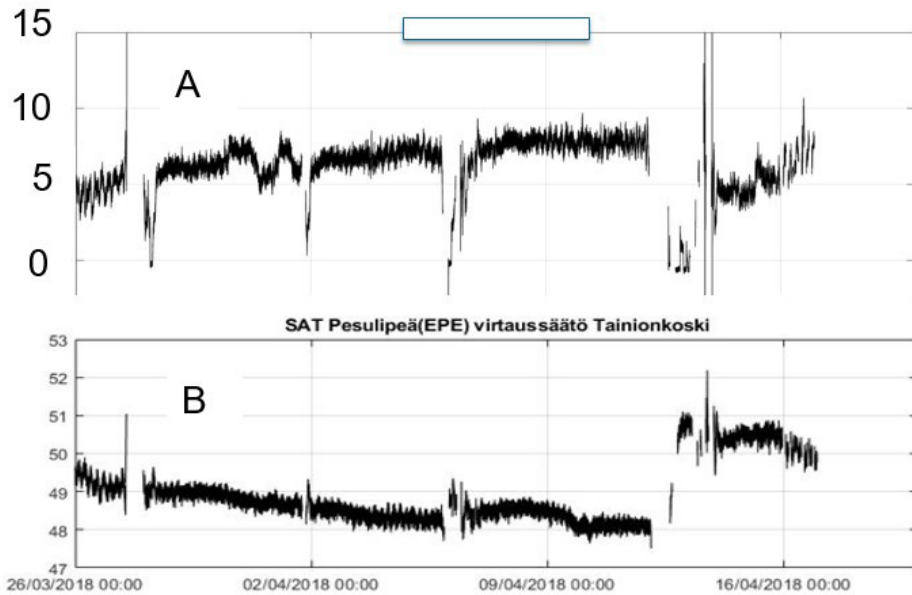


KUVA 2. Mustalipeän pumppauslinjalta pumpun imupuolelta mitattu kaasuosuus (%). Paikallisenäytön mukaan paine mittauskohdassa on luokkaa 1,8 bar.

Linjalla esiintyy suuri määrä kaasua, ja kaasun osuus myös vaihtelee voimakkaasti 15 %:sta noin 50 %:iin. Välillä kaasuosuus kasvaa mittausalueen yli, jolloin mittari näyttää nollaa. Valtaosa havaitusta kaasuosuuden vaihtelusta johtuu todennäköisesti paineen vaihtelusta

mittauskohdassa. Havaittu suuri kaasuosuus ei kuitenkaan vaikuta pumpun toimintaan, koska pumpun jälkeen paine pysyy koko ajan tavoitearvossaan 12 bar.

Linjalta saadaan tieto lähtevästä ja saapuvasta tilavuusvirtauksesta. Lähtöpuolella virtausmittaus tehdään 12 bar:n paineessa, jolloin kuplakuvausten mukaan mustalipeässä oleva kaasu on joko täysin tai lähes täysin liuenneessa muodossa. Saapuvalla puolella virtausmittaus tapahtuu noin 1,5 bar:n paineessa, jolloin kaasua esiintyy vapautuneena. Vapautuneen kaasun osuus on mahdollista estimoida virtausmittausten erotuksen perusteella (kuva 3 A).

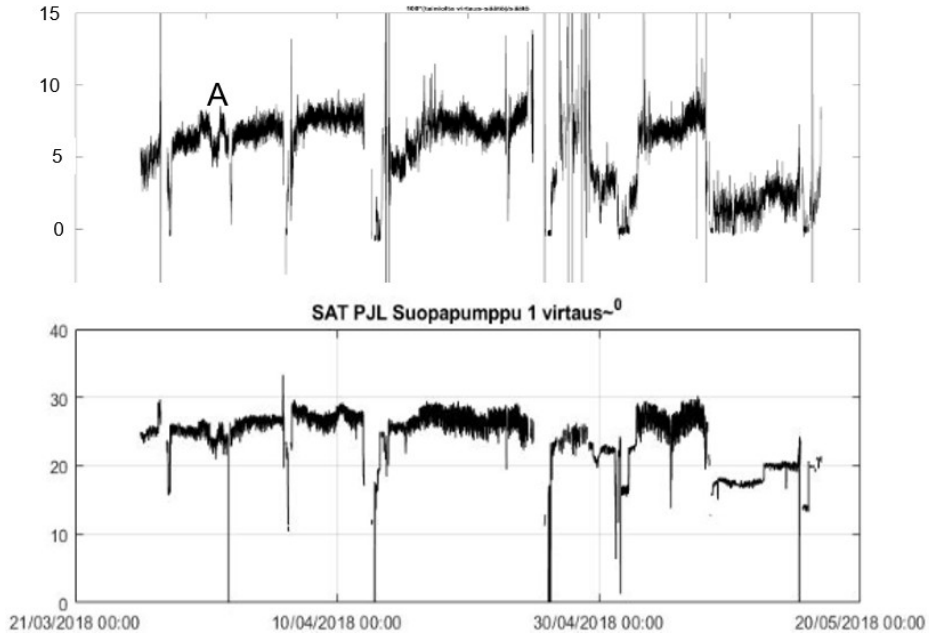


KUVA 3. A) Virtausmittausten perusteella laskettu kaasun osuus linjan loppupäässä, %. B) Mitattu virtausnopeus linjan alkupäässä.

Kuvan 3 mukaan linjan loppupäässä kaasupitoisuus nousee kahden viikon kuluessa neljästä kahdeksaan prosenttiin. Samanaikaisesti tilavuusvirtaus laskee 49,5 l:sta/s 48 l:aan/s eli noin 1,5 l/s. Tämän perusteella kahdeksan prosentin kaasupitoisuus linjan loppupäässä alentaa saavutettavaa virtausnopeutta luokkaa 3 l/s. Havaittu kaasun vaikutus virtaukseen ei siis ole kovinkaan suuri mutta kuitenkin merkittävä talouden kannalta, koska linjan pumppauskapasiteetti on tehtaan tuotantoa rajoittava tekijä.

Pumpun imupuolella kaasuosuus on kuvan 2 mukaan luokkaa 25 %, linjan loppupäässä puolestaan luokkaa 6 % ja paine mittauskohdissa on lähes sama. Tämän perusteella merkittävä osa kaasuista saadaan erotettua mustalipeästä pumppauksen yhteydessä. Toisaalta paikallisiinäyttöinen painemittaus on hyvin epäluotettava, ja paine pumpun imupuolella voi olla huomattavasti oletettua alhaisempi, joten tähän tulokseen täytyy suhtautua hieman varauksella.

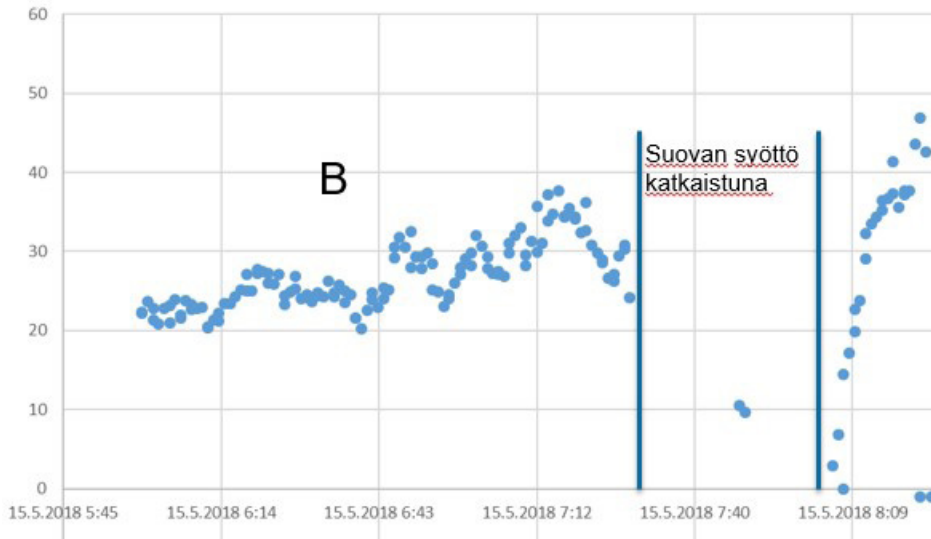
Mustalipeä ja suopa sekoittuvat ennen pumppausta, ja kaasujen hallinnan kannalta olisi olennaista tietää, onko näissä jakeissa merkittävää eroa kaasuosuuden suhteen. Oletettavasti suovan kaasupitoisuus on suurempi kuin mustalipeän. Kuvassa 4 on esitetty linjan kaasupitoisuus sekä pumpattavan suovan virtaus.



KUVA 4. A) Virtauserojen perusteella laskettu kaasupitoisuus linjassa. B) Suopavirtaus, l/s.

Kuvan 4 perusteella suopavirtauksella on merkittävä vaikutus linjan kaasupitoisuuteen, eli merkittävä osuus linjan kaasuista tulisi suovan mukana.

Suovan merkityksen varmentamiseksi suovan syöttö katkaistiin hetkeksi ja todennettiin tämän vaikutus linjan kaasupitoisuuteen (kuva 5).



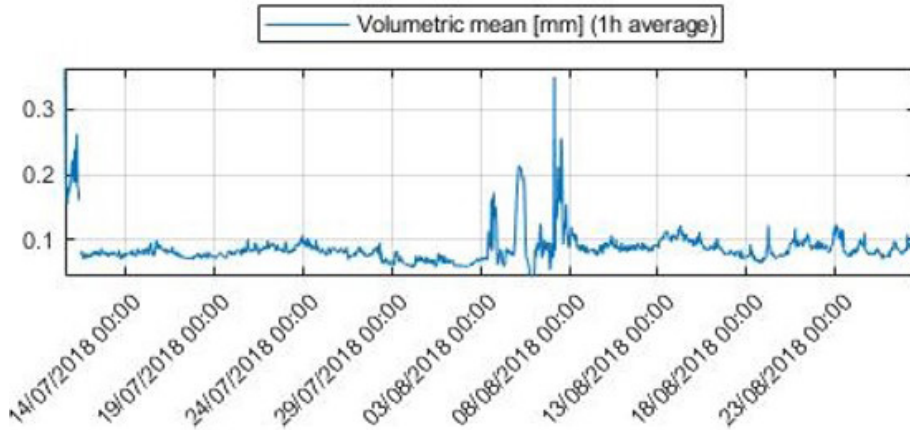
KUVA 5. A) Virtausmittauksista laskettu linjan kaasupitoisuus (%) ja B) pumpun imupuolen kaasupitoisuus (%) suovan syötön katkaisukokeessa. Suovan syötön lakatessa kaasupitoisuus nousi yli mittarin mittausalueen, joten tältä ajalta ei tallentunut mittausdataa.

Yllättäen suovan syötön pysäytyksen aikana kaasupitoisuus ei laskenut, vaan kohosi merkittävästi. Siten tässä vaiheessa ei voida varmuudella todeta, kumpi jakeista on pääasiallinen kaasun lähde linjalla.

KOETEHIDAS B: KUPLAKUVAUKSET

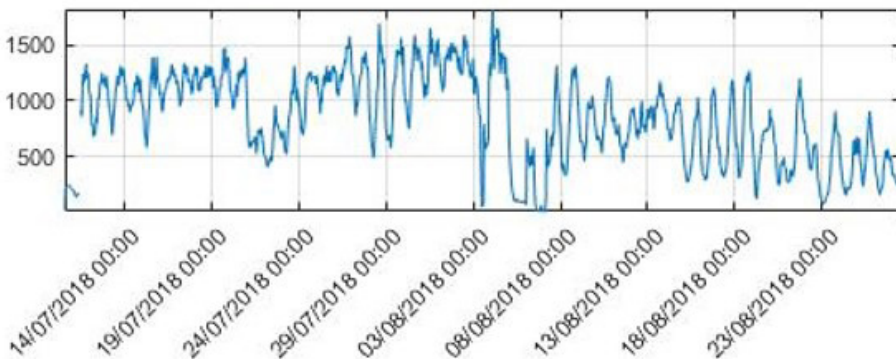
Oulun pitkäkuitulinjalla oli asennettuna refraktometri hapensyötön jälkeen ennen kakosvaiheen happireaktoria, mikä mahdollisti kuplakokomittauksen kyseisessä positiossa. Mittauksen pääasiallisena tavoitteena oli saada uusi referenssitulos pitkäkuitulinjan happidispersiön kuplakoolle sekä tässä esiintyvälle vaihtelulle. Prosessista mitattiin happidispersiota noin neljän kuukauden ajanjaksolta ja lisäksi tehtiin happidispersiön käyttäytymiseen liittyviä kokeita.

Kuvassa 6 on esitetty keskimääräinen kuplakoko mitattuna reilun kuukauden ajanjaksolta. Mittaus toimi hyvin, ja havaittu keskimääräinen kuplakoko oli noin 0,1 mm eli samaa luokkaa kuin toisella havulinjalla aiemmin mitattu ja noin 10 kertaa pienempi kuin aiemmin koivulinjalta mitattu. Yhdessä aiemmin tehtyjen havaintojen kanssa tämä tuki oletusta, että pitkäkuituprosesseissa hapen dispergoituvuus ja siten kuplakoko happivaiheessa on pieni.



KUVA 6. II-vaiheen hapen syötön jälkeen mitattu tilavuuspainotettu keskimääräinen kuplakoko.

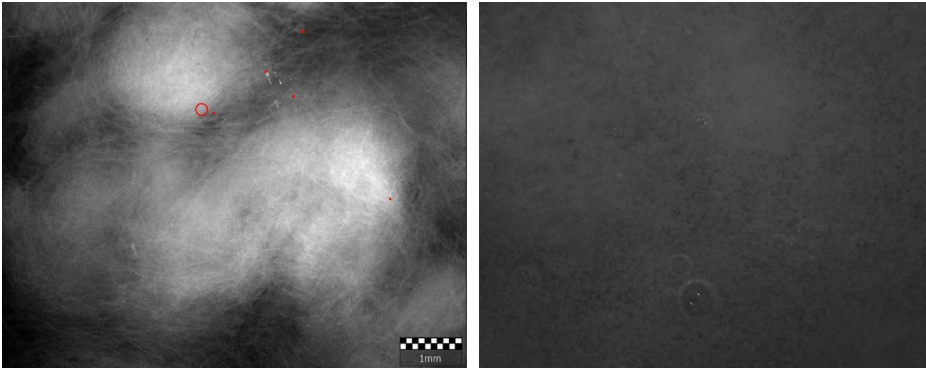
Tunnistettujen kuplien määrässä esiintyi voimakasta vuorokautisvaihtelua, joka korreloi ainakin jossakin määrin keskimääräisen kuplakoon kanssa. Tehtaalta ei kerätty prosessidatua, joten tähän liittyviä syy-seuraussuhteita ei hankkeessa selvitetty tarkemmin.



KUVA 7. Tunnistettujen kuplien määrä.

II-reaktoria syöttävä pumppu ei poista kaasua, joten sulkemalla hetkeksi II-reaktorin hapen syöttö voitiin kuplamittauksella todentaa, tuleeko I-reaktorista jäännöskaasua (kuva

8). Tehdaskokeilla pyrittiin selvittämään, kuinka happi käyttäytyy ja kuluu reaktorissa muuttamalla happiannosta ja seuraamalla samalla jäännöskaasun määrää. Happiannosta nostettiin kuuden tunnin aikana asteittain 12 -> 22 -> 25 -> 28 -> 32-> 34 kg/aan/ton ja noston vaikutus jäännöshapen määrään tarkistettiin puoleltoista tunnin kuluttua sulkeamalla II-vaiheen hapen syöttö hetkellisesti. 28 kg/ton annokseen asti jäännöshapeta ei havaittu, 32 kg/ton annoksella havaittiin yksi iso purskaus ja 34 kg/ton annoksella hapeta tulee purskeina läpi. Kaasun viipymäaika reaktorissa oli noin 15 min verrattuna massan aikaan 1 h 20 min. Yli 30 kg:n/ton annoksilla sekoittimen tehonotto laski alkuperäisestä 60 %:sta 50:een ja 45 %:iin.



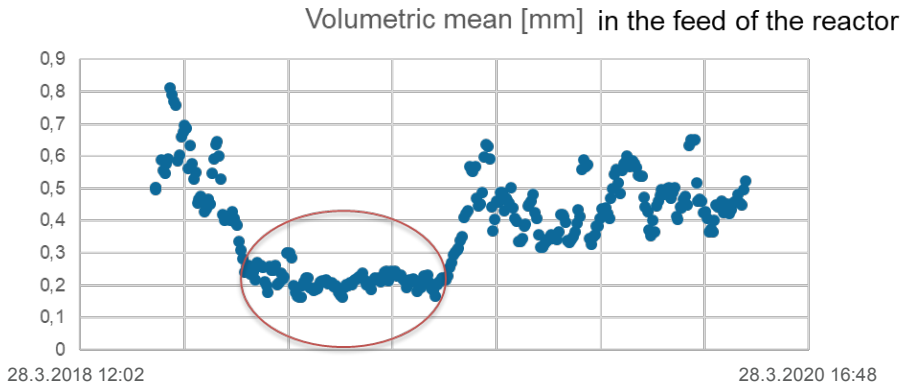
KUVA 8. Vasen: Normaali mittaustilanne, kun II-reaktorin hapen syöttö on päällä. Oikea: Tilanne, kun II-reaktorille ei syötetä hapeta ja I-reaktorissa kaikki happi on kulunut. Tällöin kuvassa näkyy ainoastaan kuituflokkeja ja yksittäisiä kuituja.

KOETEHIDAS C: LYHYTKUITULINJAN HAPPIVAIHEEN YMPÄRISTÖ

Tehdastutkimusten päätavoitteena oli selvittää happidispersion kuplakokoon vaikuttavia tekijöitä sekä sitä, kuinka kuplakoko vaikuttaa happidelignifioinnin toimintaan. Tehtaalla tehdyt aiemmat tutkimukset indikoivat, että hapen kuplakokoon voisi olla mahdollista vaikuttaa hapen sekoitusta parantamalla sekä vaahdonestoaineen käytön optimoinnilla. Lisäksi oletuksena oli, että hapen kuplakokoa pienentämällä voisi olla mahdollista parantaa kappareduktiota. Muutokset eivät kuitenkaan saisi huonontaa happivaiheen ympärillä olevien pesuvaiheiden toimintaa. Tutkimusten tulokset on pääosin julkaistu konferenssiesi-tyksissä (Käyhkö et. al. 2018 a, b, 2019 a, b) ja tähän on koostettu merkittävimmät tulokset.

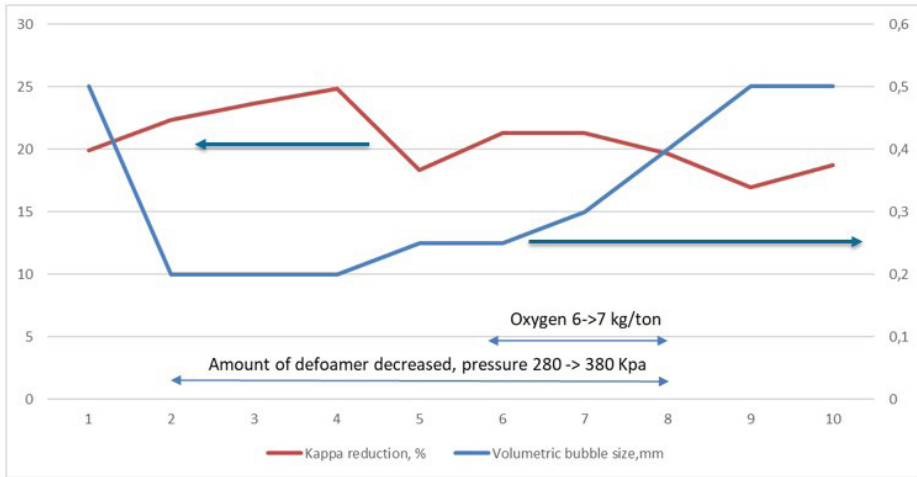
Vaahdonestoaineen käytöllä voi olla happidispersion kuplakokoa kasvattava vaikutus, ja tätä tutkittiin sulkemalla vaahdonestoaineen syöttö happivaihetta edeltävälle pesurille (kuva 9). Tällöin happidispersion kuplakoko pieneni huomattavasti. Koe toistettiin myöhemmin, ja tällöin vaahdonestoaineen syötön sulkemisella ei ollut merkittävää vaikutusta happidisper- sion kuplakokoon. Näyttäisi siis siltä, että kemiallinen tila prosessissa vaihtelee siten, että

vaahdonestoaineen käytön vähentämisellä ei aina ole vaikutusta dispersion kuplakokoon. Syynä voisi olla vaahdonestoaineen yliannostelu. Vaahdonestoainetta annostellaan prosessiin useaan eri kohteeseen, ja voi olla, että tässä tilanteessa prosessiin kertyneen vaahdonestoaineen määrä on niin suuri, että syöttömäärän vähentäminen ei merkittävästi paranna tilannetta hapen dispergoitumisen kannalta.

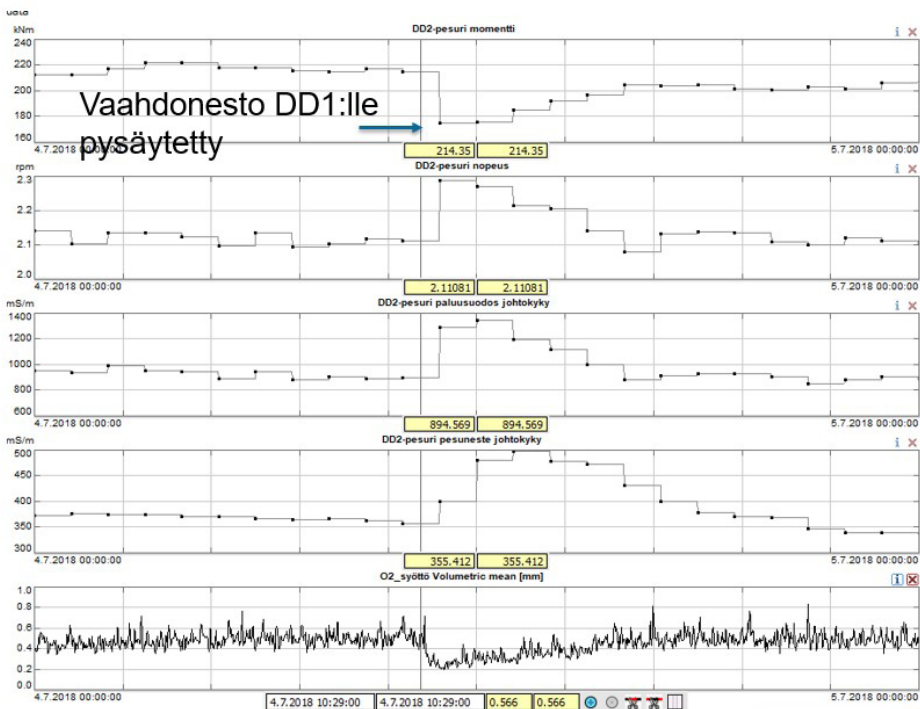


KUVA 9. Tilavuuspainotettu keskimääräinen kuplakoko happivaiheen syötössä, kun vaahdonestoke-mikaalin syöttö edelliselle pesurille on katkaistu tunnin ajaksi (Käyhkö et al. 2019 b).

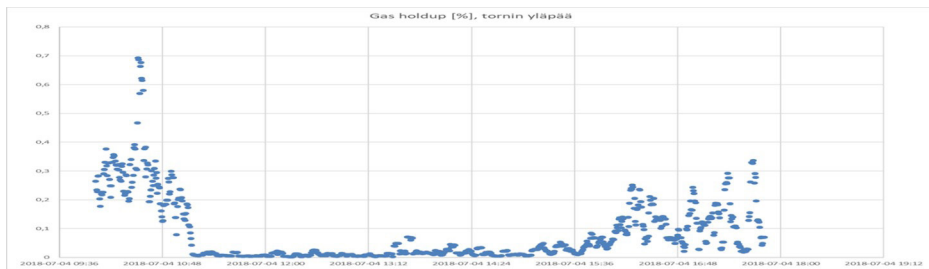
Hapen liukenemisen vaikutusta kappareduktioon tutkittiin pidemmällä koeajolla, jossa kuplakokoon vaikutettiin vähentämällä vaahdonestoaineen syöttöä sekä korottamalla prosessipainetta ja syötettävän hapen määrää (kuva 10). Hapen kuplakokoa saatiin aluksi pienennettyä merkittävästi sulkemalla vaahdonestoaineen syöttö happivaihetta edeltävällä pesurilla, mutta pesun huononemisen johdosta (kuva 11 A, pesurin rummun pyörimisnopeus kasvaa, momentti pienenee ja pestyn massan puhtautta kuvaava paluusuodoksen johtokyky nousee huomattavasti) vaahdonestoainetta jouduttiin hieman lisäämään, jolloin myös kuplakoko alkoi kasvaa. Kokeen alussa kappareduktio kasvoi selvästi, mutta kokeen jatkuessa vaikutus jäi pienemmäksi. Kuvasta 11 B kuitenkin nähdään, että kokeen aikana reaktorin huipulta mitattu jäännöskaasun määrä menee lähes nolnaan eli kuplakokoon pienentäminen lisäsi hapen kulutusta selkeästi ja paransi siten happireaktorin toimintaa. Jotta tämän vaikutus kappareduktioon saataisiin paremmin esille, tulisi hapen ja alkalien syöttöä myös lisätä. Tämä vaatisi kuitenkin vaahdonestoaineen käytön vähentämistä pitemmäksi aikaa, mikä saattaisi vaikuttaa merkittävästi pesuihin ja siten tehtaan talouteen. Lisäksi happivaihetta edeltävän pesun toiminnalla on merkittävä vaikutus pesuhäviön kautta happivaiheen kappareduktioon (kuva 12), jolloin kuplakokoon vaikutus ei välttämättä tulisi tässä esille.



KUVA 10. Tilavuuspainotettu keskimääräinen kuplakoko ja kappareduktio, kun vaahdonestoaineen syöttöä on vähennetty (Käyhkö et al. 2019 a).

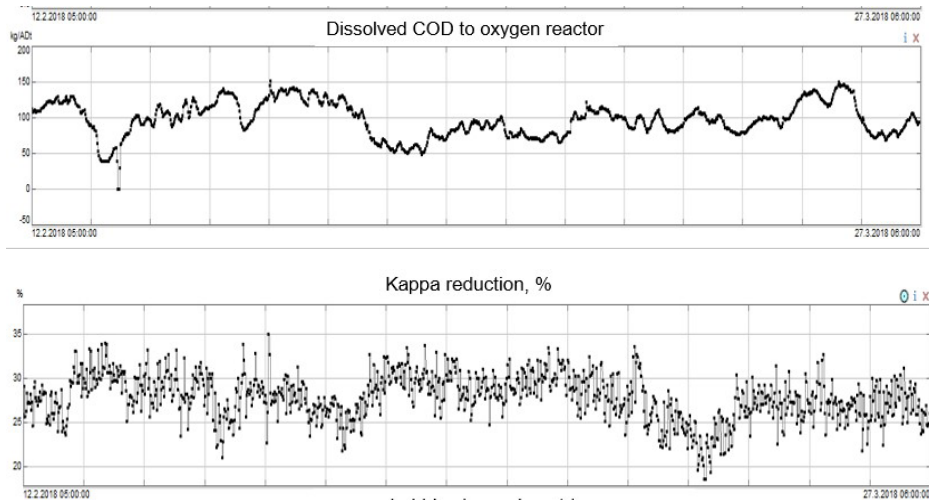


A)



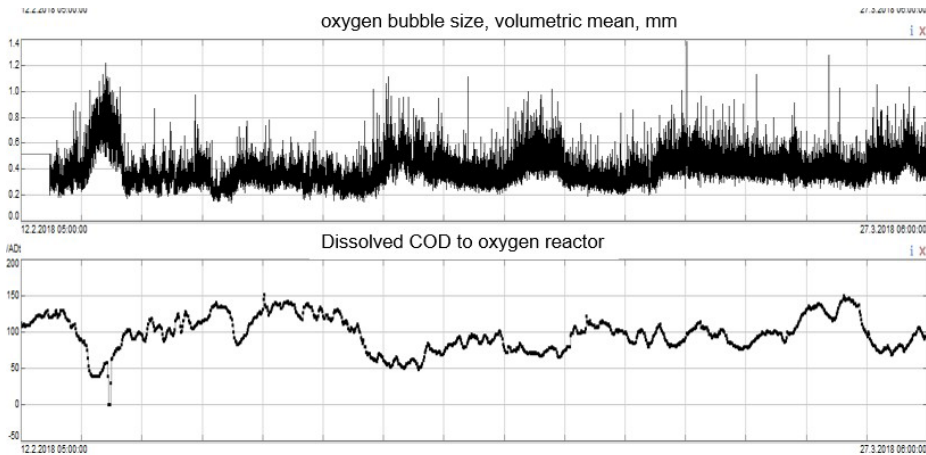
B)

KUVA 11. A) Vaahtonestoaineen syötön sulkemisen vaikutukset happivaiheen jälkeisen pesun (DD2) toimintaan ja B) hapen määrään reaktorin yläosassa (Gas holdup).



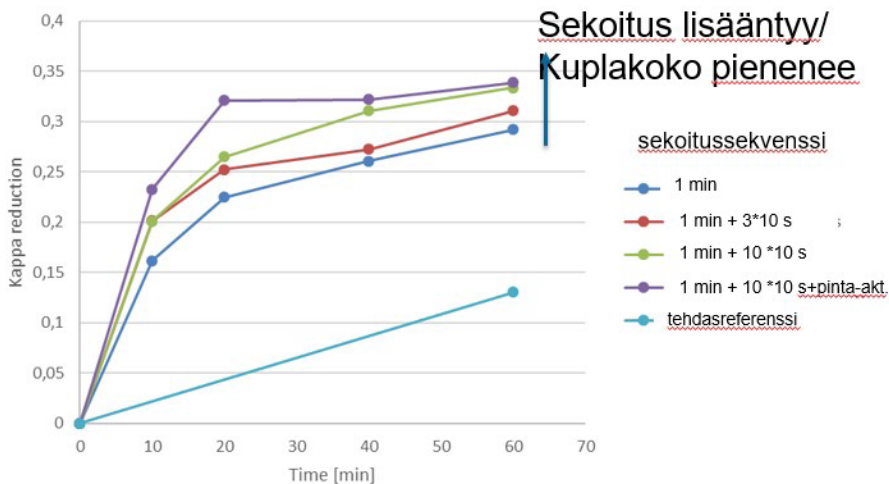
KUVA 12. Liuenneen COD:n ja kappareduktion korrelaatio. Liuenneen COD on mitattu refraktometrillä reaktorin syöttömassasta. Todellinen happivaiheessa saavutettava kappareduktio on alhaisempi kuin kuvassa osoitettu, koska kuvan kappareduktion määrittämisessä käytettävät kappamittaukset tapahtuvat puskumassasta ja valkaisuun menevästä massasta.

Prosessidatasta toivottiin myös löytyvän kuplakoon ja kappareduktion väliltä korrelaatio eli pienemmällä kuplakoolla saavutetaan parempi reduktio, mutta johtuen pesuhäviön vaihtelusta korrelaatio olikin lähinnä päinvastainen. Pesuhäviön ollessa suurempi happi kupliintuu helpommin, mutta liuenneet aineet puolestaan kuluttavat happea, joten kuplien ollessa pienempiä kappareduktio onkin alhaisempi. Tämä tulos myös indikoi, että prosessissa hapen liukeneminen on merkittävä kappareduktion saavuttamista rajoittava tekijä.



KUVA 13. Reaktoriin syötettävän hapen kuplakoon ja syöttömassan liuennan COD:n välinen korrelaatio. COD mitattiin happivaiheen syötössä olevalla refraktometrillä.

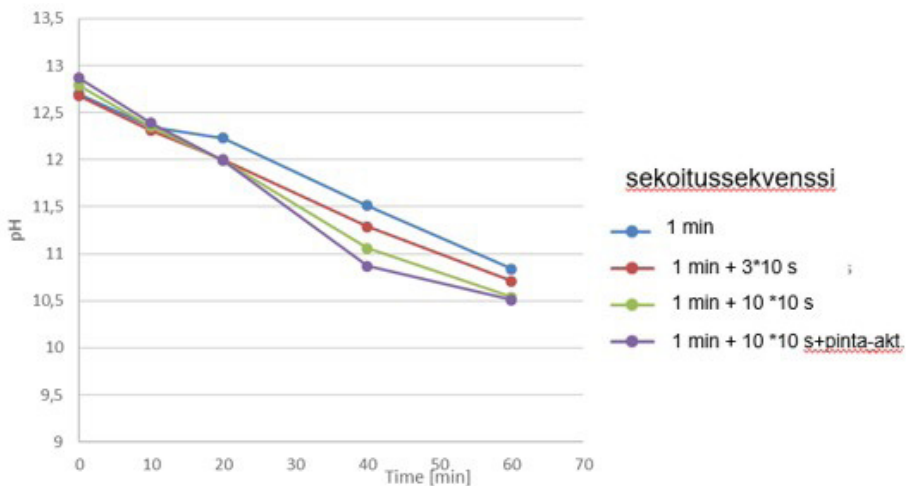
Hankkeessa tutkittiin myös laboratoriokokeilla Mark-reaktorilla hapen dispergoitumista sekä tämän vaikutuksia happidelignifioinnin kinetiikkaan (Pappinen & Käyhkö 2019). Happivaiheen syöttömassalla tehtiin kokeita, joissa hapen aineensiirtoon vaikutettiin muuttamalla sekoitusta ja käyttämällä pinta-aktiivista ainetta lisäämään dispergoitumista (kuva 14). Hapen aineensiirron parantaminen lisäsi kappareduktiota huomattavasti. Tämä myös indikoi, että kyseisellä linjalla hapen aineensiirron parantamisen kuplakokoa pienentämällä pitäisi parantaa kappareduktiota selkeästi. Hapen aineensiirron parantaminen laskee myös pH:ta, mikä on merkki reaktioiden nopeutumisesta (kuva 15).



KUVA 14. Kappareduktio Mark-reaktorilla tehdyissä laboratoriokokeissa. Kokonaisalkali 20 kg/ton. Koepisteissä massaa on sekoitettu aluksi yksi minuutti nopeudella 2400 rpm ja tämän jälkeen samalla nopeudella kuvassa esitetyillä sekvensseillä. Lämpötila 90 °C, sakeus 10,5 %, kaasuosuus 0,1 ja paine 7 bar.

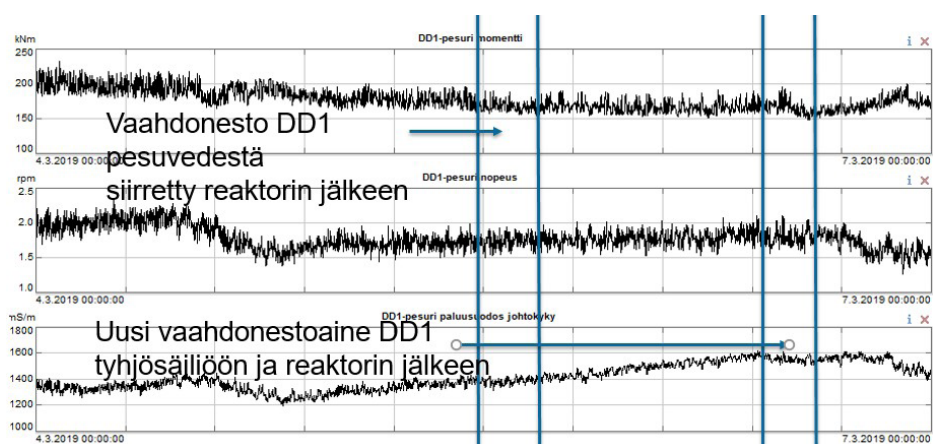
Alkaliannoksella säädettävä pH on happivaiheen toiminnan kannalta erittäin olennainen tekijä. Mitä korkeampi pH, sitä nopeammin delignifointireaktiot tapahtuvat. Reaktiot puolestaan alentavat pH:ta. Korkea alku-pH (>12) lisää kuidun viskositeettiä alentavien radikaalien muodostumista, ja korkea loppu-pH voi puolestaan heikentää happivaiheen jälkeistä pesua. Loppu-pH:n mennessä liian alhaiseksi (<10,5) delignifointireaktiot hidastuvat huomattavasti ja lisäksi liuennut ligniini saattaa saostua takaisin kuituun.

Tehtaalla normaali alkaliannos on luokkaa 10 kg/ton, ja näissä kokeissa käytettiin kaksi kertaa suurempaa annosta, jotta pH hapen aineensiirron parantuessa ei menisi liian alhaiseksi. Kuvan 15 perusteella loppu-pH saadaan alhaiselle tasolle suuremmalla alkaliannoksella, mutta alku-pH on korkeahko, minkä johdosta mahdollisissa tehdaskokeissa kuidun viskositeetin kehittymiseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota.



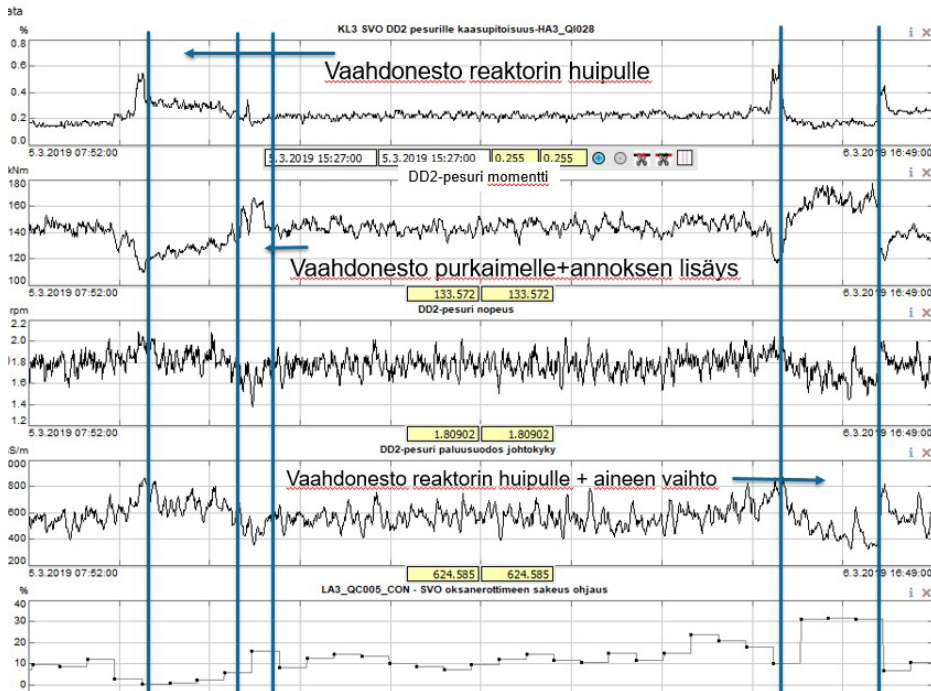
KUVA 15. pH kuvan 14 kokeissa.

Linjalla tehtiin pidemmät koeajot, joissa juuri ennen happivaihetta oleva vaahdonestoaineen syöttö siirrettiin reaktorin jälkeen sekä samalla testattiin toisen vaahdonestoaineen toimintaa (kuva 16). Koeajossa seurattiin muutoksen vaikutuksia hapen kuplakokoon, happivaiheen toimintaan sekä pesujen toimintaan. Muutoksen myötä happidispersioon kuplakoko laski hieman, mutta tällä kertaa ei niin paljon, jotta tällä voisi olla merkittävää vaikutusta happivaiheen toimintaan. Syöttöpaikan siirrolla ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta happivaihetta edeltävän pesun (DD1) toimintaan. Pesurin toimintaa kuvaavat pyörimisnopeus ja momentti pysyivät samana, eikä pestyn massan puhtautta kuvaava paluusuodoksen johtokyky myöskään muuttunut. Pesurin jätösakeudessa ei myöskään havaittu muutoksia. Tulos siis indikoi, että vaahdonestoaineen syöttö on mahdollista siirtää DD1:n pesuvedestä happireaktorin purkaimelle niin, että tämä ei vaikuta DD1:n toimintaan.



KUVA 16. Vaahdonestoaineen syöttöpaikan ja laadun vaikutus happivaihetta edeltävän pesurin toimintaan.

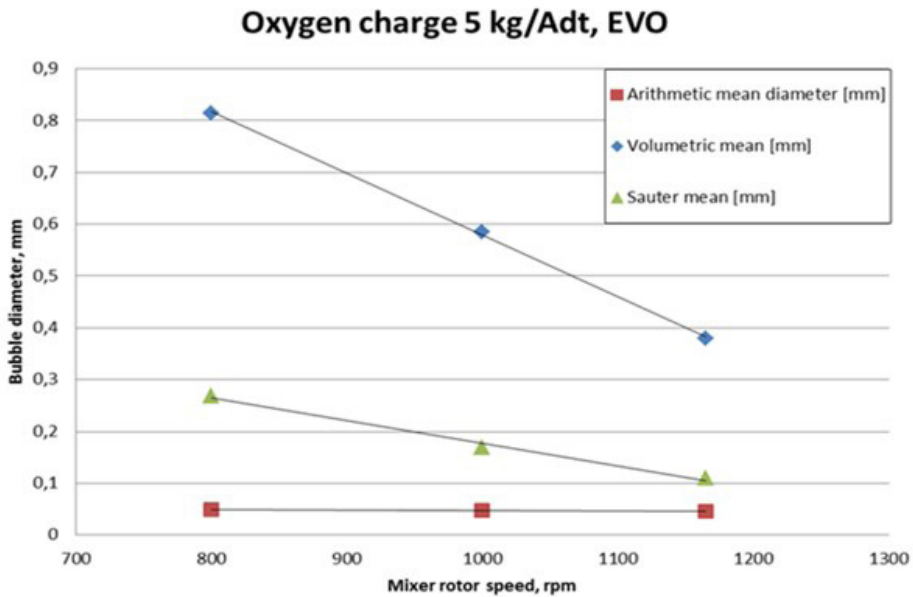
Kuvassa 17 on esitetty muutosten vaikutukset happivaiheen jälkeisen pesurin (DD2) toimintaan. Kokeiden alussa näkyy lyhyt jakso, jolloin vaahdoneston syötössä on tauko. Tällöin pesurille menevän massan kaasupitoisuus nousee jyrkästi ja pesurin momentti laskee, pyörimisnopeus nousee ja pesutulos mitattuna DD2-pesurin paluusuodoksen johtokyvystä huononee hieman. Vaahdoneston syöttö reaktorin huipulle kasvatti aluksi hieman pesurille menevän massan kaasupitoisuutta ja huononsi pesua. Tämän jälkeen vaahdonesto ohjattiin menemään etupäässä reaktorin purkaimelle, jolloin vaahdoneston sekoittuminen paranee ja lisäksi annosta kasvatettiin hieman. Tällöin kaasupitoisuus palasi alkuperäiselle tasolle tai tämän alle ja pesurin toiminta muuttui alkutilannetta paremmaksi. Vaahdonestoaineen vaihto ja syöttö reaktorin huipulle tuottivat vastaavat tulokset, paitsi syöttömassan kaasupitoisuus pieneni ja pesurin toiminta parani selkeästi alkutilanteeseen verrattuna. Vaikutus näkyy tässä myös poistosakeuden kasvamisena. Pesurin poistosakeudesta saadaan kuvaa seuraamalla massan laimennukseen menevän suodoksen määrää (oksanerottimen sakeuden ohjaus).



KUVA 17. Vaahdonestoaineen syöttöpaikan ja laadun vaikutus happivaiheen jälkeisen pesurin toimintaan.

Kokeiden perusteella näyttäisi siltä, että syöttöpaikan vaihto ei ole pelkästään mahdollista vaan jopa pesun toiminnan kannalta edullista. Vaihdoilla ei näyttäisi olevan vaikutusta happivaihetta edeltävän pesurin toimintaan, ja toisaalta tämä voisi tuoda mahdollisuuksia parantaa happivaiheen jälkeisen pesurin toimintaa. Vaahdonestoaineen syöttö DD1:lle parantaa happivaihetta edeltävää kaasunpoistoa, mutta DD2:n toiminnan kannalta olenaisempaa voi olla happivaiheen jälkeinen kaasunpoisto, koska tässä on mukana myös jäännöshappi. Happivaiheen jälkeisen kaasunpoiston kannalta vaahdonestoaineen syöttö reaktorin purkaimelle on todennäköisesti paras ratkaisu. Myös DD1:lle syötetty vaahdonestoaine kulkeutuu lähes täysin happireaktorin jälkeiseen kaasunpoistovaiheeseen, mutta vaahdonestoaineen teho heikkenee ajan myötä, jolloin se on edullista syöttää sopivan lähelle kaasunpoistokohtaa.

Linjalle asennettiin seisokin yhteydessä Andritzin toimesta suurempi moottori happisekoittimelle. Vanhalla moottorilla päästään normaaliajossa noin 1100 rpm:n kierrosnopeuteen, kun taas uudella moottorilla päästään noin 1300 rpm:n kierrosnopeuteen. Lisäksi moottorin ohjaus on suunnitteilla muuttaa tehoerusteiseksi, jolloin sitä voisi ajaa jatkuvasti esimerkiksi 95 %:n teholla. Vanhaa moottoria ajettiin vakionopeudella keskimäärin 70 %:n teholla. Linjalla tehtyjen aiempien kokeiden perusteella näillä muutoksilla voisi olla selkeä happidispersiön kuplakokoa pienentävä vaikutus (kuva 18).

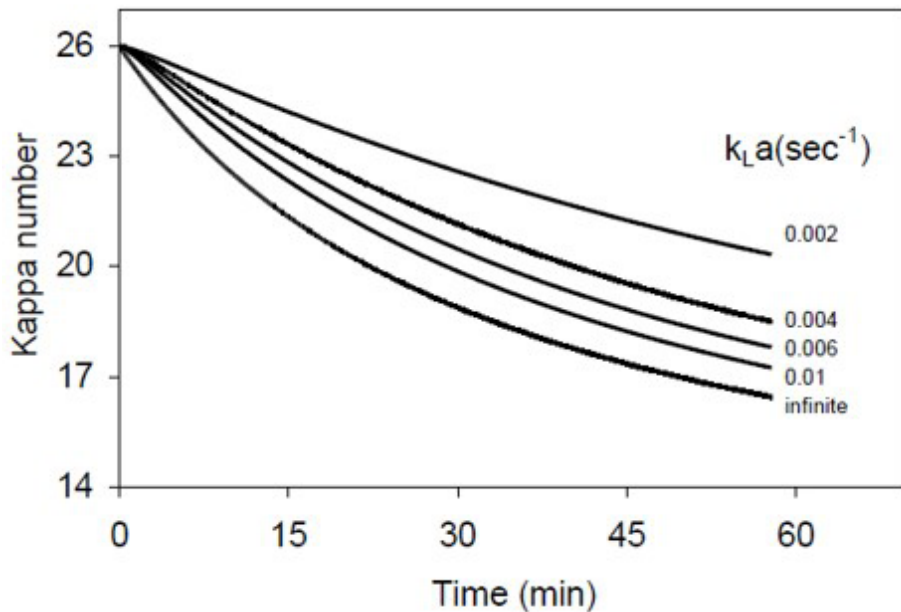


KUVA 18. Sekoittimen kierrosnopeuden vaikutus happidisersion kuplakokoon (Käyhkö et al. 2018 b).

Linjalle on valmisteltu mahdollisuus vaahdonestoaineen jatkuvatoimiselle syötölle happi-reaktorin purkaimelle ja seuraavaksi linjalla tullaan tekemään kokeita, joissa sekoittimen kierrosnopeutta kasvatetaan ja aktiivisen vaahdonestoaineen kulkeutumista hapen sekoitukseen pyritään minimoimaan syöttöpaikkoja ja määriä optimoimalla. Jos kuplakokoa saadaan merkittävästi pienennettyä, lähdetään myös optimoimaan muita kappareduktioon vaikuttavia suureita.

HAPEN AINEENSIIRTOMALLINNUSTUTKIMUKSET LYHYTKUITULINJALLA

Laboratoriokokeet indikoivat vahvasti, että lyhytkuitulinjalla kuplakoon pienentäminen kasvattaa kappareduktiota (kuva 14). Tehdasympäristössä tehdyt havainnot tukivat myös vahvasti tätä oletusta, mutta asiaa ei vielä saatu varmennettua kokeellisesti. Yksi tapa arvioida hapen kuplakokoon vaikutusta kappareduktioon on hapen aineensiirtoon perustuva fysikaalinen mallinnus, jota vietiin eteenpäin yhteistyössä University of Mainessa professorina työskentelevän Adriaan van Heiningen kanssa. Van Heiningen on aiemmin perehtynyt happivaiheen fysikaaliseen mallinukseen ja julkaissut useita artikkeleita aiheesta. Hän on muun muassa tutkinut hapen aineensiirron ($k_L a$) ja kappareduktion välistä yhteyttä (kuva 19) sekä johtanut aineensiirron ja kuplakokoon välisen yhteyden määrittävän yhtälön 1 (Käyhkö et al. 2019 a).



KUVA 19. Hapen aineensiirron ja kappareduktion yhteys (van Heiningen et al. 2003).

$$k_L a = \frac{12 D_{O_2} X_g}{((1/X_g)^{1/3} - 1) d_b^2} \quad \text{Yhtälö (1)}$$

Jossa:

$k_L a$: hapen aineensiirto kerroin, 1/s

D_{O_2} : hapen diffuusiovakio, m²/s

X_g : kaasun tilavuusosuus

d_b : kuplan halkaisija, m

Kuvassa 20 on esitetty $k_L a$ -arvo reaktorin syötössä ja poistossa perustuen taulukossa 1 esitettyihin prosessiarvoihin. Reaktorissa hapen kuluessa $k_L a$ -arvo pienenee, ja jotta hapen aineensiirto ei rajoittaisi prosessia, täytyy $k_L a$ -arvon olla tarpeeksi suuri myös reaktorin yläosassa, esimerkiksi kuvan 6 perusteella luokkaa 0,01. Tällöin kuvan 20 mukaan hapen kuplakoko reaktorin yläosassa tulisi olla 0,23 mm, jolloin hapen kuplakoko on reaktorin syötössä täytynyt olla luokkaa 0,5 mm. Prosessissa ja mittauksessa esiintyy useita mahdollisesti merkittäviä tekijöitä, joita aineensiirtolaskennassa ei ole huomioitu, esimerkiksi seuraavia:

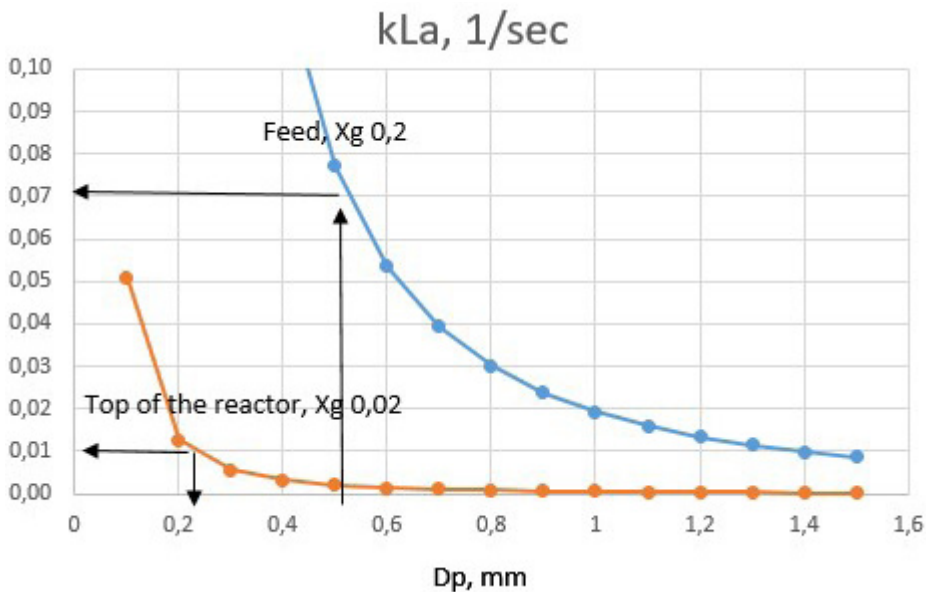
- Mallinnuksessa oletetaan, että kuplat ovat samankokoisia. Käytännössä dispersiolla on tietty jakauma, ja mitä leveämpi tämä on, sitä pienempi on aineensiirtokerroin ja sitä nopeammin tämä pienenee reaktion edetessä.
- Oletuksena on, että massa ja kuplat ovat tasaisesti jakaantuneena reaktorissa. Tämä voi olla suuressa mittakaavassa vielä mahdollista, mutta pienessä mittakaavassa ei, koska massa esiintyy reaktorissa flokkeina (kuva 8, oikea) ja kuplilla on myös taipumusta kasaantua ja muodostaa kupla-agglomeraatteja.

Näiden vaikutuksesta riittävään hapen aineensiirtoon vaadittava kuplakoko on käytännössä yhtälön kautta arvioitua pienempi. Lisäksi tässä lyhytkuitulinjan tapauksessa merkittävä osa kaasusta on isoissa epäsäännöllisen muotoisissa kuplissa, joita kuplakokomittaus ei tunnista, joten todellinen kuplakoko on suurempi kuin mittauksen antama. Kun nämä asiat huomioidaan, voidaan karkeasti arvioida, että linjalla mitattu kuplakoko tulisi saada alle 0,2 mm:n ja mieluiten tasolle 0,1 mm, jotta hapen aineensiirto ei merkittävästi rajoittaisi prosessia.

Laskenta antaa ensimmäisen kerran mahdollisuuden geneerisesti arvioida kuplakoon vaikutusta happidelignifointiprosessissa, ja saatu tulos vaadittavasta kuplakoosta on hyvin linjassa käytännössä tehtyjen havaintojen kanssa. Tämä voi jatkossa mahdollisesti luoda merkittävän menetelmän happivaiheen kehittämiseen sekä hallintaan käytännössä. Mallin verifointi sekä edelleenkehitys jatkuvat erillisissä tutkimushankkeissa.

Taulukko 1. kLa:n laskennassa käytetyt arvot, hapen diffuusiovakion arvona oli $5,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

| | Syöttö | Poisto |
|-------------------------|--------|--------|
| O ₂ , kg/ton | 20 | 1 |
| P, bar | 7 | 3,5 |
| Xg | 0,2 | 0,02 |



KUVA 20. Hapen aineensiirto (k_{La}) taulukossa 1 esitetyissä tyypillisissä happivaiheen olosuhteissa (Käyhkö et al. 2019 a).

KAASUIHIN LIITTYVÄ JATKUVATOIMISTEN ON-LINE-MITTAUSTEN KEHITYSTYÖ HANKKEESSA

Hankkeessa saatiin hyödyllistä kokemusta kuplakoko- sekä Echowise™-kaasuosuusmittauksen toimivuudesta ja hyödynnettävyydestä kuitulinjan tutkimuksissa, ja mittaukset tulevat jatkossa muodostamaan olennaisen osan tehtailla tehtäviä tutkimuksia. Näiden lisäksi hankkeessa kehitettiin ja sovellettiin uutta mittaustekniikkaa kaasuosuuden ja koostumuksen mittaukseen.

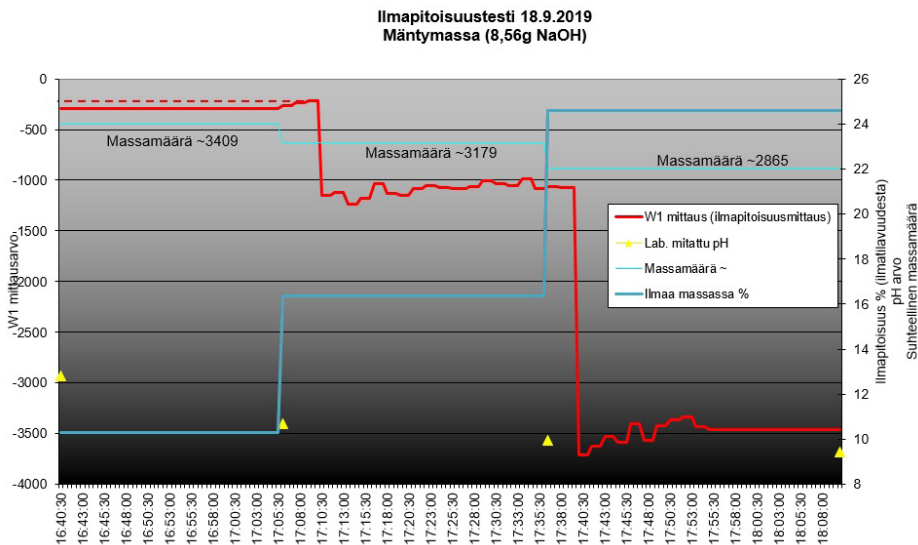
Tutkimusten tavoitteena oli todentaa happivaiheen jäännöskaasun kemiallinen koostumus ja samalla kehittää kaasun koostumuksen jatkuvatoimista on-line-mittausta. Happivaiheen jäännöskaasun koostumuksesta ei ole tietävästi julkaistu mittaustuloksia. Jäännöskaasu koostuu todennäköisesti pääosin hapestä ja osin hiilimonoksidista ja typestä. Reaktorissa muodostuu myös suuri määrä hiilidioksidia, mutta kyseisissä olosuhteissa tämän tulisi esiintyä liuenneena. Hiilimonoksidia syntyy ainoastaan hiilihydraattireaktioista, joten tämän pitoisuudella voisi olla korrelaatiota viskositeetti- ja saantotappioihin. Reaktorilla edeltävä vaahdonestoaineen käyttö vaikuttaa kaasunpoistoon ja hapen kuplakokoon ja siten reaktorin jälkeisen pesun kaasupitoisuuteen ja toimintaan. Typen pitoisuus voisi antaa kuvaa, onko reaktorin jälkeiseen pesuun menevä kaasu prosessiin syötettyä happea vai massaan sekoittunutta ilmaa. Typen mittaamiseen ei tietävästi ole olemassa jatkuvatoimista mittausta, mutta kun tiedetään hapen ja hiilimonoksidin osuudet, voidaan lopun olettaa olevan typpeä. Lisäksi kaasun koostumuksen mittauksella voisi olla mahdollista saada tietoa happidelignifoinnin jäännöskaasun määrästä ja kyseessä olevaa tietoa voisi olla mahdollista hyödyntää happidelignifoinnin säädössä. Jäännöskaasun määrälle ei ole olemassa tällä hetkellä toimivaa mittausten menetelmää.

Parhaimmillaan saatiin mitattua 70 %:n happipitoisuus, eli mittausjärjestely näyttäisi olevan toimiva ja poistokaasu näyttäisi sisältävän myös merkittäviä määriä typpeä ja/tai hiilimonoksidia. Lisäksi mittausjärjestely on jatkuvatoiminen, ja mittari tallentaa mittausdatat halutulla taajuudella. Mittari jätettiin toimintaan viikoksi tehtaalle, ja muuten mittaus toimi hyvin, paitsi näppäilyvirheen takia tallennusmoodi ei ollut jäänyt päälle.

Hiilimonoksidin osalta hankaluutena oli mittaukseen tarvittava suurehko kaasuvirtaus, joka oli luokkaa 10–100 kertaa suurempi kuin prosessista saatava kaasuvirtaus. Mittaus toteutettiin siten, että kylmäloukun jälkimmäiseen astiaan kerättiin prosessikaasua ja tästä mitattiin hiilimonoksidipitoisuus kertamittauksena. Parhaimmillaan saatiin mitattua 1 %:n hiilimonoksidipitoisuus, mutta tällöinkin näyte oli todennäköisesti laimentunut merkittävässä määrin. Lisäksi laitteen hiilimonoksidin mittausalue on 0–1 %, joten mittari ei suoraan sovellu prosessikaasun mittaukseen ja jatkuvatoimisenä mittauksena järjestelmässä täytyisi olla jonkinlainen näytteen laimennus. Hiilimonoksidimittauksen lisätuesta varten kehitettiin pussinäytteenotto sekä näytteen laimennusjärjestelmä, joita tullaan testaamaan jatkossa.

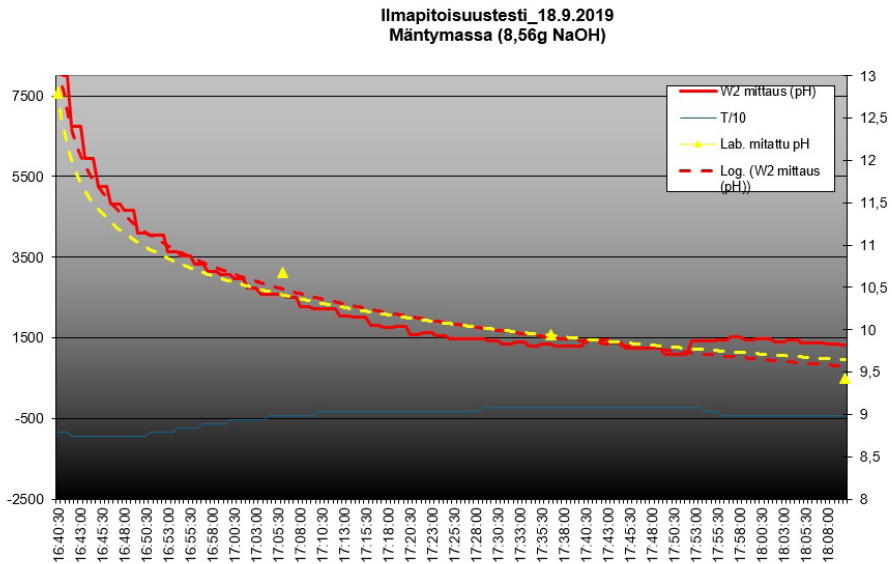
Jäännöskaasun määrän mittaukseen ei tällä hetkellä ole näköpiirissä toimivaa mittaustekniikkaa. Kuplakommittarilta saadaan tunnistettujen kuplien perusteella lukema (gas holdup -arvo), joka antaa karkeaa kuvaa jäännöskaasun määrän muutoksista, mutta mitausta ei ole voitu kalibroida ja mittaukseen liittyy useita epävarmuustekijöitä. Merkittävä ongelma on lasin likaantuminen kyseisessä kohteessa, joten tällä hetkellä mitausta ei voida tehdä jatkuvatoimisesti pitempiä aikoja. Kaasunäytteen keräysjärjestelmää on mahdollista käyttää kaasuosuuden kertaluontoiseen mittaukseen ja siten kuplamittaukselta saatavan kaasupitoisuuden tason arviointiin tai jopa kalibrointiin. Alustavat testaukset osoittivat, että mitaushetkellä kaasuosuus reaktorin yläpäässä oli hyvin alhainen, alle 0,5 %, ja gas holdup -arvo oli 0,02 eli myös hyvin alhainen (vrt. kuva 11 B). Näytteenotosta tehtävää kaasuosuuden mitausta tullaan jatkossa hyödyntämään kuplamittauksen kehittämisen sekä alla mainitun sähköisen kaasupitoisuusmittauksen kehittämisessä.

Hankkeessa kehitettiin uutta liuoksen sähkökemian perustuvaa kaasuosuusmittausta. Alla olevassa kuvassa 21 on esitetty Mark-reaktorissa 18.9.2019 toteutetun laboratoriotestin tulokset. Kuvaajassa näkyy alkutilanne täydellä massamäärällä (~3409) ja sitä seuraavat kaksi massan poistoa, jolloin kaasutilavuutta kasvattamalla ilmapitoisuus on kasvanut alun noin 10 %:n pitoisuudesta ensin 16 %:iin ja viimeisessä massan poistossa 25 %:iin. Kuvaajan punainen viiva edustaa on-line-ilmapitoisuuden mitta-arvoa, jota ei ole kuvaajassa suhteutettu vielä edellä mainittuun todelliseen muutokseen. Vastaavasti pH on laskenut testin aikana arvosta 12,79 arvoon 9,43 (kuva 20).



KUVA 21. Ilmapitoisuuden laboratoriotestin tuloksia sähkökemiallisella mittauslaitteistolla ja Mark-sekoitusreaktoriin kiinnitetyllä anturilla toteutettuna (K. Kärkkäinen 2019).

Sähkökemiallista mittausten menetelmää on mahdollista soveltaa myös pH:n mittaukseen. Alla olevassa kuvaajassa (kuva 22) on verrattu laitteistolla mitattua pH-arvoa laboratoriossa mitattuihin arvoihin. Alkutilanteessa pH-arvo on 12,79 ja laskee kokeen aikana arvoon 9,43. Kuvaajan punainen viiva edustaa sähkökemiallisella laitteistolla mitattua on-line-pH-mitta-arvoa, jota ei ole kuvaajassa suhteutettu vielä todelliseen pH-muutokseen, mutta joka graafin logaritmisella asteikolla seuraa hyvin tarkasti laboratoriossa mitattua pH-arvoa.



KUVA 22. Sähkökemiallisella laitteistolla mitattu suhteellinen pH-arvo vs. laboratoriossa mitattu pH (K. Kärkkäinen 2019).

Mark-reaktorissa testattua uutta sähkönjohtavuuteen perustuvaa ilmapitoisuuden mittausta testattiin myös todellisissa olosuhteissa asentamalla ilmapitoisuuden kokeeseen tehty mittausjärjestelmä tehtaan happireaktoriin. Tarkoituksena tässä kokeessa oli mitata todellisissa olosuhteissa happireaktorin ilmapitoisuutta kehitteillä olevalla on-line-jatkuvatoimisella mittausjärjestelmällä ja analysoida saatuja tuloksia muihin prosessimuutuksiin.

Mittausanturi asennettiin reaktorissa valmiina olevaan yhteeseen (kuva 23). Kyseinen yhde on refraktometrille suunniteltu aiemmin happireaktoriin asennettu erikoisyhde, johon voidaan asentaa anturi paineellisena ts. laitoksen käydessä. Anturi painetaan yhteeseen käyttämällä siihen suunniteltua asentamiseen tarkoitettua erikoistyökalua. Mittausyksikkö asennettiin ulos reaktorin tasolle ja suojattiin varmuuden vuoksi muovilla (kuva 24).

Koemittauksissa käytetty mittausjärjestelmä sisältää langattoman on-line 3G -modeemiyhteyden, joka mahdollistaa mittaustietojen keräämisen etäyhteydellä. Reaktorin huipun

laitetilaan asennettiin vielä varmuuden vuoksi erillinen lap-top-tietokone, jossa käytettiin iFIX-ohjelmaa varmistamaan mittaustietojen tallennus (kuva 25). Järjestelmä, joka toimi käynnistyksen jälkeen täysin automaattisesti, oli käytössä ajanjakson 14.10.–31.10.2019.



KUVA 23. Kokeessa käytetty ilmapitoisuuden mittausanturi asennettuna happireaktorin refraktometrille tarkoitettuun yhteeseen (kuva K. Kärkkäinen 2019).

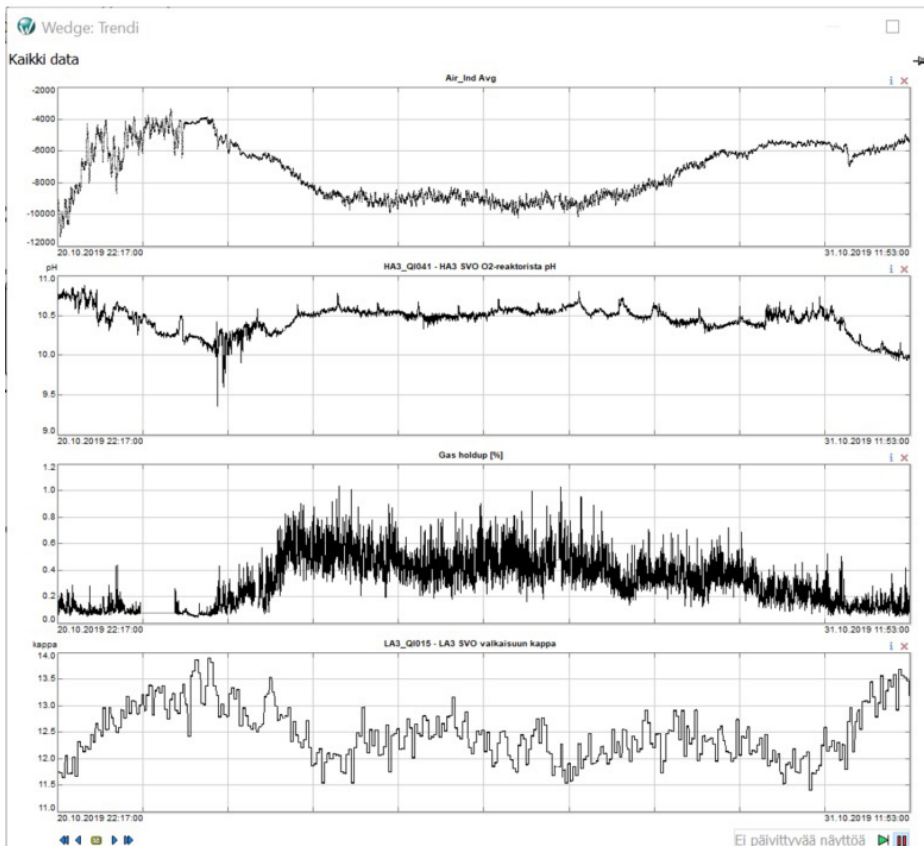


KUVA 24. Hoitotasolle asennettu muovilla suojattu mittausyksikkö (kuva K. Kärkkäinen 2019).



KUVA 25. Reaktorin huipulle tutkimuksen ajaksi jätetty lap-top-tietokone, jolla varmennettiin ilmapitoisuuden mittaustietojen keruu. Vieressä yläpuolella näkyy kuplakokomittauksen mittausyksikkö tietokoneineen sekä sen mittausanturi oikealla (kuva K. Kärkkäinen 2019).

Varsinkin jakson alkuvaihe oli mittauksellisesti haasteellinen, koska tehdasta ajettiin käyntiin seisokin jälkeen. Heti alkuvaiheessa huomattiin, että mittaustuloksien taso poikkesi suuresti Kuitulaboratorion Mark-koelaitteella tehtyihin tuloksiin nähden. Mittausten tasoa kalibroitiin, ja niiden jälkeen järjestelmä toimi hyvin koko mittausjakson. Kuvassa 26 on esitetty mittaustuloksia (Air_Ind Avg), jota on kokeiluna verrattu Wedge™-ohjelmalla muutamaa prosessimuuttujaan. Tuloksissa on nähtävänä korrelaatioita muiden mittausten kanssa. Tulokset rohkaisevat kehittämään järjestelmää edelleen ja jatkamaan näitä on-line-tehdaskokeita sekä hyödyntämään täysimääräisesti Wedge™-järjestelmää mittaustuloksien analysoinnissa.



KUVA 26. Wedge™-ohjelmalla tehty alustava korrelaatiotesti, jossa ylimpänä koejärjestelmällä mitattu ilmapitoisuuden indeksi (Air_Ind Avg) verrattuna prossimuuttuihin (Kärkkäinen 2019).

YHTEENVETO TEHDASTUTKIMUKSISTA JA JATKOTOIMENPITEET

KOETEHDAS A, PITKÄKUITULINJA: KUPLAKOKO- JA KAASUPITOISUUSMITTAUKSET

Tehtaalla testattiin ensimmäisen kerran Kuitulaboratorion toimesta Echowise-kaasuosuusmittauksen toimintaa sekä kuplamittauksen soveltuvuutta havainnoida kaasuja mustalipeälinjalla. Molemmat mittaukset toimivat hyvin ja tuottivat olennaista tietoa tehdasmittausten kannalta. Linjalla esiintyi merkittävää kaasupitoisuuden vaihtelua ja tämän vaikutus linjalla saavutettavaan tilavuusvirtaan kvantifioitiin.

KOETEHIDAS B, PITKÄKUITULINJA: KUPLAKOKOMITTAUS

Tehtaalla mitattiin II-reaktorille syötettävän hapen kuplakokoa jatkuvatoimisesti yli kuu-kauden ajan sekä tehtiin tehdaskokeita. Onnistuneen mittausjakson lisäksi tutkimuksen tärkein anti oli uusi referenssitulos kuplakoon tasosta pitkäkuitulinjalta, minkä havaittiin olevan samaa luokkaa kuin edellisellä pitkäkuitulinjalla mitattu. Happidispersiossa esiintyi voimakasta vuorokautisvaihtelua, mutta tämän syitä tai seurauksia ei todennettu, koska tehtaalta ei saatu mittausjakson ajalta tarvittavaa tehdasdataa. Lisäksi havaittiin, että kuplakokomittauksella voidaan myös linjalla havainnoida I-vaiheen jäännöskaasun määrää. Noin 30 kg/ton annokseen asti kaikki syötetty happi kului reaktorissa, ja tämän annoksen jälkeen sekoitin ei enää pystynyt tuottamaan kunnollista happidispersiota. Syötetty happi alkoi kulkeutua reaktorin läpi huomattavasti massaa nopeammin.

KOETEHIDAS D, LYHYTKUITULINJA: KUPLAKOKO-, KAASUPITOISUUS- JA KAASUMOLEKYylimittaukset

Tehtaalla toteutettiin hyvin laaja ja perusteellinen tutkimuskokonaisuus happivaiheen ja tämän ympärillä olevien pesujen osalta sisältäen monipuolisesti uusien prosessimittausten hyödyntämistä, kehitystä, tehdasseurantaa ja -kokeita, laboratoriotestejä sekä fysikaalista mallinnusta. Tutkimusten myötä saatiin aivan uutta ja perustavan laatuista tietoa kaasujen käyttäytymisestä ja vaikutuksista kuitulinjalla ja luotiin pohja prosessialueen uudenaikaiselle tutkimustoiminnalle maailmanlaajuisesti. Lisäksi osoitettiin, että linjalla on mahdollisuus selkeästi parantaa happivalkaisun toimintaa ja tähän löytyy keinoja. Tällä hetkellä vaahdonestoaineen syöttö (kg/ton) ohjautuu tuotannon mukaan. Havaittu vaahdonestoaineen ja pesuhäviön vaikutus kuplan muodostukseen, jonka siis täytyy myös korreloida vaahdonestoaineen kanssa, indikoisi sitä, että vaahdonestoaineen syöttö tulisi pikemminkin ohjautua liuenneiden aineiden pitoisuuden perusteella. Tehokkain ratkaisu olisi kuitenkin säätää vaahdonestoaineen annostelua pesurien syöttömassan ilmapitoisuuden perusteella. Tällöin välttyttäisiin yliannostukselta ja vaahdonestoaineen määrä happireaktorin syötössä olisi mahdollisimman vähäinen. Sekoittimen tehon noston avulla happivaiheen kuplakoko voisi olla mahdollista saada niin pieneksi, että reaktorin toimintaa kannattaisi tehostaa muita tekijöitä optimoimalla (alkaliannos, lämpötila, paine, sakeus). Tutkimuksia sekä laajemminkin aihealueeseen liittyviä tutkimustoimia jatketaan ja laajennetaan Kuitulaboratorion toimesta jo meneillään olevissa sekä tulevaisuudessa tutkimushankkeissa.

Tehdaskokeissa ei vielä saatu happivaiheen kuplakokoa alennettua pitemmäksi aikaa niin, että muut olosuhteet olisi saatu säädettyä kappareduktion kehittymisen kannalta suotuisiksi. Kokeet on suunniteltu tehtäväksi seuraavassa tutkimushankkeessa. Yksi merkittävä kysymys on myös, voidaanko prosessia ajaa näin ja samalla pitää pesurien toiminta vähintään entisellä tasolla. Tästä seuraavia kysymyksiä on muun muassa se, voidaanko tällöin myös valkaisuun menevän massan kappaa laskea niin, että kuidun viskositeetti ei huonone liikaa. Jos valkaisuun menevää kappaa voidaan laskea, tällä voi olla merkittävä vaikutus tehtaan kemikaalitalouteen sekä energia- ja ympäristömyönteisyyteen.

Happidelignifoinnin toimintaan ja kinetiikkaan liittyvää mallinnusta on maailmalla aiemmin tehty paljon ja esimerkiksi tärkeimpien säätömuuttujien (alkaliannos ja lämpötila) vaikutukset tunnetaan aika hyvin. Suurimpana ongelmana mallinuksissa on ollut se, että hapen aineensiirtoa ei ole pystytty mallintamaan, vaikka tällä on hyvin merkittävä vaikutus happidelignifoinnin toimintaan. Tässä hankkeessa tehty urauurtava työ liittyy mittaustekniikan kehitykseen, saatuun tietoon hapen käyttäytymisestä prosessissa sekä hapen aineensiirron fysikaaliseen mallinnukseen antaa aivan uuden pohjan kehittää ja hyödyntää mallinnusta käytännön sovelluksissa. Käytännössä tämä voisi merkitä esimerkiksi fysikaalisen mallin pohjalle rakennettua happivaiheen säätöjärjestelmää tai mallinuksen hyödyntämistä prosessien suunnittelussa ja kehitystyössä. Jatkossa hapen aineensiirron mallinnusta tullaan vielä verifioimaan laboratorio- ja tehdaskokeilla.

Prosessikaasun koostumuksen mittauksessa hankkeessa päästiin hyvin alulle. Tehtaalla pystyttiin toteuttamaan prosessikaasun näytteenotto sekä jatkuvatoiminen hapen (ja hiilidioksidin) mittaus tästä. Seuraavaksi mitatusta tullaan hyödyntämään osana tehdasseurantajoja ja kokeita ja samalla etsitään keinoja, kuinka mittauksista voisi hyödyntää prosessin ohjauksessa. Hiilimonoksidin osalta tilanne on hankalampi. Käytetyn mittarin mittausalue oli alhainen ja vaadittava näytemäärä suurempi kuin näytteenotosta saatava näytemäärä. Lisäksi markkinoilta ei löytynyt hiilimonoksidimittausta, jonka mittausalue olisi yli 1 %. Tilanteesta keskusteltiin myös Vaisalan kanssa, ja heillä voisi olla mahdollisuuksia kehittää kyseiseen kohteeseen soveltuvaa mittauksia. Kaasukoostumuksen liittyvää mittaustekniikkyötä tullaan jatkamaan kuitulinjan kaasuihin liittyvien tutkimusten myötä. Prosessikaasujen koostumuksen jatkuvatoiminen mittaus sisältää merkittävää potentiaalia prosessien toiminnan parantamiseksi sekä uusien kaupallisten mittaussovellusten synnyttämiseksi. Kaasukoostumuksen mittauksella voidaan saada prosessin ohjauksen kannalta olennaista tietoa liittyen vaahdonestoaineen, happidelignifoinnin ja pesujen toimintaan. Lisäksi mittauksille voisi löytyä myös muita sovelluksia hyödynnettäväksi biotuotetehtaalla.

Kaasuosuuden mittauksen kehityksessä päästiin myös hankkeessa eteenpäin. Nyt näköpiirissä on mahdollisuus näytteenoton avulla kalibroida kuplamittauksesta saatava kaasupitoisuuslukema. Lisäksi kaasupitoisuuden sähkökemiallinen mittaus näyttää tällä hetkellä hyvin potentiaaliselta menetelmältä, ja tämän kehitystyötä tullaan jatkamaan laboratorio- ja tehdaskokein. Myös happivaiheen jäännöskaasun koostumuksella voi olla selkeä yhteys kaasupitoisuuteen. Esimerkiksi hapen pitoisuudella voi olla suora yhteys jäännöshapen määrään; pitoisuuden ollessa korkea myös jäännöshapen määrä on korkea. Jos muiden kaasujen (typpi- ja hiilimonoksidi) käyttäytyminen pysyy vakiona, voi tämä korrelaatio olla myös hyvin voimakas. Happipitoisuuden hyödyntämistä prosessin seurantaan puoltaa mittauksen yksinkertaisuus ja halpuus.

LÄHTEET

Käyhkö, J., Peltonen, K., Mutikainen, H., Kopra, R., Eloranta, H., Pesonen, A., van Heiningen, A., The Role of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process. Proc. of the TAPPI PEERS Conference, 30.10-2.11. 2019, Saint Louise, MO, USA.

Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Eloranta, H., Honkanen, M., and Pesonen A., The State and Effect of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process. Paper Week 2019, March 24-26, 2019, Montreal, Canada.

Pappinen, A., Käyhkö, J., Mark reaktorin modifointi kaasumaisten kemikaalien dispergoitumisen sekä tehokkuuden määrittämiseen. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M., and Honkanen, M., The State and role of gas dispersion in the oxygen delignification process , Proc. of the the 51 ° Congresso Internacional ABTCP-CIADICYP 2018, October 23-25, 2018, Sao Paulo, Brazil.

Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M., and Honkanen, M., Gas dispersion in the oxygen delignification process, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 28-31, 2018, Portland, OR, USA.

Kari Kärkkäinen, Jari Käyhkö, Wedge järjestelmän käyttöönotto sekä soveltaminen Kuitulaboratorion tutkimustyössä. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Van Heiningen, A., Krothapalli, D., Genco, J., Justason, A., A chemical reactor analysis of industrial oxygen delignification. December 2003, Pulp and Paper Canada, 104(12):96-101.

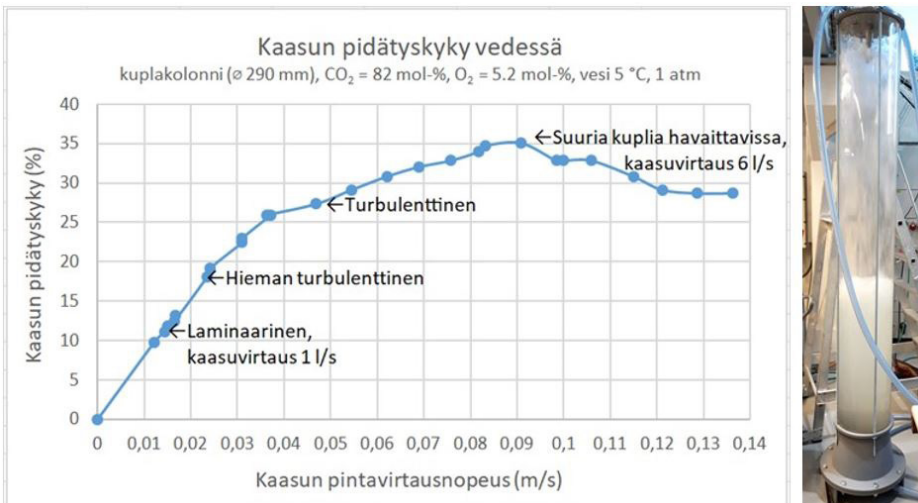
KUPLAKOLONNEILLA TEHDYT KAASUVIRTAUSKOKEET

Teijo Linnanen

Hankkeessa tehtiin Kuitulaboratoriolla kaasuvirtauskokeita kahdella erilaisella kuplakolonnilla. Näissä kokeissa keskityttiin muun muassa pienten etanolipitoisuuksien vaikutuksiin kuplakolonnien kaasuvirtauksissa.

KAASUN PINTAVIRTAUSKOKEET NORMAALIPAINEISESSA KUPLAKOLONNISSA

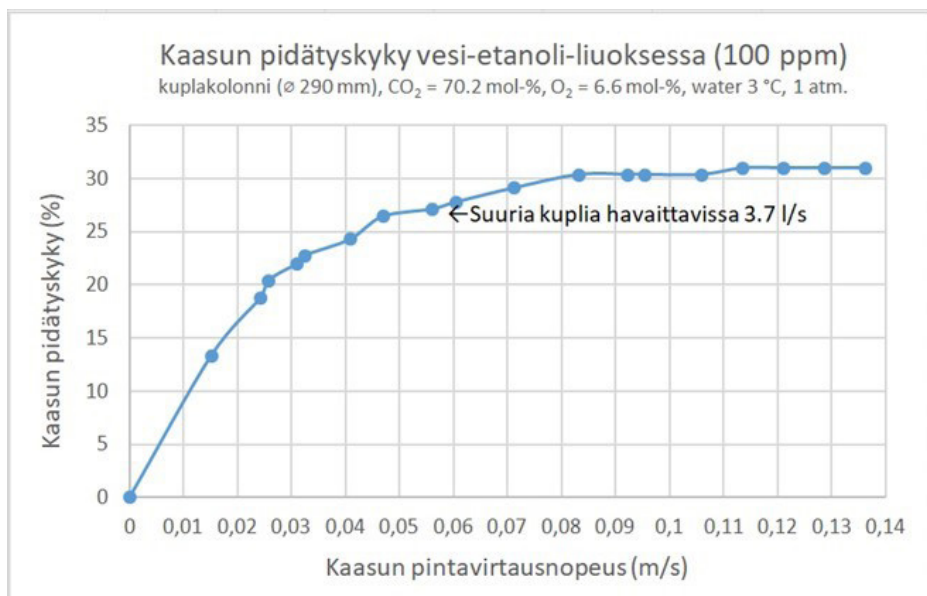
Kaasun pintavirtauskokeita tehtiin kuvan 1 kuplakolonnilla vedellä sekä eri pitoisuuksilla vesi-etanoliliuksilla. Kuvan 1 kaaviossa kaasun virtausnopeus on muutettu pintavirtausnopeudeksi, joka lasketaan kaasun tilavuusvirtauksesta jaettuna kolonnin poikkipinta-alalla. Pintavirtausnopeutta voidaan pitää kaasun keskimääräisenä nousunopeutena kolonnissa. Kaasun pidätyskyvyllä tarkoitetaan kaasun tilavuusosuutta kolonnin sisältämästä kaasunesteseoksesta, joka voitiin suhteena määrittää kokeiden aikana kuplapatjan pinnan korkeuksista mittaamalla.



KUVA 1. Kaasun pintavirtauskokeet vedellä.

Kuvan 1 vedellä tehdyt kaasun pintavirtauskokeet vastasivat hyvin aikaisemmin vedelle eri artikkeleissa esitettyjä samasta asiasta kertovia tuloksia, joissa kaasun pintavirtausnopeutta kasvatettaessa kaasukuplien virtaustyyppi muuttuu vaihteittain laminaarisesta turbulenteiksi. Noin 0,09 m/s pintavirtausnopeuden jälkeen vedessä alkaa muodostua suurempia kuplia asteittain, jolloin kaasun pidätyskyky alussa tämän rajan jälkeen kolonnissa hieman laskee.

Kuvassa 2 esitetään kaasun pintavirtauskokeiden tuloksia vesi-etanoliliuoksella, jossa etanolin pitoisuus vedessä oli 100 m-ppm. Verrattuna vedellä tehtyihin kokeisiin tällä pienellä etanolilisäyksellä oli suuri merkitys kaasun pidätyskykyyn sekä kaasukuplien keskimääräiseen kokojakamaan, jonka voidaan arvioida johtuvan veden pintajännityksen pienentymisestä etanolin vaikutuksesta.



KUVA 2. Kaasupintavirtauskokeet vesi-etanoliliuoksella.

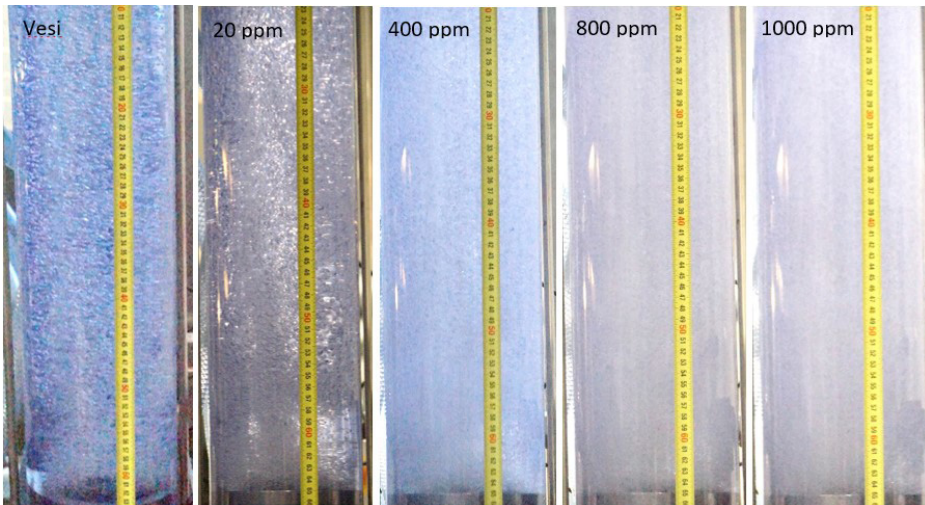
Kuvan 2 kokeissa etanolin lisäys hieman pienensi kaasun pidätyskykyä vedessä suhteessa kuvan 1 vedellä tehtyihin kokeisiin. Lisäksi suuria kuplia oli havaittavissa jo pintavirtausnopeuden 3,7 l/s jälkeen, jonka raja tuli selvästi vedellä tehtyjä kokeita aikaisemmin. Tässä kokeessa ei myöskään havaittu kaasun pidätyskyvyn alentumista tämän rajan jälkeen samalla tavoin kuin vedellä tehdyissä kokeissa.

KAASUVIRTAUSKOKEET PAINEELLISESSA KUPLAKOLONNISSA ERI ETANOLIPITOISUUKSILLA

Kaasuvirtauskokeita tehtiin paineellisessa kuplakolonnissa kiertovedellä. Tässä prosessissa kiertoveteen lisättiin vaiheittain etanolia halutun etanolipitoisuuden saavuttamiseksi. Seuraavassa on lueteltu näissä kokeissa vakioina pidettyjä arvoja:

- kaasuvirtaus 45 l/min
- kaasuseos CO₂ 73–77 til-%, O₂ 5–6 til-%, loput typpeä
- kiertoveden virtaus 14,4 l/min ja lämpötila 6–9 °C
- kuplakolonnin pinnankorkeus 7,2 m
- absoluuttinen paine kuplakolonnin pohjalla 5,22 atm.
- kuplakolonniputken sisähalkaisija 150 cm
- kaasuhajottimen kumipinnan läpimitta 120 cm

Kuplakolonnin virtaustyyppiä ja kolonnin poikkipinta-alan tarvetta voidaan arvioida muun muassa kaasun pintavirtausnopeuden kautta. Paineellisessa kuplakolonnissa kaasu puristuu paineen alaisena kasaan, jolloin sen tilavuus muuttuu käytetyn paineen suhteessa, joka täytyy huomioida laskettaessa pintavirtausnopeutta kolonnin sisällä. Näin kokeiden aikana pintavirtausnopeudeksi saadaan edellä mainituista arvoista määritettynä, kolonniputken sisähalkaisijan mukaan laskettuna noin 0,008 m/s ja kaasuhajottimen kumipinnan läpimitan mukaan laskettuna noin 0,013 m/s. Vedellä näissä pintavirtausnopeuksissa kaasuvirtauksen virtaustyyppin tulisi olla laminaarinen. Kaasuvirtauskokeissa kuplavirtaus oli puhtaalla vedellä laminaarinen (kuva 3).



KUVA 3. Kaasuvirtauskokeet paineellisessa kuplakolonnissa eri etanolipitoisilla vesillä (kuva Teijo Linnanen).

Kaasuvirtauksen turbulenttisuus lisääntyi kuitenkin selvästi, kun etanolin pitoisuutta kasvatettiin kiertovedessä. Tämä ero näkyi selvästi jo pienillä veteen lisätyillä etanolipitoisuuksilla. Kokeissa veden etanolipitoisuuden kasvaessa 20 ppm:stä 1000 ppm:iin pieneni myös havaittavien kuplien keskimääräinen koko noin 2 mm:stä 0,5 mm:iin. Samalla myös sameutta aiheuttavien mikroakuplien osuus vedessä vastaavasti kasvoi, mikä näkyy selvästi 400–1000 ppm:n pitoisuuksissa kuvassa 3. Kokeissa kaasun pidätyskykyyn vedessä ei näyttänyt kuitenkaan vaikuttavan selvästi kuplien keskimääräinen koko, koska kolonnin pinnankorkeus pysyi hyvin vakiona ainakin kokeissa läpi käydyillä etanolipitoisuuksilla alueella 0–5000 m-ppm. Tämä tarkoittaa samalla myös sitä, ettei näissä kokeissa kuplakolonnin kaasu-vesikuplatjan tiheys ole myöskään ollut kuplakoosta riippuvainen.

BIOKAASUPROSESSIN KAASUN- TUOTANNON OPTIMOINTI

Tiina Saario & Hanne Soininen

Biokaasun käyttö ympäri Suomea kasvaa koko ajan. Jotta tuotanto pysyy kysynnän tahdissa, tulee biokaasuprosessien olla entistä kustannustehokkaampia. Tämä ajaa etsimään uusia tapoja optimoida prosessia. GasOpti – Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset biojalostamo- ja vesiprosesseissa -hankkeen ”Biokaasuprosessin kaasuntuotannon optimointi” -työpaketissa etsittiin uusia tapoja optimoida biokaasuntuotantoa. Osiossa tutkittiin sekä laboratorio- että laitosmittakaavakokein muun muassa sekoituksen vaikutusta kaasuntuotantoon. Tutkimusten tuloksina saatiin uutta tietoa siitä, miten biokaasulaitoksen eri toiminnot vaikuttavat laitoksen toimintaan. Näin yritykset voivat hyödyntää tätä uutta osaamista laajalti liiketoiminnassaan.

Tässä artikkelissa on koottuna GasOpti-hankkeen ”Biokaasuprosessin kaasuntuotannon optimointi” -työpaketissa saavutetut tulokset. Tarkemmin tuloksia on esitelty Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä vuosijulkaisuisissa 2018 ja 2019. GasOpti-hankkeen rahoittajina olivat Business Finland Euroopan unionin aluekehitysrahastosta sekä Andritz Oy, Janesko Oy, Carbonreuse Finland Oy, Pixact Oy, Solenis Finland Oy, Metsäsairila Oy ja Juvan Bioson Oy. Hanke toteutettiin 1.1.2018–31.12.2019.

OPTIMAALISET SEKOITUSMENETELMÄT

Biokaasulaitoksen optimoinnin merkittäviä tekijöitä ovat sekoitus ja sen vaikutus prosessin toimintaan. GasOpti-hankkeessa tehdyissä selvityksissä todettiin, että sekoittaminen tasoittaa lämpötilan jakautumista sekä tehostaa reaktorin massansiirtoa. Tällöin bakteerit saavat paremmin ravinteita ja niiden tuottamat entsyymit jakautuvat paremmin koko reaktorin tilavuuteen. Koska bakteerien toiminta keskittyy pääsääntöisesti kiintoaineflokkien pinnoille, liiallinen sekoittaminen hajottaa näitä flokkeja ja näin heikentää bakteerien toimintaa. Toisaalta liian vähäinen sekoittaminen voi aiheuttaa pohjasedimentin kerääntymisen reaktorin pohjalle. Tällöin reaktorin vapaa tilavuus pienenee, viipymäajat lyhenevät ja kaasuntuotanto heikkenee.

Reaktorin sekoittamiselle on useita eri vaihtoehtoja, kuten mekaaniset sekoittimet, kaasusekoitus, liuoksen kierrätys tai näiden yhdistelmät. Soveltuvan sekoittimen valintaan vaikuttavat reaktorin muoto, virtaushaitat, mädätteen ominaisuudet ja käytettävä syötemateriaali.

Jatkuvatoimiseen märkämenetelmään pohjautuvaan biokaasureaktoriin muodostuu herkästi pohjasedimenttiä, jos syöte sisältää muun muassa hiekkaa tai muita epäorgaanisia hajoa-mattomia aineita. Hyvin suunnatut mekaaniset sekoittimet tai riittävän voimakas liuos- tai kaasuvirta ehkäisevät osaltaan pohjasedimentin muodostumista reaktoriin.

LAITOSMITTAKAAVAN DEMONSTRAATIOKOE - KAASUSEKOITUS MÄRKÄMENETELMÄÄN POHJAUTUVALLA BIOKAASULAITOKSELLA

Elokuussa 2018 toteutettiin Juvan Bioson Oy:n laitoksella laitosmittakaavan sekoituskoee. Kaasusekoituksen toteutti Juha Luostarinen Metener Oy:stä. Kyseessä olevan laitoksen prosessi pohjautuu märkämenetelmään, ja sen pääsyötteet ovat karjan lietalanta, kananlanta ja paikallisen elintarviketeollisuuden sivuvirrat. Laitoksen reaktorissa oli käytössä kaksi mekaanista sekoitinta. Reaktorin alaosassa on valmiina kaasusekoitusputkisto, jota hyödynnettiin demonstraatiokokeen aikana. (Saario ym. 2019a.)

Demonstraatiokoe kesti kolme vuorokautta. Kokeessa johdettiin metaania sisältävää bio-kaasua kaasukompressorin kautta jäähdyttimelle ja sieltä kaasusekoitusputkiston kautta reaktoriin. Laitoksen mekaaniset sekoittimet olivat kokeen aikana toiminnassa normaalisti. Koepäivinä reaktorimädätteestä analysoitiin kolmesti päivässä pH, johtokyky, alkaliteetti sekä kuiva-aine (TS%) ja orgaanisen aineen pitoisuus (VS%) Kaakkois-Suomen ammatti- korkeakoulun ympäristölaboratoriossa. Kaasusekoituksessa käytetystä raakakaasusta sekä varastoidusta suodattamattomasta ja suodatetusta tuotekaasusta analysoitiin rikkivety-, metaani-, happi- ja hiilidioksidipitoisuudet. (Saario ym. 2019a.)

Mädätteen alkaliteetti ja johtokyky nousivat sekoituskokeen aikana jonkin verran (taulukko 1). Tehostuneella sekoituksella ei ollut merkittävää vaikutusta pH-arvoon tai mädätteen kiintoaine- tai orgaanisen aineen pitoisuuksiin. Keskimmäisenä koepäivänä oli nähtävissä lievää muutosta kiintoaineen koostumuksessa, mutta tämä on selitettävissä pohjasedimentistä irronneella kiintoaineella. (Saario ym. 2019a.)

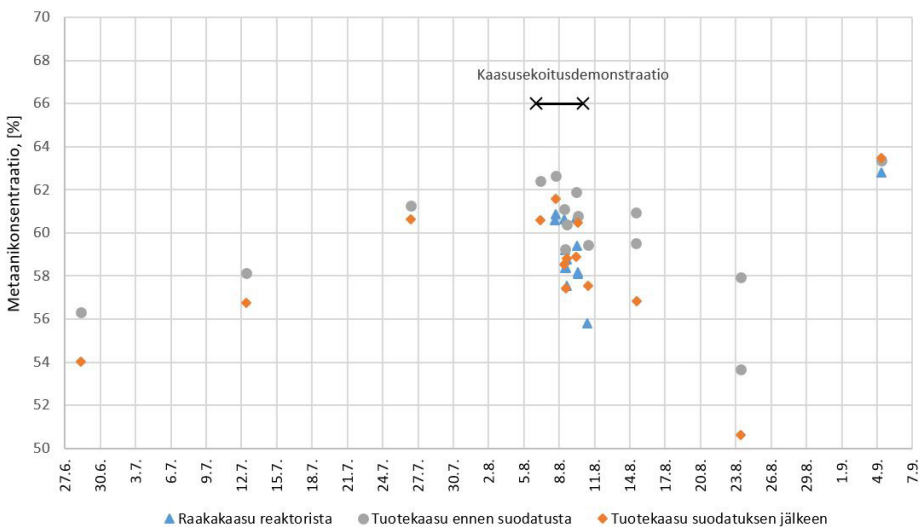
TAULUKKO 1. Biokaasun pitoisuudet sekoituskokeen aikana (keskiarvo) sekä kokeita edeltävänä että seuraavana päivänä prosessin eri vaiheissa (Saario ym. 2019a).

| Biokaasu | Mittaus- ajankohta | CH ₄ % | H ₂ S ppm | CO ₂ % | O ₂ % |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Raakakaasu | Aikana | 59,2 | 648 | 36,4 | 0,4 |
| | Jälkeen | 55,8 | 584 | 39,2 | 0,3 |
| Tuotekaasu ennen suodatusta | Ennen | 62,4 | 16 | 34,0 | 0,1 |
| | Aikana | 61,0 | 42 | 35,8 | 0,2 |
| | Jälkeen | 59,4 | 27 | 375,5 | 0,1 |
| Tuotekaasu suodatuksen jälkeen | Ennen | 60,6 | 1 | 32,9 | 0,5 |
| | Aikana | 59,3 | 4 | 34,8 | 0,6 |
| | Jälkeen | 57,5 | 3 | 36,4 | 0,7 |

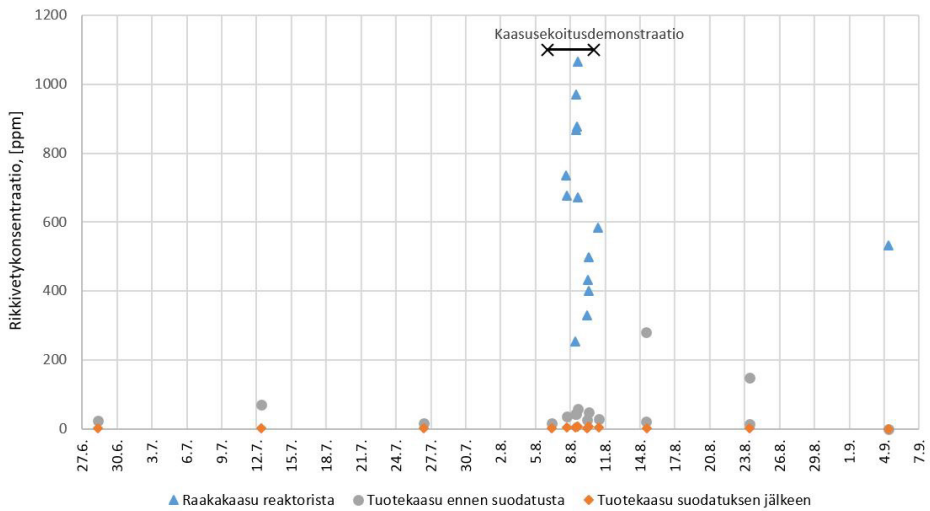
Tuloksissa esitettyjen kaasujen selitteet ovat seuraavat:

- raakakaasu (reaktori) on käsitelty biologisesti (rikkivedyn poisto)
- suodattamaton tuotekaasu on käsitelty kosteuden poistoyksiköllä
- suodattimen jälkeinen tuotekaasu on suodatettu aktiivihiilisuodattimessa.

Tulosten perusteella voidaan todeta kojärjestelmän hieman parantaneen laitoksen tuotekaasun metaanipitoisuutta (kuva 1). Raakakaasun rikkivetypitoisuuden suuret vaihtelut johtunevat reaktorin pinnassa olevan biologisen rikinpoistokerroksen toiminnan hetkellisestä heikkenemisestä sekoituksen takia (kuva 2). Myös suodattamattomassa tuotekaasussa näkyi hetkellistä rikkivetypitoisuuden kasvua.



KUVA 1. Raakakaasun sekä suodatetun että suodattamattoman tuotekaasun metaanipitoisuus pitkällä aikavälillä sekä sekoituskokeen aikana (Saario ym. 2019a).



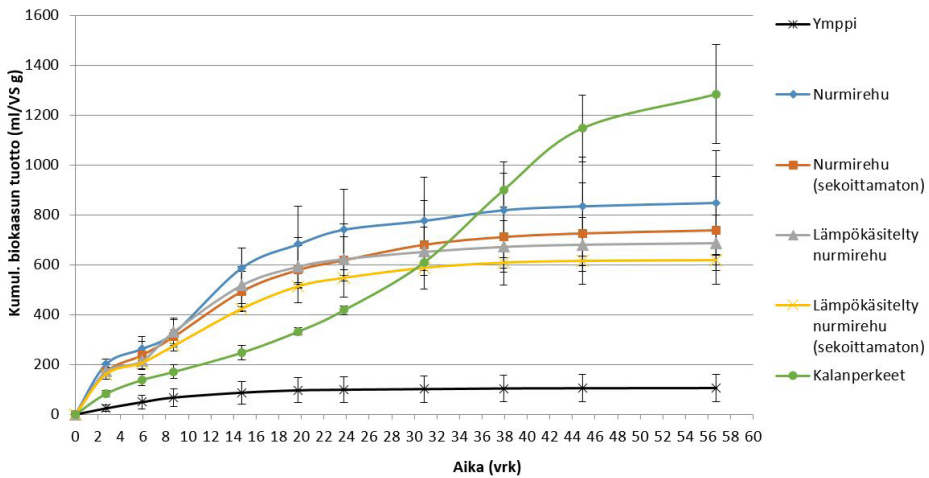
KUVA 2. Raakakaasun sekä suodatetun että suodattamattoman tuotekaasun rikkivetypitoisuus pitkällä aikavälillä sekä sekoituskokeen aikana (Saario ym. 2019a).

Kokeessa käytössä ollut kaasusekoituslaitteisto vastaa kulutukseltaan kahta perinteistä mekaanista propellisekoittajaa. Alustavien selvitysten mukaan kaasusekoitus ei ole energiatehokkaampi perinteisiin mekaanisiin sekoittimiin verrattuna, mutta voi auttaa sekoittamaan tehokkaammin koko reaktorin tilavuuden. Näin ollen mekaanisen sekoittimen ja kaasusekoituksen yhdistelmä voi tässä kohtaa olla toimivin ratkaisu. (Saario ym. 2019a, Saario ym. 2019b.)

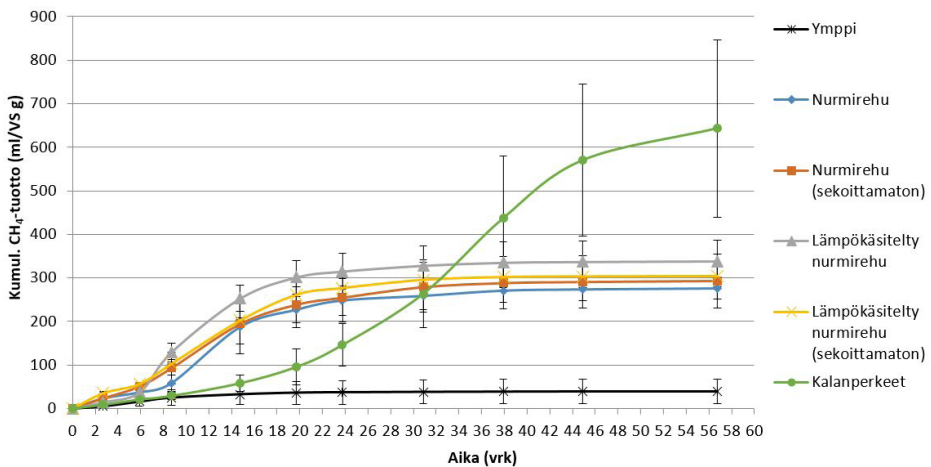
REAKTORIN SEKOITTAMISEN JA RAAKA-AINEIDEN ESİKÄSITTELYN VAIKUTUS KAASUNTUOTANTOON

Reaktorin sekoittamisen vaikutusta kaasuntuotantoon tutkittiin myös ympäristölaboratoriossa biokaasupanoskokein. Samalla tutkittiin myös syötemateriaalien esikäsitteilyn vaikutusta ja kalanperkeiden biokaasun- ja metaanintuotantoa. Kokeessa murskattua nurmirehua käytettiin syötemateriaalina sellaisenaan sekä lämpökäsiteltynä. Sekoituksen vaikutusta tutkittiin samoilla nurmirehuilla, mutta osaa pulloista ei kokeen aikana sekoitettu missään vaiheessa. (Saario ym. 2019c.)

Panokset pidettiin toiminnassa normaalin 28 vuorokauden sijaan 57 vuorokautta, koska kaasuntuotanto käynnistyi hyvin hitaasti. Tähän oli luultavasti syynä panosten käynnistyksessä käytetty biokaasulaitoksen mädäte, joka oli peräisin laitoksen uudelleen käynnistysvaiheesta. Lisäksi nurmirehu vaatii normaalistikin pitkän hajoamisajan. Kuvasta 3 voidaan nähdä, että lämpökäsittelemätön nurmirehu tuotti jonkin verran enemmän biokaasua kuin lämpökäsitelty, mutta toisaalta sen metaanintuotanto oli korkeampi (kuva 4). Oletetusti sekoitettujen panosten biokaasuntuotanto oli korkeampaa kuin sekoittamattomien. (Saario ym. 2019c.)



KUVA 3. Kumulatiivinen biokaasuntuotto (ml/VVS g) (Saario ym. 2019c).



KUVA 4. Kumulatiivinen biokaasuntuotto (ml/VVS g), kumulatiivinen metaanintuotto (ml/VVS g) (Saario ym. 2019c).

Sekoittamattomien panosten metaanintuotanto oli jonkin verran parempaa kuin sekoitettavien. Joltain osin tätä selittää se, että sekoitettaessa panoksista vapautuu myös muita kaasuja, jotka näin ”laimentavat” metaanipitoisuutta, mutta toisaalta nostavat kokonaisbiokaasuntuotantoa. Panosten biokaasun- ja metaanintuottopotentialit on esitetty taulukossa 2. (Saario ym. 2019c.)

TAULUKKO 2. Määdätettyjen panosten biokaasun- ja metaanintuottopotentialit orgaanista aine-
tonnia (tVS) kohti (Saario ym. 2019c).

| Panos | Biokaasu, m ³ BK / tVS | Metaani, m ³ CH ₄ / tVS |
|---|--------------------------------------|--|
| Nurmirehu | 743 | 237 |
| Nurmirehu (sekoittamaton) | 632 | 254 |
| Nurmirehu (esikäsitelty) | 582 | 271 |
| Nurmirehu (esikäsitelty, sekoittamaton) | 512 | 264 |
| Viherrehu (kirjallisuusarvo) | | 300–450 ^a |

^aLuste et al. 2013. Lehtomäki 2006

BIOHAJOAVIEN MATERIAALIEN KÄYTTÄYTYMINEN MÄRKÄMÄDÄTYKSESSÄ

Hankkeen aikana nousi esiin kysymys biohajoavien materiaalien käyttäytymisestä reaktorissa. Monilla laitoksilla biojätteen mukana tulevat biohajoavasta muovista tehdyt pussit ovat muodostaneet merkittävän ongelman. Xamkin ympäristölaboratoriossa tehtiin panoskoe, jossa paperipussin ja biohajoavan muovipussin käyttäytymistä märkämädätysprosessin olosuhteissa seurattiin 21 vuorokauden ajan. Lämpökaapeissa pidettyjä panoksia sekoitettiin noin päivittäin.

Laboratoriokokeen päätyttyä paperipussi oli hajonnut täysin. Biohajoava muovipussi oli melkein ennallaan, ja materiaalin väri oli hieman muuttunut. Merkittävä syy hajoamiseroon on materiaalien käyttäytyminen prosessissa ja niiden koostumus.



KUVA 5. Biohajoavat materiaalit ennen mädätteen lisäämistä (vas.). Biohajoava pussi kelluu mädätteen pinnalla (kesk.). Biohajoava pussi 21 vuorokauden jälkeen (oik.) (kuvat Tiina Saario).

LÄHTEET

Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. PhD thesis. Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 163. University of Jyväskylä, Finland.

Luste, S., Soininen, H. & Seppäläinen, S. 2013. ES BIO-hankkeen loppujulkaisu, Energiaomavarainen maatila. Helsingin yliopiston julkaisusarja. Etelä-Savossa saatavilla olevien orgaanisten materiaalien soveltuvuus biokaasulaitoksen raaka-aineeksi – metaanintuotto-potentiaalit, yhteismädätys ja hygienia, ISSN 1796-0649.

Saario, T., Soininen, H., Mörsky, S., Luostarinen, J. 2019a. Demonstraatiokokeet täysmit-takaavan laitoksella ja sekoitusmenetelmät. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Saario, T., Soininen, H., Mörsky, S. 2019b. Optimisation of Gas Production in a Biogas Plant by Improving Process Mixing. In: Papers of the 27th European Biomass Conference Setting the course for biobased economy Extracted from Proceedings of the International Conference. ISSN 2282-5819. Pages 979-982.

Saario, T., Teittinen, H., Gråsten, J., Heinonen A. 2019c. Esikäsittelyn ja sekoituksen vaiku-tus kaasuntuotantoon –CASE-panoskokeet. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

BIOKAASUPROSESSIEN OPTIMOINTI ÄLYKÄSTÄ MONITOROINTIA KEHITTÄMÄLLÄ

Tiina Saario & Hanne Soininen & Yrjö Hiltunen

Biokaasulaitoksen prosessien seurannalla on keskeinen merkitys laitoksen toiminnassa. Biokaasulaitoksilla kerätään jatkuvasti tietoa prosessin ja mädätteen tilasta sekä kaasuntuotannosta. Osa biokaasulaitoksista ei kuitenkaan käytä monitorointidataa prosessinsa optimointiin ja toiminnan kehittämiseen. Usein tietoja käytetään vain laitoksen prosessin nykytilan arviointiin. Prosessin optimointia voitaisiin vahvistaa monitoroinnin ja mallinnuksen kautta. Näin parannettaisiin prosessin ennakoitavuutta ja laitosten kannattavuutta ja pienennettäisiin niistä ympäristöön kohdistuvia vaikutuksia. (Soininen ym. 2018a, Soininen ym. 2018b.)

Tässä artikkelissa on koottuna GasOpti – Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset biojalostamo- ja vesiprosesseissa -hankkeen ”Biokaasuprosessien optimointi älykästä monitorointia kehittämällä” -työpaketissa saavutetut keskeisimmät tulokset. Tarkemmin tuloksia on esitelty Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä -vuosijulkaisuissa 2018 ja 2019. GasOpti-hankkeen rahoittajina olivat Business Finland Euroopan unionin aluekehitysrahastosta sekä Andritz Oy, Janesko Oy, Carbonreus Finland Oy, Pixact Oy, Solenis Finland Oy, Metsäsairila Oy ja Juvan Bioson Oy. Hanke toteutettiin 1.1.2018–31.12.2019.

BIOKAASULAITOKSEN MONITOROINTI SUOMESSA JA EUROOPASSA

Hankkeessa tehtiin puhelinkysely suomalaisille biokaasulaitoksille liittyen laitosten monitorointiin, optimointiin ja yleisesti esiin tulleisiin haasteisiin. Kyselyyn vastasi 10 laitosta ympäri Suomea, ja näissä oli mukana pieniä sekä suuria kuiva- ja märkämädättäjäitä. Sekoittimina kaikilla laitoksilla oli pääasiassa mekaaninen sekoitus, tosin yhdellä rinnalla oli kaasu- ja toisella nestesekoitus. Sekoitukseen liittyvinä haasteina esiin nousivat kuorettuminen, rehun nouseminen pintaan ja tarttumisen sekoituslapoihin sekä syötteen vaihtelu ja kosteuserot. (Saario ym. 2019a.)

Kyselyyn vastanneet totesivat pääsääntöisesti optimoinnin olevan haastavaa. Yleisin optimointitapa laitoksilla oli syötteen määrän tai laadun säätely. Jonkin verran käytössä oli

myös erilaisia lisäaineita. Tavanomaisia syötemateriaaleja laitoksilla olivat erilaiset puhdistamolietteet ja sivuvirrat. Toinen yleinen oli rasva- ja biojäte ja näiden jälkeen erilaiset viherjakeet ja karjan lietelanta. (Saario ym. 2019a.)

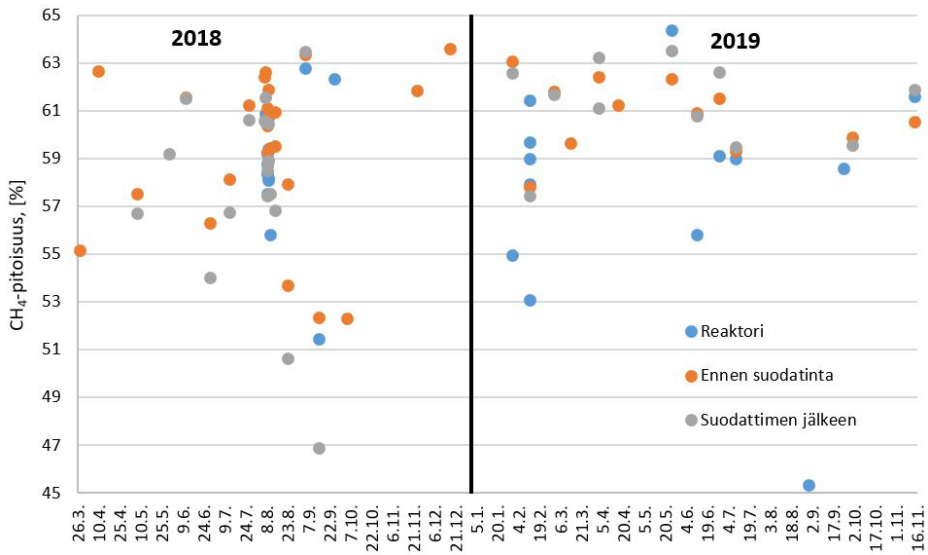
Prosessin seuranta vaihteli hyvin paljon eri laitoksissa. Yleisesti mitattavia muuttujia olivat reaktorin prosessiolosuhteet (lämpötila, pH), kaasumittaukset (kaasun tuotto, koostumus, paine) sekä syötteen ja mädätteen ominaisuudet. Osalla laitoksista seurattiin jatkuvasti eri prosessien vaiheita, kun taas joissakin seurattiin vain reaktorin lämpötilaa. Lisäksi eräällä laitokselta todettiin, että heillä seurataan useita eri muuttujia, mutta ei kovin luotettavasti. (Saario ym. 2019a.)

Yleisiä prosessihaasteita laitoksilla aiheuttivat rikkivety, pohjasedimentti ja biojätteen mukana tulevat biopussit. Rikkivedyn poistoon ja ehkäisyyn on laitoksilla käytössä useita eri menetelmiä (ilman syöttö reaktoriin, aktiivihiihliuodatus, tiettyjen syötteen välttäminen). Pohjasedimentin takia osa laitoksista on joutunut tyhjentämään reaktorin, jotta sedimentti saadaan poistettua. Osalla on käytössä ajoittainen sekoituksen suunnan kääntö, ja jollain sedimentin kertymistä on saatu vähennettyä syötteen laatua seuraamalla. Kuitenkin biojätteen mukana tulevat biopussit koettiin laitoksilla jopa pohjasedimenttiä suuremmaksi ongelmaksi. Nämä pussit eivät ehdi hajota kierron aikana, eikä niitä pysty muovipussin tavoin seulomaan pois. Biohajoavat pussit venyvät, repeytyvät ja kiertyvät lapojen ympärille. Tästä syystä osa laitoksista haluaisi kieltää biohajoavasta muovista tehdyt pussit kokonaan. (Saario ym. 2019a.)

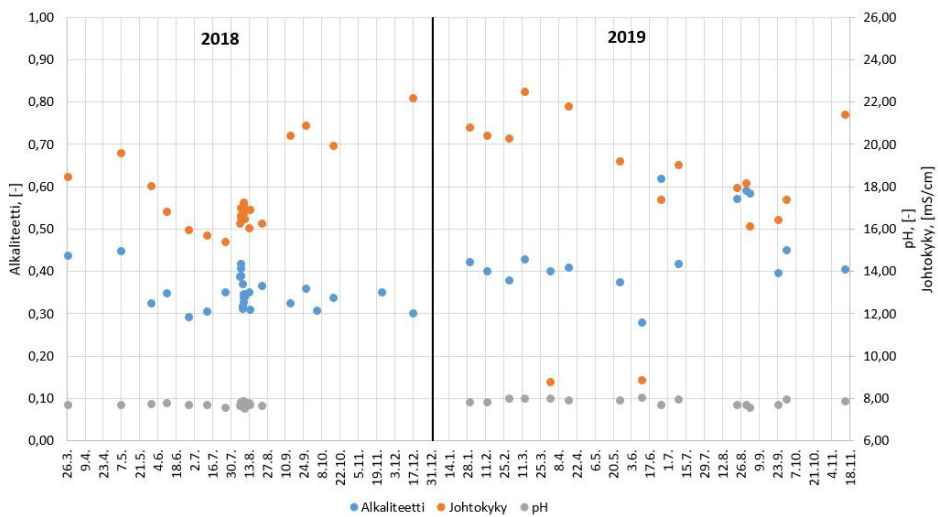
Eurooppalaisille laitoksille toimitettiin sähköpostitse sama kysely, joka tehtiin suomalaisille laitoksille puhelimitse. Vaikka kysely lähetettiin 20 maahan ja yli 40 laitokselle/kontaktihenkilölle, vastaukset saatiin ainoastaan kahdelta laitokselta. Heidän antamia vastauksia täydennettiin vuonna 2012 tehdyn selvityksen (Biomethane Regions: European Case Studies of Anaerobic Digestion Plants Show-casing their Monitoring Practices) avulla. Vastauksista voitiin todeta, että sekä syötemateriaalit ja seurattavat muuttujat ovat ympäri Euroopan hyvin samankaltaisia. Luonnollisesti eroja löytyy esimerkiksi viherjakeiden koostumuksissa. (Saario ym. 2019a.)

REAKTORIMÄDÄTTEEN ALKALITEETTIMENETELMIEN VERTAILU

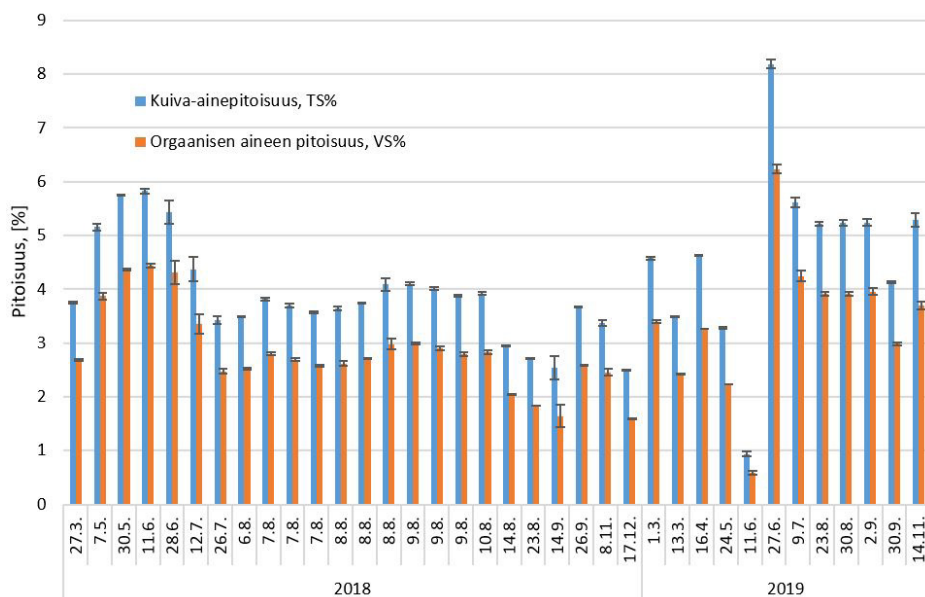
Biokaasulaitokset käyttävät reaktorin kuormituksen seuraamiseksi yleisesti joko Ripley- tai FOS/TAC-menetelmää. Molemmat teoriassa kertovat mädätteen samasta tilasta, mutta näiden käytännön toteutus eroaa jonkin verran. Hankkeessa vertailtiin näiden kahden titrausmenetelmän antamia tuloksia, esikäsittelyn vaikutusta sekä menetelmien käytännöllisyyttä kuiva- ja märkämenetelmiin perustuvien laitosten mädätteillä. (Saario ym. 2019b.)



KUVA 1. Märkämädättämön metaanipitoisuus pitkällä aikavälillä (Saario ym. 2019c).



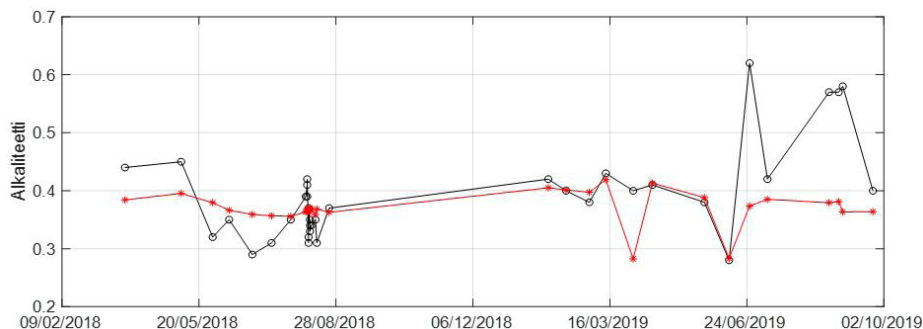
KUVA 2. Märkämädättämön reaktorimädätteen muutokset pitkällä aikavälillä (Saario ym. 2019c).



KUVA 3. Märkämädättämön reaktorimädätteen muutokset kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuuksiin pitkällä aikavälillä (Saario ym. 2019c).

MONITOROINNIN KEHITTÄMINEN JA ENNAKOINTI

Koska alkaliteetti kertoo selkeästi reaktorin tilanteesta, on se merkittävä muuttuja prosessin ohjauksen kannalta. Valitettavasti menetelmä ei kuitenkaan ole vielä nykyisin online-mitattavissa, joten vaihtoehtoisia menetelmiä on pyritty löytämään sen korvaajaksi. GasOpti-hankkeessa pyrittiin mallintamaan mädätteen alkaliteetti lineaarisesti pH:n ja johtokyvyn avulla. Kuvassa 4 on esitetty sekä kokeellinen että mallinnettu alkaliteetti. Kuten kuvasta näkyy, mallinnuksella pystytään havaitsemaan perustaso ja pienet muutokset, mutta merkittävät, suuret muutokset jäävät mallin ulkopuolelle. Näin ollen luotettavaa, vahvaa korrelaatiota ei pysty muodostamaan näiden muuttujien välille. (Saario ym. 2019c.)



KUVA 4. Alkaliteetti (musta) mallinnettuna pH:n ja johtokyvyn (punainen) avulla (kuva Yrjö Hiltunen).

LÄHTEET

Biomethane Regions. 2012. European Case Studies of Anaerobic Digestion Plants Show-casing their Monitorin Practices. The Wales Centre of Excellence for Anaerobic digestion, LandesEnergieVerein & Vienna University of Techonology.

Lossie, U. & Pütz, P. 2008. Targeted control of biogas plants with the help of FOS/TAC. Hach Lange - Practice report.

Saario, T., Mörsky, S. 2019 a. Biokaasulaitosten monitorointi Suomessa ja ulkomailla. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019a Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Saario, T., Truong, P., Lehesvaara, M., Mörsky, S. 2019b. Biokaasulaitoksen kuormituksen seuranta ja alkaliteetin FOS/TAC-arvon kautta. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019b Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Saario, T., Hiltunen, Y., Soininen, H. 2019c. Biokaasulaitoksen monitorointia kehittämässä. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019c Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

Soininen, H., Mörsky, S.K., Pulkkinen, L. 2018a. Optimisation of Gas Production in a Biogas Plant by Improving the Monitoring. In: Proceedings of the 26th European Biomass Conference. ISSN 2282-5819. Session 2CV.5.15. Pages 787–789.

Soininen, H., Mörsky, S., Vanhanen, T., Pulkkinen, L. 2018b. Biokaasun tuotannon optimoiminen prosessin seurantaan kehittämällä. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2018. Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 61. ISBN: 978-952-344-129-3 (nid.).

HANKKEESSA SYNTYNEET JULKAISUT, OPINNÄYTETYÖ JA KÄYDYT KONFERENSSIT

JULKAISUT

- 1) Kopra, R., Karjalainen, S., Käyhkö, J. and Dahl O., Portable refractometer for mill total dissolved solids (TDS) measurement, Proc of the the 51 ° Congresso Internacional ABTCP-CIADICYP 2018, October 23-25, 2018, Sao Paulo, Brazil.
- 2) Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M., and Honkanen, M., The State and role of gas dispersion in the oxygen delignification process, Proc of the the 51 ° Congresso Internacional ABTCP-CIADICYP 2018, October 23-25, 2018, Sao Paulo, Brazil.
- 3) Kopra, R., Pesonen, A., Käyhkö, J. and Dahl O., How to use TDS measurements for evaluating the performance of the washers – mill study, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 28-31, 2018, Portland, OR, USA.
- 4) Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M., and Honkanen, M., Gas dispersion in the oxygen delignification process, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 28-31, 2018, Portland, OR, USA.
- 5) Käyhkö, J., Kopra, R., “Biotuotehtaan happi- ja pesuvaiheiden toiminnan parantaminen soveltaen uusia on-line mittauksia”, Metsä, ympäristö ja energia, Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä Vuosijulkaisu 2018
- 6) Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M., Honkanen, M., Pesonen, A., The State and Effect of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process Proc of Paperweek 2019, February 4-7, Montreal, QC, Canada
- 7) Kopra, R., Karjalainen, S., Käyhkö, J. and Dahl O., Portable refractometer for mill total dissolved solids (TDS) measurement, O Papel vol 80, num. 02, 2019.
- 8) Kopra, R., Käyhkö, J., Pesonen, A., Effect of Defoamer on the Gas Content and Performance of O₂ washers – Mill Case Study, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 27-30, 2019, St Louis, MO, USA.
- 9) Käyhkö, J., Peltonen, K., Mutikainen, H., Kopra, R., Eloranta, H., Pesonen, A., van Heiningen, A., The Role of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process, Proc. of the TAPPI PEERS Conference, October 27-30, 2019, St Louis, MO, USA.
- 10) Kopra, R., Pesonen, A., Käyhkö, J., Dahl O., How to use TDS measurements for evaluating the performance of the washers – mill study, Tappi Journal, vol xx, pp.xx 2020.
- 11) Pappinen, A., Käyhkö, J., Mark reaktorin modifiointi kaasumaisten kemikaalien dispergoitumisen sekä tehokkuuden määrittämiseen. 2019 Metsä, ympäristö ja energia -soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

- 12) Käyhkö, J., Kopra, R., Peltonen, K., Kuplakoko ja sen merkitys happidelignifoinnissa. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 13) Kopra, R., Käyhkö, J., Vaahdonestoaineen vaikutus ilmapitoisuuteen ja happivaiheen pesureiden toimintaan sellutehtaan kuitulinjalla. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 14) Kärkkäinen, K., Käyhkö, J., Wedge järjestelmän käyttöönotto sekä soveltaminen Kuitulaboratorion tutkimustyössä. 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 15) Soininen, H., Mörsky, S.K., Pulkkinen, L., 2018. Optimisation of Gas Production in a Biogas Plant by Improving the Monitoring. In: Proceedings of the 26th European Biomass Conference. ISSN 2282-5819. Session 2CV.5.15. Pages 787–789.
- 16) Saario, T., Soininen, H., Mörsky, S. 2019. Optimisation of Gas Production in a Biogas Plant by Improving Process Mixing. In: Papers of the 27th European Biomass Conference Setting the course for biobased economy Extracted from Proceedings of the International Conference. ISSN 2282-5819. Pages 979–982.
- 17) Soininen, H., Mörsky, S., Vanhanen, T., Pulkkinen, L., Biokaasun tuotannon optimoiminen prosessin seuranta kehittämällä. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2018. Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 61. ISBN: 978-952-344-129-3 (nid.).
- 18) Saario, T., Truong, P., Lehesvaara, M., Mörsky, S., Biokaasulaitoksen kuormituksen seuranta ja alkaliteetin FOS/TAC-arvon kautta. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 19) Saario, T., Hiltunen, Y., Soininen, H., Biokaasulaitoksen monitorointia kehittämässä. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 20) Saario, T., Mörsky, S., Biokaasulaitosten monitorointi Suomessa ja ulkomailla. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 21) Saario, T., Soininen, H., Mörsky, S., Luostarinen, J., Demonstraatiokokeet täysmitta-kaavan laitoksella ja sekoitusmenetelmät. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).
- 22) Saario, T., Teittinen, H., Gråsten, J., Heinonen A., Esikäsittelyn ja sekoituksen vaikutus kaasuntuotantoon –CASE-panoskokeet. In: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) 2019 Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN978-952-344-225-2 (nid.).

OPINNÄYTETYÖ

Truong, Phong 2019. Sample pre-treatment in Ripley titration and comparison with FOS/TAC titration. Bachelor's thesis, Degree program in Environmental Engineering, South-Eastern Finland University of Applied Sciences.

KÄYDYT KONFERENSSIT

- 1) Congresso Internacional ABTCP-CIADICYP 2018, October 23-25, 2018, Sao Paulo, Brazil. Esitykset Kopra et al. ja Käyhkö et al.
- 2) TAPPI PEERS Conference, October 28-31, 2018, Portland, OR, USA. Esitykset Kopra et al. ja Käyhkö et al.
- 3) Paperweek 2019, February 4-7, Montreal, QC, Canada. Esitys Käyhkö et al.
- 4) Paper&Biorefinery Conference Graz, Austria. Esitys Kopra et al.
- 5) EUBCE 2018, European Biomass Conference & Exhibition - EUBCE in Copenhagen, Denmark 14.–17.5.2018. Esitys Hanne Soininen.
- 6) EUBCE 2019, European Biomass Conference & Exhibition - EUBCE in Lisbon, Portugal 27.5.–30.5.2019. Esitys Hanne Soininen.

