



Happivaiheen värähtelyongelman selvittäminen

Tatu Sinisalo

Opinnäytetyö, AMK

01/2024

Energia- ja ympäristötekniikka

Sinisalo Tatu

Happivaiheen värähtelyongelman selvittäminen

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tammikuu 2024, 51 sivua.

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää happivaiheen värähtelyongelmaan vaikuttavat tekijät ensimmäisessä happireaktorissa, sekä laatia toimintasuunnitelma, jolla värähtelyä voidaan merkittävästi vähentää tai jopa poistaa kokonaan. Tavoitteisiin pyrittiin pääsemään tekemällä koeajoja happivaiheessa ja tarkkailemalla parametrien luonnollisia muutoksia sekä niiden korrelaatiota värähtelyn kanssa.

Toimeksiantajana opinnäytetyössä toimi Metsä Fibre. Opinnäytetyön aiheena ollut happivaiheen värähtely aiheuttaa tehtaalle taloudellista haittaa. Ylimääräinen suodosveden käyttäminen ja lyhentyneet huoltovälit tulevat ylimääräisiksi kuluiksi värähtelyn vuoksi. Tämän lisäksi se luo turvallisuusriskin tehtaalla. Värähtelyä syntyy lajinvaihdon seurauksena, ja se jatkuu koko koivujakson ajan liiallisena.

Opinnäytetyössä suoritettiin kahdenlaisia koeajoja. Toisessa vaihdettiin hapen syöttösuhdetta reaktoreiden välillä, ja toisessa muunnettiin massan syöttöpainetta ensimmäiseen reaktoriin. Ennakkotietona oli, että korkea massan syöttöpaine sekä ylimääräinen kaasu vaikuttaisivat värähtelyyn negatiivisesti.

Koeajojen tuloksista huomattiin, että jos happea syötetään enemmän koivujakson aikana, värähtely mittaukset pienenevät, mikä oli päinvastoin ennakkotietoon nähden. Tuloksista myös havaittiin, että syöttöpaineen vaikutus näkyy värähtelyssä parhaiten silloin, kun se on epätasaista. Koeajojen aikana myös tuli esiin, että reaktorin jälkeen syötettävä vp-höyry nostaa värähtely mittauksia, ja huomattiin myös, että huipun laimennus auttaa hillitsemään värähtelyä.

Värähtelyongelman selvittämisessä päästiin pitkälle, ja uusia tekijöitä löydettiin, mutta kokonaan ongelma ei ratkennut opinnäytetyössä. Ongelman selvittämiseksi valmistettiin ohjeistus opinnäytetyön lopussa.

Avainsanat (asiasanat)

sellun ja paperin tuotanto, sellu, selluteollisuus

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Sinisalo Tatu

Vibration problem in oxygen delignification

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, January 2024, 51 pages.

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The objective in the thesis was to figure out which variables create vibration in the first oxygen delignification reactor, and to get rid of that excess vibration. Or if that was not possible, to at least create a roadmap which would minimize the vibration. To reach those goals test runs were conducted in the oxygen phase in which other variables were also monitored to find correlation with the vibration.

The thesis was conducted in cooperation with Metsä Fibre. The subject of the thesis has been creating economic issues for the company and it also creates a potential safety hazard at the mill. Excess expenses come from shortened maintenance intervals and from usage of excess water. The vibration begins when wood type is changed in the process and continues for the whole period when birch is processed.

There were two kinds of test runs conducted in the thesis. In the other one oxygen input ratio was swapped between the first and the second reactor, and in the other test runs feeding pressure was switched. Before the thesis it was known that high feeding pressure and excess gas in the process can cause vibration.

The results showed that feeding more oxygen into the process while birch is processed lowers the vibrations which was contrary to the predisposed information. From the results it was also found that feeding pressure causes vibrations mostly when it is very unregular. During the test runs, it was noticed that steam fed to the piping after the first reactor negatively affected the vibrations, and it was also found that pumping water to the top of the reactor positively impacts the problem.

A lot of progress was made in finding out the root cause of the problem but during the thesis the problem didn't go away fully. To solve the problem a roadmap was created at the end of the thesis.

Keywords/tags (subjects)

Pulp and paper industry, chemical pulp, pulp industry

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	4
2	Tutkimus	6
2.1	Tavoitteet ja rajaus.....	6
2.2	Eettisyys ja tutkimusmenetelmä	7
3	Puun koostumus	8
3.1	Selluloosa	8
3.2	Hemiselluloosa	9
3.3	Ligniini	10
4	Massatehdas	11
4.1	Keitto.....	11
4.2	Pesu.....	13
5	Happivaihe	14
5.1	Massan syöttö reaktoriin.....	15
5.2	Reaktori	15
6	Reaktiot	16
6.1	Reaktorin happireaktiot.....	16
6.2	Valkolipeän hapetus	17
7	Värähtely	18
7.1	Matalan taajuuden värähtely	18
7.2	Korkean taajuuden värähtely	19
8	Koeajot	20
8.1	Hapen syöttösuhteen koeajot	21
8.1.1	Syöttösuhde 50/50.....	21
8.1.2	Syöttösuhde 40/60.....	24
8.1.3	Syöttösuhde 80/20.....	27
8.1.4	Syöttösuhde 100/0.....	32
8.2	Paineen muutoksen koeajot.....	34
9	Tulokset ja ratkaisukeino	39
10	Pohdinta	46
	Lähteet	48

Kuviot

	Kuvio 3.1 selluloosan molekyyli rakenne (Paakkari U, Björn L. N.d.).....	8
--	--	---

Kuvio 3.2 Hemiselluloosa molekyyli ksylaani (Hashmi S. 2020).....	9
Kuvio 3.3 Ligniinin rakenne osaset (Piia Jöul ja muut 2022).....	10
Kuvio 4 Tehollinen ja aktiivinen alkali (Knowpulp n.d.)	12
Kuvio 5.1 Happivaihe (Knowpulp n.d.)	14
Kuvio 6.1 Happireaktorin reaktiot (Heiningen A 2017)	16
Kuvio 8.1 50/50 koeajo	23
Kuvio 8.2 50/50 koeajo	23
Kuvio 8.3 50/50 koeajo	24
Kuvio 8.4 50/50 koeajo	24
Kuvio 8.5 40/60 koeajo	25
Kuvio 8.6 40/60 koeajo	26
Kuvio 8.7 40/60 koeajo	26
Kuvio 8.8 40/60 koeajo	27
Kuvio 8.9 80/20 koeajo	28
Kuvio 8.10 80/20 koeajo	28
Kuvio 8.11 80/20 koeajo	29
Kuvio 8.12 80/20 koeajo	29
Kuvio 8.13 Toinen 80/20 koeajo.....	30
Kuvio 8.14 Toinen 80/20 koeajo.....	30
Kuvio 8.15 Toinen 80/20 koeajo.....	31
Kuvio 8.16 Toinen 80/20 koeajo.....	31
Kuvio 8.17 100/0 koeajo	32
Kuvio 8.18 100/0 koeajo	33
Kuvio 8.19 100/0 koeajo	33
Kuvio 8.20 100/0 koeajo	34
Kuvio 8.21 Paineen muutos koeajo	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
Kuvio 8.22 Paineen muutos koeajo	35
Kuvio 8.23 Paineen muutos koeajo	36
Kuvio 8.24 Paineen muutos koeajo	36
Kuvio 8.25 Toinen paineen muutos koeajo	37
Kuvio 8.26 Toinen paineen muutos koeajo	37
Kuvio 8.27 Toinen paineen muutos koeajo	38
Kuvio 8.28 Toinen paineen muutos koeajo	38
Kuvio 9.1 Hapen ja värähtelyn korrelaatio	39

Kuvio 9.2 Hapen ja värähtelyn korrelaatio	40
Kuvio 9.3 Syöttöpaineen ja värähtelyn korrelaatio	41
Kuvio 9.4 Syöttöpaineen ja värähtelyn korrelaatio	42
Kuvio 9.5 Vp-höyryn ja värähtelyn korrelaatio	43
Kuvio 9.6 Vp-höyryn ja värähtelyn korrelaatio	44

Taulukot

Taulukko 1 Happivaiheen optimaaliset ajoarvot	15
Taulukko 2 Koeajojen trendit	21

1 Johdanto

Sellun valmistus on kemiallista metsäteollisuutta, jota tehdään ympäri maailmaa. Sellua valmistetaan erottamalla puun kuidut ligniinistä. Kuituja on käytetty tavallisesti paperin ja kartongin valmistuksessa, mutta puukuiduille myös etsitään jatkuvasti muita käyttökohteita, ja nykyään puun kuiduista sekä ligniinistä voidaan tehdä useita erilaisia tuotteita. Esimerkiksi kuitua voidaan käyttää vaateteollisuudessa (Spinnova n.d.), ja ligniiniä lujissa komposiiteissa (Nurro, 2021).

Ligniinin erottaminen tapahtuu massatehtaalla. Massatehdas on sellutehtaan osa, missä haketehtasta puusta valmistetaan valkaistua kuitumassaa. Pääprosessivaiheet massatehtaalla ovat: keittäminen, peseminen, happidelignifiointi, lajittelu sekä valkaisu.

Happivaiheella eli happidelignifioinnilla tarkoitetaan sellun valmistuksen vaihetta, jossa ligniinin poistoa jatketaan keittoon nähden hellävaraisemmalla tavalla hapen avulla. Projektissa on perehdytty syvemmin happivaiheen reaktorin toimintaan, sillä toimeksiantajalla on ollut ongelma kyseisessä vaiheessa.

Ongelmana on, että ensimmäisen happireaktorin jälkeinen linjasto värähtelee liikaa, jota tapahtuu yleensä koivujaksolla sekä lajinvaihdon seurauksena. Tehtaalla tuotetaan havu- sekä koivusellua. Koivusellua valmistetaan pari vuorokautta viikossa, ja havusellua valmistetaan loput ajasta. Sellulaadun vaihtuminen aiheuttaa epätasaiset prosessiolosuhteet, jolloin vakava värähtely alkaa happivaiheessa.

Värähtely putkistoissa on normaalia, mutta ylimääräinen värähtely on haitallista tehtaalle. Siitä aiheutuu nopeampaa laippojen, hitsien ja kannakkeiden kulumista, sekä se synnyttää turvallisuusrisikin. Prosessin ajoparametrejä joudutaan myös muuttamaan epäekologisimmiksi, lisäämällä veden käyttöä. Näin tehdään tehtaalla, jotta massavirtaus olisi laihempaa, minkä on huomattu vähentävän värähtelemistä happivaiheessa.

Värähtelyongelmasta eroon pääseminen auttaisi oppimaan kuitumassan virtauksen käyttäytymisestä lisää, minkä lisäksi toimeksiantaja hyötyisi ratkaisusta taloudellisesti, pidempien huoltovälien sekä energiatehokkuuden kautta. Värähtelyongelman kanssa happivaihetta joudutaan ajamaan

epätaloudellisesti, mikä aiheuttaa energiahäviöitä. Energiahäviöitä syntyy ylimääräisestä veden käytöstä massan laimennuksessa. Mitä sakeampana massaa voidaan ajaa prosessissa, sitä ekologisempaa se on. Tämä johtuu siitä, että ei tarvitse turhaan käyttää lämpöenergiaa ylimääräiseen laimennusveteen.

Värähtelystä aiheutuu myös turvallisuushaittoja, sillä putken värähtely aiheuttaa huojuntaa hoitotasoilla happireaktorin päällä, mikä tekee siellä työskentelystä vaarallisempaa. Putken repeäminen on myös mahdollisuus, jos värähtely kasvaa liian suureksi. Tämä voisi aiheuttaa hengenvaaraan ulkona työskenteleville henkilöille. Ongelmasta syntyy myös merkittävä käytettävyyseriski tehtaalle. värähtelyongelmaa on työssä lähdetty tutkimaan tarkemmin.

2 Tutkimus

2.1 Tavoitteet ja raja

Opinnäytetyön tavoitteena on löytää ne parametrit, jotka vaikuttavat värähtelemiseen eniten, sekä todentaa niiden vaikutusten suuruus. Opinnäytetyön lopuksi kehitetään ratkaisuidea, jolla voidaan vähentää värähtelemistä tai jopa poistaa se kokonaan. Tavoitteisiin pääseminen auttaisi toimeksiantajaa taloudellisesti, sekä turvallisuus tehtaalla paranisi. Tavoitteisiin pyritään pääsemään tekemällä koeajoja tehtaalla. Koeajojen avulla voidaan havainnoida värähtelyn suuruuden vaihtelua ValmetDNA sovelluksen kautta. Alustava tieto tehtaalla ennen tutkimusta on, että suurempi massan syöttösakeus sekä ylimääräinen kaasu vaikuttavat värähtelemiseen negatiivisesti. Koeajot suunnitellaan ennakkotiedon ympärille.

Koeajojen aikana tullaan myös havainnoimaan muiden parametrien vaikutusta värähtelyyn. Nämä parametrit on valittu happivaiheen ympäriltä sen mukaan, mitkä todennäköisimmin voisivat aiheuttaa värähtelemistä. Ylimääräistä värähtelyä syntyy virtauksen epätäydellisyydestä. Tätä voi aiheuttaa esimerkiksi massan laatu, ajoparametrit tai putken geometria. Nämä asiat on otettu huomioon tarkkailtavia parametreja valittaessa. Putken geometriaa ei voida muuttaa, mutta massan laatua voidaan tarkkailla ruskean massan pesureiden palautussuodosten johtokyvyn kautta. Mitä suurempi johtokyky, sitä likaisempaa massa on. Ajoparametreista on huomioitu useita eri mittauksia. Näitä ovat lämpötila, kaasunpoiston mittaukset, syötetyt kemikaalit sekä massan syöttöpaine.

Opinnäytetyössä havainnoidaan värähtelyn vaihtelun korrelaatiota muiden parametrien vaihteluun happivaiheen ympärillä. Työssä keskitytään ensimmäisen happireaktorin purkuputken värähtelemiseen, sekä siihen vaikuttaviin tekijöihin. Koeajot pohjautuvat aiempaan tietoon, jonka mukaan suurempi syöttöpaine sekä suurempi kaasumäärä vaikuttavat värähtelyyn negatiivisesti. Näin ollen koeajoissa tullaan muuttamaan hapen määrää sekä syöttöpainetta.

Ensimmäiseen reaktoriin syötetyn hapen määrää muokataan muuttamalla hapen syöttösuhdetta ensimmäisen sekä toisen happireaktorin välillä. Massan syöttöpainetta tullaan muuttamaan suoraan DNA:sta, jolloin automaatio muokkaa laimennusvesien määrää itsestään. Näiden koeajojen

aikana tullaan kuitenkin tutkimaan muidenkin parametrien luonnollisen vaihtelun vaikutusta värähtelemiseen.

2.2 Eettisyys ja tutkimusmenetelmä

Tutkimuksessa on käytetty Jyväskylän ammattikorkeakoulun tutkimuseettisiä ohjeistuksia. Tuloksia ei ole vääristetty eikä plagioitu. Tietoperustaan käytettyjä lähteitä on luettu, sekä käytetty kriittisesti, ja lähteiden välillä on tehty vertailuja. Lähteitä tietoperustaa varten on kerätty monipuolisesti, jotta puolueellisuudelta on vältytty. Lähteinä käytettyjä markkinointi ja yrityssivuja on käytetty vain objektiivisen tiedon keräämiseen, eikä niitä ole kerätty muuta käyttöä varten. Toimeksiantajalle on annettu mahdollisuus salassapitosopimukseen ja opinnäytetyön tiedon salaamiseen. Kaikki analyysit kerätystä datasta on tehty kriittisesti.

Tutkimus tullaan suorittamaan kokeellisen tutkimuksen sekä korrelaatiotutkimuksen sekoituksena. Kokeellisessa tutkimuksessa yhtä parametriä muutetaan kerralla, ja sen vaikutusta seurataan haluttu muuttujassa. Tämän tutkimuksen kohdalla muutettavat parametrit ovat hapen määrä sekä massan syöttöpaine, ja tutkittava muuttuja on värähtely ensimmäisen happireaktorin purkuputkessa. Korrelaatiotutkimuksessa taas havaitaan kahden muuttujan luonnollisten vaihteluiden korrelaatiota. Tämän tutkimuksen kohdalla se tarkoittaa palautussuodosten, lämpötilan, höyryn, alkalien sekä kaasunpoiston vaikutusta värähtelemiseen. Korrelaatioita muuttujien välillä yritetään löytää, sekä selittää opinnäytetyössä. Molemmat tutkimusmenetelmät ovat kvalitatiivista tutkimusta, ja ne ovat helppo suorittaa rinnakkain tehdasasetuksessa. (Bhandari 2023)

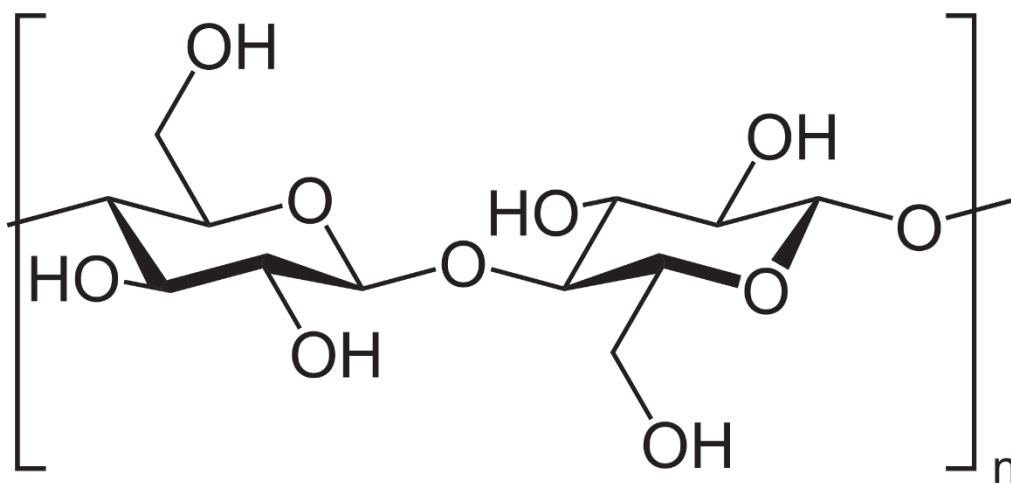
Jotkin opinnäytetyössä käytetyt lähteet ovat luotettavampia kuin toiset. Tieteellisistä artikkeleista sekä tietopankeista on kerätty suurin osa tiedosta. Bloggeja on käytetty vertailupisteinä sekä kuvien lähteinä. Näin ollen opinnäytetyön luotettavuudesta voidaan olla varmempia. Koeajoista kerätyn datan luotettavuuden kanssa tulee olla kriittinen. Suurin osa koeajoista tehtiin vain kerran, mikä ei takaa täysin luotettavaa tietoa. Dataa tulee käyttää suuntaa antavana tietona. Tämän vuoksi osa koeajoista suoritettiin kaksi kertaa, jotta voitiin havaita yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia niiden välillä.

3 Puun koostumus

Puu koostuu solullisesti kolmesta pääaineesta, joita ovat selluloosa, hemiselluloosa sekä ligniini. Selluloosa ja hemiselluloosa ovat puun kuituja, kun taas ligniini on kuidut toisiinsa yhdistävää kiinnitysainetta. Solun rakenteesta suurin osa on selluloosaa, mitä on noin 40–50 % riippuen puusta. Hemiselluloosaa puusta on noin 20–25 % ja ligniiniä 20–30 %. Loput puun rakenteesta muodostuu uuteaineista. Näitä uuteaineita ovat erilaiset rasvahapot, triterpenoidit, sekvenssiterpeenit. Näiden lisäksi puussa esiintyy epäorgaanisia alkuaineita kuten erilaiset metallit esimerkiksi kalsium ja rauta. (Puun uuteaineet n.d., Solukko n.d.)

3.1 Selluloosa

Puun rakenteesta isoin osa on selluloosaa. Hynnisen (2018) mukaan selluloosa on maapallon yleisin polymeeri. Selluloosaa on käytetty tavallisesti paperin valmistuksessa, mutta kuitujen vahvan rakenteen vuoksi voidaan selluloosaa hyödyntää muihinkin tarkoituksiin. Sekä Hynninen, (2018) että Kääriäinen (2016) ilmaisevat selluloosakuiduilla olevan paljon tulevaisuuden mahdollisuuksia.



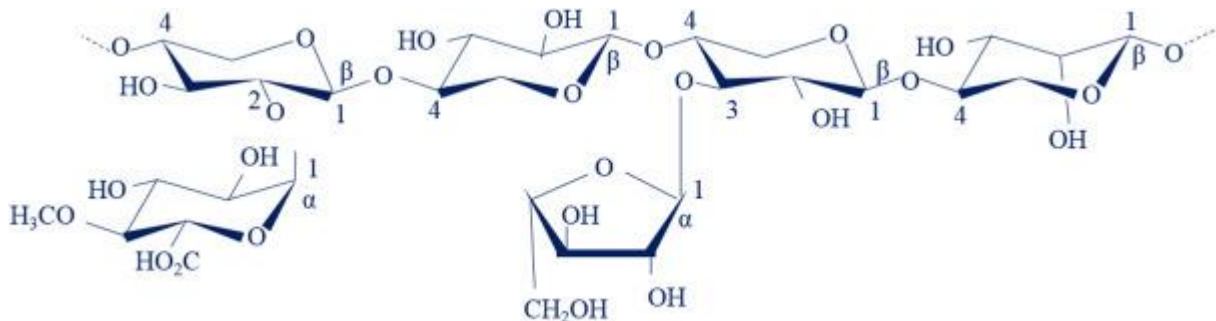
Kuvio 3.1 selluloosan molekyyli rakenne (Paakkari U, Björn L. N.d.)

Selluloosa molekyylit ovat β -D glukopyranoosiyksiköitä, jotka ovat yhdistyneet toisiinsa vetysidoksilla. Nämä vetysidokset tekevät Choudhury (2006 s.4) mukaan molekyyleistä vahvoja. Yksiköt ovat yhdistyneet toisiinsa 180 asteen kulmassa, muodostaen toistuvan, mutta vuoroin kääntyvän rakenteen. Vetysidoksien vuoksi molekyylit kasaantuvat kimpuiksi muodostaen mikrofibrillejä, jotka yhdessä muodostavat lopuksi makrofibrillejä, joiden pituus on noin 1–2,5 mm. (Selluloosan rakenne ja ominaisuudet n.d., Viljanen 2018)

3.2 Hemiselluloosa

Hemiselluloosaa eli kuusikumia on puun rakenteessa lähes saman verran kuin ligniiniä eli noin neljännes. Hemiselluloosan käyttöä on tutkittu esimerkiksi elintarviketeollisuudessa, ja sillä on hyvät tulevaisuuden näkymät. Yhdisteen käyttöä varsinkin stabilointiaineena on tutkittu Helsingin yliopistossa (Wartiovaara 2022). Aalto-yliopiston tutkijatohtori Mamata Bhattari on tutkinut hemiselluloosan mahdollisuuksia korvata muitakin yleisesti käytettyjä synteettisiä aineita esimerkiksi tuholaistorjunnassa. (Kauppi 2021)

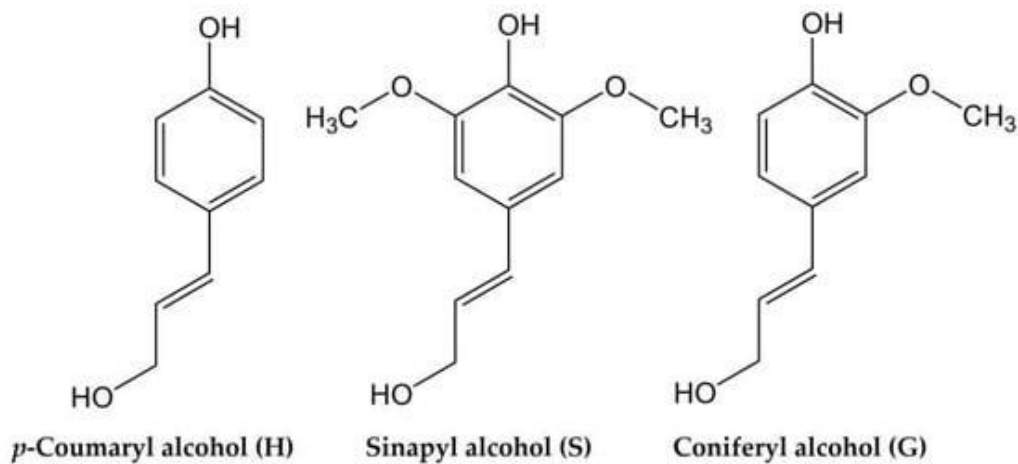
Molekyyli rakenne hemiselluloosalla muistuttaa selluloosan molekyyli rakennetta, mutta hemiselluloosassa se on epäsäännöllinen. Tämä tekee hemiselluloosasta pienemmän polymeerin kuin selluloosa. Hemiselluloosaa kuten selluloosaakin esiintyy puun lisäksi muissa kasveissa ja levissä, joten hemiselluloosia on useita erilaisia. Puussa yleisimmät hemiselluloosamolekyylit ovat kuitenkin ksyylaani sekä glukomannaani. Nämä molekyylit muodostuvat suurimmaksi osaksi glukoosista, ksyloosista, mannoosista sekä galaktoosista. (Puun hemiselluloosien rakenne ja ominaisuudet n.d.)



Kuvio 3.2 Hemiselluloosa molekyyli ksyylaani (Hashmi S. 2020)

3.3 Ligniini

Ligniini toimii puun solujen liima-aineena. Sellunvalmistuksen yksi pääprioriteetteja on ligniinin poisto. Näin ollen massatehtaan lähes koko tarkoitus on tehdä juuri sitä. Ligniiniä on tavallisesti käytetty energiaksi polttamalla sellutehtailla, mutta lähiaikoina ligniinin ominaisuuksia on tutkittu enemmän. Tätä myöten on huomattu sen olevan erittäin monipuolinen yhdiste, jolla on paljon käyttömahdollisuuksia. Nurro (2021) kertoo tutkimusprofessori Ali Harlinin ilmaiseen ligniinin tutkimusten olevan vielä kesken, mutta mielenkiintoisia käyttökohteita sille voi löytyä esimerkiksi lujarakenteisten komposiittien sekä teknisten hielten valmistuksessa. Tällä hetkellä ligniiniä käytetään energian lisäksi myös betonin notkistajana. (Nurro 2021, Puut pystyssä pitävä ligniini muuttui teollisuuden hylkiöstä rahoittajien suosikiksi 2017)



Kuvio 3.3 Ligniinin rakenne osaset (Piia Jöul ja muut 2022)

Ligniini liukenee osittain NaOH-liuokseen, minkä vuoksi NaOH onkin sellunvalmistuksessa käytetty keittokemikaali. Ligniini koostuu fenyylipropaniyksiköistä. Nämä yksiköt voivat yhdistyä toisiinsa kokonaisuksi polymeereiksi neljästä eri kohdasta. Tämän vuoksi ligniinin molekyylit ovat verkkomaisia. (Ligniinin biosynteesi, rakenne ja ominaisuudet n.d.)

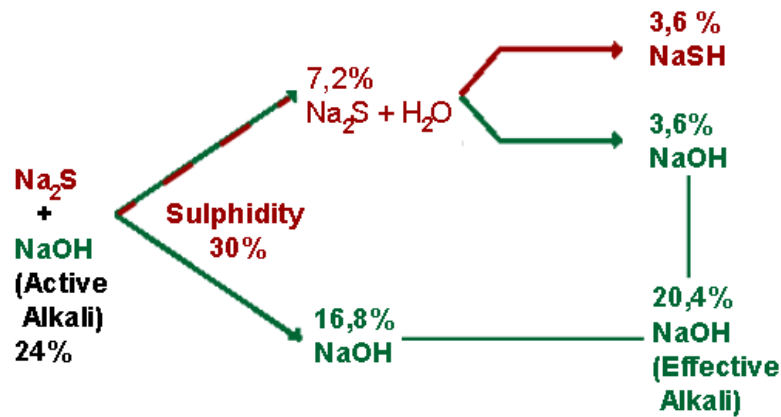
4 Massatehdas

Massatehtaalla haketetusta puusta valmistetaan valkaistua kuitumassaa. Osaprosesseja massatehtaalla ovat pasutus, keitto, pesu, happidelignifiointi, lajittelu sekä valkaisu. Näiden lisäksi massatehtaalla myös valmistetaan kemikaaleja, kuten hapetettua valkolipeää. Massatehdas on näin ollen keskiössä sellunvalmistusprosessissa.

4.1 Keitto

Ennen kuin hake saapuu keittoon, se pasutetaan. Pasutuksella tarkoitetaan hakkeen huokosissa olevan ilman syrjäyttämistä höyryllä. Tämän jälkeen valkolipeän on helpompaa tunkeutua hakkeen huokosiin keitto vaiheessa. Hakkeen keittäminen on hakkeen reagoimista valkolipeän kanssa. Valkolipeä koostuu pääasiassa natriumhydroksidista (NaOH) ja natriumsulfidista (Na₂S). Aineen väkevyyys ilmoitetaan joko tehollisena alkalina tai aktiivisena alkalina (g/l). Aktiivinen alkali tarkoittaa NaOH ja Na₂S yhteenlaskettua määrää, ja tehollinen alkali tarkoittaa NaOH ja ½ Na₂S yhteenlaskettuna. Kun Na₂S reagoi veden kanssa, puolet siitä muuttuu NaOH:ksi ja puolet NaSH:ksi. Näin ollen, tehollinen alkali tarkoittaa NaOH:in realistista määrää valkolipeässä. NaOH ja NaSH molemmat ovat aktiivisia kemikaaleja keittimessä, joten niiden realistista määrää kutsutaan aktiiviseksi alkaliksi. Valkolipeä tunkeutuu hakkeen huokosiin liuottaen ligniiniä, ja muuttaen hakkeesta puumasaa. (KnowPulp n.d., Quinde A 2021)

An example of active and effective alkali dependence



Kuvio 4.1 Tehollinen ja aktiivinen alkali (Knowpulp n.d.)

Keittimestä poistuvaa lientä kutsutaan mustalipeäksi. Mustalipeä koostuu keitossa käytetyistä kemikaaleista sekä puusta liuenneista komponenteista. Tämä mustalipeä voidaan poistaa keittimestä paisuntaan. Paisunnassa mustalipeän painetta lasketaan, jolloin siitä vapautuu kaasuja, joita voidaan käyttää massatehtaan muissa prosesseissa. Paisunnan jälkeen mustalipeä menee mustalipeäsortterin läpi talteenoton puolelle, missä se poltetaan. Poltosta jäljelle jäänyt sula epäorgaaninen aines voidaan käyttää uuden valkolipeän valmistuksessa. (Knowpulp n.d.)

Keitossa poistuneen ligniinin määrä määrittää massan kappaluvun. Kappa lasketaan testaamalla kuinka paljon kaliumpermanganaattia (KMnO₄) kuitumassa käyttää hapettaessa näytettä, ja se korreloi lähes suoraan ligniinin määrään seoksessa. Kappaluku on yksikötön mittari ja sitä mitataan tavallisesti välillä 1–100. Keiton jälkeinen kappaluku koivumassalla on noin 14–20 ja havumassalla 25–30. Yksittäinen kappaluku tarkoittaa noin 0,12 % ligniinipitoisuutta sellumassassa. Eli jos kappa on 20, on massassa 2,4 % ligniiniä. Kappaluvun liiallinen alentaminen ennen happivaihetta kuitenkin alkaa liuottamaan kuituja, mikä ilmenee esimerkiksi viskositeetin alenemisena. Tämä myös tarkoittaa huonompaa saantoa. Kappaluvun vaihteluvälillä tulisi pyrkiä lähemmäksi alarajaa kuin ylärajaa, sillä myöhemmät ligniininpoistomenetelmät ovat taloudellisesti arvokkaampia kuin keitossa

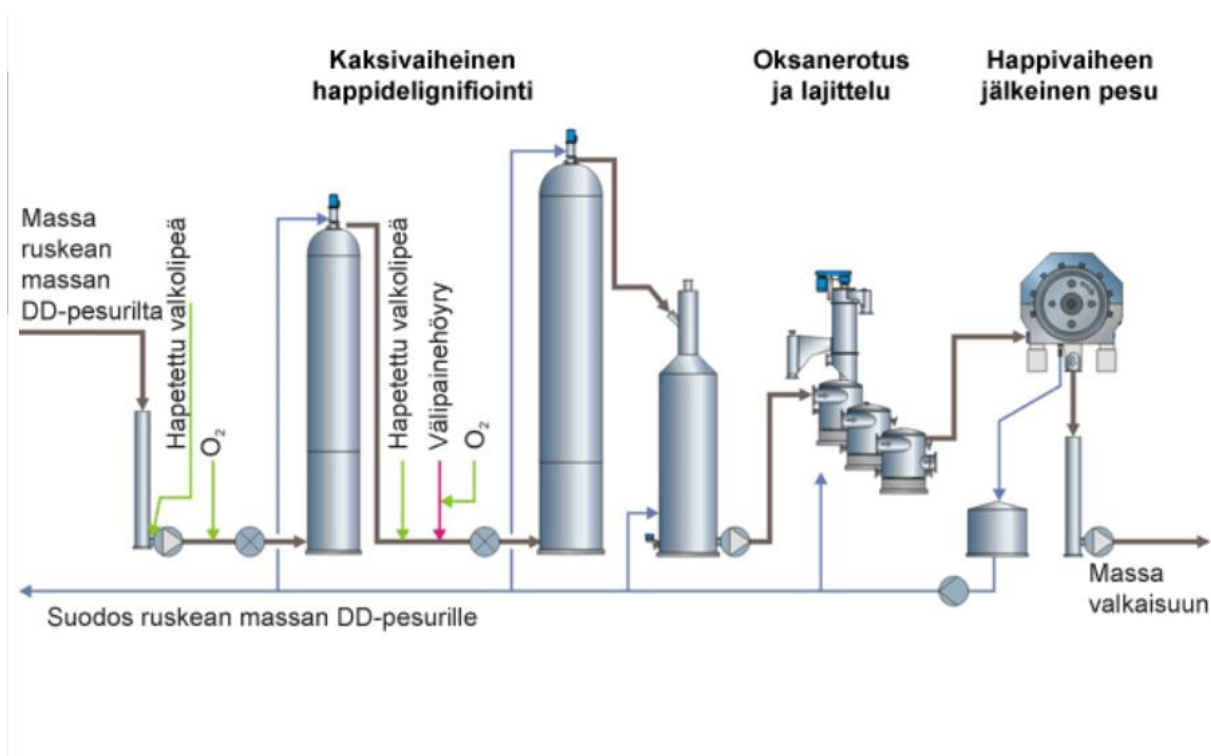
käytetty. Kappatavoite tulee kuitenkin arvioida tehdaskohtaisesti. (Kühner M, Lang P n.d.; Knowpulp n.d.)

4.2 Pesu

Massan peseminen on oleellinen osa tehokkaassa sellun valmistuksessa. Massan pesemistä tapahtuu keittimessä, keittimen jälkeen, lajittelun jälkeen sekä jokaisen valkaisu vaiheen välissä. Keiton jälkeisen pesun tarkoitus on poistaa massan seasta mahdollisimman paljon mustalipeää. Peseminen on myös hyödyllistä happivaiheen ekologisuuden kannalta. Ylimääräinen mustalipeä kuluttaa happivaiheessa käytettävää alkalia sivureaktioihin. Ruskean massan pesusuodosta voidaan käyttää keittimessä laimennusnesteenä, sekä keittimen pohjassa tapahtuvaan pesuun. Ensimmäisen ja toisen pesuvaiheen välissä on happivaihe sekä lajittelu. Toisessa pesuvaiheessa voidaan poistaa massan seasta happivaiheessa käytettyjä kemikaaleja sekä liuennutta ligniiniä, ja tätä suodosta voidaan käyttää laimennuksessa happivaiheen ja lajittamon välissä optimaalisen sakeuden saamiseksi. Suodosta käytetään myös aiemman pesuvaiheen eli ruskean massan pesun pesuvedenä. (KnowPulp n.d.)

5 Happivaihe

Happivaihe on keittimen jälkeisen pesun sekä lajittamon välissä tehtaalla. Happivaiheessa massa kulkee ensin syöttöpumpun läpi, missä paine kasvaa happireaktorille optimaaliseen arvoon. Painestettuun massaan syötetään vielä happi ennen reaktoria happisekoittimessa. Hapen ja massan sekoitus kulkeutuu reaktoriin massanjakolaitteen kautta. Reaktorin jälkeen purkain purkaa massavirran eteenpäin reaktoreiden väliselle paineenkorotus pumpulle, jonka edellä lisätään kuumaa vphöyryä eli välipainehöyryä tarvittaessa. Tämän jälkeen samanlainen prosessi menee läpi toisessa happireaktorissa alkaen massanjakolaitteesta. Massa puretaan lopuksi toisesta reaktorista puskusäiliöön.



Kuvio 5.1 Happivaihe (Knowpulp n.d.)

Happivaiheen tärkeimpiä parametrejä ovat paine, alkaliannos, happiannos sekä lämpötila. Nämä ovat tehdaskohtaisia arvoja ja muuttuvat sitä mukaan millainen happivaihe tehtaalla on. Muuttujia ovat: happireaktoreiden määrä, happivaiheen koko sekä haluttu lopputulos happivaiheelta. Taulukosta 1 on huomattavissa parametrien suuri vaihtelu. Myös lähteiden välillä on pientä heittelyä arvojen suuruuden kanssa. Esimerkiksi Ji (2007) ilmaisee optimaalisen lämpötilan olevan 70–105 astetta, mutta Ahmed (2015) esittää happivaiheen optimilämpötilaksi 80–120 astetta. Näin ollen taulukon arvot ovat keskiarvotettu näiden lähteiden välille. Taulukkoa luettaessa on myös otettava

huomioon viiveajan luonnollinen kasvaminen optimaaliseen ulkopuolelle, kun reaktoreita on enemmän kuin yksi. Nykyaikaisessa happidelignifointi prosessissa pystytään pääsemään jopa 70 % delignifioitumisasteeseen. (Ji 2007, Ahmed 2015)

Taulukko 1 Happivaiheen optimaaliset ajoarvot

Parametri	Yksikkö	Arvo
Sakeus	%	10–15
Reaktorin viive	min	50–60
Lämpötila	°C	75–110
Syöttöpaine	bar	6–8
Alkaliannos	kg/t	19–26
Happiannos	kg/t	20–25
MgSO ₄	kg/t	0–3

5.1 Massan syöttö reaktoriin

Massa pumpataan keskisakeana eli noin 10 % sakeudessa reaktoriin. Tämän vuoksi syöttöpumpuna tulee käyttää MC eli Medium Consistency pumpppua. MC-pumppu fluidisoi massaa hajoittamalla kuituverkkoa hellävaraisesti. Samalla pumppu poistaa ylimääräisiä kaasuja massavirrasta. Fluidisoituun massaun lisätään pumpun jälkeen happea ennen happisekoitinta. Happisekoitin eli kemikaalisekoitin auttaa happea jakautumaan tasaisemmin massavirran sekaan, ja fluidisoi sitä edelleen. (Knowpulp n.d.)

5.2 Reaktori

Reaktoriin massa syötetään massanjakolaitteen läpi, mikä auttaa saavuttamaan reaktorissa halutun tulppavirtauksen. Reaktorissa tarvitaan pH tasoksi noin 10, mikä vaatii alkaliannoksen syöttämistä massavirtaan. Jotta halutut reaktiot tapahtuisivat, tarvitaan alkalien ja hapen lisäksi myös korkea lämpötila, sekä viiveaikaa antaa reaktioiden tapahtua. Massan sakeus tulee pitää myös yli 10 %, muuten reaktoriin saattaa syntyä massan kanavoitumista, mikä tarkoittaa epätoivottua virtausta. Reaktorista massa siirtyy eteenpäin purkaimen kautta. Purkain auttaa massaa saavuttamaan tasaisemman virtauksen ulos reaktorista, ja samalla poistaa jäämä kaasuja reaktioiden jäljiltä. (Knowpulp n.d.)

Jos massassa on siirtymämetalleja, ne reagoivat peroksidin kanssa muodostaen ylimääräisiä hydroksyyli-radikaaleja. Radikaalit tarkoittavat molekyyliä tai yksittäisiä atomeja, joilla ei ole uloimella kuorella parillista määrää elektroneja. Näitä ovat ketjureaktiossakin esiintyvät perhydroksyyli-ionit sekä hydroksyyli-ionit. Ylimääräiset hydroksyyli-radikaalit vähentävät saantoa prosessista, sillä ne pilkkovat selluloosaa. (Knowpulp n.d.)

6.2 Valkolipeän hapetus

Happireaktori vaatii alkaliset olot, jotta reaktiot sujuisivat hyvin. Alkaliset olot saavutetaan lisäämällä hapetettua valkolipeää massavirtauksen sekaan. Valkolipeä hapetetaan, sillä se koostuu pääasiassa natriumhydroksidista sekä natriumsulfidista, ja näistä natriumsulfidi reagoi reaktorissa hapen kanssa. Tämä aiheuttaa liiallista hapen käyttöä, ja reaktion laatua ei voitaisi taata. Valkolipeä syötetään hapetusreaktoriin, missä valkolipeän sekaan syötetään happea. Reaktio on eksotermisen. Tämä tarkoittaa sitä, että reaktiossa vapautuu energiaa, mikä esiintyy tässä tilanteessa lämpönä. Natriumsulfidin reagoiessa hapen kanssa, siitä muodostuu ensin natriumtiosulfaattia, mikä edelleen hapettuu natriumsulfaatiksi. (Knowpulp n.d.)

7 Värähtely

Värähtely prosessiteollisuuden putkistossa voi johtua monesta eri asiasta. Pieni värähteleminen on normaalia, aina kun putken sisällä virtaa jotain, ja se on monesti havaittavissa kuuntelemalla tai koskettamalla putkea. Mutta vaikka värähtelemistä ei voitaisi helposti havaita, voi se silti olla haitallista prosessilinjastojen kestävyydelle. Värähtelemisen syitä ovat esimerkiksi laitteiden pyörimisliike, venttiileiden asennot, paine-erot sekä epätasaisuus prosessissa. Värähtelyn aiheuttamista rikkoutumisista 80 % liittyy pieniin liitoksiin linjastoissa, ja loput voidaan yleisesti liittää päälinjaston hitsiongelmiin (Piping vibration integrity primer). Virtauksen epätasaisuudesta johtuva värähteleminen jaotellaan pääasiassa kahteen osaan, jotka ovat matalan taajuuden värähtely sekä korkean taajuuden värähtely. Riippuen siitä kummasta on kyse, tulee toimia sen mukaisesti ongelmaan puuttuttaessa. (Piping vibration integrity primer n.d., Miles n.d.)

7.1 Matalan taajuuden värähtely

Matalan taajuuden värähtely, eli flow induced vibration tai FIV on prosessiteollisuudessa ilmenevää värähtelemistä, mitä aiheuttaa aineiden virtausten epätasaisuudet (Miles n.d.). Tästä käytetään myös nimitystä flow induced turbulence tai FIT. Noita nimityksiä ei kuitenkaan käytetä lähteissä aina samalla tavalla. Esimerkiksi Piping vibration and integrity assessment (n.d.) ilmaisee FIV:n johtuvan paine eroista fluidissa, ja FIT:n johtuvan fluidin virtausnopeuden ja sen tiheyden muutoksista. Kun taas Vibration and integrity engineering division deliver flow-induced vibration study for new build FPSO (n.d.) esittää FIT:n ja FIV:n synonyymeinä.

Virtaava aine ei ole niin tarkkaan määriteltyä matalan taajuuden värähtelyssä, toisin kuin korkean taajuuden värähtelyssä, jossa putkessa liikkuva aine on kaasua tai kahden faasin fluidia, eli kaasun ja nesteen sekoitusta (Acoustic-induced vibration AIV analysis n.d.). Matalataajuinen värähtely syntyy, kun putkessa virtaavan fluidin liikehdintä on epätasaista, aiheuttaen epäjatkuvuutta virtauksessa. Epätasaista liikehdintää voi aiheuttaa mm. linjaston tiukat käännökset, osittain suljetut venttiilit, linjastoon liittyvät t-haarot tai muut pienet putkiyhteet. Kaikki edellä mainitut tilanteet aiheuttavat virtaukseen epäjatkuvuus kohtia, mikä johtaa fluidin synnyttämään pyörteitä sekä muuta virtausta vastoin tapahtuvaa liikettä. Almasi (2020) myös ehdottaa, että linjaston alku ja loppupään paine-ero voi aiheuttaa matalan taajuuden värähtelyyn prosessissa. (Miles n.d., Piping vibration and integrity assessment n.d.)

Värähteleminen yleisesti lasketaan matalan taajuuden värähtelyksi, kun sen taajuus laskee alle 100 Hz. Tällainen värähtely rasittaa linjastoa, varsinkin laippa- sekä putkiliitoskohdista, mikä tekee asiasta rasiitteen prosessin ylläpitäjälle. FIV aiheuttaa myös kannakoinnille ylimääräistä rasiitusta, joka johtaa niiden ennenaikaiseen pettämiseen. Värähtelemisestä seuraa turvallisuusriskejä sekä taloudellista haittaa huoltojaksojen lyhentyessä. (Flow induced vibration FIV analysis n.d., Miles n.d.)

7.2 Korkean taajuuden värähtely

Korkean taajuuden värähtely, jota kutsutaan myös nimellä acoustic induced vibration tai AIV, on nopeampaa värähtelemistä kuin matalan taajuuden värähtely. Korkeataajuista värähtelyä aiheuttaa kaasut, mutta Acoustic induced vibration AIV analysis (n.d.) esittää, että sitä voisi tapahtua myös kahden faasin fluideissa. Kyseisestä värähtelemisestä aiheutuu suurta meteliä, mikä voi olla terveysriski operaattoreille. Prosessille vakavissa tilanteissa linjasto voi pettää jopa minuuteissa. (Miles n.d.)

Korkeataajuista värähtelyä aiheutuu, kun kaasun paine laskee. Tämä voi johtua painetta laskevista laitteista, tai osittain auki olevista venttiileistä. Painetta kuristava piste linjastossa saa kaasun luomaan kovaa ääntä, mikä saa putkiston värähtelemään äänen taajuuteen. Värähtelyn taajuus on huomattavasti korkeampi kuin matalataajuudessa värähtelyssä. Kun matalataajuinen värähtely todetaan yleisesti 0–100 Hz alueella, AIV toimii 500–2000 Hz alueella (Acoustic induced vibration AIV analysis n.d.). Väliin jäävät taajuudet ovat harmaata aluetta, jossa voi esiintyä kumpaa värähtelyä vain, mutta edellä mainitut värähtelyalueet ovat yleisimpiä kyseisille värähtelemisen muodoille. (Harper 2016, Miles n.d.)

8 Koeajot

Happivaiheen värähtelymittauksen data on jokaisella koivujaksolla hieman erilaista. Mittauksen yläraja eli 20 mm/s tulee kuitenkin vastaan jatkuvasti. Värähteleminen happivaiheessa on matalan taajuuden värähtelyä. Tämä tarkoittaa sitä, että värähtelyn taajuus on matala eli 0–100 Hz. Värähteleminen on voimakasta ja se kuluttaa kannakointia sekä putken eristeitä nopeasti. Koivujaksolla tuotantonopeus on huomattavasti isompi kuin havujaksolla. Tämä todennäköisesti aiheuttaa ylimääräistä rasitetta linjastoille. Tämän vuoksi matalimmat värähtelymittaukset koivujaksolla eivät koskaan ole alemmat kuin matalimmat värähtelymittaukset havujaksolla.

Koeajoihin päätettiin ottaa hapen syöttösuhteen muutos reaktoreiden välillä sekä massan syöttöpaineen muutos ensimmäiseen reaktoriin. Hapen syöttösuhdetta haluttiin muuttaa, sillä ennakkotietona oli, että ylimääräinen kaasu reaktorissa voi aiheuttaa värähtelemistä. Syöttösuhdetta muuttamalla voitiin vähentää hapen määrää ensimmäisessä reaktorissa, missä värähtelyongelma sijaitsee, muuttamatta absoluuttista kaasun määrää koko happivaiheessa. Tällä tavoin voitiin pitää hapen määrä vakiona normaalitilanteeseen nähden, jolloin kappatavoite ei kärsinyt.

Massan syöttöpainetta ensimmäiseen reaktoriin haluttiin vaihdella, sillä ennakkotietona oli, että pienempi syöttöpaine vähentäisi voimakasta värähtelyä. Syöttöpaine kertoo lähes suoraan massan sakeuden, sillä massa virtaa reaktorissa alhaalta ylöspäin, ja koska massassa oleva kuiva-aine on tiheämpää kuin vesi, nostattaa se painetta mitä sakeampaa virtaus on. Syöttöpaine siis laskee, kun massan sekaan lisätään vettä, ja nousee kun vettä vähennetään.

Koeajoissa muutettiin hapen syöttösuhdetta sekä reaktorin syöttöpaineita. Nämä kuitenkin tehtiin erillisissä koeajoissa, jotta tulosten tulkinta olisi helpompaa. Osa koeajoista tehtiin myös kaksi kertaa, jotta voitaisiin saada luotettavampia tuloksia. Koeajot suoritettiin lajinvaihtojen aikana, sekä osa suoritettiin koko koivujakson ajan, sillä koivujaksoissa värähtelyä on havaittavissa enemmän. Koeajojen tarkoituksena oli löytää kuinka paljon parametrimuutokset vaikuttavat värähtelemiseen. Koeajojen aikana sekä niiden ulkopuolella kuitenkin tarkkailtiin useita eri muuttujia, jotta löydetäisiin mahdollisimman paljon värähtelemiseen vaikuttavia parametrejä.

Koeajojen data on esitettyä allekkain eri Kuvioissa. Kuviot ovat jaettuna kymmeneen sektoriin kronologisessa järjestyksessä. Jokaisesta kuvioista löytyy ”massat siirrettävä” trendi, joka kuvaa värähtelyä. Värähtelymittaus esiintyy muodossa mm/s, ja sitä mitataan välillä 0–20. Muut trendit ovat esitettyä taulukossa 2.

Taulukko 2 Koeajojen trendit

Trendi	Yksikkö	Kuvaus
Höyry O2 reaktoriin 2	kg/s	Vp-höyryn syötetty määrä
O2 reaktori 1 täyttö	bar	Syöttöpaineen suuruus
O2 kok.annos	kg/t	Syötetyn hapen määrä tonnia kohden
O2 reaktori laimennus	%	Huipun laimennusventtiilin avauskulma
Kokonaisannos	kg/adt	Syötetyn alkalin määrä tonnia kohden
Massa O2 reaktorista 1	C	Reaktorista ulos tulevan massan lämpötila
DD2-tyhjösäiliö	mS/m	DD2 palautussuodoksen johtokyky
DD1-palautussuodos	ms/m	DD1 palautussuodoksen johtokyky
O2 reaktori 1 kaasunpoisto	bar	Kaasunpoistolinjan paine-ero reaktoriin nähden
O2 reaktori 1 kaasunpoisto	%	Kaasunpoistiventtiilin avauskulma

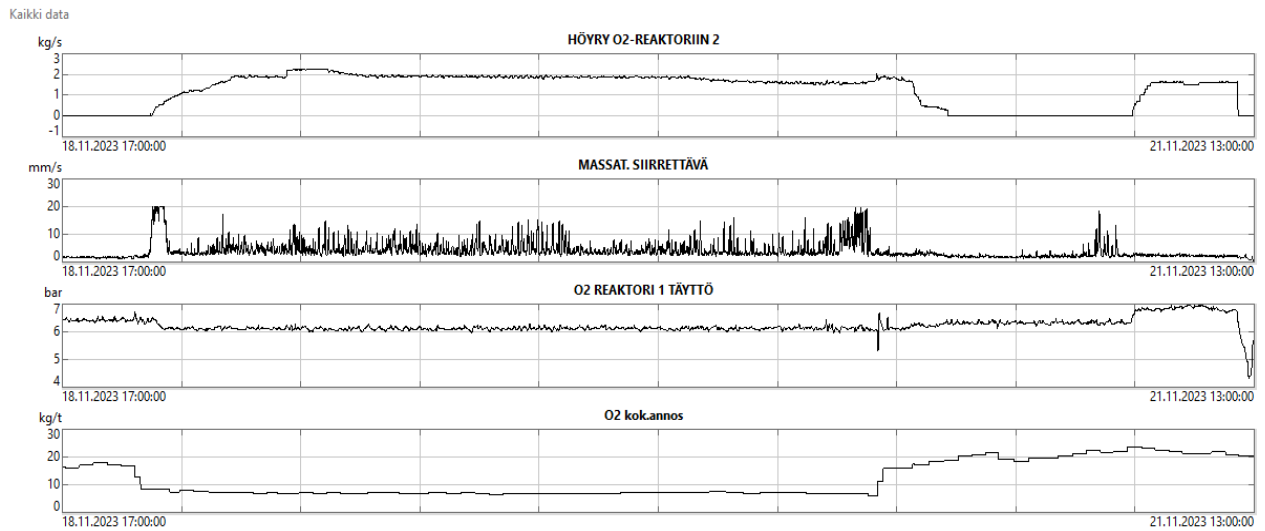
8.1 Hapen syöttösuhteen koeajot

8.1.1 Syöttösuhde 50/50

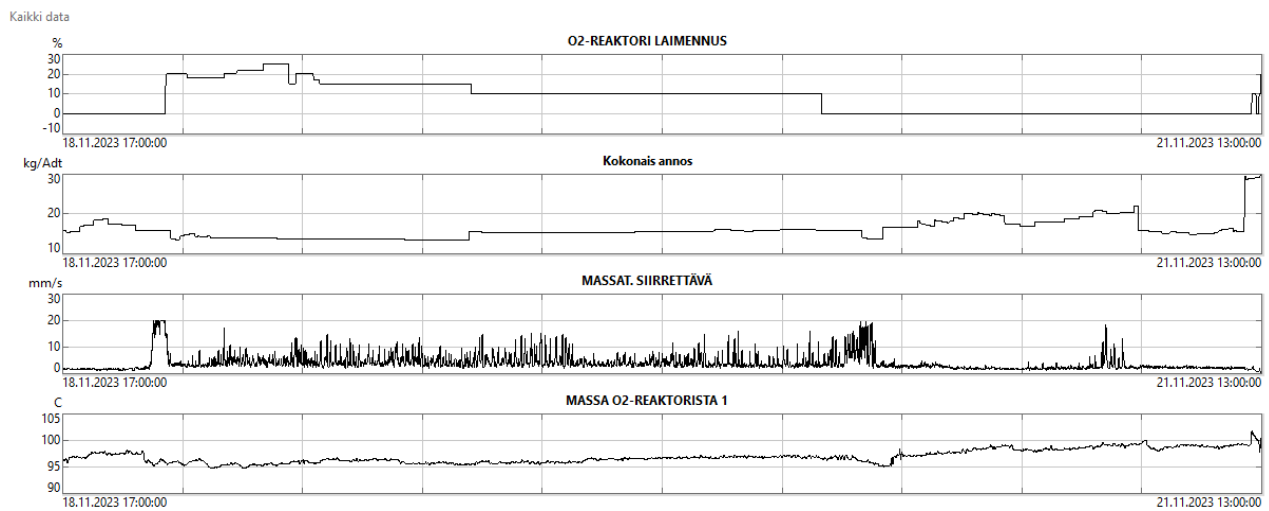
Tehtaan happivaiheessa on kaksi reaktoria. Hapen määrä jaetaan tavallisesti reaktoreiden välillä 60/40, jolloin ensimmäiseen reaktoriin menee 60 % hapesta. Tässä koeajossa syöttösuhde muutettiin 50/50 suhteeksi. Tällöin ensimmäiseen reaktoriin meni vähemmän happea kuin tavallisesti. Alustavan tiedon mukaan tämän olisi pitänyt vähentää värähtelemistä, sillä reaktoriin meni vähemmän kaasua. Koeajon data löytyy kuvioista 8.1–8.4. Koivujakso voidaan tunnistaa kuvioista hetkenä, jolloin hapen kokonaisannos on pudotettuna huomattavasti alemmas. Värähtelymittaukset olivat koko koivujakson hieman pienemmät kuin tehtaalla tavallisesti. Normaalitilanteessa värähtelemisen piikit nousevat jatkuvasti 20 mm/s saakka, kuten sektorissa 7 hetkellisesti tapahtuu. Tällä koivujaksolla värähtelymittaukset eivät saavuttaneet 20 mm/s ylärajaa kuin vain lajinvaihdossa, jotka tapahtuivat sektoreissa 1 ja 7. Värähtelemisen alhaisuus ei kuitenkaan johtunut täysin

koeajosta, sillä kuten kuviosta 8.1 voidaan huomata, hapen kokonaisannos pysyy lähes samana koko koivujakson.

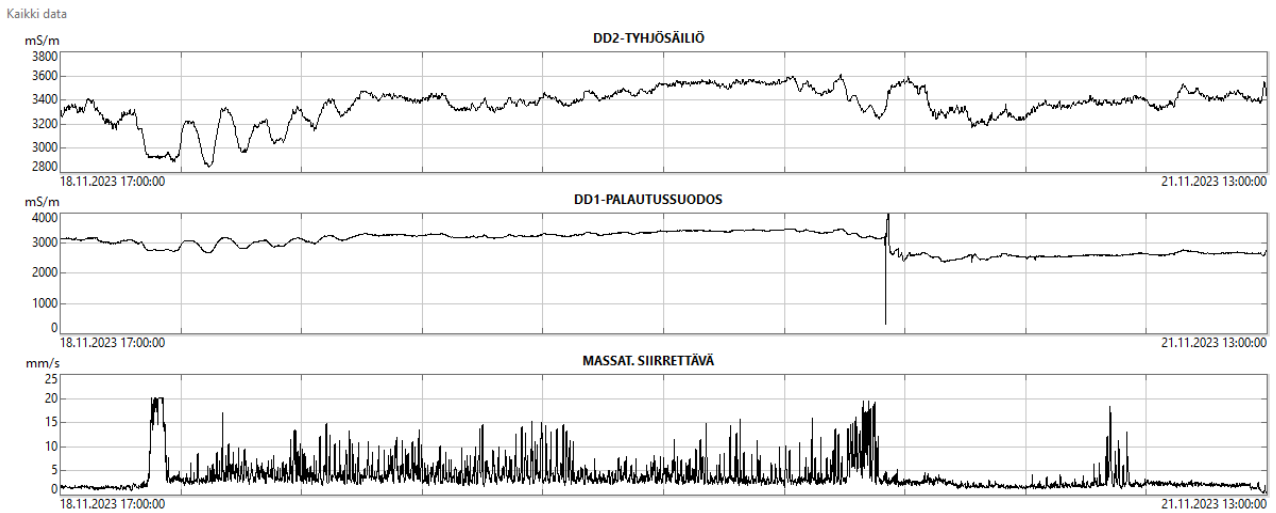
Havumassaa joudutaan ajamaan suuremmalla happikuormalla, sillä havun keitosta saapuva kappa-arvo on huomattavasti suurempi kuin koivun. Kuviosta 8.1 voidaan huomata, että värähteleminen pysähtyy, kun happiannos muutettiin havulle sopivaan määrään sektorissa 7 havujakson alkaessa. Tämä ei ole tavallista, vaan yleensä korkeat värähtelymittaukset ovat jatkuneet hetkellisesti havujakson alun jälkeenkin suurina 20 mm/s saavuttavina piikkeinä. Kuvion 8.1 sektorissa 8 myös havaitaan erittäin pieni värähtelyn pieneneminen, kun vp-höyry venttiili suljettiin. Kuvion 8.2 merkittävintä havainto on huipun laimennusventtiilin avaaminen ensimmäisessä sektorissa. Suuri värähtelypiikki pysähtyi samalla kun laimennusventtiili avattiin. Palautussuodosten arvojen heitteilyt, jotka löytyvät kuviosta 8.3, eivät tulosten perusteella vaikuta värähtelemiseen. Tämä tarkoittaisi sitä, että massan puhtaudella on pieni tai olematon merkitys värähtelemiseen. Kuviosta 8.4 huomataan, että sektorissa 7 värähtelymittaukset kasvoivat, samalla kun kaasunpoistoverkoston paine-ero mittaus tippui nollan alapuolelle. Tämä johtui venttiilin avaamisesta 100 % auki, jolloin reaktorin huipun paine ja kaasunpoistolinjan paine tasaantuivat, ja hetkellisesti kaasunpoistolinjassa oli isompi paine kuin reaktorin huipussa. Äkillinen venttiilin avaus vaikutti todennäköisesti massavirtauksen tasaisuuteen reaktorin huipussa, mistä suuremmat värähtelymittaukset saivat alkunsa.



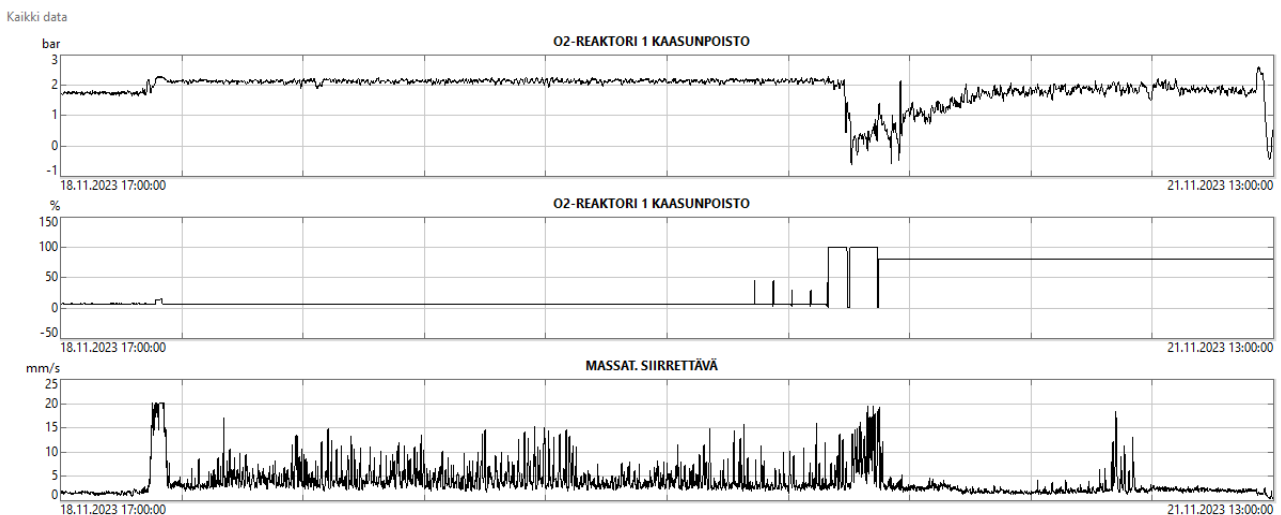
Kuvio 8.1 50/50 koeajo



Kuvio 8.2 50/50 koeajo



Kuvio 8.3 50/50 koeajo



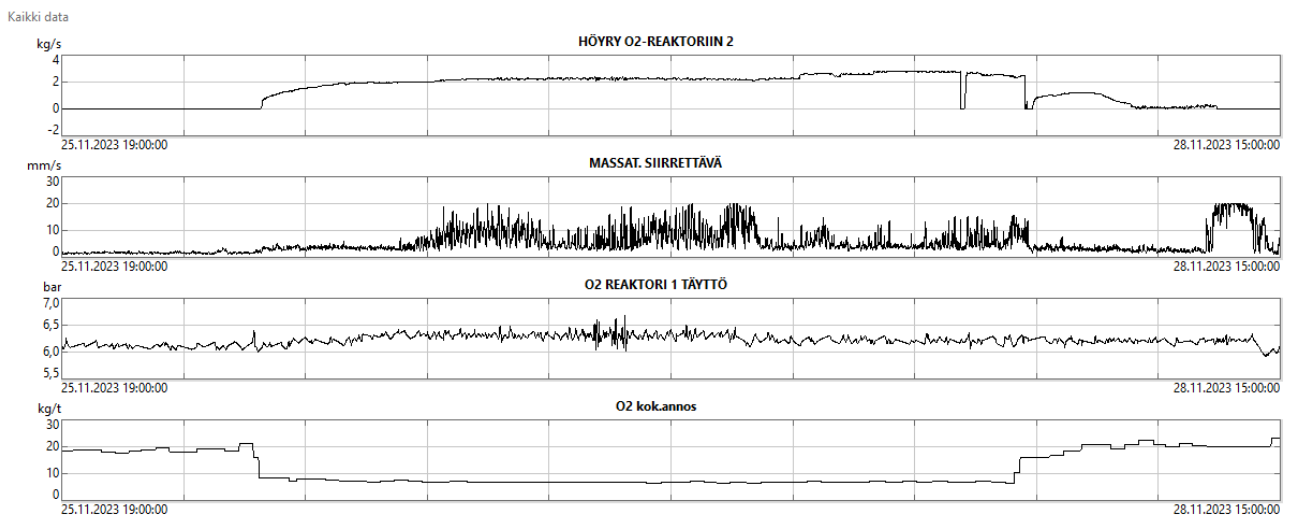
Kuvio 8.4 50/50 koeajo

8.1.2 Syöttösuhde 40/60

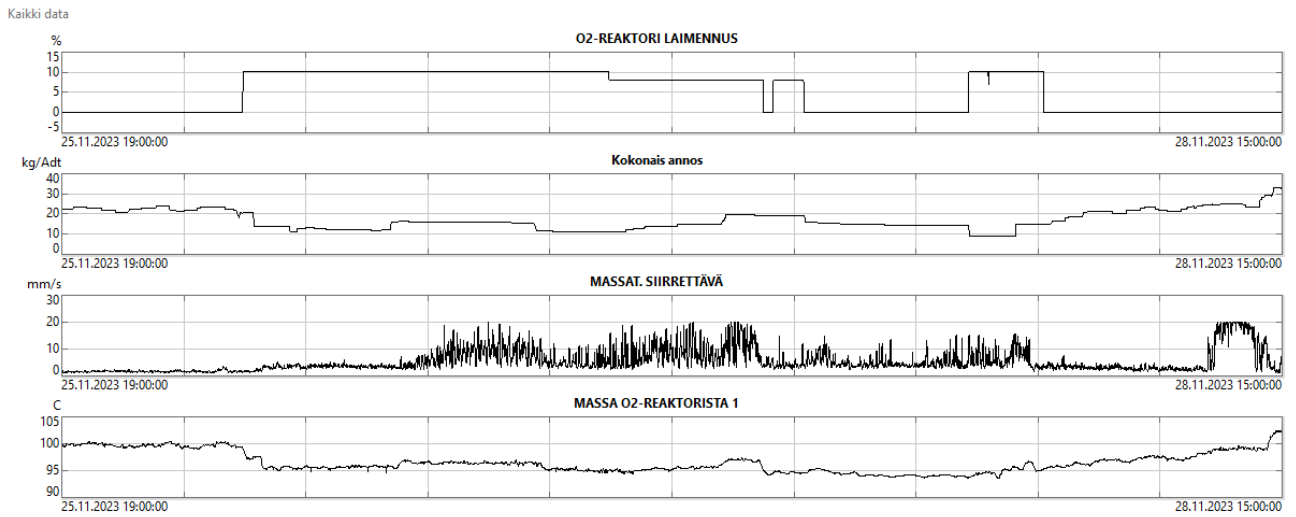
Tähän koeajoon jatkettiin hapen vähentämistä entisestään ensimmäiseen reaktoriin. Happea meni 40 % ensimmäiseen reaktoriin, ja 60 % hapesta ajettiin toiseen happireaktoriin. Tarkoituksena oli selvittää, väheneekö värähteleminen entisestään, vai tulisiko eteen jotain muunlaisia ongelmia.

Koeajoista huomattiin, että happivaiheen jälkeisillä pesureilla oli vaikeuksia pestä massaa, mikä huomattiin johtokyvyn kasvussa.

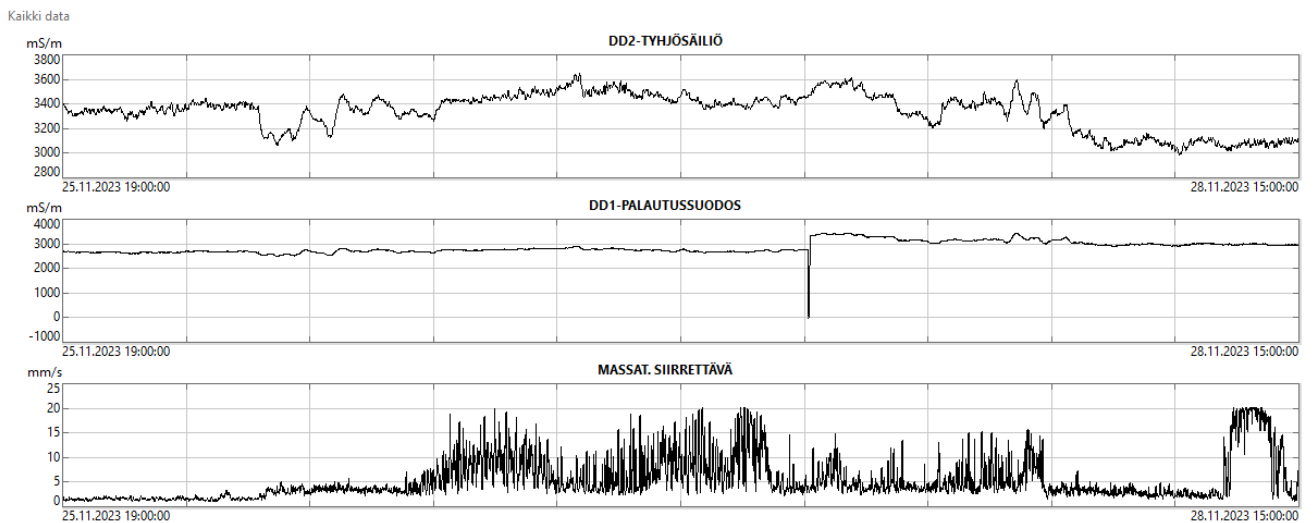
Värähtelemisen suuruudessa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia. Mittaukset olivat hieman suuremmat koivujakson keskivaiheella kuin 50/50 koeajossa, mutta loppupuolella ne olivat matalalla. Merkittävin havainto tässä koeajossa oli kaasunpoistovenktiilin kulman heittäly kuviossa 8.8. Venttiilin avauskulman heittälyyn aikaan sektoreissa 4–6, on havaittavissa korkeimmat värähtelymittaukset. Tämä voi kuitenkin myös johtua paine-erosta, jonka voidaan huomata kasvavan 2bar:iin saakka, jolloin vakavampi värähteleminen alkaa, ja paineen kasvu pysähtyy. Merkittävä havainto on myös kyseisen painemittauksen pieni putoaminen, jolloin värähtely pieneni loppu koivujaksoksi. Kuviossa 8.6 voidaan huomata lievä värähtelemisen nousu sektorissa 5, kun huipun laimennusventtiilin kulmaa pienennetään parilla prosentilla. Merkittävä havainto on myös havujakson alussa, jolloin värähtelymittaukset eivät nouse mittarajaan 20 mm/s, mikä on harvinaista tehtaalla.



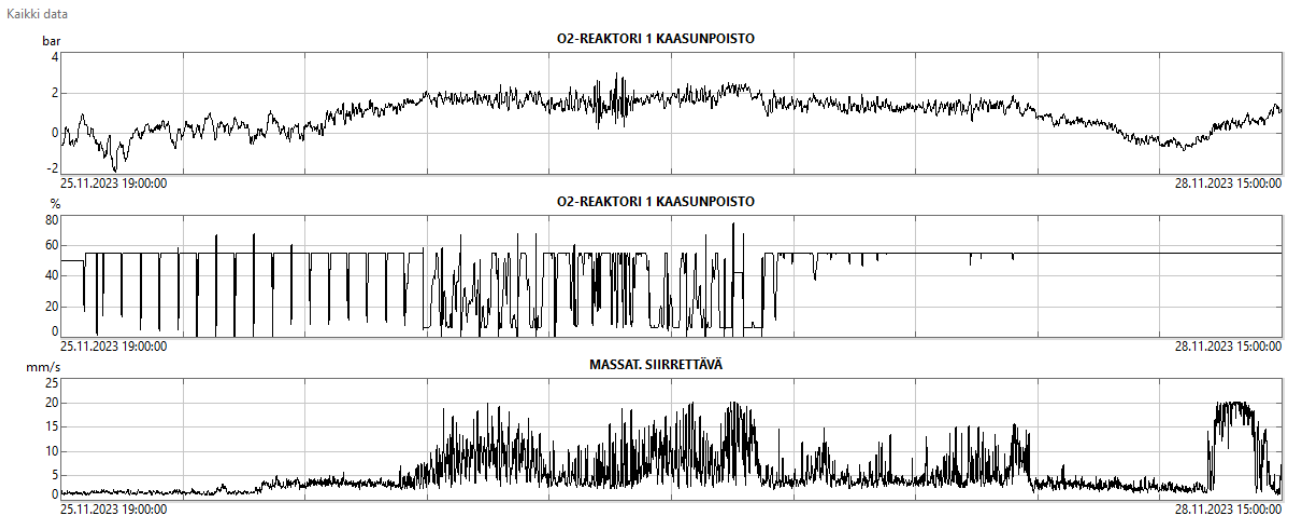
Kuvio 8.5 40/60 koeajo



Kuvio 8.6 40/60 koeajo



Kuvio 8.7 40/60 koeajo



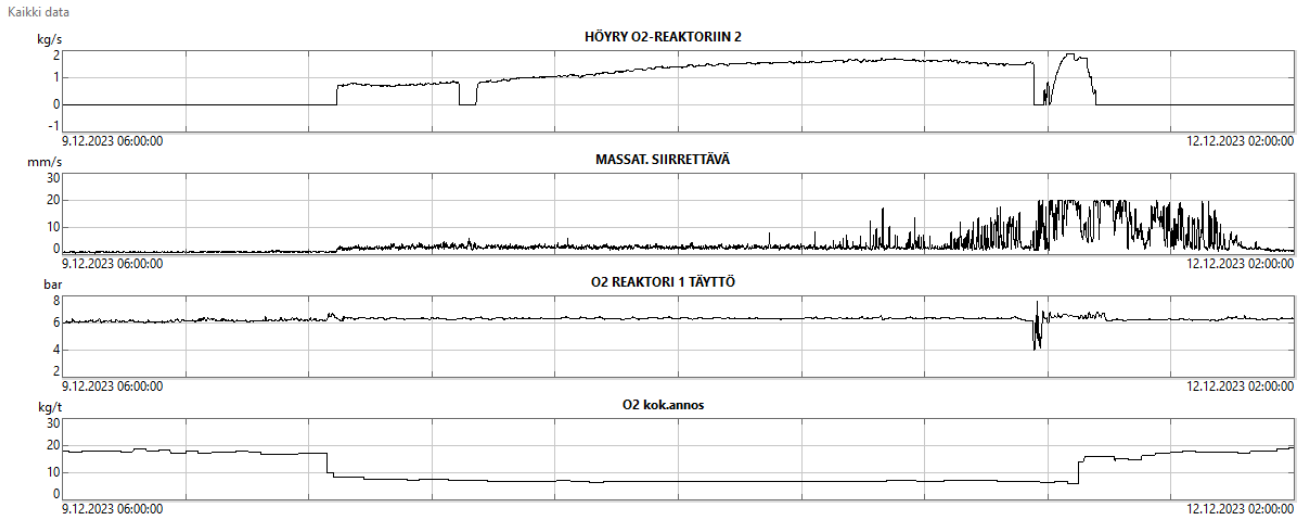
Kuvio 8.8 40/60 koeajo

8.1.3 Syöttösuhde 80/20

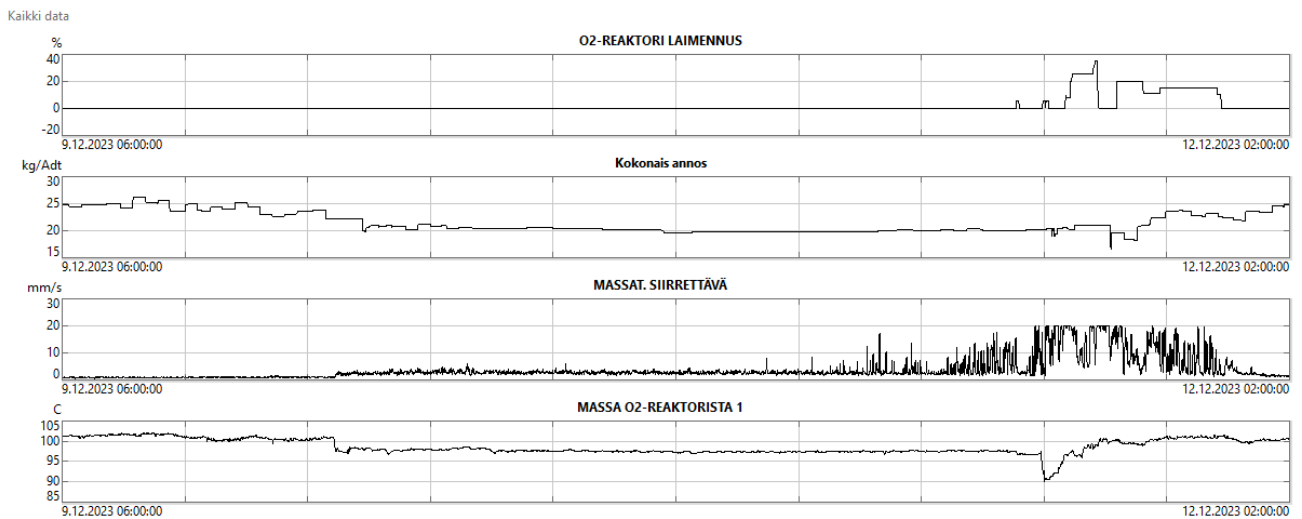
Tässä koeajossa tehtiin täysin päinvastoin, kuin mikä oli oletus värähtelyn pienenemiselle. Koeajoon päädyttiin havainnosta, missä putkessa mitattiin vähemmän värähtelemistä keskellä havujaksoa, kun reaktoriin ajettiin 100 % hapesta. Tuolloin värähteleminen happivaiheessa oli terveellisellä ja erittäin matalalla tasolla jo valmiiksi, mutta happea lisättäessä ne laskivat alemmaksi.

Koeajossa hapesta syötettiin 80 % ensimmäiseen reaktoriin, kasvattaen absoluuttista kaasun määrää reaktorissa. Tämä oli kannattava koeajo, kuten kuvioista voidaan huomata. Värähtelymittaukset olivat matalimmat koskaan koivujaksolla kyseisellä hapensyöttösuhteella, mikä oli yllättävää.

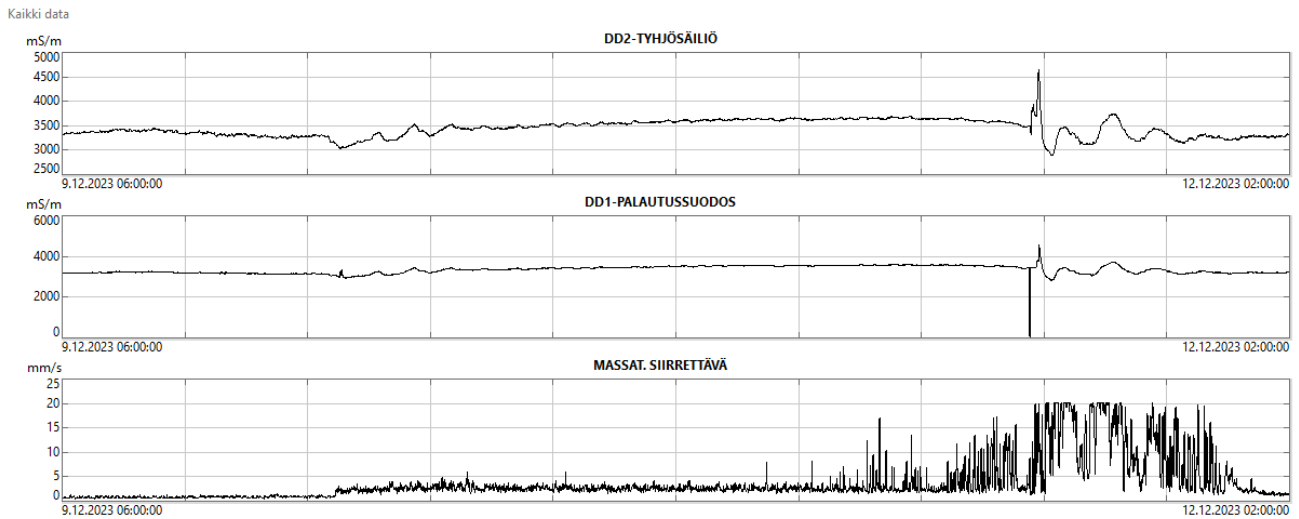
Data löytyy kuvioista 8.9-8.12



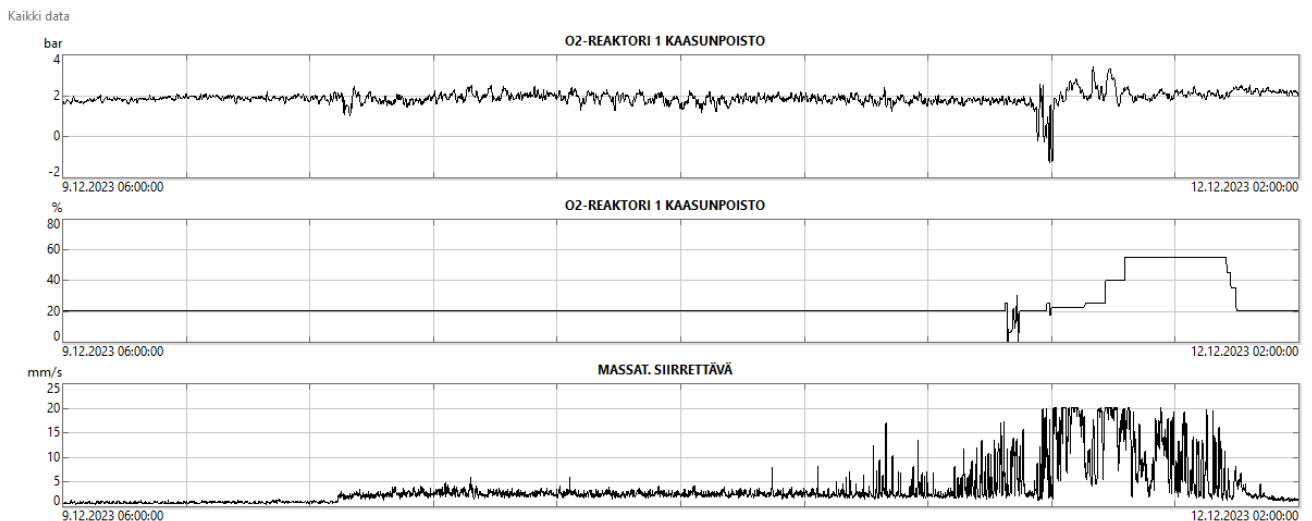
Kuvio 8.9 80/20 koeajo



Kuvio 8.10 80/20 koeajo



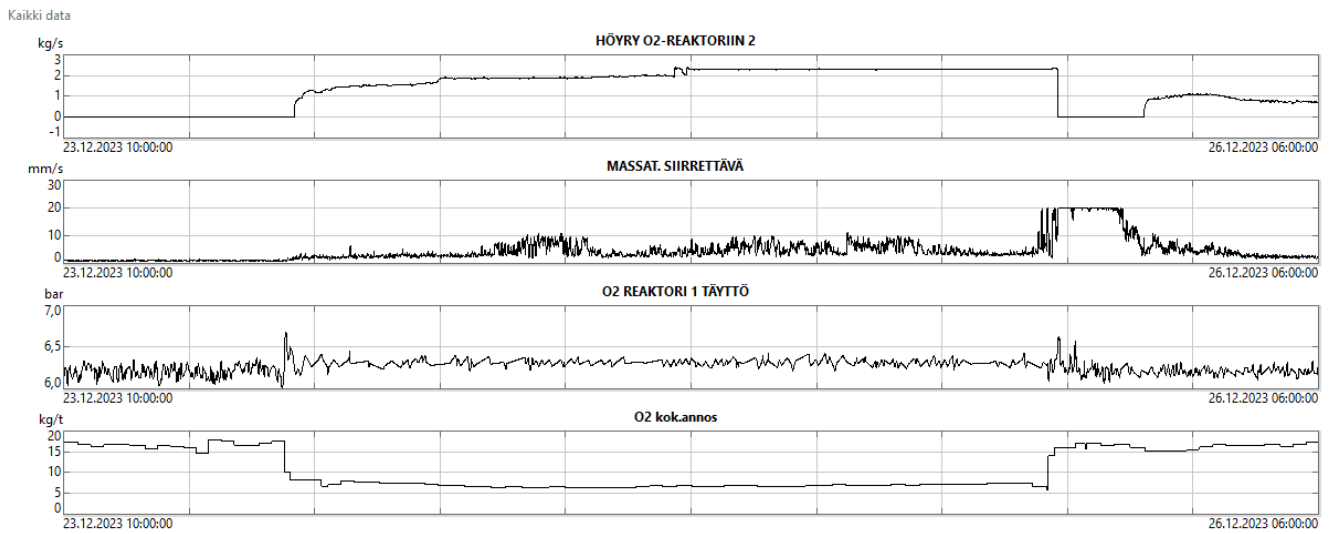
Kuvio 8.11 80/20 koeajo



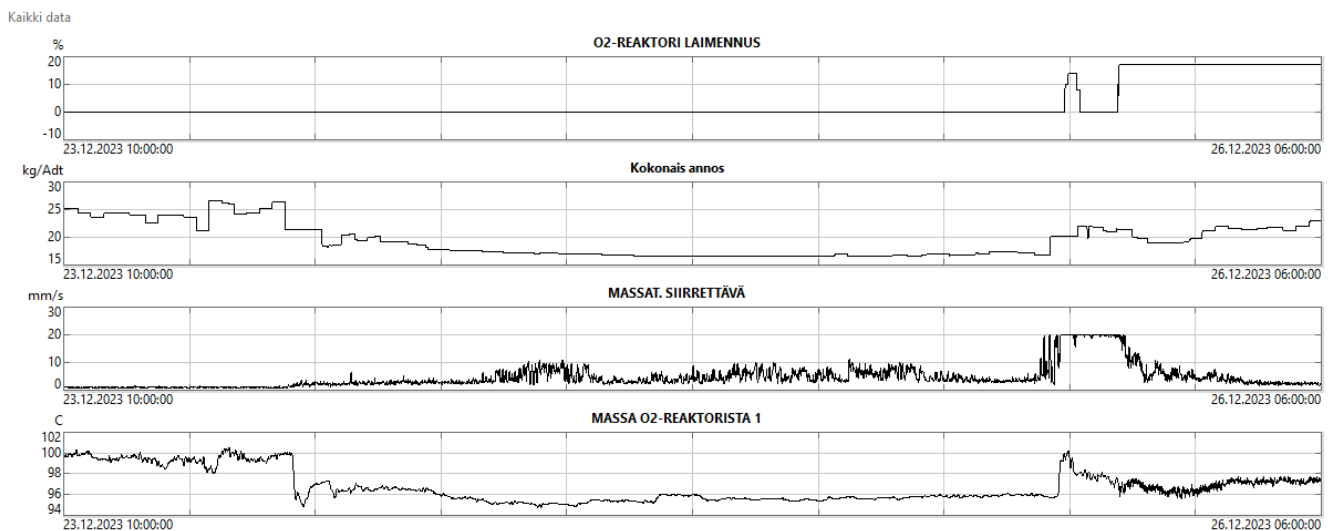
Kuvio 8.12 80/20 koeajo

Kuvioista havaitaan värähtelemisen tasaisuus kahdeksanteen sektoriin saakka, missä on tapahtunut massavirtauksessa jokin merkittävä muutos, aiheuttaen useiden eri parametrien heittämissä ylös tai alas. Hapetta ajettiin 80/20 syöttösuhteella koko koivujakson, sekä sitä jatkettiin havulla uutena tavallisesti käytettynä syöttösuhteena. Tämä oli niin merkittävä löytö, että koeajo suoritettiin.

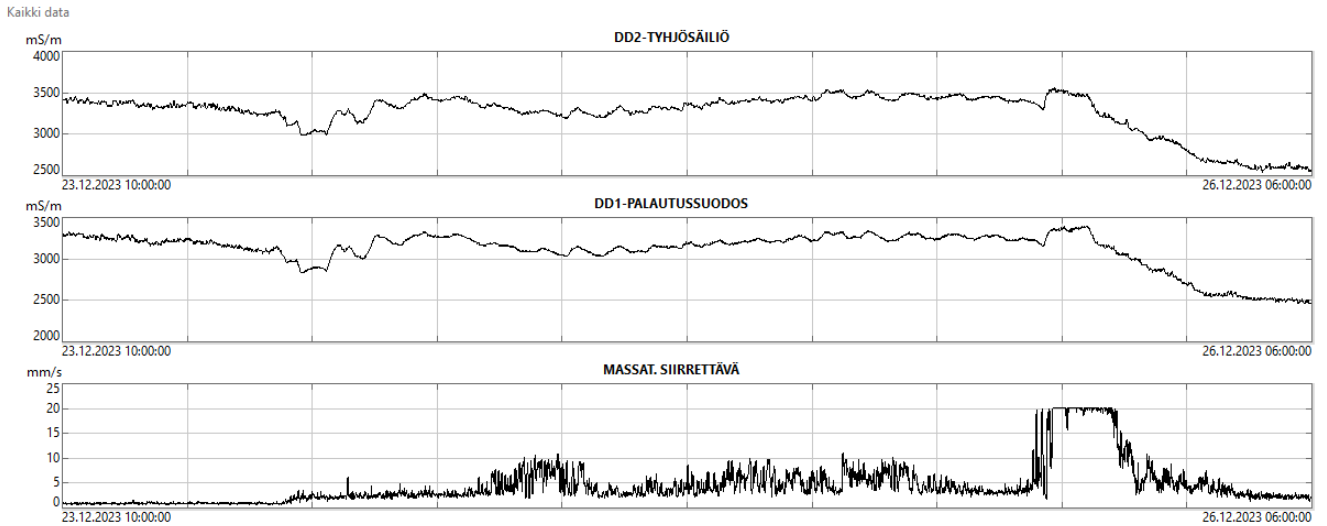
tiin myöhemmin uudelleen, jotta korrelaatiosta voitaisiin olla varmempia. Toisen koeajon data löytyy kuvioista 8.13–8.16.



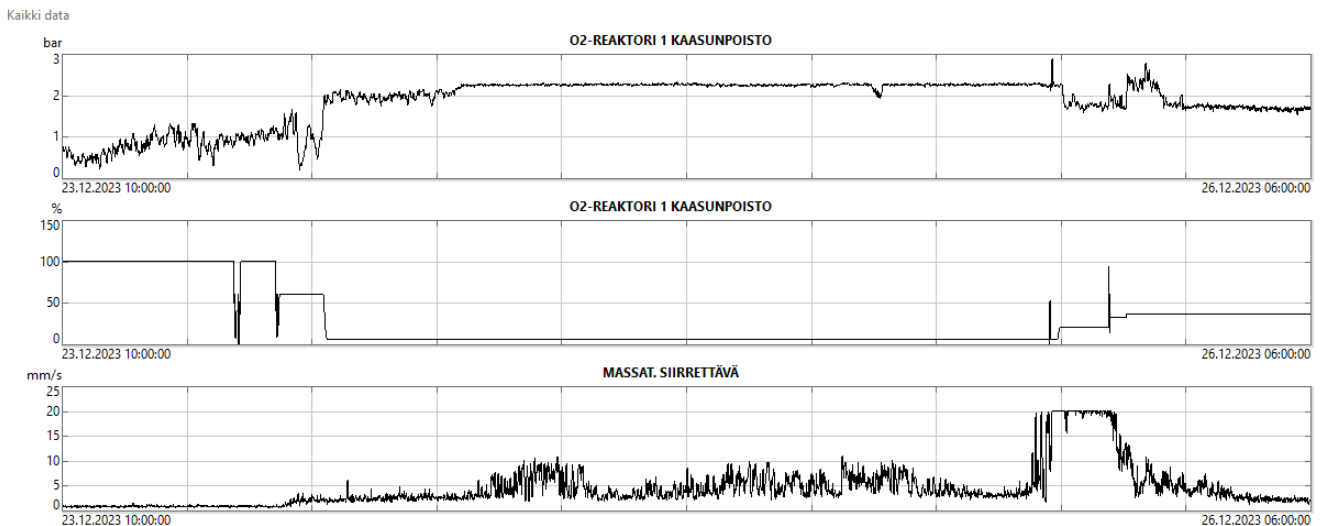
Kuvio 8.13 Toinen 80/20 koeajo



Kuvio 8.14 Toinen 80/20 koeajo



Kuvio 8.15 Toinen 80/20 koeajo

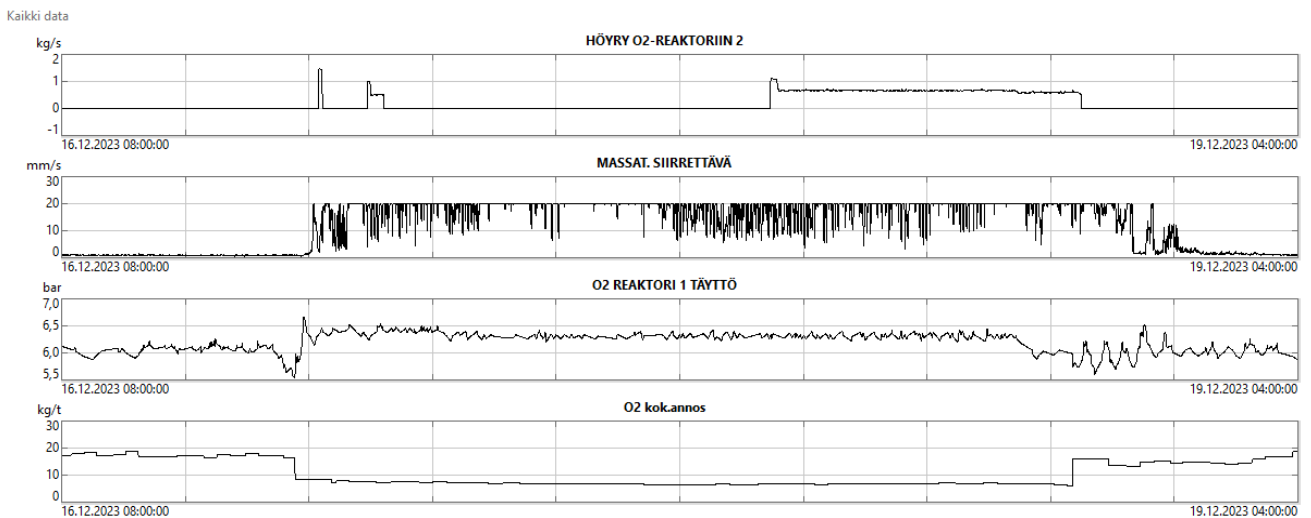


Kuvio 8.16 Toinen 80/20 koeajo

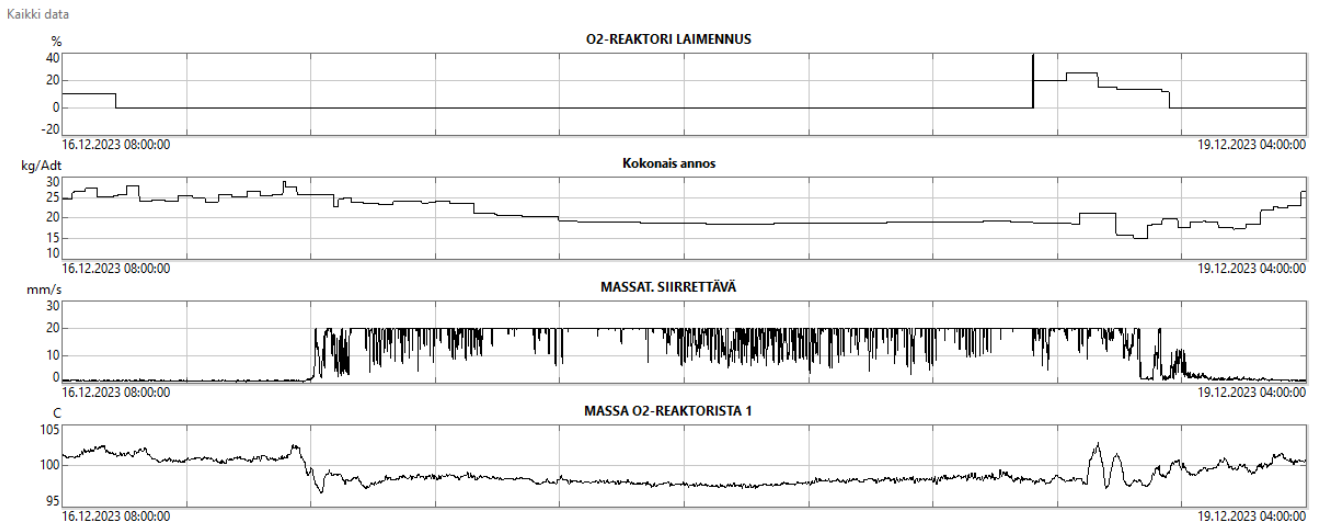
Toisessa 80/20 koeajossa värähtelymittaukset olivat lievästi korkeammat kuin ensimmäisessä, mutta ne olivat silti alhaiset kokonaiskuvassa, sillä mittaukset olivat enintään noin 10 mm/s. Tuloksissa on kuitenkin otettava huomioon se, että kaasunpoistiventtiili on ollut huomattavasti pienemmällä avauskulmalla, mikä on voinut vaikuttaa värähtelemiseen.

8.1.4 Syöttösuhde 100/0

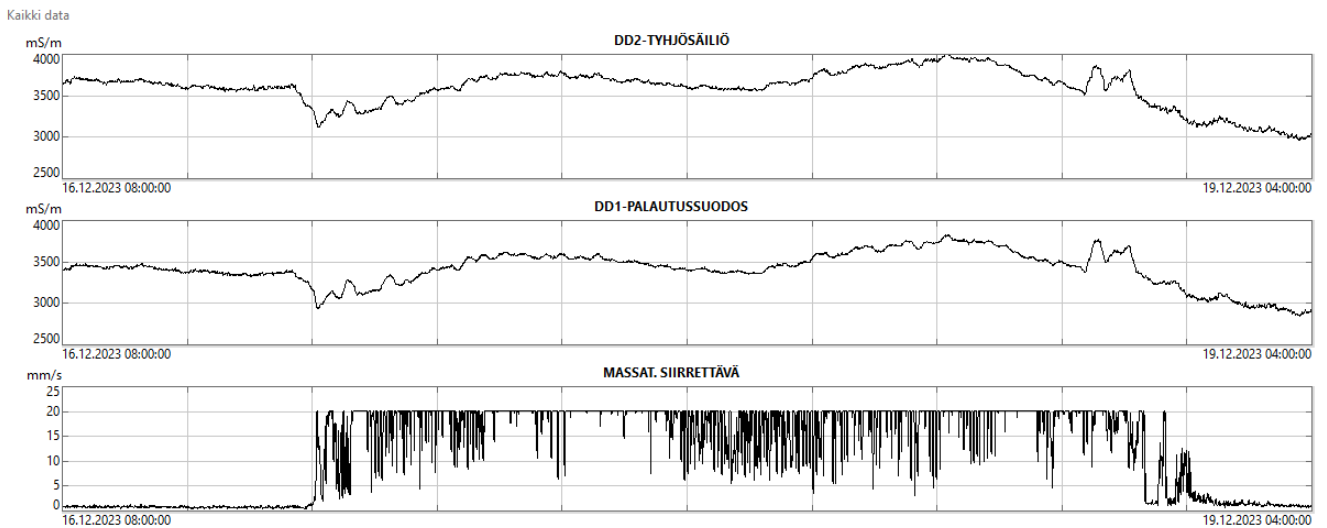
Viimeisessä hapen syöttösuhteen koeajossa ajettiin kaikki happivaiheessa käytettävä happi ensimmäiseen reaktoriin. Tässä tapahtui erittäin mielenkiintoinen ja odottamaton asia. Värähtelymittaukset ovat suurimmat mitä ne ovat koskaan olleet, mutta jos putkea seurasi paikan päällä, oli värähtely kuitenkin terveellisen näköistä. Tavallisesti värähteleminen on erittäin voimakasta ja isoliikkeistä, mutta tämän koeajon aikaan tehtaalla huomattiin värähtelyn olevan nopeampaa ja pieniliikkeisempää. Tämä vaikutti normaalilta prosessivärähtelyltä, vaikka mittaukset näyttävät, että tulokset olisivat huonoimmat tähän mennessä. Data löytyy kuvioista 8.17–8.20.



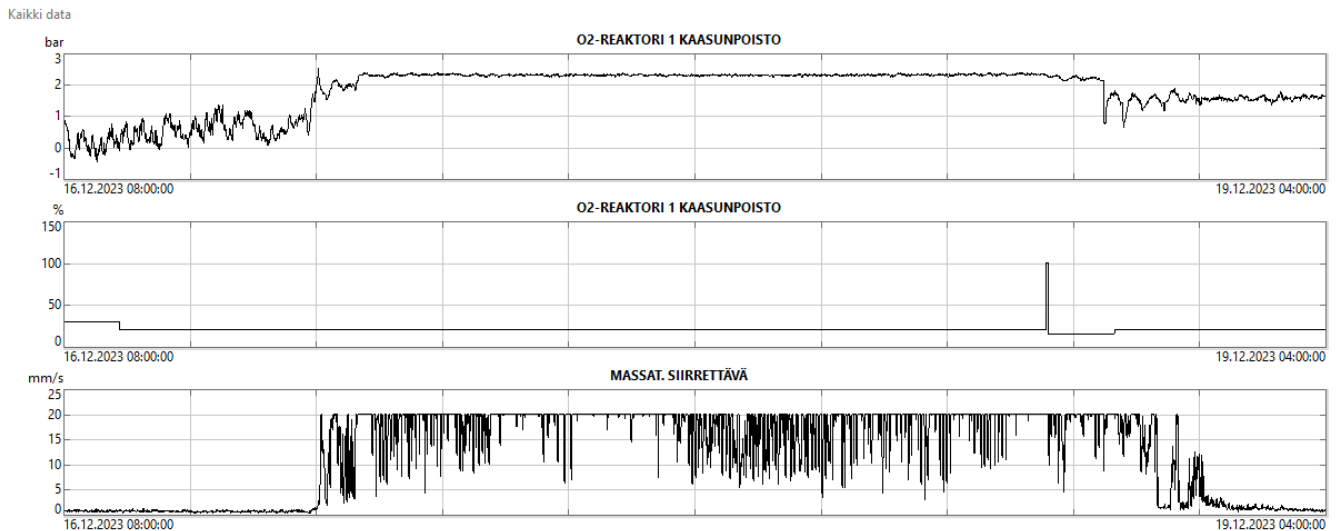
Kuvio 8.17 100/0 koeajo



Kuvio 8.18 100/0 koeajo



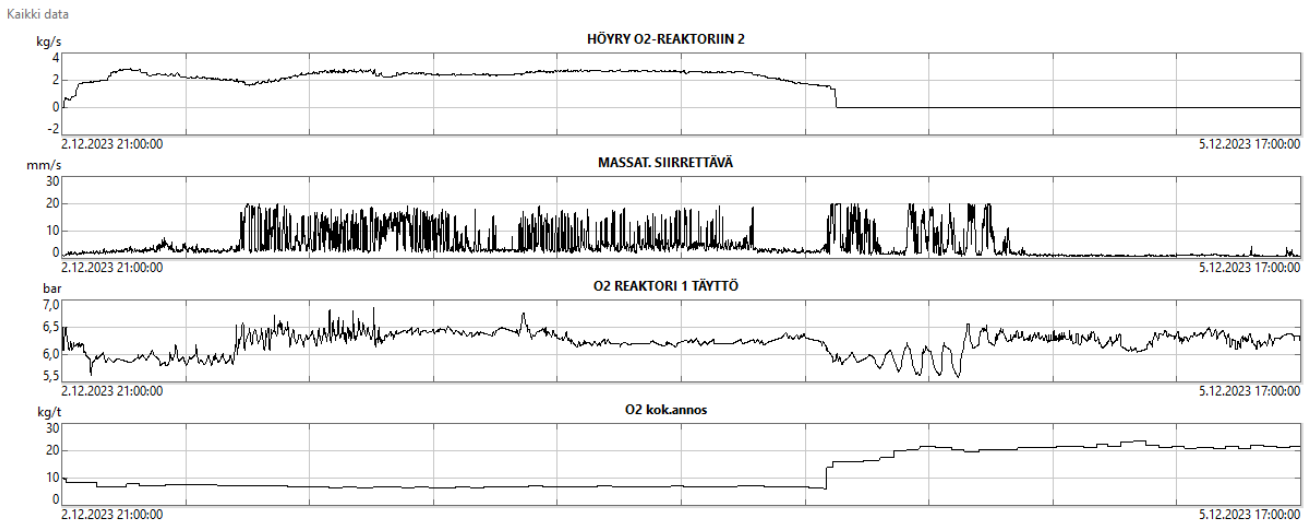
Kuvio 8.19 100/0 koeajo



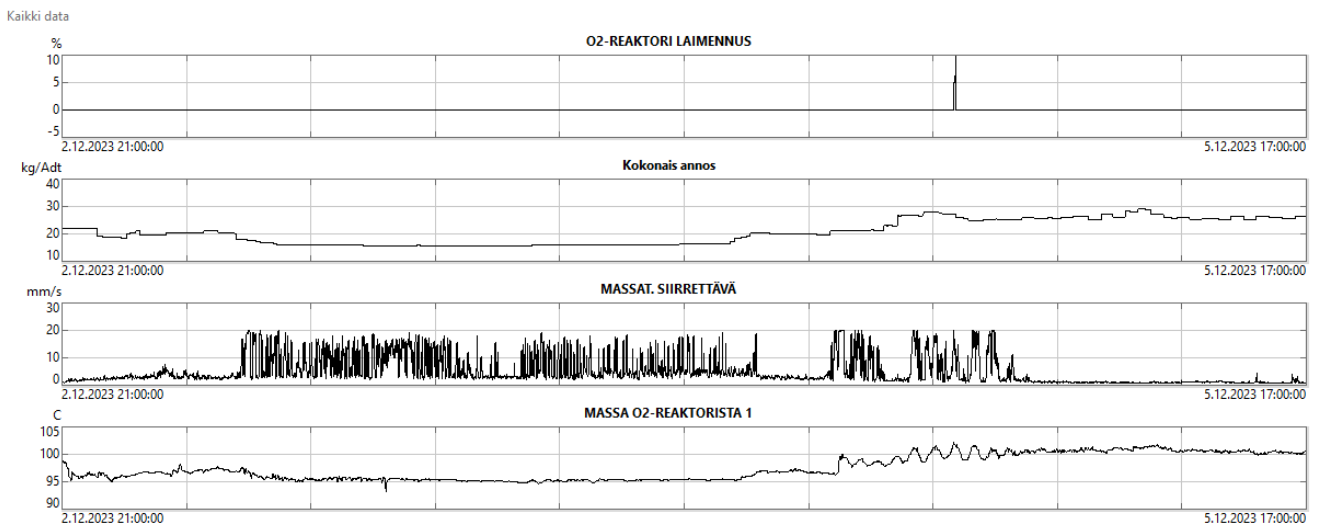
Kuvio 8.20 100/0 koeajo

8.2 Paineen muutoksen koeajot

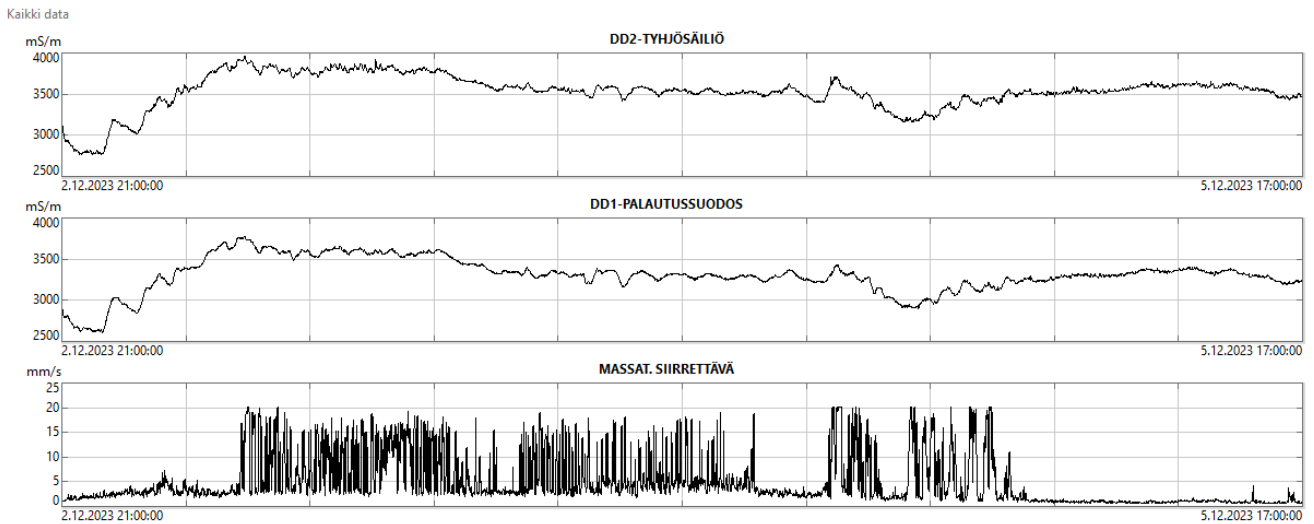
Tässä koeajossa pyrittiin havainnoimaan paineen vaikutus värähtelemiseen. Koeajo aloitettiin pienellä paineella, ja sitä nostettiin toisen sektorin puolen välin kohdalla. Ja kuten kuviosta 8.21 voidaan huomata, että vakava värähteleminen alkoi silloin. Samassa pisteessä muutettiin hapensyötösuhdetta, mutta hapen määrä lähti hitaaseen laskuun, joten äkillinen voimakkaan värähtelyn alku ei todennäköisesti ole johtunut siitä.



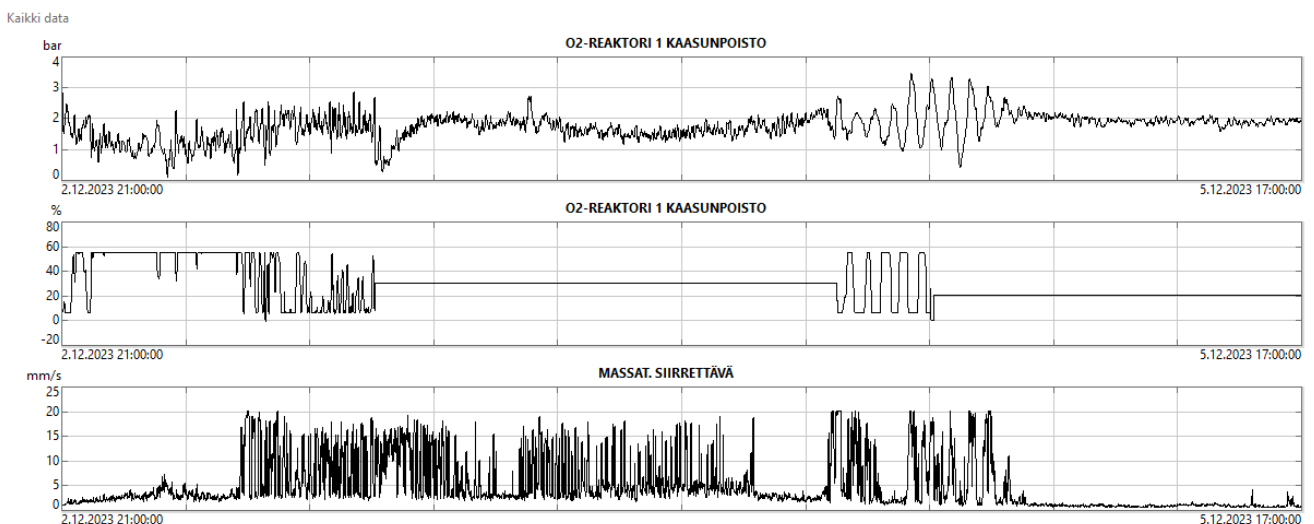
Kuvio 8.21 Paineen muutos koeajo



Kuvio 8.22 Paineen muutos koeajo



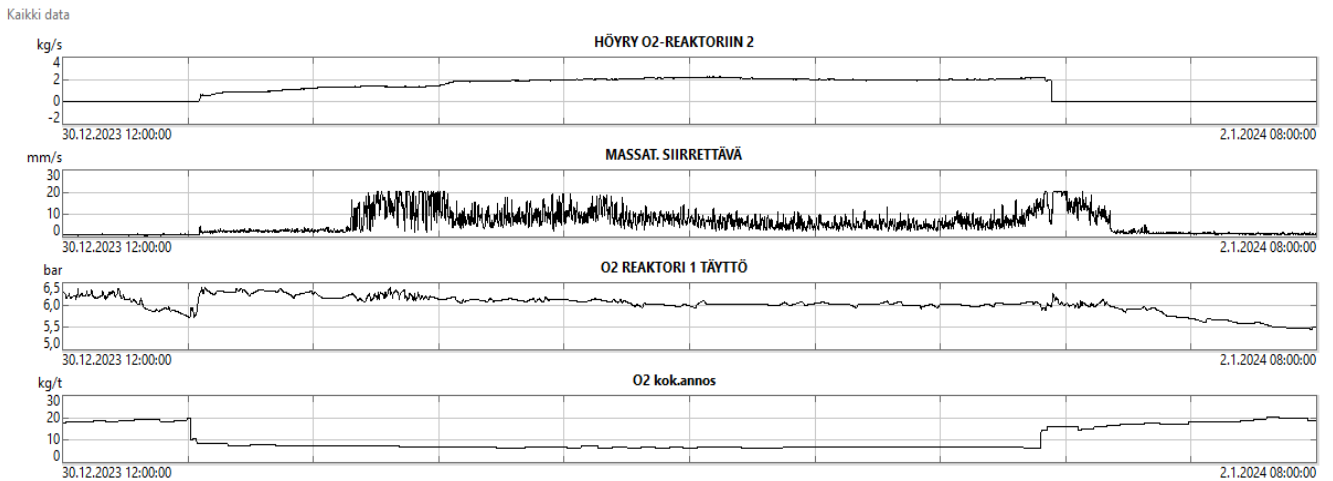
Kuvio 8.23 Paineen muutos koeajo



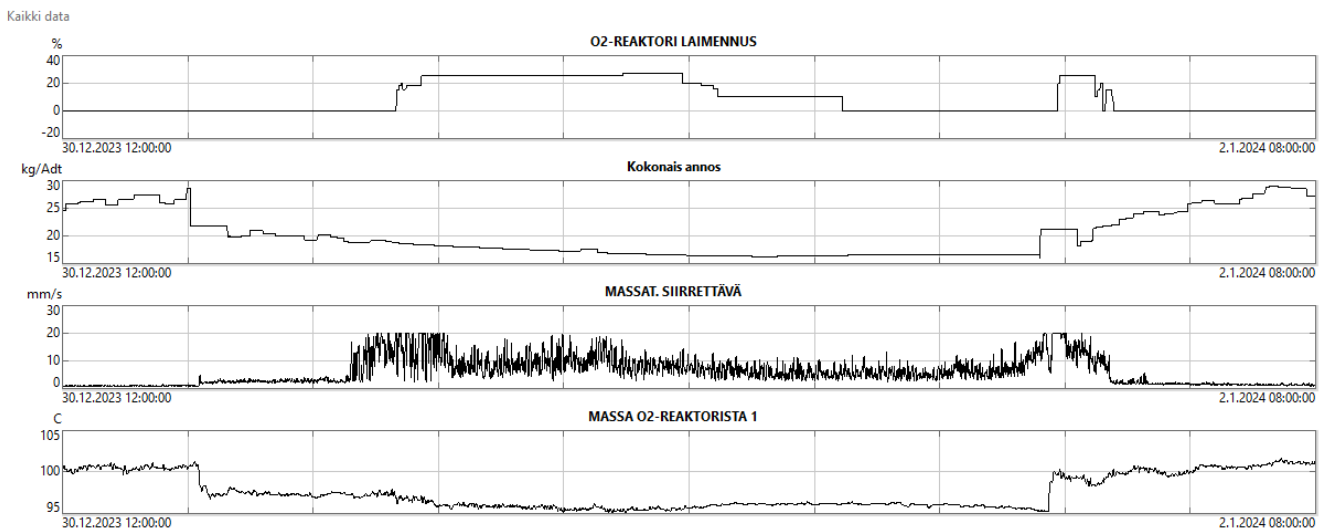
Kuvio 8.24 Paineen muutos koeajo

Paineen vaihdoksissa tapahtui suurta heittelyä, eikä koeajon alkuperäinen suunnitelma onnistunut prosessin tilanteen takia. Tämän vuoksi koeajo tehtiin uudelleen. Huomattavaa toisessa koeajossa on se, että hapen syöttösuhde oli jo tässä vaiheessa normalisoitu 80/20 suhteeksi. Toisessa koeajossa aloitettiin isommalla syöttöpaineella, ja sitä laskettiin koivujakson edetessä. Tällä tavoin paine pysyi tasaisempana, eikä siinä ollut samanlaisia heittelyitä kuin ensimmäisessä paineen muutoksen koeajossa. Värähtelymittaukset alkoivat isoina, mutta pienenevät sitä mukaan, kun painetta

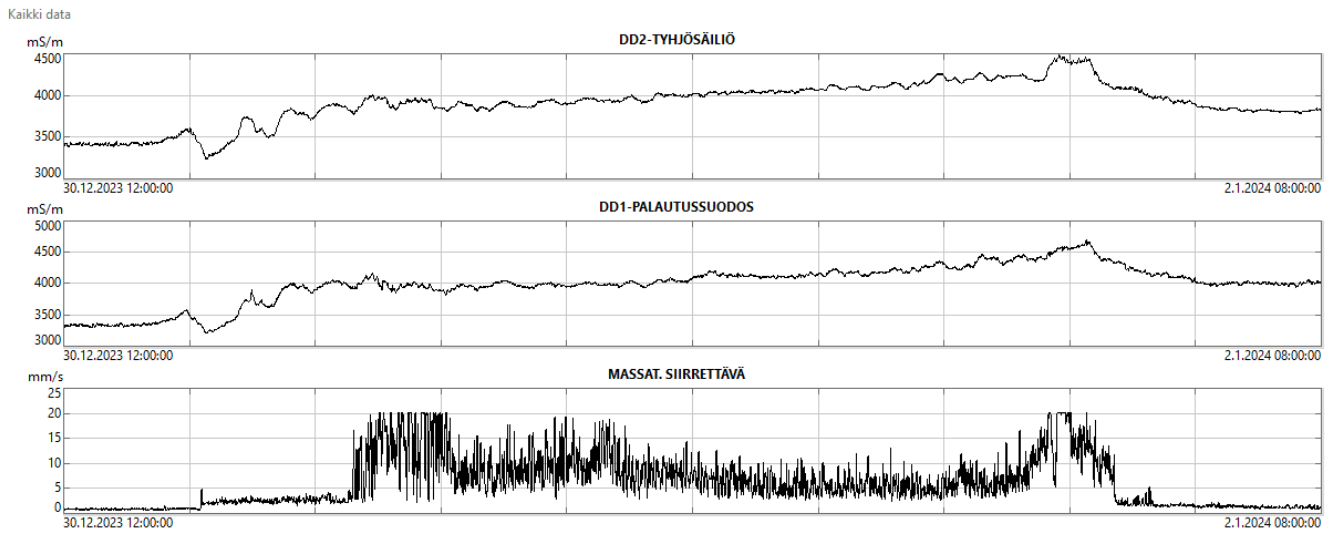
laskettiin. Vakava värähtely alkoi kolmannessa sektorissa ilman selvää selitystä, tämä saattoi joh-
tua massan laadussa tapahtuneesta muutoksesta, tai kaasunpoistiventtiin mahdollisesta tukkoi-
suudesta. Massan syöttöpaineessa on huomattavissa pientä heittelyä kolmannessa sektorissa,
mikä osoittaisi massavirtauksen vaihtelua. Värähtelemisen alkamista ei voi kuitenkaan luotetta-
vasti liittää mihinkään yksittäiseen tekijään. Ensimmäisen koeajon data löytyy kuvioista 8.21–8.24,
ja toisen koeajon data löytyy kuvioista 8.25–8.28



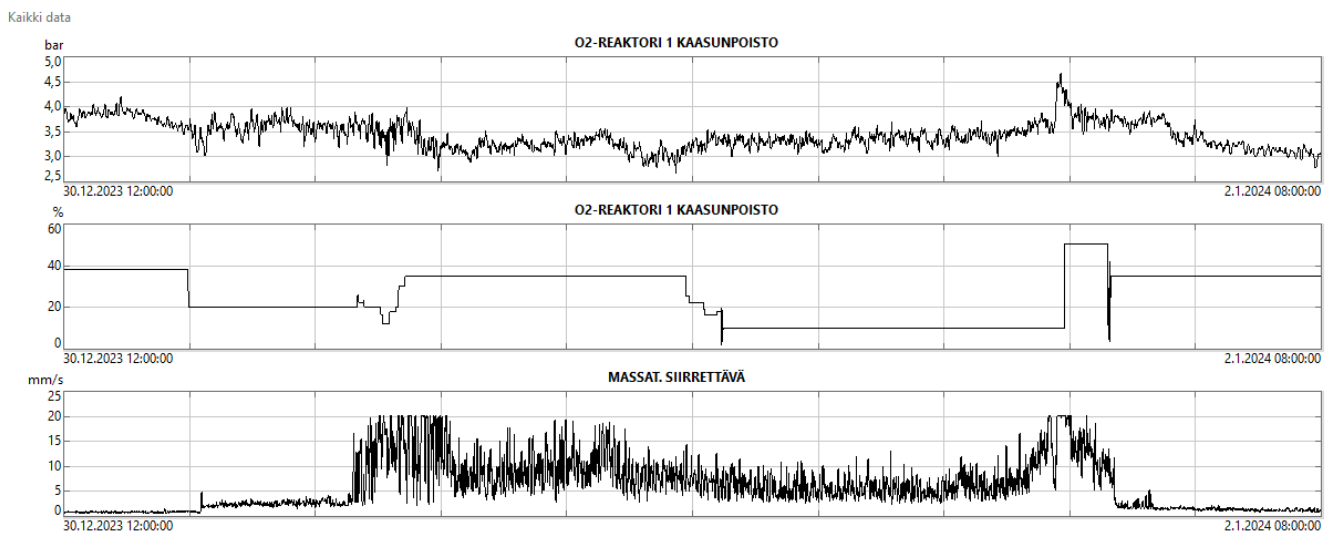
Kuvio 8.25 Toinen paineen muutos koeajo



Kuvio 8.26 Toinen paineen muutos koeajo



Kuvio 8.27 Toinen paineen muutos koeajo

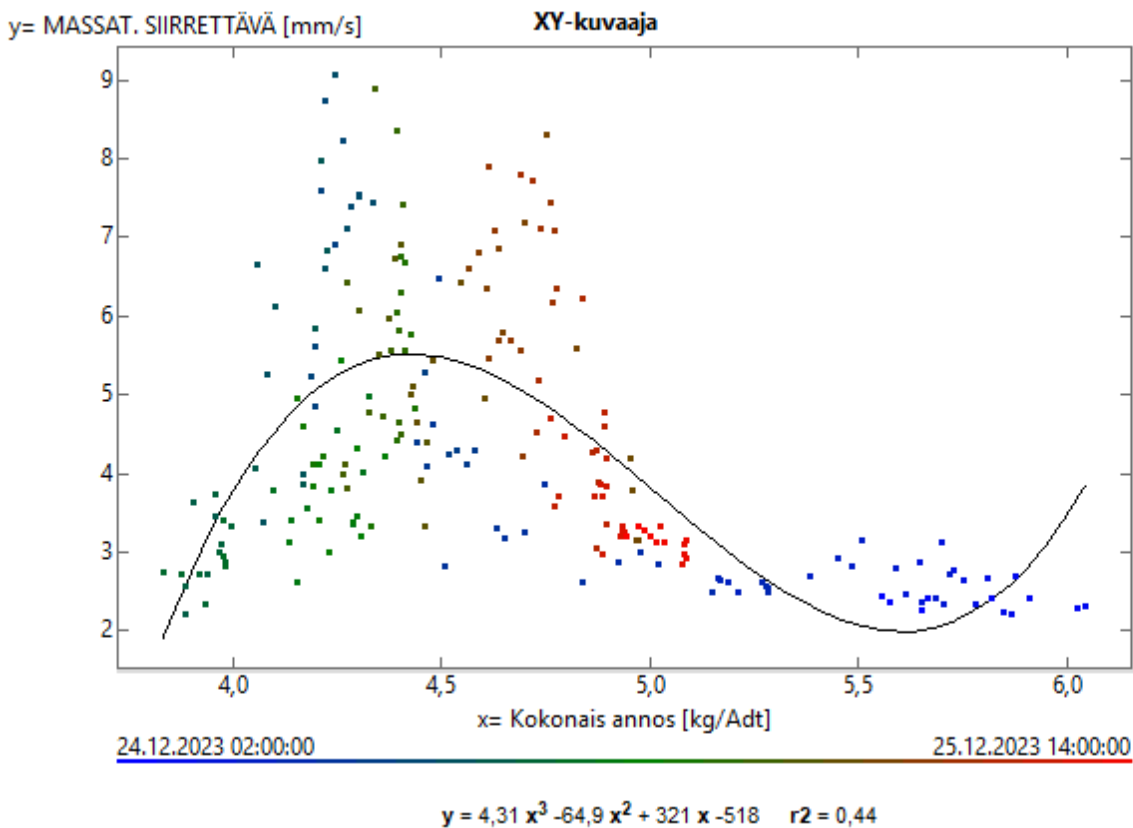


Kuvio 8.28 Toinen paineen muutos koeajo

9 Tulokset ja ratkaisukeino

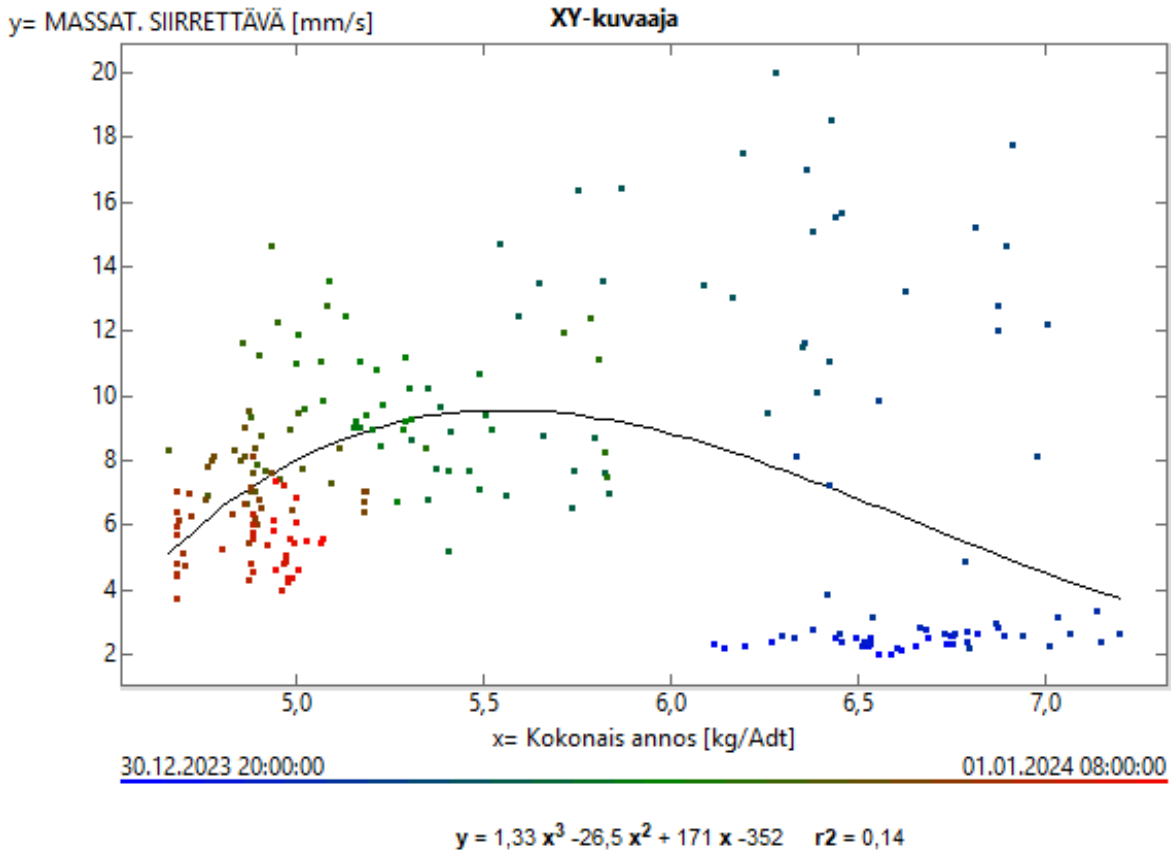
Koeajojen tulosten perusteella on selvää, että hapen määrällä on suurin yksittäinen vaikutus värähtelemisen suuruuteen. Värähteleminen vähenee tai muuttaa muotoaan ääripäitä hapensyötössä lähestyttäessä. Tulosten perusteella koivujaksoilla happea voitaisiin syöttää tavallista enemmän, ja havujaksojen alussa varsinkin voitaisiin syöttää happea vähemmän. Kuvioissa 9.1 ja 9.2 on esitetty hapen syötön korrelaatiota värähtelemisen kanssa. Kaikkien kuvioiden alareunassa on merkintä r^2 , mikä tarkoittaa kuvion parametrien korreloitumista prosentteina. Kuvio 9.1 on toisen 80/20 koeajon ajalta ja kuvio 9.2 on toisen painekoeajon ajalta. Molemmissa kuvissa huomataan pienemmän happimäärän aiheuttavan suurempaa värähtelemistä. Kuviossa 9.2 tämä ei ole niin selvää, mutta lievä korrelaatio löytyy siitäkin.

24.12.2023 02:00:00 - 25.12.2023 14:00:00, Kaikki data



Kuvio 9.1 Hapen ja värähtelyn korrelaatio

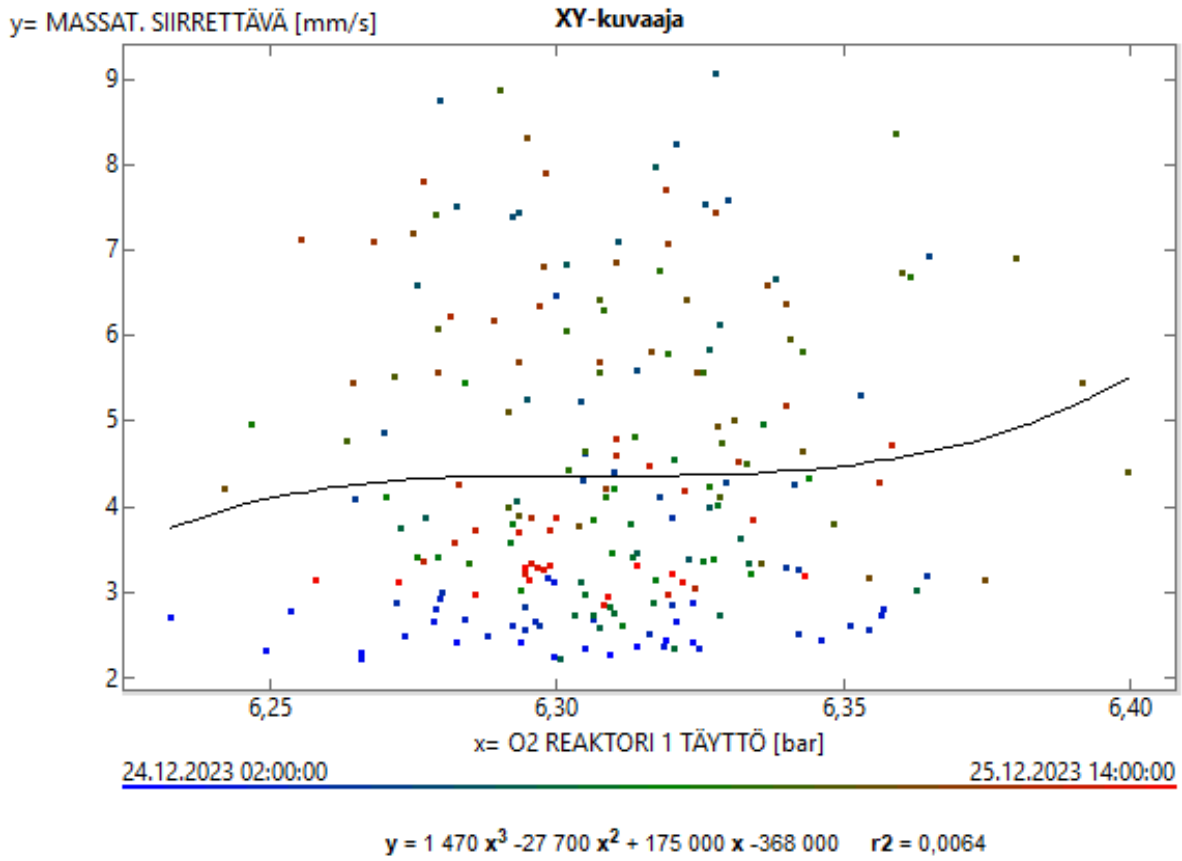
30.12.2023 20:00:00 - 1.1.2024 08:00:00, Kaikki data



Kuvio 9.2 Hapen ja värähtelyn korrelaatio

Paineen heittäminen vaikuttaisi myös olevan merkittävä tekijä värähtelemisessä. Kuviossa 9.3 ja kuviossa 9.4 nähdään paineen ja värähtelyn korrelaatio samoilta aikajaksoilta kuin happiannoksenkin kohdalla. Korrelaatio ei ole yhtä vahva kuin happiannoksen kanssa, mutta koeajoista voidaan päätellä, että tasainen syöttöpaine pienentää todennäköisyyttä värähtelypiikeille, paineen suuruudella ei ole niin suurta merkitystä, kunhan se ei mene erittäin alas tai ylös. Kuviossa 9.3 korrelaatiota on vaikea havaita, sillä paine ja värähtely pysyivät aika tasaisina, kuten voidaan huomata tarkemmista x ja y-akseleista.

24.12.2023 02:00:00 - 25.12.2023 14:00:00, Kaikki data

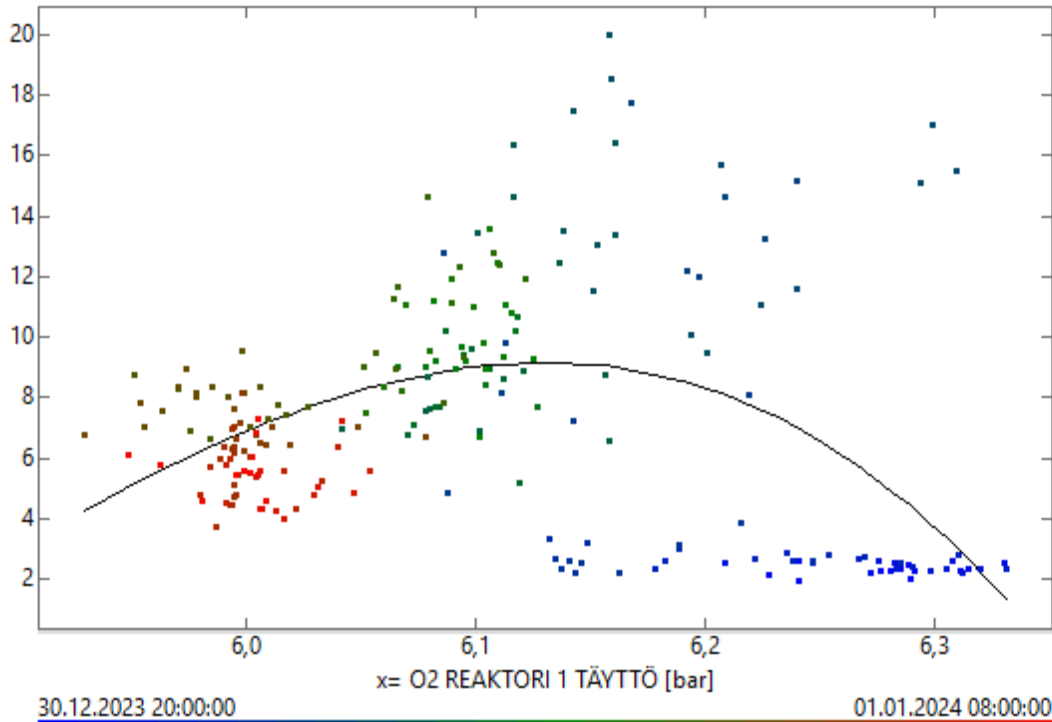


Kuvio 9.3 Syöttöpaineen ja värähtelyn korrelaatio

30.12.2023 20:00:00 - 1.1.2024 08:00:00, Kaikki data

y= MASSAT. SIIRRETTÄVÄ [mm/s]

XY-kuvaaja



$$y = -176 x^3 + 3\,070 x^2 - 17\,900 x + 34\,500 \quad r^2 = 0,2$$

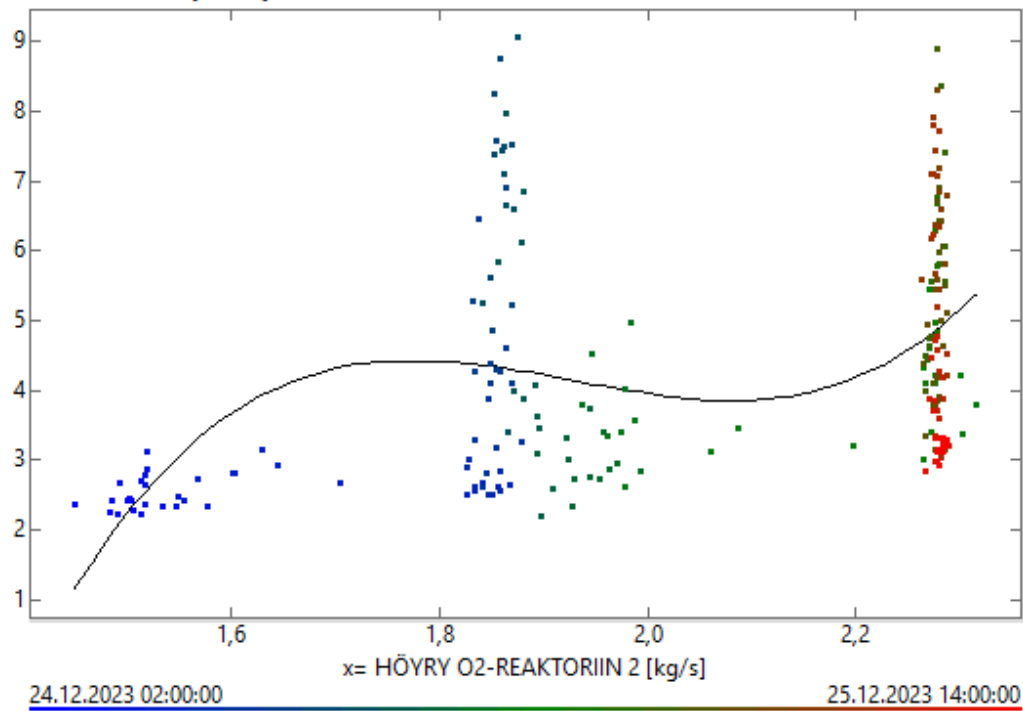
Kuvio 9.4 Syöttöpaineen ja värähtelyn korrelaatio

Vp-höyry on myös muita selvempi osatekijä värähtelemisessä. Vaikutus on helpommin huomattavissa hetkinä, joina vp-höyry sammutetaan. Vp-höyryn käyttämiseltä ei kuitenkaan voida välttyä sen kriittisyyden takia massan lämmittämisessä optimaaliseen reaktiolämpötilaan. Kuviosta 9.5 ja kuviosta 9.6 nähdään höyryn syötön määrän korrelaatio värähtelemisen kanssa. Näistä voidaan huomata värähtelymittausten matalimman pisteen nousu, höyryn määrän nousun yhteydessä.

24.12.2023 02:00:00 - 25.12.2023 14:00:00, Kaikki data

y= MASSAT. SIIRRETTÄVÄ [mm/s]

XY-kuvaaja



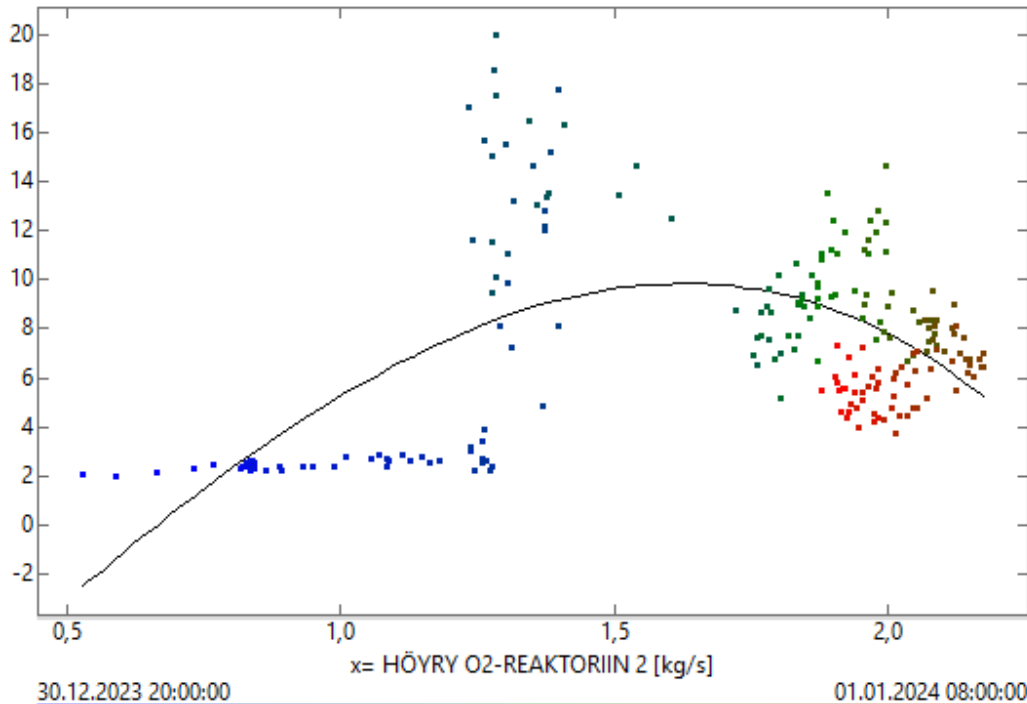
$$y = 39,6 x^3 - 229 x^2 + 438 x - 274 \quad r^2 = 0,19$$

Kuvio 9.5 Vp-höyryn ja värähtelyn korrelaatio

30.12.2023 20:00:00 - 1.1.2024 08:00:00, Kaikki data

y= MASSAT. SIIRRETTÄVÄ [mm/s]

XY-kuvaaja



30.12.2023 20:00:00

01.01.2024 08:00:00

$$y = -3,12 x^3 + 1,56 x^2 + 19,7 x - 13 \quad r^2 = 0,29$$

Kuvio 9.6 Vp-höyryn ja värähtelyn korrelaatio

Huipun laimennusventtiilin avauskulmalla näyttäisi olevan myös lievää korrelaatiota värähtelemisen kanssa. Muuttujina olleet lämpötila, alkaliannos sekä palautussuodosten johtokyky molemmilta keittimen jälkeisiltä pesureilta eivät vaikuttaneet datan mukaan värähtelemiseen. Kaasunpoiston paine-erolla ei vaikuttanut olevan suoraa korrelaatiota värähtelemisen kanssa, mutta venttiilin avauskulmaa ei voida kokonaan sivuuttaa mahdollisena tekijänä.

Jotta tehdas pääsisi värähtelystä kokonaan eroon kannattaisi tehdä seuraavat toimenpiteet. Ensimmäisenä on ehdottoman tärkeää tarkastaa kannakoinnin kunto linjastossa, ja tehdä tarvittavat korjaustyöt jo valmiiksi vahingoittuneisiin kannakkeisiin. Seuraavaksi olisi järkevää tehdä rasitusanalyysi linjastoon, mistä selviäisi ne pisteet putkistossa, jotka rasittuvat kaikista eniten. Tämä olisi hyödyllistä sen kannalta, että saataisiin tietoon mitkä ovat ne pisteet, jotka todennäköisimmin aloittavat vakavan värähtelemisen, sekä mitkä pisteet pettävät ensimmäisinä ylikuormituksessa. Näihin kohtiin voitaisiin asentaa uusia kannakointeja.

Parametreissä olisi myös edullista tehdä hieman muutoksia. Tuloksien perusteella koivujaksoja olisi järkevämpää ajaa painottaen hapensyöttöä enemmän ensimmäiseen reaktoriin. Kun taas havulle vaihdettaessa olisi järkevää laskea hapensyöttöä hetkellisesti. Tämä voitaisiin rampittaa nousemaan hitaasti lajinvaihdon aikana.

10 Pohdinta

Opinnäytetyön aiheena oleva värähtelyn synnyn selvittäminen on monimutkainen aihe. Ei ole kukaan selvää vielääkään, mistä suuri värähtely johtuu, mutta tutkimuksessa on tehty selvää edistymistä. Prosessissa on lukuisia muuttujia ja muita vaihtuvia tekijöitä kuten massan laatu, jotka voisivat vaikuttaa värähtelemiseen, joten koeajojen tuloksia pitää tulkita kriittisesti. Tutkimusaiheena värähtelyongelma on erinomainen sen monipuolisuuden takia. Ongelmanratkenta ei ole liian suoraviivaista, mikä tekee siitä mielenkiintoisen. Johtopäätöksiä kuitenkin voidaan tehdä koeajoista saadun datan perusteella.

Kaikista suurin värähtelemiseen vaikuttava muuttuja on hapen määrä. Tämä ei ole kuitenkaan suoraviivaista, sillä pienillä hapen määrillä havaittiin lievää laskua värähtelyssä, varsinkin lajinvaihdossa koivulta havulle. Toisaalta suuret hapen määrät lievensivät värähtelemistä koivujaksolla, mutta kuten koeajojen kuvioista voidaan huomata, lajinvaihto takaisin havulle aiheutti korkeita värähtelymittauksia isommilla happiannoksilla.

Paine oli toinen merkittävä tekijä värähtelyssä. Tämäkään ei kuitenkaan ole suoraviivaista, sillä syöttöpaine saattoi olla 6,0 bar tai 6,3 bar ilman mitään eroa värähtelemisessä, mutta paineen muutokset saivat aikaan värähtelemistä. Tämä ajaa johtopäätökseen, että prosessin muutokset ovat osasyä värähtelyn syntyyn. Se ei kuitenkaan selitä värähtelemisen jatkumista muutoksen jälkeenkin. Värähtelymittaukset harvoin ovat pieniä piikkejä, mikä tuo johtopäätöksen, että värähtely voi ruokkia itseään. Eli värähtely aiheuttaa lisää värähtelyä. Tämä myös selittäisi miksi värähteleminen loppuu monesti todella nopeasti, sillä jos värähtelyn aiheuttaa lisää värähtelyä, ja se poistetaan hetkeksi, häviää värähtelyn aiheuttajakin. Värähteleminen voi poistua hetkeksi, jos virtaus muuttuu tasaisemmaksi.

Muita havaintoja olivat huipun laimennusventtiilin merkitys sekä vp-höyryn määrä. Huipun laimennus todennäköisesti auttaa massavirtausta tasaantumaan, mikä lievittäisi värähtelemistä. Vp-höyry puolestaan nosti matalimpien värähtelymittausten suuruutta. Tämä voi yksinkertaisesti johtua siitä, että vp-höyry tulee niin suuressa paineessa linjastoon, että se aiheuttaa värähtelemistä, minkä vuoksi suurempi määrä nostaa värähtelymittausten matalimpia kohtia.

Massan laatu voi olla myös merkittävä tekijä värähtelemisessä. Koivun lyhyemmän kuidun ansiosta massavirtaus saattaa käyttäytyä eri tavalla. Lyhyempi kuidunpituus voi aiheuttaa myös nopeampaa kaasunpoistoventtiilin tukkeutumista. Happireaktorissa tapahtuvia reaktioita varten tulee myös syöttää oikea määrä happea ja alkalia. Jos happea on liikaa, voi sitä jäädä yli reaktorista, mikä saattaa aiheuttaa epätasaisuutta massavirrassa.

Koeajot onnistuivat vaihtelevalla menestyksellä. Kaikki ei mennyt niin kuin piti, esimerkiksi painetta ei saatu nostettua tarpeeksi koivulla ensimmäisessä painekoeajossa, sekä hapessa tehtiin parametrimuutoksia samalla kun painetta nostettiin. Samaan aikaan koeajoista saatiin paljon irti, ja onnistumisiakin tuli. Esimerkiksi hapen syötön kasvattamisella vähennettiin koivujaksojen värähtelymittauksia. Onnistumisia tuli myös uusista värähtelyn aiheuttajien löydöistä, joita olivat vp-höyry sekä huipun laimennus. Myös mittaukset, jotka eivät tuottaneet tulosta värähtelemiseen nähden eli palautussuodokset sekä lämpötila, olivat tärkeitä tutkimuksen kannalta, sillä ne voidaan nyt poissulkea ongelman aiheuttajista. Kyseisillä mittauksilla ei tehty erillisiä koeajoja, vaan niiden luonnollista vaihtelua seurattiin muiden koeajojen aikana. Näiden lisäksi värähteleminen muutti muotoaan koivujaksolla, kun kaikki happi ajettiin ensimmäiseen reaktoriin, mikä oli erittäin mielenkiintoinen löytö. Henkilökohtaisia onnistumisia opinnäytetyössä tuli myös. Opinnäytetyö auttoi oppimaan uusien sovellusten käyttöä, sekä se opetti, miten rakennetaan koeajosuunnitelmia tehdasympäristössä, ja mitä kaikkea tuollaisissa tulee ottaa huomioon.

Aihe vaatii vielä lisää tutkimusta, mutta ongelman ratkaisussa on päästy jo pitkälle. Suosituksena olisi tutkia lisää 100/0 hapensyöttö suhteen ajamista, sekä testata erilaisten hapensyöttösuhteiden vaikutusta lajinvaihdossa lisää. Näiden lisäksi kannakoinnin tarkistaminen, sekä rasisusanalyysin tekeminen olisi suotavaa, jotta putkiston heikoimmat kohdat saataisiin vahvistettua.

Lähteet

Acoustic induced vibration AIV analysis. N.d. Artikkele. Wood. Tietoa värähtelystä palvelun mainostuksen yhteydessä. Viitattu 15.11.2023 <https://www.betamachinery.com/services/acoustic-induced-vibration-aiv-analysis>

Ahmed S. 2015. Oxygen delignification process. Blogi. Wordpress. Viitattu 8.11.2023 <http://www.pulppapermill.com/oxygen-delignification-process/>

Almasi A. 07/2020. Informatiivinen artikkeli. Process instrumentation. Viitattu 15.11.2023 <https://www.piprocessinstrumentation.com/piping-tubing-hosing/article/21141872/flowinduced-vibration-in-piping-systems>

Bhandari P. 07/2021. Correlational research when & how to use it. Tieteisartikkeli. Scribbr. Viitattu 17.1.2024 <https://www.scribbr.com/methodology/correlational-research/>

Choudhury A K. 2006. Textile Preparation and Dyeing. Verkkokirja. Science Publishers. Viitattu 13.12.2023 [https://www.google.fi/books/edition/Textile Preparation and Dyeing/0TamObsaaPQC?hl=fi&gbpv=1](https://www.google.fi/books/edition/Textile_Preparation_and_Dyeing/0TamObsaaPQC?hl=fi&gbpv=1)

Flow induced vibration FIV analysis. N.d. Artikkele. Wood. Tietoa värähtelystä palvelun mainostuksen yhteydessä. Viitattu 15.11.2023 <https://www.betamachinery.com/services/flow-induced-vibration-fiv-analysis>

Harper C. 09/2016. AIV and FIV in pipelines, plants, and facilities. Analyysi. Wood. värähtelyanalyysi laitteistoon BETA:lle. Viitattu 15.11.2023. [https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/Technical Articles/AIV and FIV in Pipelines Plants and Facilities - IPC2016-64651.pdf](https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/Technical_Articles/AIV_and_FIV_in_Pipelines_Plants_and_Facilities_-_IPC2016-64651.pdf)

Hashmi S. 2020. Encyclopedia of renewable and sustainable materials. Pätkä ensyklopedia tekstiä verkkosivulta. Sciencedirect. Viitattu 13.12.2023 <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/hemicellulose>

Heiningen A. 2017. State of knowledge of oxygen delignification. Luentomateriaali University of Maine. Viitattu 14.12.2023 https://www.eucalyptus.com.br/artigos/ouros/3.4.Bleaching_Oxygen_delignification.pdf

Hynninen V. 2018. Selluloosa venyy moneksi. Blogi. Tekniikan edistämissektori. Viitattu 13.12.2023 <https://tekniikanedistamissektori.fi/selluloosa-venyy-moneksi/>

Ji Y. 2007. Kinetics and Mechanism of Oxigen Delignification. Väitöskirja. University of Maine. Viitattu 8.11.2023 <https://core.ac.uk/download/pdf/217046553.pdf>

Jõul P ja muut. 2022. Characterization of organosolv lignins and their application in the preparation of aerogels. Artikkel. MDPI. Viitattu 13.12.2023 <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/8/2861>

Kauppi A. 2021. Puuta käytetään yhä useammin ruokaan ja kosmetiikkaan – hemiselluloosalla on tutkijan mukaan valtavat mahdollisuudet. Artikkel. Forest.fi. Viitattu 13.12.2023 <https://forest.fi/fi/artikkeli/puuta-kaytetaan-yha-useammin-ruokaan-ja-kosmetiikkaa-hemiselluloosalla-on-tutkijan-mukaan-valtavat-mahdollisuudet/>

Knowpulp. N.d. Tietopankki. Sellunvalmistuksen tietopankki ja oppimisympäristö. Viitattu 14.01.2024 <https://www.knowpulp.com>

Kääriäinen P. 2016. Selluloosa – tulevaisuuden supermateriaali. Blogi. Biotalous.fi. Viitattu 13.12.2023 <https://www.biotalous.fi/selluloosa-tulevaisuuden-supermateriaali/>

Kühner M, Lang P. N.d. The Kappa number. Teknisen tiedon dokumentti. Klug Conservation. Viitattu 6.1.2024. https://www.klug-conservation.com/medien/Wissen/Wissens_Folder/wissen10_kappa_en.pdf

Ligniinin biosynteesi, rakenne ja ominaisuudet. N.d. Luentomateriaali. TKK. Viitattu 13.12.2023 <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L9.pdf>

Miles. N.d. Piping vibrations. Artikkel. DNV. Tiivistelmä värähtelyn aiheuttajista markkinointiartikkelin yhteydessä. Viitattu 15.11.2023 <https://www.dnv.com/services/piping-vibrations-110735>

Nurro M. 2021. Ligniini nousi sivuroolista parrasvaloihin. Artikkel. Metsä.fi-lehti. Viitattu 13.12.2023 <https://www.metsafi-lehti.fi/uusia-versoja/ligniini-nousi-sivuroolista-parrasvaloihin/>

Paakkari U, Björn L. N.d. Paperin kemiaa. Blogi. Blogspot. Viitattu 13.12.2023 <http://paperinkemia.blogspot.com/p/blog-page.html>

Piping vibration and integrity assessment. N.d. Artikkel. Wood. Tietoa värähtelystä palvelun mainostuksen yhteydessä. Viitattu 15.11.2023 <https://www.betamachinery.com/services/piping-vibration-and-integrity-assessment/>

Piping vibration integrity primer. N.d. Informatiivinen dokumentti. Wood. Viitattu 15.11.2023 https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/SES/Vibration_Integrity_Primer.pdf

Puun hemiselluloosien rakenne ja ominaisuudet. N.d. Luentomateriaali. TKK. Viitattu 13.12.2023 <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L8.pdf>

Puun uuteaineet. N.d. Luentomateriaali. TKK. Viitattu 21.11.2023 <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L11.pdf>

Puut pystyssä pitävä ligniini muuttui teollisuuden hylkiöstä rahoittajien suosikiksi. 2017. Uutinen. Helsingin yliopisto. Viitattu 13.12.2023 <https://www.helsinki.fi/fi/maatalous-metsatieteellinen-tiedekunta/ajankohtaista/puut-pystyssa-pitava-ligniini-muuttui-teollisuuden-hylkiosta-rahoittajien-suosikiksi>

Quinde A. 2021. The role of sulfidity during kraft pulping. Tieteellinen artikkel. Pulp and paper Canada. Viitattu 21.1.2024. <https://www.pulpandpapercanada.com/the-role-of-sulfidity-during-kraft-pulping/>

Selluloosan rakenne ja ominaisuudet. N.d. Luentomateriaali. TKK. Viitattu 21.11.2023 <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L7.pdf>

Solukko. N.d. Informatiivinen artikkeli. Puuproffa. Viitattu 21.11.2023 <https://puuproffa.fi/puutieto/puun-kerrokset/solukko/>

Spinnova. N.d. Yrityksen verkkosivusto. Viitattu 21.11.2023 <https://spinnova.com>

Vibration and integrity engineering division deliver flow-induced vibration study for new build FPSO. N.d. Artikkeli. Xodus. Artikkeli siitä kuinka yritys hoiti tietyn ongelman. <https://www.xodus-group.com/news/2023/vibration-and-integrity-engineering-division-deliver-flow-induced-vibration-study-for-new-build-fpso/>

Viljanen M. 2018. Selluloosamikrofibrillien ominaisuudet lauhkean ja trooppisen ilmastovyöhykkeen puulajeissa – Röntgensirontatutkimus. Pro gradu- tutkielma. Helsingin yliopisto. Viitattu 13.12.2023 <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/164bf1c2-b66f-4ab6-bb5e-1ef502292f57/content>

Wartiovaara A. 2022. Ryhtiä jugurttiin ja kuituja ruuansulatukseen – metsästä löytyy terveellinen vaihtoehto synteettisille stabilointiaineille. Artikkeli. Helsingin yliopisto. Viitattu 13.12.2023 <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/terveempi-maailma/ryhtia-jugurttiin-ja-kuituja-ruuansulatukseen-metsasta-loytyy-terveellinen-vaihtoehto-synteettisille-stabilointiaineille>