



# Kuorikaasuttimen automaattikäynnistyksen suunnittelu

Iiro Puustinen

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2022

Tekniikan ala

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

## Puustinen Iiro

### Kuorikaasuttimen automaattikäynnistyksen suunnittelu

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2022, 47 sivua.

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

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

### Tiivistelmä

Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaalla sijaitsee kuorenkaasutuslaitos, jolla voidaan tuottaa fossiilitonta tuotekaasua biomassasta meesauunin polttimelle. Meesauunin tuotannon pysähtyessä huolto- tai vikatilanteissa, myös kuorikaasuttimen toiminta pysähtyy. Kuorikaasuttimen ohjaus käynnistys- ja pysäytys-tilanteissa on tapahtunut manuaalisesti, mikä on vienyt operaattorin keskittymistä muista ohjaustilanteista meesauunin ja kaustisoinnin osastoilla.

Opinnäytetyön tavoite oli hyödyntää tehtaan automaatiojärjestelmää ja suunnitella kuorikaasuttimelle käytettävyyttä parantavat automaattiset käynnistys- ja pysäytyssekvenssit. Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena ja tutkimuksessa teoriaosuus on muodostettu aihetta käsittelevän kirjallisuuden pohjalta. Työn toteutuksessa on hyödynnetty tehtaan automaatiojärjestelmän ohjaus- ja lukituspiirejä sekä laitevalmistajan dokumentteja. Kuorikaasuttimen käynnistys- ja pysäytyssekvenssien suunnittelussa on tutkittu kaasuttimen onnistuneita manuaalisia käynnistys- ja pysäytystilanteita, joiden avulla on löydetty oikeat asetusarvot sekvenssien ohjauksille.

Käynnistys- ja pysäytyssekvenssien toimintakuvauksen suunnittelun jälkeen sekvenssit rakennettiin automaatiojärjestelmään yhteistyössä tehtaan projekti-insinöörin kanssa. Käynnistys- ja pysäytyssekvenssien testauksessa hyödynnettiin simulaattoria, jolla varmistettiin automaation toiminta. Simulaattoritestauksen jälkeen sekvenssien toimintaa kokeiltiin oikeassa prosessitilanteessa, jonka tuloksien perusteella ohjauksien asetusarvoja säädettiin parantamaan sekvenssien suorituskykyä. Päivitettyjen käynnistys- ja pysäytyssekvenssien ohjaukset testattiin uudestaan oikeassa prosessitilanteessa ja sekvenssit toimivat onnistuneesti.

Lopputuloksena saatiin toimeksiantajan hyväksymä helppokäyttöinen käynnistys- ja pysäytysmenetelmä, joka mahdollistaa kuorikaasuttimen identtisen ohjauksen ylös- ja alasajotilanteissa. Käynnistys- ja pysäytyssekvenssit muodostivat hyvän pohjan kaasuttimen prosessinohjaukselle, jota on mahdollista kehittää esimerkiksi lisäämällä sekvensseihin meesauunin ohjauksia, joita ei opinnäytetyössä huomioitu.

### Avainsanat (asiasanat)

Kaasutus, prosessiautomaatio, sekvenssiohjaus

### Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 1, 2, 3 ja 4 ovat salassa pidettäviä ja ne ovat poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 24§, kohdat 17, 20 ja 21. Salassapitoaika on viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 3.11.2026.

### **Puustinen liro**

#### **Design of an automatic start of a bark gasifier**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2022, 47 pages.

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

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

#### **Abstract**

Metsä Fibre's Äänekoski bioproduct factory has a biofuel gasifier that can produce fossil-free product gas from biomass to a lime kiln burner. When the production of the lime kiln stops because of maintenance or faults, the operation of the gasifier also stops. The control of the bark gasifier in start and stop situations has been operated manually, which has taken the operator's concentration from other control situations in the lime kiln and cauterization departments.

The aim of the thesis was to utilize the factory automation system and to design automatic start and stop sequences that improve the usability of the bark gasifier. The work was executed as a development study, and the theoretical part of the study has been formed based on the literature on the topic. In the implementation of the work, the control and locking circuits of the factory automation system and the equipment manufacturer's documents have been utilized. In the design of the bark gasifier sequences, the successful manual start and stop situations of the gasifier have been studied to find the correct setpoints for sequence control.

After designing the functional description of the start and stop sequences, the sequences were built into the automation system in collaboration with the factory's project engineer. A simulator was used to test the sequences to verify the operation of the automation. After simulator testing, the operation of the sequences was tested in a real process situation, based on the results of which the control setpoints were adjusted to improve the performance of the sequences. The controls for the updated sequences were re-tested in the real process situation and the sequences worked successfully.

The result is an easy-to-use start and stop method approved by the client, which enables identical control of the biomass gasifier in start and stop situations. The sequences formed a good basis for the process control of the gasifier, which can be developed, for example, by adding lime kiln controls to the sequences, which were not considered in the thesis.

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

Gasification, process automation, sequence control

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

Appendixes 1, 2, 3 and 4 are confidential and have been removed from the public thesis. The grounds for secrecy are sections 17, 20 and 21 of the Publicity Act 24§. The period of secrecy is five (5) years, ending on 3.11.2026.

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
1.1	Työn tavoitteet ja toteutus .....	3
1.2	Toimeksiantaja .....	4
<b>2</b>	<b>Kemikaalikierto sulfaattiselutehtaalla .....</b>	<b>5</b>
2.1	Haihduuttamo .....	6
2.2	Soodakattila.....	6
2.3	Kaustisointi.....	6
2.4	Meesan poltto .....	8
<b>3</b>	<b>Kuoren kaasutus .....</b>	<b>9</b>
3.1	Kaasutusreaktio.....	10
3.2	Kuoren kuivaus.....	11
<b>4</b>	<b>Meesauuni .....</b>	<b>12</b>
4.1	Poltin .....	12
4.2	Palamisilma .....	13
<b>5</b>	<b>Kiertoleijukaasutin.....</b>	<b>13</b>
5.1	Polttoaineen syöttö.....	14
5.2	Kaasutusilma .....	15
5.3	Inertointi.....	16
<b>6</b>	<b>Prosessiautomaatio .....</b>	<b>16</b>
6.1	Säätöpiiri .....	17
6.2	PID-säädin.....	17
6.3	Sekvenssiohjaus .....	20
6.4	Valmet DNA.....	20
6.5	Turva-automaatiojärjestelmä .....	21
<b>7</b>	<b>Kuorikaasuttimen käynnistys ja pysäytys .....</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Työn toteutus .....</b>	<b>22</b>
8.1	Käynnistysehdot ja lukitukset .....	23
8.2	Ilmamäärä .....	24
8.3	Polttoaineen syöttö.....	24
8.4	Pysäytyssekvenssi.....	25
8.5	Sekvenssien ohjaus .....	26

<b>9 Tulokset</b> .....	<b>26</b>
<b>10 Pohdinta</b> .....	<b>28</b>
<b>Lähteet</b> .....	<b>30</b>
<b>Liitteet</b> .....	<b>32</b>
Liite 1. Käynnistyssekvenssi (salassa pidettävä).....	32
Liite 2. Pysäytyssekvenssi (salassa pidettävä) .....	42
Liite 3. Sekvenssien ohjausnäyttö (salassa pidettävä) .....	46
Liite 4. Kaasutin päälukitukset (salassa pidettävä) .....	47

## **Kuviot**

Kuvio 1. Sulfaattiselutehtaan rakenne (Kemikaalikierto 2021) .....	5
Kuvio 2. Kaustisointireaktio (Kemikaalikierto 2021) .....	7
Kuvio 3. Meesan polton prosessi (Kemikaalikierto 2021).....	9
Kuvio 4. Kaasutuksessa tapahtuvat reaktiot (Basu 2018, 214, muokattu) .....	10
Kuvio 5: Kiertoleijupetikaasuttimen rakenne (Basu 2013, 262) .....	14
Kuvio 7: PID-säätimen toimintaperiaate (Harju & Marttinen 2000, 44) .....	19

# 1 Johdanto

Automaation ja säätöpiirien hyödyntäminen prosessiteollisuudessa kehittyy koko ajan. Nykyaikaisella tehtaalla lähes jokaisen laitteen tai prosessin ohjaus tapahtuu tietokoneella automaatiojärjestelmän avulla. Hyvin suunniteltu ja toteutettu ohjausjärjestelmä parantaa käytettävyyttä, työturvallisuutta ja tuotantotehokkuutta. Lisäksi oikein toteutetulla automaatiolla pystytään vähentämään tarpeetonta työkuormaa, ehkäisemään ihmisen tekemät inhimilliset virheet sekä tekemään ohjauksista identtisiä. Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus hyödyntää automaation tuomia etuja prosessinohjaukseen liittyen.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Metsä Fibre Oy:n Äänekosken biotuotetehdas, joka käynnistyi vuonna 2017. Tehtaalla sijaitsee biomassan kaasutuslaitos, jonka tehtävä on valmistaa tuotekaasua polttoaineeksi meesauunille. Kaasutuslaitoksen kuorikaasutin on Valmet Oyj:n toimittama kiertoleijupetikaasutin ja sen ohjaus tapahtuu Valmetin omalla ohjausjärjestelmällä, Valmet DNA:lla. Tässä opinnäytetyössä parannettiin kuorikaasuttimen käytettävyyttä automaation avulla ja suunniteltiin toimintakuvaus käynnistys- ja pysäytyssekvensseille.

Työssä lähdettiin suunnittelemaan turvallista ja helppokäyttöistä automaattista käynnistys- ja pysäytysmenetelmää, jonka tarkoituksena oli vähentää operaattorin työkuormaa mahdollisissa ongelmatilanteissa. Kuorikaasuttimen käynnistystä on aikaisemmin ohjattu automaatiojärjestelmän kautta manuaalisesti, joka vei operaattoreiden aikaa ja keskittymistä muista työtehtävistä. Sekvenssiohjauksen suunnittelussa on hyödynnetty laitevalmistajan dokumentteja, tarkasteltu kuorikaasuttimen osaprosesseja ja säätöpiirejä sekä vertailtu aikaisempien käynnistys- ja pysäytystilanteiden ohjausmalleja.

## 1.1 Työn tavoitteet ja toteutus

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus parantaa biotuotetehtaan kuorenkaasutuslaitoksen käytettävyyttä. Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena, jossa työ koostui kehittämiskohteen tarkastelulla, kehittämissuunnitelman laatimisella sekä valmiin parannusehdotuksen toteutuksella ja arvioinnilla.

Opinnäytetyössä hyödynnettiin pääasiallisesti kvalitatiivista eli laadullista tutkimusmenetelmää. Tutkimusmenetelmän yleiset piirteet, kuten havainnointi ja kirjallisten aineistojen hyödyntäminen (Kananen 2008, 69–81) toimivat pääasiallisina menetelminä kuoren kaasutuslaitoksen prosessin-ohjauksen parannuksessa. Simulaattorilla sekä oikeassa prosessitilanteessa suoritettujen testauksien mittaustietojen analysoinnissa hyödynnettiin kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusta.

Alkutilanteessa kehityskohteelle tehtiin käytettävyyttä lisäävä parannusehdotus, jonka toteutusta lähdettiin suunnittelemaan havainnoimalla prosessin ohjausta ylös- ja alasajotilanteissa. Lisäksi suunnitteluvaiheessa hyödynnettiin tehtaan automaatiojärjestelmää sekä laitevalmistajan dokumentteja. Tutkimuksen toteutusvaiheessa verrattiin useita kuorikaasuttimen onnistuneita käynnistystilanteita, joiden avulla selvitettiin oikeat suuret sekvenssien toimivuuden takaamiseksi. Toteutusvaiheessa hyödynnettiin myös simulaattoria, jolla varmistettiin valmiin parannusehdotuksen toiminta.

Tutkimusongelma tässä opinnäytetyössä oli prosessin manuaalisen ohjauksen vähentäminen, josta muodostui opinnäytetyön tärkein tutkimuskysymys, kuinka tehdä kuorikaasuttimelle turvalliset ja helppokäyttöiset automaattiset käynnistys- ja pysäytyssekvenssit?

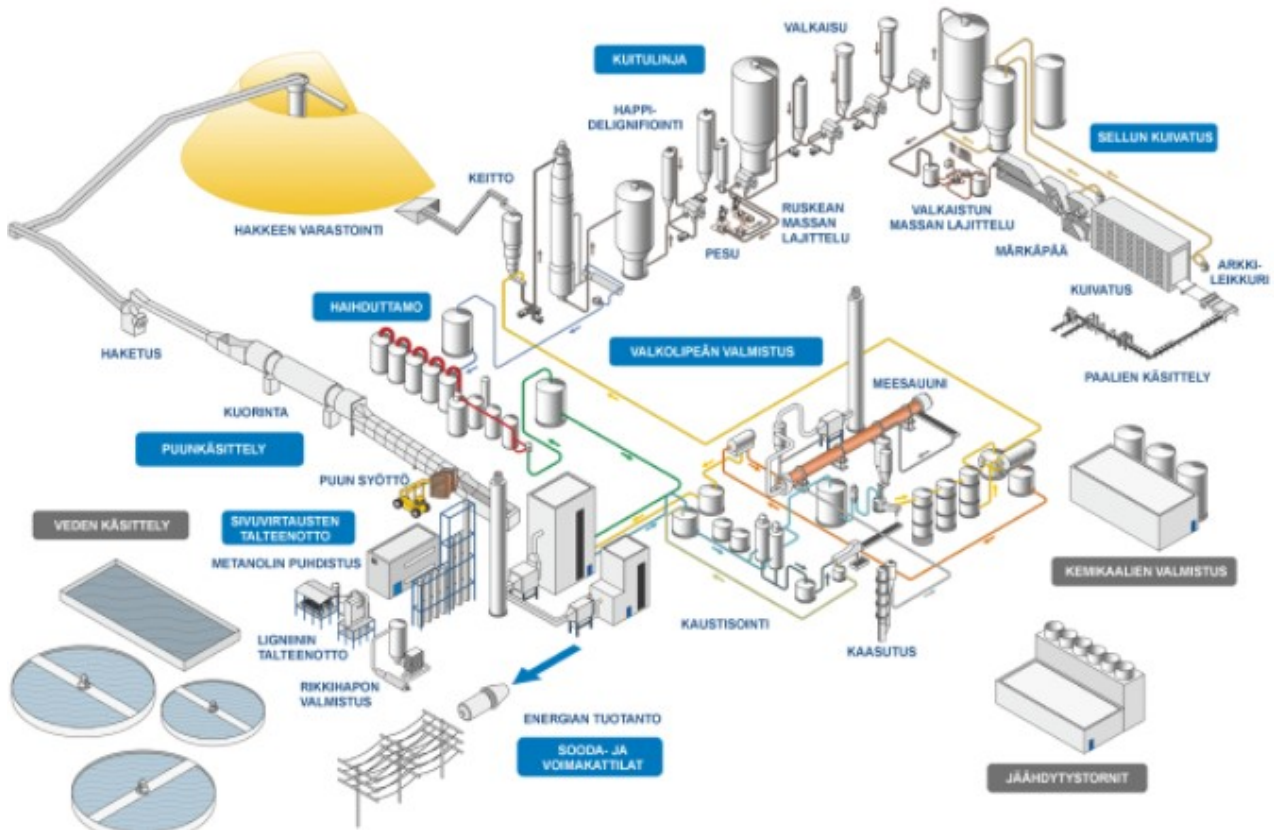
## **1.2 Toimeksiantaja**

Metsä Fibre on sellun sekä biotuotteiden valmistaja, joka kuuluu suomalaiseen Metsä Group -konserniin. Yrityksellä on Suomessa neljä biotuotteita valmistavaa tehdasta, viisi sahatavaratuotteita valmistavaa tehdasta sekä yksi sahatavaratehdas Venäjällä. Metsä Fibren omistus kuuluu Metsäliitto Osuuskunnalle, Metsä Boardille ja ITOCHU Corporationille. (Yhtiö N.d.)

Yrityksen Äänekosken tehdas käynnistyi vuonna 2017 elokuussa. Tehtaalla valmistetaan havu- ja koivusellun lisäksi sivutuotteina mäntyöljyä, tärpähtiä, rikkihappoa, bioenergiaa ja tuotekaasua. Biotuotetehdas on energiatarpeiltaan omavarainen, eikä se käytä lainkaan fossiilisia polttoaineita. Tehdas työllistää 150 henkilöä ja sen vuosittainen selluntuotanto on 1,3 miljoona tonnia. (Biotuotetehdas N.d.)

## 2 Kemikaalikierto sulfaattisellutehtaalla

Äänekosken biotuotetehtas on sulfaattisellutehtas (ks. kuvio 1). Biotuotetehtaan rakenne muodostuu keittolinjasta, talteenotosta, kuorimosta sekä kuivaamosta. Keittolinjaan kuuluu keittämö sekä valkaisu ja talteenottoon haihduttamo, soodakattila, kaustistamo, meesauuni sekä kuorenkaasutuslaitos.



Kuvio 1. Sulfaattisellutehtaan rakenne (Kemikaalikierto 2021)

Sulfaattimenetelmässä sellutehtaan ominaisuuksiin kuuluu kemikaalien talteenotto. Sulfaattisellua valmistetaan keittokemikaalien avulla, joita imeytetään keittoon syötettävään hakkeeseen. Keittokemikaaleina käytetään natriumhydroksidia ( $\text{NaOH}$ ) ja natriumsulfidia ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). Keittovaiheen jälkeen sellusta erotellaan massanpesun aikana laihamustalipeä, joka koostuu keittokemikaaleista sekä sellunvalmistukseen käytettävän puun orgaanisista aineista, kuten ligniinistä. Talteenoton tärkeimmät tehtävät ovat regeneroida keittokemikaalit, jotta ne voidaan käyttää uudelleen keittämöllä sekä tuottaa energiaa tehtaan soodakattilalla, joka mahdollistaa sellutehtaan energiaomavaraisuuden. (Kemikaalikierto 2021.)

## 2.1 Haihduttamo

Haihduttamon tehtävä on haihduttaa vettä laihamustalipeästä, jonka kuiva-ainepitoisuus on keittämöltä tullessa 15–16 %. Veden haihdutus tapahtuu haihdutinyksiköissä, joissa kasvatetaan lipeän kuiva-ainepitoisuutta yli 58 %, jolloin se on turvallista polttaa soodakattilassa. Tavallisesti vahvamustalipeän kuiva-ainepitoisuus on 75–85 %. Vedenhaihdutuksen lisäksi haihduttamon tehtävä on kerätä talteen suopaa, tärpättiä sekä metanolia, joka voidaan puhdistuksen jälkeen polttaa soodakattilalla. (Kemikaalikierto 2021.)

## 2.2 Soodakattila

Soodakattila on lipeälinjan mukaisesti toinen osasto talteenotossa, jonka tehtävä on polttaa haihduttamolta saapuva polttolipeä ja ottaa talteen palamisen yhteydessä vapautuvat kemikaalit jatkokäyttöä varten. Polttolipeän orgaanisia aineita polttamalla mahdollistetaan höyryntuotanto, jota käytetään tehtaan muilla osastoilla. Soodakattilan poltossa tärkeää on muodostaa polttolipeän sisältämästä rikistä natriumsulfidia ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) pelkistymisreaktion avulla. Pelkistymisreaktiota kuvataan reduktioasteella. (Kemikaalikierto 2021.)

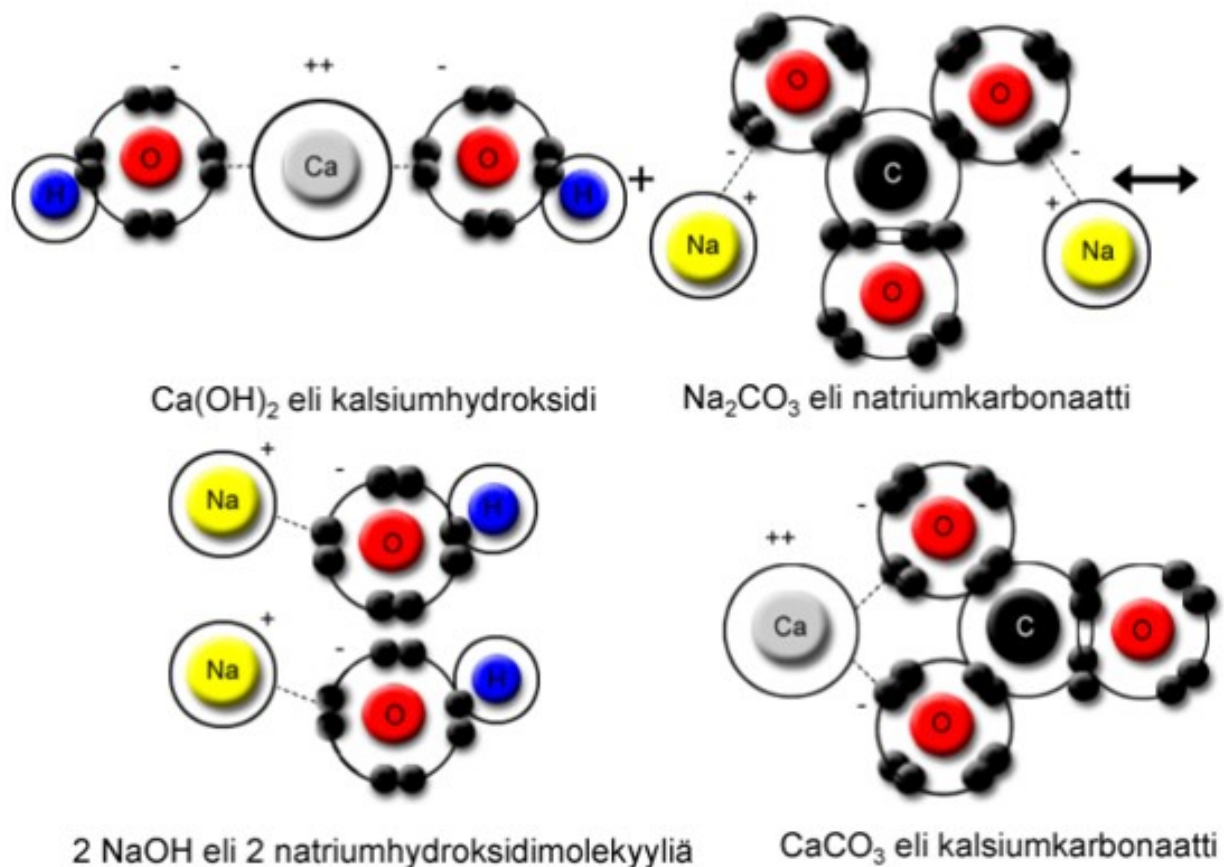
Polttolipeä syötetään soodakattilaan lipeäruiskujen sekä lusikkasuuttimien avulla, joilla mahdollistetaan lipeän haluttu pisarakoko, joka on yleisesti 0,5–5 mm. Lipeä ruiskutetaan kattilan alaosaan tulipesään, jonne muodostuu lipeäkeko. Lipeän palamisreaktio alkaa jo ruiskutuksen jälkeen pudotessa tulipesään. Palamisreaktio alkaa kuivumisesta, jossa lipeään jäljelle jäänyt vesi haihtuu. Toisessa palamisvaiheessa lipeä saavuttaa pyrolyysin, jossa haihtuvat yhdisteet alkavat palamaan ja muodostavat lämpöenergiasta johtuvan liekin. Pyrolyysin jälkeen tapahtuu koksen palaminen, jossa lipeään jäänyt hiili alkaa palamaan. Hiilen palamisella saavutetaan haluttu rikin pelkistymisreaktio, jossa natriumsulfaatista ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) muodostuu natriumsulfidia ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). Koksen palamisesta jäljelle jää sulapisara, joka otetaan talteen sulakouruja pitkin ja johdetaan liuotinsäiliöön, jossa se sekoitetaan heikkovalkolipeään. Tätä seosta kutsutaan viherlipeäksi. (Kemikaalikierto 2021.)

## 2.3 Kaustisointi

Kaustisointi on lipeälinjan viimeinen vaihe ja osaston tehtävä on valkolipeän valmistus, joka toimii keittokemikaalina sellun valmistuksessa. Valkolipeän valmistus tapahtuu yhdistämällä soodakattilan liuotinsäiliöstä tuleva viherlipeä sekä meesauunissa tuotettu kalsiumoksidi ( $\text{CaO}$ ). Viherlipeä

sisältää useita kemikaaleja, joista tärkeimmät valkolipeän valmistuksen kannalta ovat natriumyhdisteet  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ja  $\text{Na}_2\text{S}$ . Viherlipeä sisältää myös liukenemattomia aineita, jotka poistetaan selkeyttimillä ennen sen sekoittamista meesauunin kalkin ( $\text{CaO}$ ) kanssa. (Kemikaalikierto 2021.)

Kaustisointiprosessi alkaa sammuttajasta, jossa tapahtuu sammutusreaktio. Tämä tarkoittaa, että meesauunissa tuotettu kalsiumoksidi ( $\text{CaO}$ ) reagoi viherlipeän veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Kun kalsiumhydroksidi ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ja viherlipeän natriumkarbonaatti ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) reagoivat, muodostuu reaktiosta natriumhydroksidia ( $\text{NaOH}$ ) sekä meesaa eli kalsiumkarbonaattia ( $\text{CaCO}_3$ ) (ks. kuvio 2). (Kemikaalikierto 2021.)



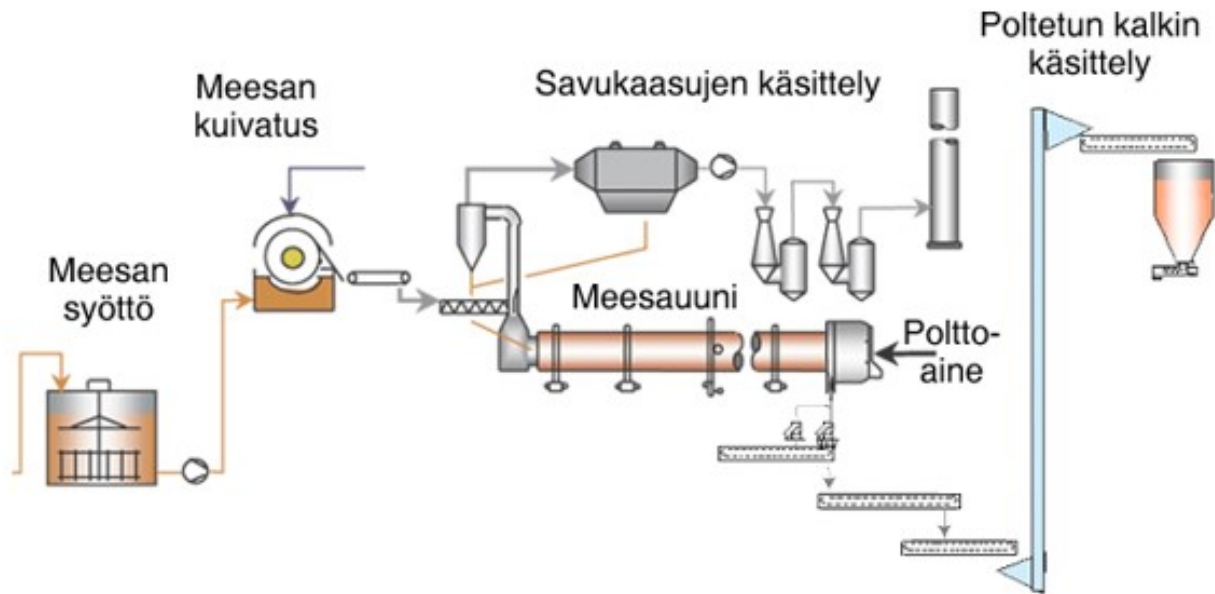
Kuvio 2. Kaustisointireaktio (Kemikaalikierto 2021)

Sammutusreaktiossa muodostuu myös lämpöenergiaa, jolla mahdollistetaan tarvittava kaustisointilämpötila 95–100 °C. Kaustisoinnin prosessia mitataan kaustisointiasteella, joka lasketaan kokonaisalkalipitoisuuden avulla. Viherlipeän kokonaisalkalipitoisuustaso on yleensä 165–175 g NaOH/l, jolloin voidaan saavuttaa 85–87 % kaustisointiaste. Prosessissa täytyy kuitenkin huomioida kalkin annostelun epätarkkuus, joten kaustisointiastetta käytetään 1–3 % maksimiarvon alapuolella, jolloin prosessissa ei muodostu ylikalkitsemista. (Kemikaalikierto 2021.)

Kaustisointiprosessissa saavutetaan tarvittavat keittokemikaalit, mutta ennen keittämölle pumpaamista valkolipeä suodatetaan. Suodatuksessa erotellaan kaustisointiprosessissa muodostuneet valkolipeä sekä meesa. Suodatuksesta talteen otettu meesa regeneroidaan meesauunin avulla uudelleen käytettäväksi kaustisointiprosessissa valkolipeän valmistukseen. (Kemikaalikierto 2021.)

## **2.4 Meesan poltto**

Meesanpoltto on toinen valkolipeän valmistuksen osastoista (ks. kuvio 3). Meesanpolton tehtävänä on regeneroida kaustisoinnissa muodostuneesta kalsiumkarbonaatista eli meesasta kalsiumoksidia, joka tapahtuu meesauunissa. Ennen meesauunia valkolipeän suodatuksesta tullut meesa pestään ja kuivataan natriumhäviöiden välttämiseksi. Meesan pesu ja kuivaus tapahtuu meesa-suotimella, jossa erotellaan kuivattu meesa sekä suodos, joka ohjataan heikkovalkolipeäsäiliöön, josta se käytetään soodakattilalla muodostuneen sulan liuotukseen. Meesan kuivauksella saavutetaan tarvittava kuiva-ainepitoisuus 75–80 %, jolloin se voidaan ohjata meesauunille polttoon. (Kemikaalikierto 2021.)



Kuvio 3. Meesaan polton prosessi (Kemikaalikierto 2021)

Kalsiumkarbonaatin muuttaminen kalsiumoksidiksi onnistuu korkeassa lämpötilassa. Meesauunin lämpötilan täytyy olla vähintään  $850^{\circ}\text{C}$ , jolloin kalsiumkarbonaatti alkaa hajoamaan. Reaktiossa muodostuu kalsiumoksidin lisäksi hiilidioksidia, jonka avulla määritetään jäännöskarbonaatti. Jäännöskarbonaatin avulla ohjataan uunin lämpötilaa, joka vaikuttaa reaktion nopeuteen. Meesauunin polton jälkeen tuotettu kalsiumoksidi siirtyy kalkinjäähdyttimeen. Jäähdytyksen jälkeen kalkki on uudelleen käytettävissä valkoliipeän valmistuksessa. (Kemikaalikierto 2021.)

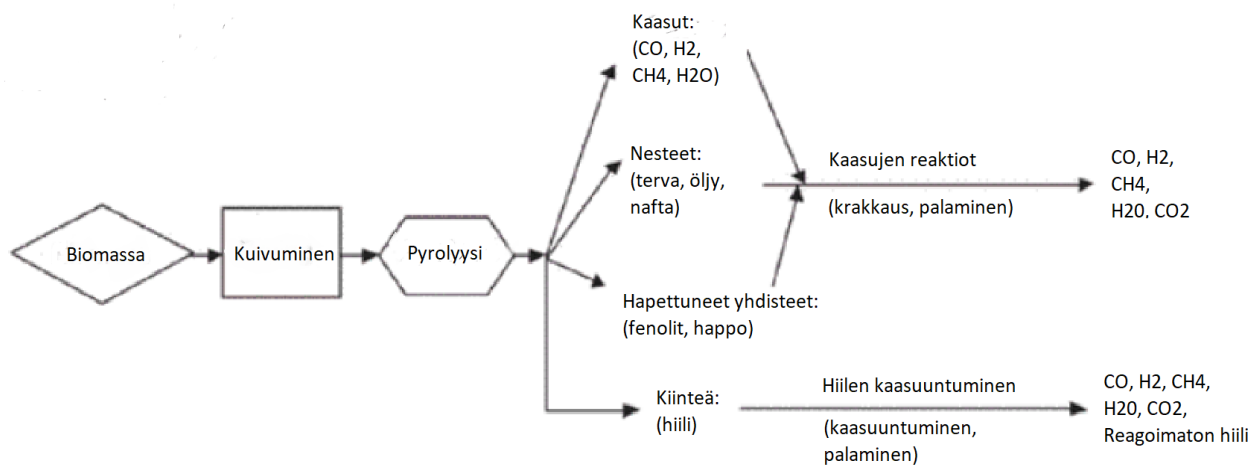
### 3 Kuoren kaasutus

Äänekosken biotuotetehtaan meesauunin yhteydessä toimii kuorenkaasutuslaitos, joka mahdollistaa meesauunin polton uusiutuvilla polttoaineilla. Kuorikaasuttimen tuotekaasua käytetään korvaamaan mäntypikiöljy meesauunin poltossa. Vaikka mäntypikiöljy onkin fossiiliton polttoaine ja sen käyttö on varmempaa, sen jatkuva polttaminen tulee kalliimmaksi kuin biomassasta eli kuoresta valmistetun tuotekaasun polttaminen. Kaasutuksessa käytettävä kuori tulee sellun valmistuksessa käytettävistä havupuista sekä koivusta.

### 3.1 Kaasutusreaktio

Biomassan kaasutuksessa muunnetaan käytettävän polttoaineen olomuotoa kiinteästä kaasuksi. Normaalissa biopolttoaineen palamisessa energia vapautuu palamisen yhteydessä, kun taas kaasutuksessa energia sitoutuu kemialliseksi energiaksi, joka omaa korkean energiatihedyyden. Kaasutuksesta saatua polttoainetta kutsutaan tuotekaasuksi. (Basu 2018, 211.)

Biomassan kaasutusprosessissa tapahtuu erilaisia termokemiallisia reaktioita (ks. kuvio 4). Ensimmäisenä biomassan sisältämä kosteus höyrystyy ja biomassan kuivuminen alkaa. Lämpötilan noustessa, kuivuneesta polttoaineesta alkaa höyrystymään haihtuvia aineita kuten vetyä ( $H_2$ ), hiilidioksidia ( $CO_2$ ), hiilimonoksidia ( $CO$ ), metaania ( $CH_4$ ) ja tervaa. Tätä reaktiovaihetta kutsutaan pyrolyysiksi eli hiilipitoinen polttoaine hajoaa kaasuksi sekä jäännöshiileksi. Lämpötilan kasvaessa jäljelle jäänyt jäännöshiili alkaa kaasuuntumaan, kun se reagoi pyrolyysissa haihtuneiden kaasujen kanssa tuottaen palamiskelpoista tuotekaasua. (E4tech 2009, 2.) Kaasutusreaktioiden vaatimat lämpötilat saadaan aikaiseksi kaasuttimessa tapahtuvan osittaisen palamisen avulla, jota säädel-



Kuvio 4. Kaasutuksessa tapahtuvat reaktiot (Basu 2018, 214, muokattu)

### 3.2 Kuoren kuivaus

Biomassan kaasutuksessa on tärkeää, että polttoaineen kuiva-ainepitoisuus on tarpeeksi suuri parhaimman kaasutustuloksen saavuttamiseksi. Tyypillisesti tuoreen puun kuiva-ainepitoisuus vaihtelee välillä 40–70 % ja ilman oikeanlaista kuivatusmenetelmää, kaasutuksessa täytyy käyttää huomattavasti enemmän energiaa, kuin noin 90 % kuiva-ainepitoisuuden omaavalle puulle. (Basu, 2013, 201.) Tutkimukset puoltavat korkean kuiva-ainepitoisuuden puolesta, sillä myös Nummelin, Hankalin ja Raimo (2014, 14) toteavat, että biomassan kaasutuksessa puun kuiva-aineen on oltava 60–90 %. Nummelin ja muut (2014, 21) mainitsevat myös, että käytettäessä biomassan kuivauksessa viirakuivuria, päästään jopa 95 % kuiva-ainepitoisuuksiin.

Biomassan kuivauksen hyötyjä ovat energiatehokkuuden lisäksi savukaasujen massavirran pieneminen, lämpöarvon nousu ja palamisilman vähäisempi tarve. Kuivauksella voi olla myös negatiivisia vaikutuksia poltossa, sillä kuiva polttoaine voi nostaa palamislämpötilaa, joka voi nostaa poltossa syntyvien NO<sub>x</sub>-päästöjen määrää. (Nummelin ym. 2014, 13.)

Yleisesti kuorikaasuttimen polttoaineen kuivausmenetelmänä käytetään viirakuivuria, jossa biomassaa kuivataan matalassa lämpötilassa. Viirakuivurin toiminta alkaa kuoren levittelystä, jossa märkä biomassa ajetaan syöttölaitteella tasaisesti, noin 0,1–0,2 m paksuiseksi patjaksi viiran päälle. Kuivurissa viiran päälle levitetty biomassa alkaa kuivumaan viirakuivurin lämmönvaihtimien avulla. Lämmönvaihtimilla lämmitetään ulkoilmaa 80–120 °C lämpötilaan, joka johdetaan yläpuolelta viiran ja polttoainepatjan läpi alapuolelle oleviin poistoilmakanaviin. Viirakuivurit toimivat hitaasti niiden vauhdin ollessa noin 1 m/min. (Nummelin ym. 2014, 23.)

Biomassa liikkuu hitaasti kuivurin polymeeriviiran päällä, jota pidetään puhtaana viirapesureiden tai viiraharjojen avulla. Viirakuivuri on ominaisuuksiltaan hyvä vaihtoehto biomassan kuivaukselle sen yksinkertaisen rakenteen, korkean käytettävyyden sekä helpon säädettävyyden vuoksi. (Nummelin ym. 2014, 23–24.)

Biomassan kuivauksen jälkeen polttoaine on valmis käytettäväksi kuorikaasuttimella, jonne se ohjataan polttoainesilojen kautta. Polttoaineena käytettävän biomassan kuivuminen jatkuu, kunnes

sen lämpötila nousee 200 °C. (Basu 2013, 203). Basu (2013, 202) selventää että kuivumista tapahtuu vielä kaasuttimessa ennen kuin biomassa alkaa kaasuuntumaan tuotekaasuksi, joka on valmis käytettäväksi meesauunilla.

## 4 Meesauuni

Meesauuni on rakenteeltaan sylinterin muotoinen, tiilillä vuorattu teräsputki, jonka koko vaihtelee tehtaan tuotantokapasiteetin mukaan. Meesauunin poltin ja meesan syöttö sijaitsevat vastakkaisilla puolilla, eli meesa ja palamiskaasut liikkuvat uunissa toisiaan kohti. Liikkuessaan uunissa palamiskaasut lämmittävät meesaa muodostaen kalsiumkarbonaattista kalsiumoksidia. Meesan eteneminen uunissa on mahdollistettu rakentamalla uuni noin 2,5 % kaltevuuteen ja meesan etenemisnopeutta voidaan nostaa uunin pyörimisnopeutta säätämällä. Pyörimisnopeus asetetaan uunin tuotantotarpeen mukaan. (Kemikaalikierto 2021).

### 4.1 Poltin

Kalkin valmistus meesauunissa vaatii suuren lämpötilan, jolloin meesa eli kalsiumkarbonaatti alkaa reagoimaan lämmön kanssa. Meesauunin korkea lämpötila saadaan aikaan polttimella ja lämpötila polttopäässä voi nousta noin 1100 asteeseen. Meesauunin poltin sijaitsee uunin päädyssä, kalkin jäähdyttimen yläpuolella, minne uunista tuleva meesa siirtyy polton jälkeen. (Kemikaalikierto 2021.) Yleisesti meesauunien polttimissa käytetään polttoaineena öljyä, mutta esimerkiksi Äänekosken biotuotetehtaan polttimella on mahdollisuus polttaa öljyn lisäksi tuotekaasua, mikä toimii pääasiallisena polttoaineena kustannussyistä.

Meesauunissa parhaan lopputuotteen saamiseksi on tärkeää huomioida polttimen liekin hallinta, sillä eri muotoiset ja pituiset liekit vaikuttavat kalkin laatuun. Liian lyhyt liekki nostaa meesauunin polttopään lämpötiloja liikaa, joka vaikuttaa kalkin jäännöskarbonaattiin. Liekki ei voi olla myöskään liian pitkä, jolloin lämpö karkaa savukaasujen mukana piippuun. (Adams 1999, 2.) Liekin hallinnalla mahdollistetaan meesauunissa valmistuvan kalkin paras laatu, jolla on suora vaikutus kausitisoinnissa valkolipeän valmistuksessa.

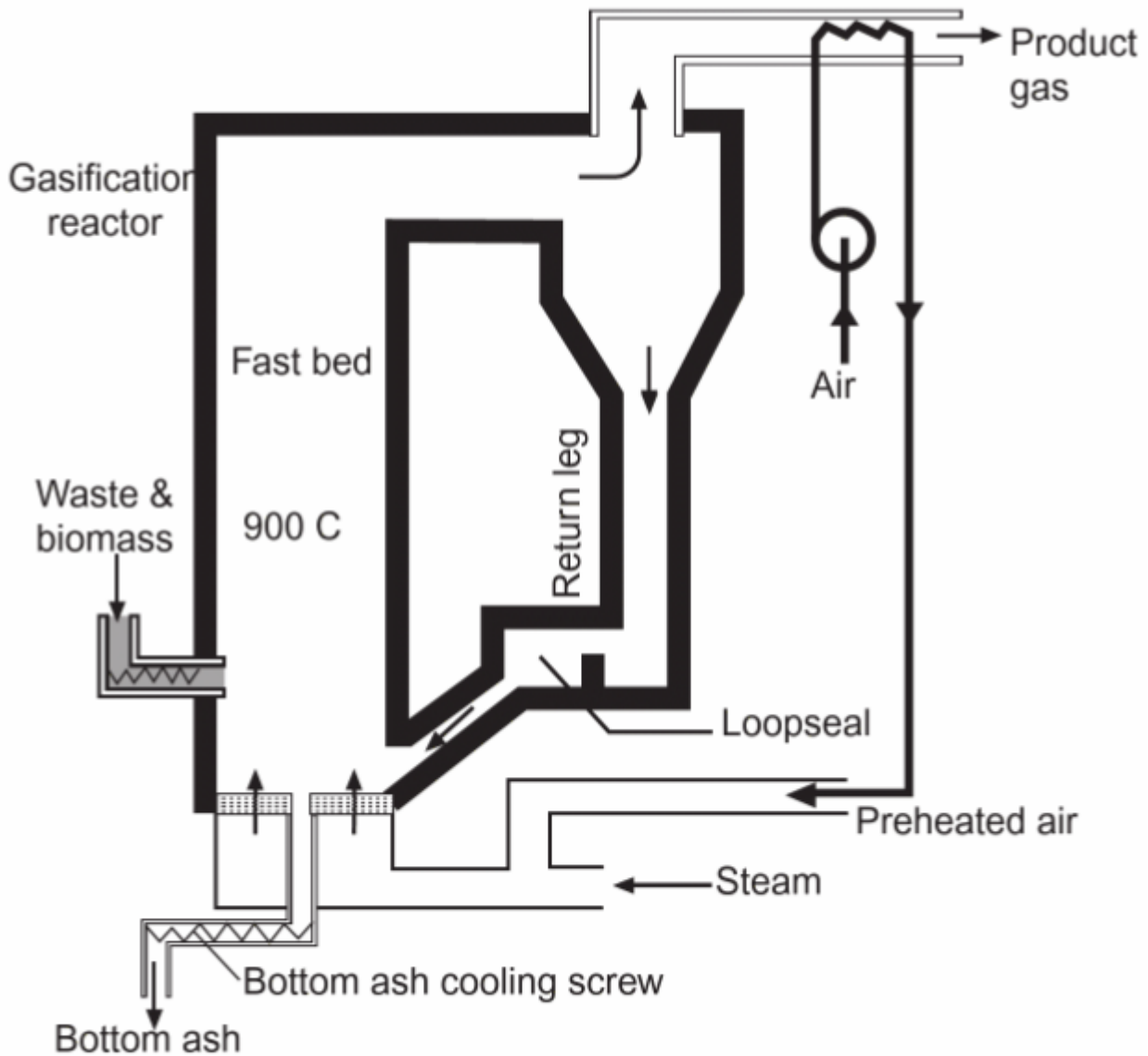
## 4.2 Palamisilma

Meesauunissa tuotettu kalkki ohjataan uunista polttimen alapuolella sijaitsevaan kalkin jäähdyttimeen, jonka tehtävänä on jäähdyttää kalkkia uunin palamisilmalla. Palamisilma on kalkin jäähdytyksen jälkeen esilämmitetty, jolla parannetaan uunin energiatehokkuutta. Palamisilma imetään kalkinjäähdyttimestä savukaasupuhaltimesta muodostuvan alipaineen avulla ja ilma toimii uunin sekundääri-ilmana. Meesauuni tarvitsee myös primääri-ilmaa, joka tuotetaan uuniin paineistettuna primääri-ilmapuhaltimella. Primääri-ilman pääasiallinen tehtävä on hallita polttimen liekin muotoa. (Kemikaalikierto 2021.)

## 5 Kiertoleijukaasutin

Kaasutusreaktion luominen vaatii siihen suunnitellun kaasutinlaitteiston. Kaasutintekniikoita ovat leijupeti (Fluidized bed), samansuuntainen virtaus (Entrained flow) ja liikkuvapeti (Moving bed) (Basu 2013, 250). Äänekosken biotuotetehtaan kuorikaasutin on Valmet Oyj:n toimittama kiertoleijupetikaasutin (Circulating Fluidized-Bed Gasifier), jossa hyödynnetään leijupeti-tekniikkaa.

Kiertoleijupetikaasuttimen rakenne on yksinkertainen ja se koostuu reaktorista, syklonista ja kiintomateriaalin paluuosasta (ks. kuvio 5). Kaasuttimeen kuuluu lisäksi polttoaineen ja petimateriaalin syöttöjärjestelmät, kaasutusilmapuhallin ja tuhkaneräysjärjestelmä. Kiertoleijupedissä biomassasta tuotettu kaasu nousee reaktorissa, kulkeutuen syklonin kautta kohti tuotekaasukanavaa. Syklonin tehtävä on erottaa petimateriaali tuotekaasusta ja kierrättää se takaisin reaktoriin uudelleen käytettäväksi. Vaikka kiertoleijupetikaasuttimessa virtausnopeus on 3,5–5 m/s, korkea reaktori mahdollistaa tuotekaasun sekä petimateriaalin pitkän viipymän, jolloin kiinteä aines ja kaasu erkaantuvat eikä petimateriaalia päädy tuotekaasukanavaan. (Basu 2013, 261–262.)



Kuvio 5: Kiertoleijupetikaasuttimen rakenne (Basu 2013, 262)

## 5.1 Polttoaineen syöttö

Äänekosken kuorikaasuttimen polttoaineen syöttö tapahtuu kahden polttoainelinjan avulla, jotka sijaitsevat molemmin puolin kaasutinta. Kuivattu kuori nousee kuorikuivurilta kaasuttimen päälle polttoainesiiiloihin, jotka toimivat puskurina polttoainemäärälle. Siilot antavat aikaa vaikuttaa kuorikuivurin nopeudensäätöön tai mahdollisiin ongelmiin polttoaineen kuivauksessa, jolloin kaasuttimen toimintaa ei tarvitse pysäyttää. Polttoaine ohjataan siilon pohjasta kuoripurkaimen avulla anosteluruuville, jolla ohjataan syötettävän polttoaineen määrää ja kuorikaasuttimen tehoa.

## 5.2 Kaasutusilma

Äänekosken biotuotetehtaan kuorikaasuttimessa tapahtuvaa kaasutusreaktiossa muodostuvaa lämpötilaa hallitaan kaasutusilmalla. Tarvittava ilmamäärä petilämpötilojen hallitsemiseksi saadaan aikaan kahdella kaasutusilmapuhaltimella, joiden avulla muodostuu myös leijupeti kaasuttimen tulipesään. Kaasutusilmapuhaltimet ovat sijoitettuna kaasuttimen alapuolelle ja ilmamäärän syöttö tapahtuu kaasuttimen pohjasta.

Kiertoleijupetikaasutinta operoidaan 800–1000 °C asteen lämpötilassa, jota hallitaan syötettävän ilman määrällä. Kaasutuksen ilmamäärä on erittäin olennainen osa prosessia, sillä väärin laskettu ilmamäärä heikentää kaasuttimen suorituskykyä. Ilmamäärän määrittämisessä käytetty parametri stoikiometrinen ilmamäärä tarkoittaa teoreettista ilmamäärää polttoaineen täydelliselle palamiselle. Palamisprosessissa täydellistä palamista ei saavuteta ilman ylimääräilmaa, jolloin joudutaan käyttämään ilmakerrointa EA (Excess air). EA-kertoimella määritetään todellinen ilmamäärä polttoaineelle, suhteessa stoikiometriseen ilmamäärään. Kaasuttimen tarvitsema ilmamäärä määritellään käyttämällä ilmakerrointa ER (Equivalence ratio). ER:n laskemisessa voidaan hyödyntää palamisprosessin ilmamäärän laskemisessa käytettyä termiä EA (Excess air). (Basu 2013, 277–278.)

$$ER (< 1), \text{kaasutus} = \frac{\text{todellinen ilmamäärä}}{\text{stoikiometrinen ilmamäärä}} = EA (> 1), \text{Palaminen}$$

Kaasutusprosessin tapahtuessa ali-ilmaisessa järjestelmässä, on stoikiometrinen ilmamäärä huomattavasti pienempi kuin palamisprosessissa. Oikein määritettynä ER parantaa kaasuttimen suorituskykyä. Liian suuri ER lisää tuotekaasun palamista kaasuttimessa, joka nostaa reaktorin lämpötilaa. Liian pieni ER taas heikentää kaasutusreaktion muodostumista ja lisää jäännöshiilen määrää kaasuttimessa. Optimaalinen ER kaasuttimessa on välillä 0,2–0,3. (Basu 2013, 277–278.)

### 5.3 Inertointi

Inertointi on yksi sammuttamiskeinoista, jossa palava aine syrjäytetään reaktiokyvyttömällä aineella eli inertillä. Inertoinnin tarkoitus palotilanteessa on tukahduttaa eli syrjäyttää happi käyttämällä esimerkiksi vettä tai jotain reagoimatonta kaasua. Kaasulla syrjäyttäminen siirtää saman tilavuuden verran palokaasuja sekä ilmaa pois palavasta tilasta. (Hyttinen, Tolonen & Väisänen, 2008, 89.)

Biotuotetehtaan kaasutin käyttää inertoinnissa soodakattilan tuottamaa höyryä. Höyry syrjäyttää kaasutusreaktion tarvitseman hapen, joka puhalletaan tuotekaasukanavan kautta meesauuniin, jolloin kaasutin saadaan turvalliseen tilaan eikä sinne jää reagoivia kaasuja. Inertoinnissa käytettävää höyryä hyödynnetään myös mahdollisissa palotilanteissa kaasuttimen polttoainelinjoissa. Biomassan kaasutuksessa polttoaineen eli kuoren kuiva-ainepitoisuus on yksi tärkeimmistä kaasutus-  
tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä, minkä vuoksi sammutustilanteissa ei käytetä vettä.

## 6 Prosessiautomaatio

Prosessiautomaatio on teollisessa ympäristössä käytettävä automaatiotekniikka. Prosessiautomaatiojärjestelmän tehtävä on hallita prosessia mittausten ja mittaustietojen perusteella ohjattavien toimilaitteiden avulla. Prosessiteollisuudessa automaatio toimittaa prosessista mitatut tiedot ihmiselle sopivassa muodossa sekä hoitaa prosessin muutostilojen ohjaukset. Yleisesti prosessiautomaatiota käytetään teollisuudessa, jossa halutaan hallita jotain ilmiötä tai reaktiota. (Heinonkoski, Asp & Hyppönen 2007, 83–84.) Heinonkoski ja muut (2007, 83–84) toteavat myös, että tällaisia aloja ovat esimerkiksi kemian-, elintarvike-, lääke- ja metalliteollisuus, joissa tuotantotoiminta koskee yleisesti virtaavia aineita.

Prosessiautomaatiossa hallittavia suureita on useita, kuten paine, lämpötila, virtausnopeus ja pinnan korkeus. Suureita mitataan erityyppisillä antureilla, jotka lähettävät tiedon automaatiojärjestelmän kautta valvomoon. Prosessissa käytettävien säätöjen avulla toimilaitteet voivat mittaustietojen perusteella säätää prosessia haluttuun suuntaan. Säätöjä varten automaatiojärjestelmässä täytyy olla erilaisia säätöpiirejä. (Heinonkoski ym. 2007, 84–87.)

## 6.1 Säättöpiiri

Teollisuudessa käytettävät säätimet ovat tärkeitä työkaluja prosessinohjauksen kannalta. Säättöpiirejä käytetään teollisuudessa yksikköprosesseissa eli järjestelmissä. Tarkasteltava järjestelmä voi tarkoittaa esimerkiksi säiliötä, reaktoria ja lämmönvaihdinta tai jotain edellä mainittuihin liittyvää osaa, kuten venttiiliä tai pumppua. (Savolainen & Vaittinen 2008, 10.) Kippo ja Tikka (2008, 21) mainitsevat, että säädin kerää mittaustietoja järjestelmästä, vertaa niitä prosessiin asetettuihin arvoihin ja laskee korjaavat toimenpiteet säätöparametrien avulla ja ohjaa prosessia tavoitearvon suuntaan.

Yksinkertainen esimerkki säättöpiiristä on suljettu takaisinkytketty säättöpiiri. Säättöpiirissä anturi mittaa tilasuuren säädettävästä järjestelmästä ja lähettää mittasuureen mittalähtetimen kautta summaimelle. Summain saa mittasuureen lisäksi vertailusuureen, joka tulee käskylohkolta, johon on asetettu asetusarvo. Summain vähentää vertailusuureesta mittasuureen ja lähettää erotuksesta muodostuvan erosuureen säätimelle, joka määrittää ohjauksen toimilaitteelle, joka ohjaa järjestelmää. (Savolainen & Vaittinen 2007, 13.)

## 6.2 PID-säädin

Yksikköprosessien ja laiteiden ohjaus säättöpiirien avulla vaatii aina säädön, jonka tyyppi riippuu paljon kohteena olevasta järjestelmästä. Prosessiteollisuudessa käytetään paljon suhde- ja asetusarvosäätöjä useiden eri virtausten ja annostelujen vuoksi. Suhdesäätö mahdollistaa toiminnon, jossa yhden aineen virtausnopeuden muuttuessa, säätää suhdesäätäjä myös toisen aineen virtausta. Asetusarvosäädössä prosessin toiminnolle asetetaan lähtöarvo, joka voi muuttua jatkuvasti hitaasti tai seurata ennalta määrättyä funktiota. (Kippo & Tikka 2008, 130.)

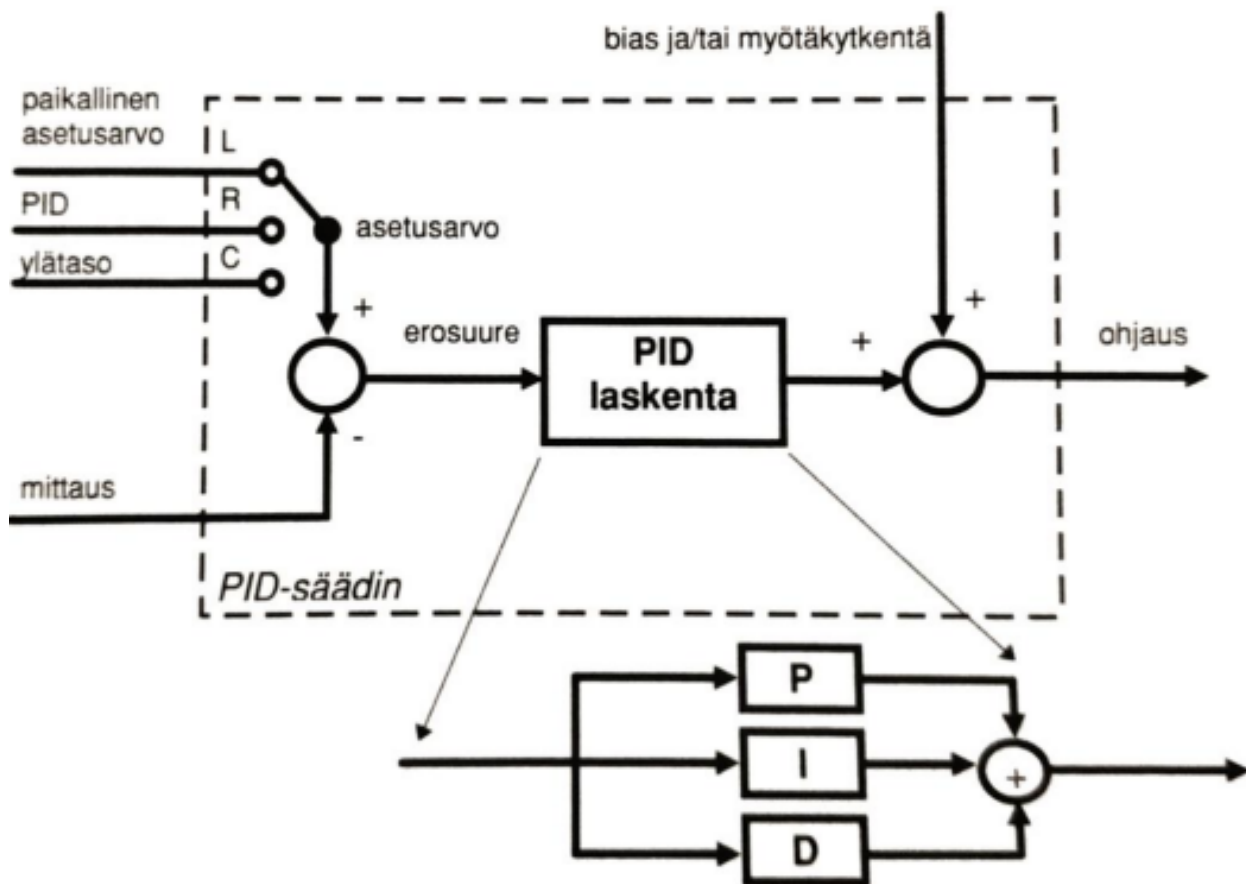
PID-säädin (Proportional + Integral + Derivative control) on prosessiteollisuudessa käytetty säädin. Säädön avulla prosessinohjaukset voivat reagoida nopeasti säätöpoikkeamiin. PID-säädön hyödyt näkyvät varsinkin ennakkoinnissa eli säädöllä pystytään vastaamaan prosessista mitattuihin muutoksiin, jos esimerkiksi mittauksessa esiintyy viivettä. Säädön P-osa tarkoittaa proportionaalista eli suhteellista osaa, joka muuttaa toimilaitteelle menevää ohjausviestiä verrannollisesti erosuureeseen nähden. (Savolainen & Vaittinen 2008, 30.)

I-osa eli integraaliosa on lisätty säätimeen säätöpoikkeamien neutraloimiseksi. Pelkässä P-säädössä ohjearvoa muuttamalla jää säätösuure pienemmäksi. P-säädön käyttämässä P-algoritmossa ohjauksen muuttaminen vaatii aina erosuureen arvon olevan erisuuri kuin 0. Ohjauksen muuttaminen onnistuu siis I-osan avulla. Kun säätimen erosuure saa arvoksi eri suuren kuin 0, alkaa integroiva osa laskea kumulatiivisesti yhteen positiivisen aika-akselin ja erosuureen väliin jäävää pinta-alaa. Näin ollen, jos erosuure laskee nolnaan, voi laskettava pinta-ala jäädä nollasta poikkeavaksi ja integroivan tekijän säätöalgoritmi mahdollistaa ohjaukseen nettolisäyksen. Säätöpoikkeama häviää, kun integroiva osa muuttaa säätösuureen ohjearvoa askelmaisesti äärellisessä ajassa. (Savolainen & Vaittinen 2008, 34.)

D-osa eli derivoiva osa mahdollistaa säätöjen säätöpoikkeamien neutraloimisen. D-säädön vahvuudet tulevat esiin mittausjärjestelmissä, joiden aikavakiot ovat hitaita, mutta säädettävien järjestelmien muutosnopeudet voivat tapahtua nopeasti. D-säädöllä avulla on mahdollisuus ennakoida mittattavassa järjestelmässä tapahtuvia muutoksia ja ohjata järjestelmää oikeaan suuntaan. D-säädössä derivoiva osa muuttaa säätimen ohjausta suhteessa erosuureen aikaderivaattaan eli muutosnopeuteen. PID-säädin on nopeasti reagoiva säädin ja kaikki sähköisesti toteutetut säätimet sisältävät täydellisen PID-algoritmin. PID-säädintä on kuitenkin mahdollista käyttää PI-säätimenä muuttamalla D-termin derivointiaikavakio nolaksi tai pelkästään P-säätimenä muuttamalla integraaliaikavakio äärettömäksi. (Savolainen & Vaittinen 2008, 36–38.) Teollisuusprosesseissa yleisin säädintyyppi on PI-säädin (Harju & Marttinen 2000, 44).

PID-säätimen avulla järjestelmän ohjaus tapahtuu kolmen eri valittavan asetusarvon avulla, joita ovat L (Local), R (Remote) tai C (Computer) (ks. kuvio 6). Ohjausvalinnan ollessa L, käyttäjä voi itse valita haluamansa arvon, jolloin säädin ei käytä ylemmän tason säätimiä ohjauksessa. Ylemmän tason säätimiä hyödynnetään asetusarvon ollessa R tai C, jotka ovat muuttuvia asetusarvoja ja näitä asetusarvoja kutsutaan kaskadikytkennöiksi. R-asetusarvolla säädin ohjaa järjestelmää sisäisesti, kun taas C-asetus arvolla järjestelmän ohjaus tulee ulkopuolisen tietokoneen laskemasta asetusarvosta. (Harju & Marttinen 2000, 45.) Kaskadikytkennässä säätösuureen arvo määrittyy useiden ohjaussuureiden mukaan, jotka tulevat järjestelmän sisältä tai ulkoa. Kaskadikytkennässä säätöpiiri muodostuu useista säätimistä, joita kutsutaan ylä- ja alasäätimiksi. Kaskadipiirissä

yläsäätimen tehtävä on määrittää järjestelmän säätösuure, jolloin alasäädin on tilassa R, joka tarkoittaa, että alasäätimen ohjaussuure voi muuttua koko ajan, jotta se ohjaa yläsäädintä ja sitä kautta järjestelmää haluttuun suuntaan. (Harju & Marttinen 2000, 23–24.)



Kuvio 6: PID-säätimen toimintaperiaate (Harju & Marttinen 2000, 44)

### 6.3 Sekvenssiohjaus

Usein teollisuuden prosesseissa tapahtuu samoja identtisiä vaiheita. Nämä vaiheet voivat liittyä esimerkiksi jonkun tuotteen valmistukseen tai osaprosessiin, kuten laitteiston pesuun tai käynnistykseen. Prosessit, joita ohjataan automaatiolla, voivat hyödyntää näissä vaiheissa sekvenssiohjauksia.

Sekvenssiohjaus tai panosprosessi on prosessinohjaustapa, jossa tiettyä prosessia ohjataan niin kutsuttujen askelten avulla. Ohjaustavassa on tyypillistä askelten välissä olevat siirtymäehdot, joiden toteutuessa askeleet etenevät kohti sekvenssin loppua. Sekvenssiohjausta tehdessä määritellään kunkin askeleen toiminta ja mitä askeleessa on määrä tapahtua. Kun askel on suorittanut sen ennalta määrätyn tehtävän, on sekvenssi valmis siirtymään seuraavaan askeleeseen. Siirtymä tapahtuu kaikkien siirtymäehtojen toteutuessa ja siirtymäajan täytyessä. Sekvenssiohjauksessa askelten määrä voi vaihdella prosessista riippuen samoin kuten siirtymäehdot ja siirtymäajat. (Kippo & Tikka, 57–58.) Ohjaustavalla pyritään vähentämään prosessinohjaajan tai operaattorin työkuormaa, kun prosessin ohjaus tapahtuu sekvenssiohjauksella. Sekvenssiohjauksella minimoidaan myös ihmisen tekemät inhimilliset virheet, koska ohjaustapa tekee kaiken identtisesti.

### 6.4 Valmet DNA

Teollisuudessa prosessin ja toimilaitteiden ohjaus tapahtuu ohjausjärjestelmällä. Äänekosken biotuotetehdas käyttää prosessinohjauksessa DCS-järjestelmänään (Distributed control system) Valmet DNA -järjestelmää, joka mahdollistaa laitoksen prosessin, laitteiden ja koneiden ohjauksen yhdeltä alustalta.

Ohjausjärjestelmällä toteutetaan niin sisäänrakennetut analogiset ohjaukset kuin logiikkaohjaukset. Valmet DNA:n ohjauksiin kuuluu mittaukset, PID-säätimet, hälytysten käsittely, moottorien ja venttiilien ohjaukset, sekä ryhmäkäynnistykset ja sekvenssit. Järjestelmän ohjaus tapahtuu pääte-laitteilla Valmet DNA -ohjelmalla. (Tuotannon hallinta ja automaatio 2022.)

## 6.5 Turva-automaatiojärjestelmä

Teollisuuden prosessien ohjauksessa käytettävän DCS-järjestelmän lisäksi tehtailla tai laitoksilla täytyy olla oma, erillään DCS-järjestelmästä oleva turva-automaatiojärjestelmä. Turva-automaatiojärjestelmä eli TAJ takaa laitokselle turvallisen käymisen ja sen avulla voidaan välttää niin laiterikkoja kuin työtaturmia. TAJ on prosessista riippuen erilainen ja se suunnitellaan tehtaalle riskiarviointien perusteella. Vaarallisemmat prosessit vaativat turva-automaatiojärjestelmältä enemmän luotettavuutta ja järjestelmien riittävyttä. (Turvatekniikan keskus 2007, 4–5.)

Järjestelmän toimintavarmuuden täytyy olla ehdoton ja toimia koko laitoksen elinkaaren ajan. TAJ ei myöskään saa vaikuttaa prosessin toimintaan aiheuttaen turvallisuutta vaarantavaa tilannetta tai tarpeetonta alasajoa. Toiminnan kannalta järjestelmän tulee olla helposti huollettavissa sekä testattavissa. (Turvatekniikan keskus 2007, 4.)

Suomessa valvontaviranomaisena toimii Turvatekniikankeskus (Tukes), jonka valvontapiiriin kuuluvat vaarallisten kemikaalien teollinen käsittely ja varastointi sekä painelaitteet ja paineelliset järjestelmät. Viranomaisen tehtävä on tarkastaa laitoksien turva-automaatiojärjestelmät ennen käyttöönottoa sekä suorittaa määräaikaistarkastuksia. Määräaikaistarkastuksissa selvitetään, että järjestelmän turva-automaation kunnossapito ja toteutus on tehty vaatimusten mukaisesti. (Turvatekniikan keskus 2007, 11–12.)

## 7 Kuorikaasuttimen käynnistys ja pysäytys

Äänekosken biotuotetehtaan kuorikaasuttimen käyttö on riippuvainen meesauunin ja kaustisoinnin toiminnasta. Vikatilanteissa tai kunnossapidollisissa toimenpiteissä, jotka johtavat meesauunin tuotannon laskemiseen tai alasajoon, kaasuttimen tuottamaa tuotekaasua ei voida käyttää vähäisen tehon tarpeen takia, vaan meesauunilla siirrytään apupoltolle, jossa käytetään mäntypikiöljyä. Huolto- tai vikatilanteet, pois lukien vuosihuoltoseisakki, ovat yleensä lyhytkestoisia ja kuorikaasuttimen otetaan huoltotilanteiden jälkeen käyttöön mahdollisimman nopeasti, sillä kaasuttimen tuottaman tuotekaasun käyttö on edullisempaa kuin mäntypikiöljyn polttaminen. Vuosihuoltoseisakissa kaasutin jäähtyy niin alhaiseen lämpötilaan, että sen käynnistämisessä täytyy käyttää käynnistyspoltinta ja lämmittää kaasutin tarpeeksi korkeaan lämpötilaan ennen kuin kuoren syöttö voidaan aloittaa.

Lyhyemmissä noin 1–3 päivän huolloissa tai vikatilanteissa kaasuttimen pysäytyksessä kaasutinta ei ole tarvetta jäähdyttää, vaan kaasutin ohjataan turvalliseen tilaan inertoimalla se höyryllä, joka syrjäyttää kaasutuksen tarvitseman hapen. Kaasuttimen ollessa hapettomassa tilassa kaasutusreaktiota ei muodostu ja tuotekaasun tuotanto pysähtyy, mutta lämpö kaasuttimen pedissä ei laske, vaan se varastoituu kaasuttimen petiin jääneeseen kuoreen sekä petimateriaaliin. Kaasuttimen tuotannon ollessa pysähdyksissä, lämpö pysyy tarpeeksi korkeana noin 3–4 päivää, jolloin kaasutin on mahdollista ottaa käyttöön ilman käynnistyspoltinta. Lämpötilan säilymisen ja käynnistyksen varmistukseksi on kaasuttimeen syötettävä riittävästi kuorta ennen sen inertoimista.

Kuorikaasuttimen käynnistys ilman käynnistyspoltinta tapahtuu kaasutusilman avulla. Kaasutusilma tulee kaasuttimeen pohjan ilmasuuttimien kautta, kaasuttimessa valmiiksi olevan kuoripedin alta. Kaasutusilman syöttö käynnistyksessä suoritetaan kovalla virtauksella, noin 1,8–2,1 Nm<sup>3</sup>/s, jotta se lävistää kuoripedin ja kaasuttimen reaktori saa happea. Happi kaasuttimen reaktorissa aloittaa jo valmiiksi korkeassa lämpötilassa olevan kuoren kanssa kaasutusreaktion ja lämpötila kaasuttimessa nousee erittäin nopeasti ja kuori alkaa kaasuuntumaan tuotekaasuksi. Kun lämpötila nousee yli 700 °C, voi kaasuttimeen alkaa syöttämään kuorta. Onkin siis tärkeää, että kaasuttimeen on ennen pysäyttämistä syötetty riittävästi kuorta, jottei käynnistyksessä tapahtuva kaasutusreaktio kuluta kaikkea kuorta, ennen kuin polttoaineen syöttö voidaan käynnistää. Polttoaineen syötön aloittamisen jälkeen kaasutin on taas jatkuvatoimisessa käytössä.

## 8 Työn toteutus

Kuorikaasuttimen käynnistys- ja pysäytyssekvenssit ovat suunniteltu parantamaan kaasuttimen käytettävyyttä sekä vähentämään operaattorin työkuormaa mahdollisissa ongelmatilanteissa. Käynnistyssekvenssi sisältää 7 askelta ja pysäytyssekvenssi 6 askelta. Molemmat sekvenssit sisältävät sekvenssin käynnistysehdot sekä askelten väliset siirtymäehdot, joiden mukaan sekvenssi etenee kohti loppua. Opinnäytetyön tekijä on suunnitellut sekä tehnyt sekvenssin rakenteen ja sekvenssi on rakennettu tehtaan automaatiojärjestelmään yhdessä yrityksen projekti-insinöörin kanssa.

## 8.1 Käynnistys ehdot ja lukitukset

Kuorikaasuttimen käynnistys- ja pysäytyssekvenssin toiminnan varmistukseksi sekä väärinkäytön ehkäisemiseksi sekvenssiin on laadittu lista käynnistysehtoja (ks. liite 1). Turvallisuuden takaamiseksi sekvenssien käynnistys- sekä siirtymäehdoissa on hyödynnetty sekä TAJ- ja DCS-lukituksia. Kaikkien käynnistysehtojen tulee toteutua ennen kuin käynnistyssekvenssiä voi ohjata.

Kaasuttimen TAJ-lukitukset koostuvat kahdesta eri piiristä (ks. liite 4), päälukituksista sekä KPA-lukituksista. Päälukituksilla varmistetaan kaasuttimen toiminta turvallisella alueella ja KPA-lukitukset antavat luvan polttoaineen syötölle. Käynnistyssekvenssin käynnistys- ja etenemisehdot on määritelty pitkälti kaasuttimen lukituksien mukaan, jolloin prosessinohjaus sekvenssillä pysyy sallituissa ylä- ja alarajoissa.

Ennen kuin käynnistyssekvenssin ohjaus saa luvan, meesauunin täytyy olla toiminnassa ja mäntypikiöljyn syöttö meesauuniin olla yli 0,5 kg/s. Mäntypikiöljyn tuottaman tehon on kuitenkin oltava alle 40MW, jolloin kaasuttimen tuotekaasun tuottama teho ei ole liian suuri meesauunille yhdessä mäntypikiöljyn kanssa. Lisäksi meesauunin polttimen primääri-ilman ohjaus tuotekaasulle täytyy olla 100 % auki. Muut käynnistyssekvenssin meesauuniin liittyvät ehdot tulevat meesauunin TAJ- sekä DCS-lukitusten mukaan, kuten meesauunin hapen määrä, jonka tulee olla ennen sähkösuodinta yli lukitusrajan ja meesauunin polttopään täytyy olla alipaineessa.

Sekvenssin käynnistyslupa vaatii meesauunin toiminnan lisäksi kaasuttimeen liittyvien ehtojen toteutumista. Polttoainelinjojen tiivistysilmapuhaltimien tulee olla päällä sekä polttoainesilojen pintojen tulee olla yli 30 %. Silojen pinnankorkeudella voidaan varmistaa polttoaineen riittävyys käynnistykseen ajaksi.

Käynnistykseen tapahtuessa ilman sytytyspoltinta, kaasuttimen pedin lämpötilan tulisi sekvenssin toimintavarmuuden takia olla ennen käynnistystä yli 360 °C, mutta käynnistysehdoissa ei ole asetettu lämpötilalle alarajaa. Vaikka lämpötila on alhaisempi kuin 360 °C, kannattaa käynnistyssekvenssiä kokeilla, jolloin on mahdollisuus välttää käynnistyspolttimen käyttö. Alhaisemman lämpötilan käynnistys käynnistyssekvenssillä ei aiheuta turvallisuus- tai laiterikkoriskiä, mutta sen toimintaa ei voi varmuudella todeta. Alhaisin lämpötila, josta kaasutin on käynnistetty ilman käynnistyspoltinta, on 363°C.

## 8.2 Ilmamäärä

Kuorikaasuttimen käynnistys ilman sytytyspoltinta tapahtuu kaasutusilman avulla. Kaasutusilmaa tulee virrata kaasuttimeen riittävästi, jotta se lävistää kaasuttimen pedin kuorikerroksen ja kuori alkaa kaasuuntumaan nostaen kaasuttimen lämpötilaa. Käynnistyssekvenssin ensimmäisessä askeleessa kaasutusilman virtausta ohjataan kaasutusilmapuhaltimilla.

Ennen kuoripedin läpäisemistä kaasutusilman virtausmittaus ei tunnista virtausta, joten kaasutusilmapuhaltimien ohjauksessa ei voi käyttää kaasutusilman virtaussäätimen automaattista A/L-tilaa, vaan kaasutusilman määrää ohjataan puhaltimien nopeudella manuaalisesti M-tilassa. Kuorikerroksen puhkeamisen on havaittu tapahtuvan kaasutusilmapuhaltimien nopeuden ollessa yli 30 %. Käynnistyssekvenssissä kaasutusilmapuhaltimien ohjaus on toteutettu rampittamalla puhaltimien ohjaus nopeudesta 0 % nopeuteen 30–50 %. Sekvenssin ohjauksen nopeusasetus on 2 % / s, eli puhaltimet saavuttavat halutun asetusarvon 15–25 sekunnissa. Rampittamalla puhaltimien nopeus mahdollistetaan kaasutusilmapuhaltimien rauhallinen ohjaus, jolla vältetään puhaltimiin kohdistuvaa kovaa räsitusta sekä mahdollista laiterikkoa.

Kuorikerroksen puhkeamisen jälkeen kaasutusilma virtausmittaus alkaa näyttämään mittaustietoa, jolloin virtaussäätimen ohjauksessa voidaan siirtyä M-tilasta A/L-tilaan. Käynnistyssekvenssi antaa virtaussäätimelle asetusarvon 2.0 Nm<sup>3</sup>/s. Samalla kuin virtausmittaus alkaa näyttämään mittaustietoa, lähtee kaasuttimen petilämpötila nousemaan. Ilman syöttö kaasuttimeen käynnistää leijutuksen ja kuori alkaa kaasuuntumaan. Kaasutusilman avulla kaasuttimen petilämpötila nousee lämpötilaan 650°C, joka toimii ehtona kaasuttimen päälukituksen kuittaamiselle sekä polttoaineen syötön KPA-lukituksen poistumiselle.

## 8.3 Polttoaineen syöttö

Kuorikaasuttimen päälukituksen ja KPA-lukituksen kuittauksen jälkeen sekvenssi ohjaa polttoainelinjojen sulkupellit auki. Sulkupeltien avautuessa kaasuttimen petilämpötila jatkaa nousuaan ilma-syötön avulla kohti 700 °C, jonka jälkeen annosteluruuvit saavat syöttöluvan. Käynnistyssekvenssin lopullinen tavoite on saada kuorikaasutin kaasutustilaan, joka toteutuu ohjaamalla vähintään toisen polttoainelinjan annosteluruuvia yli 5 % nopeudella. Sekvenssissä polttoaineen syöttö alkaa kahdella annosteluruuvilla M-tilassa, annosteluruuvi 1 nopeusasetuksella 6 % ja annosteluruuvi 2

nopeusasetuksella 0 %. Polttoaineen syötön täytyy alkaa nopeasti syöttöluvan jälkeen, jolla välte-  
tään jo kaasuttimessa olevan kuoren loppuun palaminen ja kaasuttimessa tapahtuvan reaktion  
sammuminen. Polttoaineen syötön ja sitä myötä kaasuttimen tehon noston on kuitenkin tapah-  
duttava rauhallisesti, jolla estetään liiallisen hiilimonoksidin muodostumista. Liian suuri hiilimonok-  
sidin määrä aiheuttaa meesauunin alasajon.

Saavuttaessaan kaasutustilan kaasutin on toiminnassa ja tuottaa tuotekaasua meesauunille. Kuori-  
kaasuttimen tehoa nostetaan sekvenssillä rauhallisesti ja ohjataan kaasutin tasapainoiseen tilaan.  
Käynnistyssekvenssi asettaa yläsäätimenä toimivan kaasutustehosäätimen M-tilaan asetusarvolla  
51MW, joka on hieman minimitehon yläpuolella normaalissa prosessitilanteessa. Sekvenssi siirtää  
myös alasäätiminä toimivat kaasutusilmavirtaus-, petilämpötila- sekä annosteluruuvien nopeus-  
säätimet R/A-tilaan, jolloin ne ohjautuvat tehosäätimen asetusarvon mukaan. Kaasuttimen ollessa  
täysin toiminnassa käynnistyssekvenssin viimeisessä askeleessa käynnistyvät kuorikuivain, pohja-  
tuhkan käsittelylaitteet sekä petimateriaalin syöttösekvenssi.

## 8.4 Pysäytyssekvenssi

Käynnistyssekvenssin toiminnan varmistamiseksi on suunniteltu sitä tukeva pysäytyssekvenssi. Py-  
säytyssekvenssin tehtävä on ajaa kuorikaasutin rauhallisesti turvalliseen tilaan sekä syöttää käyn-  
nistystä varten riittävästi kuorta kaasuttimen petiin.

Pysäytyssekvenssin käynnistys ei vaadi muita käynnistysehtoja kuin tilatiedon, että kaasutustila on  
päällä. Ehdon täytyessä pysäytyssekvenssi antaa kaasutustehosäätimelle asetusarvon 55MW. Sää-  
din ohjaa kaasutuksen lähelle minimitehoa ja samalla annosteluruuvien nopeus laskee tehoasetuk-  
sen takia arvoon 7 %. Käynnistykseen riittävän kuoren määrä varmistetaan, kun sekvenssi nostaa  
annosteluruuvien nopeussäätimen M-tilassa asetusarvoon 10 % ja ohjaa kaasutusilmavirtaussäät-  
imen M-tilassa asetusarvoon 1,8 Nm<sup>3</sup>/s. Normaalissa prosessitilanteessa kaasutusilmavirtaussää-  
din toimii petilämpötilasäätimen alasäätimenä. Kun polttoaineen syöttöä lisätään, laskee se kaa-  
suttimen pedin lämpötilaa. Normaalissa ohjaustilanteessa lämpötilan lasku estetään lisäämällä  
kaasutusilman virtausta. M-tilassa asetusarvolla 1,8 Nm<sup>3</sup>/s ilmamäärä on kuitenkin liian vähäinen

syötettävän polttoaineen määrälle, jolloin polttoaine alkaa tukahduttamaan kaasutinta ja laske-  
maan pedin lämpötilaa. Polttoaine ei siis ehdi kaasuuntumaan vaan alkaa kerääntymään kaasutti-  
men pohjalle.

Kun kaasuttimen petiin on syötetty haluttu määrä polttoainetta, sekvenssi pysäyttää kaasutusilma-  
puhaltimet, jolloin TAJ-lukitukset tulevat voimaan ja kaasuttimen toiminta pysähtyy. Lukitukset  
sulkevat polttoainelinjat ja aloittavat automaattisen inertoinnin höyryllä ja kaasutin ohjautuu tur-  
valliseen tilaan.

## 8.5 Sekvenssien ohjaus

Kuorikaasuttimen käynnistys ja pysäytyssekvenssiä ohjataan biotuotetehtaan valvomosta käyttäen  
Valmet DNA ohjausnäyttöä. Sekvenssien ohjaus tapahtuu ohjausnäytölle rakennetun ikkunan  
avulla (ks. Liite 3). Käynnistys- ja pysäytyssekvenssin ohjausnäytöstä operaattori voi käynnistää  
sekvenssit M-tilassa sekä muuttaa tarvittaessa sekvenssien asetusarvoja. Käynnistyssekvenssissä  
muutettavia asetusarvoja ovat polttoainelinjan valinta käynnistyksessä asetuksella 1 tai 2, kaasu-  
tusilmanpuhaltimien nopeuden rampitusraja asetuksella 30–50 % sekä annosteluruuvien käynnis-  
tysnopeus asetuksella 5,1–10 %. Pysäytyssekvenssin muutettava arvo on polttoaineen syöttöaika  
suuremmalla ohjauksella ennen pysäytystä asetuksella 0–240 s. Muutettavat asetusarvot ovat  
suunniteltu erilaisia prosessitilanteita varten. Sekvenssin ohjauksessa operaattorin tehtäväksi jää  
sekvenssin käynnistyksen lisäksi kaasuttimen päälukitusten kuittaus, jossa operaattorin täytyy pai-  
naa kaasutussuoja-painonappia.

## 9 Tulokset

Kuorikaasuttimen käynnistys- ja pysäytyssekvenssit on rakennettu Biotuotetehtaan DCS-  
järjestelmään toimintakuvauksen perusteella (ks. liite 1 ja 2). Sekvenssien testaus on ensin suori-  
tettu simulaattorilla, jolla on varmistettu sekvenssien loppuun pääseminen. Kun sekvenssien auto-  
maation toiminta on varmistettu simulaattoriympäristössä, on käynnistys- ja pysäytyssekvenssiä  
testattu oikeassa prosessitilanteessa.

Kaasuttimen pysäytys pysäytyssekvenssillä onnistui, mutta käynnistyssekvenssillä ei saavutettu ha-  
luttua lopputulosta. Käynnistyssekvenssin edettyä askeleeseen polttoaineen syöttö, siirtymäehdot

eivät täyttyneet sekvenssin siirtymäehdoissa olleen virheen vuoksi. Lisäksi polttoaineen syöttö tapahtui liian suurella ohjauksella, joka nosti kaasuttimen tehoa ja aiheutti liiallisen hiilimonoksidin muodostumisen. Annosteluruuvien ohjauksessa havaittiin, että vaikka annosteluruuvi 2 nopeusasetus on 0 %, sen tuottama teho yhdessä annosteluruuvi 1 nopeusasetuksen 6 % kanssa on liian suuri. Näiden virheiden seurauksena kaasuttimen TAJ-lukitukset tulivat voimaan ja kaasuttimen toiminta pysähtyi.

Ensimmäisellä käynnistyskerralla havaittiin myös muita pienempiä virheitä tai säätökohteita. Sekvenssin käynnistyessä ohjattavat laitteet ohjataan sekvenssin avulla A-tilaan. Polttoaineen annosteluruuvien ohjaus A-tilaan onnistuu kuitenkin vasta kaasuttimen päälukitusten täytyessä, jotka eivät ole vielä voimassa sekvenssin alkutilanteessa. Tästä johtuen annosteluruuvien ohjaus jäi sekvenssin edetessä M-tilaan, jolloin sekvenssi ei voinut toteuttaa niiden ohjausta. Lisäksi käynnistyksessä havaittiin virhe, kun toisen polttoainesiilon purkain ei toteuttanut sille annettua ohjauksenkäskyä.

Ensimmäisessä käynnistyksessä kaasutusilmapuhaltimien ohjauksen rampitus nopeudesta 0 % nopeuteen 40 % tapahtui nopeusohjauksella 2 % / s. Nopeusohjauksen arvo ei aiheuttanut sekvenssiin häiriöitä, mutta puhaltimien nopea ohjaus ei antanut operaattorille aikaa havainnoida prosessin etenemistä.

Sekvenssin ensimmäisessä testauksessa esiintyneet virheet korjattiin sekä asetusarvoja muutettiin toiminnan parantamiseksi. Ensimmäisen testauksen epäonnistumiseen johtanut liiallinen hiilimonoksidin muodostuminen huomioitiin muuttamalla kuorta syöttävien annosteluruuvien ohjaustapaa. Muutos toteutettiin siirtämällä toisen annosteluruuvin käynnistys vasta sekvenssin seuraavaan askeleeseen, jolloin käynnistyksessä kuoren syöttö voidaan aloittaa käyttämällä vain yhtä annosteluruuvia. Käynnistys yhdellä annosteluruuvilla poistaa tehon äkillisen nousun eikä hiilimonoksidin muodostumista synny liikaa. Toisen annosteluruuvien ohjaus käynnistyy vasta kun kaasuttimen ohjaus siirtyy sekvenssissä tehonsäädön perään, jolloin kaasutin on jo tasapainoisessa tilassa. Lisäksi käynnistyssekvenssin kaasutusilmamäärän ohjausta hidastettiin pudottamalla kaasutusilmapuhaltimien nopeusohjauksen rampitusaika arvoon 0,5 %/s. Hitaampi rampitusaika nopeudesta 0 % nopeuteen 30-50 % mahdollistaa rauhallisemman lämpötilan nousun kuoripedin puhkeamisen jälkeen sekä antaa prosessinohjaajalle aikaa seurata sekvenssin etenemistä.

Käynnistyssekvenssiin tehdyt muutokset testattiin simulaattorilla sekä oikeassa prosessitilanteessa. Ensimmäisellä käynnistyskerralla esiintyneet virheet eivät toistuneet ja kaasuttimen pysäytys ja käynnistys tapahtuivat onnistuneesti. Käynnistys- ja pysäytyssekvenssien lopulliset toimintakuvaukset löytyvät liitteistä 1 ja 2.

## 10 Pohdinta

Opinnäytetyössä oli tavoitteena kehittää Äänekosken biotuotetehtaan kuorikaasuttimen käytettävyyttä automaattisen käynnistys- ja pysäytysmenetelmän avulla. Tavoitteesta muodostui tutkimusongelma, jonka yhteydessä muodostui opinnäytetyön tärkein tutkimuskysymys, johon vastattiin työn aikana. Opinnäytetyössä onnistuttiin hyödyntämään automaation tuomia etuja ja lopputuloksena muodostui turvallinen ja helppokäyttöinen käynnistys- ja pysäytyssekvenssi, joka parantaa biotuotetehtaan kuorenkaasutuslaitoksen käytettävyyttä. Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena, jossa työn menetelmäsuuntauksena toimi pääasiallisesti kvalitatiivinen tutkimusmenetelmä. Simulaattorilla sekä oikeassa prosessitilanteessa suoritettujen testauksien mittaustietojen analysoinnissa hyödynnettiin kvantitatiivista tutkimusmenetelmää, jonka avulla saatiin selvitettyä oikeat prosessisuureet sekvenssien toimivuuden takaamiseksi. Testaukset sekä mittaustietojen analysointi mahdollisti myös tulosten luotettavuuden arvioinnin.

Käynnistys- ja pysäytyssekvenssin toiminta on testattu ensin simulaattorilla ja sitten oikeassa prosessiympäristössä. Ensimmäisessä testausvaiheessa löydetty virheet korjattiin ja käynnistyssekvenssin ohjausta muutettiin toiminnan varmistukseksi. Päivitetty versio testattiin uudelleen simulaattorilla sekä oikeassa prosessitilanteessa onnistuneesti.

Vaikka käynnistyssekvenssin toiminta voitiin todeta, on tietenkin mahdollista, että käynnistyssekvenssin toimintaa joudutaan kehittämään tulevaisuudessa, mutta mahdollisia kehittämistoimenpiteitä on vielä liian aikaista arvioida. Käynnistyssekvenssin täydellistä toimintaa ei voida myöskään todeta vain yhdellä onnistuneella käynnistys- ja pysäytyskerralla, vaan se vaatii useita testauksia erilaisissa prosessitilanteissa. Sekvenssejä ei voitu testata useita kertoja opinnäytetyön määräajassa, sillä kuorikaasuttimen alasajo testauksen takia ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Vähäisen testauksen vuoksi tulevaisuuden käynnistystilanteissa tulee kiinnittää huomiota kaasuttimen petilämpötilaan ja tarkkailtava, onko käynnistyssekvenssin toiminta identtistä eri käynnistyslämpötiloissa. Onnistunut testikäynnistys suoritettiin vuorokausi kaasuttimen pysäytyksen jälkeen, jolloin kaasuttimen pedin lämpötila oli vielä yli 500 °C, joten käynnistyksessä tapahtunut lämpötilan nousu oli vähäinen. Onkin siis tarkkailtava, kuinka sekvenssin ohjaukset käyttäytyvät ja onko ohjaus identtinen, kun käynnistystä lähdetään suorittamaan lämpötilan laskiessa alle 400 °C. Sekvenssejä ohjattaessa on myös huomioitava kuoren määrä kaasuttimessa ennen käynnistystä ja tarkkailtava, että kaasutusilman virtausasetus on riittävä kuoripedin läpäisemiseksi. Huomioitavia kohtia varten sekvenssien ohjausnäyttöön on rakennettu säädettävät asetusarvot käynnistyssekvenssin kaasutusilman ohjaukselle sekä pysäytyssekvenssin kuoren syötön ajalle (ks. liite 3). Säädettävät arvot on tehty tulevaisuuden ohjaustilanteita varten, jotta kaasuttimelle löydetään toimintavarma ja tasapainoinen käynnistysohjaus.

Käynnistys- ja pysäytyssekvenssin ohjattaessa kuorenkaasutuslaitosta automaattisesti, meesauunin happisäädön ohjaus kaasuttimen käynnistystilanteessa jää silti prosessinohjaajan tehtäväksi. Opinäytetyön laajuuden vuoksi meesauunin happisäädön ohjausta ei otettu mukaan sekvenssin ohjaukseen, mutta sekvenssit ovat luoneet helposti muokattavan pohjan kaasuttimen käynnistys- ja pysäytysohjaukselle, jota on mahdollista kehittää tulevaisuudessa esimerkiksi lisäämällä meesauunin ohjauksia sekvenssiin mukaan.

## Lähteet

Adams, T. 1999. Lime Kiln Principles and Operations. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI. Viitattu 10.12.2021. <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/2-2.pdf>.

Basu, P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. London: Academic Press. Viitattu. 16.1.2022. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.

Basu, P. 2018. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. London, England: Academic Press. Viitattu 14.10.2021. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.

Biotuotetehdas. N.d. Metsä Fibre. Viitattu 27.9.2021. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Tuotantolaitokset/Biotuotetehdas/Pages/default.aspx>.

E4tec. 6.2009. Review of technologies for gasification of biomass and wastes. Viitattu 6.11.2021. <https://www.e4tech.com/resources/95-review-of-technologies-for-gasification-of-biomass-and-wastes.php?filter=year%3A2009>.

Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Säättöpiirin virityksen perusteet. Espoo: Otamedia.

Heinonkoski, R., Asp, R. & Hyppönen, H. 2008. Automaatio – helppoa elämää? Suomen Automaatioseura ry.

Hyttinen, V. Tolonen, P. & Väisänen, T. Palofysiikka. 2008. Suomen pelastusalan keskusjärjestö. Tampere: Esa Print Oy.

Kananen, J. 2008. Kvali – Kvalitatiivisen tutkimuksen teorit ja käytänteet. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kemikaalikierto. 2021. KnowPulp oppimisympäristö, v.19.0. Prowledge Oy. Viitattu 9.10.2021. <https://janet.finna.fi>.

Kippo, A. & Tikka, A. 2008. Automaatiotekniikan perusteet. Helsinki: Edita.

Nummelin, J., Hankalin, V. & Raiko, M. 2014. Yijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen: Polttoaineen kuivaustekniikat. Helsinki: Motiva. Viitattu 16.1.2022. [https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Polttoaineen\\_kuivaustekniikat.pdf](https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivaustekniikat.pdf).

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

Tuotannon hallinta ja automaatio. 2022. KnowPulp oppimisympäristö, v.20.0. Prowledge Oy. Viitattu 4.2.2022. <https://janet.finna.fi>.

Turva-automaatio prosessiteollisuudessa. 2007. Turvatekniikan keskus. Viitattu 16.2.2022. <https://docplayer.fi/162203-Tukes-opas-turva-automaatio-prosessiteollisuudessa-turvatekniikan-keskus-turvatekniikan-keskus-turva-automaatio-prosessiteollisuudessa.html>.

Yhtiö. N.d. Metsä Fibre. Viitattu 27.9.2021. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Pages/default.aspx>.

## **Liitteet**

### **Liite 1. Käynnistyssekvenssi (salassa pidettävä)**



















**Liite 2. Pysäytyssekvenssi (salassa pidettävä)**







**Liite 3. Sekvenssien ohjausnäyttö (salassa pidettävä)**

**Liite 4. Kaasutin päälukitukset (salassa pidettävä)**