



# NO<sub>x</sub>-tason hyödyntäminen meesauunin tehonsäädössä

Atte Kovanen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2021

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

**Kovanen, Atte**

## **NO<sub>x</sub>-tason hyödyntäminen meesauunin tehonsäädössä**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2021, 84 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: Suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: Kyllä

### **Tiivistelmä**

Kuorikaasuttimen tuotekaasun poltto aiheuttaa Äänekosken biotuotetehtaan meesauunin korkeissa lämpötiloissa huomattavat NO<sub>x</sub>-päästöt. NO<sub>x</sub>-päästöjen vähentäminen on ollut vaikeaa, koska NO<sub>x</sub>-tason lasku osittain heikentää meesauunissa poltetun kalkin laatua. Vähennystavoitteita on myös vaikeuttanut tuotekaasun laadun vaihtelu. Opinnäytetyössä pyrittiin ratkaisemaan tämä ongelma. Tavoitteena oli kehittää biotuotetehtaan meesauuniin tehonsäätöratkaisu, jolla pystytään hallitsemaan ja vähentämään kuorikaasun poltosta syntyviä NO<sub>x</sub>-päästöjä ilman, että meesauunissa poltetun kalkin laatu heikkenee. Tarkoituksena oli säätää kuorikaasuttimen tehoa meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöjen mukaan. Tavoitteiden saavuttamiseksi työssä kehitettiin myös meesauunin happisäätöä.

Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena. Tutkimuksen teoriapohja koottiin aihetta käsittelevistä kirjallisuus- ja verkkolähteistä. Meesauunin prosessin nykytila kartoitettiin tehtaan prosessinohjausjärjestelmästä sekä laitevalmistajien dokumenteista. Kerätyn tiedon pohjalta toimeksiantajalle laadittiin kehitysehdotus, jossa esitettiin NO<sub>x</sub>-päästöjen mukaisen tehonsäädön ja uudistetun happisäädön toimintaperiaatteet.

Toimeksiantajan hyväksytyä kehitysehdotukset säätimet toteutettiin. Säätimien toimintaa paranneltiin ja viritettiin koeajojen aikana kerätyn mittausdatan perusteella. Koeajojen jälkeen säätimet käyttöönotettiin ja niiden toimintaa seurattiin ja analysoitiin neljän viikon ajan. Säätimien vaikutuksia meesauunin prosessiin arvioitiin vertaamalla neljän viikon aikana kerättyä mittausdataa säätömuutoksia edeltäneen ajan mittausdataan.

Työn tuloksina saatiin toimiva tehonsäätö ja happisäätö. Säädöillä pystyttiin vähentämään biotuotetehtaan meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöjä, parantamaan siinä poltetun kalkin laatua sekä laskemaan ja tasaamaan sen jäännöshappipitoisuutta. Työssä esitettiin lisäksi kehitysmahdollisuuksia kuoren kaasutuslaitoksen toiminnan parantamiseksi.

### **Avainsanat (asiasanat)**

Meesanpoltto, kaasutus, säätöpiirin viritys, NO<sub>x</sub>-päästöt, jäännöshappi

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Ei

**Kovanen, Atte**

### **Utilization of NO<sub>x</sub> levels in lime kiln load control**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2021, 84 pages.

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

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

Combustion of the bark gasifier's product gas causes significant NO<sub>x</sub> emissions at high temperatures in the lime kiln of the Äänekoski bioproduct mill. Reducing NO<sub>x</sub> emissions has been difficult because lower NO<sub>x</sub> levels tend to decrease the burnt lime quality in limekiln. In addition, the product gas quality is not constant. This makes it even more difficult to reach reduction targets. The purpose of the thesis was to solve this problem. The goal was to create a load controller for the lime kiln which can control and decrease NO<sub>x</sub> emissions without negatively affecting burnt lime quality. The idea was to control the bark gasifier energy input with lime kiln NO<sub>x</sub> emissions. In order to achieve these goals, the excess air control of the lime kiln was also developed in the work.

The thesis was carried out as a development study. The theoretical basis of the study was compiled from literature and online sources dealing with the topic. The current state of the lime kiln process was determined from the mill's process control system and equipment manufacturer's documents. On the basis of the information gathered, a development proposal was presented to the client, which included the operating principles of NO<sub>x</sub> based load control and the new excess air control.

The controllers were implemented after being approved by the client. The operation of the controllers was improved and tuned based on the measurement data collected during the test runs. After the test runs, the controllers were commissioned, and their operation was monitored and analyzed for four weeks. The effects of the controllers on the lime kiln process were evaluated by comparing the measurement data collected over four weeks with the measurement data of the time before the control changes.

The result of the work was a functioning NO<sub>x</sub> based load controller and an improved excess air controller. The developed controllers were able to reduce the NO<sub>x</sub> emissions of the bioproduct mill's lime kiln, improve the quality of the lime burned in it and stabilize its residual oxygen content. The work also presented development opportunities for the bark gasification plant.

### **Keywords/tags (subjects)**

Lime reburning, gasification, controller tuning, NO<sub>x</sub> emissions, excess air

### **Miscellaneous (Confidential information)**

No

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>5</b>
1.1	Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet.....	5
1.2	Toimeksiantaja .....	6
1.3	Tutkimusasetelma, aineiston keruu ja analysointi.....	6
<b>2</b>	<b>Kemikaalikierto</b> .....	<b>8</b>
2.1	Haihduuttamo .....	8
2.2	Soodakattila.....	9
2.3	Kaustisointi .....	10
2.4	Kalkkikierto.....	11
<b>3</b>	<b>Meesauuni</b> .....	<b>13</b>
3.1	Poltin .....	13
3.2	Kalkin jäähdytin .....	14
3.3	Flash-kuivain.....	16
3.4	Savukaasujen käsittely .....	16
3.5	Ohjaus.....	17
<b>4</b>	<b>Kaasutus</b> .....	<b>19</b>
4.1	Kaasuuntumisen teoria .....	19
4.2	Ilmakerroin .....	21
4.3	Kuori polttoaineena .....	23
4.4	Polttoaineen kosteus.....	23
<b>5</b>	<b>CFB-kaasutin</b> .....	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>PID-säädin</b> .....	<b>26</b>
6.1	Toimintaperiaate .....	27
6.2	Viritys.....	29
6.2.1	Säätöpiirin häiriöt .....	29
6.2.2	Viritysparametrien määrittäminen .....	30
<b>7</b>	<b>Typenoksidipäästöjen muodostuminen poltinpoltossa</b> .....	<b>31</b>
7.1	Terminen NO .....	32
7.2	Nopea NO .....	33
7.3	NO:n muodostus N <sub>2</sub> O-väliuotteen kautta .....	34
7.4	Polttoaine NO.....	34
7.5	NO <sub>x</sub> -päästöjen hallinta meesauunissa .....	35

<b>8</b>	<b>Meesauunin tehonsäätö NO<sub>x</sub>-ien mukaan .....</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>Meesauunin prosessinohjauksen nykytila .....</b>	<b>41</b>
9.1	Tehonsäätö.....	41
9.2	Happisäätö .....	42
9.3	Kuoren kaasutuslaitos .....	46
<b>10</b>	<b>Kehitysehdotus.....</b>	<b>50</b>
10.1	Happisäätö .....	50
10.2	Tehonsäätö.....	53
<b>11</b>	<b>Säätimien toteutus ja käyttöönotto .....</b>	<b>54</b>
11.1	Happisäätö .....	54
11.2	Tehonsäätö.....	56
<b>12</b>	<b>Tulokset ja analysointi .....</b>	<b>59</b>
<b>13</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>61</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>64</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>68</b>
	Liite 1. Laimeiden hajukaasujen vaikutus meesauunin NO <sub>x</sub> -päästöihin tasaisella pikiöljypoltolla .....	68
	Liite 2. Viirakuivurilla kuivatun kuoren kuiva-ainepitoisuus .....	69
	Liite 3. Savukaasupuhaltimen, savukaasupellin ja kiertokaasupellin A-tilan muutoksien toimintakuvaus sekä happisäätimen toimintakuvaus .....	70
	Liite 4. Tehoasetuksen säätimen toimintakuvaus.....	73
	Liite 5. Meesauunin tuotannon vaikutus uunin tehoon eri tehoasetuksilla.....	76
	Liite 6. Tehoasetuksen säätimen ohjaustapa .....	77
	Liite 7. Poltetun kalkin jäännöskarbonaatti ennen ja jälkeen säätömuutoksien.....	78
	Liite 8. Meesauunin NO <sub>x</sub> -päästöt ennen ja jälkeen säätömuutoksien .....	79
	Liite 9. Meesauunin jäännöshappipitoisuus ennen ja jälkeen säätömuutoksien .....	80
	Liite 10. Happisäädön ohjaustapa ennen ja jälkeen säätömuutoksien .....	81
	Liite 11. Meesauunin ominaisenergiankulutus ennen ja jälkeen säätömuutoksien .....	82
	Liite 12. Tehoasetuksen säätimen NO <sub>x</sub> -taso ja kuollut alue .....	83
	Liite 13. Meesauunin tuotanto ennen ja jälkeen säätömuutoksien .....	84
	<b>Kuviot</b>	
	Kuvio 1. Kemikaalikierto osana sellutehdasta .....	8
	Kuvio 2. Kaustisoinnin periaatekuva .....	10
	Kuvio 3. Esimerkki kalkkikierrosta.....	12

Kuvio 4. Kiertouunin liekin muodot .....	14
Kuvio 5. Kalkin jäädyttimen toimintaperiaate .....	15
Kuvio 6. Periaatekuva arinajäädyttimestä .....	15
Kuvio 7. Flash-kuivain osana meesauunia .....	16
Kuvio 8. Kiertouunin mittauksia ja säätöjä .....	18
Kuvio 9. Kaasutuksen vaiheet vastavirtakaasuttimessa .....	20
Kuvio 10. Tärkeimmät kaasutus- ja palamisreaktiot.....	20
Kuvio 11. Ilmakerroin ja jäännöshappi.....	21
Kuvio 12. Ilmakertoimen vaikutus maakaasun palamisen hyötysuhteeseen.....	22
Kuvio 13. CFB-kaasuttimen petilämpötilan ja ER:n korrelaatio.....	23
Kuvio 14. Polttoaineen kosteuden vaikutus CFB-kaasuttimen ilmakertoimeen .....	24
Kuvio 15. Polttoaineen kosteuden vaikutus tuotekaasun lämpöarvoon.....	24
Kuvio 16. Valmet CFB-kaasutin .....	26
Kuvio 17. PID-säätimen rakenne .....	28
Kuvio 18. Esimerkki askelvastekokeesta .....	30
Kuvio 19. Termisen NO:n lämpötila riippuvuus 1 ms ja 10 ms viiveajoissa.....	33
Kuvio 20. Polttoainetyypen reaktiopolut.....	35
Kuvio 21. Ilmavaiheistus polttimessa.....	36
Kuvio 22. Meesauunin lämpötilaprofiilit .....	38
Kuvio 23. Biotuotetehtaan meesauunin NO <sub>x</sub> -päästöt ja jäännöskarbonaatti .....	39
Kuvio 24. Syöttöpään lämpötilan ja NO <sub>x</sub> -päästöjen korrelaatio.....	40
Kuvio 25. Polttopään lämpötilan ja NO <sub>x</sub> -päästöjen korrelaatio .....	40
Kuvio 26. Periaatekuva biotuotetehtaan meesauunista .....	43
Kuvio 27. Meesauunin jäännöshappipitoisuus ja sen säätörajat.....	44
Kuvio 28. Savukaasupellin ohjaustapa ja meesauunin jäännöshappi.....	46
Kuvio 29. Kuoren kaasutuslaitos .....	47
Kuvio 30. Petimateriaalin lisäyksen vaikutus kaasuttimen petilämpötilaan .....	48
Kuvio 31. Kaasuttimen petilämpötila ja meesauunin jäännöshappi .....	49
Kuvio 32. Jäännöshapen vaikutus NO <sub>x</sub> -päästöihin .....	51
Kuvio 33. Happsäädön toiminta.....	56
Kuvio 34. Tehoasetuksen säätimen toiminta.....	58

## Taulukot

Taulukko 1. PID-säätimen osien edut ja haitat .....	28
---	----

Taulukko 2. Säättömuutoksien vaikutukset meesauunin prosessiin .....	59
--	----

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet

Huoli ilmastonmuutoksesta ja ympäristöstä on saanut monia maita muuttamaan omia lakejaan ja käytäntöjään. Esimerkiksi Suomessa kasvihuonepäästöjä on pyritty vähentämään jo pitkään muun muassa lainsäädäntöä uudistamalla ja fossiilisten polttoaineiden verotusta nostamalla. Tämä on luonnollisesti ohjannut teollisuutta muokkaamaan omia prosessejaan ympäristöystävällisempään suuntaan.

Äänekosken biotuotetehtaalla ympäristöhuoliin on vastattu panostamalla uusimpaan tekniikkaan ja resurssitehokkuuteen. Tehtaan biomassan kaasutuslaitosta voidaan pitää malliesimerkkinä tällaisesta panostuksesta. Kaasutuslaitos muuttaa tehtaan ylimäärä kuoren meesauunissa poltettavaksi tuotekaasuksi, jolla on pystytty korvaamaan meesanpoltossa käytetty fossiilinen polttoaine. Uuden tekniikan käyttö perinteisen teollisuusprosessin kanssa ei kuitenkaan ole itsestään selvää: tuotekaasun poltto tekee meesauunin tehonsäädöstä normaalia vaikeampaa sekä synnyttää huomattavat  $\text{NO}_x$ -päästöt. Nämä  $\text{NO}_x$ -päästöt ovat enimmäkseen typpimonoksidia. Ilmakehässä typpi-dioksidiksi hapettuva typpimonoksidi ei ole kasvihuonekaasu, mutta se on kuitenkin merkittävä ilmansaaste, joka aiheuttaa esimerkiksi happamia sateita. Biotuotetehtaalla  $\text{NO}_x$ -päästöjä pyritäänkin mahdollisuuksien mukaan vähentämään.

Biotuotetehtaalla meesauunin  $\text{NO}_x$ -päästöjen vähennys on osittain ristiriidassa uunin laadukkaan tuotannon kanssa: meesanpoltto vaatii korkean lämpötilan, joka itsessään lisää reilusti  $\text{NO}_x$ -päästöjen muodostumista. Uunia joudutaankin operoimaan päästörajan tuntumassa. Kaasuttimen ominaisuuksien vuoksi se ei ole helppoa. Opinnäytetyön tarkoituksena oli vastata tähän ongelmaan. Tavoitteena oli kehittää säätöratkaisu, jossa kaasuttimen tehonsäätö perustuu meesauunin  $\text{NO}_x$ -päästöihin. Tavoitteiden saavuttamiseksi työssä piti myös kehittää meesauunin happisäätöä.

Meesauunin  $\text{NO}_x$ -ien mukaiseen tehonsäätöön liittyviä tutkimuksia tai selvitystöitä ei ole aikaisemmin tehty, mutta aihetta läheisesti käsitteleviä diplomi-, kandidaatin- ja opinnäytetöitä on paljon, esimerkiksi Timo Hakkaraisen (2014) diplomityö, jossa hän kartoitti  $\text{NO}_x$ -päästöjen vähennystekniikat meesauuneissa. Topias Kuusrainen (2019) kehitti taas opinnäytetyössään biotuotetehtaan kuoren kaasutuslaitoksen prosessinohjausta, jonka toimintaa hän osaltaan arvioi  $\text{NO}_x$ -päästöjen



avulla. Tämä opinnäytetyö sisältää samankaltaisia lähtökohtia edellä mainittujen lopputöiden kanssa yhdistäen NO<sub>x</sub>-päästöjen hallinnan prosessinohjauksen kehittämiseen.

## 1.2 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Äänekosken biotuotetehdas. Biotuotetehdas on Metsä Fibre Oy:n sellutehdas, joka valmistaa sellun ohella useita biotuotteita muun muassa bioenergiaa, mäntyöljyä ja tuotekaasua (Äänekosken biotuotetehdas n.d). Tehdas valmistui vuonna 2017 syrjäyttäen vuonna 1985 käyttöönotetun vanhan sellutehtaan. Biotuotetehtaan tuotantokapasiteetti on 1,3 miljoonaa tonnia sellua vuodessa, joka on melkein kolme kertaa suurempi, kuin aiemman tehtaan tuotanto. Tuotannon lisääntyessä tehdas on kuitenkin onnistunut alittamaan edellisen tehtaan ympäristöluvun päästörajat. (Mikä biotuotetehdas? n.d.)

Metsä Fibre Oy kuuluu Metsä Group metsäteollisuuskonserniin ja sen liiketoiminta-alueena on sellun ja sahatavaran valmistus. Metsä Fibren lisäksi Metsä Groupin tytäryhtiöinä on Metsä Tissue ja Metsä Board. Metsä Group koostuu metsänomistajien hallinnoimasta Metsäliitto Osuuskunnasta sekä Metsä Forestista ja Metsä Woodista. Metsä Fibren omistus jakautuu Metsäliitto Osuuskunnan (50,1 %), Metsä Board Oyj:n (24,9 %) ja Itochu Corporationin (25,0 %) kesken. (Metsä Fibre n.d; Organisaatio, omistajat ja johto n.d.)

## 1.3 Tutkimusasetelma, aineiston keruu ja analysointi

Tämä opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena. Kehittämistutkimuksessa tutkimuskohde voi olla käytännössä mitä tahansa, kunhan siihen pystytään vaikuttamaan ja sen toimintaa kehittämään (Kananen 2012, 20-21). Tässä työssä tutkimuskohde oli biotuotetehtaan meesauunin tehonsäätö. Tehonsäädön kehittäminen rajattiin koskemaan vain kuorikaasuttimen tehonsäätöä. Työssä tutkittiin ja kehitettiin myös meesauunin happisäätöä.

Kehittämistutkimuksessa tutkija toimii ulkopuolisena havainnoijana eli hän on erillään tutkittavasta ilmiöstä, eikä vaikuta siihen aktiivisesti. Tyypillistä kehittämistutkimukselle on tutkimuksen muotoilu ongelmaksi, josta johdetaan tutkimuskysymykset. Kun tutkimuskysymyksiin saadaan vastaus, ongelmalle on löydetty ratkaisu. (Mts. 27-28.) Tämän opinnäytetyön tutkimuskysymykset olivat:

- Mitkä tekijät vaikuttavat jäännöshapen heilumiseen meesauunissa?
- Onko meesauunin tehonsäätö  $\text{NO}_x$ :ien mukaan perusteltua?
- Mikä on varteenotettavin ratkaisu jäännöshapen tasaamiseksi?
- Mikä on varteenotettavin ratkaisu  $\text{NO}_x$ :ien mukaiseen tehonsäätöön?
- Miten nämä ratkaisut toteutetaan?

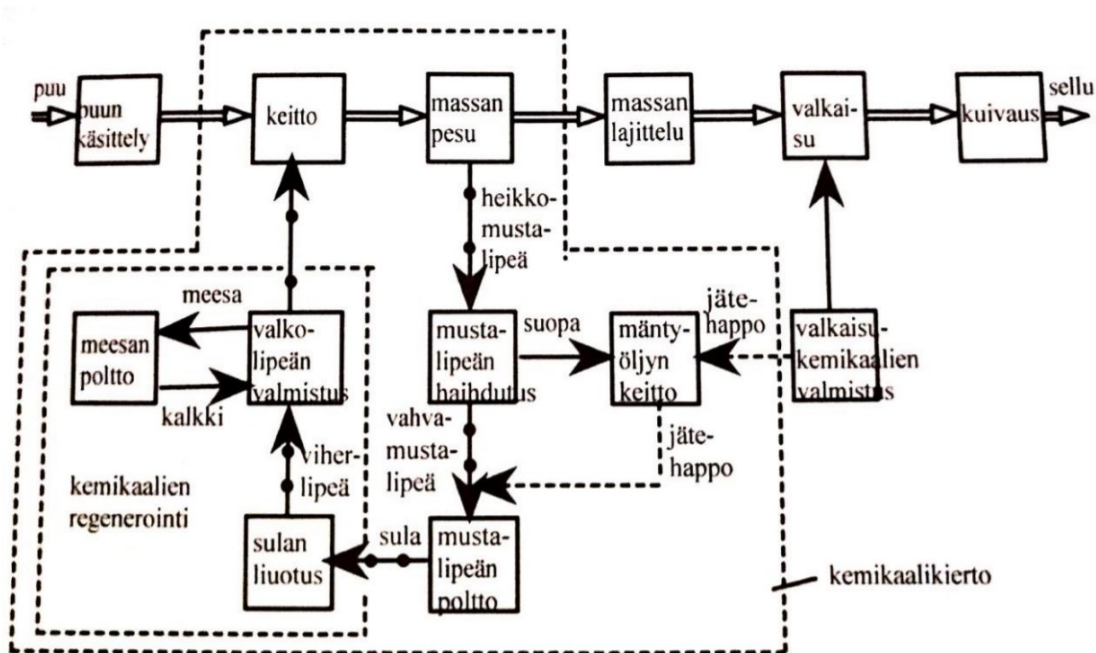
Kehittämistutkimuksessa painottuu teoria, jonka pohjalle tutkimus rakentuu. Kehittämistutkimus on tutkimuksena monimenetelmäinen ja se koostuu kvalitatiivisista ja kvantitatiivisista tutkimusmenetelmistä. (Mts. 19.) Kvalitatiivista eli laadullista tutkimusta käytetään, kun pyritään ymmärtämään tutkittavaa ilmiötä syvällisesti. Laadullinen tutkimus soveltuu ilmiöihin, joista ei ole aikaisempaa tietoa. Laadullisen tutkimuksen tuloksia tulkitaan tutkittavan ilmiön ymmärtämiseksi, eikä niistä pyritä tekemään yleistyksiä. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa tietoa kerätään ensisijaisesti havainnoinnin, haastattelujen ja dokumenttien muodossa. (Mts. 29-30, 93.)

Kvantitatiivisessa eli määrällisessä tutkimuksessa ilmiötä kuvataan luvuin ja sen tekijöiden korrelaatioilla. Määrällinen tutkimus pohjautuu teorioihin, jotka on johdettu kvalitatiivisista tutkimuksista. Toisin sanoen tutkittavan ilmiön muuttujat on tiedossa. Kvantitatiivisen tutkimuksen aineisto voidaan kerätä esimerkiksi kyselyillä. (Mts. 31-32, 121.)

Tässä opinnäytetyössä pääsijaisena tutkimusmenetelmänä käytettiin kvalitatiivista tutkimusotetta. Oleellisena osana tiedon keräystä oli biotuotetehtaan Valmet DNA prosessinohjausjärjestelmä, josta havainnointiin meesauunin prosessinohjauksen nykytila. Prosessinohjausjärjestelmästä kerättiin muun muassa työssä esitetty mittausdata. Lisätietoa haettiin meesauunin ja kuoren kaasutuslaitoksen laitevalmistajan dokumenteista ja prosessin toimintakuvauksista. Uusien säätöpiirien käyttöönoton aikana suoritettiin meesauunin operaattorien haastatteluja, joista saatiin tietoa säätöjen toimivuudesta ja käytettävyydestä. Kvantitatiivista tutkimusotetta käytettiin työn tuloksien arvioinnissa: tulokset ilmoitettiin lukuina ja trendeinä. Säätöpiirien muutoksien vaikuttavuutta arvioitiin vertaamalla tuloksia muutoksia edeltäneeseen aikaan. Opinnäytetyön teoriapohja koottiin alan kirjallisuudesta ja aihetta käsittelevistä verkkolähteistä.

## 2 Kemikaalikierto

Sulfaattisellutehdas käyttää valkolipeää puuhakkeen keittämässä. Keitossa hakkeesta saadaan eriteltyä sellukuidut lopputuotteeseen. Keittämisestä ylijäänyttä puun ligniinin ja valkolipeän seosta kutsutaan heikkomustalipeäksi. Tämä lipeä regeneroidaan sellutehtaan kemikaalikierrossa takaisin valkolipeäksi keittämölle. Lisäksi kierrossa hyötykäytetään puusta liuenneet orgaaniset aineet sellutehtaan energiantuotannossa. Väkevöityä heikkomustalipeää polttamalla saadaan tuotettua höyryä ja sähköä tehtaan tarpeisiin. (Smook 2016, 76; Tran & Vakkilainen 2016.) Kemikaalikierron hyödyillä on myös kääntöpuolensa. Mahdolliset ongelmat kierrossa heikentävät sellun laatua, nostavat energiankulutusta ja rajoittavat tuotantokapasiteettia (Tran & Vakkilainen 2016). Kuviossa 1 on esitelty kemikaalikierron merkitys sellutehtaassa.



Kuvio 1. Kemikaalikierto osana sellutehdasta (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 65)

### 2.1 Haihduttamo

Kemikaalikierto alkaa massanpesusta syntyneen heikkomustalipeän haihdutuksella. Haihdutuksen avulla mustalipeän kuiva-ainepitoisuus saadaan nostettua soodakattilan poltolle sopivaksi. Saapumistilassa kuiva-ainepitoisuus on noin 13-17 %. Veden poiston lisäksi lipeästä erotetaan puun hartsimaiset aineet eli suopa. Suovasta valmistetaan mäntyöljyä. (Smook 2016, 137, 164.)

Haihduksessa heikkomustalipeä ajetaan haihdutinsarjan läpi, jossa lipeän sisältämä vesi kiehuteetaan pois. Sarjan haihdutinyksiköissä lipeä altistetaan alipaineelle ja lämmitetään höyryllä lämmönvaihtimen välityksellä. Lipeästä höyrynä poistuva vesi käytetään sarjan edellisen haihduttimen lipeän veden kiehuttamiseen. Lipeä ja höyry kulkevat sarjassa siis vastakkain. Kun mustalipeän kuiva-ainepitoisuus kasvaa, höyryn paine kasvaa samalla. Lipeä poistuu haihduttamolta 60-80 %:n kuiva-ainepitoisuudessa. (Mts. 137.)

## 2.2 Soodakattila

Soodakattilalla käsitellään haihduttamolta tulevan vahvamustalipeän orgaaniset sekä epäorgaaniset kemikaalit. Käsittely tapahtuu polttamalla lipeä kattilan tulipesässä. Lipeä syötetään tulipesään ruiskuttamalla. Polton aikana lipeään liuenneet puun orgaaniset aineet palavat ja vapauttavat lämpöä. Lämpö luo soodakattilassa korkeapainehöyryä, joka kattilan turbiinin läpi ajettaessa, tuottaa tehtaalle sähköä ja prosessihöyryä. Orgaanisen aineen palaessa epäorgaaniset kemikaalit reagoivat tulipesässä muodostaen pääasiassa natriumsulfidia ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) ja natriumkarbonaattia ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Nämä kemikaalit poistetaan sulana kattilan pohjalta liuotinsäiliöön. Liuotinsäiliössä kemikaalit liuotetaan heikkovalkolipeään, jolloin muodostuu kaustisointiin pumpattavaa viherlipeää. (Huhtinen ym. 2013, 69-74.)

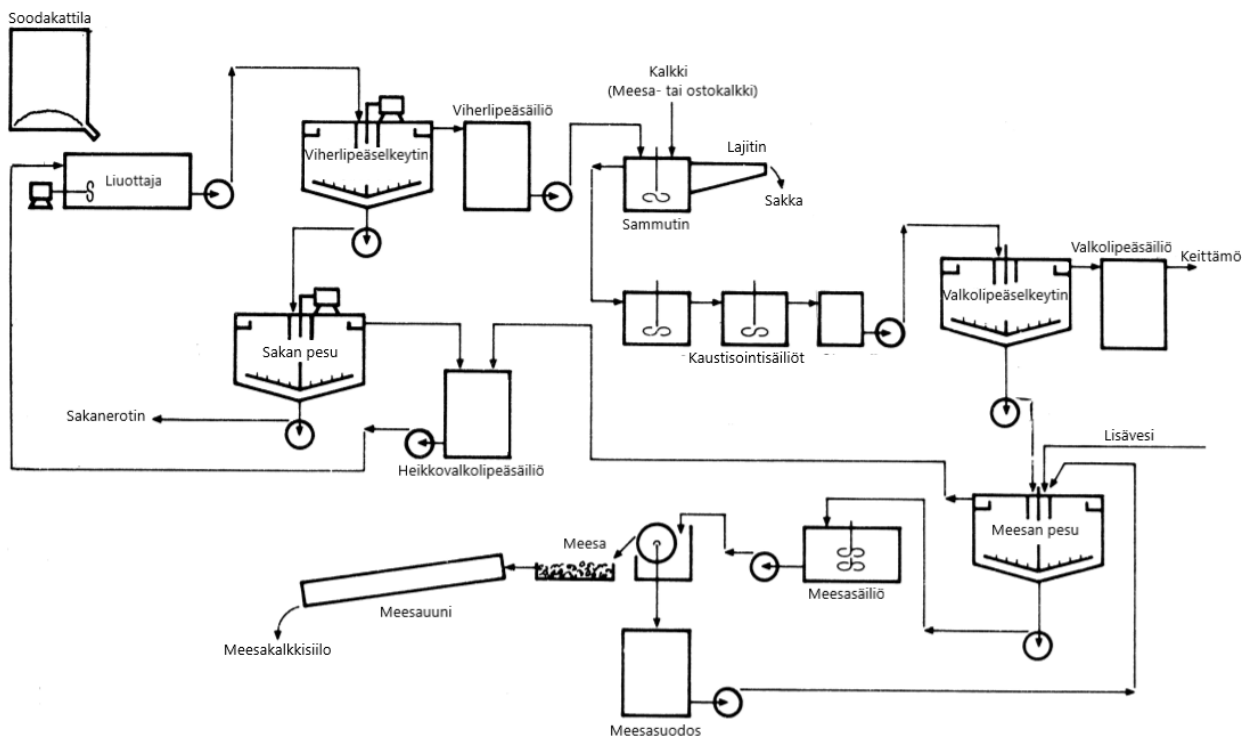
Soodakattilalla pyritään mahdollisimman korkeaan natriumsulfidin saantoon sen ollessa valkolipeän toinen aktiivinen kemikaali. Natriumsulfidia tuotetaan pelkistämällä natriumsulfaattia ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Pelkistymisreaktio tapahtuu soodakattilan pohjalla, keossa, vähähappisissa olosuhteissa. Nämä olosuhteet ovat täysin käänteiset palamisilmaa vaativalle palamiselle. Reaktion tehokkuus määritellään reduktiolla. Reduktio ilmaisee sulassa olevan natriumsulfidin suhteen natriumsulfidiin ja natriumsulfaattiin:

$$\text{Reduktioaste} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4}$$

Mitä korkeampi reduktio, sitä vähemmän natriumsulfaatti aiheuttaa kuollutta kuormaa sellun keitossa. Hyvin hallitulla soodakattilalla päästään reduktiossa 95-98 %:iin. (Vakkilainen 2017, 242-244.)

## 2.3 Kaustisointi

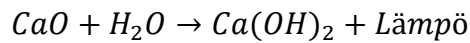
Kaustisoinnin tarkoituksena on muuttaa soodakattilalta tulevan viherlipeän sisältämä natriumkarbonaatti natriumhydroksidiksi (NaOH) sekä poistaa kemikaalikierrosta epäpuhtauksia. Kaustisointi alkaa liuottajalta tulevan viherlipeän käsittelystä (ks. kuvio 2). Viherlipeästä erotellaan, esimerkiksi selkeyttämällä, viherlipeäsakka. Sakka poistetaan, jotta se ei aiheuttaisi ongelmia kemikaalikierrossa. Sakan poistaminen nostaa muun muassa kaustisointireaktion ja meesasuoitimen tehokkuutta. Ennen lopullista poistoa prosessista viherlipeäsakka tyypillisesti pestään vedellä. Näin varmistetaan, että sakan mukana ei poistu kaustisoinnille edullisia kemikaaleja. Pesusta yli jäänyt alkalipitoinen vesi pumpataan heikkovalkolipeäsäiliöön. (Smook 2016, 153-155; Kemikaalikierto 2021.)



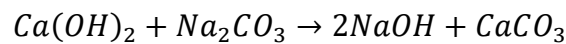
Kuvio 2. Kaustisoinnin periaatekuva (Smook 2016, 154, muokattu)

Sakasta puhdas viherlipeä sekoitetaan sammuttimessa kalkin (CaO) kanssa. Kalkkia syötetään sammuttimeen meesakalkki- ja ostokalkkisiilosta. Meesakalkkisiilon kalkki saadaan kalkkikierrosta. Ostetulla kalkilla kompensoidaan kalkin häviöitä kierrossa ja ylläpidetään kalkin laatua. Ennen sammutinta viherlipeän lämpötilaa lasketaan viherlipeäjähdyttimellä. Jäähdytyksellä estetään

kiehumista sammuttimesta. (Kemikaalikierto 2021.) Kalkki reagoi viherlipeän sisältämän veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) sammutusreaktiossa:



Kalsiumhydroksidi reagoi viherlipeän natriumkarbonaatin kanssa tuottaen natriumhydroksidia kaustisointireaktiossa:

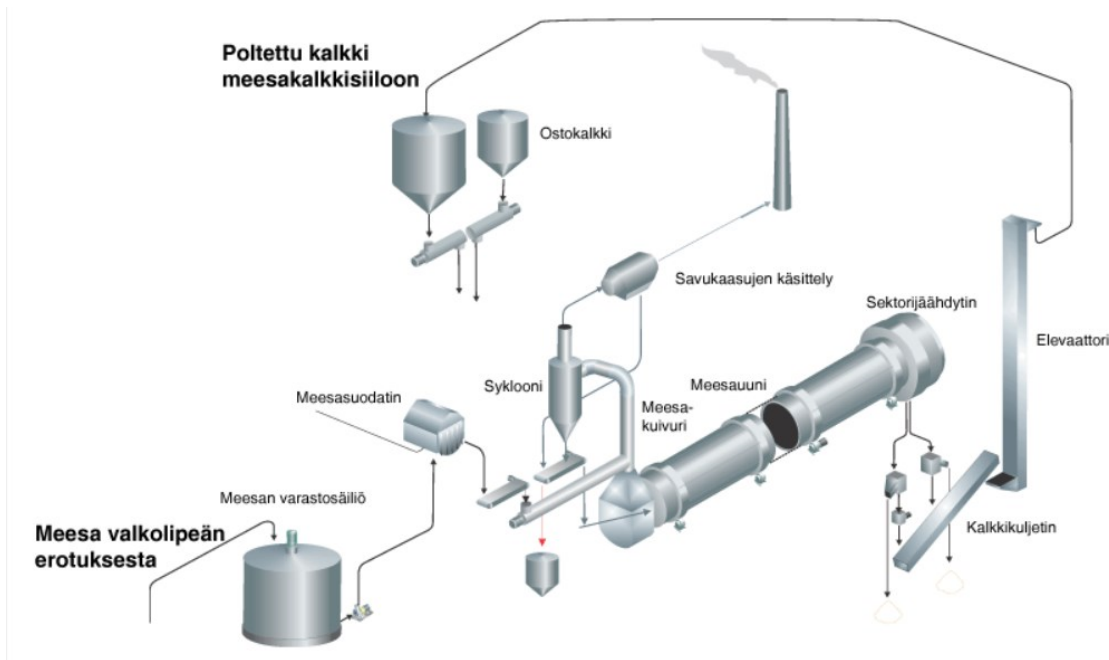


Sammutin ylikaataa kaustisointisäiliöihin missä lopullinen, noin kaksi tuntia kestävä, kaustisointireaktio tapahtuu. Reaktiosta syntynyt natriumhydroksidi yhdessä natriumsulfidin kanssa muodostavat keittämön tarvitseman valkolipeän. Valkolipeä erotellaan kaustisoinnissa syntyneestä meesasta ( $\text{CaCO}_3$ ). Tyypillisesti erotus tapahtuu selkeyttämällä tai suodattamalla meesa valkolipeästä. Eroteltu meesa laimennetaan ja pumpataan kalkkikiertoon. (Smook 2016, 155-156.)

Kaustisoinnissa korostuu sammuttimeen syötettävän viherlipeän ja kalkin laatu. Vaihtelut laadussa heikentävät kaustisoinnin tehokkuutta ja näin ollen valkolipeän saantoa. (Smook 2016, 157.) Viherlipeän laadusta kertoo titrautuva kokonaisalkali (Total Titratable Alkali), joka ilmoittaa natriumhydroksidin, natriumsulfidin ja natriumkarbonaatin konsentraation grammoina litroissa viherlipeässä. Suuri konsentraatio edesauttaa operoinnin tasaisuutta ja toimii puskurina häiriötilanteissa. Matala konsentraatio parantaa kaustisoinnin tehokkuutta, epäreagoimattoman natriumkarbonaatin määrän ollessa pieni kemikaalikierrossa. (Smook 2016, 78.) Kalkin laatu määritetään reaktiivisuudella ja jäännöskarbonaatin määrällä. Sammuttimeen syötettävän kalkin ominaisuudet määrittyvät kalkkikierrossa. (Bajpai 2016, 132; Kemikaalikierto 2021.)

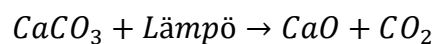
## 2.4 Kalkkikierto

Kalkkikierrossa kaustisoinnista tuleva meesa poltetaan meesauunissa kalkiksi (ks. kuvio 3). Poltosta saatu kalkki jäähdytetään ja kuljetetaan meesakalkkisiiloon. Siilosta kalkki annostellaan takaisin sammuttimeen. (Kemikaalikierto 2021.)



Kuvio 3. Esimerkki kalkkikierrosta (Kemikaalikierto 2021)

Kiertoon tuleva meesa pumpataan meesasuoimeen, jossa meesa pestään ja sen kuiva-ainepitoisuus nostetaan 70-80 %:iin (Smook 2016, 157). Pesulla meesasta poistetaan valkoliipeän jäämiä ja alkalipitoisia epäpuhtauksia. Pesuliuos otetaan talteen heikkovalkoliipeäsäiliöön. (Bajpai 2016, 102,139.) Kuiva-ainepitoisuuden nostolla vähennetään meesan polttamiseen tarvittavaa energia määrää. Esikäsitelty meesa syötetään meesauuniin, jossa se kuivuu ja lämpenee hajomispisteeseen. Meesan lämpötilan kasvaessa yli 800 °C:n, se hajoaa kalkiksi ja hiilidioksidiksi (CO<sub>2</sub>) kalsinointireaktiossa:



Kalkin laatu määritetään jäännöskarbonaattilla sekä kaustisointivoimalla. Jäännöskarbonaatti kertoo kalsiumkarbonaatin määrän poltetussa kalkissa. Kaustisointivoimasta ilmenee kalkin reaktiivisuus sammuttimessa. Kalkki on laadukasta, kun se on mahdollisimman puhdasta hyvällä reaktiivisuudella. Kaustisointivoima kasvaa jäännöskarbonaatin vähentyessä, mutta tietyn pisteen jälkeen se alkaa laskea. Toisin sanoen meesanpolto korkeissa lämpötiloissa tuottaa puhdasta kalkkia heikentäen samalla sen reaktiivisuutta. Kalkin reaktiivisuus sammutuksessa vähenee, jos se poltetaan liian kovaksi meesauunissa. (Bajpai 2016, 132-133; Kemikaalikierto 2021.) Pieni ylimäärä meesaa kalkissa (1-2 %) on välttämätöntä hyvän reaktiivisuuden vuoksi (Smook 2016, 157).

### 3 Meesauuni

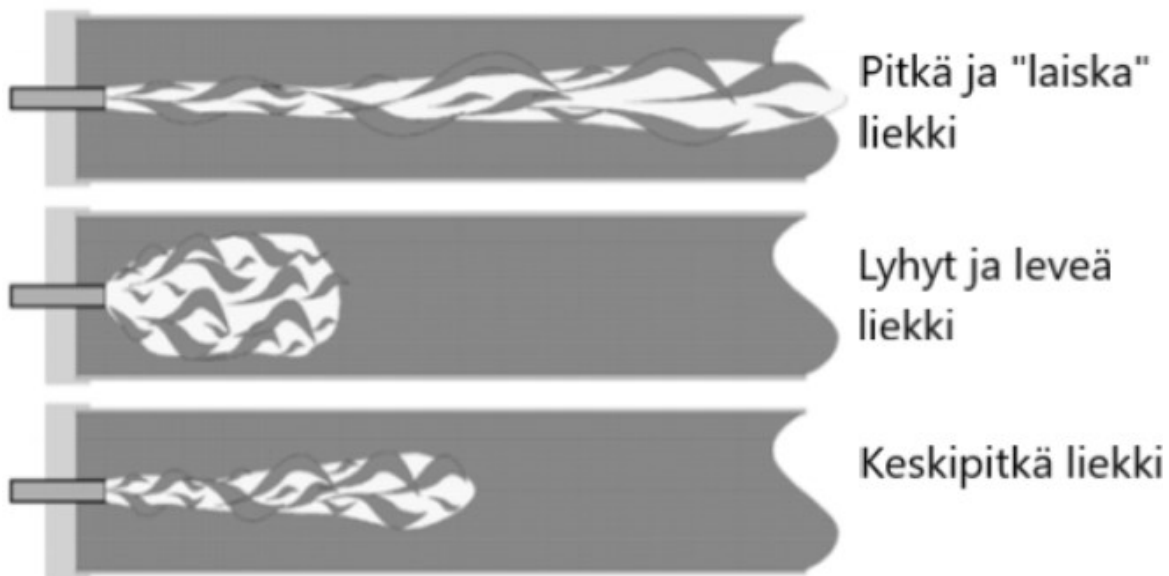
Meesauuni on suuri, hieman kallellaan oleva teräsputki, joka on sisäpuolelta vuorattu tuulenkestävillä tiileillä. Meesa syötetään uunin yläpäässä sijaitsevaan syöttöpäähän, josta se kulkeutuu hitaasti polttopäätä kohti uunin jatkuvan pyörimisen ansiosta. Uunia pyöritetään kannatusrenkailla, joidenka päällä uuni makaa. Meesanpolttoon vaadittu lämpö synnytetään polttopäässä sijaitsevalla polttimella. Palamisesta aiheutuvan liekin ja meesaa vastavirtaan kulkevien savukaasujen yhteisvaikutuksesta meesa kuivuu, lämpenee ja kalsinoituu uunissa. Tyypillinen läpimenoaika uunissa on normaalisti 1,5-4 tuntia. Aikaan vaikutetaan uunin kierrosnopeudella ja kaltevuudella. (Adams 1999.)

#### 3.1 Poltin

Meesauunin poltin on usein suunniteltu monelle polttoaineelle, kuten öljylle ja kaasulle. Poltinta ympäröi polttohuuva, johon se ja sen liitännäislaitteet ovat tuettuna. Polttimen tukemisen lisäksi huuva luo kalkille reitin pois uunista. Poistuva kalkki ja uunin sisäpuolella oleva poltin on sijoitettu kauaksi toisistaan, jotta poltin ei ylikuumentuisi. (Kemikaalikierto 2021.)

Meesauunin poltimella tavoiteltu optimaalinen liekki on sylinterimäinen. Liekin lämpötila pyritään pitämään korkeana, jotta uunin tuotanto olisi mahdollisimman suuri. Ongelmana on, että liekin suuri lämpötila kuluttaa uunin vuorausta sekä tuottaa kovaksi palanutta kalkkia. Lyhyet liekit ovat kuumia ja aiheuttavat edellä mainittuja haittoja. Pitkät ja epätehokkaat liekit saavat aikaan tuotannon menetyksiä. Liekin pituutta säättämällä pystytään pääsemään uunin suorituskyvyn kannalta kompromissiin (ks. kuvio 4). Hyväksi todettu pituus liekille on noin kolme kertaa uunin halkaisijan mitta. Liekin muotoa ja stabiilisuutta säädetään polttopäässä sijaitsevalla primääri-ilma puhaltimella. Primääri-ilman osuus polttoaineen vaatimasta kokonaisilmamäärästä on 5-25 %. (Adams 1999.)



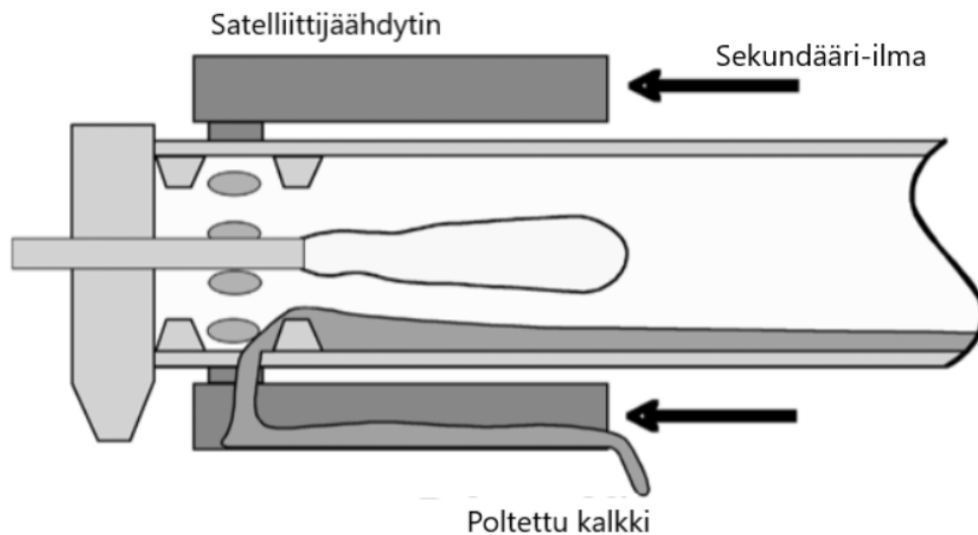


Kuvio 4. Kiertouunin liekin muodot (Adams 1999, muokattu)

Polttoaineena meesauuneissa on tyypillisesti käytetty öljyä ja maakaasua. Pääpolttoaineiden ohella meesauuneissa poltetaan sellutehtaan sivutuotteita ja jätevirtoja, kuten mäntyöljyä ja hajukaasuja. Kasvavat energian hinnat ovat luoneet tarpeen löytää uusia edullisempia vaihtoehtoja meesauunien polttoaineiksi. (France, Jones & Tran 2009.) Esimerkiksi Äänekosken biotuotetehtaalla meesauunin pääpolttoaineena käytetään kuorikaasuttimen tuotekaasua ja apupolttoaineena toimii mäntypikiöljy.

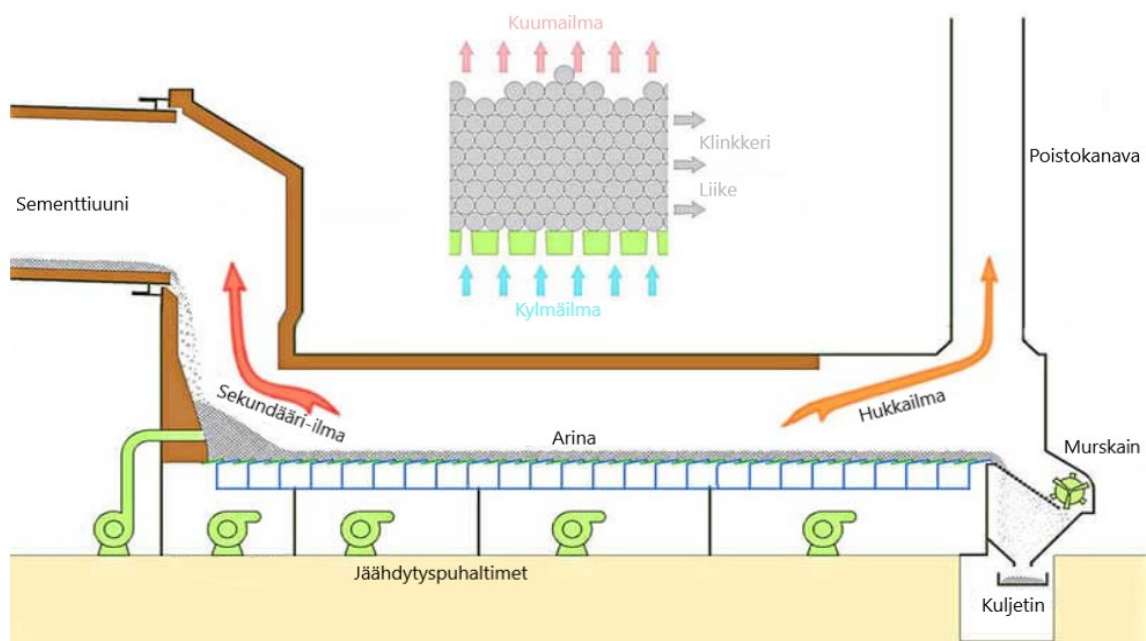
### 3.2 Kalkin jäähdytin

Kalkki poistuu meesauunista korkeassa lämpötilassa, joka on noin 950 °C. Tämä lämpö otetaan talteen jäähdyttämällä kalkkia uunin palamisilmalla. Jäähdyttämällä saadaan parannettua uunin energiatehokkuutta ja laskettua kalkin lämpötila noin 350 °C:seen. (Smook 2016, 158-159.) Jäähdyttävä ilma toimii uunin sekundääri-ilmana. Uunin savukaasupuhallin imee kyseisen ilman jäähdyttimen läpi uuniin. Yleisiä jäähdytin tyyppisiä meesauuneissa on sektorijäähdytin ja satelliittijäähdytin. Molempien jäähdyttimien toiminta perustuu kalkin kulkemiseen vastavirtaan ilman virtaukseen nähden (ks. kuvio 5). Jäähdytymisen jälkeen kalkki murskataan ja kuljetetaan meesasiinloon. (Kemikaalikierto 2021.)



Kuvio 5. Kalkin jäähdyttimen toimintaperiaate (Adams 1999, muokattu)

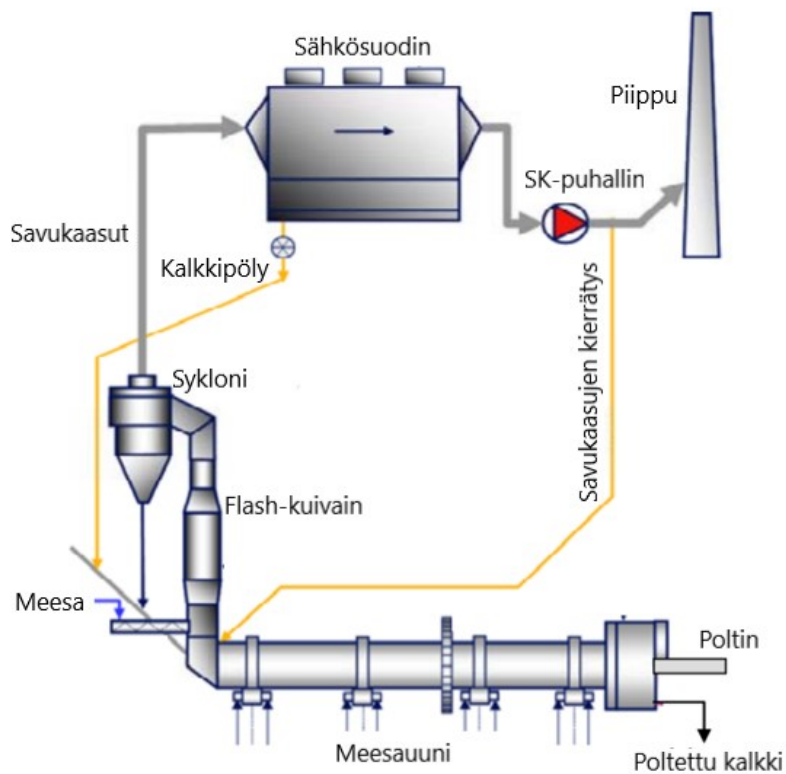
Biotuotetehtaalla kalkkia viilennetään palkkiarinajäähdyttimellä. Tässä mallissa kalkki putoaa uunin alapuolella olevaan jäähdytimeen, jossa kalkkia liikutetaan eteenpäin arinapalkeilla. Jäähdyttimen ilma puhalletaan kalkkipatjan alta ja imetään arinalta uuniin. Kuviossa 6 on periaatekuva sementtiteollisuudessa käytettävästä kiertouuniin arinajäähdyttimestä, joka on toimintaperiaateltaan samanlainen biotuotetehtaan jäähdyttimen kanssa.



Kuvio 6. Periaatekuva arinajäähdyttimestä (Grate cooler n.d, muokattu)

### 3.3 Flash-kuivain

Moderneissa meesauuneissa meesan kuiva-ainepitoisuus nostetaan lähes 100 %:iin ennen uunia. Kuivaus tapahtuu flash-kuivaimella, joka koostuu kuivausputkesta ja syklonista (ks. kuvio 7). Meesasuotimelta tuleva meesa syötetään kuivausputkeen, josta se kulkeutuu uunin savukaasujen mukana sykloniin. Kuljetuksen aikana meesa kuivuu savukaasujen lämmön vaikutuksesta. Syklonissa meesapöly erotellaan savukaasuista ja syötetään uuniin. Flash-kuivainta käytettäessä uunin koko pituus on meesan lämmittämistä ja kalsinointia varten. (Adams 1999; Kemikaalikierto 2021.)



Kuvio 7. Flash-kuivain osana meesauunია (Tran & Vakkilainen 2016, muokattu)

### 3.4 Savukaasujen käsittely

Kalkin regenerointi aiheuttaa pölyämistä meesauunissa. Pöly suodatetaan savukaasuista, jotta se ei leviäisi ympäristöön. Meesauunin savukaasut puhdistetaan, joko savukaasupesurilla tai

sähkösuodattimella. Nykyään käytännössä kaikki uudet meesauunit ovat varustettuna sähkösuodattimella, vaikka savukaasupesureilla pystytään paremmin kontrolloimaan rikki päästöjä. Sähkösuotimien suosio johtuu niiden kyvystä päästä tiukempiin hiukkaspäästörajoihin. (Tran & Vakkilainen 2016.)

Ympäristöhaittojen ehkäisyyn lisäksi savukaasujen käsittelyllä saadaan talteenotettua uunista poistuvia meesayhdisteitä. Sähkösuodattimella kerätty meesapöly kuljetetaan takaisin uunin syöttöpäähän ja poltetaan kalkiksi. Osa talteenotetusta pölystä voidaan kerätä erilliseen siiloon ja kuljettaa pois tehtaalta. Näin vierasaineita poistetaan kalkkikierrosta. (Kemikaalikierto 2021.)

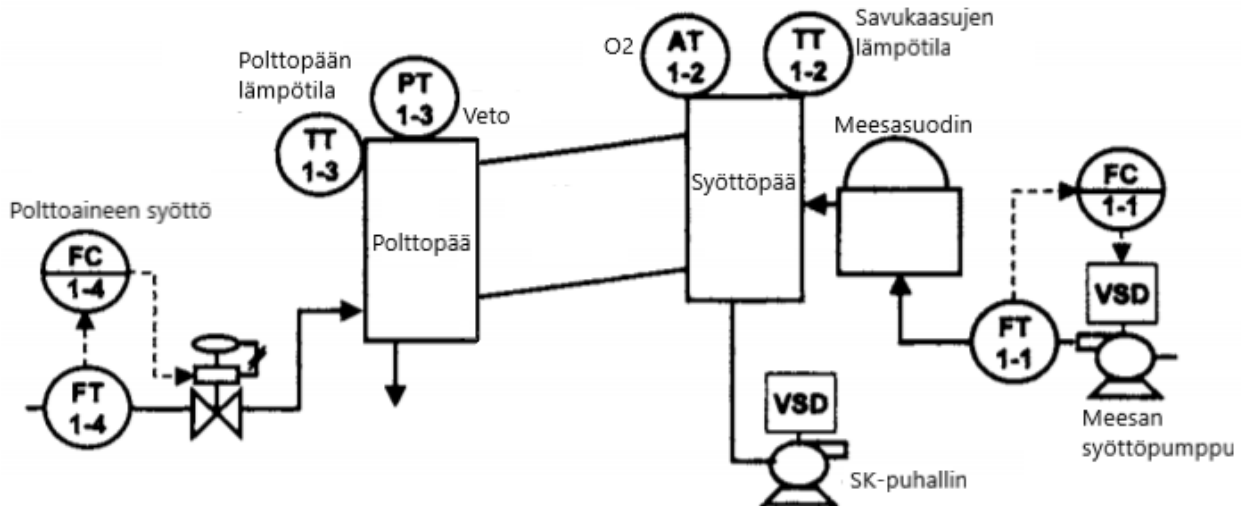
Meesauunin savukaasujen lämpötilaa halutaan hallita sähkösuotimen vaurioiden estämiseksi. Lämpötilaa voidaan säätää meesan syöttöruuvien kohdalla olevalla lämpötilan säätöpellillä. Pellillä ohjataan savukaasujen määrää meesavirtaukseen. Pellin lisäksi savukaasukanavassa voi olla jäähdytysvesisuutin, joka jäähdyttää savukaasuja ruiskuttamalla siihen vettä. (Kemikaalikierto 2021.) Biotuotetehtaalla lämpötilaa hallitaan pääsääntöisesti flash-kuivurissa sijaitsevalla jäähdytysvesiruiskutuksella. Uunissa ei ole lämpötilan säätöpeltiä.

### 3.5 Ohjaus

Meesauunia ajetaan kalkin kulutuksen mukaan. Ohjauksella tavoitellaan mahdollisimman vakaata tuotantoa. Käytännössä tavoitteisiin päästään, kun pystytään vakioimaan meesan syötön ja polton olosuhteet. Prosessin hallintaa vaikeuttaa poltettavan materiaalin pitkä viipymäaika uunissa. Vaikka uunin kalkin, savukaasujen ja pinnan lämpötilamittaukset implikoivat muutoksista uunin tuotannossa, lopulliset vaikutukset tuotannon häiriöistä näkee vasta jäännöskarbonaatista. Koska syöttöpään häiriöt pystytään todentamaan kunnolla vain polttopäässä, syötön tasaisuus korostuu entisestään. (Kemikaalikierto 2021.)

Meesauunin tuotantoa ohjataan meesasuoitimen syöttöpumpulla (ks. kuvio 8). Pumpun jälkeinen meesan virtaus ja sen tiheys määrittävät uunin tuotannon. Tyypillisesti meesan tiheys pidetään vakiona ennen suodinta. Suotimella pyritään meesan mahdollisimman tasaiseen kuiva-ainepitoisuuteen. Tämä edesauttaa flash-kuivurin tasaista toimintaa, joka puolestaan tekee uunin tuotannosta tasaista. Kuiva-ainepitoisuuden lisäksi tärkeää on meesan alkalipitoisuuden vaki-

oiminen. (Kemikaalikierto 2021.) Varsinkin korkeat alkalipitoisuudet aiheuttavat meesan kasaantumista uunissa renkaiksi ja palloiksi. Kasaantuminen johtaa uunin alasajoihin ja putsaukseen. (Bajpai 2016, 139.)



Kuvio 8. Kiertouunin mittauksia ja säätöjä (Blevins, Brown, McMillan & Wojsznis 2003, 329, muokattu)

Polton olosuhteet määrittää syötettävän polttoaineen määrä, polton ilmakerroin sekä liekin muoto, jonka vaikutukset uunin toimintaan käsiteltiin luvussa 3.1. Polton tavoitteena on hyvä kalkin laatu mahdollisimman pienellä polttoaineen kulutuksella. (Kemikaalikierto 2021.) Polttoaineen kulutuksen tehokkuus voidaan ilmoittaa meesauunin ominaisenergiankulutuksena.

Ominaisenergiankulutus ilmoittaa kuinka paljon uuni käyttää energiaa suhteessa uunin tuotantoon. Tyypillisesti tämä ilmoitetaan gigajouleina per tonni tuotettua kalkkia kohti (GJ/t CaO). Mitä pienempi uunin ominaisenergiankulutus on, sitä energiatehokkaammin uunin meesanpoltto toimii. (Adams 1999.)

Uunin ilmakerroin pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi. Näin parannetaan uunin energiatehokkuutta (Kemikaalikierto 2021). Ilmakerroin käsitellään tarkemmin luvussa 4.2. Palamiseen vaadittavaa ilmamäärää säädetään savukaasupuhaltimella, joka vaikuttaa samalla uunin alipaineeseen ja savukaasuvirtauksen määrään. Säättöä ohjataan uunin jäännöshappimittauksella, jonka optimaalinen arvo on välillä 1,5-2,5 %. (Kemikaalikierto 2021.)

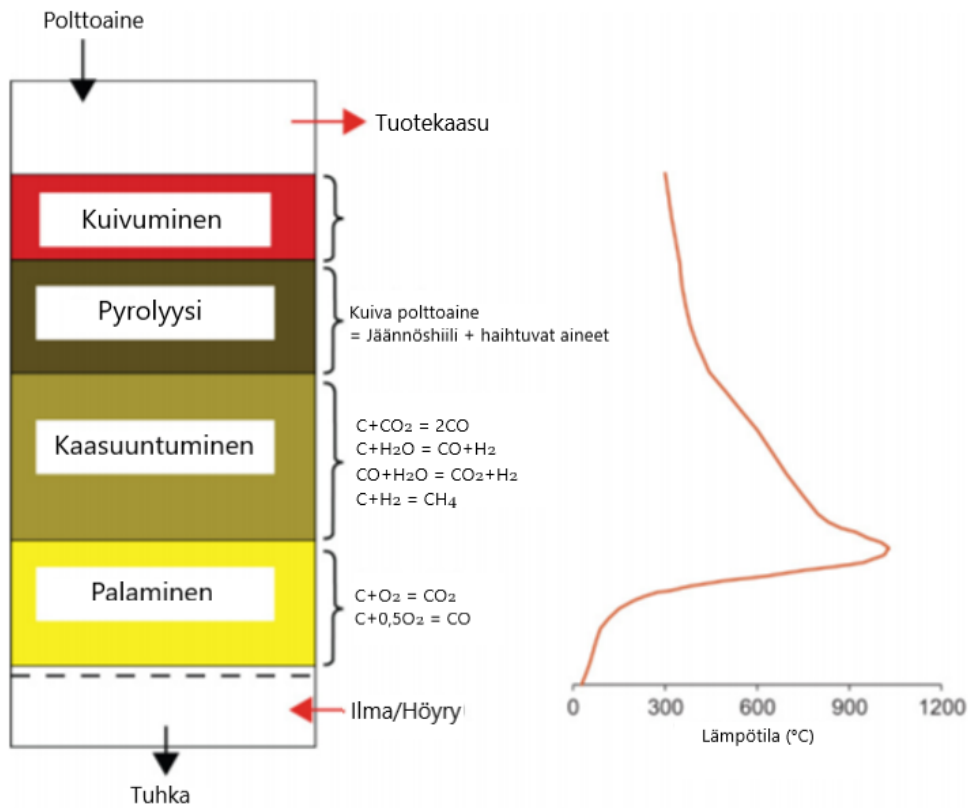
## 4 Kaasutus

### 4.1 Kaasuuntumisen teoria

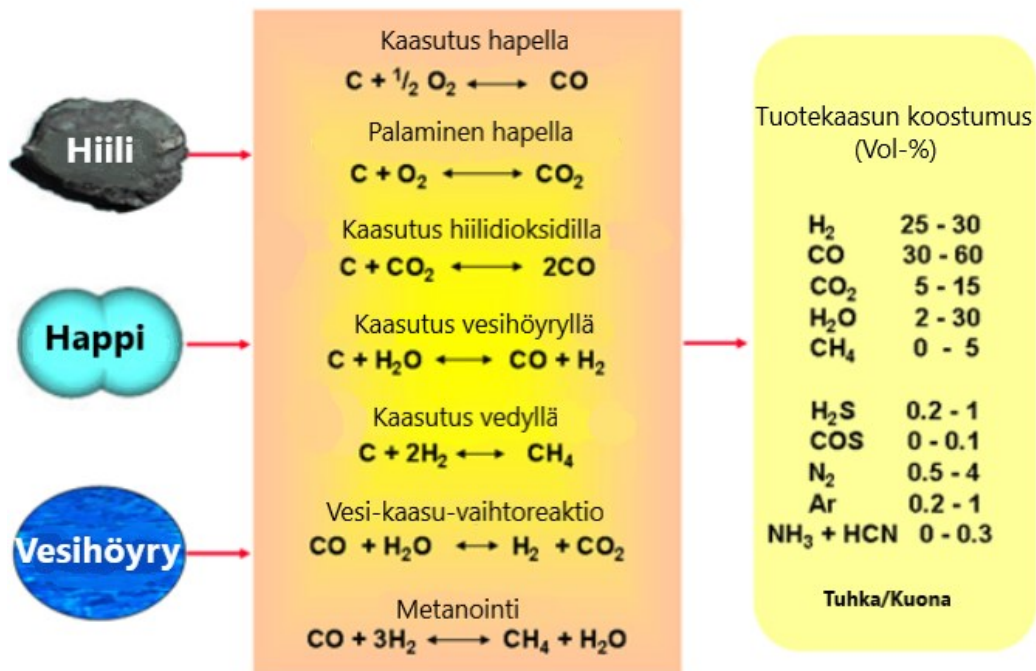
Kaasutuksessa polttoaine lämpökäsitellään kaasutusreaktorissa poltettavaksi tuotekaasuksi hapettavalla väliaineella. Kaasutus tuottaa kaasua, jäännöshiiltä, tervaa ja tuhkaa. Kaasutuksesta syntyvän tuotekaasun pääkomponentit ovat hiilimonoksidi (CO), hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), vesi (H<sub>2</sub>O), vety (H<sub>2</sub>) ja metaani (CH<sub>4</sub>). Reaktiona kaasutus tapahtuu pyrolyysin ja palamisen välissä kuitenkin hyödyntäen molempia tuotekaasun valmistuksessa. (Thermal gasification of biomass n.d.)

Reaktoriin syötettävä väliaine voi olla ilmaa, happea tai höyryä. Ilmaa on helposti saatavilla, mutta sen typpikaasupitoisuus laimentaa tuotekaasua ja näin ollen laskee sen lämpöarvoa. Happikaasutuksella päästään eroon tuotekaasua laimentavasta typestä. Tässä menetelmässä joudutaan kuitenkin käyttämään erillistä laitteistoa typen erotukseen ilmasta. Höyryn käyttäminen väliaineena vaatii ulkoisen lämmönlähteen, joka ylläpitää endotermistä kaasuuntumisreaktiota kaasuttimessa. (Basu 2006, 76.)

Reaktorin kaasuuntumisprosessin voi jakaa neljään eri vaiheeseen kuvion 9 mukaisesti. Kuivumisessa polttoaineen sisältämä kosteus höyrystyy. Pyrolyysissä polttoaine hajoaa lämmön vaikutuksesta haihtuviksi aineiksi ja jäännöshiileksi. Haihtuneet aineet koostuvat kevyistä kaasuista, tervasta sekä polyaromaattisista hiilivedyistä. Palamisella tuotetaan kaasutuksen vaatima termien energia. Energia synnytetään lisäämällä happea kaasutusreaktioon. Tämä happi reagoi polttoaineen jäännöshiilen kanssa muodostaen lämpöä. Lämpöä syntyy myös, jos happi pääsee reagoimaan reaktorissa vedyn kanssa. (Mts. 63-67.) Itse kaasutuksessa jäännöshiili ja kaasutusreaktorin kaasut reagoivat keskenään muodostaen poltettavia kaasuja haihtuneiden aineiden lisäksi (ks. kuvio 10) (Reactions & transformations n.d.).



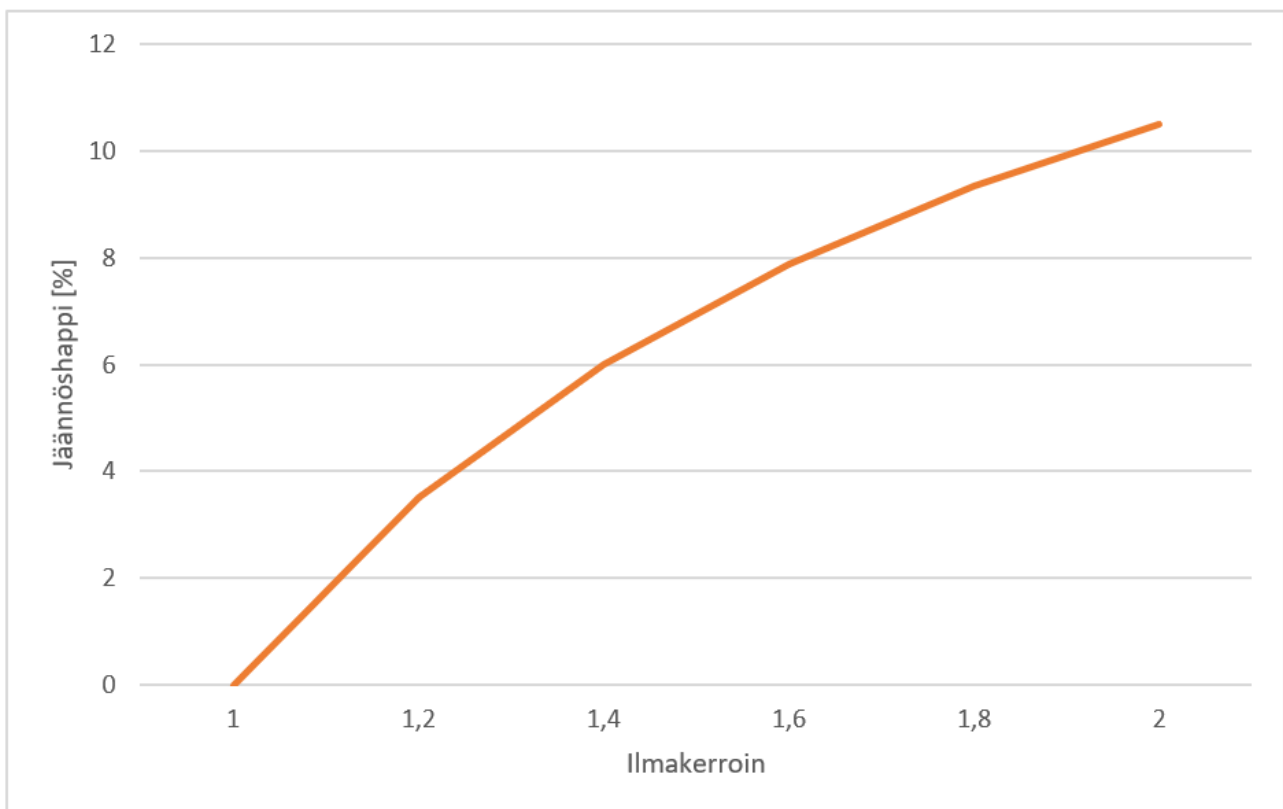
Kuvio 9. Kaasutuksen vaiheet vastavirtakaasuttimessa (Basu 2018, 226, muokattu)



Kuvio 10. Tärkeimmät kaasutus- ja palamisreaktiot (Reactions & transformations n.d, muokattu)

## 4.2 Ilmakerroin

Polttoaineelle pystytään laskemaan stoikiometrinen ilmamäärä, joka vastaa täydelliseen palamiseen tarvittavaa teoreettista minimi-ilmamäärää. Täydellinen palaminen teoreettisella ilmamäärällä on kuitenkin käytännössä mahdotonta. Tämän takia palamistapahtumaan tuodaan ylimääräilmaa. Ilmakerroin ilmoittaa palamiseen syötettävän ilman suhteen stoikiometriseen ilmamäärään. (Vakkilainen 2017, 37.) Ilmakerroin voidaan määrittää palamisreaktiosta syntyneen savukaasun jäännöshapesta (ks. kuvio 11).

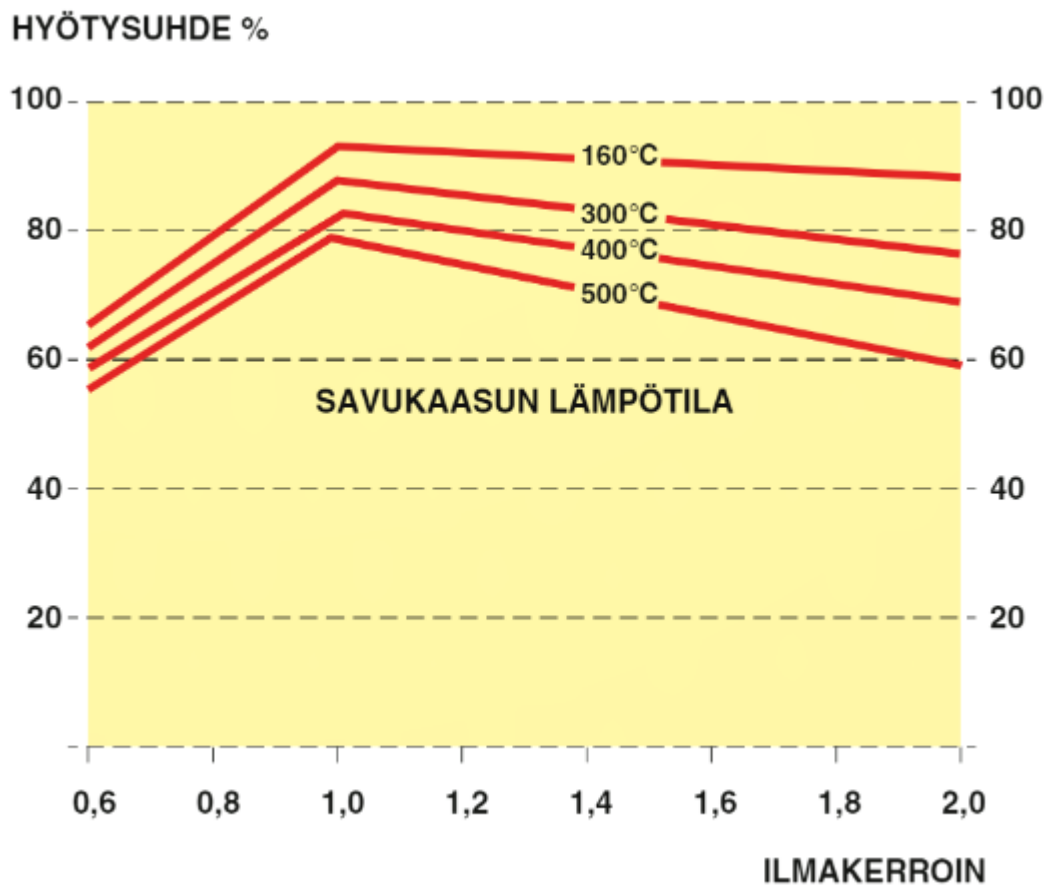


Kuvio 11. Ilmakerroin ja jäännöshappi (O2 learning handbook 2017, 5-6, muokattu)

Ilmakertoimella on suora vaikutus poltinpolton energiatehokkuuteen (ks. kuvio 12).

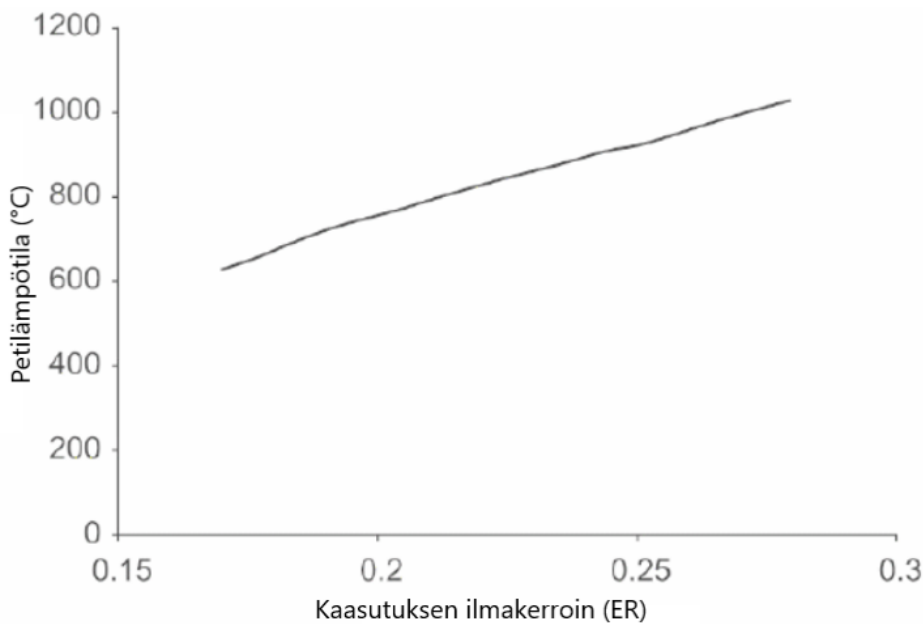
Ylimääräilmailalla energiaa kuluu hukkaan ilman lämmittämiseen. Ali-ilmailalla palaminen on epätäydellistä ja häkää alkaa muodostumaan. Palaminen on energiatehokkaimmillaan mahdollisimman pienellä yli-ilmakertoimella. (Suomalainen, Turunen & Vapaalahti 2015, 41.)





Kuvio 12. Ilmakertoimen vaikutus maakaasun palamisen hyötysuhteeseen (Maakaasukäsikirja 2014, 15)

Kaasutuksessa ilmakerroin on reilusti alle yhden ja sitä kutsutaan termillä ER (Equivalence ratio). ER-arvolla pystytään vaikuttamaan kaasuttimen tuotekaasun saantoon sekä lämpötilaan. Kun ER nousee, kaasuttimessa muodostunutta tuotekaasua palaa enemmän ja reaktorin lämpötila kasvaa (ks. kuvio 13). Lisääntynyt palaminen polttaa tuotekaasun hiilimonoksidia ja vetykaasua kasvavissa määrin hiilidioksidiksi ja vedeksi. Tämä ei ole toivottavaa lopputuotteen kannalta. Toisaalta liian pieni ER aiheuttaa epätäydellistä kaasuuntumista ja nostaa jäännöshiilen määrää kaasuttimessa. Kaasuttimissa ER pidetään tyypillisesti välillä 0,2-0,3. Tällä alueella poltettavan tuotekaasun saanto polttoaineesta on parhaimmillaan. (Basu 2006, 86-88.)



Kuvio 13. CFB-kaasuttimen petilämpötilan ja ER:n korrelaatio (Basu 2006, 90, muokattu)

### 4.3 Kuori polttoaineena

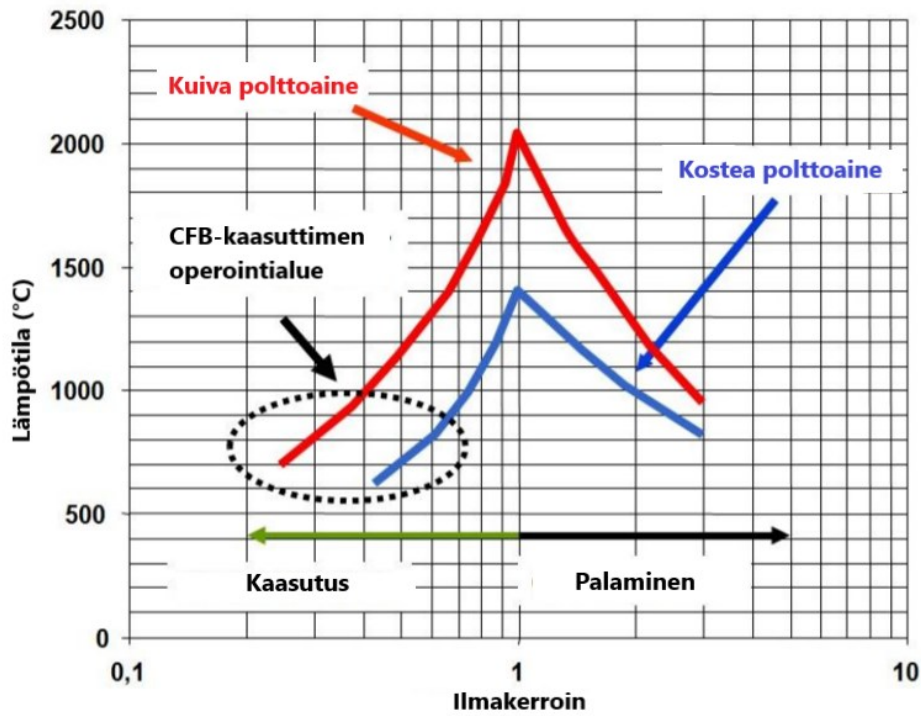
Äänekosken biotuotetehtaan kaasutuslaitos käyttää polttoaineena havu- ja koivukuorta. Kuoren tehdas saa sellupuun kuorinnasta. Havukuoren tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 18,5-20 MJ/kg. Koivulla arvo on 21-23 MJ/kg. Saapumistilassa havukuoren kosteus on 50-65 m-% ja koivun 45-55 m-%. Puun kuoren typpipitoisuus on 0,3-0,5 m-%. (Alakangas, Hurskainen, Korhonen & Laatikainen 2016, 205-206.)

Meesauunin apupolttoaineena käytettävän mäntypikiöljyn lämpöarvo on 38 MJ/kg ja typpipitoisuus 0,1 m-% (Ikonen 2012, 25). Vaikka mäntypikiöljy on polttoarvoltaan, homogeenisyydeltään ja typpipitoisuudeltaan kuorta parempi polttoaine, sen käyttö ei ole kannattavaa. Pikiöljy on huomattavasti kalliimpaa kuin kuori, joten sen polttaminen ei ole taloudellista. Biotuotetehtaan meesauunia pyritäänkin ajamaan pelkällä tuotekaasulla.

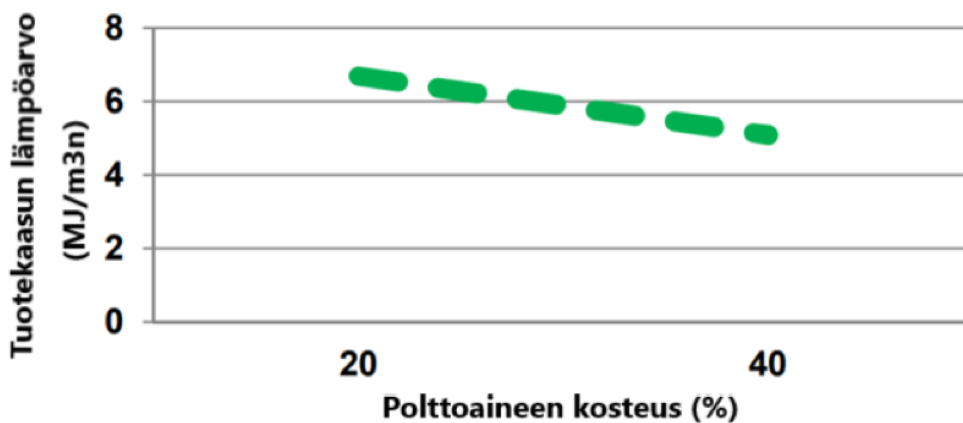
### 4.4 Polttoaineen kosteus

Polttoaineen kosteus laskee kaasuttimen hyötysuhdetta. Jokaista kaasuttimeen tuotavaa vesikiloa kohti kaasutin käyttää vähintään 2260 kJ energiaa sen höyrystämiseen. Energia on suoraan pois kaasutusreaktioista. Biomassan kaasutuksessa polttoaineen kosteus pidetään alle 20 %:n ja

korkeat kosteuspitoisuudet vaativat biomassan esikuivausta. (Basu 2018, 214-215.) Kuvioissa 14 ja 15 on esitelty polttoaineen kosteuden vaikutukset kaasuttimen ilmakertoimeen ja tuotekaasun lämpöarvoon. Kuviosta 14 voidaan todeta, että polttoaineen kosteuden noustessa joudutaan ilmakerrointa kasvattamaan, jotta lämpötila kaasuttimessa pysyy muuttumattomana. Kuviossa 15 ER:n nosto sekä lisääntynyt vesihöyry näkyvät tuotekaasun lämpöarvon laskuna.



Kuvio 14. Polttoaineen kosteuden vaikutus CFB-kaasuttimen ilmakertoimeen (Isaksson 2015, muokattu)



Kuvio 15. Polttoaineen kosteuden vaikutus tuotekaasun lämpöarvoon (Isaksson 2015, muokattu)

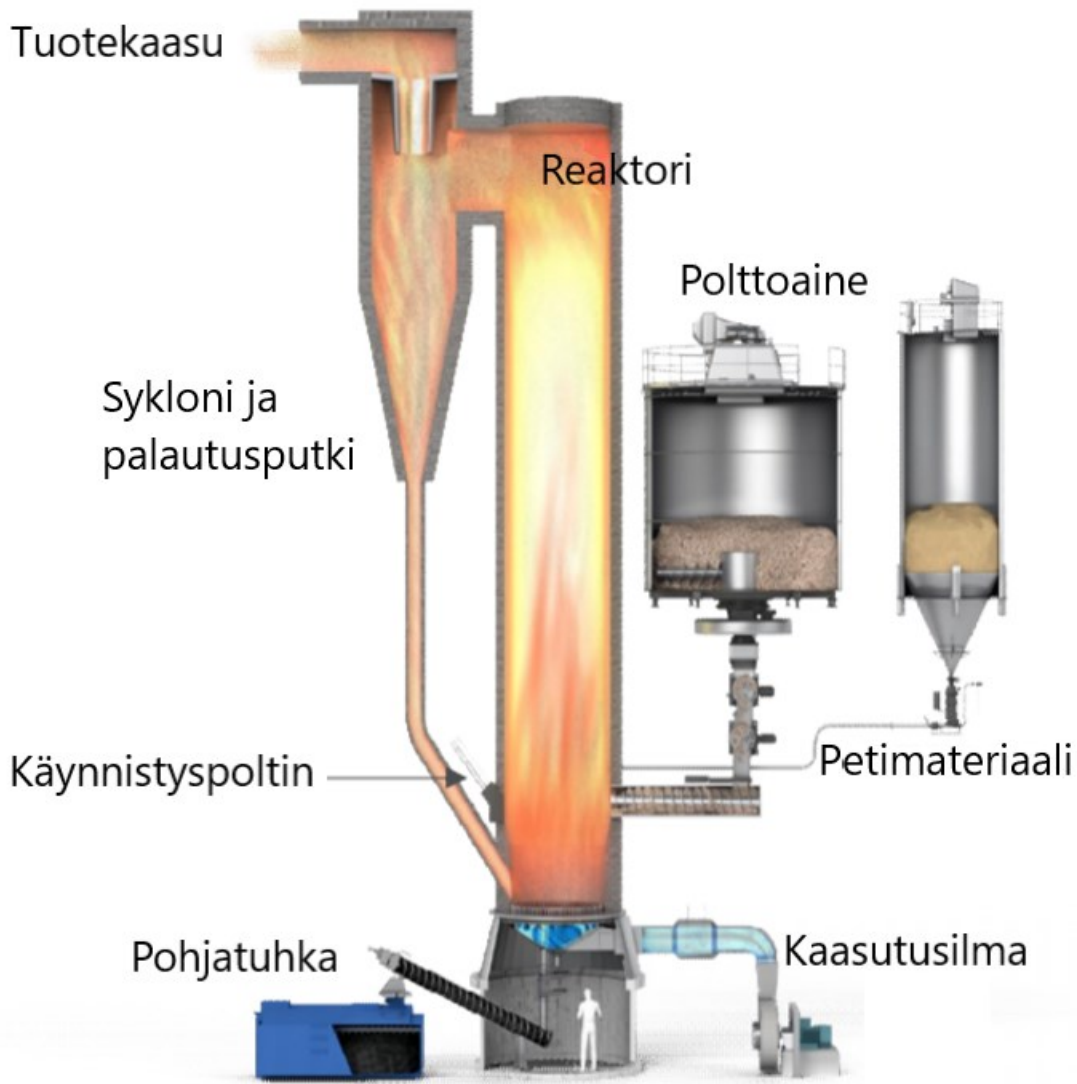
Biotuotetehtaalla kuori kuivataan viirakuivurilla ennen sen syöttämistä kaasuttimeen. Tyypillisesti viirakuivurissa polttoaine syötetään 0,05-0,10 m kerroksena liikkuvan viiran päälle. Polttoaineeseen puhalletaan kuumaa ilmaa, jonka vaikutuksesta biomassa kuivuu. Biomassan vesi poistuu kuuman ilman mukana kuivurista. Kuumailma saa lämpönsä joko hukkalämmöstä tai matalapainehöyrystä. (Vakkilainen 2017, 150.) Biotuotetehtaalla lämmönlähteenä toimii matalapainehöyry.

## 5 CFB-kaasutin

CFB-kaasutin eli kiertoleijupetikaasutin (Circulating Fluidized-Bed Gasifier) hyödyntää kaasutuksessa leijupetitekniikkaa. Leijupetikaasutuksessa polttoaine syötetään kaasutusväliaineella leijutettuun fluidisoituun petiin. Peti koostuu hienojakoisista partikkeleista, esimerkiksi hiekasta. Kaasuttimessa polttoaine ja kaasutusväliaine sekoittuvat kuuman petimateriaalin kanssa, jonka vaikutuksesta polttoaine kuivuu, pyrolysoituu, palaa ja kaasuuntuu. Laajan sekoittumisen vuoksi kaasuttimen petilämpötila on yhtenäinen. Tämä tekee petilämpötilan säädöstä ER:llä helppoa sekä antaa edellytykset kaasuttaa erilaisia polttoaineita kaasuttimessa. (Basu 2006, 62, 74-75.)

Leijupetikaasuttimet voidaan jakaa kuplapetikaasuttimiin (Bubbling Fluidized-Bed Gasifier) ja kiertoleijupetikaasuttimiin. Kuplapetikaasuttimissa polttoaine syötetään kaasuttimen reaktorissa sijaitsevaan kuplivaan petikerrokseen. BFB-kaasutin operoi alle 980 °C:n petilämpötilassa ja sen leijutusnopeus on 0,5-1,0 m/s. Kiertoleijupetikaasuttimessa petimateriaali on hajaantunut ympäri reaktoria ja sitä leijutetaan suurilla nopeuksilla (3,5-5,5 m/s). CFB-kaasuttimiin kuuluu sykloni, jolla estetään tuotekaasun mukana kulkevien kiinteiden aineiden poistuminen kaasuttimesta. Syklonissa eroteltu aines palautetaan takaisin reaktoriin palautusputken kautta. Reaktorin lämpötilaa pidetään välillä 800-1000 °C. (Basu 2018, 273-276.)

CFB-kaasuttimen koko reaktorin täyttävä kiertopeti antaa sille etuja BFB-kaasuttimeen verrattuna. Muun muassa polttoaineen konvertoituminen tuotekaasuksi on tehokkaampaa. Lisäksi CFB-kaasuttimella on vähemmän laadullisia vaatimuksia polttoaineelle. Ominaisuuksiensa vuoksi kiertoleijupetikaasutin soveltuu hyvin biomassan kaasutukseen. (Basu 2006, 74-75.) Kuviossa 16 on esitetty CFB-kaasuttimen rakenne. Kuvion kaasutin on Valmet Oyj:n kiertoleijupetikaasutin, joka vastaa laitteistoltaan Äänekosken biotuotetehtaan kaasutinta.



Kuvio 16. Valmet CFB-kaasutin (Isaksson 2015, muokattu)

## 6 PID-säädin

Teollisuuden prosessit vaativat säätämistä, jotta ne pysyvät hallinnassa. Säätäminen tapahtuu toimilaitteen ohjausta muuttamalla, joko käsiohjauksella manuaalisesti tai säätimellä automaattisesti. Automaattisen säädön peruseräteenä on pyrkiä saamaan prosessin mittaus vastaamaan haluttua asetusarvoa. Teollisuudessa säätimiksi valitaan lähes aina PID-säädin (Proportional-Integral-Derivative), josta PI-säädin on käytetyin säädinrakenne. (Harju & Marttinen 2000, 9, 67.)

## 6.1 Toimintaperiaate

PID-säädin koostuu nimensä mukaisesti suhdeosasta (P), integraaliosasta (I) ja derivointiosasta (D). Suhdeosa eli säätimen vahvistus muuttaa säätimen ohjausta ( $u(t)$ ) suoraan verrannollisesti mittauksen ja asetusarvon eroon ( $e(t)$ ) nähden. Vahvistus viritetään säätimeen parametrin  $K_p$  avulla. Koska vahvistus reagoi vain eroarvon muutoksiin, on sillä tapana jättää pysyvä säätöpoikkeama prosessiin. Poikkeamaa pystytään vähentämään vahvistusta kasvattamalla, mutta se saattaa johtaa säätöjärjestelmän värähtelyyn ja epästabiilisuuteen. Tämän vuoksi P-säädön kanssa käytetään usein I-osaa. (Savolainen & Vaittinen, 30-34.)

Integraaliosa poistaa säätöpoikkeaman ajan kuluessa. I-osa laskee mittauksen ja asetusarvon eron pinta-alaa jatkuvasti yhteen. Näin ollen säätimen ohjaus voi muuttua, vaikka säätöpoikkeama kävisi nollassa. Integraaliosa vaikuttaa ohjaukseen niin kauan, kunnes säätöpoikkeama loppuu. Säätimen I-osan painoarvoon vaikutetaan integrointiajalla  $T_i$ . Integrointiajalla voidaan karkeasti määrittää se aika, joka kuluu mittauksen ja ohjauksen erosuureen poistamiseen. (Mts. 34.)

Pienet mittauksen ja asetusarvon muutokset voivat kieliä suuremmista häiriöistä prosessissa. Derivointiosalla näihin häiriöihin vastataan ennakoivasti nopealla säätimen ohjauksen muutoksella. Derivointiosassa säätimen ohjaus saa arvonsa erosuureen aikaderivaatasta eli säätöpoikkeaman kulmakertoimesta. Derivointiajalla  $T_D$  vaikutetaan derivointiosan suuruuteen säätimessä.  $T_D$  ilmoittaa karkeasti ajan, jonka sisällä säätimen ohjaus saa vahvistusta säätöpoikkeaman tapahtumasta alkaen. PID-säädin on kokonaisuudessaan seuraava:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

missä integrointi- ja derivointiaika ilmoitetaan sekunteina. (Mts. 36-37.)

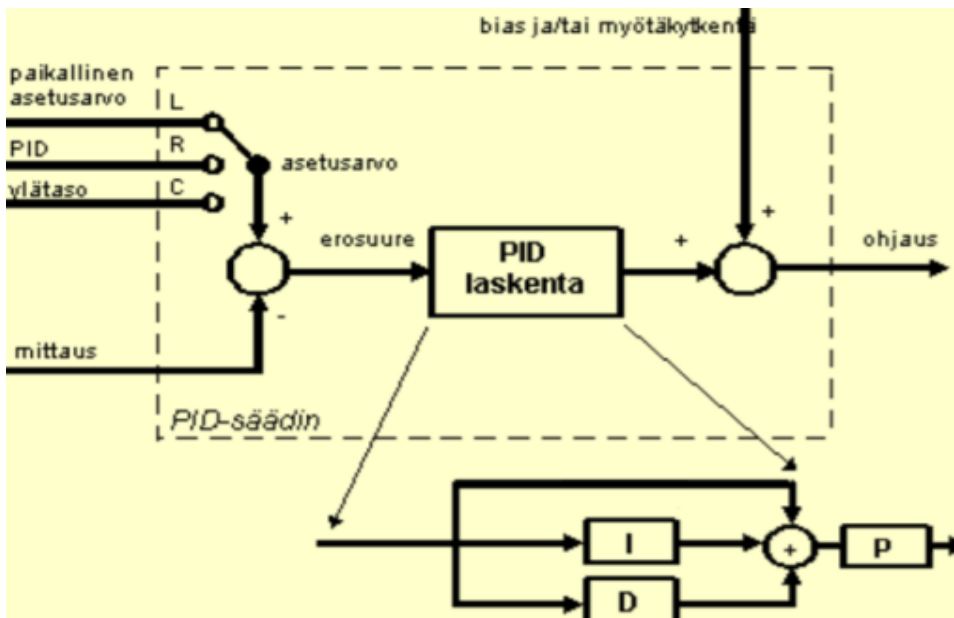
Kuten kaavasta näkee, integrointiajan kasvattaminen vähentää sen vaikutusta säädössä. Toisaalta jos integrointiajan laittaa hyvin pieneksi, se aiheuttaa vahvan ohjauksen kasvun. D-osan lukuarvoa nostamalla saadaan voimakkaampi ohjauksen muutos häiriötilanteessa. D-osalla onkin tapana vahvistaa prosessin mittauskohinaa. Haitallista ominaisuutta poistetaan mittauksen suodatuksella tai

derivoinnin laskemistapaa muuttamalla. Prosessiteollisuudessa derivointiosa on usein jätetty kokonaan pois. Tällöin sen arvo on nolla säätimessä ja säädin on PI-säädin. PD-säädin saadaan, kun integrointi-aika nostetaan todella suureksi. (Harju & Marttinen 2000, 78-79.) Taulukkoon 1 on koottu PID-säätimen eri osien edut ja haitat.

Taulukko 1. PID-säätimen osien edut ja haitat (Harju & Marttinen 2000, 80)

	P-osa	I-osa	D-osa
Tavoite	Poistaa virhe	Poistaa pysyvä virhe	Nopeuttaa vastetta
Haitta	Pysyvä virhe	Ylitys, hidas vaste	Herkkyys kohinalle

PID-säädin voi saada asetusarvonsa kolmesta eri lähteestä (ks. kuvio 17). Local (L) asetuksella säädin pyrkii käyttäjän asettamaan paikalliseen asetusarvoon. Remote (R) ja Computer (C) asetuksella säätimen asetusarvo tulee ylemmän tason säätimeltä. C-tilassa säätimen asetusarvo määrittyy järjestelmän ulkopuolisesta laskennasta. Remotella asetusarvo saadaan järjestelmän sisällä olevasta PID-säätimestä. Remoten tai Computerin ollessa käytössä, säätöä kutsutaan kaskadisäädöksi. (Mts. 67-68.)



Kuvio 17. PID-säätimen rakenne (Harju & Marttinen 2000, 67, 90, muokattu)

Kuvion 17 bias-termillä tarkoitetaan säätimen ohjauksen vakiotasoa erosuureen ollessa nolla. Myötäkytkennällä kompensoidaan säätöpiirin häiriöitä. Myötäkytkentä muuttaa säätöpiirin ohjausta ennen kuin häiriöt näkyvät säätimen mittauksessa. (Mts. 36, 72, 93.)

## 6.2 Viritys

Säädöstä ei ole hyötyä, jos se ei ole hyvin viritetty. PID-säätimen viritys tarkoittaa säätimen parametrien valitsemista siten, että se toimii halutusti. Käytännössä hyvä säätöjärjestelmä ei sisällä suurta värähtelyä, eikä mittauksen ja asetusarvon isoa poikkeamaa. (Savolainen & Vaittinen 2007, 41.)

Jotta säädin voidaan virittää, täytyy aluksi tietää, miten prosessin halutaan toimivan. Säätimen toiminta onkin aina prosessikohtaista. Säätöpiirin parametrien hakeminen ei voi tapahtua yksitellen, koska kaikki parametrit ovat sidoksissa toisiinsa ja vaikuttavat säädettävän järjestelmän ominaisuuksiin. Tämä korostaa säädettävän prosessin tuntemusta. Eri tilanteet prosessissa vaativat tietynlaista säätöpiirin ohjausta. (Harju & Marttinen 2000, 146.)

### 6.2.1 Säätöpiirin häiriöt

Säätöpiirin häiriöitä voi olla esimerkiksi mittauskohina tai kuormitushäiriöt. Näillä häiriöillä on tapana kertaantua yksittäisestä prosessista toiseen. Säätöpiirin häiriöiden määrittämisessä ja korjaamisessa on siis tarpeellista tutkia myös muiden säätöpiirien vaikutuksia säädettävään prosessiin. Esimerkiksi piirin värähtely voi johtua itse säätöpiiristä tai sen ulkopuolelta tulevasta häiriöstä. (Harju & Marttinen 2000, 19.)

Värähtelyn lähteen pystyy määrittämään pysäyttämällä toimilaitteen ohjauksen. Jos säätöpiiri jatkaa värähtelyä säätimen ollessa käsiohjauksella, on värähtelyn tultava säätöpiirin ulkopuolisesta häiriöstä. Tällöin ulkopuolinen säätöpiiri on viritettävä uudelleen tai sen laitteistoa on paranneltava. Mikäli edellä mainitut keinot eivät auta, voi ongelmaa yrittää korjata myötäkytkennällä. (Mts. 19.)

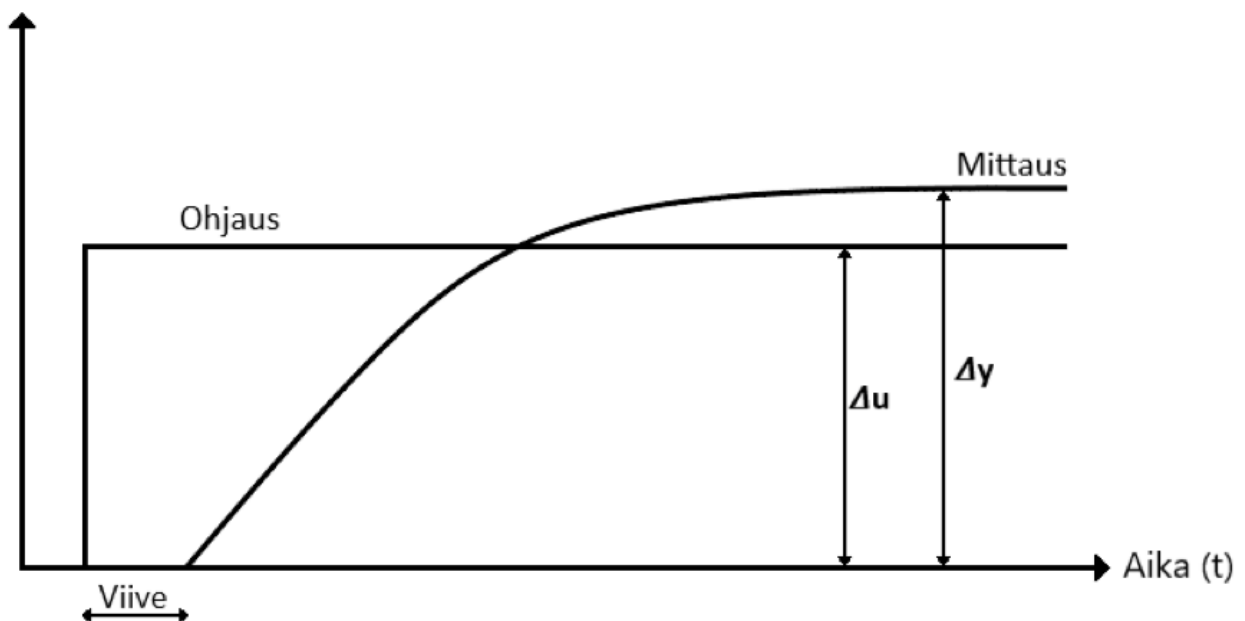
Jos taas käsiohjaukselle vaihto poistaa säätöpiirin värähtelyn, häiriön lähde löytyy säädettävästä säätöpiiristä. Vika voi löytyä säätöpiirin viritysparametreista tai ohjattavasta toimilaitteesta. Mikäli



vika on toimilaitteessa, on se huollettava. Huollolla korjattu prosessisäätö ei kuitenkaan täysin välttä virityksen tarkistamista. Vaikka säätöpiirin värähtely olisi aiheutunut pelkästä toimilaitteesta, virityksen hyvyys pitää silti aina varmistaa toimilaitteen käyttöönotossa. (Mts. 19.)

## 6.2.2 Viritysparametrien määrittäminen

Askelvastekoe on yksinkertaisin tapa mallintaa säädettävä prosessi. Kokeessa säätimeen tehdään käsiohjauksella askelmainen ohjauksen muutos (ks. kuvio 18). Prosessin käyttäytyminen otetaan talteen (esim. trendille) ja siitä määritetään säädettävän järjestelmän viritysparametrit. (Harju & Marttinen 2000, 115, 136.) Määrittäminen tapahtuu laskukaavoilla, joihin sijoitetaan askelvastekokeen mittausdata. Kaavat ottavat huomioon esimerkiksi säätimen ohjauksen ( $u(t)$ ) vaikutuksen mittaukseen ( $y(t)$ ) sekä viiveen, joka kuluu ohjauksen muutoshetkestä mittauksen ensimmäiseen muutokseen. (Savolainen & Vaittinen 2007, 27, 41-42.) Koe pyritään suorittamaan häiriöttömässä tasapainotilassa, jolloin mittaustulokset ovat mahdollisimman käyttökelpoisia. Täysi häiriöttömyys prosessissa on kuitenkin käytännössä vaikea saavuttaa. (Harju & Marttinen 2000, 136.)



Kuvio 18. Esimerkki askelvastekokeesta (Savolainen & Vaittinen 2007, 27, muokattu)

Toinen tapa virittää säädin on ”yritys ja erehdys -menetelmä”. Menetelmässä säätimen parametreja muutetaan niin kauan kunnes säätimen toiminta todetaan optimaaliseksi. Viritystavassa korostuu viritäjän kokemus, sillä hyvien vitysparemetrien löytäminen voi viedä paljon aikaa ja häiritä viritettävän prosessin toimintaa. (Harju & Marttinen 2000, 155.)

Säätimen vityksen voi myös tehdä vitystyökaluilla. Vitystyökalut hyödyntävät viritettävän prosessin mittausdataa ja muodostavat tästä datasta prosessimallin. Saadusta mallista pystytään, askelvastekokeen tavoin, laskemaan säätimelle vitysparemetrit. Vitystyökalut tarjoavat mallinnuksen lisäksi mahdollisuuden analysoida ja simuloida prosesseja. (Mts. 11, 114, 157.)

Säätöpiirin vitysparemetrien määrittämisen jälkeen, pitää säätöpiirin vityksen toimivuus tarkistaa. Tämä tapahtuu kytkemällä se automaatile. Automaattilassa säätöpiirin asetusarvoa muutetaan pienin askelein tasapainotilan ympärillä. Vitystä voidaan pitää toimivana, jos säätöpiirin mitaus seuraa muuttuvaa asetusarvoa ripeästi, eikä se sisällä suurempia värähtelyitä. (Savolainen & Vaittänen 2007, 42.)

Vitysmenetelmistä saadut vitysparemetrit ovat harvoin täysin optimaaliset säätöpiiriin. Siksi ne vaativat hienovityttämistä ennen lopullista käyttöönottoa. Säätösuureen värähtelyä kompensoidaan pienentämällä vahvistusta. Jos mittauksella kestää kauan päästä asetusarvoon, lisätään vahvistusta. Tavallisesti pärjätäänkin pelkän vahvistuksen hienovityttämällä. Mikäli vahvistuksen muutokset eivät paranna säätöä riittävästi, voidaan integrointi- ja derivointiaikaa hieman muuttaa. (Mts. 42.)

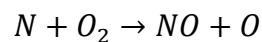
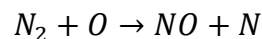
## **7 Typenoksidipäästöjen muodostuminen poltinpoltossa**

Typenoksidipäästöt aiheuttavat ilman saastumista esimerkiksi happamien laskeumien muodossa. Suurin osa päästöistä on ihmisen aikaansaamia ja huomattava määrä niistä muodostuu liikenteen ja energiantuotannon polttoprosesseissa. Typenoksidi ( $\text{NO}_x$ ) on sateenvarjotermi, jonka alle kuuluu typen ja hapen yhdisteet. Palamistapahtumassa näistä yhdisteistä eniten syntyy typpimonoksidia ( $\text{NO}$ ) ( $\geq 95\%$ ). Loput noin 5 % on typpidioksidia ( $\text{NO}_2$ ). Ympäristövaikutusten kannalta typpimonoksidilla ja typpidioksidilla ei ole suurta eroa, sillä enimmäisosa typpimonoksidista hapettuu ilmakehässä typpidioksidiksi. Kolmantena tärkeänä  $\text{NO}_x$ -päästönä voidaan pitää dityppi-

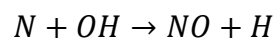
oksidia ( $N_2O$ ). Arkikielessä ilokaasuna tunnettu  $NO_x$ -yhdiste on haitallinen varsinkin ilmakehän otsonille. Polttoprosesseissa ilokaasua syntyy tavallisesti vähän, joten sen merkitys on muihin  $NO_x$ -päästöihin verrattuna pieni. Ainoastaan leijupetipoltossa on havaittu merkittäviä ilokaasupitoisuuksia. (Raiko, Saastamoinen, Hupa, Kurki-Suonio 2002, 300-301.) Tässä luvussa keskitytään  $NO$ -päästöjen muodostumiseen, koska muiden  $NO_x$ -päästöjen osuus suhteessa typpimonoksidipäästöihin on poltinpoltossa häviävän pieni.

## 7.1 Terminen $NO$

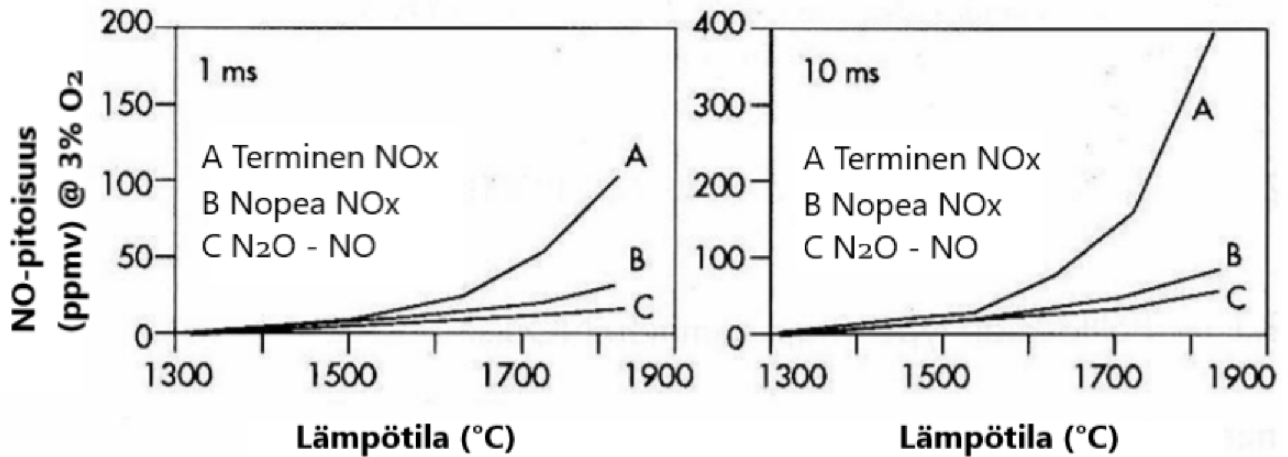
Typpimonoksidin muodostuminen vaatii molekyyllitypen hajoamista typpi-atomeiksi. Happimolekyyli ( $O_2$ ) ei pysty hajottamaan polttoilman typpimolekyyliä suorassa reaktiossa, vaikka se tapahtuisi korkeassa lämpötilassa. Suoran reaktion sijaan typpimonoksidia syntyy reaktioketjusta, joka saa alkunsa typpimolekyylistä ( $N_2$ ) ja happiatomista ( $O$ ):



Jos reaktioketju tapahtuu alistoikiometrisissä olosuhteissa, happimolekyylin rooli typen hapettajana vähenee. Reaktiossa happimolekyylin korvaa hydroksyyli-radikaali ( $OH$ ):



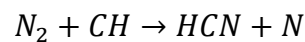
Ketjureaktioita kutsutaan Zeldovichin mekanismiksi. Mekanismin alkamista rajoittaa vapaiden happiatomien pitoisuus palamistapahtumassa. Happiatomien määrä reaktiossa kasvaa, joko lisäämällä palamisilmaa tai nostamalla lämpötilaa. Erityisesti korkeat lämpötilat kasvattavat  $NO$ -päästöjä poltossa (ks. kuvio 19). Kasvua edesauttaa savukaasujen pitkä viipymäaika näissä lämpötiloissa.  $NO$ :n muodostuminen on vähäistä alle  $1400\text{ °C}$ :n lämpötilassa. Muodostuminen kasvaa eksponentiaalisesti, kun lämpötila nousee yli  $1600\text{ °C}$ :n. Koska typpimonoksidin muodostus on hyvin lämpötilaherkkää, nimitetään Zeldovichin menetelmää myös nimellä terminen  $NO$ . (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 4-12, 4-13.)



Kuvio 19. Termisen NO:n lämpötila riippuvuus 1 ms ja 10 ms viiveajoissa. (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 4-13, muokattu)

## 7.2 Nopea NO

Toinen reaktiopolkku NO:n muodostukseen alkaa, kun hiilivetyradikaali (CH) ja palamisilman typpimolekyylireagoivat keskenään muodostaen vetysyanidin (HCN) ja typpiatomia (N):



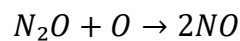
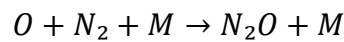
Reaktiotuotteet jatkavat reagoimistaan typpimonoksidiksi:



Hiilivetyradikaalin kautta muodostunutta typpimonoksidia kutsutaan nopeaksi NO:ksi. Nopeaa NO:ta kehittyy liekin polttovyöhykkeessä, polttoaine rikkaissa olosuhteissa, jossa CH-radikaaleja on läsnä. Nopeaa NO:ta muodostuu palamisessa nopeasti ja se on voimakkainta alistoikiometrisissä kylmissä liekeissä pienellä viipymäajalla. Nopean NO:n osuus NO-päästöistä on usein alle 5%. (Raiko ym. 2002, 308-309.)

### 7.3 NO:n muodostus N<sub>2</sub>O-väliuotteen kautta

Typpimonoksidia voi syntyä myös ilokaasun ja O-atomin keskinäisessä reaktiossa. Reaktion vaatima ilokaasu muodostuu typen ja happiatomin reaktiosta, kun kaasukomponentti (M) on läsnä. Reaktiopolkua NO:n muodostukseen on seuraava:

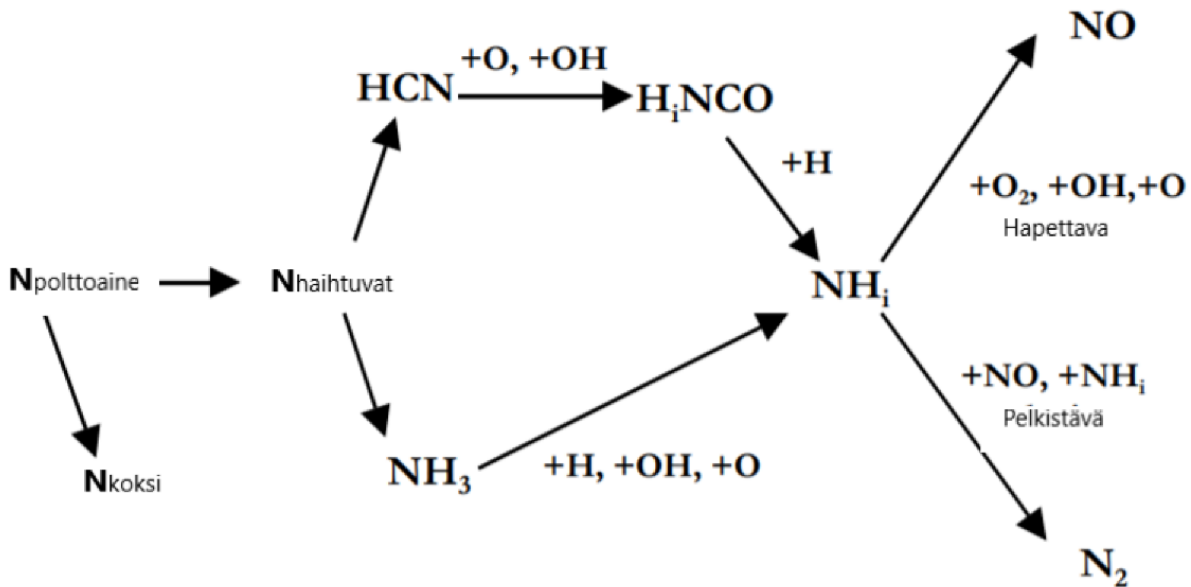


Poltinpoltossa N<sub>2</sub>O-väliuotteen kautta muodostunutta typpimonoksidia voidaan pitää vähäisenä (ks. kuvio 19). Reaktio vahvistuu ilmakertoimen ja paineen kasvaessa. Esimerkiksi dieselmootoreissa N<sub>2</sub>O:n kautta muodostunut typpimonoksidi on merkittävä osa NO<sub>x</sub>-päästöistä. (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 4-14.)

### 7.4 Polttoaine NO

Polttoaine NO syntyy nimensä mukaisesti polttoaineen typestä. Polttoaineessa typpeä on huomattavasti vähemmän kuin palamisilmassa, mutta se on reaktiivisempaa poltossa. Reaktiivisuuden johdosta typpipitoisten polttoaineiden NO-päästöt ovat tyypillisesti korkeampia kuin typettömien polttoaineiden. (Raiko ym. 2002, 308.)

Polttoaine NO:n muodostuminen alkaa, kun polttoaine pyrolysoituu. Pyrolyysissä polttoaineesta vapautuu typpeä, joka konvertoituu pienimolekyylisiksi kaasumaisiksi yhdisteiksi, kuten syanivedyksi (HCN) ja ammoniakiksi (NH<sub>3</sub>). Jos nämä reaktiotuotteet pääsevät reagoimaan happipitoisten komponenttien kanssa, syntyy typpimonoksidia. Polttoaine NO on nopean NO:n tavoin lievästi riippuvainen lämpötilasta. Sen sijaan stoikiometrialla ja ilmakertoimella on suuri merkitys: ilman happipitoisten komponenttien läsnäoloa HCN ja NH<sub>3</sub> reagoivat molekyylytypeksi (ks. kuvio 20). (Mts. 308-309.)



Kuvio 20. Polttoainetyypen reaktiopolut (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 4-17, muokattu)

## 7.5 $\text{NO}_x$ -päästöjen hallinta meesauunissa

$\text{NO}_x$ -päästöjen määrään voidaan vaikuttaa primäärisillä ja/tai sekundäärisillä menetelmillä. Primäärimenetelmillä vähennetään  $\text{NO}_x$ -päästöjen syntyä puuttamalla polttoprosessiin. Sekundäärimenetelmillä poistetaan palamisesta syntyneitä  $\text{NO}_x$ -päästöjä savukaasuista. Polttoprosessiin vaikuttaminen on usein edullisempaa, mutta savukaasujen käsittely poistaa tehokkaasti  $\text{NO}_x$ -päästöjä. (Raiko ym. 2002, 303, 317, 332.) Meesauuneissa sovelletaan lähinnä primäärisiä menetelmiä. Meesauunin suuri savukaasujen pölypitoisuus ja matala lämpötila eivät ole optimaalisia sekundäärimenetelmien tehokkaaseen käyttöön (A review of  $\text{NO}_x$  emission... 1999, 24; Hakkarainen 2014, 88-89).

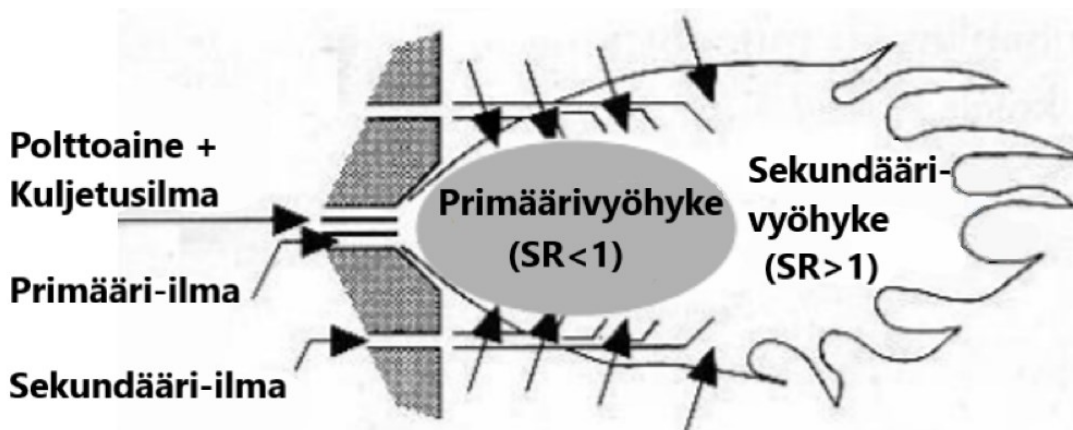
Euroopan unioni esittää meesauunille BAT-tekniikkana (Best Available Techniques) neljää eri polttotekniikkaan perustuvaa  $\text{NO}_x$ -vähennysmenetelmää. Tekniikat ovat:

1. Optimoitu palaminen ja palamisen hallinta
2. Hyvä polttoaineen ja ilman sekoittuminen
3. Low- $\text{NO}_x$ -poltin
4. Polttoaineen valinta/vähätyypinen polttoaine

Optimoidulla palamisella ja palamisen hallinnalla tarkoitetaan prosessimittauksien hyödyntämistä polton säädöissä. Säättämällä uunin jäännöshappea, lämpötilaprofiilia tai ilmajakoa voidaan  $\text{NO}_x$ -päästöjä vähentää. (Direktiivi 2014/687/EU, 100, 119.) Erhardin (1999, 16) mukaan optimoidulla palamisella tavoitellaan parasta mahdollista palamisen hyötysuhdetta, jossa  $\text{NO}_x$ -päästöjen määrä on hyvällä tasolla ja hallittavissa.

Hyvällä polttoaineen ja ilman sekoittumisella varmistetaan täydellinen palaminen. Jos sekoittuminen on heikkoa, häkää voi syntyä, vaikka jäännöshappimittaus näyttäisi tavoitearvoa. Savukaasujen häkäpitoisuutta kompensoidaan ilmaylimäärällä, mikä lisää typpimonoksidin muodostumista. (Suomalainen ym. 2015, 14-15, 62-63.) Ilman sekoittuminen polttoaineeseen voidaan hoitaa kohdan 3 ehdottamalla Low-  $\text{NO}_x$ -polttimella.

Low- $\text{NO}_x$ -polttimet perustuvat ilman ja polttoaineen vaiheistukseen. Ilmavaiheistuksessa liekkiin luodaan ali-ilmainen alue, jolla saadaan pelkistettyä polttoaineen typen yhdisteet typpimolekyyleiksi. Loppu ilma palamiseen tuodaan liekin reunoilta, jossa polttoaine  $\text{NO}$ :n muodostuminen on enää vähäistä (ks. kuvio 21). Ilmavaiheistus vähentää myös termisen  $\text{NO}$ :n muodostumista, koska se madaltaa liekin lämpötilahuippuja ja hapen määrää  $\text{NO}_x$ :ien muodostumisvyöhykkeessä. Polttoainevaiheistuksessa polttoaineen palamista vaiheistetaan eri polttovyöhykkeisiin. Näissä vyöhykkeissä typpimonoksidia ja typen yhdisteitä pyritään pelkistämään ja hapettamaan typpimolekyyleiksi. (Raiko ym. 2002, 309, 312-313, 447.)



Kuvio 21. Ilmavaiheistus polttimessa. SR kuvastaa stoikiometriseen palamiseen vaadittavaa ilmamäärää (Zevenhoven & Kilpinen, 4-18, muokattu)

Kuten luvussa 7.4 kerrotaan, polttoaineen typpipitoisuus näkyy suoraan NO<sub>x</sub>-päästöjen määrässä. Esimerkiksi biomassan tai väkevien hajukaasujen polttaminen tuottaa enemmän NO<sub>x</sub>-päästöjä kuin öljyn tai maakaasun, koska niiden typpipitoisuus on korkeampi. Toisaalta eri polttoaineet palavat eri lämpötiloissa, jolloin termisen NO:n vaikutus osaltaan kasvaa NO<sub>x</sub>-päästöissä. (Direktiivi 2014/687/EU, 119.)

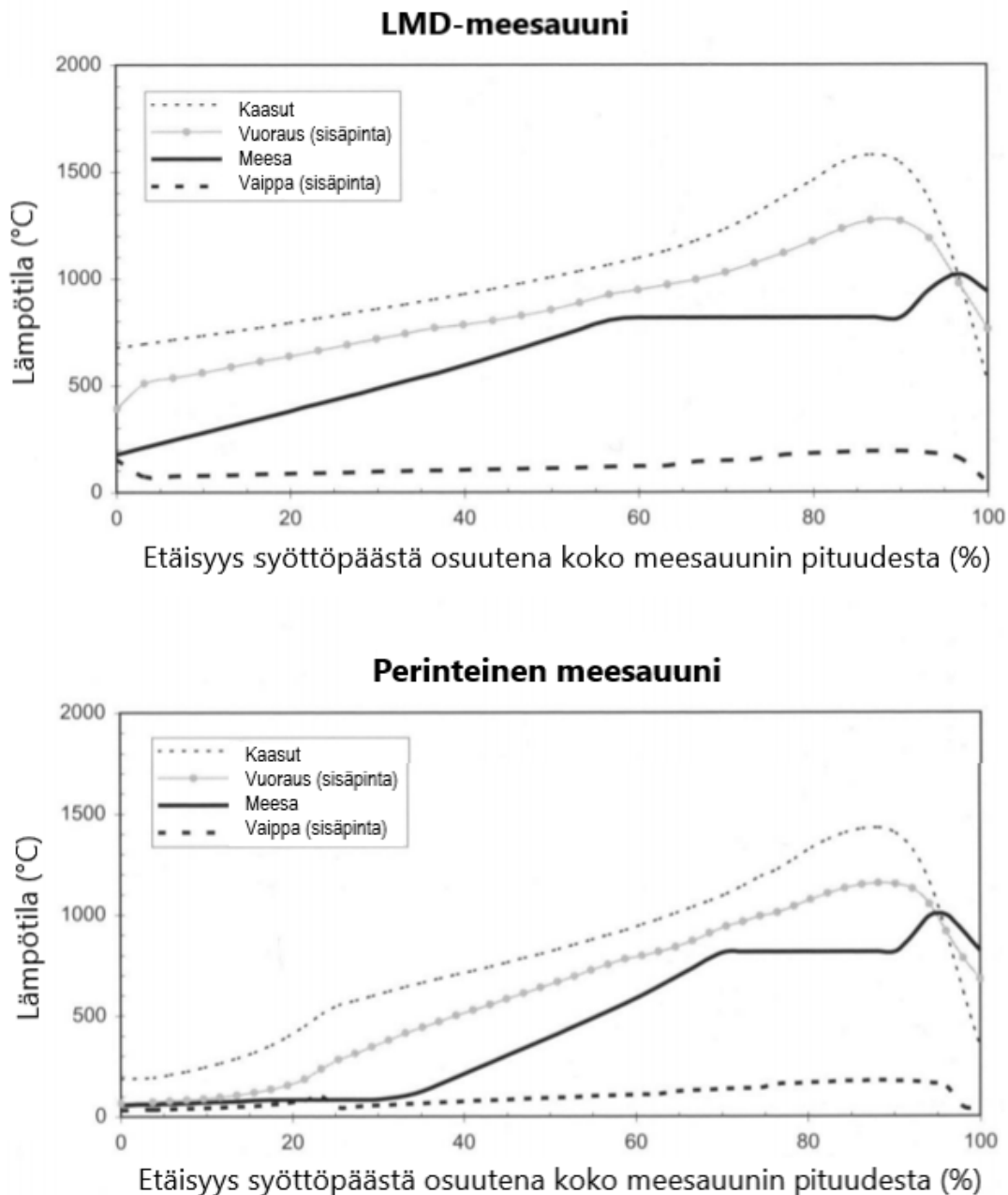
Biotuotetehtaan meesauunissa NO<sub>x</sub>-päästöjä hallitaan vähennysmenetelmillä 1-3. Kohdan neljä vähennysmenetelmän ei voida sanoa olevan käytössä tehtaan meesauunissa, koska uunissa käytetään polttoaineena kuoren kaasutuslaitoksen tuottamaa korkea typpipitoista tuotekaasua. Uunissa poltetaan myös kaustisoinnissa syntyvät laimeat hajukaasut. Hajukaasuilla ei kuitenkaan näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta uunin NO<sub>x</sub>-päästöihin (ks. liite 1).

## 8 Meesauunin tehonsäätö NO<sub>x</sub>:ien mukaan

Kolmessa ruotsalaisessa meesauunissa on tutkittu polttoaineen vaikutusta NO<sub>x</sub>-päästöihin. Polttoaineina tutkimuksessa käytettiin mm. mäntyöljyä, polttoöljyä, metanolia ja kuorikaasuttimen tuotekaasua. Tuloksissa polttoaineen typpipitoisuus korreloi yleisesti NO<sub>x</sub>-päästöjen kanssa. Yhdessä meesauunissa havaittiin vahvaa korrelaatiota NO<sub>x</sub>-päästöjen ja palamislämpötilan välillä. Samanlaista yhtenäisyyttä on löydetty myös yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa, jossa mitattiin kuuden eri meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöjä. Tutkimuksessa yhden meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöt olivat sidoksissa vahvasti palamislämpötilaan. (A review of NO<sub>x</sub> emission... 1999, 24.)

Tutkimuksien valossa näyttää siltä, että joissain meesauuneissa NO<sub>x</sub>-päästöt kertovat hyvin kuinka kuumana uuni käy. Kuviossa 22 on esitetty flash-kuivurilla (Lime mud dryer) varustetun meesauunin sekä perinteisen meesauunin lämpötilaprofiilit. Kuvioista nähdään, että modernin meesauunin pituudesta noin 15 % sisältää yli 1400 °C:n lämpötilassa olevia kaasuja. Polttopäässä kaasut ovat korkeimmillaan 1600 °C:n lämpötilassa. Kuten luvussa 7.1 todettiin, yli 1400 °C:n lämpötiloissa termisen NO:n määrä alkaa kasvamaan nopeasti. Yli 1600 °C:n lämpötiloissa termisen NO:n muodostuminen kiihtyy voimakkaasti. Koska NO<sub>x</sub>-päästöt ovat riippuvaisia lämpötilasta, ja parhaimmillaan korreloivat sen kanssa suoraan, voidaan niillä arvioida poltetun kalkin laatua. Näin tehdään Äänekosken biotuotetehtaalla, jossa uunin laadukkaasta tuotannosta kertoo tietty NO<sub>x</sub>-taso. Käytännössä uunin tehoa muutetaan pääsääntöisesti NO<sub>x</sub>-päästöjen mukaan.



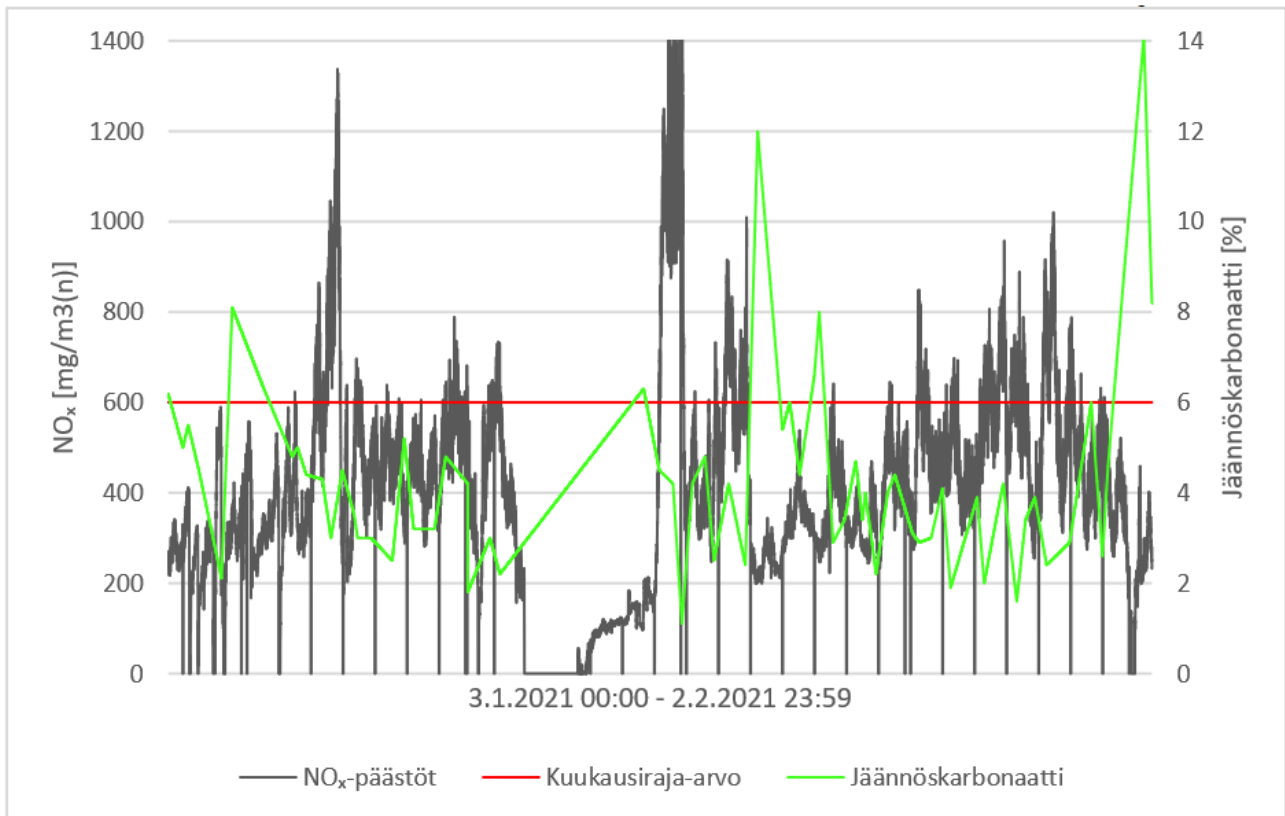


Kuvio 22. Meesauunin lämpötilaprofiilit (Arpalahti, Engdahl, Jäntti, Kiiskilä, Liiri, Pekkinen, Puumalainen, Sankala & Vehmaan-Kreula 2008, 176, muokattu)

Biotuotetehtaalla poltettua kalkkia pidetään yleisesti laadukkaana, kun meesauunin  $\text{NO}_x$ -päästöt ovat lähellä kuukausipäästöraja-arvoa  $600 \text{ mg/m}^3(\text{n})$  tai sen yläpuolella. Meesauunia ei kuitenkaan aktiivisesti pyritä operoimaan näin korkeilla  $\text{NO}_x$ -päästöillä, vaikka tällaisilla päästötasoilla päästään helposti optimaaliseen jäännöskarbonaattiin, joka on biotuotetehtaalla noin 2-4 %.

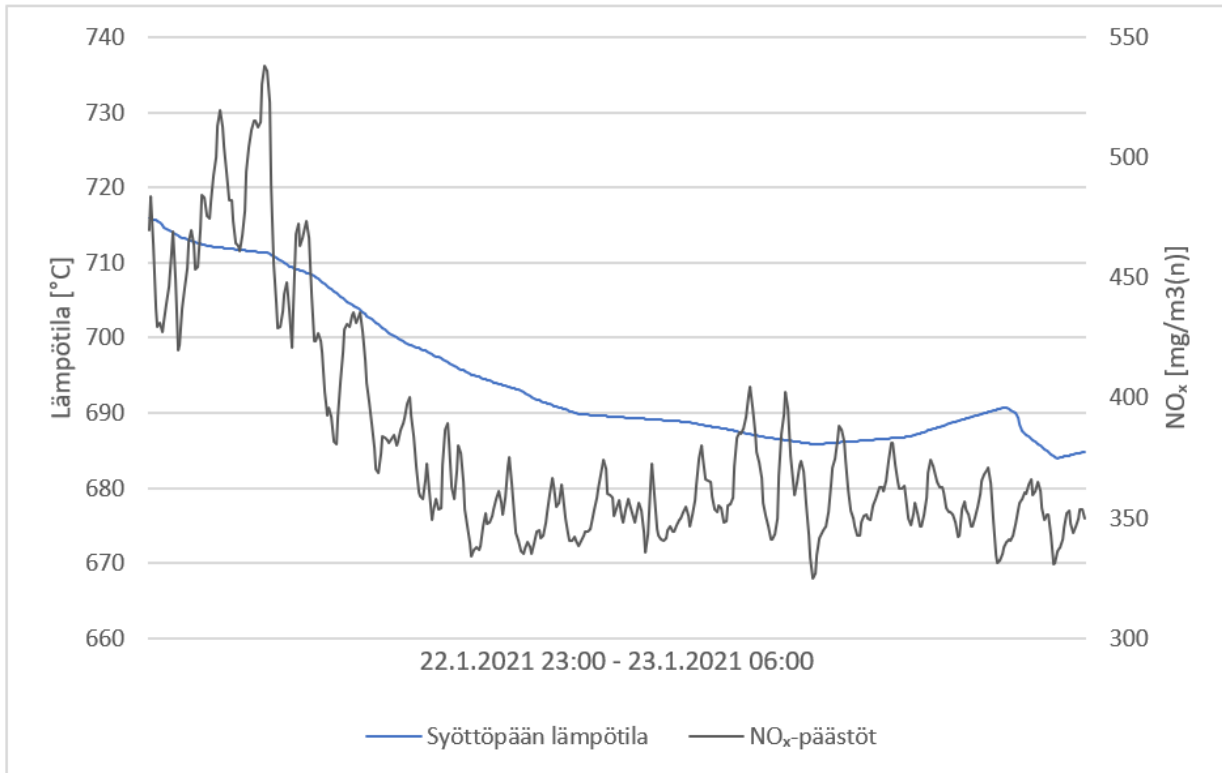
Kuvion 23 mittausdata tehtaan meesauunista tukee tätä näkemystä. Kun  $\text{NO}_x$ -päästöt ovat kuukausiraja-arvon läheisyydessä on jäännöskarbonaatti lähes poikkeuksetta hyvällä tasolla.

Toisaalta, jos  $\text{NO}_x$ -päästöt laskevat alle  $400 \text{ mg/m}^3(\text{n})$ , alkaa jäännöskarbonaatin määrä poltetussa kalkissa kasvaa nopeasti. Tällöin polttoaine  $\text{NO}$ :n osuus  $\text{NO}_x$ -päästöistä on todennäköisesti termistä  $\text{NO}$ :ta huomattavasti suurempi. Kuviossa piikit  $\text{NO}_x$ -päästöissä alaspäin johtuvat päivittäisestä mittauksen automaattisesta kalibroinnista. Jäännöskarbonaatti mitataan noin 3 kertaa päivässä, jonka takia sen liikkeet kuviossa ovat jyrkkiä.

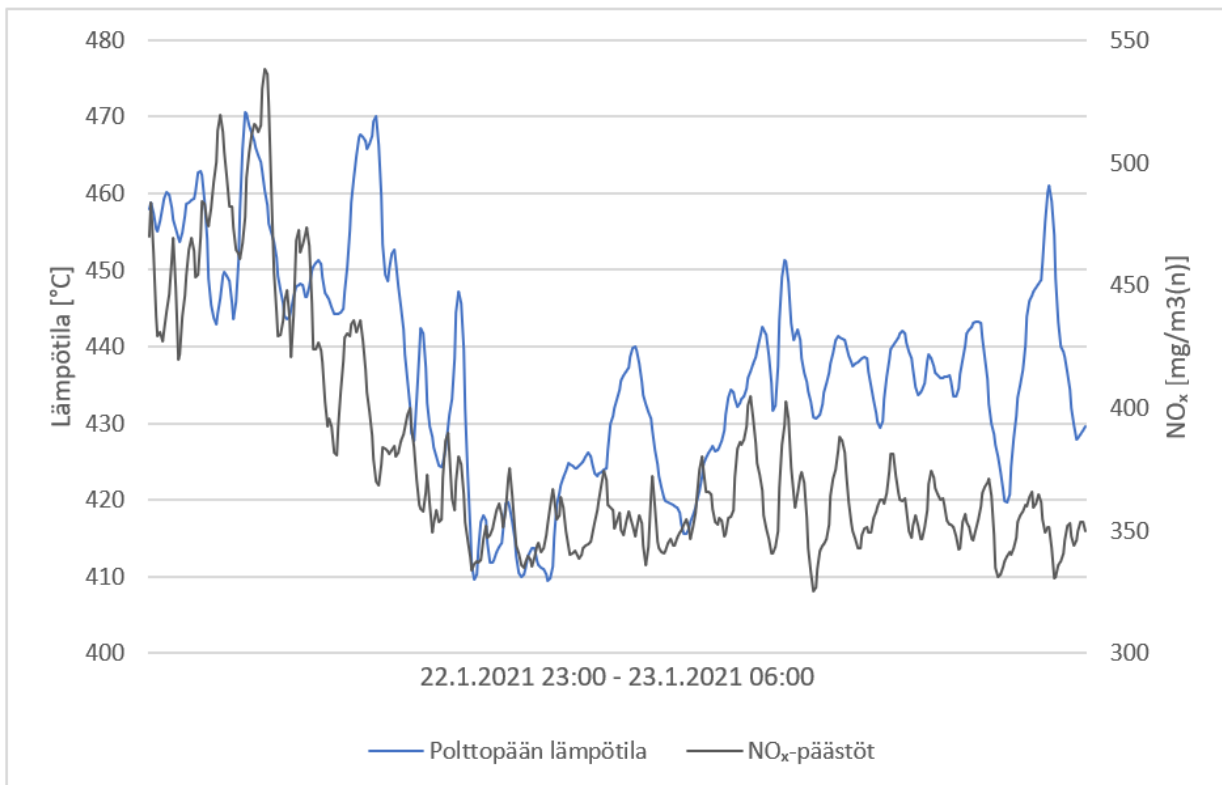


Kuvio 23. Biotuotetehtaan meesauunin  $\text{NO}_x$ -päästöt ja jäännöskarbonaatti

$\text{NO}_x$ -päästöjen lisäksi biotuotetehtaan meesauunin polton tärkeimmät indikaattorit ovat syöttö- ja polttopään lämpötilat sekä palkkiarinajähdyttimen kamera. Syöttöpään lämpötila kertoo kuinka hyvin meesauudin ja flash-kuivuri toimivat. Mikäli syöttöpään lämpötila laskee tasaisella tuotannolla, on meesan kosteus kasvanut tai polton olosuhteet polttopäessä muuttuneet. Polttopään palamisen olosuhteista kertoo polttopään lämpötila. Nämä lämpötilat korreloivat tasaisella tuotannolla ja teholla  $\text{NO}_x$ -päästöjen kanssa suhteellisen hyvin (ks. kuviot 24 ja 25). Arinan kameralla voidaan arvioida kalkin laatua sen väristä. Mitä kirkkaampaa ja hehkuvampaa kalkki on, sitä vähemmän siinä on jäännöskarbonaattia.



Kuvio 24. Syöttöpään lämpötilan ja NO<sub>x</sub>-päästöjen korrelaatio



Kuvio 25. Polttopään lämpötilan ja NO<sub>x</sub>-päästöjen korrelaatio

Koska NO<sub>x</sub>-päästöt ovat biotuotetehtaan meesauunissa sidoksissa vahvasti sen lämpötiloihin ja jäännöskarbonaatti kulkee niiden mukana, voidaan tehonsäätöä typenoksideilla pitää varteenotettavana vaihtoehtona. Biotuotetehtaan meesauunin tehonsäädön pystyisi tekemään myös syöttö- tai polttopään lämpötilojen mukaan, mutta NO<sub>x</sub>-ien mukaisella säädöllä on tiettyjä etuja lämpötiloihin nähden. Ensinnäkin lämpötilamittaukset ovat hyvin paikallisia. Termistä NO:ta sen sijaan syntyy merkittävästi noin 15 %:n alueella uunissa, jolloin se kertoo kokonaisvaltaisemmin uunin tilanteesta. NO<sub>x</sub>-mittausta voidaan pitää myös uunin lämpötilamittauksia luotettavampana, koska sillä mitattavat päästöt ovat viranomaisvalvonnassa eli sen kuntoon ja toimintaan kiinnitetään normaalia enemmän huomiota. Biotuotetehtaan meesauunista on saatavilla lämpötilaprofiili, jota voisi teoriassa hyödyntää tehonsäädössä, mutta tätä ei ole liitetty tehtaan prosessiautomaatiojärjestelmä Valmet DNA:han. Toinen etu NO<sub>x</sub>-tason mukaisella tehonsäädöllä on parempi päästöjen hallinta: päästöjä pystytään kontrolloimaan sekä vähentämään helpommin, kun tehoa säädetään typenoksideilla. Tämän ominaisuuden merkitys kasvaa, jos päästörajat kiristyvät tulevaisuudessa.

NO<sub>x</sub>-tasoon sidotun tehonsäädön ongelmana on, että sen merkitys painottuu meesauunin polttopäähän. Prosessihäiriöt syöttöpäässä näkyvät NO<sub>x</sub>-päästöissä vasta uunin loppupäässä, jolloin tehonsäädön reagointi on liian myöhäistä. Syöttöpään suuremmissa häiriötilanteissa tehonsäädön asetusarvoa jouduttaisiin siis edelleen muuttamaan. Polttopäähän NO<sub>x</sub>-ien mukainen tehonsäätö sopii hyvin. Esimerkiksi häiriötilanteet kuoren kaasutuslaitoksella pystyttäisiin helposti kompensoidaan tehonsäätimen automaattisella ohjauksella: kun tuotekaasun laatu muuttuu, NO<sub>x</sub>-päästöt muuttuvat, jolloin tehonsäätö reagoi tarvittavalla tavalla.

## **9 Meesauunin prosessinohjauksen nykytila**

Biotuotetehtaan meesauunin ja kuoren kaasutuslaitoksen on toimittanut Valmet Oyj. Näiden prosessikokonaisuuksien ohjaus suoritetaan Valmet DNA:lla. Tämän työn kannalta oli tärkeää ymmärtää kuoren kaasutuslaitoksen vaikutukset meesauunin tehonsäätöön ja happisäätöön.

### **9.1 Tehonsäätö**

Biotuotetehtaan meesauunin tehoa säädetään kaasuttimen ja/tai pikiöljypolttimen ohjausta muuttamalla. Kaasuttimen tehoa säädetään käsiohjauksella tai automaattilla. Käsiohjauksella kaa-

suttimen tehoa (MW) muutetaan uunin tuotannon, jäännöskarbonaatin, NO<sub>x</sub>-ien ja lämpöjen mukaan. Automaatilla kaasutin toimii remote-tilassa, jolloin se saa ylemmän tason säätimeltä tehoasetusarvon. Asetusarvo tulee laskennasta, joka huomioi uunin tuotannon päivässä (t/d) ja operaattorin valitseman uunin ominaisenergiankulutuksen eli uunin tehoasetuksen (MJ/t). Automaatilla teho säätyy siis automaattisesti tuotannon muutoksissa. Teoriassa tehoasetuksen pitäisi olla aina vakio, mutta koska prosessissa esiintyy häiriöitä, joudutaan tehoasetusta muuttamaan käsiohjauksen tavoin.

Pikiöljypoltinta ohjataan aina automaatilla, joko local- tai remote-tilassa. Local-asetuksella operaattori asettaa polttimen säätimeen tehoasetusarvon, jolla hän haluaa uunia ajaa. Remotella pikiöljypoltin saa asetuservonsa samalta säätimeltä, jolta myös kaasutin saa remote-asetusarvon.

Tehonsäädön ongelmana on kaasuttimen tuotekaasun laadun vaihtelu. Operaattorin on vaikea arvioida tehon muutoksen suuruutta ja sen vaikutuksia meesanpolttoon, koska kaasuttimen todellisesta tehosta ei ole tietoa. Tuotannon häiriöissä tehon säätäminen on aina tehtävä käsin. Kunnollisella säädöllä teho muuttuisi automaattisesti tuotannon häiriöissä, ilman operaattorin vaatimia toimenpiteitä. Tällöin säädin seuraisi uunin mittauksia ja muuttaisi tehoa optimaalisella tavalla.

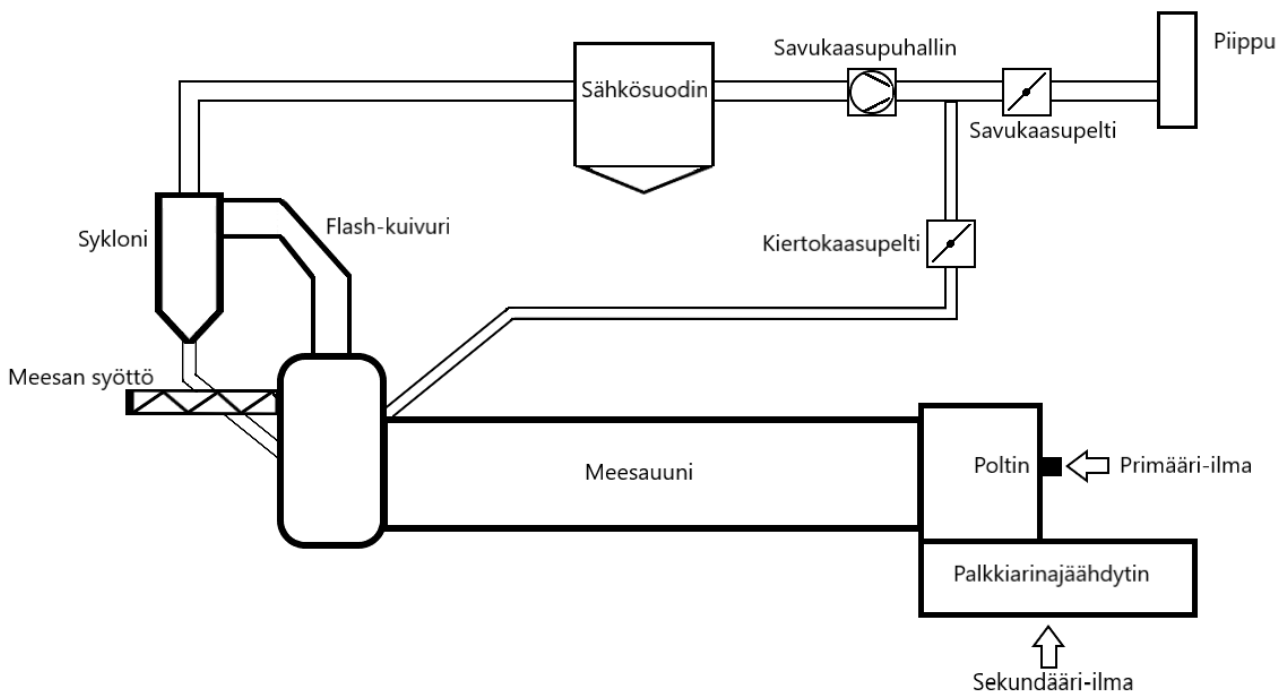
## 9.2 Happisäätö

Biotuotetehtaan meesauunin palamisilma jakaantuu primääri- ja sekundääri-ilmaan sekä polttimen jäähdytysilmaan. Primääri-ilma tuodaan primääri-ilmapuhaltimella suoraan polttimeen ja sen osuus kokonaisilmamäärästä on noin 10 %. Uuniin menevää primääri-ilman virtausta säädetään local-asetuksella. Poltinta jäähdyttävä ilma puhalletaan polttimen reunoilta uuniin. Jäähdytysilmapuhallin toimii vain käsiohjauksella ja sen tuottaman ilmamäärän osuus kokonaisilmasta on vähäinen.

Sekundääri-ilma saadaan palkkiarinajäähdyttimeltä, josta se imetään vedon avulla polttimelle. Osa sekundääri-ilmasta puhdistetaan ennen uunia. Kalkkipölyistä ilmaa ohjataan sykloniin, josta puhdistettu ilma puhalletaan pölynpoistopuhaltimella uunin huuvan yläosaan. Ilma imeytyy vedon kautta uunin polttimelle. Syklonissa eroteltu kalkki kuljetetaan meesakalkkisiiloon.

Arinalle ilma puhalletaan neljän eri puhaltimen kautta, joista kaksi on local-asetuksella ja kaksi remote-asetuksella. Remotella olevat puhaltimet säätävät huuven painetta, pyrkien pitämään sen lievästi alipaineisena. Toisen remote-tilassa olevan puhaltimen kautta, uuniin tuodaan palamisilman lisäksi kaustisoinnin laimeat hajukaasut.

Meesauunin vetoon vaikutetaan savukaasupuhaltimella, savukaasupellillä ja kiertokaasupellillä (ks. kuvio 26). Pääasiallinen veto uuniin synnytetään savukaasupuhaltimella, jolla poistetaan savukaasut uunista.



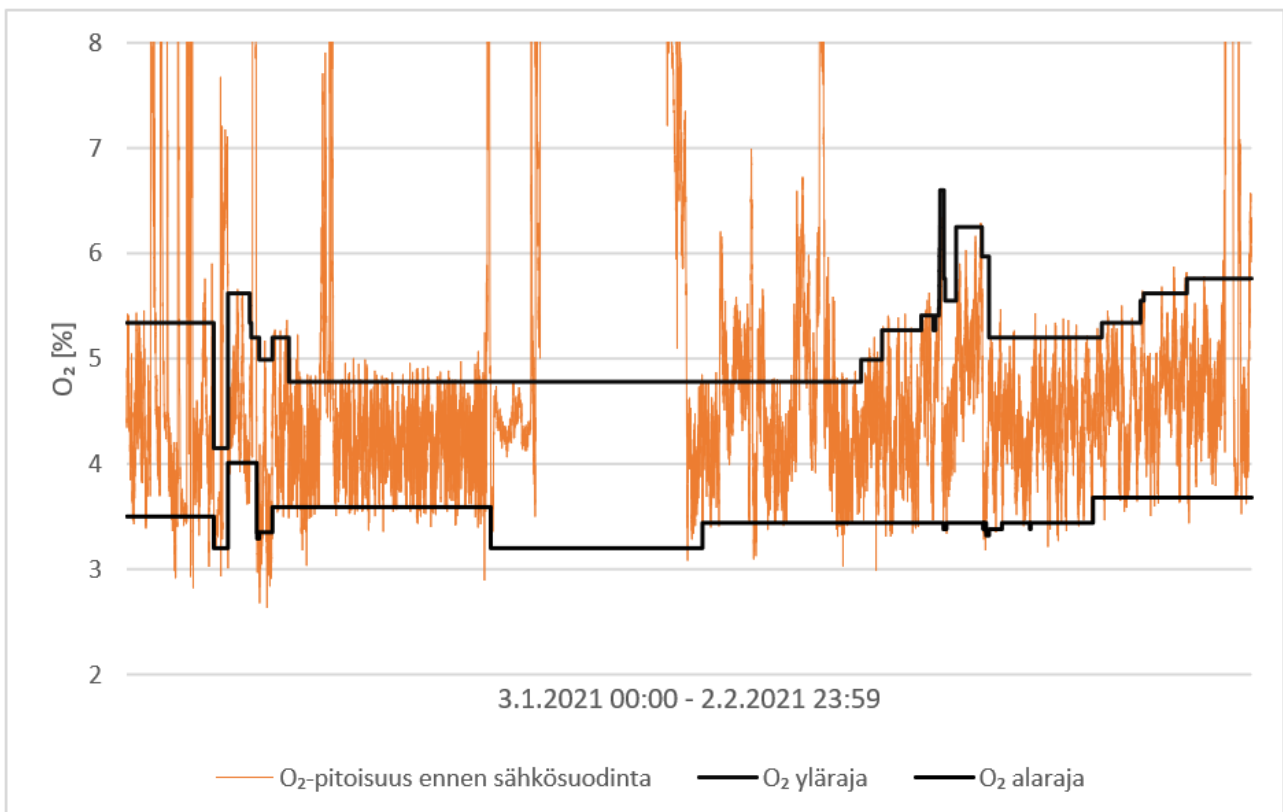
Kuvio 26. Periaatekuva biotuotetehtaan meesauunista

Savukaasupuhaltimen vedon avulla varmistetaan flash-kuivurin toiminta. Käytännössä flash-kuivurissa vallitseva veto on hyvällä tasolla, kun savukaasupuhaltimen kierrokset ovat riittävän korkealla (yli 80 %) ja savukaasupeltti vähintään 40 % auki.

Savukaasupeltti sijaitsee savukaasupuhaltimen ja uunin piipun välissä. Pellin asennolla pystytään vaikuttamaan uunin sisäiseen vetoon. Mitä enemmän pelti on auki, sitä enemmän vetoa uunissa on.

Kiertokaasupelti sijaitsee kiertokaasukanavassa savukaasupuhaltimen ja savukaasupellin välissä. Kiertokaasukanavan kautta osa savukaasuista kierrätetään flash-kuivuriin. Savukaasujen kierrätyksellä varmistetaan meesan riittävä kuivuminen ennen varsinaista polttoa. Matalalla uunin tuotannolla peltiä on tarkoitus pitää suuresti auki, koska savukaasujen määrä on pieni uunissa. Korkealla tuotannolla uunin savukaasujen määrä on taas suuri, jolloin peltiä voi ajaa enemmän kiinni. Pellin asennon muutokset vaikuttavat suoraan uunin vetoon. Kun peltiä avaa, savukaasujen virtaus syöttöpäässä kasvaa, jolloin polttopäähän vaikuttava veto pienenee. Jos taas peltiä sulkee, kierrätettyjen savukaasujen vaikutus uunin polttopään vetoon vähenee.

Meesauunin happisäätö perustuu biotuotetehtaalla savukaasupellin asentoon. Savukaasupuhallin pidetään vakio kierroksilla ja kiertokaasupeltiä pyritään operoimaan tuotannon mukaan. Operaattori valitsee kolmesta sähkösuodinta edeltävästä jäännöshappimittauksesta yhden, jonka mukaan hän haluaa happea säätää. Jäännöshappea säädetään tietyllä alueella, joka on operaattorien päätettävissä (ks. kuvio 27). Jos jäännöshappimittaus ylittää alueen rajan, savukaasupelti sulkeutuu tai aukeaa. Muutokset vedossa vaikuttavat sekundääri-ilman määrään palamisessa.



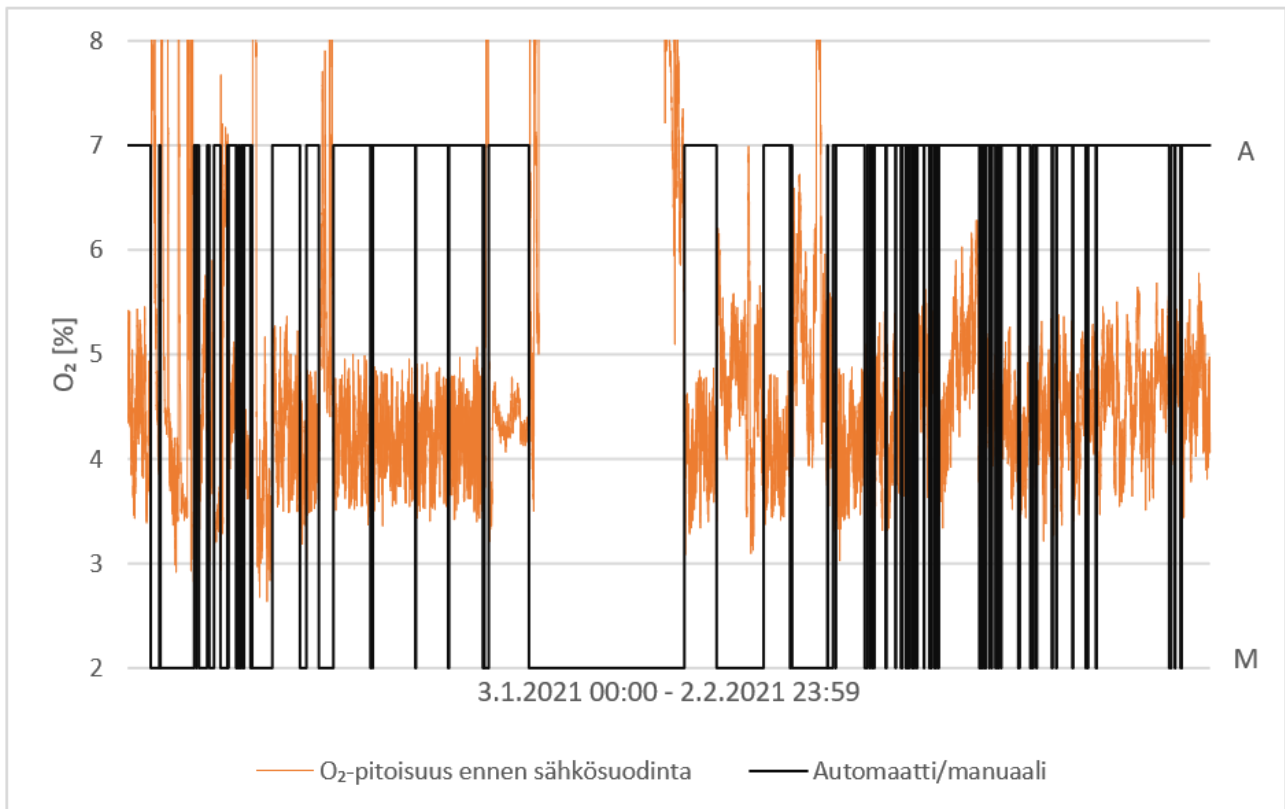
Kuvio 27. Meesauunin jäännöshappipitoisuus ja sen säätörajat

Biotuotetehtaan meesauunissa optimaalinen jäännöshappi on 3-4 %. Uunia ajetaan kuitenkin käytännössä reilusti yli 3,5 %:n jäännöshapella (ks. kuvio 27). Tämä johtuu happisäädön ongelmista. Kuten luvussa 4.2 todettiin, korkea ilmakerroin tarkoittaa huonoa hyötysuhdetta.

Happisäädön ongelmana on savukaasupellin huono säätökyky. Pellin asennon muutoksilla on vaikea saavuttaa tasaista jäännöshapetta. Pelti voisi olla hyvä happisäätäjä, jos kuorikaasuttimelta tulevan tuotekaasun määrä ei muuttuisi jatkuvasti. Pellin huonous säätäjänä on johtanut tilanteeseen, jossa uuniin ajetaan paljon ylimääräilmaa, jotta uuni ei menisi alas häikäpiikeistä. Häikäpiikillä tarkoitetaan epätäydellisestä palamisesta johtuvaa hään korkeaa määrää savukaasuisa. Häikäpiikit johtavat meesauunin polton alasajoon. Häikäpiikit syntyvät usein, kun meesauunin jäännöshappi laskee alle 3 %:n. Kuorikaasuttimen tuotekaasu on enimmäkseen häkää, joten riski häikäpiikeille on suuri, jos happisäätö pettää.

Jäännöshapen heilunnassa ei ole muutoksia, vaikka savukaasupellin asettaa käsiohjaukselle. Käsiohjausta joudutaan usein kuitenkin käyttämään, koska savukaasupeltiin perustuva säätö on heikko (ks. kuvio 28). Luvussa 6.2.1 todettiin, että jos säätöpiirin värähtely ei lakkaa säätimen ollessa käsiohjauksella, on värähtelyn lähteen tultava säätöpiirin ulkopuolelta. Jäännöshapen heiluntaan vaikuttavat tekijät voi jäljittää kaasuttimen toimintaan, mutta koska uunin hapen on annettu heilua vapaasti tietyllä alueella, on perusteltua kyseenalaistaa koko happisäädön toimivuus.

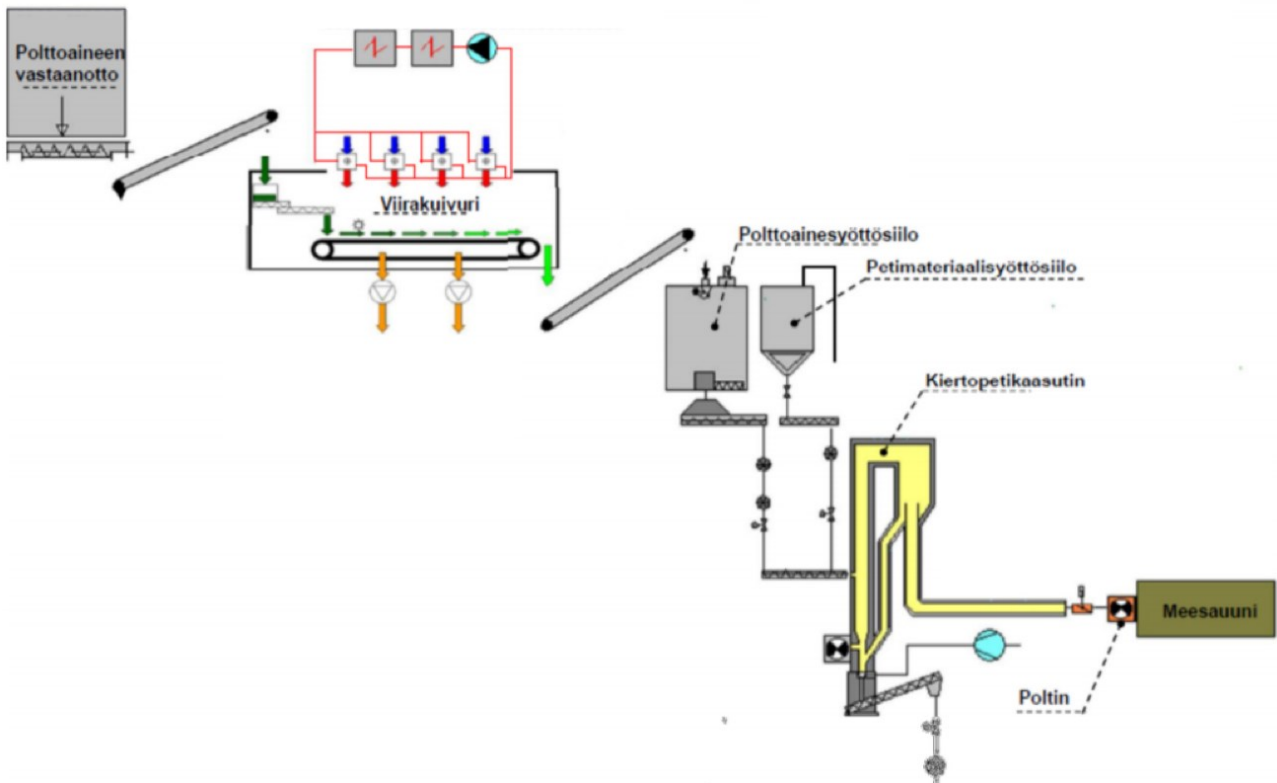




Kuvio 28. Savukaasupellin ohjaustapa ja meesauunin jäännöshappi

### 9.3 Kuoren kaasutuslaitos

Biotuotetehtaan kuoren kaasutuslaitos koostuu polttoainevarastosta, viirakuivurista ja itse CFB-kaasuttimesta (ks. kuvio 29). Varastosta kuori kuljetetaan hihnakuljettimilla viirakuivuriin, jossa kuori kuivataan kaasuttimen käyttöön. Kuivattu kuori kuljetetaan kolakuljettimella kaasuttimen päälle, jossa se jaetaan kahteen eri polttoainesiiloon. Siiloista kuori annostellaan kaasuttimen reaktoriin polttoaineen annosteluruuveilla 1 ja 2. Reaktorissa kuori muutetaan tuotekaasuksi, joka ohjataan meesauunin polttimelle.



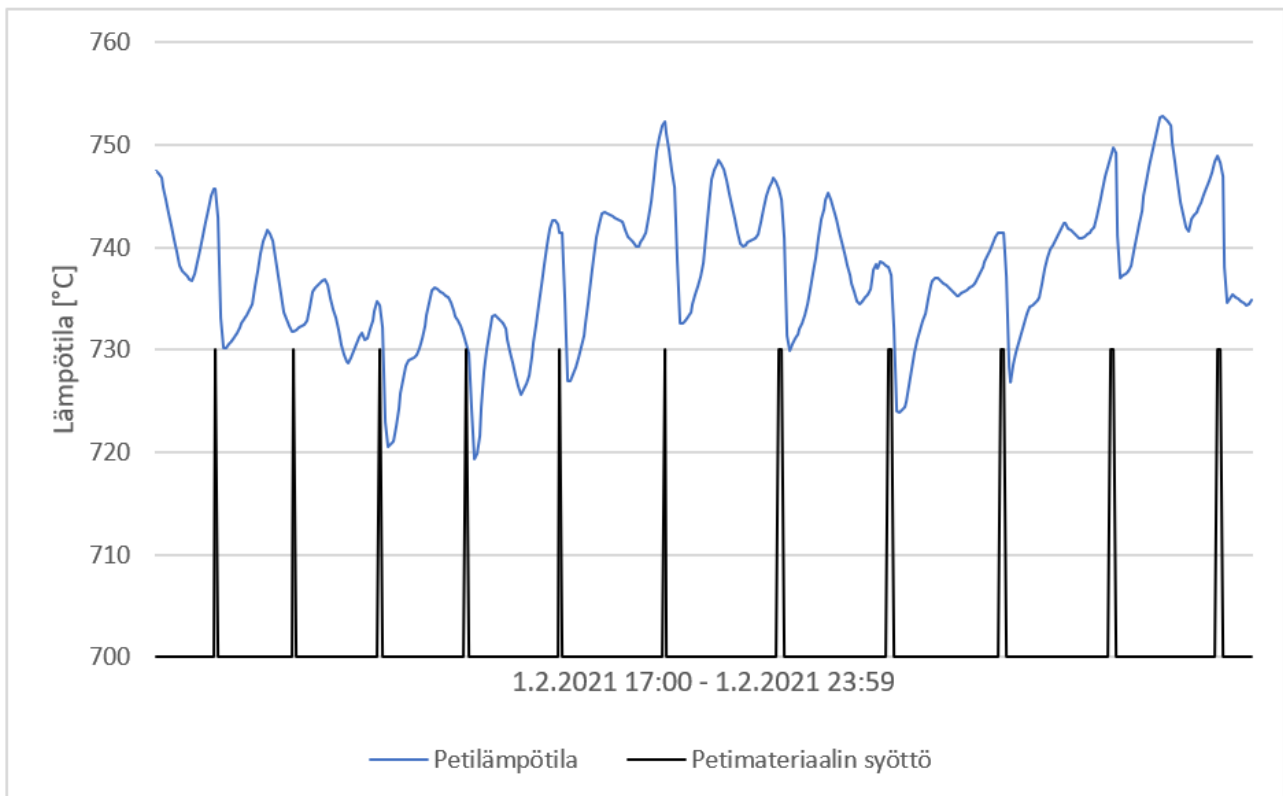
Kuvio 29. Kuoren kaasutuslaitos (Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaan YVA-selostus 2014, 67, muokattu)

Kaasuttimen teho määräytyy annosteluruuvien nopeuksien ja polttoaineen laatueroimen mukaan. Polttoaineen laatuero on operaattorin muutettavissa oleva arvo, jolla määritetään kuoripolttoaineen energiatiheys (MWh/m<sup>3</sup>). Kaasuttimen teho saadaan, kun tämä arvo kerrotaan annosteluruuvien polttoainevirtauksella, joka on yksittäisellä ruuvilla 12-115 m<sup>3</sup>/h. Ruuvien nopeudella vaikuttaa polttoainevirtauksen määrään ruuvien läpi. Ruuvien nopeus määräytyy kaasuttimen tehonsäätimen ohjauksesta.

Ongelma kaasuttimen tehonsäädössä on sen mittauksen luotettavuus. Mikään ei takaa, että tietyllä ruuvien nopeudella kaasuttimeen kulkeutuu juuri tietty määrä kuorta. Lisäksi operaattorin valitsema polttoaineen laatuero ei ole millään tavalla sidoksissa kuoren todelliseen laatuun. Käytännössä kuoren laadun vaihteluihin reagoidaan kaasuttimen tehoa muuttamalla, laatueroimen ollessa vakio. Kaasuttimen säädettävä teho onkin siis puhtaasti laskennallista, eikä se kuvasta oikeaa kaasutustehoa.

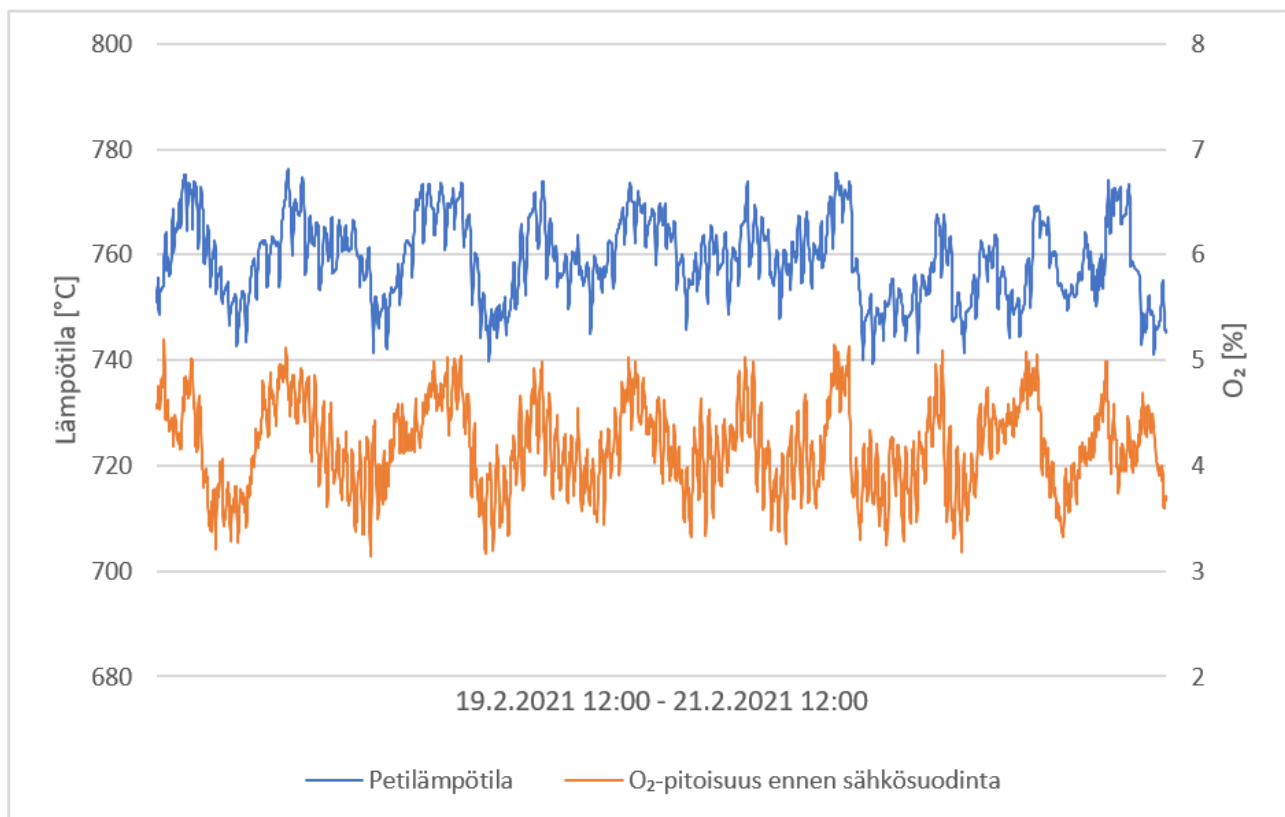
Kaasuttimen ER pyritään pitämään vakiona. Tällöin petilämpötila on tasainen ja näin ollen myös tuotekaasun tuotanto pysyy tasaisena. Mikäli ER muuttuu, on kaasuttimeen syötettävän polttoaineen määrä tai laatu muuttunut. Petilämpötila säätyy kaasutusreaktioon tuotavan leijutusilman mukaan. Kaasuttimen uuden petimateriaalin lisäyksen vaikutukset ovat johtaneet ratkaisuun, jossa petilämpötilan säädölle on luotu kuollut alue asetusarvon ympärille. Kuolleella alueella tarkoitetaan ohjauksen jäädyttämistä, kun mittaus on alueella. Petilämpötila ei siis ole jatkuvasti säädöllä, vaan sen mittauksen annetaan heilua vapaasti  $\pm 10$  °C asetusarvon ympärillä.

Petimateriaalin lisäys jäädyttää kaasuttimen petilämpötilaa nopeasti, noin 10 °C:n verran (ks. kuvio 30). Lisäys tapahtuu 10-40 min välein. Jos säätimessä ei olisi kuollutta aluetta, voisi petilämpötilan säätö reagoida liian voimakkaasti lämpötilan muutoksiin. Säädin on myös jäädytetty 130 sekunniksi petimateriaalin lisäyksen jälkeen. Tämä osaltaan antaa petilämpötilalle mahdollisuuden liikkua reilusti kuolleen alueen yli ilman, että kaasutusilman ohjaus tekee korjaavia toimenpiteitä.



Kuvio 30. Petimateriaalin lisäyksen vaikutus kaasuttimen petilämpötilaan

Petilämpötilan ja sen säädön vaikutukset näkyvät suoraan meesauunin jäännöshapessa (ks. kuvio 31). Kun petilämpötila laskee, palamista tapahtuu vähemmän kaasuttimessa eli kaasuuntuminen voimistuu, jolloin jäännöshappi uunissa laskee. Toisaalta, kun petilämpötila nousee, ER on normaalia suurempi eli palaminen kaasuttimessa kasvaa, jolloin poltettavan tuotekaasun määrä vähenee, mikä johtaa meesauunin jäännöshapen kasvuun.



Kuvio 31. Kaasuttimen petilämpötila ja meesauunin jäännöshappi

Joissain tapauksissa petilämpötilan lasku johtuu polttoaineen kosteuspitoisuuden kasvusta.

Kuviossa 31 esitetty kaasuttimen petilämpötilan ja meesauunin jäännöshapen korrelaatio on kuitenkin niin vahva, että polttoaineen kosteuden nousulla saattaa olla normaalia pienempi vaikutus kaasuuntumiseen. Tämä johtuu todennäköisesti kiertoleijupetikaasuttimen kyvystä kompensoida polttoaineen laadun vaihteluita.

Poltettavan tuotekaasun määrän vaihteluiden lisäksi sen laatu vaihtelee. Polttoainevarastosta kuljetettava kuori otetaan kahdella isolla ruuvipurkaimella hihnakuorijalle. Toinen ruuvi on koirakuorelle ja toinen havukuorelle. Kuorten keskinäinen suhde ei ole minkäänlaisella säädöllä ja se

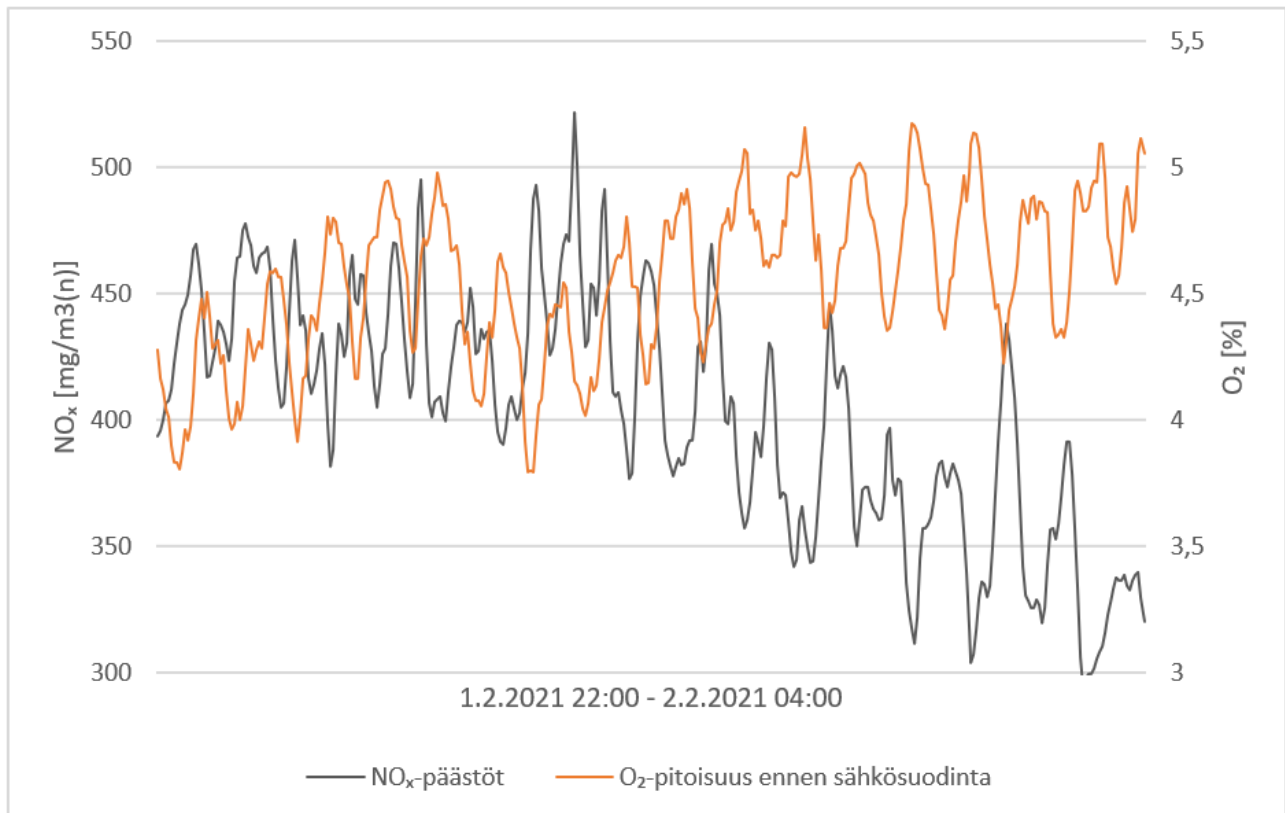
muuttuu jatkuvasti. Suhteesta ei ole myöskään mittausta. Käytännössä ei siis tiedetä kuinka suuri osuus kaasuttimen polttoaineesta on havua ja kuinka paljon koivua. Kuten luvussa 4.3 kerrottiin, koivun lämpöarvo ja kuiva-ainepitoisuus ovat suurempia, kuin havun. Jos kuorten keskinäinen suhde muuttuu radikaalisti, on sillä merkittäviä vaikutuksia tuotekaasun laatuun. Laadullisia vaihteluita lisää viirakuivurin toiminta, jolla ei päästä tasaiseen polttoaineen kuiva-ainepitoisuuteen (ks. liite 2). Viirakuivurin toimintaa vaikeuttaa kaasuttimen polttoaineen kulutuksen vaihtelu, koska sen läpi kulkevan kuoren nopeus riippuu kaasuttimen polttoainesilojen pinnankorkeudesta. Mikäli polttoaineen tarve kasvaa tai laskee nopeasti kaasuttimella, viirakuivurin nopeuden muutokset hankaloittavat kuoren kuivausprosessin tasaisuutta.

## 10 Kehitysehdotus

Opinnäytetyön alusta lähtien oli selvää, että toimiva tehonsäätö tarvitsee rinnalleen toimivan happisäädön. Siksi työssä lähdettiin kehittämään myös meesauunin happisäätöä, jota ei pidetty riittävän hyvänä automaattiselle tehonsäädölle. Toimeksiantajan kanssa uskottiin, että  $\text{NO}_x$ :ien mukaan muuttuva teho ajaisi uunin alas, jos jäännöshapen annettaisiin heilua kuten aina ennenkin. Tässä luvussa käydään läpi happisäädön ja tehonsäädön kehitysehdotukset siinä muodossa missä ne toimeksiantajalle esiteltiin.

### 10.1 Happisäätö

Biotuotetehtaan meesauunissa huonosti säädetty jäännöshappi aiheuttaa  $\text{NO}_x$ -päästöjen heilunnan. Kuviossa 32 on esitetty jäännöshapen vaikutus uunin typenoksidipäästöihin. Kuvioista voidaan todeta, että lisääntynyt ilma palamisessa ei nosta  $\text{NO}_x$ -päästöjä, vaan laskee niitä.  $\text{NO}_x$ -päästöjen pienentyminen on seurausta ylimääräilman jäähdyttävästä vaikutuksesta: vaikka palamistapahtumaan tuodaan enemmän happiatomeja, termisen  $\text{NO}$ :n muodostuminen vähenee, koska lämpötila laskee. Toisaalta pitää huomioida, että jäännöshapen heilunta johtuu tuotekaasun laadun muutoksista. Esimerkiksi jos poltettavan tuotekaasun määrä kasvaa uunin polttimessa, jäännöshappi laskee, jolloin lämpötila uunissa nousee lisääntyneen polttoainetehon sekä hapen laskun vuoksi. Tasaisella tuotannolla ja teholla tuotekaasun laadun muutoksia voidaan pitää perimmäisenä syynä  $\text{NO}_x$ -päästöjen heiluntaan.



Kuvio 32. Jäännöshapen vaikutus NO<sub>x</sub>-päästöihin

Happisäädön parantamiseksi laadittiin kehitysehdotus, jossa:

- Savukaasupuhaltimen nopeus säätyy jäännöshapen mukaan.
- Savukaasupelti ylläpitää savukaasupuhaltimen säätöaluetta.
- Kiertokaasupelti liikkuu automaattisesti tuotannon mukaan toimien passiivisena happisäätäjänä.
- Pyritään tiettyyn jäännöshappiarvoon, ei alueeseen.

Ehdotuksen säätötavassa taajuusmuuttajakäyttöinen savukaasupuhallin muuttaa automaattilla ohjaustaan jäännöshappimittauksen muuttuessa. Säädön tavoitteena on pitää jäännöshappimittaus operaattorin valitsemassa asetusarvossa. Kun jäännöshappi on vakio, sen vaikutukset NO<sub>x</sub>-päästöjen heiluntaan vaimenee. Säätötavan jäännöshappimittaus on edelleen operaattorin valittavissa.

Savukaasupuhaltimen käyttö happisäädössä on ilmeinen, koska savukaasupuhallin on tyypillisesti meesauunien happisäätäjä ja savukaasupelti on todettu biotuotetehtaalla huonoksi säädettäväksi toimilaitteeksi. Savukaasupellin asentosäätö on hidas ja sen vaikutukset uunin vetoon on vaikeasti

arvioitavissa siinä missä savukaasupuhaltimen nopeusohjesäätö on nopea ja sillä voidaan helposti vaikuttaa uunin vetoon.

Säätötavassa savukaasupelti pyrkii automaattilla estämään savukaasupuhaltimen ohjauksen minimi- ja maksimiarvot. Eli kun savukaasupuhaltimen nopeusohjaus on liian kauan ohjauksen ääripäissä, pelti sulkeutuu tai avautuu tilanteen mukaan. Teoriassa savukaasupeltiä voisi pitää täysin auki ja antaa puhaltimen ohjauksen liikkua vapaasti, mutta koska alhaisella savukaasupuhaltimen nopeudella flash-kuivurin toiminta heikkenee, on savukaasupuhaltimen ja savukaasupellin toimittava yhdessä. Säätöalueen ylläpitämisen lisäksi savukaasupellillä estetään häikäpiikkien syntyminen. Jos uunin jäännöshappi on liian alhainen tai häkää esiintyy savukaasuissa, savukaasupellin asento-ohjaus kasvaa.

Kiertokaasupellin asento suhteessa tuotantoon vakioidaan. Näin kiertokaasupelti toimii passiivisena hapensäätäjänä tuotannon muutoksissa. Pellin asennon muutokset madaltavat savukaasupuhaltimen ohjauksen muutoksen tarvetta, koska pellin asennolla vaikutetaan palamisilman määrään tilanteissa, joissa polttoaineen määrä muuttuu.

Automaattisäätö vähentää operaattorien puuttumista kiertokaasupellin asentoon. Säätötavassa operaattori voi kuitenkin vaikuttaa kiertokaasupellin asentoon kiertokaasupellinkorjauksella  $\pm 15$  %. Tämä antaa operaattorille mahdollisuuden säätää flash-kuivurin savukaasuvirtausta, vaikka säätö on automaattilla. Esimerkiksi pikiöljypoltolla savukaasujen määrä on uunissa pienempi, kuin kaasutuksella, joten pellin asento suhteessa tuotantoon ei voi olla aina samanlainen.

Kehitysehdotuksessa esitetty säätötapa ei puutu uunin primääri- ja sekundääri-ilmojen säätöihin. Primääri-ilman säätöminen jäännöshapen mukaan ei ole perusteltua, koska säätötapa rikkoisi liekin muodon ja stabiilisuuden. Primääri-ilman säätö on hyvä jättää operaattorien vastuulle. Sekundääri-ilman säätöön puuttuminen on tarpeellista vain, jos se ei pysty pitämään huuven painetta asetusarvossa. Tämä voi olla mahdollista, jos savukaasupuhaltimella toteutettu säätö on liian nopea painesäädölle. Lähtökohtaisesti on oletettu, että säätö pystyy reagoimaan muuttuvaan vetoon.

## 10.2 Tehonsäätö

Toimeksiantajalle ehdotettiin säätöratkaisua, jossa:

- Meesauunin tehoa säädetään NO<sub>x</sub>:ien mukaan.
- Ohjaus tapahtuu uunin tehoasetusta muuttamalla.
- Säädöllä on kuollut alue, jonka suuruuteen operaattori voi vaikuttaa.
- Säätimen ohjauksen voimakkuus kasvaa, jos NO<sub>x</sub>-päästöt ovat yli säätimen asetusarvon.
- Säätimen ohjaus jäädytetään, jos uunin alasajautumisen riski kasvaa.

Säätöratkaisussa uunin tehoasetukseen on tehty säädin. Automaatilla operaattori asettaa uunille tietyn NO<sub>x</sub>-tason, local-asetusarvon, johon säädin pyrkii kasvattamalla tai pienentämällä uunin tehoasetusta. Säädin toimii käsiohjauksella samalla tavalla kuin tehoasetus normaalisti.

Koska meesauunin prosessi halutaan pitää vakaana on perusteltua, että uunin teho ei säädy jatkuvasti. Tämän vuoksi tehonsäädössä on kuollut alue asetusarvon alapuolella. Kuollutta aluetta muuttamalla, operaattori voi lisätä säätimen ohjausta tai jäädyttää ohjauksen kokonaan ilman, että hän koskee säätimen asetusarvoon. Tämä ominaisuus on hyödyllinen, kun ajetaan lähellä päästörajaa, mutta jäännöskarbonaatti ei ole hyvä. Kuolleen alueen suuruudella voidaan myös reagoida NO<sub>x</sub>-päästöjen heiluntaan. Häiriö tilanteissa, joissa NO<sub>x</sub>-päästöt heiluvat suuresti voidaan säätimen kuollutta aluetta kasvattamalla rauhoittaa tehonsäätöä. Aluetta voi muuttaa välillä 50-250 mg/m<sup>3</sup>(n).

Säätötavassa meesauunia on mahdollista ajaa yli 600 mg/m<sup>3</sup>(n) typenoksidipäästöillä. Esimerkiksi ylösajotilanteissa suuri teho voi olla tarpeellista. Säädin on kuitenkin lähtökohtaisesti suunniteltu toimimaan päästörajan läheisyydessä. Tämän vuoksi toimeksiantajalle ehdotettiin, että säätimen ohjauksen voimakkuus kasvaa, jos NO<sub>x</sub>-päästöt ylittävät asetusarvon. Säätimen asetusarvo olisi siis NO<sub>x</sub>-päästöjen maksimimäärä mitä ei haluta ylittää.

Säätimeen ohjaus jäädyttyy, jos jäähdytysvesiriskiä säätoventtiili on liikaa auki tai jäännöshappipitoisuus on ennen sähkösuodinta matala tai häkää esiintyy savukaasuissa ja säätimen mittausta on asetusarvon alapuolella. Ehdolla pyritään estämään häkäpiikit sekä sähkösuotimen ylikuumentuminen. Lisäksi säädin jäädyttyy aina, kun uunin tuotantoa muutetaan. Ohjaus jäädy-



tetään, jotta uunin teho ei muuttuisi tuotannon sekä tehoasetuksen vaikutuksesta samanaikaisesti. Jäädytys kestää kaikissa tapauksissa 5 minuuttia, jonka kuluttua säätimen ohjaus toimii normaalisti.

## **11 Säätimien toteutus ja käyttöönotto**

Toimeksiantaja hyväksyi tehon- ja happisäädön kehitysehdotukset sellaisenaan. Kehitysehdotuksista laadittiin tarkemmat toimintakuvaukset, joiden pohjalta säätömuutokset tehtiin toimeksiantajan edustajan kanssa. Nämä toimintakuvaukset kehittyivät ja muuttuivat koeajojen ja käyttöönoton aikana alkuperäisestä kehitysehdotuksesta. Liitteessä 3 on esitelty savukaasupuhaltimen, savukaasupellin ja kiertokaasupellin automaattitilojen säätömuutoksien toimintakuvaukset sekä savukaasupuhallinta ohjaavan happisäätimen toimintakuvaus. Liitteessä 4 on esitelty meesauunille valmistuneen tehoasetuksen säätimen toimintakuvaus. Työssä kehitetyt säädöt toteutettiin PI-säätiminä. Näiden säätimien toiminta koulutettiin operaattoreille ennen lopullista käyttöönottoa.

### **11.1 Happisäätö**

Savukaasupuhaltimen nopeusohjeen säädölle luotiin remote-tila, joka saa asetusarvonsa erilliseltä happisäätimeltä. Happisäätimeen asetellaan uunin jäännöshapen asetusarvo. Happisäätimen ohjaus rajoitettiin välille 80-95 %, jonka jälkeen säädin viritettiin. Viritysparametrit haettiin "yritys ja erehdys-menetelmällä".

Kun savukaasupuhaltimen säätö todettiin riittäväksi, toteutettiin savukaasupellin säätömuutos. Pellille tehtiin ehdot, joiden toteutuessa sen asento muuttuu. Käytännössä pelti avautuu tai sulkeutuu, kun happisäädin on säätörajalla, happisäätimen mittauksen ja asetusarvon eroarvo kasvaa liikaa ja säätö on myöhässä tai häkää esiintyy savukaasuissa. Savukaasupellin säätömuutoksien jälkeen se laitettiin säätämään happisäätimen kanssa. Säätöjen keskinäisen toiminnan aikana happisäätimen viritysparametreja hienoviritettiin ja savukaasupellin asennon muutoksen ehtoja paranneltiin. Lopulta happisäätö saatiin toimimaan hyvin ja se otettiin meesauunilla yleisesti käyttöön.

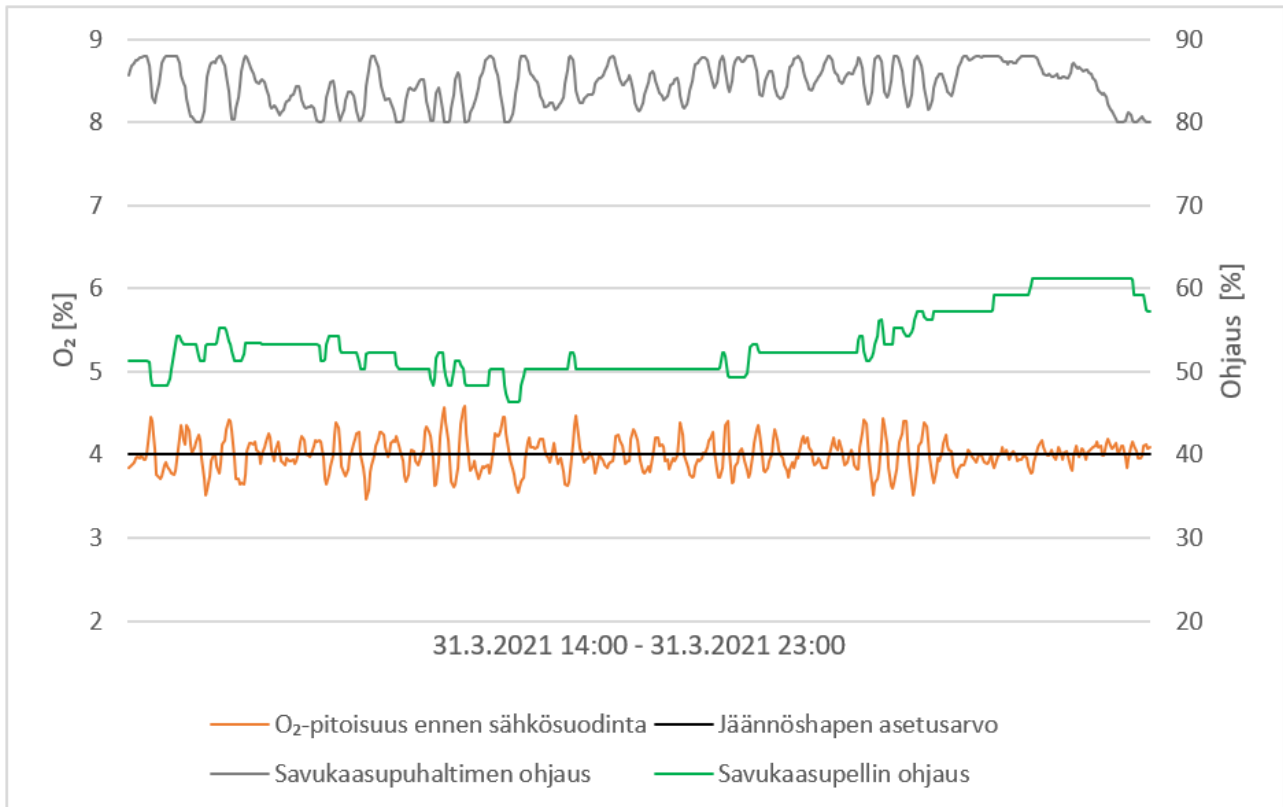
Happisäädön toiminnan suhteen jouduttiin kuitenkin tekemään paljon kompromisseja. Happisäätimen alkuperäinen säätöalue oli savukaasupuhaltimelle liian suuri. Savukaasupuhaltimen kierroksien kasvaessa yli 90 %:n se alkoi värähtelemään paljon. Happisäädön koeajoissa oltiin osattu ennakoida savukaasupuhaltimen värähtelytason nouseminen, mutta sen suuruudesta ei ollut tietoa. Värähtelyä lisäsi savukaasupuhaltimen likaisuus koeajojen aikana. Ajan kuluessa puhallin kerää itseensä meesapölyä, joka kasvavissa määrin vahvistaa sen värähtelyä. Puhallin puhdistettiin toimeksiantajan toimesta ja sen värähtely saatiin hyvälle tasolle. Happisäätimen ohjauksen ylärajaa päätettiin silti laskea 88 %:iin, jotta savukaasupuhaltimella pystytään säätämään pidempiä ajanjaksoja ennen kuin se täytyy puhdistaa. Ylärajan muutoksella saatiin myös rauhoitettua meesauunin painevaihtelua. Heiluvaan paineeseen oltiin jo tätä ennen vastattu pienentämällä happisäätimen vahvistusta ja nostamalla hieman sen integrointi-aikaa. Lisäksi huuuvan painesäätöä päätettiin nopeuttaa nostamalla sen vahvistusta.

Kiertokaasupellin säätömuutos otettiin käyttöön savukaasupuhaltimen ja savukaasupellin kanssa, mutta sen toiminta todettiin mahdottomaksi, koska se oli jumissa. Kiertokaasupeltiin kerääntyy meesapölyä ja meesayhdisteitä todella helposti. Pellin pystyy putsamaan kunnolla vain huoltoseisokissa, joka ei ollut ajankohtainen opinnäytetyön aikana. Syöttöpää, jonka läheisyydessä kierto-kaasupelti sijaitsee, oli myös kärsinyt pitkään tukkeutumisongelmista. Tämän vuoksi savukaasupellin asennon alaraja automaattitilassa asetettiin 45 %:iin. Rajoituksella pyrittiin varmistamaan riittävä savukaasuvirtaus flash-kuivurissa.

Kiertokaasupellin säätömuutoksen poissaolo ei haitannut happisäädön toimivuutta. Ainoa suurempi haitta kierto-kaasupellin liikkumattomuudessa oli, että happisäätöä ei päästy testaamaan yli 50 %:n kierto-kaasupellin asennolla. Säätö ei siis välttämättä toimi yhtä hyvin suuremmalla pellin avaumalla.

Kehitysehdotuksessa jäännöshappea oli tarkoitus hallita ensisijaisesti savukaasupuhaltimen ohjauksella. Puhaltimen säätöalue jäi lopulta niin pieneksi, että sen toimiminen pääohjauksena ei ollut mahdollista. Säätöjen virittämisen aikana huomattiin myös kuinka vähäinen vaikutus puhaltimella loppujen lopuksi oli uunin jäännöshapen säädössä. Happisäädön pääohjauksen rooli jäi siis edelleen savukaasupellin vastuulle. Säädön toimivuuden kannalta tällä ei ollut suurta merkitystä. Säädössä savukaasupuhallin näyttäisi hidastavan jäännöshapen muutosta ja savukaasupelti

pitävän sen asetusarvon läheisyydessä noin 0,5 jäännöshappiprocentin säätöerolla asetusarvon molemmin puolin (ks. kuvio 33). Suurempia säätöeroja happisäätöön tulee lähinnä, kun kaasuttimen polttoaine muuttuu paljon tai jos kaasutinta operoidaan minimi-/maksimikuormassa.



Kuvio 33. Happisäädön toiminta

## 11.2 Tehonsäätö

Tehonsäädön toiminta muuttui heti säädön kehitysvaiheessa. Toimeksiantajan edustajan kanssa todettiin, että säädin oli helpompi toteuttaa, jos se toimii remote-tilassa. NO<sub>x</sub>-tason valinta muutettiin säätimestä erilliselle piirille. Kuolleelle alueelle tehtiin samankaltainen valintapiiri. Tehoasetuksen säätimen asetusarvon määräytymiselle luotiin laskenta, joka ottaa huomioon NO<sub>x</sub>-tason ja kuolleen alueen. Säätimen asetusarvo määritettiin kolmella pääehdolla:

1. Jos säätimen mittaus on NO<sub>x</sub>-tason yläpuolella, on asetusarvo NO<sub>x</sub>-taso.
2. Jos säädin on kuolleella alueella, on asetusarvo mittaus.
3. Jos mittaus on NO<sub>x</sub>-tason alapuolella ja se ei ole kuolleella alueella, on asetusarvo NO<sub>x</sub>-taso miinus kuollut alue.

Säätimen alustavat viritysparametrit haettiin simuloimalla säätimen toimintaa tehtaan prosessin-ohjausjärjestelmällä. Koeajoissa säätimen parametrit viritettiin säätimelle optimaaliseksi. Tärkeää oli tehdä säätimestä hidas, jotta meesauunin poltto ei häiriintyisi. Säädin saatiin toimimaan tasisella kaasutuksella hyvin, mutta kaasuttimen häiriöissä säätimen toiminta ei ollut enää riittävällä tasolla. Tästä syystä säätimen integrointiaika muutettiin vaihtumaan kaasuttimen petilämpötilan mukaan eli säätöeron poiston nopeus laitettiin riippumaan kaasutuksen voimakkuudesta. Muutos tehtiin, jotta kaasuttimen tehoa ei nosteta liikaa tilanteissa missä NO<sub>x</sub>-päästöt ovat tehoasetuksen säätimen asetusarvon alapuolella ja kaasuttimen petilämpötila normaalia alhaisempi eli poltettavan tuotekaasun saanto normaalia korkeampi.

Kaasuttimen petilämpötilan muutoksien vuoksi, säätimen asetusarvon määräytymiselle luotiin vielä neljäs ehto. Tässä poikkeusehdossa säätimen ohjauksen annetaan pienentyä kuolleella alueella, jos kaasuttimen petilämpötila on matala ja NO<sub>x</sub>-päästöt korkealla. Ehdolla pyrittiin ennakkoimaan NO<sub>x</sub>-päästöjen nopeaa kasvua.

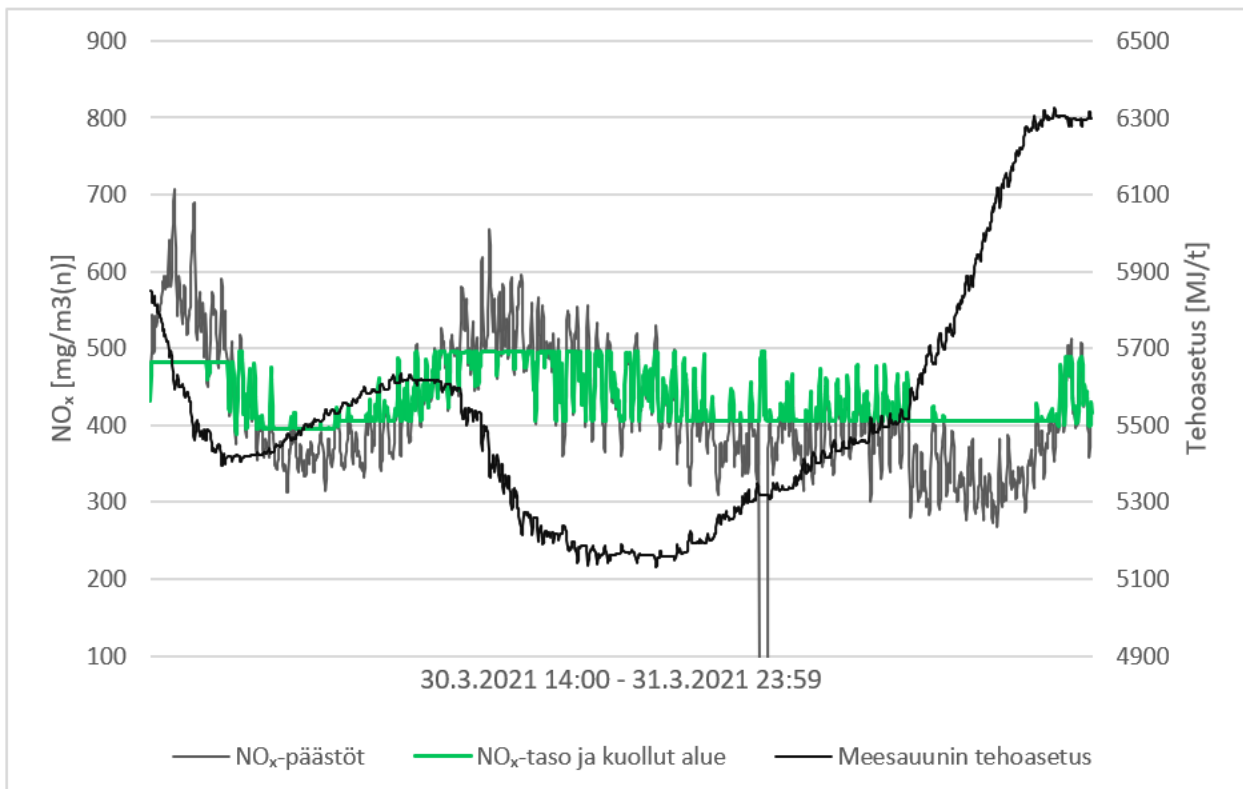
Integrointiajan tavoin, myös säätimen vahvistuksesta tehtiin muuttuva. Säätimen vahvistus laitettiin seuraamaan uunin tuotantoa. Tehoasetussäädöllä meesauunin tehon kasvu on sitä suurempaa mitä korkeammalla tuotannolla sitä operoidaan (ks. liite 5). Jos vahvistuksen olisi annettu olla vakiona, meesauunin tehonsäätö olisi ollut minimi tuotannolla liian hidaskasvu ja maksimi tuotannolla liian nopea. Vahvistuksen oikaisulla tasoitettiin tehon muutoksen suhdetta tuotantoon.

Tehoasetuksen säätimen ohjauksen voimakkuuden kasvattaminen päästörajan läheisyydessä todettiin koeajojen aikana huonoksi ideaksi. Säätimellä saatiin tuotettua hyvää jäännöskarbonaattia alle 500 mg/m<sup>3</sup>(n) NO<sub>x</sub>-tasolla. NO<sub>x</sub>-päästöjen ylittäessä yli 500 mg/m<sup>3</sup>(n) on meesauuni jo niin kuuma, että typenoksidipäästöt alkavat piikittämään rajusti ylöspäin. Tämä johtaa tehoasetuksen säätimen erittäin nopeaan kasvuun, joka itsessään vähentää säätimen ohjausta riittävällä nopeudella. Säätimen nopeuttaminen aiheutti koeajoissa lähinnä sen yliampumista. Se taas johti uunin kylmenemisiin.

Säätimen ohjauksen jäädytykset toteutettiin kehitysehdotuksen mukaan. Säätimeen lisättiin vielä erillinen tehonvähennys tilanteisiin, joissa uunin alasajon riski kasvaa liian suureksi. Tuotannon

muutoksista käynnistyvä viiden minuutin jäädytys poistettiin. Säätimestä saatiin tehtyä sen verran hidas, että meesauunin tehon säätymisen tehoasetuksen ja tuotannon muutoksen vaikutuksesta yhtäaikaan ei nähty ongelmana.

Tehonsäätö käyttöön otettiin happisäädön käyttöönoton jälkeen. Tehonsäädön käytössä korostui meesauunin jäännöshapen asetusarvo. Meesauunin operaattoreita haastateltaessa kävi ilmi, että 3 %:n jäännöshapella uunin  $\text{NO}_x$ -pitoisuudet nousevat hyvin nopeasti yli sallitun kuukausikeskiarvon. Yli 5 %:n jäännöshapella uunin lämpeneminen on taas liian hidasta. Happisäädön asetusarvo aseteltiin alustavasti 4,0 %:iin. Tällä jäännöshappiarvolla pyrittiin pitämään uunin hyötysuhde hyvänä,  $\text{NO}_x$ -päästöt kurissa sekä luomaan tehonsäädölle optimaalinen happitaso, missä se pystyy vaikuttamaan uunin typenoksidipäästöihin. Koeajojen alustavien tuloksien perusteella meesauunille määritettiin sopiva  $\text{NO}_x$ -taso ja kuollut alue. Operaattoreita ohjeistettiin pitämään  $\text{NO}_x$ -taso noin 400-500  $\text{mg}/\text{m}^3(\text{n})$  välillä ja kuollut alue noin 100  $\text{mg}/\text{m}^3(\text{n})$ . Kuviossa 34 on esitelty tehoasetuksen säätimen toiminta meesauunin tehonsäädön koeajon aikana.



Kuvio 34. Tehoasetuksen säätimen toiminta

## 12 Tulokset ja analysointi

Tehon- ja happisäädön käyttöönoton jälkeen säätimien toimintaa seurattiin ja analysoitiin neljän viikon ajan. Tällä tarkasteluvälillä tehonsäätö oli kaasutuksen aikana automaattilla 89 % ajasta (ks. liite 6). Happisäätö oli vastaavasti automaattilla 84 % meesauunin tuotantoajasta (ks. taulukko 2). Säätimiä pidettiin/käytettiin manuaali-tilassa lähinnä kaasuttimen suuremmissa häiriötilanteissa, kaasuttimen ollessa minimikuormalla sekä meesauunin ylös- ja alasajoissa. Korkea automaatti-tilojen käyttöprosentti kertoo, että operaattorit näkevät säätimien parantavan meesauunin toimintaa. Tätä havaintoa tukee taulukossa 2 esitetyt tulokset. Taulukkoon 2 on koottu neljän viikon ajalta kerätty mittausdata meesauunin prosessista ja verrattu sitä säätömuutoksia edeltäneen ajan mittausdataan. Liitteissä 7-11 on esitetty taulukon 2 mittaustulokset trendien muodossa.

Taulukko 2. Säätömuutoksien vaikutukset meesauunin prosessiin

Tutkittava kohde	Ennen muutosta (4 vk)	Muutoksen jälkeen (4 vk)	Muutos-%
Jäännöskarbonaatin keskiarvo	5,21 %	4,33 %	-16,9 %
Jäännöskarbonaatin keskihajonta	3,87 %	1,73 %	-55,3 %
Yli 6,0 %:n jäännöskarbonaatti	12 krt	4 krt	-66,7 %
NO <sub>x</sub> -päästöjen keskiarvo	397,2 mg/m <sup>3</sup> (n)	334,7 mg/m <sup>3</sup> (n)	-15,7 %
Päästörajan ylittävät NO <sub>x</sub> -päästöt:			
Yli 600 mg/m <sup>3</sup> (n)	23 krt	17 krt	-26,1 %
Yli 800 mg/m <sup>3</sup> (n)	10 krt	3 krt	-70,0 %
Yli 1000 mg/m <sup>3</sup> (n)	7 krt	1 krt	-85,7 %
Jäännöshapen keskiarvo	4,91 %	4,40 %	-10,4 %
Happisäätö A-tilassa	48 %	84 %	75,0 %
Ominaisenergiankulutuksen keskiarvo	6066 MJ/t	5581 MJ/t	-8,0 %

Taulukon 2 mukaan säätömuutoksilla on pystytty parantamaan poltetun kalkin laatua. Jäännöskarbonaatin keskiarvon laskua merkittävämpänä tuloksena voidaan pitää karbonaattinäytteiden keskihajonnan pienenemistä. Tulos osoittaa, että tehonsäädöllä on onnistuttu tasaamaan jäännöskarbonaatin laadun vaihteluita. Tämä havainto näkyy myös yli 6,0 %:n jäännöskarbonaatin ylityksien laskuna (ks. taulukko 2). Jäännöskarbonaatin tasaantumisen voi osittain päätellä, että tehonsäätö reagoi kaasutustehon muutoksiin operaattoreita paremmin.

Jäännöskarbonaattinäytteisiin perustuvat tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska näytteen laatu on hyvin riippuvainen näytteenottoajasta. Neljän viikon tarkasteluvälillä oli esimerkiksi tilanteita, joissa poltetun kalkin jäännöskarbonaatti oli todella korkea. Näissä tilanteissa jäännöskarbonaattia mitataan kuitenkin harvoin, koska operaattoreille on ilmeistä, että meesauuni ei käy kuumana. Toisaalta joinain ajanjaksoina kalkki on ollut todennäköisesti todella laadukasta, mutta tällöin ei ole vain mitattu jäännöskarbonaattia. Jäännöskarbonaattimittauksiin perustuvia tuloksia voidaankin pitää vain suuntaa antavina.

Taulukon 2 tulokset osoittavat, että uusilla säätötavoilla on onnistuttu pienentämään  $\text{NO}_x$ -päästöjen keskiarvoa 15,7 %. Vähennys ei ole itsessään merkittävä, mutta kun ottaa huomioon kalkin laadun samanaikaisen kasvun, voidaan parannusta meesauunin toimintaan pitää huomattavana. Käytännössä säätimillä on pystytty tuottamaan laadukasta kalkkia pienemmillä meesauunin huippulämpötiloilla. Huippulämpötilojen laskusta kertoo myös päästörajan ylityksien vähentyminen. Varsinkin korkeiden  $\text{NO}_x$ -päästöjen määrää on saatu alennettua merkittävästi (ks. taulukko 2). Yli 600 mg/m<sup>3</sup>(n) ylityksiä on silti edelleen suhteellisen paljon.  $\text{NO}_x$ -päästöjen pitäminen tämän rajan alapuolella pitkiä aikoja on hyvin vaikeaa, koska kaasuttimen polttoaineen laatua ei hallita. Tehonsäätö ei siis täysin pysty estämään päästörajan ylityksiä, mutta se reagoi niihin nopeasti laskemalla kaasuttimen tehoa. Tämä vähentää  $\text{NO}_x$ -päästöjen viipymäaikaa päästörajan yläpuolella (ks. liite 8).

Suurimpana syynä  $\text{NO}_x$ -päästöjen laskuun on matala  $\text{NO}_x$ -taso, jolla meesauunia operoitiin tarkasteluvälin ajan (ks. liite 12). Tarkasteluvälin alussa huomattiin nopeasti, että  $\text{NO}_x$ -päästöjen ei tarvitse olla lähellä meesauunin kuukausiraja-arvoa, jos halutaan tuottaa hyvä laatuista kalkkia. Havainto oli mahdollista tehdä, koska meesauunin prosessin toimintaa saatiin tasattua happisäädöllä. Jäännöshapen tasaaminen myös osaltaan vaimensi  $\text{NO}_x$ -päästöjen piikittelyä.

Taulukon 2 mukaan meesauunin jäännöshapen keskiarvo laski 10,4 % vertailuajanjaksoon nähden. Operaattorit ovat siis luottaneet uuden happisäädön toimintaan ja laskeneet jäännöshappipitoisuuden tasoa meesauunissa. Luottamus uuteen happisäätöön näkyy lisäksi sen käyttömäärässä, joka oli kasvanut 75 % vanhaan happisäätöön nähden (ks. taulukko 2). Taulukossa 2 esitetyt tulokset osoittavat, että uusi happisäätö toimii huomattavasti paremmin kuin vanha. Happisäädön positiiviset vaikutukset meesauunin jäännöshapteen ovat nähtävissä jäännöshapen trendistä (ks.

liite 9). Nämä vaikutukset näkyvät myös meesauunin ominaisenergiankulutuksen laskuna: matalammalla ja tasaisemmalla jäännöshapella on saatu parannettua uunin hyötysuhdetta (ks. taulukko 2). Meesauunin ominaisenergiankulutusta vertaillaessa pitää kuitenkin muistaa, että se on vain laskennallista, koska kaasuttimen todellista tehoa ei tiedetä.

Taulukossa 2 esitetyt tulokset ovat kokonaisuudessaan hyvin positiiviset. Tuloksien luotettavuutta lisää meesauunin tuotannon vaihtelu tarkasteluvälillä eli säätimet eivät toimineet vain yhdessä tuotantopisteessä (ks. liite 13). Tuloksiin pitää silti suhtautua varauksella, koska säätimien toiminnan tarkasteluväli oli vain neljä viikkoa. Näin lyhyellä aikavälillä mahdolliset mittaushäiriöt sekä meesauunin erilainen tuotantotilanne vertailuajanjaksojen välillä korostuu esitettyjen tuloksien arvoissa. Tuloksien luotettavuutta olisi mahdollista lisätä pidentämällä vertailuajanjaksojen aikaväliä sekä kalibroimalla kaikki tutkimuksessa käytetyt mittaukset ennen sen suorittamista. Lyhyen aikavälin sekä mittausten epävarmuustekijöiden puitteissa on kuitenkin pystytty selkeästi osoittamaan, että tässä opinnäytetyössä kehitetyt säätimet parantavat biotuotetehtaan meesauunin prosessia merkittävästi.

## 13 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää Äänekosken biotuotetehtaalle säätöratkaisu, jossa kuorikaasuttimen tehonsäätö perustuu meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöihin. Tavoitteena oli vähentää NO<sub>x</sub>-päästöjä ilman, että uunissa poltetun kalkin laatu kärsii. Tehonsäädön toimivuuden vuoksi tässä työssä piti kehittää myös meesauunin happisäätöä. Näistä tavoitteista muodostettiin tutkimuskysymykset, joihin työn aikana vastattiin. Lopputuloksena saavutettiin toimiva tehonsäätö ja happisäätö. Näiden säätöjen avulla pystyttiin vähentämään biotuotetehtaan meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöjä, parantamaan siinä poltetun kalkin laatua sekä laskemaan sen happitasoa. Voidaankin todeta, että tämän opinnäytetyön tavoite on saavutettu.

Työssä kehitetyt säätimet vaativat kuitenkin jatkokehittämistä. Tehonsäädön ongelmana on edelleen NO<sub>x</sub>-päästöjen ja kalkin laadun keskinäinen ristiriita. Tehoasetuksen säädin viritettiin sen verran hitaaksi, että se ei ylikuumenna meesauunin polttopäätä. Hitaus kuitenkin kustautuu kalkin laadussa, kun kaasuttimella tapahtuu vähänkin isompi häiriö. Toimeksiantajan vastuulle jää määrittää kuinka paljon meesauunin tehonsäädön toiminnassa painotetaan NO<sub>x</sub>-päästöjä ja kuinka paljon laadukasta kalkkia. Tämä tulee vaatimaan säätimen hienovirittämistä.



Happisäädön toimivuutta hankaloittaa savukaasupuhaltimen mahdollinen likaantuminen, joka estää sillä säätämisen. Tällöin happisäätö olisi jälleen pelkän savukaasupellin varassa. Tämä ei kuitenkaan ole loppupelissä suuri haitta, kunhan pelti toimii tässä työssä kehitetyn toimintaperiaatteen mukaan. Vanhan happisäädön heikkous oli, että siinä pyrittiin ajamaan happialuetta. Savukaasupuhaltimen vaikutus biotuotetehtaan meesauunin jäännöshapteen todettiin tämän työn aikana sen verran pieneksi, että pelkällä savukaasupellillä toimiva happisäätö on käyttökelpoinen, kunhan tavoitellaan happiasetusarvoa.

Savukaasupuhaltimen likaantumista suurempi haitta on happisäädön mahdolliset vaikutukset meesauunin flash-kuivuriin. Happisäädön ohjaus muuttaa jatkuvasti flash-kuivurin läpi kulkevaa savukaasuvirtausta. Tämä voi aiheuttaa pitkällä aikavälillä syöttöpään tukkeutumista, jos meesa ei jostain syystä kuivu riittävästi savukaasujen vaikutuksesta. Mielestäni syöttöpään tukkeutuminen happisäädön vaikutuksesta on hyvin epätodennäköistä, koska savukaasupellin ja savukaasupuhaltimen ohjaukset rajoitettiin ylläpitämään riittävää savukaasuvirtausta flash-kuivurissa. Happisäädön vaikutuksia flash-kuivurin toimintaan ei pystytty tämän opinnäytetyön aikana tutkimaan meesauunin syöttöpään pidempiaikaisen tukkoisuuden vuoksi. Opinnäytetyön aikana ei pystytty myöskään todentamaan kiertokaasupellin asennon vaikutuksia happisäädön kokonaistoimintaan. Kiertokaasupellin suurempi avauma voi heikentää happisäädön toimivuutta, kun suurempi osa savukaasupuhaltimen läpi kulkevasta savukaasuvirtauksesta kierrätetään takaisin flash-kuivuriin. Tehonsäädön tavoin happisäätöä joudutaan todennäköisesti hienovirittämään tulevaisuudessa.

Säätöjen lopullinen hienovirittäminen vaatii ajan mukana tuomaa käyttäjäkokemusta. Tämä opinnäytetyö suoritettiin sen verran lyhyellä aikavälillä, että edellä mainittua käyttäjäkokemusta ei ole vielä kertynyt meesauunin operaattoreille. Näkisin kuitenkin, että säätöjen jatkokehittämistä vielä tärkeämpää olisi parantaa kuoren kaasutuslaitoksen polttoainejärjestelmän toimintaa.

Kuoren kaasutuslaitoksen nykytilassa jatkuvasti muuttuva polttoaineen laatu heiluttaa kaasuttimen kaasutustehoa. Tämä heiluminen näkyy suoraan meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöissä ja ominaisenergiankulutuksessa (ks. liitteet 8 ja 11). Käytännössä muuttuva kaasutusteho muuttaa kaasuttimen polttoaineen tarvetta, joka vastaavasti heikentää viirakuivurin toimintaa, jolloin polttoaineen laadun vaihtelu kasvaa entisestään. Näkemykseni mukaan ongelma on ratkaistavissa,

mikäli havu- ja koivukuoren suhde pystytään vakioimaan. Vakiintuneella polttoaineen lämpöarvolla kuorikaasuttimen polttoaineen kulutus tasaantuisi huomattavasti, mikä mahdollistaisi kuoren kuivurilla tasaisemman kuivauksen. Tällä hetkellä kuoren kaasutuslaitoksen polttoaine muuttuu kuitenkin sen verran paljon, että tietyin väliajoin tuotekaasun lämpöarvo romahtaa. Tehonsäätöä ja happisäätöä onkin hyvin vaikea pitää pitkiä aikoja automaattilla, kun katoavaan tehoon joudutaan reagoimaan nopeilla säätömuutoksilla (ks. liitteet 6 ja 10). Muuttuva kaasutusteho näkyy myös tehoasetuksen säätimen  $\text{NO}_x$ -tason ja kuolleen alueen muutoksina (ks. liite 12). Ideaalissa tilanteessa operaattorit pitäisivät tehoasetuksen säätimen asetusarvon lähes aina vakiona.

Polttoainejärjestelmän kehittämisen lisäksi, kaasuttimen petilämpötilan säädön kuollut alue pitäisi mielestäni poistaa. Kun kuollut alue on käytössä, poltettavan tuotekaasun määrän annetaan muuttua hallitsemattomasti tietyllä alueella. Tämä hallitsemattomuus näkyy jäännöshapen trendistä, joka piirtää sinikäyrää (ks. kuviot 28 ja 33). Tässä opinnäytetyössä kehitetty happisäätö rajoittaa jäännöshapen liikkumisaluetta, mutta se ei poista sen sinikäyrämäisyyttä. Petimateriaalin syötön haitat pitäisikin pystyä poistamaan hyvin viritetyllä petilämpötilansäätimellä. Tällöin kaasuttimen petilämpötilan säätö tavoittelisi tiettyä pistettä, ei aluetta. Kuolleen alueen poisto tasaisi meesauunin jäännöshapen sekä  $\text{NO}_x$ -päästöjen lyhytaikaista heiluntaa.

Polttoainejärjestelmän muutoksilla sekä kaasuttimen petilämpötilan säädön virittämisellä pystyttäisiin näkemykseni mukaan parantamaan biotuotetehtaan meesauunin prosessin toimintaa merkittävästi. Näiden parannuksien avulla saataisiin vähennettyä happisäädön sekä  $\text{NO}_x$ -päästöjen lyhyt- ja pitkäaikaista heiluntaa. Tasaisemmilla  $\text{NO}_x$ -päästöillä työssä kehitetyn tehonsäädön toiminnasta tulisi todella vakaata ja meesauunin  $\text{NO}_x$ -tasoa pystyttäisiin laskemaan.  $\text{NO}_x$ -päästöjen tasaantuminen mahdollistaisi myös kuolleen alueen poiston tehoasetuksen säätimestä.

Kaiken kaikkiaan säätimet toimivat hyvin haastavassa toimintaympäristössä ja niillä on pystytty tuomaan lisäarvoa toimeksiantajalle. Uskoisin, että tässä opinnäytetyössä kehitettyjä säätimiä pystytään hyödyntämään myös muissakin meesauuneissa, jotka käyttävät kuorikaasua polttoaineenaan. Tulevaisuuden sovelluksissa olisi kuitenkin suotavaa, että polttoaineen laadun hallintaan ja kaasutuslaitoksen toimintaan panostetaan vahvasti ennen kuin lähdetään kehittämään hienos-tuneita säätöpiirejä.

## Lähteet

- A review of NO<sub>x</sub> emission control strategies for industrial boilers, kraft recovery furnaces, and lime kilns. 1999. National council for air and steam improvement. Viitattu 18.1.2021. <https://p2infohouse.org/ref/51/50112.pdf>.
- Adams, T. 1999. Lime Kiln Principles and Operations. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI. Viitattu 5.1.2021. <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/2-2.pdf>.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Korhonen, J. & Laatikainen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoainneiden ominaisuuksia. Verkkojulkaisu. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Viitattu 11.1.2021. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>.
- Arpalahti, O., Engdahl, H., Jäntti, J., Kiiskilä, E., Liiri, O., Pekkinen, J., Puumalainen, R., Sankala, H. & Vehmaan-Kreula, J. 2008. Chemical Pulping. Part 2: Recovery of Chemicals and Energy. Papermaking Science and Technology Book 6, Chemical Pulping. Helsinki: Finnish Paper Engineers`Association.
- Bajbai, P. 2016. Pulp and paper Industry: Chemical Recovery. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. Viitattu 5.1.2021. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.
- Basu, P. 2018. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. London, England: Academic Press. Viitattu 10.1.2021. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.
- Basu, P. 2006. Combustion and gasification in fluidized beds. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Blevins, T., Brown, M., McMillan, G. & Wojsznis, W. 2003. Advanced Control Unleashed-Plant Performance Management for Optimum Benefit. Research Triangle Park: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, ISA. Viitattu 8.1.2021. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

Direktiivi 2014/687/EU. Parhaan käytettävissä olevan tekniikan direktiivi sellu-, paperi- ja kartonkiteollisuudelle. Annettu 26.9.2014. Viitattu 18.1.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018D1147&from=EN>.

Erhard, R. 1999. Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), why and how they are controlled. Raportti NO<sub>x</sub>-päästöjen vähentämiskeinoista. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto. Viitattu 18.1.2021. <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fnoxdoc.pdf>.

France, S., Jones, A. & Tran H. 2009. Current status of alternative fuel use in lime kilns. Artikkel. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI. Viitattu 6.1.2021. <https://www.researchgate.net/publication/293460787>.

Grate cooler. N.d. Arinajäähdyttimen tuote-esittely. AGICO Group. Viitattu 6.1.2021. <http://www.cementplantequipment.com/products/clinker-cooler/grate-cooler/>.

Hakkarainen, T. 2014. Reduction of nitrogen oxide emissions in lime kiln. Diplomityö. Lappeenranta Teknillinen Yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 18.1.2021. [https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102230/Reduction%20of%20nitrogen%20oxide%20emissions%20in%20lime%20kiln\\_doria.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102230/Reduction%20of%20nitrogen%20oxide%20emissions%20in%20lime%20kiln_doria.pdf?sequence=2&isAllowed=y).

Harju, H. & Marttinen, A. 2000. Sääätötekniikan koulutusmateriaali. Suomen Automaatioseura ry. Viitattu 21.1.2021. [https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid\\_kirja\\_1-1.pdf](https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf).

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.

Ikonen, Ossi. 2012. Alternative liquid biofuels for lime kilns. Kandidaattityö. Lappeenranta Teknillinen Yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 11.1.2021. <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76995/Kandity%C3%B6%202012%20Ikonen%20Ossi%20-%20Alternative%20liquid%20bio-fuels%20for%20lime%20kiln%20JULKINEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Isaksson, J. 2015. Gasification of waste and biofuels-Operational experiences in large scale. Esitysmateriaali, Valmet. Global Syngas Technologies Council, GSTC. Viitattu 11.1.2021.  
<https://www.globalsyngas.org/uploads/downloads/2015-14-2-isaksson.pdf>.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kemikaalikierto. 2021. KnowPulp oppimisympäristö, v.19.0. Prowledge Oy. Viitattu 14.1.2021.  
<https://janet.finna.fi>.

Kuusrainen, T. 2019. Kuorikaasuttimen prosessinohjauksen kehittäminen. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 7.3.2021.  
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/167036/Kuorikaasuttimen%20prosessinohjauksen%20kehitta%CC%88minen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

Maakaasukäsikirja. 2014. Verkkojulkaisu. Suomen kaasuyhdistys. Viitattu 11.1.2021.  
<https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/>.

Metsä Fibre. N.d. Nettisivut. Metsä Fibre Oy. Viitattu 10.2.2021. <https://www.metsafibre.com/fi/Pages/default.aspx>.

Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaan YVA-selostus. 2014. Ympäristöhallinto. Viitattu 6.2.2021. <https://www.ymparisto.fi/aanekoskenbiotuotetehdasYVA>.

Mikä biotuotetehtas? N.d. Nettisivut. Metsä Fibre Oy. Viitattu 10.2.2021. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Tuotantolaitokset/Biotuotetehtas/Pages/mika-biotuotetehtas.aspx>.

O2 learning handbook. 2017. Tuote-esittely. Yokogawa. Viitattu 13.3.2021. [https://web-material3.yokogawa.com/ZR\\_Handbook\\_rev2.pdf](https://web-material3.yokogawa.com/ZR_Handbook_rev2.pdf).

Organisaatio, omistajat ja johto. N.d. Nettisivut. Metsä Fibre Oy. Viitattu 10.2.2021.  
<https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Organisaatio-ja-johto/Pages/default.aspx>.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit.

Reactions & transformations. N.d. Kaasutuksen esittely. Nettisivut. National Energy Technology Laboratory. Viitattu 10.1.2021. <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/reaction-transformations>.

Savolainen, J. & Vaittinen, R. 2007. Sääätötekniikan perusteita. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys.

Smook, G. 2016. Handbook for Pulp & Paper Technologists (4th Edition). Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI. Viitattu 5.1.2021. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

Suomalainen, L., Turunen, T. & Vapaalahti, S. 2015. Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva: Helsinki. Viitattu 2.2.2021. [https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusuunien\\_energiatehokkuus.pdf](https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusuunien_energiatehokkuus.pdf).

Thermal gasification of biomass. N.d. Nettisivut. Kansainvälinen energiajärjestö: bioenergia. Viitattu 10.1.2021. [http://task33.ieabioenergy.com/content/thermal\\_gasification](http://task33.ieabioenergy.com/content/thermal_gasification).

Trang, H. & Vakkilainen, E. 2016. The kraft chemical recovery process. Artikkelit. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI. Viitattu 7.1.2021. <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>.

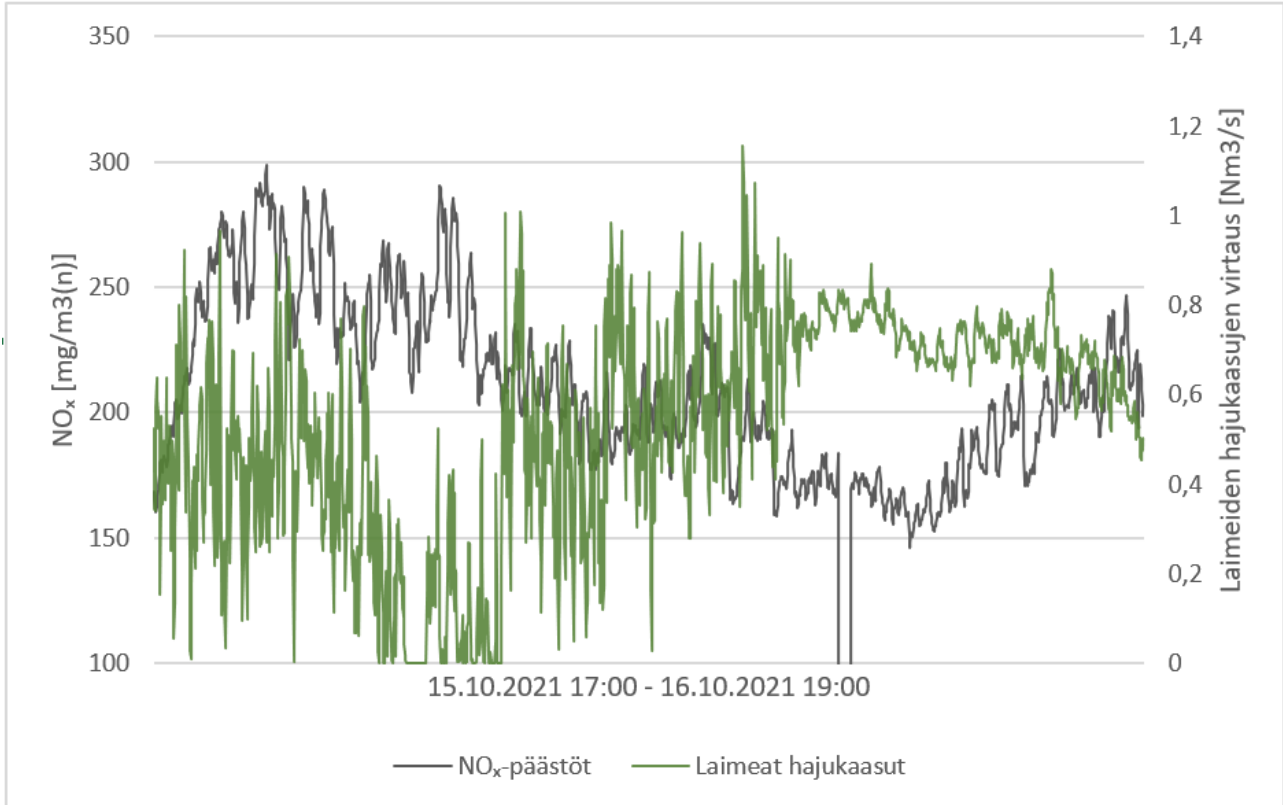
Vakkilainen, E. 2017. Steam generation from biomass. Construction and design of large boilers. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

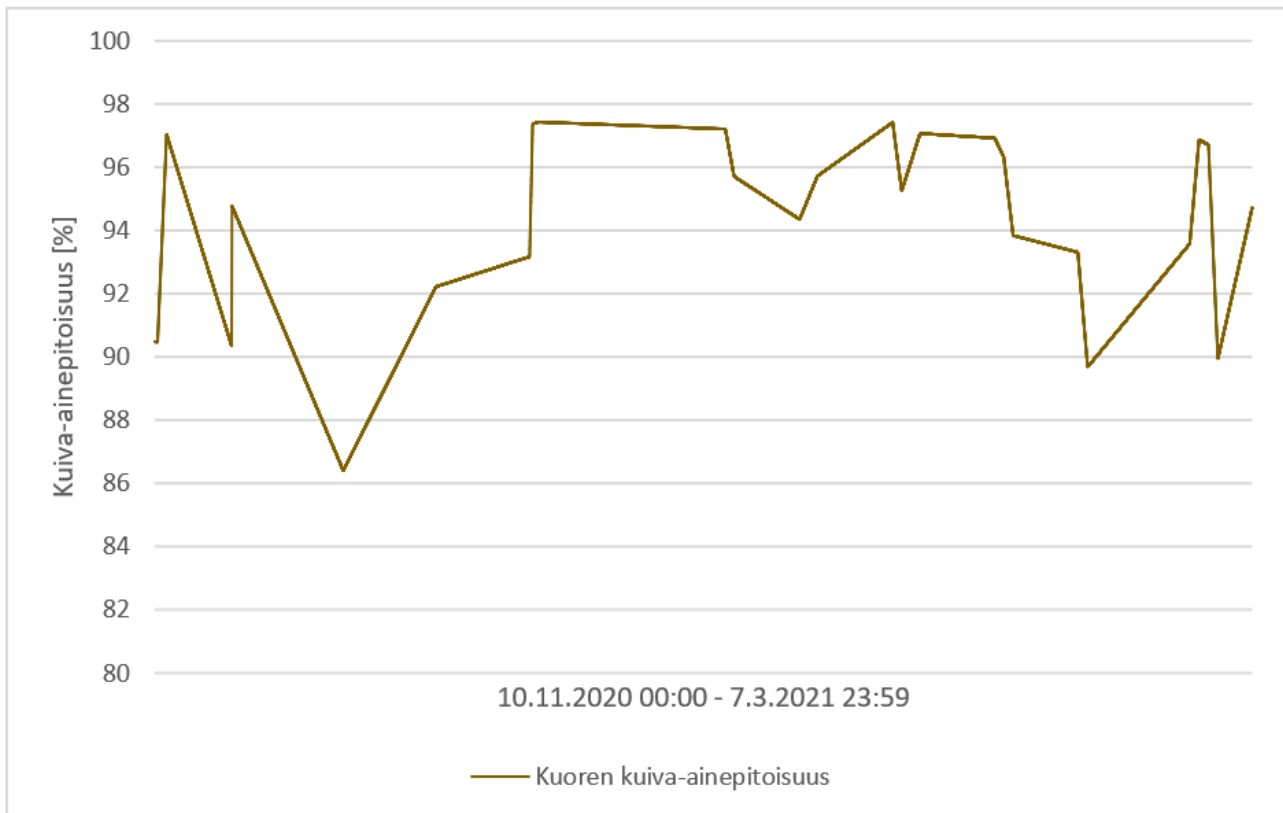
Zevenhoven, R. & Kilpinen P. 2004. Controll of pollutants in flue gases and fuel gases. Opetusmateriaali. Helsingin yliopisto. Viitattu 15.1.2021. <http://users.abo.fi/rzevenho/gasbook.html>.

Äänekosken biotuotetehdas. N.d. Nettisivut. Metsä Fibre Oy. Viitattu 10.2.2021. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Tuotantolaitokset/Biotuotetehdas/Pages/default.aspx>.

## Liitteet

### Liite 1. Laimeiden hajukaasujen vaikutus meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöihin tasaisella pikiöljypoltolla



**Liite 2. Viirakuivurilla kuivatun kuoren kuiva-ainepitoisuus**



### Liite 3. Savukaasupuhaltimen, savukaasupellin ja kiertokaasupellin A-tilan muutoksien toimintakuvaukset sekä happisäätimen toimintakuvaus

#### MU Savukaasupuhallin nopeus

- M-tilassa R/A-asetusarvo seuraa piirin mittausta.
- R/A-tilassa nopeusohjearvo tulee piiriltä MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ
- Automaatilla säätimen ohjaus on rajoitettu välille 80...88 %.
- Piiri ohjataan M-tilaan, jos paine sähkösuotimen jälkeen ylittää LL1-rajan -28,5 mbar(g).
  
- Hälytykset
  - Savukaasupuhaltimen ohjaus automaatilla alle 80,5 % > 10 min, kun meesauuni O2 säätö on automaatilla.
  - Savukaasupuhaltimen ohjaus automaatilla yli 87,5 % > 10 min, kun meesauuni O2 säätö on automaatilla.
  
- Tiedot muihin piireihin
  - MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ
  - KELLOPELTI ENNEN PIIPPUA
  - MU SAVUKAASUPUHALLIN

#### Kellopelti ennen piippua (Savukaasupelti)

- Piiri ohjataan M-tilaan, kun MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ ei ole automaatilla.
- A-tilassa asento-ohjearvo pyrkii pitämään A-tilassa olevan savukaasupuhaltimen ohjauksen välillä 80,35...87,65 % ja estämään häikäpiikit uunissa:

Pelti sulkeutuu 2 %, jos (1 %, jos ao. ehdot ovat voimassa ja kellopellin ohjaus alle 47,5 %)

- SAVUKAASUPUHALTIMEN NOPEUS on alle 80,35 % ja
- MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ eroarvo alle -0,20 % > 4 s

Pelti avautuu 2 %, jos

- SAVUKAASUPUHALTIMEN NOPEUS on yli 87,65 % ja
- MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ eroarvo yli 0,20 % > 4 s

Pelti sulkeutuu 1 %, jos

- SAVUKAASUPUHALTIMEN NOPEUS on yli 84 % ja
- MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ eroarvo alle -0,36 % > 4 s

Pelti avautuu 1 %, jos

- SAVUKAASUPUHALTIMEN NOPEUS on alle 84 % ja
- MEESAUUNI O2 SÄÄTÖ eroarvo yli 0,36 % > 4 s

Pelti avautuu 5 %, jos

- O2 PITOISUUS ENNEN SÄHKÖSUODINTA on alle 2,8 %

TAI

- kaksi kolmesta savukaasun häkämittauksista on yli 500 ppm:
  - SAVUKAASUN HÄKÄPITOISUUS 1
  - SAVUKAASUN HÄKÄPITOISUUS 2
  - SAVUKAASUN HÄKÄPITOISUUS 3
- A-tilassa jokaisen pellin liikkeen jälkeen käynnistyy ajastin, jonka jälkeen yllä mainitut ehdot voivat toteutua uudestaan (2 %:n ja 5 %:n liikkeille 90 s ajastin. 1 %:n liikkeille 24 s ajastin). A-tilassa pellin ohjaus on rajoitettu välille 45...95 %.
- Hälytykset
  - Savukaasupellin ohjaus A-tilassa > 90 %

### Kiertokaasupelti

- A-tilassa pellin asento-ohjearvo tulee laskennasta
  - $SP = (-A/12) + (400/3) + B$ , jossa
  - A= MEESASUODIN PUMPPU, t/d
  - B= KIERTOKAASUPELLIN KORJAUS, %
- A-tilassa pellin ohjaus on rajoitettu välille 25...100 %.

### Kiertokaasupellin korjaus

- Piiri toimii KIERTOKAASUPELLIN A-tilan asennon korjaajana.
- Operaattori voi muuttaa korjausta välillä -15...+15 %. Korjauksen yksikkö vastaa kiertokaasupellin %-ohjausta.
- Tiedot muihin piireihin
  - KIERTOKAASUPELLI

## Meesauuni O2 säätö (Happisäädin)

- Piiri säätää MU SAVUKAASUPUHALLIN NOPEUS nopeussäätöä.
  - M-tilassa operaattori ohjaa säätimen lähtöä välillä 80...88 %.
  - A/L-tilassa operaattori antaa jäännöshapen asetusarvoksi 3,0...10 %.
  - M-tilassa piirin A/L-asetusarvo seuraa piirin mittausta.
- 
- Operaattori valitsee jäännöshapen mittaukseksi yhden seuraavista kolmesta vaihtoehdosta:
    - O2 PITOISUUS 1 ENNEN SÄHKÖSUODINTA
    - O2 PITOISUUS 2 ENNEN SÄHKÖSUODINTA
    - O2 PITOISUUS 3 ENNEN SÄHKÖSUODINTA
  - Lukitukset

Piirin ohjaus sallittu, kun:

- MU SAVUKAASUPUHALLIN NOPEUS, R/A-tilassa.

Kun lukitus tulee voimaan:

- Säädin lukitaan M-tilaan ja ulostulo pakotetaan seuraamaan piirin MU SAVUKAASUPUHALLIN NOPEUS mittausta.
- 
- Hälytykset
    - Säättöero yli 0,5 %, jos asetusarvon ja mittauksen erotus poikkeaa yli  $\pm 0,5$  % > 20 s.
    - Säättöero yli 1,2 %, jos asetusarvon ja mittauksen erotus poikkeaa yli  $\pm 1,2$  % > 30 min.
  - Tiedot muihin piireihin
    - Säätimen lähtö piirille: MU SAVUKAASUPUHALLIN NOPEUS.

## Liite 4. Tehoasetuksen säätimen toimintakuvaus

### Uunin tehonsäädön tehoasetus

- Säätöpiirillä ohjataan meesauunin tehonsäädön tehoasetusta.
- Säätimen mittauksena käytetään NO<sub>x</sub> ppm mittauksesta johdettua NO<sub>x</sub>-mittausta mg/m<sup>3</sup>(n), joka päivittyy reaaliajassa (SAVUKAASUN NO<sub>x</sub> MU on DNA:ssa oleva NO<sub>x</sub>-mittaus mg/m<sup>3</sup>(n), mutta se päivittyy info järjestelmän päästölaskennasta minuutin välein).
- M-tilassa operaattori ohjaa tehoasetusta välillä 4500...8000 MJ/t.
- A/R-tilassa säätimen asetusarvo muodostuu NO<sub>x</sub>-tason ja kuolleen alueen mukaan.
  - NO<sub>x</sub>-taso toimii säätimen ulkoisena asetusarvona, jolla määritetään uunin NO<sub>x</sub>-päästöjen enimmäismäärä. NO<sub>x</sub>-taso on operaattorien päätettävissä välillä 250...900 mg/m<sup>3</sup>(n).
  - Kuollut alue vaikuttaa säätimen asetusarvon (NO<sub>x</sub>-tason) alapuolella. Säätimen ohjaus jäädytetään, jos sen mittaus on kuolleella alueella (tällöin R-asetusarvo on mitaus). Kuolleen alueen suuruus on operaattorin päätettävissä välillä 50...250 mg/m<sup>3</sup>(n). Säätimessä kuollut alue on aina vähintään 50 mg/m<sup>3</sup>(n).
- Säätimen ohjauksen annetaan liikkua kuolleella alueella, jos
  - Säätimen mittaus on > 350 mg/m<sup>3</sup>(n) JA
  - KAASUTIN PETILÄMPÖTILA local-asetusarvon ja mittauksen erotus on suurempi kuin 8 °C.

Tällöin asetusarvo on NO<sub>x</sub>-taso – kuollut alue.

- Mikäli säätimen mittaus on pienempi, kuin NO<sub>x</sub>-taso ja se ei ole kuolleella alueella, säätimen R-asetusarvo on: NO<sub>x</sub>-taso – Kuollut alue.
- Säätimen vahvistus muuttuu tuotannon mukana.
- Säätimen integrointiaika kaksinkertaistuu, jos
  - Säätimen mittaus on pienempi kuin asetusarvo JA
  - KAASUTIN PETILÄMPÖTILA local-asetusarvon ja mittauksen erotus on suurempi kuin 8 °C.
- Säätimen ohjaus jäädytetään, jos
  - RUISKUVESI VIRTAUS ohjaus on > 85 % TAI
  - KELLOPELTI ENNEN PIIPPUA on > 92,5 % TAI
  - O<sub>2</sub> PITOISUUS ENNEN SÄHKÖSUODINTA on < 3,15 % TAI
  - Tehonvähennyskerroin < 1,0
 JA
  - Säätimen mittaus on säätimen asetusarvon alapuolella.

Jäädytys kestää 5 minuuttia.

- Lisäksi säätimen A-tilan ohjaus jäädytetään
  - Smartcems huollon ajaksi (mittauksen kalibrointi).
  - Jos SAVUKAASUN NOX MU mittaus on alle 40 mg/m<sup>3</sup>(n).
- A-tilassa säätimen lähdöstä vähennetään tehoasetusta kertomalla se 0,94 (-6 %), jos
  - RUISKUVESI VIRTAUS ohjaus yli 99 % > 2 min TAI
  - SAVUKAASUN LÄMPÖTILA ENNEN SÄHKÖSUODINTA on > 360°C TAI
  - O<sub>2</sub> PITOISUUS ENNEN SÄHKÖSUODINTA on < 2,8 % TAI
  - kaksi kolmesta savukaasun häkämittauksista on yli 500 ppm:
    - SAVUKAASUN HÄKÄPITOISUUS 1
    - SAVUKAASUN HÄKÄPITOISUUS 2
    - SAVUKAASUN HÄKÄPITOISUUS 3
    - TAI
  - TEHONVÄHENNYS nappia on painettu
- Tehon vähennyksestä alkaa 15 min ajastin, jonka kuluttua kerroin 0,94 rampitetaan arvoon 1,0 30 minuutissa, jos
  - Yllämainituista ehdoista mikään ei ole päällä JA
  - RUISKUVESI VIRTAUS ohjaus < 95 % JA
  - SAVUKAASUN LÄMPÖTILA ENNEN SÄHKÖSUODINTA on < 350°C.
- A-tilan ohjaus on jäädytettynä, jos ohjauksen kerroin on alle 1,0 ja tehoasetuksen säätimen mittaus on pienempi kuin asetusarvo.
- Huom! Säätimen kääntäminen manuaalille ehdon laukeamisen jälkeen ei muuta kerrointa 0,94, vaan ehto rampittuu normaalisti arvoon 1,0 ajan kuluessa. Mikäli haluat ohittaa 0,94 rampituksen vaikutuksen uunin tehoon käännä MEESAUUNIN TEHONSÄÄTÖ rampituksen ajaksi manuaalille.
- Lukitukset

Piirin ohjaus sallittu, kun:

- MEESAUUNIN TEHONSÄÄTÖ on automaattilla.

Kun lukitus tulee voimaan:

- Piirin lähtö pakotetaan seuraamaan mittausta POLTTOAINETEHOKKUUS, MJ/t.

Kun lukitus poistuu: piiri vapautuu.

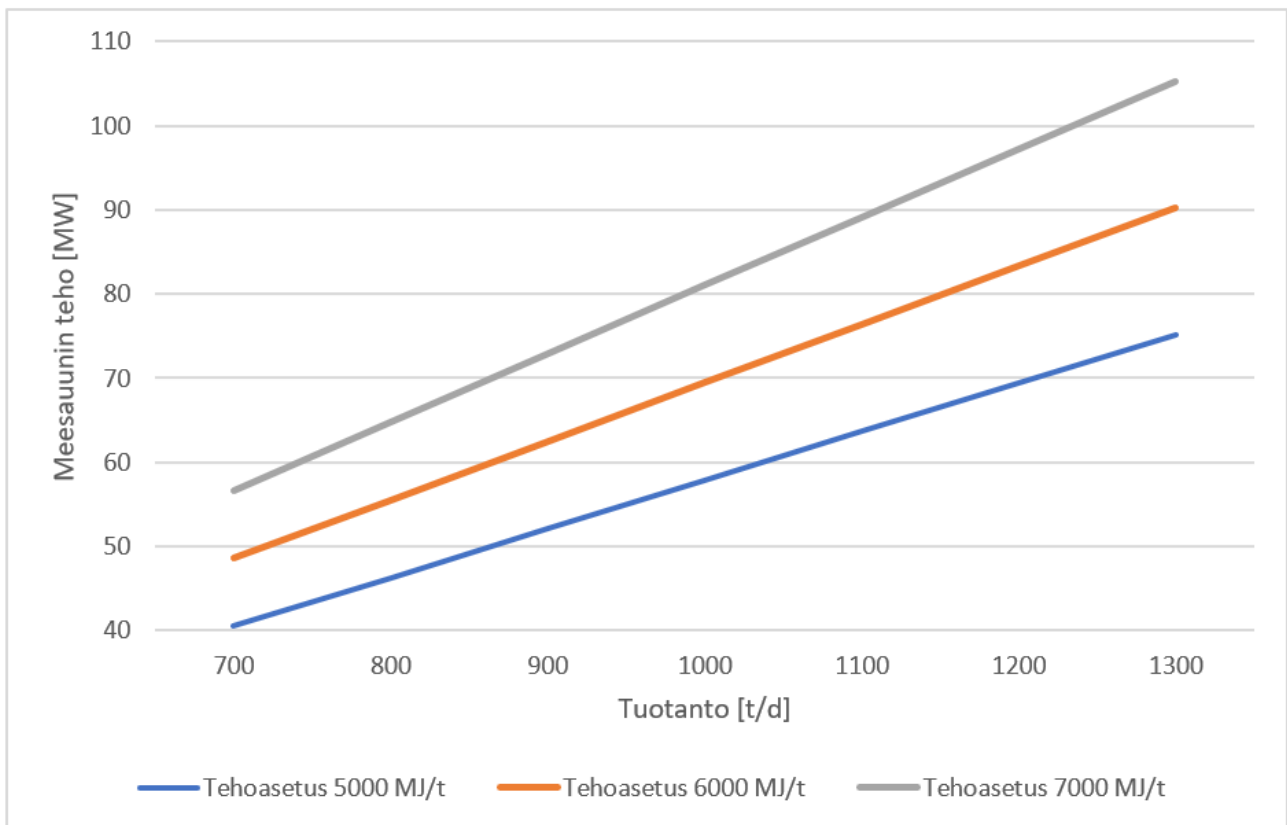
- Hälytykset
  - Tehon vähennys – 6 %
  - Ohjaus automaattilla < 4800 MJ/t
  - Ohjaus automaattilla > 7800 MJ/t
  - Säättöero yli 150 mg/m<sup>3</sup>(n), kun mittauksen ja asetusarvon ero on yli ±150 mg/m<sup>3</sup>(n) yli 30 min ajan.
- Tiedot muihin piireihin
  - MEESAUUNIN TEHONSÄÄTÖ

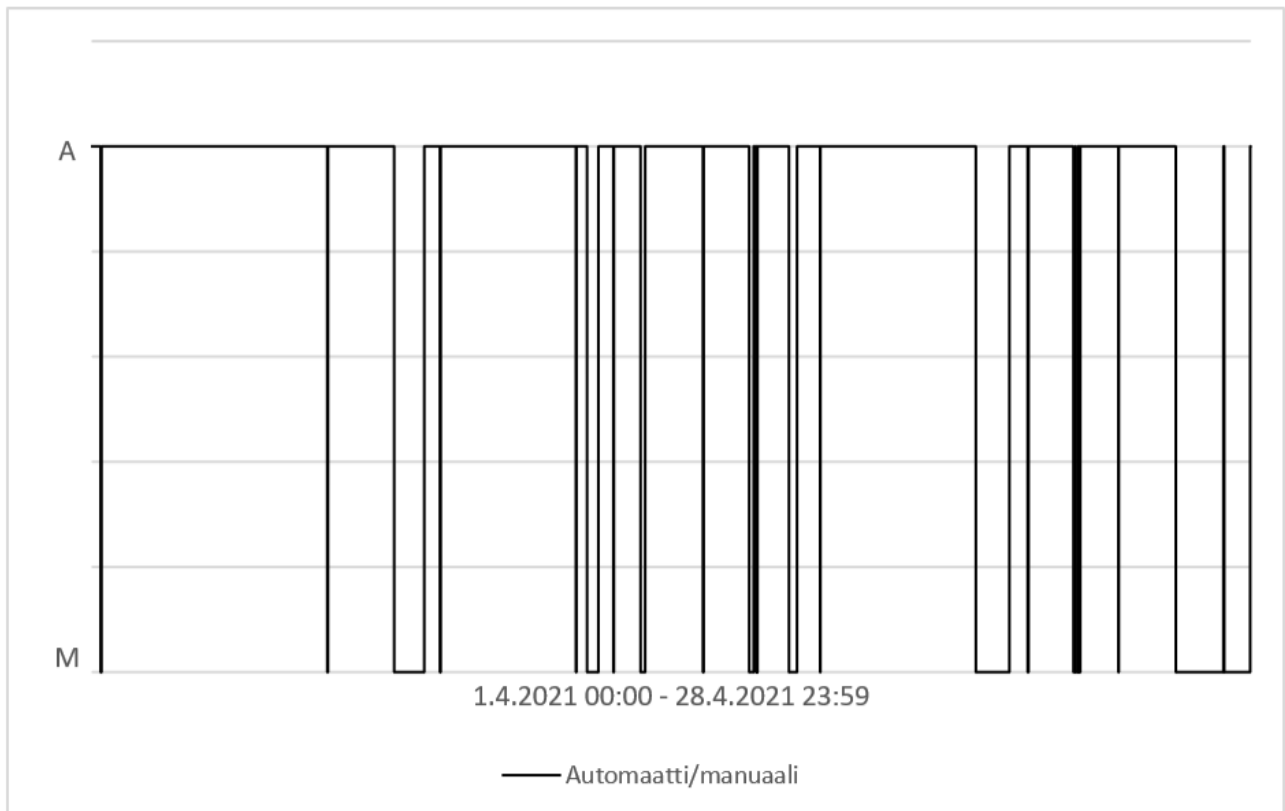
### **Uunin tehoasetuksen NO<sub>x</sub>-taso**

- Piirillä vaikutetaan säätimen MEESAUUNIN TEHOASETUS remote-asetusarvoon. A/R-tilassa säätimen asetusarvo muodostuu NO<sub>x</sub>-tason ja kuolleen alueen mukaan.
- NO<sub>x</sub>-taso toimii säätimen ulkoisena asetusarvona, jolla määritellään uunin NO<sub>x</sub>-päästöjen enimmäismäärä. NO<sub>x</sub>-taso on operaattorin päätettävissä välillä 250...900 mg/m<sup>3</sup>(n).
- Tiedot muihin piireihin
  - MEESAUUNIN TEHOASETUS

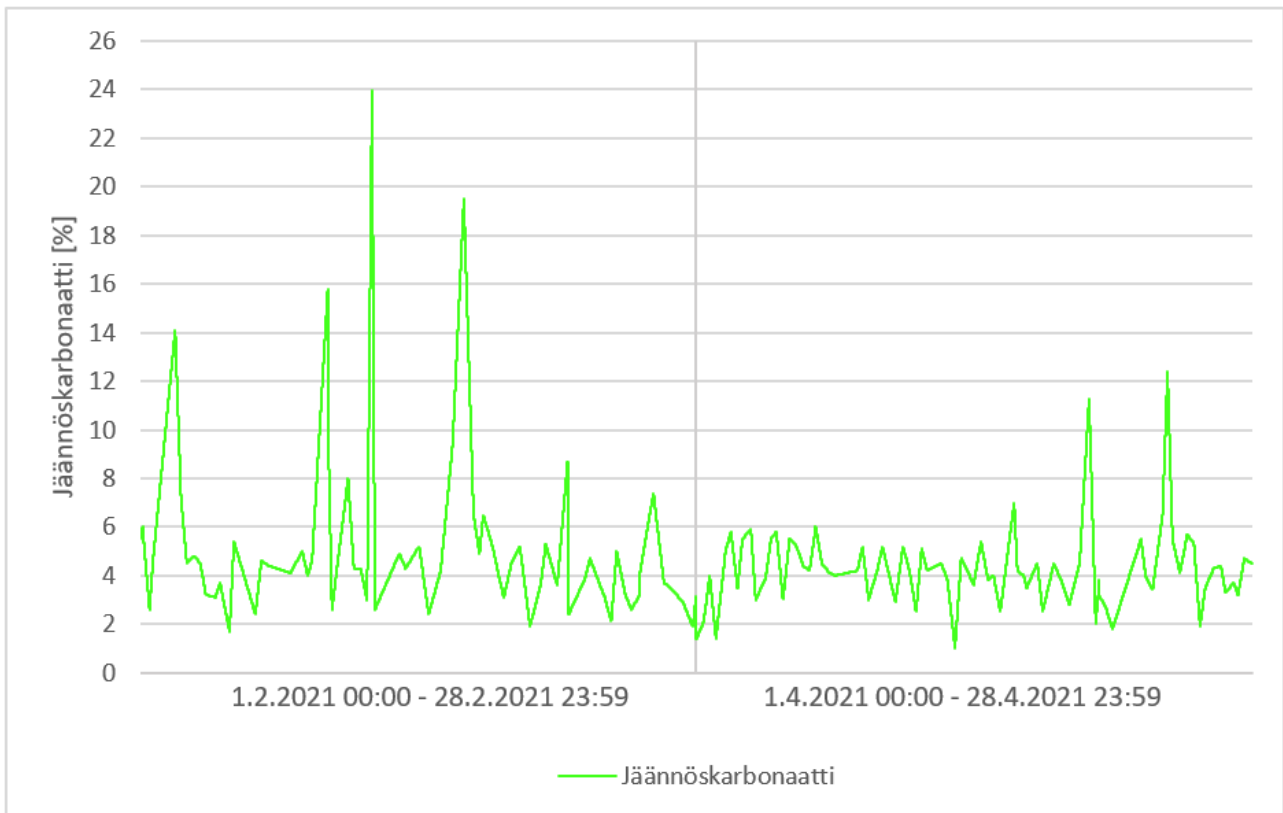
### **Uunin tehoasetuksen kuollut alue**

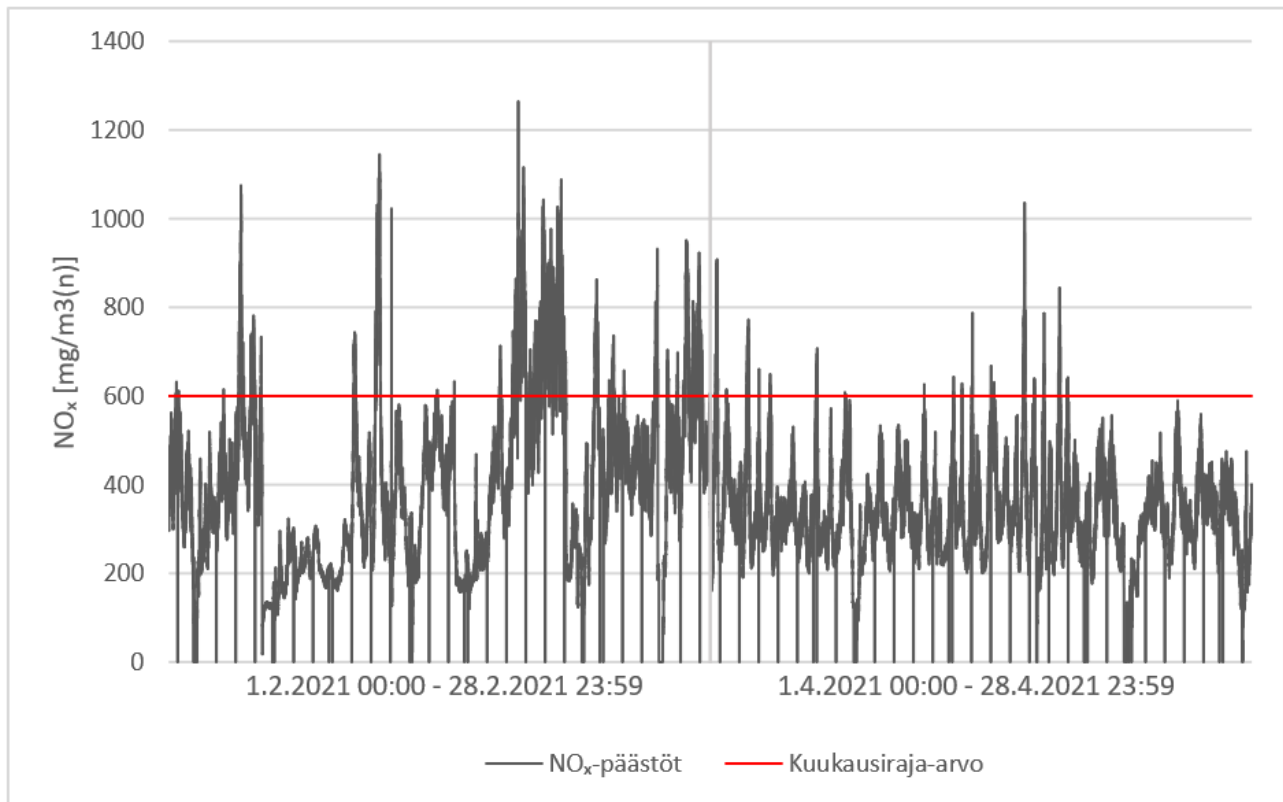
- Piirillä vaikutetaan säätimen MEESAUUNIN TEHOASETUS A-tilan kuolleen alueen suuruuteen. Kuollut alue vaikuttaa säätimen MEESAUUNIN TEHOASETUS asetusarvon (NO<sub>x</sub>-tason) alapuolella.
- MEESAUUNIN TEHOASETUS säätimen ohjaus jäädytetään, jos sen mittaus on kuolleella alueella (tällöin R-asetusarvo on mittaus).
- Operaattori voi muuttaa kuollutta aluetta välillä 50...250 mg/m<sup>3</sup>(n).
- Tiedot muihin piireihin
  - MEESAUUNIN TEHOASETUS

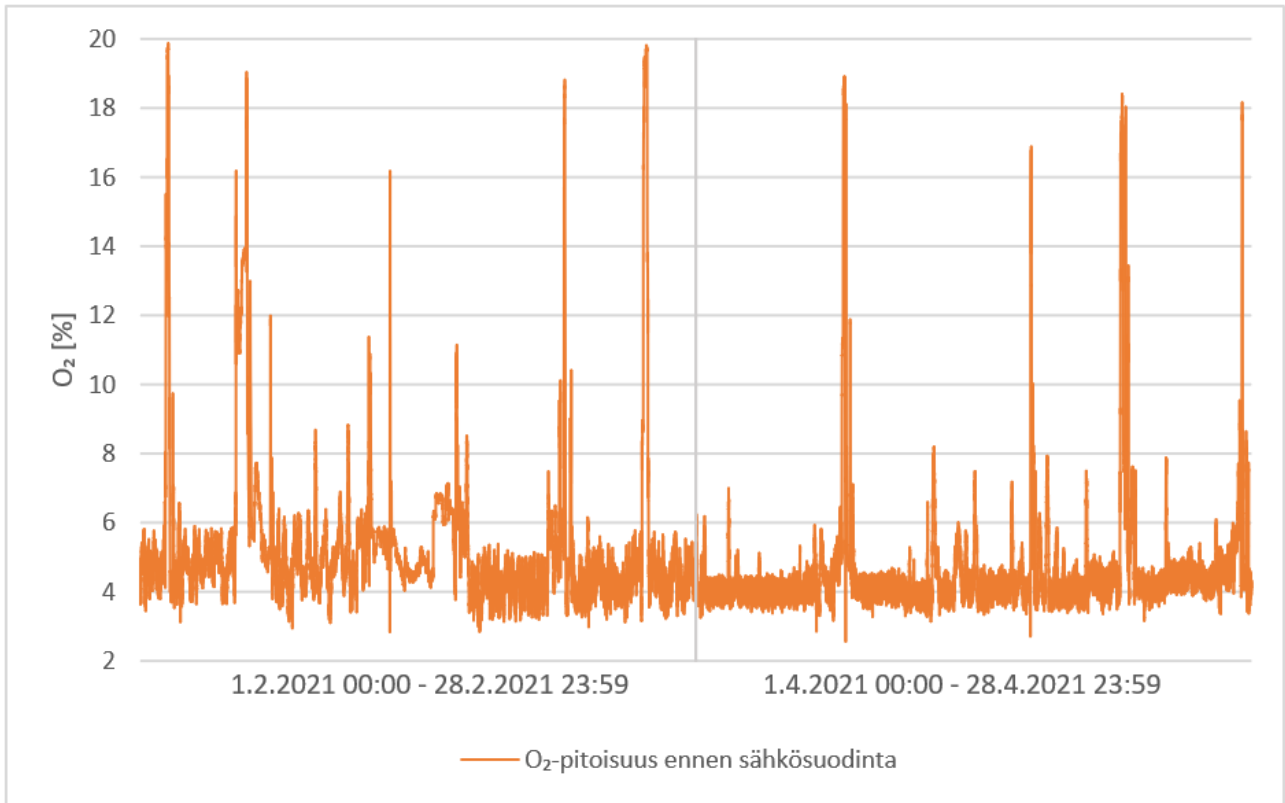
**Liite 5. Meesauunin tuotannon vaikutus uunin tehoon eri tehoasetuksilla**

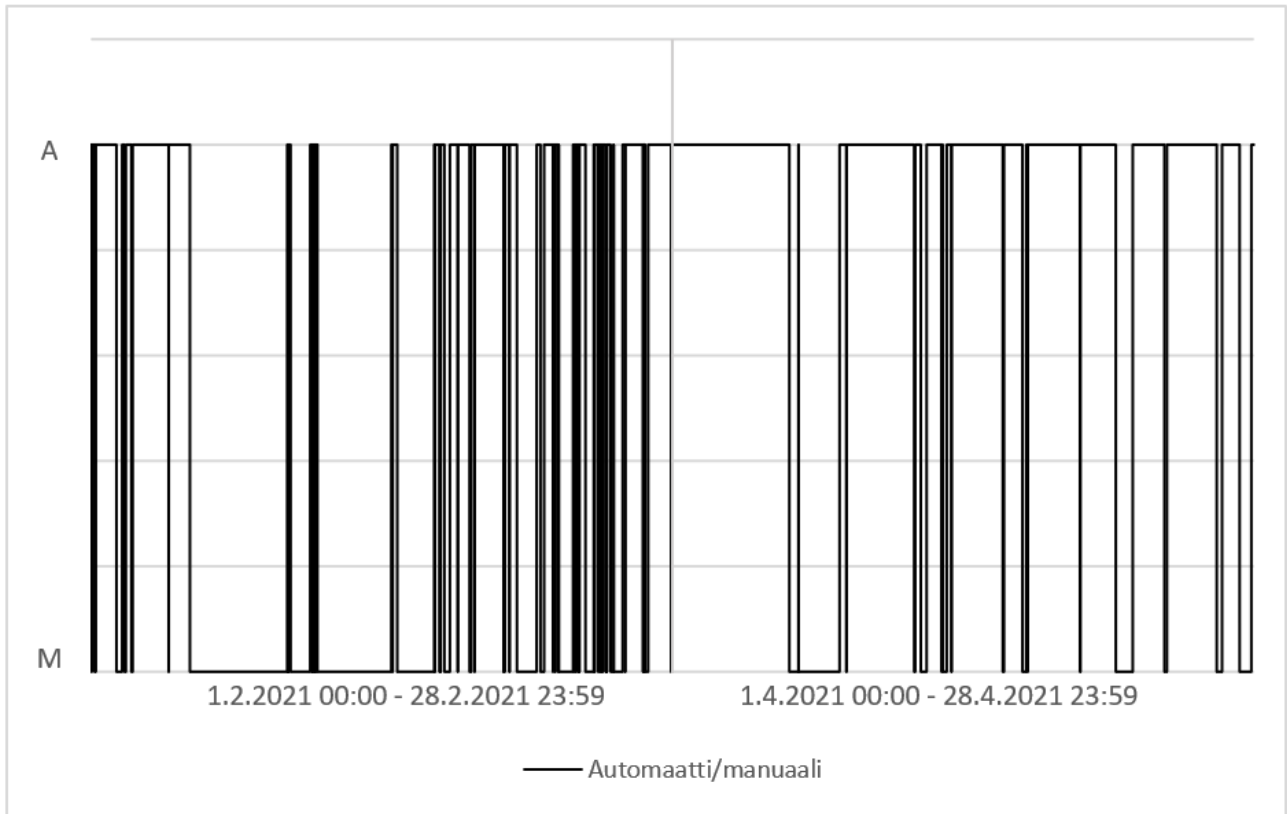
**Liite 6. Tehoasetuksen säätimen ohjaustapa**

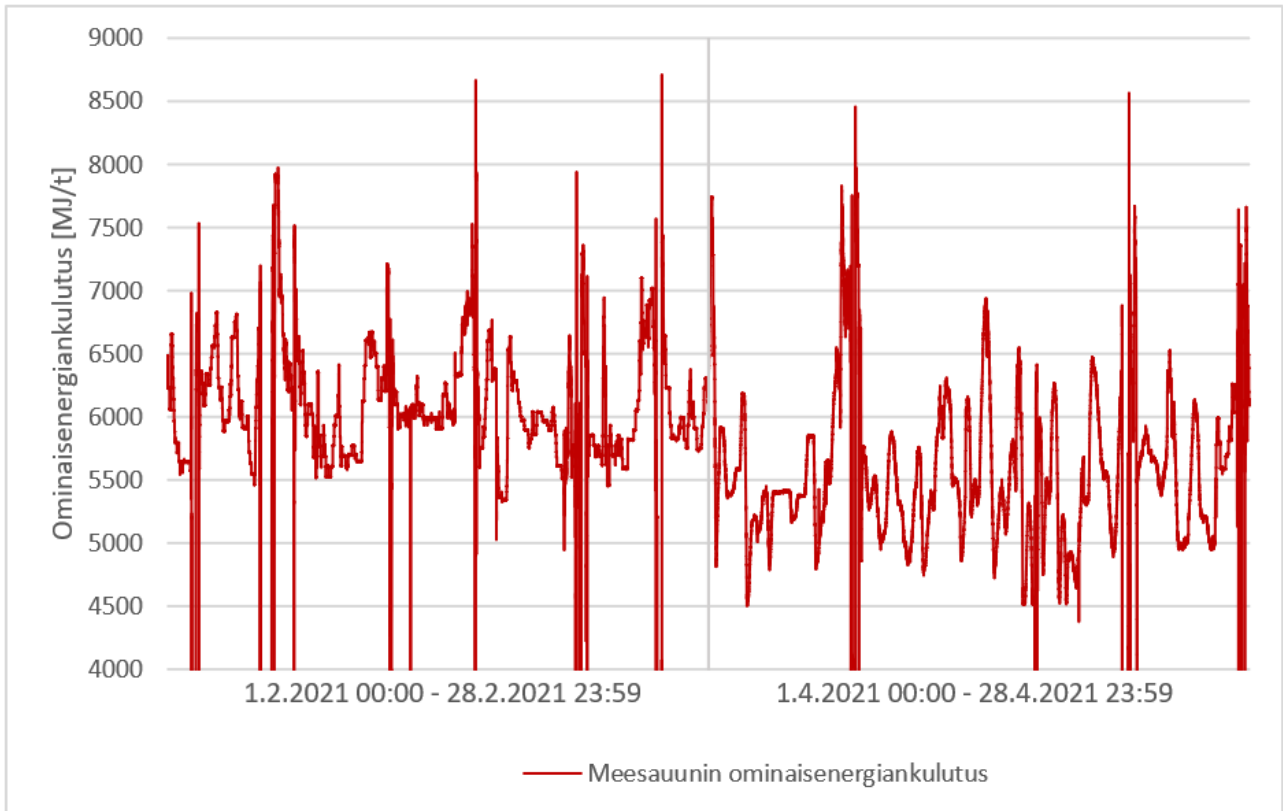


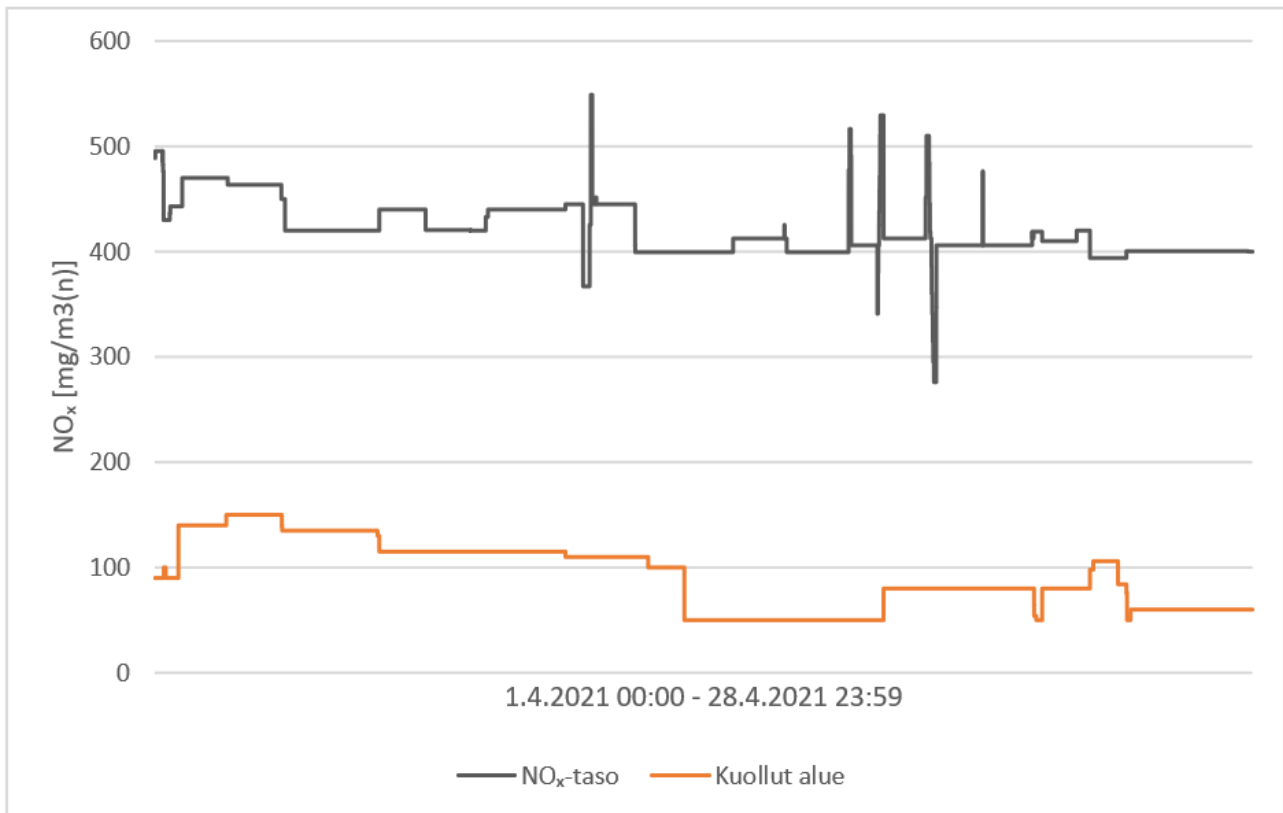
**Liite 7. Poltetun kalkin jäännöskarbonaatti ennen ja jälkeen säätömuutoksen**

**Liite 8. Meesauunin NO<sub>x</sub>-päästöt ennen ja jälkeen säätömuutoksien**

**Liite 9. Meesauunin jäännöshappipitoisuus ennen ja jälkeen säätömuutoksien**

**Liite 10. Happisäädön ohjaustapa ennen ja jälkeen säätömuutoksien**

**Liite 11. Meesauunin ominaisenergiankulutus ennen ja jälkeen säätömuutoksien**

**Liite 12. Tehoasetuksen säätimen NO<sub>x</sub>-taso ja kuollut alue**

**Liite 13. Meesaunun tuotanto ennen ja jälkeen säätömuutoksien**