

Kuorikaasuttimen prosessinohjauksen kehittäminen

Topias Kuusrainen

Opinnäytetyö

Elokuu 2018

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Kuusrainen, Topias	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Helmikuu 2019
	Sivumäärä 42	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Kuorikaasuttimen prosessinohjauksen kehittäminen		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hytönen, Kari & Kuisma, Ari		
Toimeksiantaja(t) Metsä Fibre Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Kiinnostus teolliseen biokaasutusprosessiin on kasvanut viimeisen muutaman vuosikymmenen aikana. Syitä siihen ovat fossiilisten polttoaineiden korkeat päästöt ja hintojen nousu. Yksi esimerkki tällaisesta kaasuttimesta löytyy Metsä Fibre Oy:n biotuotetehtaalta. Siellä kaasuttimen tehtävä on muuttaa kiinteä kuori meesauunin polttimelle sopivaksi tuotekaasuksi.</p> <p>Biotuotetehtaalla automaatio on merkittävässä roolissa. Kaasutuslaitoksen ohjaamisessa automaation tai prosessin ei koettu toimivan riittävällä tasolla. Vaikeuksia aiheutui erityisesti vaihtelevasta kaasutustehosta, joka vaikutti meesauunin prosessiin. Opinnäytetyön tavoite oli kehittää kaasutuslaitoksen prosessinohjausta. Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena, johon kuului tutkimusaineiston kerääminen, prosessiin perehtyminen ja kehitysehdotuksen antaminen. Tutkimuksen rajattiin kolmeen tutkimuskysymykseen: Mitkä häiriöt vaikuttavat kaasuuntumisprosessiin? Mikä on tehokkain vaihtoehto niiden vaikutuksen poistamiseksi? Miten valittu vaihtoehto toteutetaan? Työn tutkimusaineistona toimivat pääosin kaasutuslaitoksen mittaushistoria, toimintakuvaukset ja kirja- sekä internetlähteet.</p> <p>Mittaushistoriaa tutkimalla voitiin todeta merkittävin syy ongelmille. Tutkimuksen perusteella tilannetta olisi voitu parantaa poistamalla kuormahäiriöitä tai suunnittelemalla säätötapa uudestaan. Tuloksina saatiin ehdotus säätötavasta, jonka arvioitiin reagoivan paremmin kuormahäiriöihin ja vähentävän niiden syntymistä. Lisäksi löydettiin lisätutkimusta tarvitsevia kehitysmahdollisuuksia, joilla prosessinohjausta voidaan tarvittaessa kehittää eteenpäin. Kehitetyn ehdotuksen toimintaperiaatteet otettiin käyttöön, ja tulokset olivat arvioiden mukaiset. Kaasutuslaitoksen prosessinohjaus saatiin tasolle, johon toimeksiantaja oli tyytyväinen.</p>		
<p>Avainsanat (asiasanat)</p> <p>Prosessiautomaatio, kaasutus, prosessinohjaus, kaasutuksen ilmakerroin</p>		
<p>Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)</p> <p>Liitteet ovat salassa pidettäviä ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassa pitoaika 10 vuotta, salassapito päättyy 25.3.2029.</p>		

Author(s) Kuusrainen, Topias	Type of publication Bachelor's thesis	Date February 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 42	Permission for web publication: x
Title of publication Developing the process control of a bark gasifier		
Degree programme Bachelor of Engineering, Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari & Kuisma, Ari		
Assigned by Metsä Fibre Oy		
Abstract <p>In past few decades there has been new rise of interest in industrial level biofuel gasifiers. This is mainly driven by the high emissions and raising costs of fossil fuels. One example of such biofuel gasifier is in Metsä Fibre's bioproduct factory in Äänekoski. There the gasifier convert bark solid into product gas usable in the limekiln burner.</p> <p>In the bio product factory, automation has big role. Concerning the gasifier, the operators felt that the automated process control was not of the required level. In particular, the fluctuation in product gas power, caused problems that disrupted the limekiln. The goal of the study was to develop the process control of the gasifier. The task was conducted as a development study, which included gathering data, analyzing the process and producing the solution. To focus the study, it was categorized into three research questions: What are the main disruption sources? What is the most effective solution to eliminate or minimize them? How is the solution implemented? Research data consisted mainly of the gasifier's measurement data and equipment descriptions.</p> <p>The main concerns in the process control were found by studying the data for the gasifier. The solution possibilities were divided into minimizing physical interference or control planning. The result included a new control plan, which was predicted to react better and reduce interference. The conclusion found minimizing physical interference is still a possibility, but it needs to be examined further. The principles of the new plan were implemented. As a result, the process control meets the requirements of the assignor.</p>		
Keywords/tags (subjects) Process automation, Gasifying, Process control, Equivalence ratio		
Miscellaneous (Confidential information) Appendixes are confidential and have been removed from the public thesis. Grounds for secrecy: Act on the Openness of Government Activities 621/1999, Section 24, 17: business or professional secret. The holding period lasts 10 years, the secrecy expires on 25.3.2029.		

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Opinnäytetyön tausta ja tavoite	4
1.2	Toimeksiantajana Metsä Fibre Oy.....	5
1.3	Työn toteutus	5
2	Sellutehtaan energiantuotanto	6
3	Meesauuni sellutehtaassa.....	7
3.1	Kemikaalikierto.....	7
3.2	Kaustisointi	8
3.3	Kalkin kierto.....	9
4	Prosessiautomaatio	11
4.1	Säätöpiirit	11
4.2	PID-säädin.....	12
4.3	Säätöpiirien virittäminen.....	14
4.4	DCS-järjestelmä	15
4.5	Säätöongelman ratkaiseminen.....	17
5	Biomassan kaasutus.....	18
5.1	Kaasutusprosessi	18
5.2	Kuoripolttoaineen ominaisuudet	21
6	Kiertoleijupetikaasutin.....	21
6.1	Kaasutintyytit.....	21
6.2	Kaasuttimen ominaisuudet	22
6.3	Biotuotetehtaan kuoren kaasutuslaitos.....	24

7	Viirakuivuri.....	25
8	Kuorikaasuttimen prosessinohjaus.....	27
	8.1 Polttoaineen ohjaus	28
	8.2 Kaasutusilman ohjaus.....	28
	8.3 Petilämpötilan säätäminen	29
9	Tulokset.....	29
	9.1 Häiriöiden tutkinta	29
	9.1.1 Polttoaineen laadun vaihtelu	30
	9.1.2 Petilämpötilan säädin	31
	9.1.3 Kaasutustehon muuttaminen.....	32
	9.1.4 Petimateriaalin lisäys.....	34
	9.2 Ratkaisun valinta	34
	9.3 Kehitysehdotus.....	36
	9.4 Käyttöönotto	36
	9.5 Vaikutusten arviointi	37
10	Pohdinta ja lisätutkimuksen tarve	40
	Lähteet	42
	Liitteet	43

Kuviot

Kuvio 1. Esimerkki sulfaattiselutehtaan kemikaalikierron lohkokaaviosta	8
Kuvio 2. Meesanolto	10
Kuvio 3. PID-säätimen toimintaperiaate	13
Kuvio 4. Esimerkki säätöpiirissä esiintyvän värähtelyhäiriön vianmäärityksestä	15
Kuvio 5. Äänekosken biotuotetehtaalla on käytössä Valmet DNA - prosessinohjausjärjestelmä.....	16
Kuvio 6. Esimerkki säätöongelmien ratkaisuprosessista.	17
Kuvio 7. Kuvio esittää biomassan kaasuttamisen muutosprosessia.....	19
Kuvio 8. CFB-kaasuttimen toiminta-alue on 750 °C - 900 °C.....	20
Kuvio 9. Havainnekuva Foster Wheelerin kehittämästä CFB-kaasuttimesta. Laitteisto eroaa vain hieman Äänekosken Valmet Oyj:n kaasuttimesta. Esim. Äänekoskella ei ole ilman esilämmitystä.	22
Kuvio 10. ER:n vaikutus hiilen olomuodon muutoksen tehokkuuteen CFB- kaasuttimessa	23
Kuvio 11. ER:n vaikutus petilämpötilaan CFB-kaasuttimessa	24
Kuvio 12. Yksinkertaistettu prosessikuva viirakuivaimen toiminnasta.....	26

Taulukot

Taulukko 1 Vertailun tulokset kahdelta kuukaudelta ennen ja jälkeen säätötavan vaihtamisen	38
---	----

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoite

Metsä Fibre Oy:n biotuotetehtas käynnistettiin Äänekoskella elokuussa 2017. Tehtaaseen kuuluu sisäisiä sivuvirtoja hyödyntävä biomassan kaasutuslaitos. Laitoksessa on Valmet Oyj:n toimittama CFB-kaasutin (Circulating Fluidized Bed Gasifier) eli kiertoleijupetikaasutin, jonka tuotekaasua käytetään kalkin polttamiseen meesauunissa. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tämän kaasuttimen prosessinohjauksen liittyviä haasteita. Maailmasta löytyy vain muutamia saman toimintaperiaatteen kaasutuslaitoksia, mutta täysin vastaavaa kokonaisuutta ei ole muualla.

Viime aikoina teollisuudessa on herännyt kiinnostus biomassan hyödyntämiseen. Basun (2013, 15) mukaan syitä tähän ovat tarve vähentää kasvihuonepäästöjä, halu irrottautua vähemmän saatavilla olevista ja hinnaltaan vaihtelevista öljystä ja kaasusta, halu siirtyä uusiutuvaan ja paikallisesti saatavilla olevaan energian lähteeseen sekä öljyn ja maakaasun hintojen nousu.

Äänekoskella meesauunin energialähteenä käytetään tehtaan omia sivuvirtoja. Primääripolttoaineena toimii sellupuun kuori ja varalla mäntypikiöljy. Molemmat ovat uusiutuvia biotuotteita, mutta merkittävistä kustannussyistä kuorta halutaan hyödyntää tehtaalla ja mäntypikiöljy myydä.

Tutkimuksen aihealue on keskeinen kaustisoinnin osastolla, jossa kaasutuslaitos sijaitsee. Kaasutuslaitoksen tuotekaasulla on suora vaikutus poltettuun kalkkiin ja siten välillinen vaikutus koko kaustisointiprosessin tehokkuuteen sekä hieman biotuotetehtaan kemikaalikiertoon.

Pääsyy tutkimukselle oli, että kaasutustehon vaihtelu aiheutti ongelmia tuotekaasun käyttökohteessa meesauunissa ja sen savukaasuissa. Ensimmäinen tavoite oli perehtyä kaasutuslaitoksen toimintaan ja tunnistaa sen prosessinohjaukseen vaikuttavat tekijät. Prosessinohjauksessa esiintyvien häiriöiden etsintä rajautui polttoaineen syöttöjärjestelmään, kaasutusilman puhaltimiin ja kaasuttimen

säätimiin. Havaintojen perusteella arvioitiin ratkaisuvaihtoehtoja löydettyihin häiriöihin. Lopullisena tuotoksena esitetään mahdollinen ratkaisu ongelmiin.

1.2 Toimeksiantajana Metsä Fibre Oy

Tämä tutkimus pohjautuu tarpeeseen kehittää yhtä uuden biotuotetehtaan sivuprosesseista. Tehtaan omistaja ja käyttäjä Metsä Fibre Oy on yksi Suomen suurimmista sellu- ja metsäteollisuuden yrityksistä. Se on osa Metsä Group -konsernia ja Metsäliitto Osuuskunnan tytäryhtiö. Metsäliitto Osuuskunta omistaa yhtiöstä 50,1 %. Metsäliitto Osuuskunnan toinen tytäryhtiö Metsä Board Oy omistaa 24,9 % ja Japanilainen Itochu Company Oy omistaa 25 %. Metsäliitto Osuuskunnan jäsenet koostuvat n. 104 000 metsänomistajista. (Metsä Fibre lyhyesti n.d.)

Metsä Fibre Oy:llä on neljä sellutehdasta Suomessa. Äänekoskella sijaitsee uusin, vuonna 2017 elokuussa käyttöön otettu biotuotetehdas. Uusi tehdas valmistui samalle tontille pois puretun Metsä Fibre Oy:n vanhan sellutehtaan viereen. Biotuotetehdas on monella tapaa uudistunut versio vanhasta. Esimerkiksi sen käytössä tavoitellaan 0 %:a fossiilista polttoainetta ja vanhaan tehtaaseen verrattuna tuotanto yli kaksinkertaistui, samalla kun käyttöhenkilökunta pysyi lähes samana. (Metsä Fibre lyhyesti n.d.)

1.3 Työn toteutus

Tämä opinnäytetyö toteutettiin kehitystutkimuksena, jonka tarkoituksena oli kehittää kaasutuslaitoksen prosessia paremmalle tasolle. Kehittämistutkimus alkaa nykytilan kartoituksella, tuottaa parannusehdotuksen ja päättyy tulosten arviointiin ja seurantaan (Tutkimus ja kehittäminen 2017).

Tässä tutkimuksessa on käytetty kvalitatiivista eli laadullista tutkimusmenetelmää. Kvalitatiivinen tutkimusmenetelmä soveltuu hyvin tutkimuksiin, joissa kaikkia muuttujia ei voida kontrolloida ja menetelmiä joudutaan muokkaamaan tilanteen mukaan. Sille ominaista on, että tutkimusaineistoa kerätään havainnoimalla, haastatteluilla ja kirjallisuudesta. (Tutkimus ja kehittäminen 2017)

Tutkimuskysymykset olivat: mitkä häiriöt vaikuttavat kaasuuntumisprosessiin, mikä on tehokkain vaihtoehto niiden vaikutuksen poistamiseksi ja miten kyseinen vaihtoehto toteutetaan? Tutkimustyössä perehtymiseen ja ratkaisujen arviointiin haettiin tietoa kirjallisuudesta, automaatiojärjestelmästä ja laitevalmistajan materiaaleista. Tutkimustyön aineisto on kerätty toimeksiantajan automaatiojärjestelmästä ja laitevalmistajan materiaaleista.

Ongelmanasettelu on ratkaistu perehtymällä eri muuttujien vaikutukseen prosessissa ja arvioimalla prosessinohjaustapojen toimivuutta. Tuloksina ehdotetaan ratkaisua ongelmaan ja arvioidaan valitun ratkaisun vaikutusta prosessiin.

2 Sellutehtaan energiantuotanto

Biotuotetehtaalla tavoite on saada 100 % omakäyttöenergiasta tehtaalle tulevasta puusta. Massatehtaalla syntyvällä ja soodakattilassa poltettavalla mustalipeällä voidaan lämmittää lähes kaikki tehtaan kohteet pois lukien oman polttimen vaativat prosessit, kuten meesauuni.

Biotuotetehtas on metsäteollisuuden uuden sukupolven tehdas. Sen päätuote on sellu, mutta sen lisäksi kaikki puun osat ja sivuvirrat pyritään hyödyntämään. Sellutehtas, kuten biotuotetehtas, voidaan jakaa kahteen osaan: kuitulinjaan ja kemikaalikiertoon. Kuitulinjalla puu jalostetaan selluksi. Kemikaalikierron tehtävä on regeneroida kuitulinjalla käytettäviä kemikaaleja ja tuottaa tehtaan tarvitsema sähkö ja lämpö. Keskeinen vaihe kemikaalikierrossa on kuitulinjalta syntyvän mustalipeän polttaminen soodakattilassa. Polttamisesta syntyy Äänekosken biotuotetehtaalla sähköä n. 1800 GWh/v ja kaukolämpöä ja höyryä n. 640 GWh/v. Tällä pyritään kattamaan tehtaan sähkön tarve n. 240 -prosenttisesti ja höyryn 100 -prosenttisesti tarve. (Äänekosken biotuotetehtas n.d.)

Kaikissa biotuotetehtaan lämmityskohteissa kuten kalkin regeneroinnissa, ei voida hyödyntää höyryä. Sitä ei voida hyödyntää, koska kalkki pitää kuumentaa n. 1100 °C:seen (ks. luku 3.4). Biotuotetehtaalla kalkki poltetaan meesauunissa. Riittävä kuumuus saadaan altistamalla generoitava kalkki meesauunin polttimen säteilylle. Perinteisesti meesauunissa on käytetty raskasta polttoöljyä tai maakaasua. (Energia,

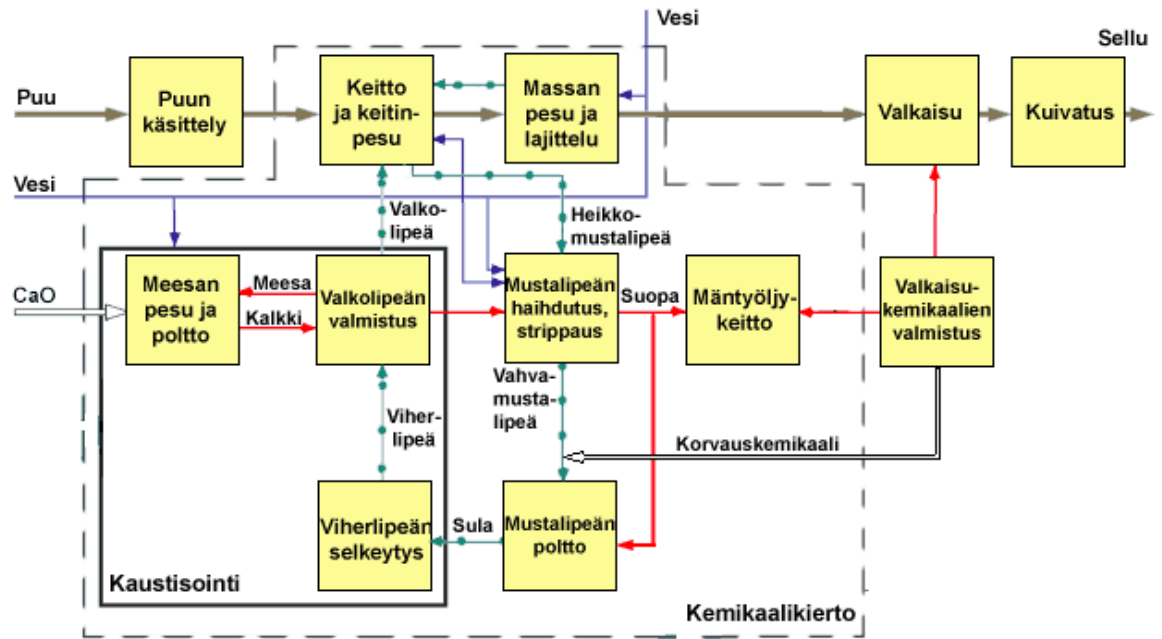
ympäristö, talous ja turvallisuus 2019.) Biotuotetehtaalla on kuitenkin päästy eroon fossiilisista polttoaineista (Äänekosken biotuotetehtas n.d.).

Biotuotetehtaalla meesauunin energian tarve on korvattu kuorinnasta tulevan kuoribiomassan avulla. Sellaisenaan kuori ei kuitenkaan sovellu polttimen käytettäväksi, ja sen lämpöarvo on huomattavasti fossiilisia vaihtoehtoja huonompi. Ongelmat on ratkaistu kuivaamalla kuori lämpöarvoltaan paremmaksi ja sen jälkeen kaasuttamalla se tuotekaasuksi, joka voidaan polttaa meesauunissa kaasun tavoin. Biotuotetehtaalla kuoribiomassan kuivaus ja kaasutus tehdään Valmet Oyj:n toimittamilla viirakuivurilla ja kiertoleijupetikaasuttimella. Kuoren kulutus meesauunia varten on noin 750 GWh/v (Äänekosken biotuotetehtas n.d.).

3 Meesauuni sellutehtaassa

3.1 Kemikaalikierto

Kemikaalikierto yhdistää valtaosan sellutehtaan prosesseista. Sen tehtävä on kierrättää sellun valmistuksen keskeisiä kemikaaleja. Tässä kierrossa kaustisointi on viimeinen vaihe ennen kemikaalien uudelleen käyttöä keittovaiheessa ja keitinpesussa (ks. kuvio 1). Tämän tutkimuksen kohde, kuoren kaasutuslaitos, vaikuttaa kemikaalikiertoon välillisesti. Sen tuottama tuotekaasu käytetään kaustisoinnin meesauunissa kalkin polttamiseen. Kaustisointi vaiheen lopputuote on valkolipeä, joka sisältää keittovaiheen tarvitsemia alkaleja. Massaa keittäessä alkalisuhde valkolipeässä on oleellinen tekijä puun kuituuntumisen, saannon ja massan lujuuden kannalta. (Seppälä, Klemetti, Kortelainen, Lytikäinen, Siitonen & Sironen 2001, 79; Sulfaattisellun valmistus 2018)



Kuvio 1. Esimerkki sulfaattiselutehtaan kemikaalikierron lohkokaaaviosta (Sulfaattiselun valmistus 2018)

Kemikaalien käytön jälkeen, massan pesu- ja lajitteluvaiheesta syntyvä jäteliemi käsitellään haihduttamien prosesseissa ennen sen polttoa soodakattilassa (ks. kuvio 1). Haihduttamien päätehtävä on erottaa siitä ylimääräinen aines, kuten suopa, ja nostaa kuiva-aineen osuutta. Haihduttamien jälkeen vahva mustalipeä poltetaan soodakattilassa. Sen tehtäviin kuuluu mustalipeään sitoutuneen natriumin muuttaminen regeneroitavaan natriumkarbonaattimuotoon ja tulipesässä syntyvän natriumsulfaatin pelkistäminen natriumsulfidiksi. Samalla mustalipeän sisältämien orgaanisten aineiden poltosta vapautuva energia muuttuu sähköksi ja höyryksi. Soodakattilasta saatavan suolasulaa kutsutaan viherlipeäksi. Sen muuttaminen takaisin keittovaiheessa hyödynnettäväksi valkolipeäksi tapahtuu kaustisoinnissa. (Seppälä ym. 2001, 155; 157.)

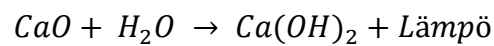
3.2 Kaustisointi

Kaustisoinnin tehtävä on muuttaa soodakattilasta saatavan viherlipeän sisältämä natriumkarbonaatti natriumhydroksiksi, joka on natriumsulfidin kanssa valkolipeän pääalkali. Muuttaminen tapahtuu sekoittamalla kalsiumoksidia eli poltettua kalkkia

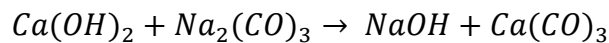
viherlipeään. Kalkki reagoi ensin viherlipeässä olevan veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksia, minkä jälkeen se reagoi natriumkarbonaatin kanssa muodostaen natriumhydroksidia. Prosessin reaktio on hidas, ja tuotetusta valkolipeästä on ennen käyttöä erotettava jäljelle jäävä kiintoaine kalsiumkarbonaatti eli meesa. Prosessia kutsutaan kaustisoinniksi, josta tulee myös vaiheen nimi.

Kaustisoinnissa kalkki on uudelleen käytettävä kemikaali, jonka palauttaminen tapahtuu kalkkikierrrossa. Kierto on mm. meesan pesu, suodatus ja regenerointi. Regenerointi tapahtuu polttamalla meesa meesauunissa. (Sulfaattisellun valmistus 2018.)

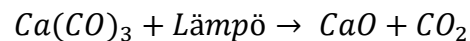
Poltetun kalkin ja veden kemiallinen reaktio on



Kaustisoinnin kemiallinen reaktio on

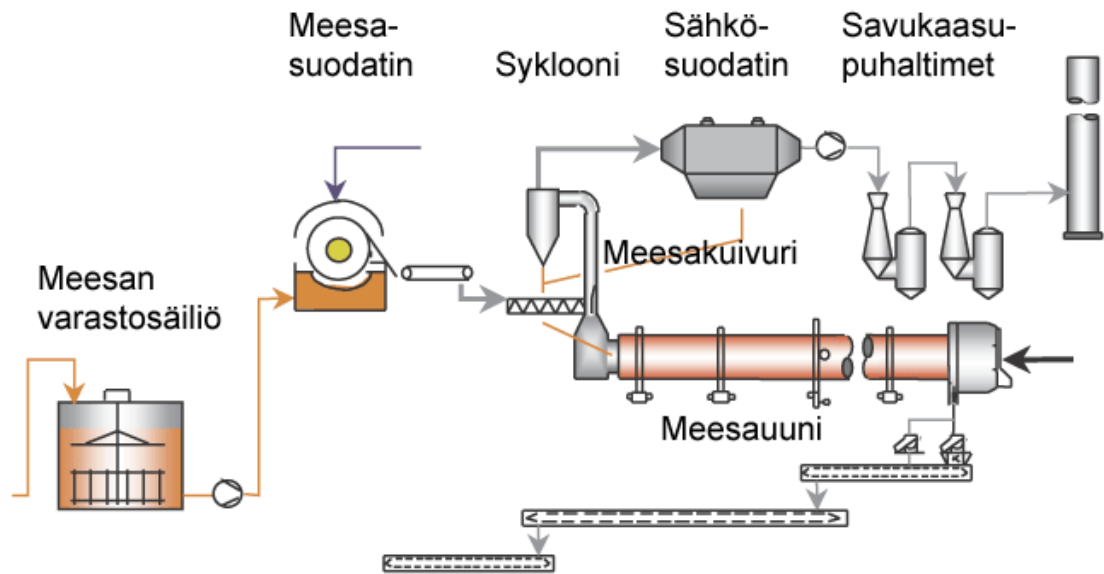


Kalkin regeneroinnin eli meesan polttamisen kemiallinen reaktio on



3.3 Kalkin kierto

Meesanpoltto on osa kaustisoinnin kalkkikiertoa (ks. kuvio 2). Kiertävää kalkkia käytetään kaustisoinnissa viherlipeän muuttamisessa valkolipeäksi. Kaustisointiin menevä kalsiumoksidi muuttuu reaktioissa kalsiumkarbonaatiksi eli meesaksi, joka muutetaan lämmön avulla takaisin käytettäväksi kalsiumoksidiksi. Prosessin reaktiot eivät ole täydellisiä poltettuun kalkkiin jää palamatonta kalsiumkarbonaattia. Meesanpolton keskeinen ohjausarvo onkin kalsiumkarbonaatin osuus poltetussa kalkissa eli jäännöskarbonaatti. (Sulfaattisellun valmistus 2018.)



Kuvio 2. Meesanpoltto (Sulfaattisellun valmistus 2018)

Meesauuni on n. 2,5 % astetta kallelleen asetettu teräsputki, joka on sisältä vuorattu tiileillä. Meesa syötetään yläpäästä ja lämpöenergia alapäästä. Pyörittämällä meesauunia poltettava massa saadaan kuumenemaan tasaisesti ja valumaan alas. Pyörimisvauhtia on säädettävissä, mutta tyypillisesti se on 0,5-1,5 kierrosta/min. (Sulfaattisellun valmistus 2018.)

Palauttamisprosessi vaatii paljon ulkopuolelta tuotua lämpöä, koska reaktio alkaa vasta lämpötilan ollessa yli 850 °C ja kiihtyy lämpötilan kasvaessa. Riittävä reaktionopeus teolliseen käyttötarkoitukseen saavutetaan noin 1100 °C:n lämpötilassa. Polttamisen vaiheet uunissa voidaan jakaa neljään: kuivaus, lämmitys, kalsinointi ja loppukäsittely. Kalsinointi on vaihe, jossa hajoaminen tapahtuu, silloin lämpötilan tulisi olla noin 1100 °C. Kuumentamiseen tarvittava energia saadaan tavallisesti öljystä tai maakaasusta, mutta on mahdollista polttaa myös kuorta tai mäntyöljyä, kuten tämän tutkimuksen kohteessa. (Sulfaattisellun valmistus 2018.)

Meesauunissa polton energiatehokkuuteen vaikuttaa erityisesti ilmaylimäärä ja säteilyhäviö. Ylimääräinen kaasu laskee lämpötilaa uunin alkuvaiheessa ja vähentää säteilevien kaasukomponenttien osuutta savukaasuista, jolloin huonontunut lämmönsiirto nostaa savukaasujen lämpötilaa ja niiden energiahäviö kasvaa. (Sulfaattisellun valmistus 2018.)

Tuotannonohjauksessa meesauunin päätavoitteena on kaustisoinnille optimaalisen mahdollisen kalkin tuottaminen tasaisesti. Poltetun kalkin laatua mitataan normaalisti jäännöskarbonaatilla ja kaustisointivoimalla eli kalkin reaktiivisuudella. Reaktiivisuus kasvaa jäännöskarbonaatin vähentyessä tiettyyn pisteeseen asti, kunnes se kääntyy laskuun. Meesan kuumentaminen liikaa poistaa lähes kaiken jäännöskarbonaatin, mutta aiheuttaa kalkin kiteytymisen, jolloin reaktiivisuus huononee ja aiheuttaa ongelmia kaustisointivaiheessa. (Sulfaattisellun valmistus 2018.)

4 Prosessiautomaatio

4.1 Säättöpiirit

Teollisuuden prosesseja hallitaan ohjaamalla ja säätämällä (Harju & Marttinen 2000, 9). Sellun valmistus on esimerkki laajasta prosessista. Automaation käyttämiseksi prosessit jaetaan yksikköprosesseihin (Kippo & Tikka 2008, 20). Yksikköprosessilla voi olla säättöpiirejä. Kaasutuslaitos on tällainen yksikköprosessi, jolla on säättöpiirejä. Säätämistä ja valvontaa toteuttavia laitteita, kuten mittalaitteita, säätimiä ja toimilaitteita kutsutaan instrumenteiksi. Eri valmistajien säätimet saattavat erota toisistaan. Yleisin säädin teollisuudessa on PID-säädin (Proportional-Integral-Derivative) (Harju & Marttinen 2000, 44). Kaikki tässä työssä käsitellyt säätimet ovat PID-säätimiä ilman derivointi osaa eli PI-säätimiä.

Säätämiseksi voidaan kutsua operaattorin tekemiä manuaalisia ohjaustoimenpiteitä tai säätimen automaattisesti tekemää säätöä. Ohjaussignaali voidaan antaa operaattorin toimesta, jolloin sitä kutsutaan käsiohjaukseksi. Automaattisen säädön ohjaussignaali perustuu instrumenttien prosessista antamaan mittaustietoon. (Harju & Marttinen 2000, 9.) Äänepölyn biotuotetehtaan kaasutuslaitoksessa kaasutustehon säätäminen vaatii manuaalista ohjaustoimenpidettä ja petilämpötilan säädin toimii manuaalisesti tai automaattisesti.

Säättöpiiri muodostuu yksikköprosessista toimilaitteineen, mittausanturista ja -lähettimestä sekä säätimestä. Standardin mukainen säädin lähettää ohjauksen toimilaitteelle analogiamuotoisena virtaviestinä (4-20 mA) tai kenttäväylää pitkin

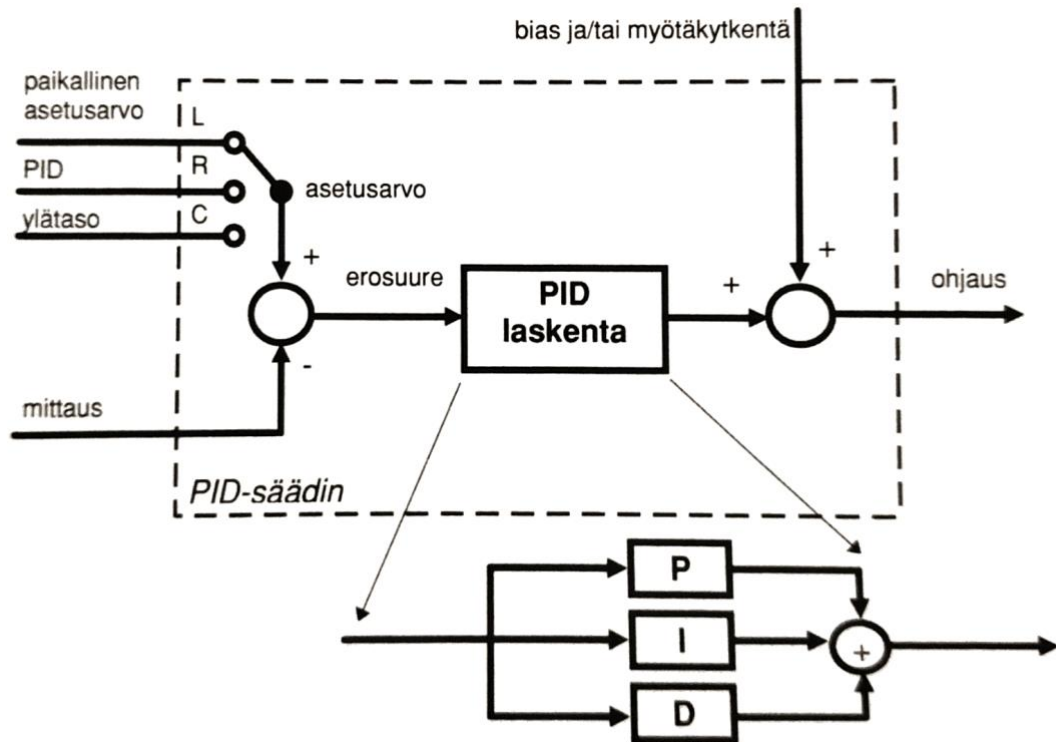
digitaalisena viestinä. Toimilaite muuttaa prosessia viestin mukaisesti.

Takaisinkytkentä tarkoittaa, että säädetty arvo eli oloarvo mitataan ja lähetetään takaisin säätimelle. Automaattitilassa säätimen tehtävä on laskea uusi ohjaus toimilaitteelle asetusarvon ja oloarvon erosuureen muutoksien mukaan.

Käsiohjauksessa takaisinkytkentää ei käytetä. (Harju & Marttinen 2000, 16; 23.)

4.2 PID-säädin

PID-säädintä voidaan käyttää M- eli manual-tilassa tai A- eli auto- tilassa. Manuaali tilassa operaattori antaa haluamansa ohjausarvon. Käyttäessä takaisinkytkentäläenkin informaatiota automaattiseen säätämiseen on säädin A/L-, A/R- tai A/C-tilassa (ks. kuvio 3). L tarkoittaa sanaa local, jolloin ohjausarvoksi on valittu paikallinen asetusarvo. Kaskadikytkentä tarkoittaa, että yläsäätäjän ohjausarvo annetaan alasäätäjän ohjausarvoksi. Säätöpiirin uloimmainen säädin on yläsäädin, ja apusäätimet ovat alasäätimiä. R tarkoittaa sanaa remote, jolloin ohjausarvo tulee jonkun ylemmän tason säätimeltä. C taas tarkoittaa computer, jolloin ohjausarvo tulee alasäätimen ohjausjärjestelmän ulkopuolisen tietokoneen tms. yläsäätäjältä. (Harju & Marttinen 2000, 23-24.)



Kuvio 3. PID-säätimen toimintaperiaate (Harju & Marttinen 2000, 44)

Ohjaus on toimilaitteelle lähetetty signaali, jonka automaatiohjauksessa säädin laskee asetusarvon ja mittauksen erosuureesta. Bias-termi ja/tai myötäkykentä voidaan lisätä ohjaukseen. Bias on nollasta poikkeava vakiotaso, jolla korjataan säätimissä oleva säätövirhe. Myötäkykentällä säädin pyritään saamaan reagoimaan tulevaan häiriöön ennen sen näkymistä ohjaussuureessa. Se on kuten bias, mutta se korjaa muuttuvaa häiriötä. Myötäkykentää voidaan käyttää, kun vaikuttava häiriö on mitattavissa ja sen vaikutus tiedetään. (Ks. kuvio 3.) (Harju & Marttinen 2000, 44-45; 25; 239.)

PID-säätimen laskenta koostuu vahvistusosasta (P), Integrointiosasta (I) ja derivointiosasta (D) (ks. kuvio 3). Yleisin versio siitä on PI-säädin, jossa derivointiosaa ei ole. Tässä tutkimuksessa mukana olevat säätimet ovat PI-säätimiä, minkä vuoksi opinnäytetyö käsittelee vain niitä. P-säätimessä on vakiotaso (U_0), vahvistuskerroin (K_p) ja erosuure ($e(t)$). PI-säätimessä vakiotason sijasta käytetään ajan funktiona muuttuvaa erosuureen integraalilauseketta (T_i). (Harju & Marttinen 2000, 45; 47.)

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$

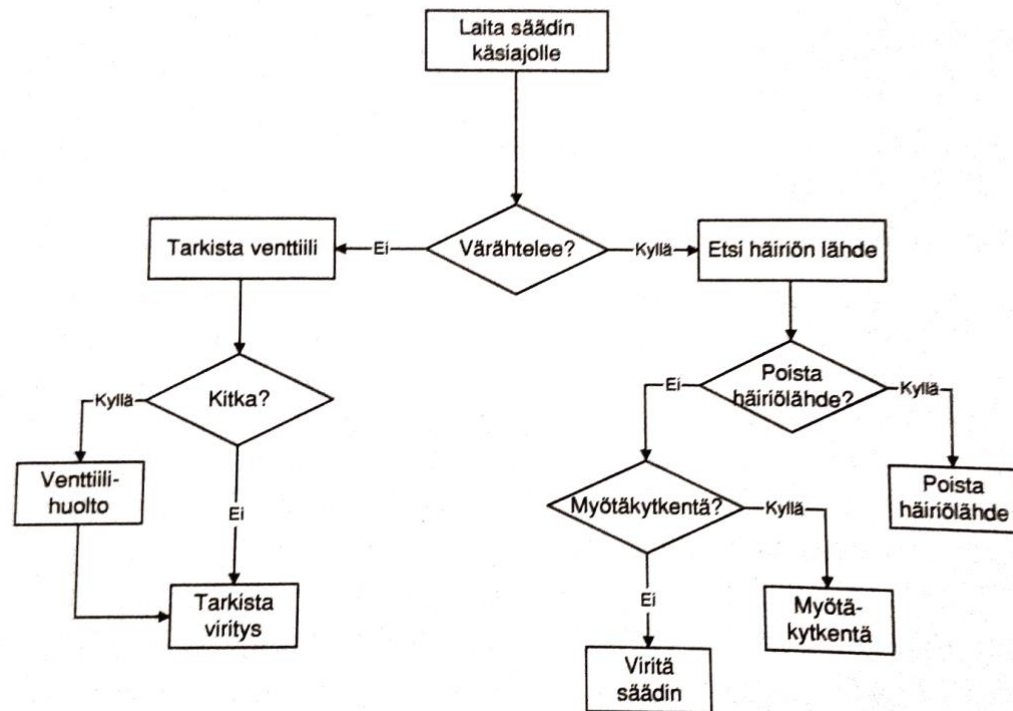
4.3 Säättöpiirien virittäminen

PI-säätimen viritysparametrit ovat vahvistuskerroin (K_p) ja integrointiaika (T_i).

Vahvistuskerroin vaikuttaa erosuureeseen vahvistamalla sitä kertoimen arvon mukaisesti. Kerrointa kasvattamalla järjestelmän käyttäytyminen voimistuu. I-osan tarkoituksena on poistaa jatkuvuustilan virhe. Integrointiosa vahvistaa ohjausarvoa säätimeen P-osan verran määritetyssä integrointiajassa: mitä suurempi integrointiaika on, sitä hitaampi vaikutus sillä on säätimeen. Säättöpiirin virittäminen perustuu näiden parametrien arvojen ja suhteen optimoimiseen niin, että prosessi ohjautuu halutulla tavalla. (Harju & Marttinen 2000, 50.)

Virittämisen perustana toimii ohjattava prosessi. Häiriöitä voivat olla mm. mittauskohina ja kuormitushäiriöt. Tarkasteltavalle piirille kuormitushäiriöt ovat prosessiin liittyviä ilmiöitä, jonka voi aiheuttaa myös toinen säättöpiiri. Jos säättöpiiri värähtelee häiriöstä, voidaan vian kohdentaminen aloittaa asettamalla piiri manuaalille. Mikäli värähtely lakkaa, aiheuttaa kyseinen piiri sen itse. Tällöin syy voi olla säättöpiirin parametrit tai toimilaittevikka (ks. kuvio 4). (Harju & Marttinen 2000, 15.)

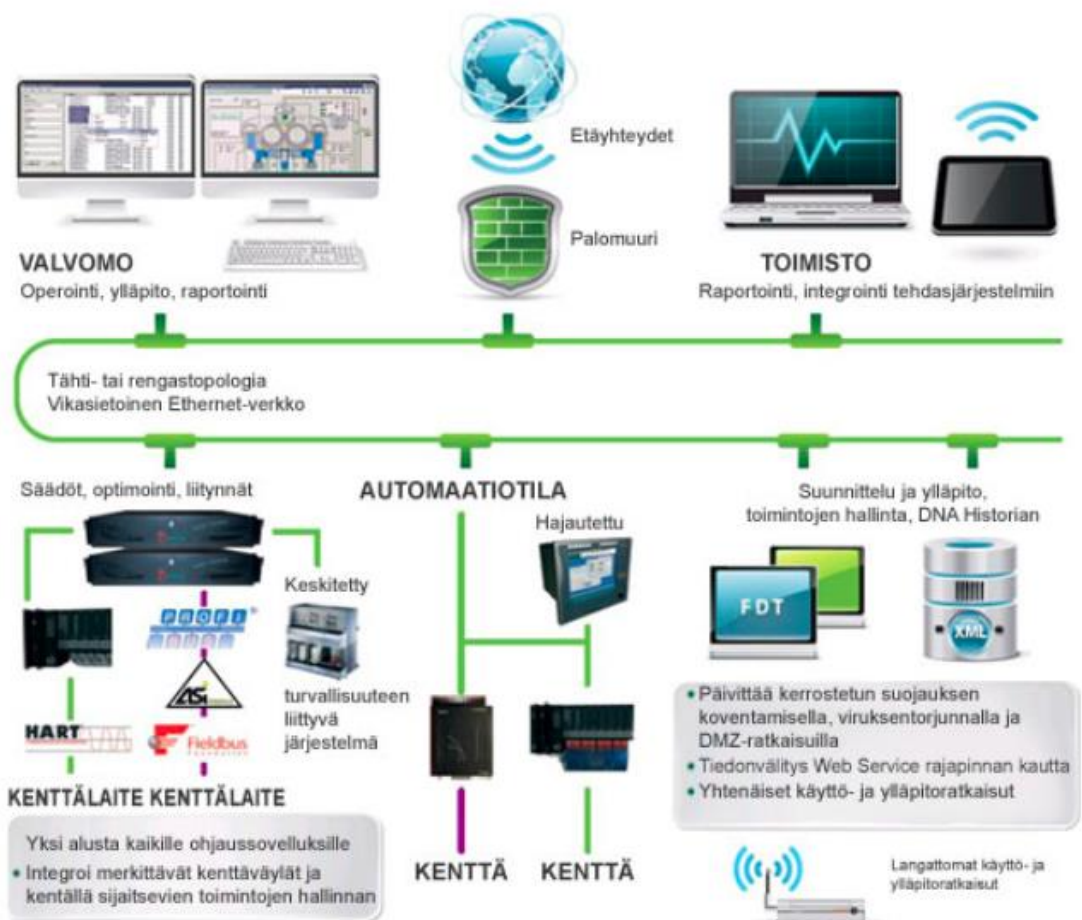
Mikäli värähtely jatkuu manuaalitulassa, on lähde piirin ulkopuolella. Jos häiriön lähdepiirin parametrien virittäminen tai toimilaitteen korjaaminen eivät onnistu, voidaan harkita myötäkystennän käyttöä tai viimeisenä vaihtoehtona virittää värähtelevä piiri poistamaan häiriön vaikutukset mahdollisimman hyvin (ks. kuvio 4). Häiriöön huonosti reagoiva säättöpiiri voi alkaa vahvistamaan värähtelyä niin, että siitä tulee hallitsematon. Tällaista piirin käyttäytymistä kutsutaan epästabiiliksi. (Harju & Marttinen 2000, 16; 13.)



Kuvio 4. Esimerkki säätöpiirissä esiintyvän värähtelyhäiriön vianmäärityksestä (Harju & Marttinen 2000, 16)

4.4 DCS-järjestelmä

Biotuotetehtaalla käytössä oleva prosessinohjausjärjestelmä eli DCS-järjestelmä (Distributed Control System) on Valmet DNA. Se on automaatio- ja informaatioalusta prosessinohjaukseen. Riippuen organisaatiosta Valmet DNA:n tehtävä voi olla prosessin, koneiden, laadun, valvonnan ja käyttöjen ohjaukset sekä optimointi ja kunnonvalvonta. Analogiset ja logiikkaohjaukset voidaan sisäinrakentaa siihen. Perusohjauksia ovat mittaukset, hälytykset, PID-säätimet, moottorien ja venttiilien ohjaukset, ryhmäkäynnistykset, sekvenssit jne. (Ks. kuvio 5) (Tuotannon hallinta ja automaatio 2018.)



Kuvio 5. Äänekosken biotuotetehtaalla on käytössä Valmet DNA -prosessinohjausjärjestelmä (Tuotannon hallinta ja automaatio 2018).

Järjestelmän käyttö tapahtuu valvomossa PC-tietokoneella. Biotuotetehtaalla valvomotoimintoja on keskitetty keskusvalvomoon, jonka tavoitteena on erillisiin valvomoihin verrattuna tehokkaampi kommunikointi osastojen kesken sekä tuotannonohjauksen välillä. DCS-järjestelmää käyttävät operaattorit, jotka ovat vastuussa prosessin ohjauksesta. Operaattorien tehtävä on valvoa, ohjata ja ylläpitää heille määritetty prosessi. Operaattori toimii myös ohjaamansa prosessin asiantuntijana.

Prosessinohjaus voidaan jakaa kolmelle eri tasolle ylimmästä alimpaan:

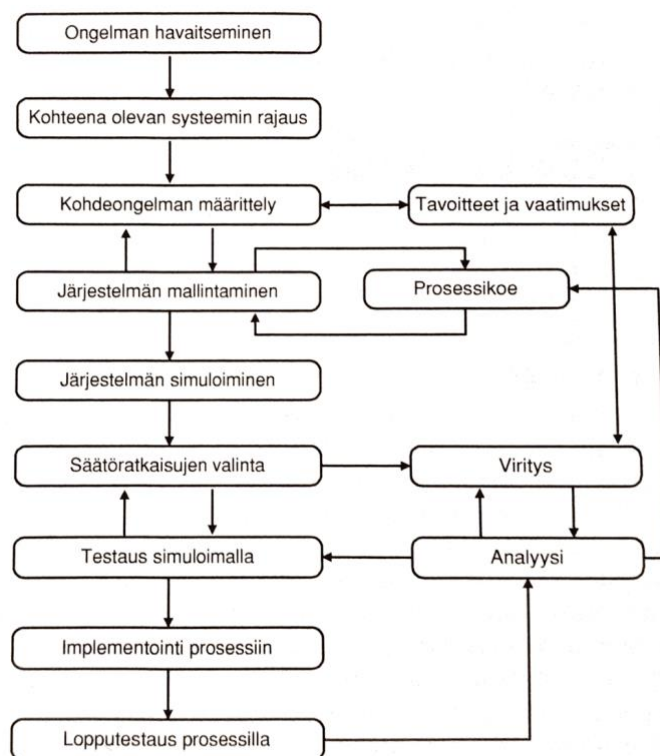
tuotannonohjaukseen, ohjaus- ja säätötasoon sekä kenttäväylätasoon.

Tuotannonohjaukseen kuuluu esimerkiksi kuukausittainen tai viikoittainen tuotannonstrategia. Strategialla pyritään mm. optimoimaan tuotantoyksikön taloudellinen tuotto. Se määrittää ohjaustason toimenpiteet, kuten asetusarvot ja

vaihtojen tapahtumahetket ylemmän tason säätimille. Ylemmän tason säädin voi reagoida minuuteissa ja yksinkertaisimmillaan olla kaskadikytkennän PID-yläsäädin. Alataso kuvastaa kenttävyylätasoa, jossa säätöväli voi olla nopeimmillaan millisekunneja. Alatasolle kuuluu kentällä olevat säädöt, mittaukset ja toimilaitteet. Alataso luo perustan ylemmille tasoille ja kokonaisuudelle. (Harju & Marttinen 2000, 29-30.)

4.5 Säätöongelman ratkaiseminen

Harjun ja Marttisen (2000, 107) mukaan säätösuunnittelu voidaan aina palauttaa kysymykseen ”mitä halutaan ja miksi”, koska prosessit ovat niin yksilöllisiä. Tavoitteet säätimen nopeuden, stabiiliuden, häiriönsietoisuuden, ristikkäisvaikutusten ja tarkkuuden suhteen vaativat aina kompromisseja. Ne voidaan myös asettaa monella eri tapaa. Mikäli tavoitteeseen ei päästä alkuperäisellä säätösuunnitelmalla, täytyy sekä prosessia että säätöjä tarkastella ongelman löytämiseksi ja korjaamiseksi. Kuviossa 6 esitetään, kuinka tällainen säätöongelman korjausprosessi tyypillisesti etenee.



Kuvio 6. Esimerkki säätöongelmien ratkaisuprosessista. (Harju & Marttinen 2000, 108.)

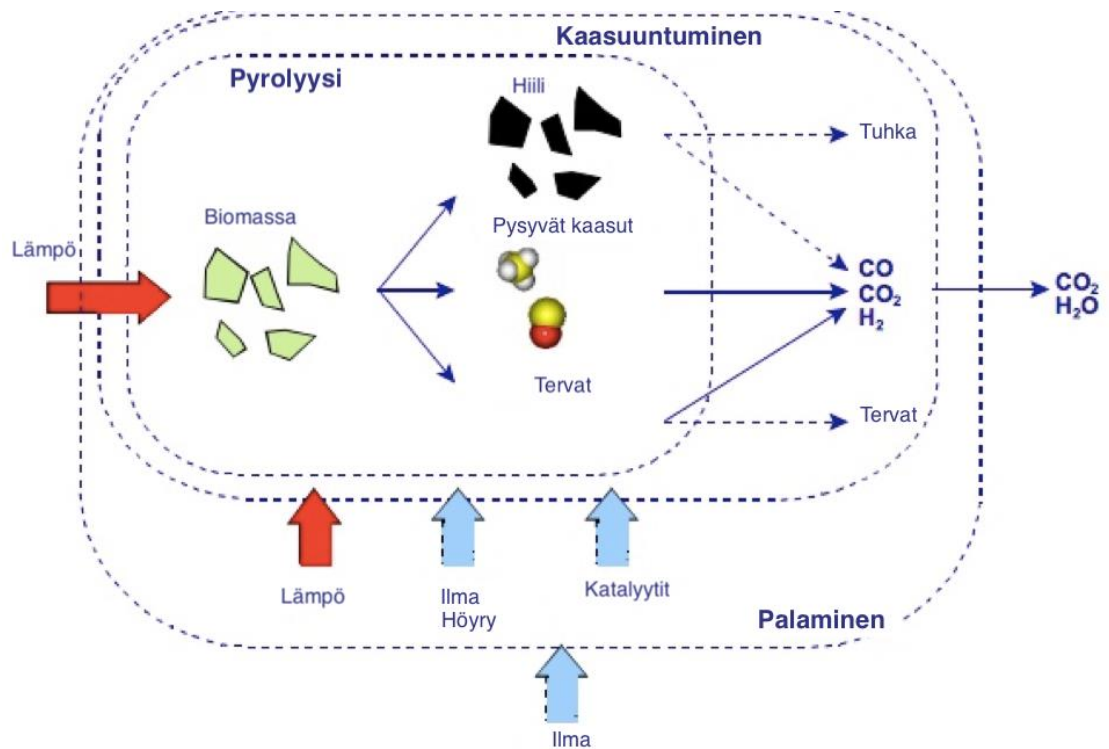
Tämän työn tutkimusvaihe sisälsi monta kuvion 6 vaiheista, mutta ei seurannut sitä tarkasti tai sisältänyt kaikkia. Lähtökohtana tutkimuksessakin toimi ongelman määrittäminen ja kohteena olevan systeemin rajaaminen. Tässä tutkimuksessa ongelma oli kaasutuslaitoksen tuottaman kaasutustehon vaihtelu ja sen automaattisäätimien huono käytettävyys. Niiden vaikutus oli meesauunin tuotannon vaihteleva laatu ja savukaasujen päästöarvot sekä kaasutuslaitoksen säätämiseen kuluva aika. Ensisijaisesti tutkimuksessa etsittiinkin ongelmaa kaasutuslaitoksen säätötavoista. Tutkimus ei sisältänyt järjestelmän mallintamista tai simulointia, jolloin säätötavan valinnan jälkeen sitä koeajettiin suoraan. Tämän työn tulokset vastaavat kuvion 6 loppuratkaisun analyysiä.

5 Biomassan kaasutus

5.1 Kaasutusprosessi

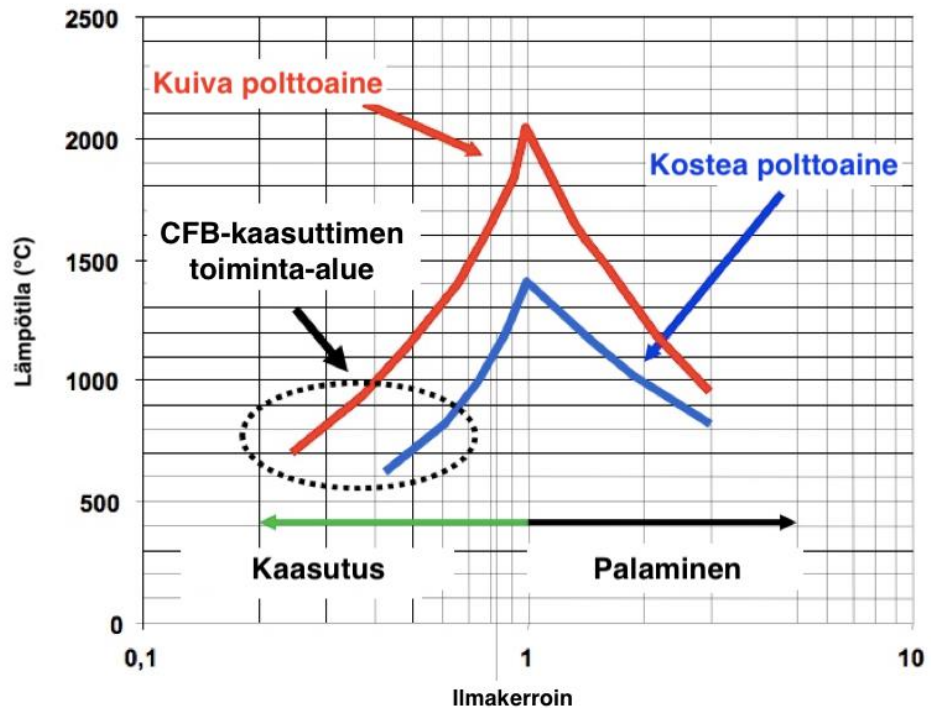
Kaasuttaminen ilmiönä ei ole uusi löytö. Ensimmäisen kaasutukseen liittyvän ja tunnetun tutkimuksen teki Thomas Shirley vuonna 1659 (Basu 2013, 2). Syyt nykyajan biokaasuttimien käytölle johtuvat ympäristötavoitteista ja öljyn saatavuuden heikentymisestä sekä kallistumisesta (Basu 2013, 4). Kaasutuksesta saatavan tuotekaasun mahdollisia käyttökohteita ovat esim. lämmitys, yhdistetty lämmön ja sähköntuotanto (CHP) ja synteettisen kaasuntuotanto (SNG) (Boerrigter & Rauch 2006, 17). Tämän työn kohteessa tuotekaasu käytetään suodattamattomana lämmityskäyttöön.

Biomassa on houkutteleva polttoaine uusiutuvuutensa takia ja kehitys teollisissa kaasutus prosesseissa lisää sen käyttömahdollisuuksia. Kaasuttaminen prosessina on biomassan hajottamista kaasuksi lämmöllä ja ilmalla (ks. kuvio 8). Lämpö tuotetaan polttamalla osa kaasutettavasta biomassasta. Palamisen eli lisätyn lämmön määrää voidaan säätää palamisilman ja biomassan syöttösuhteella. Prosessi vaatii jatkuvan riittävän korkean lämpötilan, riittävästi ilmaa ja biomassaa. (Knoef 2005, 1.)



Kuvio 7. Kuvio esittää biomassan kaasuttamisen muutosprosessia (Knoef 2005, 1).

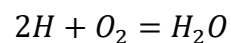
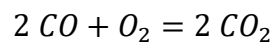
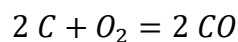
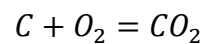
Kiertoleijupetikaasuttimen eli CFB-kaasuttimen petilämpötila pyritään pitämään 750 °C – 900 °C:ssa. Kuviossa 8 on esitetty CFB-kaasuttimen toiminta-alue lämpötilan ja ilmakertoimen suhteen. Tämän periaatteen kaasutinta voidaan siis säätää lämpötilan mukaan. Kuvion 8 korkeimmassa huipussa syötetyn hapen määrä on se määrä, jonka täydellinen polttoaineen palaminen tarvitsee, silloin ilmakerroin on 1,0. Ilmakertoimen kasvaessa täydellisen palamisen pisteen ylitse syötetyllä ilmalla on jäähdyttävä vaikutus. Ilmakertoimen laskiessa alle 1,0 jää osapolttoaineesta palamatta. Tällöin palamattomalla polttoaineella jäähdyttävä vaikutus. Kaasutuksessa ilmakertoimen säätämisellä on siis päinvastainen vaikutus lämpötilaan kuin palamisessa. (Isaksson 2016, 4.)



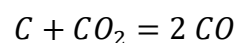
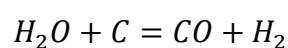
Kuvio 8. CFB-kaasuttimen toiminta-alue on 750 °C - 900 °C (Isaksson 2016, 12).

Kaasutuksen pääreaktiot sisältävät lämpöä vapauttavia ja kuluttavia reaktioita. Energiaa vapauttavia ovat hapen reagoiminen hiilen tai vedyn kanssa. Energiaa sitovia ovat veden hajoaminen häkäksi ja vedyksi sekä hiilen ja hiilidioksidin muuntuminen häkäksi. (Isaksson 2016, 5.)

Energiaa vapauttavia reaktioita ovat



Energiaa sitovia reaktioita ovat



5.2 Kuoripolttoaineen ominaisuudet

Selluympäristössä kaasutettava biomassa saadaan usein sellupuun kuorinnan sivutuotteena. Esim. Äänekosken tapauksessa kaasutettava polttoaine on havu- ja koivupuiden kuorta ja kuorinnassa irronneita puun osia. Kuivan havupuun nettoenergia-arvo on 18,5 – 19,5 MJ/kg ja tyypillinen kosteus 50 - 65 %, kun koivulla vastaavat arvot ovat 21,0 – 23,0 ja 45 - 55 %. (Alakangas 2000, 152.)

Kaasuttimelle tulevan kuoren laadun ominaisuudet voivat vaihdella monella tapaa, eikä niistä ole saatavilla jatkuvaa mittatietoa. Kaasutuksen ilmakertoimen ja petilämpötilan säätimen toimintakuvauksien mukaan mahdollisesti muuttuvia ominaisuuksia ovat kuoren kosteus, palakoko, puulajin jakauma ja lämpöarvo.

6 Kiertoleijupetikaasutin

Vaikka kaasutus on kemiallisilta reaktioiltaan hyvin monimutkainen, niin laitteisto on verrattain yksinkertainen. Kiertoleijupetikaasuttimeen tulee polttoainetta, väliainetta, kuten hiekkaa tai kalkkia, ja ilmaa. Sieltä poistuu tuhkan ja väliaineen sekoitusta ja tuotekaasua. Monimutkaisempiakin sovelluksia löytyy, mutta tämä tutkimus käsittelee Valmet Oyj:n toimittamaa ja Äänekosken Biotuotetehtaalle asennettua laitteistoa.

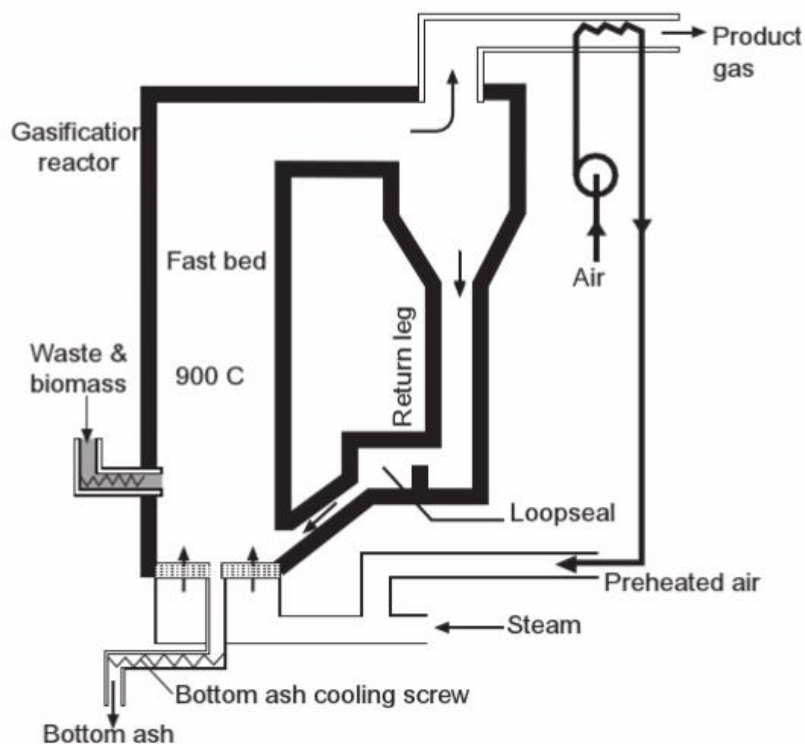
6.1 Kaasutintyytit

Kaasutintyytit voidaan jakaa kolmeen eri pääkategoriaan: samansuuntainen virtaus (engl. Entrained flow), liikkuvapeti (engl. Moving bed) ja leijupeti (engl. Fluidized bed) (Basu 2013, 251). Biotuotetehtaan kaasutin on leijupetitekniikkaa. Sen tarkemmat alakategoriat ovat alakategoriat kupliva peti- ja kiertopetitekniikka (Basu 2013, 251). Keskeiset vaatimukset kaasuttimelle muodostuvat toimivuudesta meesauunin kanssa ja polttoaineesta, joka on sellupuun kuorinnasta syntynyttä kuorta. Kaasuttimesta ei saa aiheutua haittaa kalkin kierrolle esim. hiekan muodossa ja sen pitää pystyä hyödyntämään syötetty kuoriaines sen vaihtelevista ominaisuuksista huolimatta. Kiertoleijupetitekniikan laaja toiminta-alue ja säädettävyyden mahdollistavat sen hyvän käytettävyyden meesauunin yhteydessä.

6.2 Kaasuttimen ominaisuudet

Kiertoleijupetikaasutin koostuu reaktorista, syklonista ja kiintomateriaalin paluuosasta (ks. kuvio 9). Tällä tekniikalla saavutetaan pitkä viipymäaika ja kiinteiden ja kaasujen hyvä sekoittuminen, jotka parantavat erilaisten biomassojen käytettävyyttä polttoaineena. Kaasutusprosessin tehokkuuden määrittää saavutettu ilmakerroin (engl. Equivalence ratio, ER). ER kertoo todellisen ilma-polttoainesuhteen verrattuna stoikiometriseen ilma-polttoainesuhteeseen. Stoikiometrisessa suhteessa happea on juuri se määrä, jonka polttoaine teoriassa tarvitsee täydelliseen palamiseen. (Basu 2013, 279.)

Kiertoleijupedin reaktorissa virtaus on kuplivaa petiä huomattavasti nopeampi (3,5 - 5,5 m/s versus 0,5 – 1,0 m/s) (Basu 2013, 279). Hyvä palaminen ja riittävän hidas virtaus vähentää kiintoaineen, kuten tuhkien ja petimateriaalin, pääsemistä tuotekaasun mukana meesauuniin.

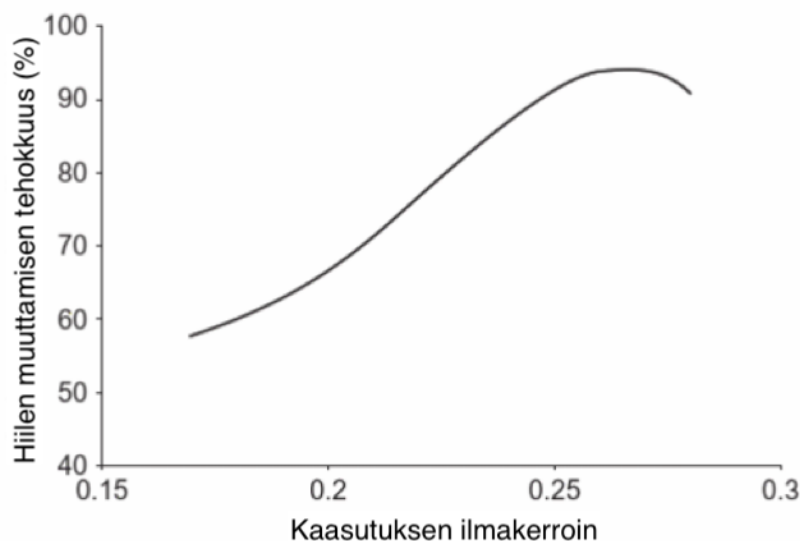


Kuvio 9. Havainnekuva Foster Wheelerin kehittämästä CFB-kaasuttimesta (Basu 2013, 279). Laitteisto eroaa vain hieman Äänekosken Valmet Oyj:n kaasuttimesta. Esim. Äänekoskella ei ole ilman esilämmitystä.

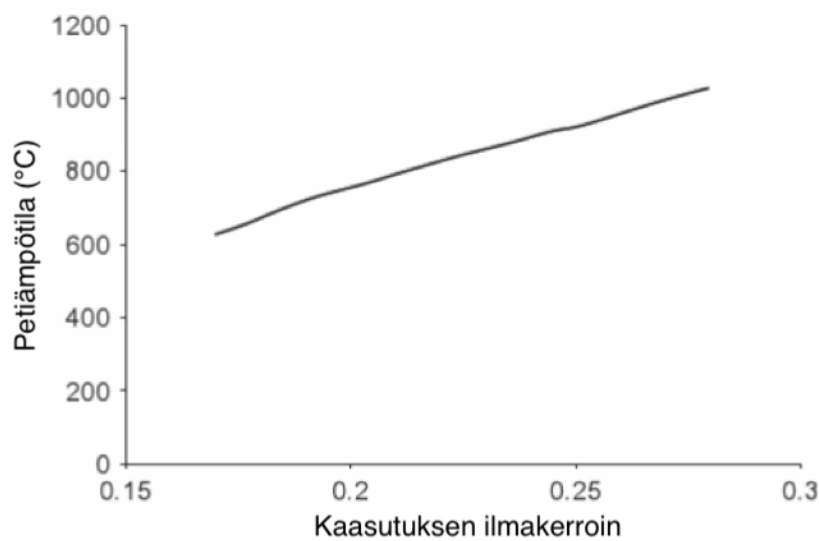
Reaktorissa operointilämpötila on 800 - 900 °C, riippuen polttoaineen laadusta ja käyttötarkoituksesta (Basu 2013, 279; 283). Lämpötilaan vaikuttaa tervan muodostuminen sekä kaasutusprosessin hyötysuhde. Rajoittavia tekijöitä ovat petimateriaalin ja tuhkan pehmeneminen tai sulaminen korkeammissa lämpötiloissa ja biomassan ligniiniin huono kaasuuntuminen matalissa lämpötiloissa. (Basu 2013, 279.)

Itse kaasuuntumisprosessi ei vaadi happea vaan korkean lämpötilan. Lämpöenergian tuominen prosessiin kaupallisissa laitteistoissa tapahtuu kuitenkin polttamalla osa kaasutetusta materiaalista jo reaktorissa. Se kuitenkin kuluttaa osan tuotekaasun energiasta ja lisää ei haluttuja kaasuja lopulliseen tuotekaasuun. Mitä vähemmän lämpöä käytetään suhteessa kaasutettuun polttoaineeseen, sitä tehokkaampi prosessi on. Tätä lämmön määrää ohjataan syötetyn ilman määrällä suhteessa syötettyyn polttoaineeseen. (Basu 2013, 279.) Biotuotetehtaan kaasutuslaitoksessa suhteen säätää kaasutuksen ilmakerroinsäädin tai petilämpötilan säädin

Vertaamalla kaasuttimesta saatua tehoa eri ER-määrillä voidaan löytää kyseisen laitteiston paras hyötysuhde. CFB-kaasuttimessa normaaliarvo olisi 0,2-0,30. ER-arvon muuttuessa palamisen määrä reaktorissa muuttuu, hyötysuhde muuttuu ja petilämpötila liikkuu sen mukana (ks. kuvio 10). (Basu 2013, 279.) CFB-kaasuttimen suunnitteluvaiheessa lasketun optimaalisen lämpötilan ja ER:n avulla voidaan suunnitella reaktorin lämpötasapaino (Basu 2013, 283).



Kuvio 10. ER:n vaikutus hiilen olomuodon muutoksen tehokkuuteen CFB-kaasuttimessa (Basu 2013, 278)



Kuvio 11. ER:n vaikutus petilämpötilaan CFB-kaasuttimessa (Basu 2013, 279)

Kuviossa 10 optimaalinen ER olisi 0.26, mutta siihen vaikuttaa useita tapauskohtaisia muuttujia, jolloin se ei ole kopioitavissa. Tämän tutkimuksen kohteessa keskeisimpiä muuttujia ovat polttoaineen laatu (palakoko, lämpöarvo), määrä ja sen sisältämä kosteus sekä sen hetkinen ajomalli. Oleellista tämän tutkimuksen kannalta oli, että petilämpötila kulkee lähes lineaarisesti ER:n mukana (ks. kuvio 11). Se tarkoittaa, että ER:n olessa vakio, nähdään petilämpötilan muutoksesta, jos kaasutusprosessi on muuttunut. Mikäli petilämpötila pidetään vakiona, säätämällä kaasutuksen ilmakerrointa, niin muutokset nähdään kaasutuksen ilmakertoimesta. Kaasutuksen korkea hyötysuhde ja vaihtelun tasaisuus ovat keskeisiä biotuotetehtaalla, koska sillä on keskeinen vaikutus tuotekaasun adiabaattiseen palamislämpötilaan.

6.3 Biotuotetehtaan kuoren kaasutuslaitos

Metsä Fibren Oy:n biotuotetehtaan kaasuttimen ER:n ja tehon optimoinnin kannalta käytännössä keskeiset mittaukset ovat kaasutusilman virtaus, polttoaineen syöttöruuvien nopeus ja kaasuttimen petilämpötila. ER:n ja kaasuttimen tehon automaattiohjauksen säätämistä vaikeuttaa se, ettei hyvää tuotekaasun tehon mittaria ole saatavilla. Myöskään polttoaineen tarkkaa määrää, kosteutta tai lämpöarvoa ei ole jatkuvana mittauksena saatavilla. Polttoaineen annosteluruuvien

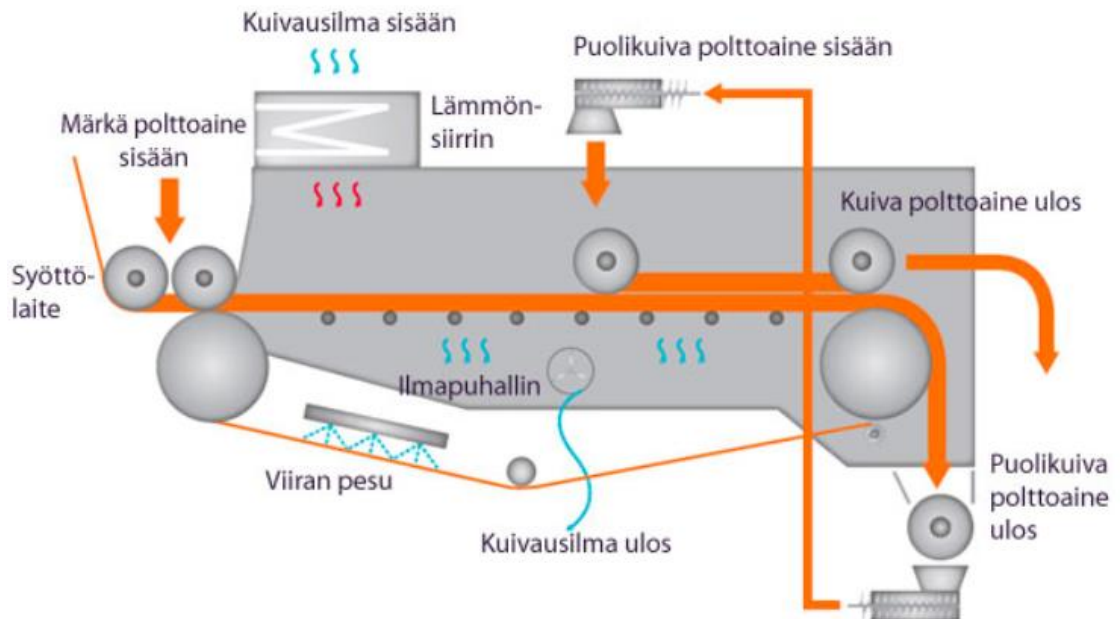
nopeus tiedetään ja pysyy tasaisena, mutta ei tiedetä, onko polttoaineen määrä suoraan verrannollinen ruuvien nopeuteen niin kuin polttoaineen virtauksen laskenta olettaa.

Kaasutuslaitoksen operoinnin kannalta keskeisimpiä toimilaitteita ovat kaasutusilmapuhallin 1 ja 2, polttoaineen annosteluruuvit 1 ja 2 ja petilälämpötilamittaukset 1-6. Muita laitoksen toimilaitteita ja prosesseja ovat polttoaineen syöttölinjat 1 ja 2 sisältäen siilon, annostelutaskun, sulkusyöttimiä, sulkupeltejä ja tiivisteilmaa, tuhkan poisto, petimateriaalin syöttö, inertointihöyryn syöttö ja starttipoltin sekä useita muita paineen ja lämpötilan mittauksia.

7 Viirakuivuri

Polttoaineen sisältämä vesi vaatii energiaa kaasuuntumiseksi. Tämän energian tuottamiseksi joudutaan kaasuttimessa polttamaan suurempi osuus polttoaineesta, jolloin tuotekaasun palavien yhdisteiden määrä vähentyy suhteessa savukaasuihin. Koska kaasutusprosessin hyvä hyötysuhde ja meesauunissa korkea tuotekaasun palamislämpötila vaativat korkean biomassan kuiva-aineen, kannattaa se kuivata ennen kaasuttamista.

Yleinen tapa kuivata kaasutettava biomassa on käyttää viirakuivuria (ks. kuvio 12). Sillä päästään korkeaan ja tasaiseen kuiva-ainepitoisuuteen käyttämällä hukka- tai sekundäärilämmön lähteitä kuten kuumaa vettä, lauhdetta tai matalapainehöyryä. Kuivurissa viiralle levitetään tasainen 10 - 20 cm:n kerros kuivattavaa biomassaa. Kerros kuivataan imemällä sen lävitse tyypillisesti 80 - 120 °C kuumaa ilmaa. Viiran nopeus kuivurissa on hidas, n. 1 m/min, ja viipymä aika on 30-90 min. Tasaiseen loppukosteuteen vaikuttaa tasainen palakoko ja patjan paksuus. (Nummelin, Hankalin & Raiko, 2014. 23.)



Kuvio 12. Yksinkertaistettu prosessikuva viirakuivaimen toiminnasta (Energia, ympäristö, talous ja turvallisuus 2019)

Viirakuivurin ohjauksessa haetaan laadultaan hyvää lopputulosta ja energiatehokkuutta. Kuivuria säädetään pääasiassa puhaltimien nopeudella ja ilman lämpötilalla (Energia, ympäristö, talous ja turvallisuus 2019).

Kuorelle tyypillinen kosteusprosentti on 30 – 60 %. Nykyajan biomassan kaasutuskohteille polttoaineen mitoitettu kosteus vaihtelee 10 – 20 %, jolloin kuivaaminen on välttämätöntä. (Basu 2013, 76; 202.)

Vaikka 10 – 20 % on karkea arvio, antaa se suuntaa kuivurin tuotannon tavoitteelle. Kaasutusprosessin toimiakseen täytyy kuiva-aineen olla korkea ja tasalaatuinen. Käytännössä Äänekoskella tehdyt kuivan kuoren analyysit kertoivat kuivurin pystyvän yli 90 % kuiva-aineeseen, jolloin kuiva-aine ei ole ongelma. Tarkempaa analyysiä siitä, kuinka nopeasti ja voimakkaasti kuiva-aine vaihteli, ei ollut. Kuivurin tuotanto oli kuitenkin niin laadukasta, että tämä tutkimus keskitettiin kaasutusprosessin säätöihin.

8 Kuorikaasuttimen prosessinohjaus

Kuoren kaasutuslaitoksen säätöpiirejä ohjataan keskusvalvomosta Valmet DNA DCS:llä. Operaattori ohjaa kaasuttimen kaasutustehon säätöpiiriä M-tilassa. Ohjaamista varten operaattori seuraa pääasiassa meesauunin lämpötiloja, kalkin jäähdyttimen videokuvaa ja jäännöskarbonaattianalyysijä. Kaasutustehon ohjauspiiri antaa asetusarvon polttoaineen annosteluruuveille ja kaasutusilman virtaukselle. Kuorikaasuttimen muiden säätimien päätehtävä on ylläpitää tasainen ja tehokas kaasuuntuminen sekä suojata laitteistoa ylikuumenemista vastaan, joka normaalisti onnistuu säätämällä ilma-polttoainesuhdetta petilämpötilan mukaisesti.

Ilma-polttoainesuhdetta säättävät petilämpötilan ja kaasutuksen ilmakertoimen säätimet A/L, A/R tai M-tilassa. A/R-tilassa ne saavat ohjauksen petilämpötilan ja petilämpötilan asetuksen erosuureesta. A/L-tilassa kaasutuksen ilmakerroin pyrkii operaattorin asettamaan kaasutuksen ilmakertoimen paikallisarvoon ja petilämpötilan säädin pyrkii operaattorin asettamaan petilämpötilan paikallisarvoon. Petilämpötilan säädin vaikuttaa kuoren laatukertoimeen, jolloin sen virtauksen määrä muuttuu kaasutustehon asetuksen pysyessä samana. Kaasutuksen ilmakerroin ohjaa kaasutusilman virtauspiiriä suhteessa kaasutustehon asetukseen. Molempien säätimien ollessa M-tilassa operaattori seuraa itse petilämpötilaa ja ohjaa ilma-polttoainesuhdetta.

Kaasuttimen säätöpiirit mahdollistavat erilaisia ohjaustapoja. Nykyinen ohjaustapa oli laitteiston toimittajan Valmet Oyj:n ohjeiden mukainen. Näiden ohjeiden mukaan kaasutuksen ilmakerroin tuli säilyttää hyväksi todettuna vakiona (M- tai A/L-tilassa) ja petilämpötilan säätimen tehtävä oli korjata automaattisesti (A/L-tilassa tai A/R-tilassa) häiriöitä. (ks. liite 1)

A/L-tilassa petilämpötilan säädin saa ohjaavan eroarvon petilämpötilasta jatkuvasti. Sen A/R-tila toimii samoin, mutta siihen on lisätty +/-10 °C ns. kuollut alue. Sillä alueella petilämpötila saa heilua säätimen reagoimatta.

8.1 Polttoaineen ohjaus

Kaasutustehon säätö ohjataan M-tilassa meesauunin ohjausarvojen mukaisesti. Se on ylempään tason piiri, joka ohjaa annosteluruuvien 1 ja 2 nopeuden sekä kaasutusilman virtausta niiden ollessa A/R-tilassa. Annosteluruuvien nopeuden laskentapiiriin vaikuttavat polttoaineen laatukerroin, kaasutustehon ohjaus ja petilämpötilan säädin. Säädin toimii vaikka vain toinen polttoaineen syöttölinjoista olisi käytössä tai kaasutusilman virtaus, kaasutuksen ilmakerroin ja petilämpötilan säätö olisivat M-tilassa.

Polttoaineen laatukertoimen (MWh/m^3) asettaa operaattori. Petilämpötilan säädin vaikuttaa siihen korjausarvolla pitääkseen petilämpötilan asetusarvossa. Näiden tulokset kerrotaan kaasutustehon ohjauksella, joka antaa ohjauksen (m^3/h) annosteluruuvi 1 ja 2 virtauspiireille. Annosteluruuvien ruuvien virtaus 25 - 115 m^3/h skaalautuu niiden nopeudeksi 0 - 100 % suoraan verrannollisesti.

8.2 Kaasutusilman ohjaus

Kaasuttimeen tulee ilmaa pääasiassa kahdella sarjalla asennetulla kaasutusilmapuhaltimella ja lisäksi polttoaineen syöttölinjojen sulkusyöttimiltä, johon tuodaan tiivistysilmaa. Kaasutusilman virtauspiiri ohjaa puhaltimia. Sille kaasutuksen ilmakerroin ohjaa paljonko ilmaa tarvitaan. Kaasutuksen ilmakerroin on suhdearvo, jossa ilman ja polttoaineen syöttö tehdään.

Kaasutusilman virtauksen minimi on 1,8 Nm^3/s . Toimintakuvauksen mukaan maksimi asetusarvo puhaltimille on 20,0 Nm^3/s . Kaasutusilman lisäksi kaasuttimeen tulee tiivisteilmaa polttoaineen sulkusyöttimiltä. Tiivisteilman virtaus vaihtelee hieman, mutta on noin 1,0-1,7 Nm^3/s (ks. liite 2). Sen mittaus sijaitsee ennen sulkusyöttimiä, joten kaasuttimen suuntaan tulevaa osuutta ei tiedetä. Tämä tiivisteilman virtaus on riippumaton kaasutustehosta, jolloin se luo pohjakuorman ilman virtaukseen.

Kaasutuksen ilmakerroin voi olla vakio tai säädettävissä petilämpötilan mukaan. Valmet Oyj:n ohjeiden mukaan se optimoidaan kaasuttimen ollessa vakaassa ajossa ja jätetään vakioksi. Optimointi tarkoittaa kaasutuksen ilmakertoimen ajamista siihen

arvoon, jossa petilämpötila on asetusarvossaan ja petilämpötilan korjauskerroin on säätöalueensa keskellä. Optimoinnin jälkeen kaasutusilman virtauspiiri voidaan laittaa automaatile A/R-tilaan, jolloin se saa asetusarvon kaasutustehon ohjauksen mukaan.

8.3 Petilämpötilan säätäminen

Lämpötilan vaihteluun reaktorissa ja petilämpötilassa on lukuisia syitä. Havaintojen perusteella merkittävimmät syyt vaihteluun ovat uuden petikalkin syöttö, polttoaineen laadun vaihtelu ja ilma-polttoainesuhteen muuttuminen. Petilämpötilan säätö reagoi näihin muutoksiin korjausarvolla, joka jaetaan asetetulla polttoaineen lämpöarvolla ja näin se lisää tai vähentää annosteluruuvien nopeutta kaasutusteho asetuksen pysyessä samana. (ks. liite 3)

Petilämpötilan mittausta tapahtuu kuudella anturilla, joista kolmen korkeimman lämpötilan keskiarvoa käytetään ohjausarvona. Tämä suodattaa hyvin virheelliset mittaukset.

Suunniteltu kaasuttimen lämpötilan säätöalue on 700 – 900 °C, jonka alueelta laitteistolle ja käyttökohteelle optimaalinen ilman ja polttoaineen suhde tulisi löytää. Tässä laitteistossa tavoiteltu lämpötila on Valmet Oyj:n ohjeen mukaan 800 - 850 °C, jota kokemusten mukaan voidaan pyrkiä parantamaan. Valittu asetusarvo voi olla esim. 820 °C.

Kaasutuksen lämpötilan alaraja on 650 °C. Toisin kuin laskiessa, lämpötilan noustessa aiheutuu riski laitteistolle ja sitä varten on rajoitussäädin, joka alkaa rajoittamaan kaasutusilman syöttöä petilämpötilan noustessa 20 °C yli asetusarvon.

9 Tulokset

9.1 Häiriöiden tutkinta

Kuorikaasuttimen toiminnasta aiheutuva yleisin ja keskeisin ongelma oli meesauunin jäähtyminen tai kuumentuminen. Merkittävin vaikuttaja oli kaasutustehon vaihtelu. Kuten luvussa 3.3 Kalkin kierto kerroin, meesauunin prosessi on hidas ja silloin myös

ongelmien korjaus tapahtuu viiveellä. Meesauunin lämpötilojen vaihtelu vaikeuttaa savukaasujen lämpötilan ja NO_x-päästöjen hallintaa. (ks. liite 4)

Vaihtelun kasvaessa saattaa savukaasujen lämpötila tai kaasutuksesta tullut häikäpiikki aiheuttaa kaasutusprosessin alasajon. Meesauunin lämmityksessä kaasutuslaitoksen alasajo ja käynnistäminen vaativat usein tuotekaasun korvaamista mäntypikiöljyllä. Polttoaineena mäntypikiöljy on kuorta kalliimpaa, jolloin em. tilanne aiheuttaa myös lisäkustannuksia.

Ongelmia ja niiden lähteitä etsittiin mittaushistorian, toimintakuvausten ja koeajojen avulla. Merkittävimmät löydettyt häiriöt johtuivat polttoaineen laadun vaihtelusta, petilämpötilan säätämisestä polttoaineella ja kaasutustehon muuttamisesta sekä petimateriaalin syöttämisestä.

9.1.1 Polttoaineen laadun vaihtelu

Polttoaineen laadun vaihtelu vaikuttavaa siihen, kuinka paljon energiaa se vaatii kaasuuntumiseksi. Se vaikuttaa kaasuuntumisesta saatavaan kaasutustehoon ja kaasuuntumisreaktion lämpötilaan, jotka näkyvät esim. meesauunin mittauservoissa ja kaasuttimen petilämpötilassa. Polttoaineen laadun huonontuminen laskee em. arvoja ja parantuminen nostaa. Itse polttoaineen laadusta ei ole jatkuvia mittauksia, jolloin sen vaikutuksia ei tiedetä tarkkaan.

Meesauunin arvojen mukaan ohjataan kaasutustehoa ja petilämpötilan mukaan säädetään kaasutuksen ilma-polttoainesuhdetta. Vaikeuksia meesauunissa lisää se, että sen prosessi reagoivat hitaasti muutoksiin. Vahinko kuten jäännöskarbonaatin tai NO_x-päästöjen nousu saattaa jo tapahtua, ennen kuin kaasutustehoa huomataan muuttaa. Kaasuuntumisreaktion lämpötilassa ei ole tätä ongelmaa. Kaasuttimen petilämpötila reagoi muutoksiin riittävän nopeasti, koska siihen voidaan vaikuttaa tehokkaasti ilma-polttoainesuhteella. Tämä tarkoittaa, että polttoaineen laadun muuttuessa petilämpötila ei juurikaan muutu, mutta kaasutustehon muutos tulee viiveellä näkyviin meesauunin ohjausarvoissa.

Tämän häiriön torjumisessa voidaan pyrkiä vähentämään muutoksia polttoaineen laadussa tai virittää säätimet minimoimaan häiriön vaikutukset. Merkittävimmät

muuttajat, joihin voitaisiin vaikuttaa, ovat havu- ja koivukuoren jakauma, kuiva-aineen osuus ja partikkelikoko.

Puunkäsittelyn kuorinnasta tuleva kuori murskataan ja varastoidaan. Havu- ja koivukuori varastoidaan erikseen. Kaasutuslaitokselle tuleva kuori puretaan näistä kasoista yhtäaikaisesti samalla linjalle. Ennen kaasutuslaitosta polttoaine kuivataan viirakuivaimella ja varastoidaan polttoainesiiloihin. Tämän prosessin nopeus muuttuu kaasutustehon tarvitseman polttoaineen virtauksen vauhdin mukaisesti.

Partikkelikoon epätasaisuuden ratkaisu vaatii polttoaineen lisämurskaus-, revintä- tai hakkuvaiheen kuorikirkon ja kaasutuslaitoksen välille (ks. liite 5).

Havu- ja koivukuoren jakauma saattoi muuttua, koska toisiinsa nähden niiden purkuruuvien nopeus vaihteli (ks. liite 6). Tähän voisi vaikuttaa purkuruuvien ohjauksen virittämisellä.

Yksi muuttujista, joka vaikuttaa tasaiseen kuiva-aineeseen, on viirakuivurin tuotannon nopea muuttuminen. Viirakuivurin nopeus seuraa kuorikaasuttimen tarvitseman polttoaineen virtausta. Viirakuivurin tuotannon nopeuden tasoittamiseksi tehokas keino olisi tasoittaa polttoaineen virtaus kuorikaasuttimeen. Yksi ratkaisu olisi vaihtaa ilma-polttoainesuhteen säätäminen kaasutusilmalle, jolloin polttoaineen syöttö säilyy vakiona kaasutustehoon nähden. Lisäksi kaasutuslaitoksen polttoainesiilojen täyttöasteen ja kuivurin tuotannon säätöpiirien säätötapoja ja virityksiä voisi tutkia.

9.1.2 Petilämpötilan säädin

Kaasutustehon heilumisen takia, kaasuttimen petilämpötilan säädintä operoitiin usein M-tilassa. Silloin ongelmat vähenivät merkittävästi, mutta säätämisen tarve säilyi. (ks. liite 4) Kuten luvussa 4.3 Säätöpiirien virittäminen kerroin, voidaan ongelmien häviämisestä päätellä, ettei säätöpiiri toimi. Toimilaitteiden toimintakuntoakaan ei epäilty, joka vahvisti säätöpiirin virittämisen tai muuttamisen olevan tarpeellista. Kuitenkin M-tilassa tarvittiin edelleen operaattoria tekemää ohjausta, jolloin automaattisäätimelle oli selvä tarve ja muita häiriön lähteitä kannatti etsiä.

Yksi keskeinen ongelma petilämpötilan säätämisessä polttoaineelle on, että se vahvistaa polttoaineen laadun vaikutusta kaasutustehoon. Polttoaineen laadun huonontuminen laskee petilämpötilaa ja silloin petilämpötilan säädin korjaa sitä vähentämällä polttoaineen määrää suhteessa kaasutusilmaan. Sama tapahtuu toiseen suuntaan polttoaineen laadun parantuessa.

Jos kaasutustehon vaihtelu muuttaa meesauunin prosessia, on operaattorin reagoitava muuttamalla kaasutustehoa. Koska nämä meesauunin arvot reagoivat paljon petilämpötilaa hitaammin, voi todellinen kaasutusteho olla jo palautunut operaattorin reagoidessa. Tämä efekti vaikeuttaa tasaisen ja oikean kaasutustehon ohjausta.

Polttoaineen laadun vaihtelun vaikutusta voidaan vähentää muuttamalla petilämpötilan säädin ohjaamaan kaasutusilmaa polttoaineen sijasta. Silloin lämpötilan muuttamiseksi muutetaan vain palamisen määrää, eikä itse polttoaineen määrää. Kummassa tahansa säätötavassa operaattorin täytyy ohjata kaasutustehoa meesauunin mittausarvojen mukaisesti.

9.1.3 Kaasutustehon muuttaminen

Kaasutuksen ilmakertoimen tavoite on säilyttää oikea ilma-polttoainesuhde kaasutustehoa muutettaessa. Jos kerroin on oikein, pysyy kaasuuntumisreaktion lämpötila lähes samana eri kaasutustehon alueilla. Kuitenkin kaasutuksen ilmakertoimen optimoinnin jälkeen, kun kaasutustehoa muutettiin (n. 11 MW) ja petilämpötilan säädin oli M-tilassa, havaittiin, että kaasutuksen ilmankerrointa oli muutettava merkittävästi (n. 10,6 %) (ks. liite 7). Tällöin voidaan epäillä kaasutuksen ilmakertoimen oikeellisuutta.

Nykyinen kaasutuksen ilmakerroin lasketaan jakamalla kokonaisilman virtaus (Nm^3/s) kaasuttimeen virtaavan polttoaineen sisältämällä teholla (MW). Tämän laskun tulos jaettuna stoikiometrisellä ilmakertoimella antaa kaasutuksen ilmakertoimen. Tämä tarkoittaa, ettei kumpikaan tai toinen virtausmittaus vastaa todellisia arvoja.

Todennäköisesti isoimman virheen laskennassa aiheuttaa se, että kokonaisilman virtaukseen ei oteta huomioon tiivisteilman kulkeutumista kaasuttimeen.

Vaikka tiivisteilman virtaus sulkusyöttimille on mitattu arvo, niin siitä kaasuttimeen menevän osuuden suuruutta ei tiedetä.

Tiivisteilman aiheuttama kuormahäiriön ratkaisu vaatii lisätutkimusta siitä, kuinka suuri osuus tiivisteilman virtauksesta kulkeutuu kaasuttimen suuntaan. Saatua ilmamäärä täytyy lisätä kokonaisilman virtauksen laskentaan. Mikäli virtauksen mittaaminen ei onnistu, voidaan myös kokeilla eri osuuksia, kunnes löydetään ilmamäärä, jolla kaasutustehon muuttaminen vaikuttaa vähiten petilämpötilaan.

Häiriö korjaantuu myös jos petilämpötilan säädin vaihdetaan ohjaamaan kaasutusilman määrä. Silloin kaasutusilman määrä ohjautuu petilämpötilan mukaan eikä tämän virheellisen kaasutuksen ilmakertoimen mukaan. Lisäksi tiivisteilman määrä voidaan optimoida. Tiivisteilman määrän muuttamiseksi täytyy tehdä lisätutkimusta, ettei muutos aiheuta riskiä toimintaan. Jos kaasuttimeen syötetty todellinen ilma-polttoainesuhde on lähes vakio, tiivisteilman väheneminen lisääsi kaasutusilman virtausta, joka etenkin pienellä kaasutusteholla auttaisi pedin leijumista.

Polttoaineen virtaus lasketaan suoraan verrannollisesti annosteluruuvien nopeudesta. Kahden eri ajotilanteen perusteella epäilin, ettei annosteluruuvien nopeus ole aivan suoraan verrannollinen polttoaineen virtaukseen. Ongelma voi johtua ruuvien kulumisesta ja täyttöasteen muuttumisesta eri nopeuksilla. Havaintoa tukee kahden ajotilanteen vertailu, joista ensimmäisessä ajotilanteessa oli käytössä kaksi annosteluruuvia, molemmat nopeudella 10 %, polttoaineen virtaus yhteensä $45 \text{ m}^3/\text{h}$ ja petilämpötila 834 °C sekä kaasutusilman virtaus $3,2 \text{ Nm}^3/\text{s}$ (ks. liite 8). Toisessa ajotilanteessa oli käytössä yksi annosteluruuvi nopeudella 32 % ja polttoaineen virtaus sama $45 \text{ m}^3/\text{h}$ ja petilämpötila 837 °C sekä kaasutusilman virtaus $2,9 \text{ Nm}^3/\text{s}$ (ks. liite 9.) Koska toisessa tilanteessa kaasutusilmaa virtaa vähemmän ja petilämpötila on korkeampi, voidaan epäillä polttoainettakin virtaavan vähemmän, vaikka asetettu virtaus on sama. Tarkkaa laskelmaa näistä ajotilanteista ei kannata tehdä, sillä asiaan vaikuttaa muitakin muuttujia kuten polttoaineen ominaisuudet ja petimateriaalin syöttö.

Laskentavirheen korjaaminen vaatisi todellisen virtauksen mittaamista eri nopeuksilla. Siitä olisi hyötyä operaattorille kaasutustehon ohjaamiseen ja se vähentäisi kaasutuksen ilmakertoimen laskentavirhettä.

Tiivisteilman kuormahäiriön ja annosteluruuvun laskentavirheen eliminoinnin avulla kaasutuksen ilmakerroin parantuisi huomattavasti. Se vähentäisi merkittävästi petilämpötilan säätimelle tulevia häiriöitä, jonka myötä säädintä voisi hidastaa ja kaasutustehon vaihtelu vähenisi. Mikäli kaasutuksen ilmakerroin toimisi lähes vakiona, voisi sitä seuraamalla havaita polttoaineen laadun muutokset ennen niiden vaikutusta meesauuniin.

9.1.4 Petimateriaalin lisäys

Petimateriaalin lisäys tapahtuu noin 10 – 25 min välein ja laskee petilämpötilaa noin 9 °C (ks. liite 10). Muutos korjautuu itsestään muutamassa minuutissa, mutta voi aiheuttaa ongelman, jos petilämpötilan säädin reagoi muutokseen liian voimakkaasti.

Petimateriaalin lisäyksen vuoksi petilämpötilan säätimelle on luotu +/- 10 °C alue, jonka sisällä säädin ei reagoi eli ns. kuollut alue. Tällä tavalla säädin on pitänyt petilämpötilan hyvin ohjearvojen (800 - 850 °C) sisällä.

Häiriön huomioimiseksi muita ratkaisuvaihtoehtoja ovat säätimen jäädyttäminen hetkeksi (esim. 120 sek) petimateriaalin lisäyksen jälkeen tai parametrien optimointi.

9.2 Ratkaisun valinta

Automaattinen petilämpötilan säätö oli selkeä pääsyy kaasutustehon vaihteluun ja sitä kautta ongelmiin meesauunin lämpötilan säädössä sekä savukaasuissa. Olemassa olevista mittauksista oli vaikea määrittää tarkkaa syytä. Kaasutustehon vaihtelut syntyivät ja kasvoivat useiden häiriöiden yhteisvaikutuksesta. Mielestäni suurimmat tekijät muodostuvat polttoaineen käyttämisestä säätävänä arvona ja kokonaisilmavirtauksen laskentavirheestä.

Polttoaineen käyttämistä petilämpötilaa säätävänä arvona kyettäisiin parantamaan polttoaineen laadun tasaamisella ja ennakoimisella. Keinoja tähän ovat polttoaineen murskaus, havu- ja koivujakauman mittaus ja kuivatun polttoaineen kosteuden

mittaus. Tehokkaampi ratkaisu on vaihtaa kaasutusilma säätäväksi arvoksi, koska polttoaineella säätäminen vahvistaa kaasutustehon vaihtelua.

Petilämpötilan säätäminen polttoaineella aiheutti myös lisää viirakuivurin tuotannon vauhdin vaihtelu, joka lisää polttoaineen laadun vaihtelua. Tämä parantuisi, jos kaasutustehon heiluntaa onnistutaan tasaamaan muilla keinoilla, mutta ongelma ratkaistaan kokonaan vaihtamalla kaasutusilma petilämpötilaa säätäväksi arvoksi.

Kaasutustehon muuttamisesta syntynyt häiriö koostuu pääasiassa kaasutusilman kokonaisilman virtauksen laskentavirheestä. Polttoaineen ollessa petilämpötilaa säätävä arvo, joutuu polttoaineen virtaus seuraamaan kaasutusilman määrää, koska kaasutusilma on kaasutustehoa seuraava vakio. Vaihtamalla petilämpötilan säädin vaikuttamaan kaasutusilmalla, alkaa se seuraamaan kaasutustehon ohjaamaa polttoainetta ja näin korjaa kokonaisilman virtauksen laskentavirheen.

Polttoaineen virtauksen laskentavirheen vuoksi polttoaineen virtaus voi erota todellisesta. Mielestäni sillä ei ole merkittävää vaikutusta kaasutusprosessin ohjaamisen kannalta. Keskeistä tässä on, että ruuvien nopeuteen nähden polttoaineen virtaus on tasainen. Koska kaasutusteho ohjataan meesauunin mittausarvojen mukaan, ei tarkalla kaasutusteholla tai polttoaineen virtauksella ole vaikutusta.

Petimateriaalin lisäys ei ollut poistettavissa oleva häiriön lähde, jolloin petilämpötilan säädin täytyy saada reagoimaan sen aiheuttaman vaihteluun mahdollisimman hyvin. Sen nykyinen toiminta oli hyväksyttävällä tasolla, mutta se voi parantua poistamalla ns. kuollut alue ja optimoimalla säätimen parametreja.

Häiriöitä ja niiden vaikutusta ei voitu arvioida tarkasti, mutta tehokkain yksittäinen keino on vaihtaa polttoaine ohjautumaan kaasutustehon mukaan ja kaasutusilma petilämpötilaa säätäväksi arvoksi. Tähän riittävät nykyiset mittaukset, jolloin pelkkä säätötavan muutos riittää.

Useat muista ratkaisuista vaativat lisätutkimusta tai investointeja laitteistoihin, sillä polttoaineella säätäminen vaikuttaa näistä moneen. Uskon viirakuivurin tuotannon laadun tasaantuvan, jos polttoaineen virtausnopeus kaasuttimeen tasaantuu. Tämän jälkeen olisi helpompi nähdä muiden muuttujien vaikutus.

Ratkaisuksi valitsin säätötavan vaihtamisen. Merkittävin muutos oli kaasutusilman vaihtaminen polttoaineen tilalle petilämpötilaa säätäväksi arvoksi. Tämän muutoksen jälkeen tarvitaan koeajojakso, jolloin voidaan tutkia sen vaikutuksia ja arvioida lisämuutosten tarvetta.

9.3 Kehitysehdotus

Ehdottamani ratkaisu kaasutuslaitoksen automaattiseen säätämiseen oli seuraava: kaasutuksen ilmakertoimesta tehdään pääsäätäjä ottamalla siitä pois petilämpötila ja nopeuttamalla sen reagointia samalle tasolle petilämpötilan säätimen kanssa. Petilämpötilan säätimestä ja polttoaineesta tehdään varasäätäjä estämään petilämpötilan liika kuumentuminen tai jäähtyminen. Varasäädin tehdään kasvattamalla petilämpötilan säätimen ns. kuollut aluetta +/- 20 °C:seen. Esitin lisäämään ala- ja ylärajahälytyksen ”Kuori säätää”, kun varasäädin vaikuttaa.

Normaalissa käytössä kaasutusilmalla säädettäessä odotin lämpötilan pysyvän asetusarvosta -10 - 0 °C alueella. Petimateriaalin lisäyksen huomioimiseksi kaasutuksen ilmakertoimen parametrit eivät saa olla liian nopeita tai voimakkaita.

Varasäädön avulla estettäisiin erityisesti liika kuumentuminen, mutta myös tarpeeton jäähtyminen. Vanhassa säädössä oli varasäätö, joka säätö ilmalli ja tuli mukaan vain ylärajalla. Jäähtyminen ei ole vaarallista, kuten kuumentuminen, mutta tarvittaessa säädin voisi korjata myös toiseen suuntaan. Realistinen esimerkki hallitsemattomasta kuumentumisesta olisi toisen polttoaineen syöttölinjan tukkeutuminen ja jäähtymiseen erityisen huonolaatuinen polttoaine.

9.4 Käyttöönotto

Kehitysehdotusteni jälkeen todettiin, että kaasutusilmalla säätämistä kannattaa kokeilla. Laitetoimittaja Valmet Oyj:n edustajat tekivät automaatioon seuraavat muutokset:

- Petilämpötilan säädin vaihdettiin ohjaamaan kaasutusilman virtausta.
- Petilämpötilan suodatukseen jätettiin vaihtoehdoiksi A/R-tila, jolloin säädin toimi +/- 10 °C kuolleen alueen kanssa.
- Petilämpötilan säätimeen käyttöönotettiin A/R-tila, jolloin säädin toimi ilman kuollutta aluetta.

- Petilämpötilan säätimeen lisättiin 130 sekuntin jäädytys petimateriaalin syötön jälkeen.
- Varajärjestelmäksi asetettiin kuoren lisäsyöttö petilämpötilan noustessa yli +20 °C asetusarvon.
- Varajärjestelmän aktivoituessa kaasutuslaitoksen ohjausnäytölle tulee näkyviin "Rajoittaa" hälytys.
- Kaasutuksen ilmankerroin jätettiin vakioksi ja tuotiin ohjausnäyttöön näkyville.

Tässä säätötavassa kaasutuksen ilmakertoimen tarkoitus on, että operaattori pystyy säätämään kaasutusilman virtausta, jos petilämpötilan säädin ei siihen pysty.

Esimerkki tästä on petilämpötilan säätimen oleminen toiminta-alueensa rajalla.

Kaasutuslaitoksen ohjauksen automaattisäätöä on tarkoitus käyttää vasta, kun kaasutuslaitos on vakaassa ajossa. Käyttöön otetussa säätötavassa ennen manuaali säädöltä automaatille siirtymistä, pitää petilämpötila ohjata lähelle asetusarvoa. Petilämpötilan ollessa asetusarvossa on kaasutusilman virtaus hyvä. Sen jälkeen säädetään kaasutusilmavirtauksen operaattorin määrittelemä paikallinen L-arvo ja petilämpötilan säätimeltä tuleva ulkoinen R-arvo samoiksi. Ne säädetään kaasutuksen ilmakertoimen asetuksella, joka vaikuttaa ulkoiseen R-arvoon. Näiden L- ja R-arvojen kohdatessa voidaan asettaa kaasutusilman virtauksen säädin A/R-tilaan ja petilämpötilan säädin A/L- tai A/R-tilaan, jolloin säätimet toimivat automaattilla. (ks. liitteet 12 – 15)

9.5 Vaikutusten arviointi

Uuden säätötavan käyttöönoton jälkeen, ensimmäisen 16 päivän aikana petilämpötilan säädintä oli käytetty lähes ainoastaan A-tilassa. Tästä voidaan päätellä, että säädin on selvinnyt automaattisesti tapahtuneista häiriöistä, ja että operaattorit ovat hyväksyneet sen toiminnan tason. Mittaushistoria kaasutusilmasta, kaasutustehosta ja petilämpötilan mittauksien erosta tukevat tätä johtopäätöstä. Kaasutusilman virtaus säätää tasaisesti kaasutustehon ympärillä, mikä kertoo todellisen kaasutustehon pysyvän keskiarvoltaan melko tasaisena. Noin kuuden vuorokauden osio samoista mittauksista ennen säätötavan vaihtamista näyttää, että silloin A-tilassa säätävän polttoaineen virtaus vaihtelee huomattavasti kaasutustehoon nähden. Näitä tarkkailu jaksoja verratessa nähdään, että petilämpötilan minimi ja maksimi mittauksien ero vaihtelee paljon enemmän

polttoaineella kuin kaasutusilmalla säätäessä. Polttoaineella säädettäessä kuuden päivän aikana mittauksien ero ylittää viisi kertaa 120 °C ja kaasutusilmalla säädettäessä kolmesti 16 päivän aikana. Nämä kolme kertaa johtuvat uuden säätimen käyttöönotosta ja kaasutuslaitoksen alas- tai ylösajossa. Tästä voidaan päätellä petimateriaalin toimivan paremmin uudella säätötavalla. (ks. liite 11)

Noin kahden viikon kokeilun jälkeen, toimeksiantaja hyväksyi kehitetyn säätimen. Tämän jälkeen tein ajo-ohjeet koskien muutoksia kaasuttimen käyttöönotossa ja ohjaamisessa (ks. liitteet 12 – 15). Ajo-ohjeiden tarkoituksena oli varmistaa ajotavan yhtenäistäminen ja tiedon jakaminen operaattoreille.

Vertaillakseni vanhaa ja uutta säätötapaa analysoin muutoksia neljän kuukauden tarkastelujaksolta. Taulukossa 1 näkyvät vertailtavat tulokset. Vertailun ajanjakso on noin kaksi kuukautta ennen säätötavan muutosta ja noin kaksi kuukautta sen jälkeen. Tuloksien tarkkuutta heikentää, että summat ovat mittaustrendeistä silmämääräisesti todettuja. Ne ovat kuitenkin hyvin vertailukelpoisia, koska vanhan ja uuden säätötavan mittaustietoja on käsitelty samalla tavalla. Toimivuuden arvioinnissa ei myöskään tarvittu tarkkoja määriä vaan tuloksia siitä, missä ja miten paljon säätötapa on muuttanut prosessia ja prosessinohjausta.

Taulukko 1 Vertailun tulokset kahdelta kuukaudelta ennen ja jälkeen säätötavan vaihtamisen (ks. liitteet 16 - 21)

Muuttujat	Ennen (2kk)	Jälkeen (2kk)	Muutos-%
Mäntypikiöljyn käyttökerrat	6 krt	6 krt	0 %
Petilämpötilan säädin A-tilassa kaasutuksen aikana	48 %	85 %	77 %
Petilämpötilan säätimen käyttökerrat M-tilassa kaasutuksen aikana	8 krt	4 krt	-50 %
Jäännöskarbonaattianalyysien ka.	4,46 %	4,52 %	1 %
NO _x -päästöjen vaihtelu:			
Yli 600 mg/m ³ (n)	17 krt	15 krt	-12 %
Yli 1000 mg/m ³ (n)	15 krt	8 krt	-47 %
Yli 1500 mg/m ³ (n)	13 krt	4 krt	-69 %
Viirakuivurin tuotannon säädin A-tilassa kuivauksen aikana	42 %	84 %	100 %
Viirakuivurin tuotannon säätimen käyttökerrat M-tilassa kuivauksen aikana	9 krt	3 krt	-67 %

Taulukko 1 osoittaa, ettei mäntypikiöljyn käyttöön johtaneet tilanteet ole vähentyneet. Tuloksesta voi päätellä, että petilämpötilan säätimen ongelmat johtavat harvoin mäntypikiöljyn käyttöön asti. Tässä muuttujassa luotettavuutta heikentää, ettei käyttökertojen syitä tarkastella ja tarkastelujakso on liian lyhyt. Todennäköisesti myös operaattorien jatkuva kehittyminen vähentää ääritilanteita.

Merkittävämmiin petilämpötilan säädin vaikuttaa kaasutustehon käytettävyyteen meesauunin lämmittämisessä, siksi tarkastelen meesauunin kuumentumista ja jäännöskarbonaattianalysejä. Meesauunin kuumentuessa NO_x-päästöt nousevat ja jäähtyessä jäännöskarbonaatin osuus poltetussa kalkissa kasvaa. Lisäksi näin käydessä operaattori voi joutua ottamaan petilämpötilan säätimen M-tilaan.

Taulukon 1 mukaan uudella säätötavalla kaasutustilassa petilämpötilan säätimen M-tilan käyttökerrat ovat vähentyneet 50 %:a ja A-tilaa on pidetty päällä 77 %:a enemmän. Tämä on luotettava indikaattori prosessiohjauksen kehittymisestä. Ennen säätötavan muutosta tehtiin kokeilujakso, jonka vuoksi A-tilaa käytettiin normaalia enemmän. Se heikentää M- ja A-tilan vertailun tarkkuutta.

Tahatonta meesauunin kuumentumista kuvaa NO_x-päästöjen nousu. Taulukon 1 vertailun mukaan uudella säätötavalla korkein 1500 mg/m³(n) raja ylittyi 69 %:a vähemmän, keskimäinen 1000 mg/m³(n) raja ylittyi 47 %:a vähemmän ja luparaja 600 mg/m³(n) ylittyi 12 %:a vähemmän. Luparajan lyhyt ylittyminen ei välttämättä kerro ongelmista, mutta keskimäisen ja korkeimman rajan ylittyminen kertoo keskimäisen ja korkeimman rajan ylittymisten vähentyminen osoittaa kaasutustehon hallinnan parantuneen merkittävästi. Toisaalta keskimäisen rajan ylittyminen kahdeksan kertaa osoittaa, ettei kaikkia ongelmia ole poistettu uudella säätötavalla. Tuloksesta ei kuitenkaan voi päätellä, mikä aiheuttaa nämä ongelmat.

Jäännöskarbonaattianalyysien keskiarvo kasvoi 1 %:lla tarkastelujaksojen välillä (ks. Taulukko 1). Tämä osoittaa luotettavasti, ettei säätötavan vaihtaminen vaikuttanut poltetun kalkin laatuun. Tulos ei kuitenkaan osoita tasaantuiko jäännöskarbonaatin vaihtelu.

Epäilin polttoaineella säätämisen aiheuttavan viirakuivurin tuotantonopeuden vaihtelua. Tuotantonopeuden vaihtelun mittaushistoriasta ei kuitenkaan löydy merkittäviä muutoksia (ks. liite 20). Sen sijaan, Taulukon 1 mukaan, viirakuivurin

tuotannon automaattisäädön käytettävyys kaksin kertaistui tarkkailujaksojen välillä ja M-tilaa vaativat tilanteet vähentyivät 67 %. Kaasuttimen uudella säätötavalla oli todennäköisesti positiivinen vaikutus näihin tuloksiin. Tämän johtopäätöksen tarkkuutta vähentää merkittävästi, että tarkkailujakson aikana viirakuivurin säätötapoja kehitettiin.

Nämä tulokset osoittavat, että kehitetty säätötapa paransi merkittävästi kaasutuslaitoksen prosessinohjausta, muttei parantanut jäännöskarbonaatin keskiarvoa poltetussa kalkissa.

10 Pohdinta ja lisätutkimuksen tarve

Tutkimuskysymyksiin onnistuttiin vastaamaan. Kysymykset olivat: mitkä häiriöt vaikuttavat kaasuuntumisprosessiin, mikä on tehokkain vaihtoehto niiden vaikutuksen poistamiseksi ja miten kyseinen vaihtoehto toteutetaan. Pehdyttyäni kaasutusprosessiin ja sen laitteistoon, löytyi merkittävimmät häiriöt, mikä mahdollisti selkeän johtopäätöksen prosessinohjauksen kehittämiseksi: petilämpötilan säädin ei toimi riittävän hyvin, ja kaasutusilman vaihtaminen petilämpötilaa säätäväksi arvoksi on tehokkain ratkaisu. Kehitysehdotukseni otettiin käyttöön pienin muutoksin. Mittaustuloksista voitiin päätellä, että uusi säätötapa toimii huomattavasti vanhaa paremmin, ja ettei säätimen toiminta vaikuttanut jäännöskarbonaatin keskiarvoon.

Häiriöiden tutkimuksen tarkkuuteen vaikutti, että prosessissa oli niin monta muuttajaa, ettei kokonaisvaikutusta voitu laskea tarkasti. Lisäkoeajoilla ja -mittauksilla olisi pystytty tarkentamaan arvioita häiriöistä, mutta tämä tutkimustulos oli riittävä osoittamaan uuden säätötavan hyödyt. Jos kehitysehdotus olisi vaatinut kalliimpia investointeja tai luonut turvallisuusriskejä, tuloksia olisi täytynyt tarkentaa ennen käyttöönottoa.

Mielestäni tämä kehittämistutkimus toi arvokasta hyötyä toimeksiantajalle. Onnistuneen kuorikaasuttimen prosessinohjauksen kehittämisen lisäksi tutkimusprosessi tuotti lisätietoa laitteiston käyttäjille ja loi pohjaa kuorikaasuttimen kehittämiselle.

Jäännöskarbonaatin laadun parantaminen vaatii lisätutkimusta. Mielestäni lisätutkimukset kannattaa keskittää polttoaineen laadun parantamiseen ja vaihtelun tasoittamiseen sekä kaasutuksen optimaalisen ilma-polttoainesuhteen löytämiseen. Puulajien suhteen tasoittaminen ja palakoon pienentäminen voivat tehostaa kaasuuntumista ja tasoittaa kaasutustehon vaihtelua. Optimaalisessa ilma-polttoainesuhteessa kaasuttimen hyötysuhde on parhaimmillaan ja liekin adiabaattinen palamislämpötila meesauunissa korkeimmillaan. Lisätutkimuksen ilma-polttoainesuhteesta voi tehdä esimerkiksi ajamalla kolme kahden viikon koeajoa kolmella eri petilämpötilan asetusarvolla. Asetusarvot, kuten 800 °C, 820 °C ja 840 °C, muuttavat ilma-polttoainesuhdetta. Vertailemalla eri asetusten aikana saatuja jäännöskarbonaattianalyysien keskiarvoja nähdään suunta, millä suhteella kaasutusteho on optimaalinen.

Lähteet

- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Energia. Espoo: Otamedia.
- Basu. P. 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Burlington: Academic Press. Viitattu. 18.9.2018. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.
- Basu. P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. London: Academic Press. Viitattu. 18.9.2018. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.
- Boerrigter, H & Rauch, R. 2006. Review of applications of gases from biomass gasification. Vienna: University of Technology, Institute of Chemical Engineering. Viitattu 10.9.2018. <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/rx06066.pdf>.
- Energia, ympäristö, talous ja turvallisuus. 2019. Opetusmateriaali. AEL Oy. KnowPulp-oppimisympäristö v.17.0. Viitattu 8.1.2019. <https://janet.finna.fi/>
- Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Säästöpiirin virityksen perusteet. Espoo: Otamedia.
- Isaksson, J. 2016. Gasification. Koulutusmateriaali. Valmet Technologies Oy. Viitattu 26.9.2018.
- Kippo, A. & Tikka, A. 2008. Automaatiotekniikan perusteet. Helsinki: Edita Prima.
- Knoef. H. 2005, Handbook on Biomass Gasification. Enschede: BTG biomass technology group B.V. Viitattu 10.9.2018. <http://www.btgworld.com/en/references/publications/paper-handbook-biomass-gasification.pdf>
- Metsä Fibre lyhyesti. N.d. Metsä Fibren esittely yhtiön verkkosivuilla. Viitattu 10.1.2019. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Pages/default.aspx>
- Nummelin, J., Hankalin, V. & Raiko, M. 2014. Yijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen: Polttoaineen kuivaustekniikat. Helsinki: Motiva. Viitattu 10.1.2019. https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijäämälämmön_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivaustekniikat.pdf
- Seppälä, M., Klemetti, U., Kortelainen, V.-A., Lyttikäinen, J., Siitonen, H. & Sironen, R. 2001, Paperimassan valmistus. Helsinki: Opetushallitus.
- Sulfaattisellun valmistus. 2018. Opetusmateriaali. AEL Oy. KnowPulp-oppimisympäristö v.16.0. Viitattu 15.10.2018. <https://janet.finna.fi/>
- Tuotannon hallinta ja automaatio. 2018. Opetusmateriaali. AEL Oy. KnowPulp-oppimisympäristö v.16.0. Viitattu 15.10.2018. <https://janet.finna.fi/>
- Tutkimus ja kehittäminen. 2017. Opetusmateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Optima-oppimisympäristö. Viitattu 10.1.2018.
- Äänekosken biotuotetehtä. N.d. Biotuotetehtaan esittely Metsä Fibren verkkosivuilla. Viitattu 10.1.2019. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Biotuotetehtas/Pages/default.aspx>

Liitteet