SELLUTEHTAAN HAJUKAASUKATTILAN KÄYTÖN JA KUSTANNUSTEN TEHOSTAMINEN

UPM Kaukas

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2025

Aleksi Kemppinen

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Satu Lipiäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Aleksi Kemppinen

Sellutehtaan hajukaasukattilan käytön ja kustannusten tehostaminen
UPM Kaukas

Energiatekniikan diplomityö

2025

92 sivua, 26 kuvaa, 10 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori Satu Lipiäinen

Ohjaajat: Käyttöinsinööri Samuli Särkelä, DI Tuure Tamminen, DI Tomi Nevalainen, DI Aleksi Nurmi, DI Juha Keltanen ja DI Minna Maunus-Tiihonen

Avainsanat: hajukaasut, hajukaasukattila, väkevät hajukaasut, laimeat hajukaasut, sellutehdas, päästöt

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia UPM Kaukaan sellutehtaan hajukaasukattilan optimointimahdollisuuksia, erityisesti kemikaalien kulutuksen ja päästöjen vähentämiseksi. Keskeinen tarkastelun kohde oli savukaasupesurissa käytettävä NaOH–kemikaali, jonka kulutuksen vähentäminen toisi säästöjä sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta. Tavoitteita lähdettiin hakemaan hajukaasukattilan ajomallin muutoksella.

Työssä arvioitiin erilaisia ajomalleja, joista teorian pohjalta valittuja parhaimpia vaihtoehtoja testattiin käytännössä. Parhaimmaksi ajomalliksi nykyisen ajomallin korvaajaksi osoittautui vaihtoehto, jossa väkeviä hajukaasuja poltettiin pelkästään soodakattilassa ja hajukaasukattilassa poltettiin pelkästään metanolia. Tämä ajomalli vähensi NaOH:n kulutuksen 10–12 % tasolle aiempaan ajomalliin verrattuna. Kustannuksien osalta vaikutus on sama, eli noin 10–12 % aiemmista kustannuksista, koska suurin kustannustekijä on NaOH:n kulutus hajukaasukattilalla.

Uusi ajomalli nosti kuitenkin tehtaan sulfiditeettiä, mikä voi aiheuttaa ongelmia muualla tehtaalla. Rikkiä jää entistä enemmän kemikaalikiertoon. Korkea sulfiditeetti on ollut Kaukaan sellutehtaalla vuosia tunnettu haaste ja potentiaalinen jatkotutkimuksen kohde.

Työssä ehdotettiin myös parannuksia hajukaasujärjestelmän teknisiin yksityiskohtiin, kuten painemittauksen ja tukihöyryn syötön sijoitteluun. Lisäksi muitakin parannusehdotuksia, joiden avulla voitaisiin mahdollistaa hajukaasukattilan joustavampi ja turvallisempi käyttö tulevaisuudessa. Parannukset saattaisivat avata jopa uusia ja parempia ajomalli vaihtoehtoja tulevaisuudessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Aleksi Kemppinen

Improving the operation and cost efficiency of a pulp mill's non-condensable gas boiler
UPM Kaukas

Master's thesis

2025

92 pages, 26 figures, 10 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post-doctoral researcher Satu Lipiäinen

Supervisor: Operations Engineer Samuli Särkelä, M.Sc. (Tech.) Tuure Tamminen, M.Sc. (Tech.) Tomi Nevalainen, M.Sc. (Tech.) Aleksi Nurmi, M.Sc. (Tech.) Juha Keltanen and M.Sc. (Tech.) Minna Maunus-Tiihonen

Keywords: non-condensable gases (NCG), NCG boiler, odorous gases, concentrated non-condensable gases, diluted non-condensable gases, pulp mill, emissions

The objective of this master's thesis was to investigate optimization opportunities for the non–condensable gas (NCG) boiler at UPM Kaukas pulp mill, with a particular focus on reducing chemical consumption and emissions. A key area of focus was the NaOH chemical used in the flue gas scrubber. Reducing its consumption would bring both economic and environmental benefits. These goals were approached by evaluating changes to the operating model of the NCG boiler.

Several operational models were assessed, and the most promising alternatives based on theory were tested in practice. The most effective model proved to be one where the concentrated non–condensable gases were combusted solely in the recovery boiler, while only methanol was burned in the NCG boiler. This model reduced NaOH consumption to 10–12 % of the previous level. In terms of cost, the effect was the same, as NaOH consumption is the main cost driver in NCG boiler operation.

However, the new operating model led to an increase in mill–wide sulfidity, which could cause problems elsewhere in the process. More sulfur remained in the chemical cycle, further stressing an already know and long–standing challenge at the Kaukas pulp mill. This makes sulfidity control a relevant topic for further research.

The study also proposed technical improvements to the NCG system, such as changes to the placement of pressure measurement and support steam injection. In addition, other improvements suggestions were made to enhance the flexibility and safety of NCG boiler operation. These changes could also enable the implementation of new and more efficient operating models in the future.

KIITOKSET

Tämän diplomityön kirjoittaminen on ollut pitkä ja opettavainen matka. Vaikka viime kuukaudet ovat tuntuneet pitkiltä, aika on lopulta kulunut yllättävän nopeasti, ja työ on viimein saatu päätökseen. Haluan käyttää tilaisuuden kiittääkseni kaikkia, jotka ovat tukeneet minua tämän työn ja opintojeni aikana.

Ensimmäisenä haluan lämpimästi kiittää UPM:ää mahdollisuudesta tehdä diplomityöni Kaukaan sellutehtaalla. Olen saanut työskennellä Kaukaan piipun juurella jo lähes neljän kesän ajan. Tämän pitkäaikaisen yhteistyön myötä olen saanut arvokasta käytännön osaamista ja oppinut paljon alasta, mikä antaa minulle vahvan pohjan tulevaisuuden uralleni.

Haluan esittää suuret kiitokset kollegoilleni sekä erityisesti ohjaajilleni, jotka opastivat ja tukivat minua työn aikana. Kiitokset myös talteenoton henkilöstölle. Heidän panoksellaan oli suuri merkitys pitkien koeajojaksojen onnistumisessa. Operaattorit osallistuivat koeajojen toteutukseen omalta osaltaan. Lisäksi heiltä sai paljon apua ja tietoa työn suorittamista varten.

Lopuksi haluan kiittää vielä perhettäni ja ystäviäni heidän korvaamattomasta tuestaan. He ovat olleet tärkeänä tukena niin diplomityön laatimisessa kuin koko opintojeni aikana. Perheeni on ollut minulle keskeinen voimavara, jonka ansiosta olen voinut edetä opintopolullani ja viedä tämän työn päätökseen.

Lämmin kiitos vielä kerran kaikille, jotka ovat tavalla tai toisella osallistuneet tähän projektiin.

Lappeenrannassa 26.9.2025

Aleksi Kemppinen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	kattilan NO-taso	ppm, mg/Nm^3
B	ammoniakkipitoisuus kuivissa kaasuissa	ppm
K	ammoniakin konvertoituminen NO:ksi	%
L	lipeäkuiva-ainemäärä	kg k.a./ADt
P	ammoniakkipitoisuus metanolissa	kg/ADt
S	savukaasujen määrä	Nm^3/kg k.a.
X	väkevien hajukaasujen osuus kattilan ilmamäärästä	%

Lyhenteet

ADt	ilmakuivattu sellutonni
BAT	paras käytettävissä oleva tekniikka (Best Available Techniques)
BREF	(Best Available Techniques Reference Document)
CNCG	väkevät hajukaasut (Concentrated Non-Condensable Gases)
DNCG	laimeat hajukaasut (Diluted Non-Condensable Gases)
EVO	hapetettu valkolipeä
HKK	hajukaasukattila
k.a.	kuiva-aine
KL1	kuitulinja 1
KL2	kuitulinja 2
LEL	alempi räjähdysraja (Lower Explosive Limit)
NaOH	natriumhydroksidi

NCG	hajukaasut (Non-Condensable Gases)
ppm	miljoonasosa (parts per million)
SOG	strippauskolonnin jälkeiset hajukaasut (Stripper Off Gases)
TRS	pelkistyneet rikkiyhdisteet (Total Reduced Sulphur)
UEL	ylempi räjähdysraja (Upper Explosive Limit)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli– ja lyhenneluettelo

Ilmoitukset

1 Johdanto 10
1.1 Tausta 11
1.2 Tavoitteet 11
1.3 Tutkimus kysymykset 12
1.4 Rajaukset 13
1.5 Työn rakenne 13
2 Sellutehtaan prosessi ja hajukaasut 15
2.1 UPM Kaukas 15
2.2 Sulfaattisellun valmistusprosessi 16
2.2.1 Raaka-aineen vastaanotto 17
2.2.2 Kuitulinja 18
2.2.3 Kuivatus ja toimitus 19
2.2.4 Talteenottojärjestelmä 20
2.3 Hajukaasut 21
2.3.1 Muodostuminen ja keräily 23
2.3.2 Polttaminen 28
2.3.3 Hajupäästöjen vaikutukset 30
2.3.4 Kemikaalit 31
2.3.5 Päästöt 33
2.3.6 Hajukaasujen vaikutukset soodakattilan päästöihin 34
3 Tehtaan hajukaasujen nykyinen tilanne 38
3.1 Muodostuminen ja keräily 38
3.1.1 Kuitulinja 39

3.1.2 Talteenottojärjestelmä ... 40
3.2 Hajukaasujen käsittely ... 40
3.2.1 Soodakattila ... 40
3.2.2 Hajukaasukattila ... 41
3.2.3 Meesauuni ... 42
3.2.4 Hajukaasujärjestelmän muut komponentit ... 42
3.3 Päästöt ... 45
3.4 Natriumbisulfiitin käyttö ... 47
4 Hajukaasujen polton optimointi ... 48
4.1 Hajukaasujen polton jakautuminen ... 48
4.2 Reunaehdot hajukaasujen käsittelyä ja polttoa varten ... 49
4.3 Vaihtoehtoisia ajomalleja ... 51
4.4 Koeajojen suorittaminen ... 56
4.5 SO_2–pesuri ... 57
5 Koeajojen tulokset ... 60
5.1 Natriumbisulfiitin muutokset ... 60
5.2 Vaikutus kuitulinjojen kemikaalijäämiin ... 61
5.3 Päästöt ... 67
5.4 Hajukaasukattilan muutokset testiajon aikana ... 72
5.5 SO_2–pesurilla tapahtuneet muutokset ja kemikaalien kulutus ... 73
5.6 Muutokset sulfiditeetissä ja vaikutukset kemikaalikiertoon ... 75
6 Tulosten läpikäynti ja pohdinta ... 78
6.1 Työn taloudellisia tuloksia ... 78
6.2 Tulokset päästöjen muutoksesta ... 79
6.3 Tehdyt muutokset ja mahdollisuudet natriumbisulfiittisäiliössä ... 79
7 Parannusehdotukset hajukaasujärjestelmään ... 81
8 Yhteenveto ... 86
Lähteet ... 90

Liitteet

Liite 1. Soodakattilan hajukaasupoltin sivulta ja takaa

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Aleksi Kemppinen on käyttänyt seuraavaa tekoälytyökalua opinnäytetyön tekemisessä:

1. ChatGPT (OpenAI), versiot GPT-4o ja GPT-5
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Tekoälyn käytön tarkoituksena oli korjata kielioppivirheitä sekä selkeyttää omaa tekstiä tietyissä osioissa työtä. Lisäksi tekoälytyökalua hyödynnettiin itse tuotetun tekstin luonnosteluun englanninkieliseksi käännökseksi tiivistelmää varten.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Tekoälyä hyödynnettiin kirjoittamisprosessin tukena edellä mainituissa käyttötarkoituksissa. Kirjoittaja tuotti sisällön itse ja arvioi huolellisesti tekoälyn antamat korjausehdotukset ennen niiden käyttämistä tekstissä.

Vastuu

Kirjoittaja, Aleksi Kemppinen, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Tämä diplomityö käsittelee Kaukaan sellutehtaan hajukaasukattilan käytön ja kustannustehokkuuden parantamista. Tarkemmin keskitytään kemikaalien kulutuksen ja päästöjen vähentämiseen. Työ on tehty UPM Kaukaan sellutehtaalle. Diplomityön keskeisimpänä tavoitteena on saada pienennettyä kemikaalien kulutusta nykyisestä tasosta hajukaasukattilalla. Kemikaalien käytön vähentämiseen liittyvien ratkaisujen löytyminen tuo taloudellisia säästöjä ja parantaa tehtaan suljettua kemikaalikiertoa. Samalla pyritään vähentämään hajukaasukattilalla muodostuvia päästöjä.

Aihe on erityisen tärkeä, sillä sellunvalmistuksen kustannukset ovat nousseet globaalin tilanteen seurauksena. Teollisuudessa pyritäänkin yhä aktiivisemmin optimoimaan prosesseja ja vähentämään kustannuksia kannattavuuden parantamiseksi. Yksi keskeinen keino taloudellisten kustannusten hallintaan on kemikaalien kulutuksen vähentäminen. Tämän lisäksi kemikaalien kulutuksen ja päästöjen vähentäminen on myös ympäristön kannalta suotavaa. Päästöjen vähentäminen on tärkeä osa tiukentuvien ympäristötavoitteiden saavuttamista. Kaukaalla hajukaasukattilan päästöt eivät nykyisellään ole ongelma, sillä ne jäävät reilusti raja-arvojen alapuolelle.

Yleisesti aiempia tutkimuksia päästöjen vähentämisestä hajukaasukattiloilla on tehty, mutta kemikaalien vähentämisestä ja taloudellisten säästöjen saavuttamiseen liittyviä tutkimuksia ei juurikaan ole saatavilla. Aiemmissa tutkimuksissa on esitetty hyviä ideoita päästöjen pienentämiseksi, mutta tässä työssä päästöjen vähentäminen saavutetaan pääasiassa hajukaasukattilan mahdollisen ajomallimuutoksen kautta. Ajomallimuutoksen myötä voidaan optimoida kattilan toimintaa, mikä vaikuttaa sekä päästöjen että kemikaalien kulutuksen vähenemiseen. Kemikaalien kulutuksen väheneminen tuo siten taloudellisia säästöjä. Päästöjen osalta muissa tutkimuksissa on keskitytty muun muassa kattilan rakenteeseen, polttoprosessiin ja savukaasujen käsittelymenetelmiin. Tässä työssä näitä osa-alueita ei ole tarkoituksena tarkastella, vaan pääpaino on ajomallimuutoksen vaikutusten tarkastelussa.

1.1 Tausta

Tässä työssä teoriaosuudessa tarkastellaan sellun valmistusta sulfaattimenetelmän kautta, joka on yleisin tuotantomenetelmä ja käytössä myös UPM Kaukaan sellutehtaalla. Tehtaalla sellun raaka–aineena käytetään havupuuta. Kaukaan sellutehtaalla muodostuu normaalilla tavalla sellunvalmistusprosessiin kuuluvia hajukaasuja, jotka jaetaan väkeviin ja laimeisiin hajukaasuihin. Väkeviä hajukaasuja poltetaan hajukaasu- ja soodakattilassa. Laimeita hajukaasuja näiden polttopaikkojen lisäksi myös meesauunissa.

Hajukaasukattilassa väkevien hajukaasujen polttamisen yhteydessä muodostuu savukaasupesurissa natriumbisulfiittia, jota hyödynnetään kuitulinjalla osana sellunvalmistusta. Hajukaasukattilan natriumbisulfiitin tuotanto on siten tärkeää sellutehtaan toiminnan kannalta. Samalla väkevät hajukaasut hävitetään tehokkaasti hajukaasukattilan kautta. Tehokas hajukaasujen hävitys takaa, ettei ylimääräisiä hajuja pääse ympäristöön. Nykyisin natriumbisulfiittia kuitenkin muodostuu huomattavasti yli oman tarpeen. Tämä tarkoittaa ylimääräisiä kemikaalien kulutuksia ja sitä kautta turhia kustannuksia.

1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on kartoittaa erilaisia vaihtoehtoja, joilla voitaisiin pienentää hajukaasukattilan kemikaalien kulutusta ja vähentää hajukaasukattilalla muodostuvia päästöjä. Yksi vaihtoehto on hajukasukattilan eräajomalli (batch–ajomalli), jossa väkeviä hajukaasuja poltettaisiin hajukaasukattilalla ainoastaan natriumbisulfiitin kulutuksen perusteella. Kun natriumbisulfiittisäiliön pinta laskee alle tavoitetason, väkevät hajukaasut ohjattaisiin soodakattilalta takaisin hajukaasukattilalle poltettavaksi. Säiliön pinnan saavuttaessa jälleen halutun tason, niin väkevät hajukaasut käännettäisiin takaisin soodakattilalle. Muitakin vaihtoisia ajomalleja on toki olemassa, kuten väkevien hajukaasujen jatkuva, mutta vähäinen poltto hajukaasukattilalla. Lisäksi alustavat havainnot viittaavat siihen, että natriumbisulfiitin muodostuminen ei välttämättä edellytä väkevien hajukaasujen polttoa, vaan pelkkä metanolin poltto saattaa riittää tuottamaan tarvittavan määrän natriumbisulfiittia prosessin tarpeisiin. Päällimmäisenä tavoitteena olisi kuitenkin löytää ratkaisuja, joilla pienentää hajukaasukattilan päästöjä ja kemikaalikustannuksia, eli tarkemmin SO_2–pesurin NaOH:n kulutusta.

Tutkimuksen ongelmakohdaksi voivat muodostua erätuotannon tuomat haasteet ja muutokset tehtaan sulfiditeetissä. Haasteena erätuotannossa on väkevien hajukaasujen kääntäminen paikasta toiseen jatkuvasti, joka voi näkyä hetkellisesti korkeampina päästöinä, kun palamisolosuhteet kattiloissa muuttuvat. Myös muodostuvan natriumbisulfiitin määrä vaihtelee erätuotannolla, jolloin voidaan päätyä tilanteeseen, jossa natriumbisulfiitti loppuu kokonaan. Merkittävä riski liittyy myös sulfiditeetin nousuun, joka vaikuttaa koko prosessin tasapainoon. Mikäli kemikaalikierrossa olevan natriumin määrä vähenee ja väkevien hajukaasujen sisältämä rikki jää entistä enemmän kiertoon polttopaikan muutoksen seurauksena, kasvaa sulfiditeetin nousun riski huomattavasti.

1.3 Tutkimus kysymykset

Työn tavoitteena on löytää vastauksia seuraaviin keskeisiin tutkimuskysymyksiin:

- Onko natriumbisulfiitin erätuotanto hajukaasukattilalla mahdollista?

Erätuotantomallin toteuttaminen vaikuttaa teoriassa mahdolliselta, mutta siihen liittyvät välilliset vaikutukset saattavat tehdä siitä käytännössä epäsopivan vaihtoehdon. Mallin ideana olisi polttaa väkeviä hajukaasuja tietty aika hajukaasukattilalla, jonka jälkeen väkevien hajukaasujen poltto keskitetään soodakattilaan. Vaihtelevat olosuhteet polttamisessa saattavat näkyä korkeampina päästöinä molemmilla kattiloilla. Lisäksi erätuotanto vaatii myös operaattoreilta aktiivisia toimia ajomallin jatkuvaan muutokseen, mikä lisää operatiivista kuormitusta.

- Onko muita mahdollisia ajomalleja, joilla turvataan natriumbisulfiitin tuotanto ja varmistetaan väkevien hajukaasujen käsittelyn sekä polton varmuus?

Väkeville hajukaasuille on olemassa kaksi eri polttopaikkaa, joten vaihtoehtoisia ajomalleja on olemassa. Yhtenä pohdinnan kohteena on, onko väkevien hajukaasujen poltto ylipäätään tarpeen natriumbisulfiitin muodostamiseksi hajukaasukattilalla. Mahdollista voisi olla myös polttaa vain pieni osuus väkevistä hajukaasuista, mikäli se riittää tuottamaan prosessissa tarvittavan määrän natriumbisulfiittia. Näitä erilaisia ajomalleja olisi tärkeä päästä kokeilemaan käytännössä, mutta ennen sitä on kuitenkin mietittävä niiden hyödyt ja haitat läpi teoriatasolla. Vaihtoehtoisen ajomallin täytyy tuottaa natriumbisulfiittia ja samalla pitää hajukaasujen käsittely turvallisena ja varmalla tasolla vaarantamatta muuta prosessia.

- Onko vaihtoehtoisella ajomallilla mahdollisuus saavuttaa kemikaalisäästöjä?

Mikäli hajukaasukattilalla voidaan tuottaa natriumbisulfiittia vain kulutusta vastaava määrä, niin silloin kemikaalien kokonaiskulutus pienenee. Natriumbisulfiitin valmistukseen käytetään väkeviä hajukaasuja ja NaOH–kemikaalia. Väkevien painottuessa soodakattilalle, niin hajukaasukattilan SO_2–pesurin NaOH:n kulutus pienenee. Pienempi kemikaalitarve tarkoittaa suoraan myös alempia kustannuksia. Tämä on tärkein tutkimuskysymys, jota lähdettiin selvittämään. Ennen tätä, täytyy kuitenkin löytää edellisiin kysymyksiin ratkaisut.

- Onko vaihtoehtoisella ajomallilla vaikutusta päästöjen määrään ja jakautumiseen?

Tehtaiden muodostamien päästöjen osuutta halutaan yleisesti pienentää. Sama tavoite on myös Kaukaalla. Onko uusien ajomallien myötä mahdollista löytää vaihtoehto, jolla soodakattilan ja hajukaasukattilan päästöt jäävät nykyiseen tilanteeseen nähden pienemmiksi. Ajomallien koeajot tulevat osoittamaan mahdolliset muutokset päästöjen jakautumisessa ja kokonaismäärien vähenemisessä.

1.4 Rajaukset

Tutkimukselle on asetettu rajoja, jotta työn laajuus pysyy realistisena ja hallittavissa. Tutkimuksen ulkopuolelle on jätetty natriumbisulfiitin vaikutusten tarkastelu kuitulinjan toimintaan. Työssä on käytetty ainoastaan nykyisiä kemikaalijäämätasoja, eikä niiden vaikutuksia kuitulinjan klooridioksidipäästöjen muodostukseen ole käsitelty. Ulkopuolelle on rajattu myös sellutehtaan sulfiditeetin pienentämisen mahdollisuudet, eli erilaiset keinot vähentää rikin määrää kemikaalikierrosta. Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan Kaukaan hajukaasukattilan ja siihen liittyvän järjestelmän tilannetta koskeviin asioihin, eikä muihin vastaaviin järjestelmiin tai kattilaratkaisuihin. Toki mahdollisesti joitakin osia työstä voidaan hyödyntää sellaisenaan tai soveltaen muissa vastaavissa kohteissa.

1.5 Työn rakenne

Työ jakautuu kirjallisuusosaan ja käytännön tehtäväosaan. Työ alkaa tutustumalla sellutehtaaseen ja sen prosessiin. Tutustutaan sellunvalmistuksen eri vaiheisiin ja niiden keskeisiin asioihin. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan sellutehtaan hajukaasuja ja

selvitetään vastauksia seuraaviin kysymyksiin. Mitä ne ovat? Mistä niitä muodostuu? Miten niitä käsitellään ja poltetaan? Lisäksi perehdytään hajukaasuihin liittyviin kemikaaleihin sekä päästöihin.

Seuraavassa osiossa siirrytään tehtaan nykytilanteen tarkasteluun hajukaasujen osalta. Tehtaalla tapahtuvan muodostumisen, keräilyn ja käsittelyn kautta päästään syvemmälle sisään hajukaasujen maailmaan käytännön tasolla. Myös hajukaasuihin liittyvät päästöt ovat keskeisessä roolissa tätä osiota. Tämän jälkeen käsitellään natriumbisulfiitti, joka on tämän työn keskeisiä kemikaaleja.

Neljännessä luvussa syvennytään hajukaasujen polton reunaehtoihin ja mahdollisiin vaihtoehtoisiin ajomalleihin. Eri ajomalleja vertaillaan, jotta löydetään paras ratkaisu Kaukaan sellutehtaalle. Osiossa käsitellään myös tulevia koeajoja ja SO_2–pesuria, joka on keskeinen komponentti hajukaasujärjestelmässä ja natriumbisulfiitin tuotannossa.

Viidennessä ja kuudennessa luvuissa käsitellään tutkimuksessa saatuja tuloksia. Ensimmäisenä tulkitaan koeajojen tuloksia ja niissä havaittuja muutoksia hajukaasujärjestelmässä, päästöissä, natriumbisulfiitin tuotannossa ja kuitulinjan kemikaalijäämissä. Tämän jälkeen arvioidaan diplomityön taloudellisia vaikutuksia ja päästöjen muutoksia, mitkä ovat työn kannalta tärkeimmät tulokset.

Seitsemännessä luvussa esitetään mahdollisia parannusehdotuksia hajukaasujärjestelmään, mitä työn aikana havaittiin. Parannusehdotuksilla voidaan parantaa nykyistä hajukaasujärjestelmän tilannetta Kaukaalla ja luoda siitä toimivamman kokonaisuuden.

2 Sellutehtaan prosessi ja hajukaasut

Tässä kappaleessa tutustutaan sellun tuotantoon ja sellutehtaan hajukaasuihin. Aluksi lyhyt katsaus UPM Kaukaaseen. Tämän jälkeen käydään läpi sellun valmistuksen vaiheet pääpiirteittäin. Sitten selvitetään, mitä hajukaasut ovat, mistä ne koostuvat sekä miten niitä kerätään ja poltetaan. Lisäksi perehdytään kemikaaleihin, jotka liittyvät hajukaasuihin ja hajukaasukattilaan. Lopuksi vielä tarkastellaan hajukaasujen aiheuttamia ympäristöllisiä vaikutuksia sekä päästöjä, joita hajukaasujen polton yhteydessä muodostuu.

2.1 UPM Kaukas

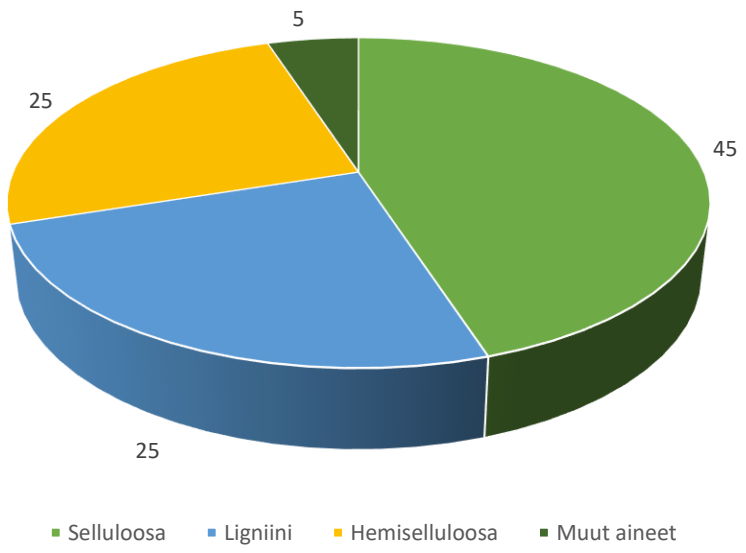
UPM Kaukas on UPM–Kymmene Oyj:n biometsäteollisuuden integraatti Lappeenrannassa (kuva 1). Kaukaalla sijaitsee sellu– ja paperitehdas, biojalostamo sekä saha. Integraatin alueella on myös UPM:n suurin tutkimus- ja tuotekehityskeskus. Lisäksi UPM Metsän toimintaa puunhankinnan johdon ja metsäpalvelutoimiston osalta. Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitos, joka tuottaa lämpöä ja sähköä tehtaan lisäksi myös kaupungin asukkaille, sijaitsee niin ikään tehdasintegraatin alueella. (UPM Kaukas 2024b.)

Kuva 1. UPM Kaukas integraatti (UPM Kaukas 2024c).

Kaukaan tehtailla tuotetaan vuosittain 700 000 tonnia havusellua, 300 000 tonnia päällystettyä aikakausilehtipaperia, 380 000 m^3 sahatavaraa sekä 130 000 tonnia uusiutuvaa dieseliä ja uusiutuvaa naftaa. Kaukaan integraatin alueella työskentelee noin 1 000 henkilöä, minkä lisäksi lähes päivittäin noin 500 urakoitsijan työntekijää ja kesäisin noin 170 kesätyöntekijää. (UPM Kaukas 2024a; UPM Kaukas 2024b.)

2.2 Sulfaattisellun valmistusprosessi

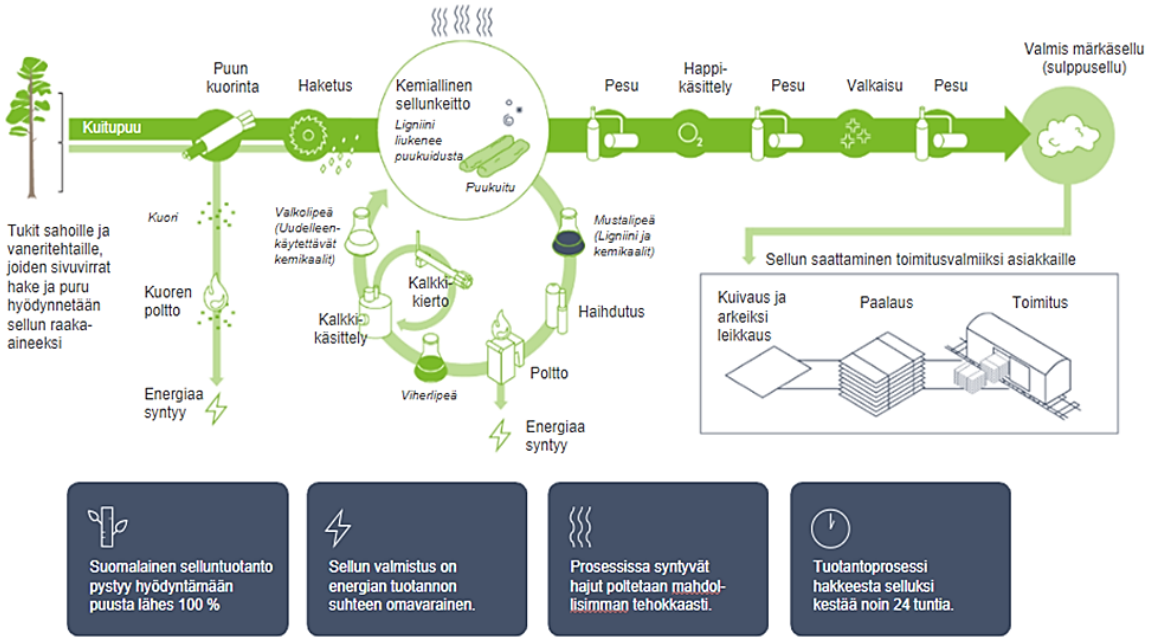
Sellua valmistetaan puun kuiduista. Puun rakenteesta noin 50 % on vettä ja loput kiinteitä jakeita. Kuivasta osuudesta on noin 45 % selluloosaa, 25 % hemiselluloosaa, 25 % ligniiniä ja loput 5 % muita orgaanisia sekä epäorgaanisia aineita (kuva 2). Sellun valmistuksessa tavoitteena on erottaa kuidut, eli poistaa kuitujen välisenä sidosaineena toimiva ligniini. Sellua voidaan valmistaa usealla eri menetelmällä. Mekaanisesti, kemimekaanisesti tai kemiallisilla menetelmillä. Kemiallisiin menetelmiin kuuluvat sulfaatti- ja sulfiittimenetelmät. Sulfaattimenetelmä on sellun valmistuksessa kaikista menetelmistä käytetyin, sillä jopa 80 % maailman selluntuotannosta perustuu sulfaattimenetelmään. (Suhr et al. 2015, s. 5, 195.)



Kuva 2. Puun kuivan osuuden rakenteen jakauma.

2.2.1 Raaka-aineen vastaanotto

Sulfaattisellun valmistusprosessi alkaa puunhankinnasta ja -käsittelystä. Raaka-aineena käytetään pääosin pyöreää puuta. Vaihtoehtona pyöreälle puulle on käyttää valmista haketta tai muita metsäteollisuuden sivuvirtoja. Ensimmäisenä puu kuoritaan. Kuorinta tapahtuu yleensä puiden hankautuessa toisiaan vasten kuorintarummussa. Tämän vaiheen jälkeen kuoritut puut haketetaan hakkeeksi, eli pieniksi lastuiksi. Tarkoituksena on saada hakkeesta mahdollisimman tasalaatuista, jotta sellun tuotannon seuraavat vaiheet onnistuvat parhaalla mahdollisella tavalla ja saadaan valmistettua laadukasta sellua. Hyvälaatuinen hake tehostaa sellun valmistusta ja vähentää raaka-aineen hävikkiä. Kuorimisessa syntyvää kuorta hyödynnetään uusiutuvana biopolttoaineena erillisissä voimalaitoksissa energian tuotannossa. Sellunvalmistuksessa puunkuoresta on vain haittaa, sillä se heikentää valmiin sellumassan lujuutta ja samalla alentaa tavoiteltua lopputuotteen vaaleutta. (Suhr et al. 2015, s. 197.) Kuvassa 3 on esitetty sulfaattisellun valmistusprosessi ja muutamia kiinnostavia faktoja selluprosessista.



Kuva 3. Sulfaattisellun valmistusprosessi (UPM Intranet 2024).

Kuvassa 3 on esitetty sulfaattisellunvalmistuksen päävaiheet. Tästä voidaan huomata sellunvalmistuksen olevan monivaiheinen ja pitkä prosessi. Prosessi on puun ja sen kuitujen osalta suoraviivainen valmiiksi selluksi asti. Kemikaalit tekevät prosessiin ulkoisia silmukoita, mitkä kertovat tehokkaasta kemikaalien uudelleenkäytöstä prosessissa.

2.2.2 Kuitulinja

Puun kuitujen välinen ligniini poistetaan kemiallisessa sulfaattimenetelmässä keittämällä haketta keittokemikaalien kanssa. Keittokemikaalina käytetään valkolipeää, joka sisältää natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumsulfidia (Na_2S). Ennen keittämisen aloittamista hake kuumennetaan höyryllä, jotta hakkeen sisältämä ilma ja vesi saadaan mahdollisimman hyvin pois lastuista. Tämä vaihe suoritetaan parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi, jotta keittokemikaalit pääsevät tasaisemmin vaikuttamaan koko keitettävään kappaleeseen. Keittäminen voidaan toteuttaa joko eräkeittona tai jatkuvatoimisena prosessina. Eräkeittämisessä käsitellään tietty määrä haketta kerralla, minkä jälkeen kierto alkaa alusta. Vastaavasti jatkuvatoimisessa keitossa prosessi on jatkuva, eli keittäminen tapahtuu keittimen eri vaiheiden läpi edetessä. (Suhr et al. 2015, s. 197.)

Seuraavaksi keitetty massa pestään monivaiheisessa pesuprosessissa, eli pesemössä. Tarkoituksena on saada mustalipeä, eli keittokemikaalit ja liuenneet orgaaniset aineet, erilleen irronneista kuiduista. Pesemön yhteyteen liittyy usein myös happivaihe, jossa ligniinin poistaminen jatkuu keittämisen jälkeen. Tämän jälkeen kuitumassa jatkaa matkaa seulontaan, jossa massan laatua parannetaan erottelemalla erikokoiset ja selluun kuulumattomat kappaleet pois massasta. (Suhr et al. 2015, s. 199–200.)

Seuraavaksi sellu saapuu valkaisuun, jossa tarkoituksena on valkaista keittämisen jälkeen väriltään ruskea massa haluttuun vaaleuteen. Valkaisu on myös pesemön tapaan monivaiheinen prosessi, missä massa kulkee vaiheesta toiseen. Valkaisussa käytetään massan valkaisuun kemikaaleja, joista yleisimpiä ovat klooridioksidi (ClO_2), happi (O_2), vetyperoksidi (H_2O_2) ja natriumhydroksidi (NaOH). Yleensä eri vaiheissa käytetään eri kemikaaleja, jotta valkaisureaktiot olisivat erilaisia ja tasapainottaisivat toisiaan. Valkaisun jälkeen massa vielä seulotaan uudestaan samoin kuin pesemön jälkeen. (Suhr et al. 2015, s. 200–203.)

2.2.3 Kuivatus ja toimitus

Lopuksi valmis sellu pakataan ja kuljetetaan muualle jatkojalostusta varten. Kuvassa 4 on yksi vaihtoehtoinen pakkausmuoto. Vaihtoehtoisesti sellu voidaan käyttää myös integroidun tehtaan tilanteessa heti valmistuspaikan läheisyydessä. Integroidulla tehtaalla tarkoitetaan sitä, että sellutehtaan läheisyydessä on jokin muu tehdas, kuten paperitehdas, joka pystyy hyödyntämään valmiin sellun omana raaka-aineenaan. Kun alueella ei ole sellua hyödyntävää tehdasta, niin sellu joudutaan kuljettamaan muualle jatkojalostusta varten. Ennen kuljetusta sellu on kuitenkin järkevää kuivata säilyvyyden ja kuljetuskustannusten takia. Kuljettaminen on yksinkertaisesti helpompaa, kun sellu on pakattu järkevään muotoon ja helposti käsiteltäväksi. Tarkoituksena on saada sellun kuiva–ainepitoisuus noin 90 % tasolle ennen kuljetusta. (Fardim 2011, s. 602.)

Kuva 4. Kuivattua sellua paalaamossa, jossa sellusta tehdään helposti käsiteltäviä sellupaaleja kuljetusta varten (UPM Intranet 2024).

Kuivatusta varten on olemassa useita erilaisia menetelmiä. Aluksi suurin osa vedestä poistetaan yleensä mekaanisesti puristamalla, esimerkiksi sylintereitä ja viiroja hyödyntäen. Tämän jälkeen lopullinen kuivatus haluttuun arvoon tapahtuu haihtumisen kautta, eli prosessiin tuodaan tarvittava määrä lämpöä, jolloin kosteus siirtyy sellusta ympäröivään ilmaan. Tämä ilmavirtauksen lämpö voidaan hyödyntää vielä ennen kuin se ohjataan kosteuden kanssa pois prosessista. (Fardim 2011, s. 602–605.)

2.2.4 Talteenottojärjestelmä

Sellutehtaan osaksi kuuluu merkittävänä tekijänä kemikaalien kierto, eli tuttavallisemmin talteenottojärjestelmä. Tämän ansiosta kemikaaleja voidaan käyttää uudelleen ja vähentää uusien kemikaalien osuutta. Samalla kustannukset pienenevät ja päästöt ympäristöön vähenevät. Lipeäkierrossa keittämöltä, pesmöltä ja mahdollisesti myös valkaisulta tulevat lipeävirrat kerätään talteen. Kerätty mustalipeä ohjataan talteenoton puolelle, jossa se menee haihduttamolle ensimmäisenä. Haihduttamolla mustalipeän kuiva-aine pitoisuutta nostetaan vaiheittain soodakattilassa polttoa varten. Kuitulinjalta lähtevän mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 15 % ja haihduttamossa tämä arvo nostetaan noin 80 %, jotta polttaminen soodakattilassa olisi optimaalista ja turvallista. (KnowPulp 2023.)

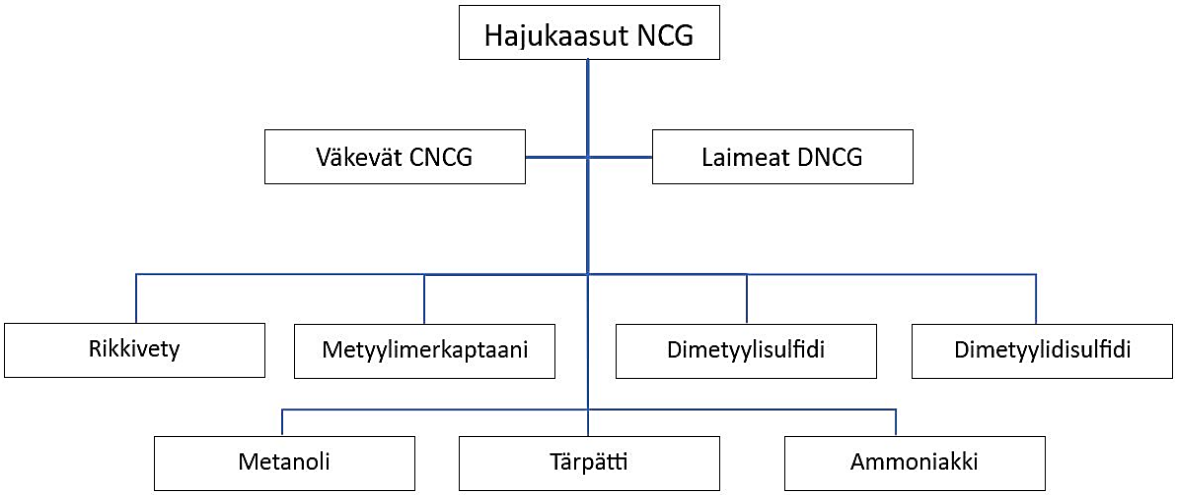
Soodakattilaan syötetty mustalipeä palaa ja kemiallisten reaktioiden kautta kattilasta ulos tuleva kemikaalisula sekoitetaan laihavalkolipeään, jolloin muodostuu viherlipeää. Viherlipeä koostuu pääosin natriumsulfidista (Na_2S) ja natriumkarbonaatista (Na_2CO_3). Tästä pääsemme seuraavaksi käsittelemään kaustisointia ja meesanpolttoa, mitkä muodostavat oman kemikaalikierron osana talteenottoa. Tätä kemikaalikiertoa kutsutun kalkkikierroksi, jossa kiertävänä kemikaalina on kalkki. Kalkin tehtävänä on muuttaa tuleva viherlipeä valkolipeäksi. Kaustisoinnissa viherlipeän natriumkarbonaatti (Na_2CO_3) reakoi kalkin eli kalsiumoksidin (CaO) ja veden (H_2O) muodostaman seoksen kanssa. Yhtenä reaktiotuotteeena muodostuu natriumhydroksidia ($NaOH$), joka on valkolipeän aktiivinen kemikaali. (Suhr et al. 2015, s. 206.)

Kalsiumoksidin ja natriumkarbonaatin toisena reaktiotuotteena muodostuu kalsiumkarbonaattia ($CaCO_3$), eli tuttavallisemmin meesaa. Tämä meesa pyritään palauttamaan kalkkikierrossa takaisin kalsiumoksidiksi, joka reakoi uudelleen viherlipeän kanssa muodostaen valkolipeää. Meesan poltto tapahtuu meesauunissa, joka on pitkä pyörivä uuni. Tämä prosessin vaihe tarvitsee toimiakseen korkeaa lämpötilaa, joka tuodaan prosessin ulkopuolelta polttamalla meesauunissa jotain polttoainetta, esimerkiksi maakaasua tai öljyä. Meesan poltossa muodostuu haluttua kalsiumoksidia, mutta toisena reaktiotuotteena syntyy hiilidioksidia (CO_2). (KnowPulp 2023.)

2.3 Hajukaasut

Hajukaasut (NCG, Non–Condensable Gases) ovat prosessin eri vaiheissa syntyneitä pahanhajuisia kaasuja. Hajukaasut jakautuvat kahteen pääluokkaan, jotka ovat väkevät hajukaasut (CNCG, Concentrated Non-Condensable Gases) ja laimeat hajukaasut (DNCG, Diluted Non–Condensable Gases). Nimiensä mukaisesti hajukaasujen jakaminen eri luokkiin tapahtuu väkevyyden mukaan. Kuvassa 5 on hajukaasujen kaksi pääluokkaa ja hajukaasujen keskeisimmät komponentit. Hajukaasujen keräily on tärkeä osa nykyisten sellutehtaiden toimintaa. Nykyaikaiset menetelmät ja tekniikat mahdollistavat hajukaasujen laadukkaan keräilyn, niin että tehdas on hajukaasujen osalta lähes kokonaan hajupäästötön. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297.)

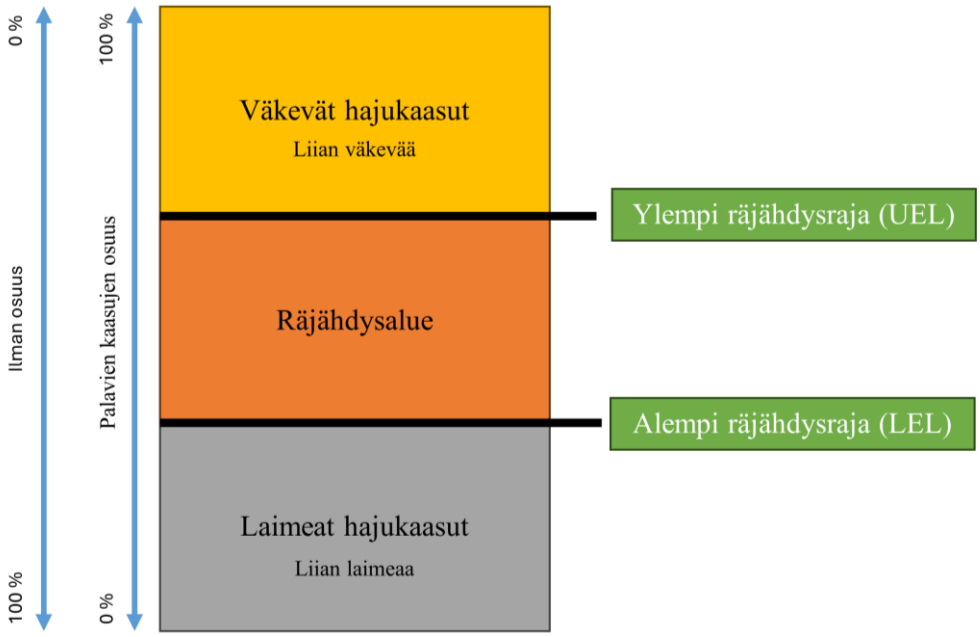
Hajukaasut kattavat monia erilaisia kaasuja, joista suurin osa on rikkipitoisia kaasuja. Rikkipitoisilla kaasuilla on erittäin alhainen hajukynnys, eli hajuaisti havaitsee jo pienetkin pitoisuudet ilmassa. Merkittävimmät hajukaasut ovat rikkivety (H_2S), metyylimerkaptaani (CH_3SH), dimetyylisulfidi ($(CH_3)_2S$) ja dimetyylidisulfidi ($(CH_3)_2S_2$). Lisäksi hajukaasuissa on muita orgaanisia yhdisteitä, kuten metanoli (CH_3OH), tärpätti ($C_{10}H_{16}$) ja ammoniakki (NH_3). (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297.)



Kuva 5. Hajukaasujen luokittelu ja tärkeimmät yksittäiset komponentit, joista hajukaasut muodostuvat.

Väkeviin hajukaasuihin luokitellaan kaasut, joissa muodostuneen rikin määrä on noin 2–6 kgS/ADt (kilogrammaa rikkiä/kuivattu sellu tonni). Väkevät hajukaasut voivat palaa, sillä ne asettuvat ylemmän räjähdysrajan yläpuolelle (UEL, Upper Explosive Limit) (kuva 6). Palaminen ei kuitenkaan tapahdu ilman happea ja siten tason laskemista räjähdysalueelle. Väkeviä hajukaasuja täytyy laimentaa ilmalla, jotta palamiselle optimaaliset olosuhteet ovat valmiit. Palaminen tai räjähdys vaatii kuitenkin vielä kemiallisen ketjureaktion, eli niin sanotusti palon alun, josta reaktio saa alkunsa. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297–298.)

Laimeat hajukaasut sisältävät samoja kaasuja kuin väkevät hajukaasut, mutta laimeampana seoksena. Laimeat hajukaasut ovat alemman räjähdysrajan alapuolella (LEL, Lower Explosive Limit). Ne eivät voi sellaisenaan syttyä tai räjähtää. Laimeat hajukaasut sisältävät paljon ilmaa, jolloin palavaa materiaalia ei ole riittävästi. Määrällisesti laimeita hajukaasuja muodostuu sellunvalmistuksessa yleensä enemmän. Laimeiden hajukaasujen keräilyyn on panostettu entistä enemmän. Molemmat hajukaasulajit ovat todella tärkeitä kerätä talteen ja hävittää asianmukaisesti, jotta tehdas voi saavuttaa hajupäästöjen osalta monesti tavoitellun nollatason. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297–298.) Laimeiden hajukaasujen rikkipitoisuus on noin 0,1–0,5 kgS/ADt ja muodostuva määrä on noin 300–400 m^3n/ADt (Suomen soodakattilayhdistys 2023, s. 29).



Kuva 6. Kaasuseoksen väkevyys ja räjähdysrajat, jotka määräytyvät kaasun koostumuksen mukaisesti tietyille tasoille (mukailtu: Soodakattilayhdistys 2023, s. 12).

Räjähdysrajat määrittävät räjähdysalueen, jolla palavan materiaalin ja hapen osuudet ovat sellaisella tasolla, että palaminen etenee itsestään. Mikäli jompaa kumpaa seoksessa on liikaa, niin silloin asetutaan räjähdysalueen ulkopuolelle. Ylimääräinen happi tekee seoksesta liian laimean, kun taas liian suuri palavien osuus estää palamisen hapen puutteen vuoksi. Räjähdysrajat ovat yksilölliset eri kaasuilla. Niihin vaikuttaa lämpötila ja paine. Lisäksi myös polttopaikan geometria, koko, lämmönjohtavuus sekä millainen sytytyslähde on. (Nassimi 2017, s. 384–385.)

Väkevät ja laimeat hajukaasut täytyy kerätä, pitää ja loppukäsitellä erillään, koska niiden sekoittuessa muodostuu räjähdysherkkä kaasuseos. Toisen ollessa räjähdysrajan ylemmällä tasolla ja toisen vastaavasti alemmalla tasolla, jolloin näiden sekoittuessa syntyvä kaasuseos on optimaalisella räjähdysalueella. Väkevien kanssa on erityisen tärkeää pitää ne erillään ilmasta ja varmistaa järjestelmien ilmatiiveys, etteivät ne laimene liikaa ja päädy räjähdystasolle. Hajukaasuja muodostuu monissa sellun valmistuksen vaiheissa, eikä aina kaikkia muodostumiskohteita edes tiedosteta. Asia on onneksi korjaantunut parempaan suuntaa tiedon lisääntyessä. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297–298.)

Hajupäästöjä ympäristöön ilmaantuu yleisimmin erilaisissa häiriötilanteissa tehtaiden laitteistoissa tai prosesseissa. Hajupäästöjen johtaminen ympäristöön on kuitenkin viimeinen vaihtoehto, jos muuta ratkaisua hajukaasujen käsittelylle ei ole saatavilla. Häiriötilanteiden varalle on hyvä olla toimivat päälaitteet ja järjestelmät sekä mahdollisia varavaihtoehtoja, jotta hajupäästöt saadaan pidettyä turvallisesti hallinnassa. Hajukaasuja voidaan yleensä keräillä jonkin aikaa, vaikka poltto mahdollisuutta ei hetkellisesti olisikaan tarjolla. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297–298.)

2.3.1 Muodostuminen ja keräily

Väkevien hajukaasujen muodostumiseen vaikuttavat tuotantomenetelmä, keitinjärjestelmä (erä tai jatkuvatoiminen), valkolipeän sulfiditeetti, mustalipeän kuiva–ainepitoisuus polttoon mennessä ja mustalipeän säilytyslämpötilat. Väkeviä hajukaasuja muodostuu enemmän lehtipuusellun kuin havupuusellun valmistuksessa. Selluntuotannossa hajukaasujen muodostumisen olosuhteet ovat jatkuvassa murroksessa, jolloin on vaikea tarkasti määrittää muodostuvien hajukaasujen määrää ja koostumusta. Tästä syystä hajukaasujen koostumusta ei voida pitää siten aina täysin samanlaisena. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 297–298.)

Väkeviä hajukaasuja muodostuu monessa kohdassa kuitulinjan ja etenkin talteenoton puolella. Kuitulinjan väkevien hajukaasujen muodostuminen alkaa keittimessä, kun keittokemikaalit reagoivat hakkeen kanssa. Jatkuvatoimisessa keittimessä keräiltävä hajukaasuvirta on tasainen, mutta eräkeitossa muodostuminen on enemmän jaksottaista. Keittämiseen liittyy myös vahvasti tärpätti ja sen erottaminen, mikä on yksi merkittävä hajukaasuja muodostumispaikka. Tärpättivarastosäiliö, –pesuri ja –dekantteri, jolla tärpätti erotetaan, ovat kaikki väkevien hajukaasujen keräilykohteita. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 298–300; Suhr et al. 2015, s. 287–288.)

Kuitulinjoilta väkevien hajukaasujen keräyksen piiriin kuuluu yleensä niin säiliöitä kuin prosessilaitteita. Säiliöihin kuuluvat tärpätin varastosäiliö, likaislauhdesäiliöt ja paineelliset lipeäsäiliöt. Prosessilaitteita, joista keräilyä suoritetaan ovat keittimen kaasaus, kiehutin (reboiler), lipeän paisunnan hönkälauhdutin ja aiemmin mainittu tärpätinerotuslaitteisto. Lisäksi hakesiilossa voi muodostua laimeita väkevämpiä hajukaasuja. Näitä ei kuitenkaan johdeta väkevien keräysjärjestelmään. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 48.)

Talteenotossa kerätään väkeviä hajukaasuja likaislauhdejärjestelmän eri vaiheista, kuten likaislauhdesäiliöistä ja likaislauhduttimista. Yksi merkittävä keräilykohde likaislauhdejärjestelmästä on strippauskolonnin jälkeiset hajukaasut (SOG, Stripper Off-Gases). SOG–kaasuja tulisi käsitellä erillään muista väkevien hajukaasujen lähteistä, jos tehtaalla ei ole metanolilaitosta. SOG–kaasut sisältävät pääosin metanolia, TRS–yhdisteitä, terpeeneitä, orgaanisia yhdisteitä ja höyryä. Edellisten lisäksi väkevien hajukaasujen keräilyä suoritetaan haihduttamon paineistetusta polttolipeäsäiliöstä ja tyhjiökaivosta sekä metanolisäiliöstä, mikäli tehtaalla on olemassa metanolin nesteytyslaitos. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 298–300.)

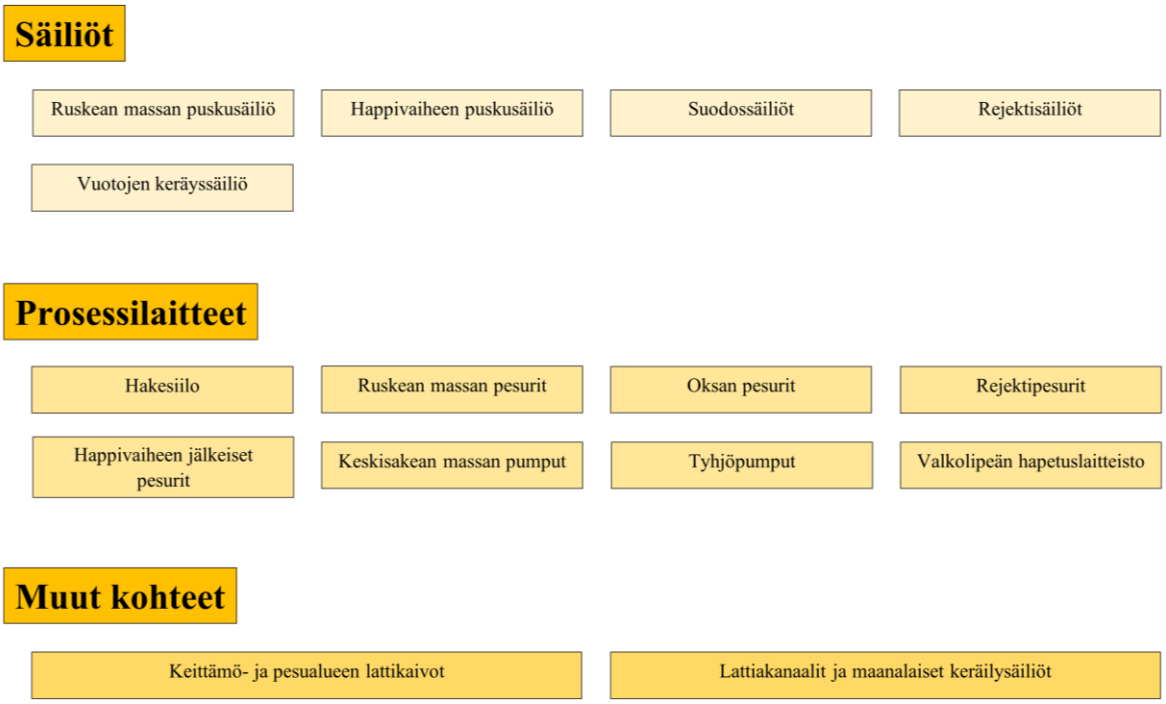
Hajukaasujen keräilyä on aloitettu 1950–luvulla. Aluksi hajukaasuja liikuteltiin putkistoissa puhaltimien avulla. Sen seurauksena väkevät hajukaasut laimentuivat kuitenkin likaa ja laskivat UEL–tasolta räjähdysalueelle. Tämän seurauksena esiintyi paljon räjähdyksiä ja tulipaloja hajukaasujen keräysjärjestelmässä. 1970–luvulla Ruotsissa kehitettiin nykyisinkin edelleen käytössä oleva höyryejektori, jolla väkevien hajukaasujen liikuttaminen yleisesti tapahtuu. Laimeiden hajukaasujen liikuttamisessa käytetään edelleen puhaltimia. (Lin 2005, s. 1.)

Hajukaasuja voidaan pullottaa, eli kerätä järjestelmään ensisijaisen polttopaikan toiminnan lakkautuessa. Pullotus on vain hetkellinen toteutus, jolla annetaan aikaa varapolttopaikan ylösajoon. Pullotuksen aikana hajukaasuja kerääntyy lisää putkistoon ja niiden poistuminen on estetty. Pullotuksen seurauksena hajukaasujärjestelmässä paine nousee. Tämän takia hajukaasujärjestelmä on rakennettava kestämään paineen nousua. Paineen nousua järjestelmässä hidastetaan sulkemalla kaikki höyrysyötöt, eli höyryejektorin ja paineensäätöhöyryn tulot. Mikäli yhtään polttopaikoista ei saada toimintaan, joudutaan hajukaasut ohjaamaan ohituslinjaan, jolla ne ohjataan johonkin turvalliseen paikkaan. Yleensä ohituslinja menee piippuun ja sitä kautta ympäristöön. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 84–86.)

Hajukaasujärjestelmä toimii pitkälti tehokkaan automaation pohjalta, pitäen tehtaan hajupäästöistä vapaana. Automaatio hoitaa muun muassa hajukaasujen pullotuksen aloittamisen ja mahdollisen käännön varapolttopaikkaan häiriötilanteessa. Toki polttamisen aloitus vaatii usein myös operaattorin toimintaa. Kääntäminen varapolttopaikalle tulisi tapahtua niin, ettei hajukaasuja pääse järjestelmän ulkopuolelle. Hajukaasujärjestelmien toiminnan tulisi jatkua myös käyttöenergian loppuessa, eli käytettävissä tulisi olla varajärjestelmä tarvittavan energian tuottamiseen. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 84–86.)

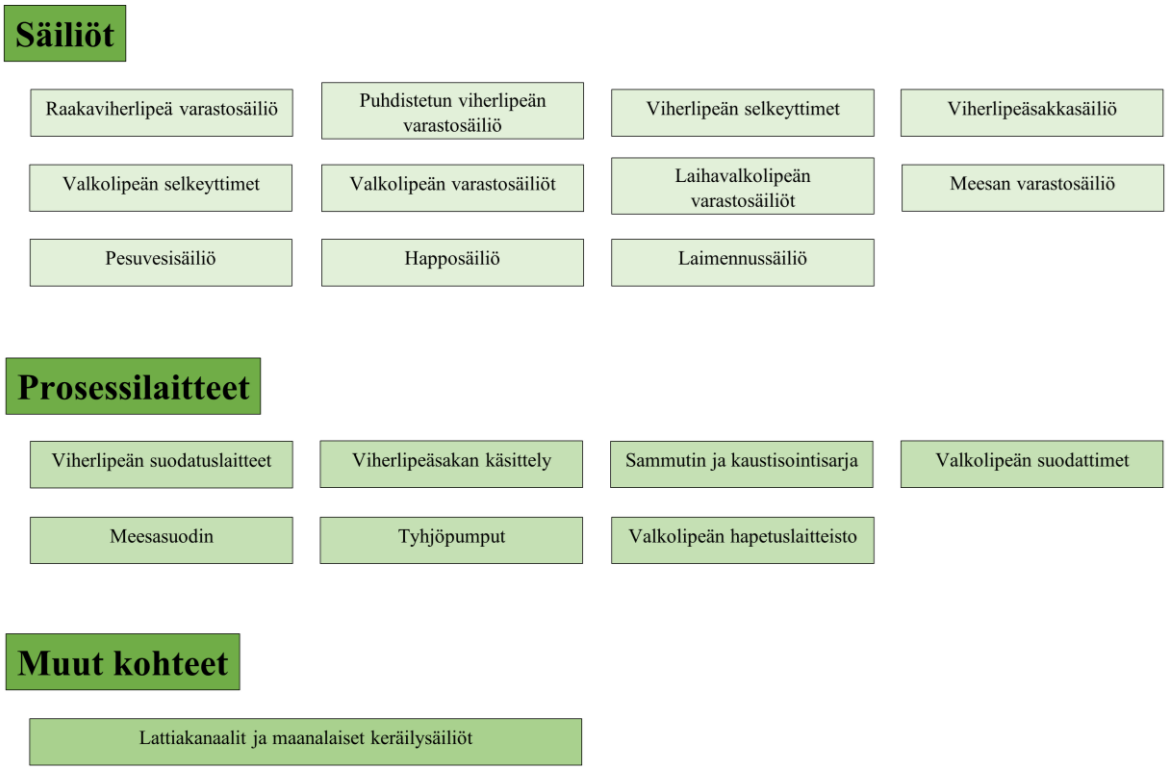
Nykyisin lähes kaikki sellutehtaat keräävät laimeat hajukaasut ja pyrkivät keräämään myös hajanaisia hajupäästöjä. Tästä huolimatta kaikkia rikkipitoisia hajukaasuja ei kuitenkaan voida aivan täysin kerätä. Keräämättä jääneiden osuus on yleensä kuitenkin niin pieni, että voidaan ajatella tehtaiden olevan täysin hajuttomia. Laimeita hajukaasuja muodostuu kaikissa sellun valmistusprosessin vaiheissa, paitsi puun käsittelyssä ja kuivauksessa. Laimeiden hajukaasujen koostumukseen ja määrään vaikuttaa mm. prosessin lämpötilat, käytössä olevat laitteet, keräyskohteet ja –menetelmät. Edellisten lisäksi myös valmistuksessa käytettävä puulaji vaikuttaa hajukaasujen määrään ja laatuun. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 301.)

Kuitulinjan ja talteenoton osastoilta keräyskohteita laimeille hajukaasuille on väkeviä hajukaasuja enemmän. Kuitulinjan tärkeimmät laimeiden hajukaasujen lähteet ovat esitetty kuvassa 7. Laimeiden keräyskohteet ovat luokiteltu kohteen toiminnan mukaisesti säiliöihin, prosessilaitteisiin ja muihin kohteisiin. Vastaavasti kuvassa 8 on esitetty talteenoton kaustisoinnin puolelle luokiteltavat lähteet.



Kuva 7. Kuitulinjan laimeiden hajukaasujen lähteet jaoteltuna kohteiden toiminnan mukaisesti (mukailtu: Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 301).

Laimeiden hajukaasujen lähteitä talteenottojärjestelmän puolella ovat paineettomassa tilassa olevat lipeäsäiliöt, joita suurin osa haihdutusalueen säiliöistä on. Polttolipeäsäiliö on yleensä paineistettu, joten siitä ei kerätä laimeita hajukaasuja. Lisäksi haihdutusalueelta kerättävän suovan säiliöistä kerätään laimeita hajukaasuja. Suovasta voidaan valmistaa sellutehtaalla sivutuotteita, kuten mäntyöljyä. Tosin suovan keräämistä suoritetaan vain havupuusellun valmistuksen yhteydessä. Soodakattilan ympäristössä muodostuu myös hajukaasuja, joista tärkeimmät lähteet ovat liuotussäiliön, tuhkasäiliön sekä tuhkan sekoitussäiliön poistokaasuissa olevat TRS–yhdisteet. Lisäksi joissakin tapauksissa myös kaliumin ja kloorin poistojärjestelmä kuuluvat keräilyn piiriin. Nämä kaasut käsitellään ennen niiden johtamista laimeiden hajukaasujen järjestelmään muiden kerättyjen kaasujen kanssa. Käsittelyllä tarkoitetaan pesemistä, jäähdyttämistä ja pisaranerottamista. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 301–303.)



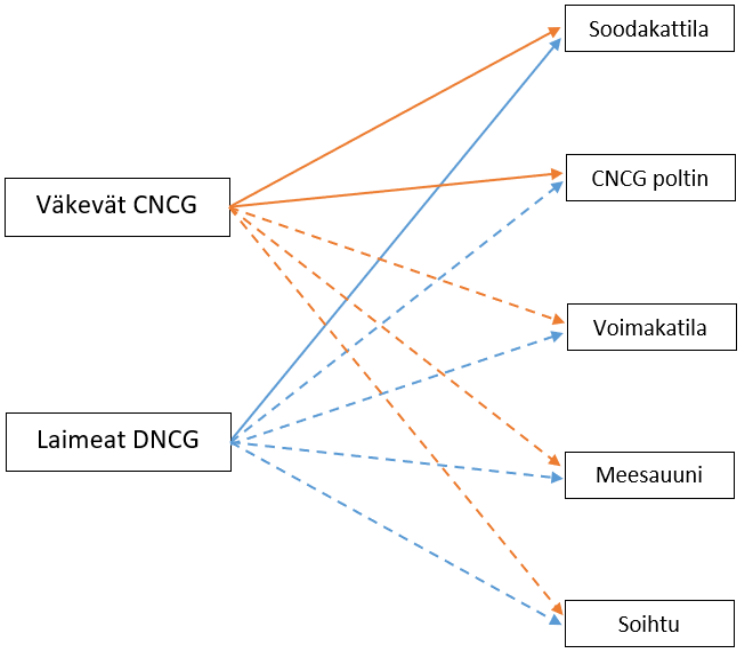
Kuva 8. Talteenoton kaustisoinnin laimeiden hajukaasujen lähteet jaoteltuna kohteiden toiminnan mukaisesti (mukailtu: Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 303).

Kuvasta 8 havaitaan, että kaustisoinnin puolella laimeiden keräilyn piirissä on paljon säiliöitä, enemmän kuin kuitulinjan puolella. Kaustisoinnin laimeiden hajukaasujen keräilyn suhteen on otettava huomioon mahdolliset keräilyjärjestelmän tukkeutumiset, koska osa kaustisoinnin prosesseista ovat pölyäviä ja pöly voi muodostaa tukoksia keräilyjärjestelmään (Suomen soodakattilayhdistys 2023, s. 28).

Sulfaattisellutehtaalla sivutuotteena syntyvää mäntyöljyä käsitellessä muodostuu myös hajukaasuja. Suurin osa muodostuneista hajukaasuista on rikkipitoisuudeltaan alhaisia, joten ne kuuluvat laimeisiin hajukaasuihin. Mäntyöljyn tuotannossa hajukaasuja kerätään sekoitus–, mäntyöljy– ja happovesisäiliöistä. Lisäksi reaktorista ja H_2S–pesurista. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 302.)

2.3.2 Polttaminen

Väkevien ja laimeiden hajukaasujen polttaminen sellutehtailla tapahtuu pitkälti samoissa loppukohteissa, tarjolla olevien vaihtoehtojen mukaisesti (kuva 9). Polttokapasiteetin täytyy olla ylimitoitettu normaalin ajon tilanteeseen nähden. Lisäksi hajukaasujen polttamiselle on hyvä olla olemassa vaihtoehtoisia kohteita, jotta käsittely voidaan suorittaa aina asianmukaisesti. Vaikka yksi polttopaikoista joutuisi syystä tai toisesta pois käytöstä, niin järjestelmä pysyy vakaana toiminnassa. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 304.)



Kuva 9. Hajukaasujen mahdolliset polttopaikat sellutehtailla. Yhtenäinen viiva kuvaa ensisijaista polttopaikkaa ja katkoviiva varapolttopaikkaa.

Laimeiden hajukaasujen polttaminen suoritetaan pääosin soodakattilassa. Kaustisoinnin alueella muodostuneita laimeiden hajukaasujen yhdisteitä poltetaan usein suoraan meesauunissa. Laimeita hajukaasuja esilämmitetään ja syötetään soodakattilaan palamisilmana. Väkevien hajukaasujen polttaminen suoritetaan ensisijaisesti soodakattilassa tai erillisessä hajukaasupolttimessa. Erillistä hajukaasukattilaa käytetään esimerkiksi, jos on tarvetta tuottaa kemikaaleja, kuten natriumbisulfiittia tai rikkihappoa. Vaihtoehtoisia hajukaasujen polttamispaikkoja ovat meesauuni, erillinen voimakattila tai soihtu. (Hovikorpi & Vakkilainen 2019, s. 304.)

Soodakattilassa väkevät hajukaasut syötetään toisioilma tasoon, jossa TRS–päästöt pelkistyvät rikkidioksidiksi. Laimeat hajukaasut taas syötetään aiemmin mainitusti soodakattilan sekundääri– tai tertiääritasoon palamisilmana, jolloin se korvaa osan palamisen tarvitsemasta ilma määrästä. Samat hajukaasujen syöttökohdat soodakattilan mukaisesti ovat myös muissa polttopaikoissa. Meesauuni on yleensä taloudellisesti kannattava polttopaikka soodakattilan lisäksi, koska silloin ei tarvita erillistä kattilaa hajukaasujen polttamista varten, vaan hajukaasut hävitetään muun prosessin ohessa. Erillistä hajukaasukattilaa käytettäessä, voidaan polttaa sekä väkeviä että laimeita hajukaasuja. Tässä vaihtoehdossa kattila tarvitsee hajukaasujen lisäksi kuitenkin yleensä jonkin tukipolttoaineen. Erilliset hajukaasukattilat ovat hyviä hajukaasujen polttopaikkoja tehtaan muiden häiriötilanteiden aikana. Hajukaasukattiaan voidaan yhdistää lämmöntalteenotto, jolloin polttamisessa syntyvä lämpöenergia hyödynnetään esimerkiksi prosessihöyryn tuottamiseen. (Suhr et al. 2015, s. 296–301.)

Hajukaasujen polttaminen edellä mainituissa kohteista nostaa muodostuneiden savukaasujen NO_X–päästöjä. Tämä johtuu etenkin hajukaasujen sisältämästä ammoniakista. NO_X–päästöjen nousua voidaan kuitenkin vähentää oikeilla toimenpiteillä ja käytetyillä tekniikoilla. Yksinkertaisimmat toimet NO_X–päästöjen vähentämisen ovat vaiheittainen polttaminen, polttoaineen oikeanlainen syöttö ja syötön sijoittuminen kattilassa. (Suhr et al. 2015, s. 296–301.)

Hajukaasujen polttaminen on hyviin samantapaista kuin minkä tahansa muunkin kaasumaisen polttoaineen polttaminen. Ehtoina hajukaasujen hyvälle polttamiselle ovat lämpötila yli 871 °C, viipymäaika vähintään 0,75 sekuntia ja ylimääräinen happipitoisuus 3–4 %. Nämä ehdot määrittävät minimit täydelliselle palamiselle. Tosin ehtojen välillä voidaan toimia joustavasti, jolloin täydellinen palaminen toteutuu edelleen. Esimerkiksi jonkin edellä mainitun arvon ollessa suurempi, voidaan toisen arvon sallia olevan hieman pienempi. (Lin 2005, s. 8.)

Kaasun palaminen on jatkuva ketjureaktio. Kaasun syttymisellä tarkoitetaan tilannetta, kun ilma ja kaasu reagoivat keskenään. Tämä reaktio jatkuu omatoimisesti luoden jatkuvan palamisprosessin. Reaktio on jatkuva, kun reaktiossa lämpöä syntyy enemmän kuin sitä vapautuu. Ketjureaktion alkamiseksi tarvitaan jokin alkusysäys, jotta prosessi jatkuu sen jälkeen itsenäisenä. (Raiko 2002, s. 113.)

Kaasupolttimen rakenne ja toiminta ovat yksinkertaisia. Polttimessa tarvitaan palamisilmaa ja poltettavaa polttoainetta. Kaasupolttimessa palamisilma ja kaasu voidaan sekoittaa joko ennen poltinta tai polttoaine voidaan syöttää vasta polttimen polttopään luokse. Esisekoitetussa polttamisessa palamisilma ja kaasu sekoitetaan ennen polttosuuttimeen syöttämistä, mikä nopeuttaa palamista ja näkyy siten lyhyempänä liekkinä. Vastaavasti tilanteessa, jossa on polttoaineen erillinen syöttö polttopäähän, palaminen on hitaampaa ja liekki pidempi. Hitaampi palaminen johtuu siitä, että palamisilman ja kaasun täytyy sekoittua täydellistä palamista varten, mikä ottaa oman aikansa. Palamista voidaan kuitenkin nopeuttaa myös tässä vaihtoehdossa syöttämällä poltettava kaasu kohtisuorassa palamisilmaan nähden ja syöttämällä polttoainetta useammasta erillisestä suuttimesta. (Huhtinen 2000, s. 81, 139–141.)

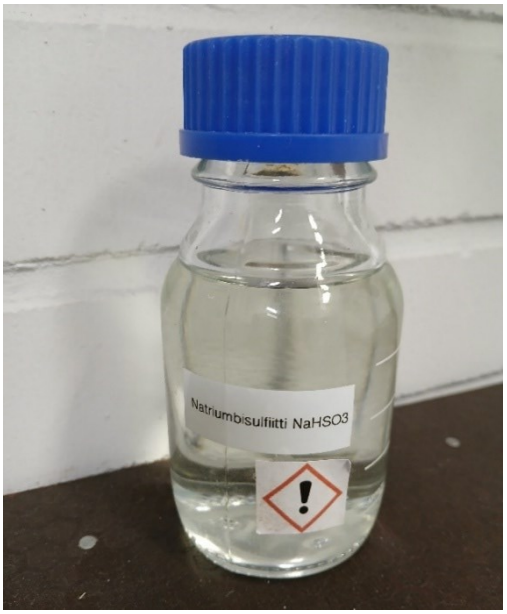
2.3.3 Hajupäästöjen vaikutukset

Sellutehtailla muodostuvien hajukaasujen aiheuttamat hajupäästöt ovat monille tehtaiden läheisyydessä asuville tuttuja. Hajukaasuihin liittyvät TRS–päästöt ovat yleisin hajun aiheuttaja, vaikka toki muitakin hajunlähteitä tehtaalla on olemassa. Esimerkiksi jäteveden ja –lietteen käsittelyssä orgaanisen aineen hajoamisessa muodostuu hajuja. Hajujen suunta, voimakkuus ja altistumisaika vaikuttavat siihen, kuinka aktiivisesti hajupäästöihin reagoidaan ulkopuolisen tahon toimesta. Jokainen ihminen kokee ja käsittelee hajupäästöjä eri tavoin, joten toisia hajupäästöt häiritsevät enemmän kuin toisia. (Suhr et al. 2015, s. 189–192.)

Ulkopuolelta tulevat hajuilmoitukset ovat kuitenkin todella tärkeitä, vaikka monesti ajatellaan siitä koituvan vain mainehaittoja tehtaalle ja yritykselle. Ulkopuoliset ilmoitukset hajupäästöistä ovat yleensä toimeenpanevia voimia havaita, toteuttaa ja reagoida hajujen lähteisiin, sekä suorittaa tarvittavat toimenpiteet asiaankuuluvalla tavalla asian ratkaisemiseksi. Hajupäästöjen käsittely on nykyaikaisilla sellutehtailla yleisesti ottaen hyvällä tasolla. Prosesseja valvotaan ja kehitetään jatkuvasti ja käytössä on laaja skaala teknisiä ratkaisuja hajujen vähentämiseksi. Tämän ansiosta tehtaiden lähialueet kärsivät todella harvoin pitkäaikaisista tai toistuvista hajuongelmista. Toki äkilliset häiriö ja ongelma tilanteet, aiheuttavat monesti hajupäästöjä lähialueelle. (Suhr et al. 2015, s. 189–192.)

2.3.4 Kemikaalit

Natriumbisulfiitti eli natriumvetysulfiitti ($NaHSO_3$) on muun muassa metsä- ja kemianteollisuudessa käytettävä kemikaali, jota käytetään pelkistimenä, vedenpuhdistuksessa kemiallisena hapen– ja kloorinpoistoaineena. Lisäksi sitä voidaan käyttää mekaanisen massan valkaisussa, mäntyöljyn valmistuksessa ja valkaisun klooridioksidi sekä vetyperoksidinjäämien poistamisessa. Puhdas natriumbisulfiitti haisee voimakkaasti rikkidioksidille ja on väriltään kirkkaan keltaista. Se kykenee liukenemaan helposti veteen. Varastosäiliön tulee olla materiaaliltaan ruostumatonta terästä tai muovia, sillä kemikaali syövyttää monia eri metalleja. Natriumbisulfiitti on kierrätettävä tilanteen vaatiessa ongelmajätteenä. (KnowPulp 2023.) Kuvassa 10 on natriumbisulfiittinäyte.



Kuva 10. Natriumbisulfiittinäyte.

Kaukaalla natriumbisulfiittia valmistetaan hajukaasukattilan (HKK) savukaasupesurissa osana savukaasujen käsittelyä. Tämän lisäksi sellutehtaan käyttöön tulee jatkossa nestebiojalostamon sivuvirtana muodostuvaa natriumbisulfiittia. Sellutehdas hyödyntää syntyviä natriumbisulfiitti virtoja omassa tuotantoprosessissaan. (Aluehallintovirasto 2015, s. 17.) Nykyisin nestebiojalostamolta toimitetaan natriumbisulfiittia sellutehtaalle.

Metanoli (CH_3OH) on vesiliukoinen kemikaali, jota käytetään liuottimena ja välillisenä toimijana muiden kemikaalien tuottamisessa. Sellutehtailla metanolia käytetään klooridioksidin valmistuksessa pelkistimenä. Metanoli reakoi reaktioyhtälön 1 mukaisesti, mistä syntyy reaktiotuotteina kloridioksidia (ClO_2), muurahaishappoa (HCOOH) ja vettä (H_2O). Tavallisesti metanoli tunnetaan myös polttoaineena ja jäätymistä estävänä aineena. Sellutehtaalla muodostuvaa metanolia ei voida suoraan käyttää pelkistimenä ilman raskaita puhdistustoimia. Metanoli on erittäin herkästi syttyvää ainetta ja voi aiheuttaa siten räjähdysvaaran suljetuissa tiloissa. Siksi sen käytössä ja varastoinnissa tulee olla huolellinen. Metanoli on terveydelle haitallinen aine jo pienissäkin määrissä ja suuremmat altistukset ovat vaarallisia, jotka voivat johtaa kuolemaan. Tämän takia metanolin kanssa työskennellessä on oltava varovainen ja käytettävä oikeanlaisia suojavarusteita. (KnowPulp 2023.)

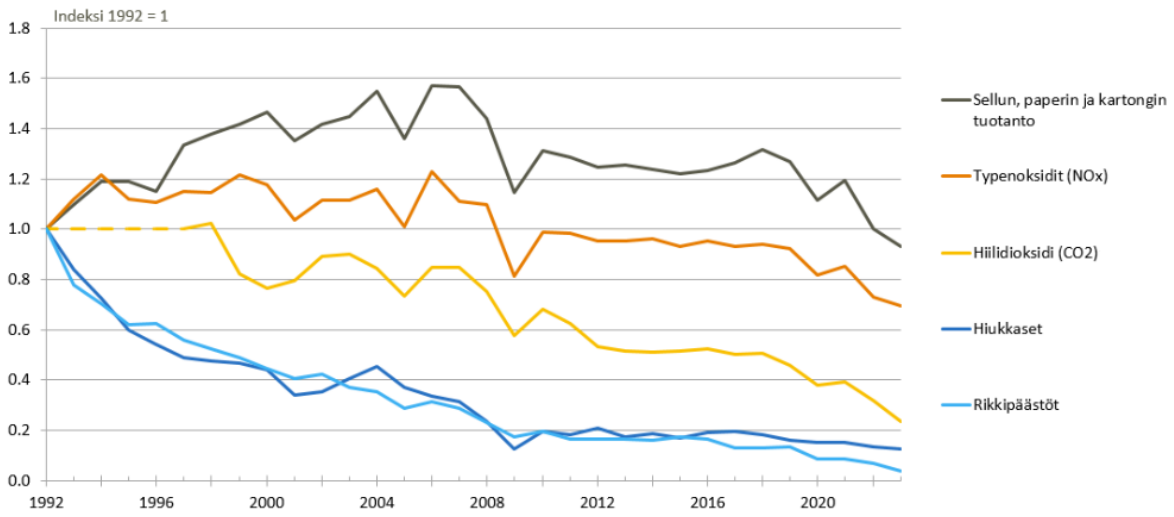
$$4ClO_3^- + CH_3OH + 4H^+ \longrightarrow 4CLO_2 + HCOOH + 3H_2O \qquad (1)$$

Metanolia muodostuu selluntuotannossa noin 10 kg/ADt ja sen tiheys on noin 0,80 kg/dm^3. Metanolia syntyy keittämisessä, josta se siirtyy lipeän kautta haihduttamolle ja siitä edelleen likaislauhteeksi. Likaislauhde menee strippauskolonniin, josta paljon metanolia sisältävät stripperin jälkeiset SOG–kaasut menevät suoraan polttoon tai metanolikolonniin, jossa metanoli nesteytetään ennen polttoa. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 9, 18, 64.)

Natriumhydroksidi (NaOH) eli lipeä on sellutehtaalla käytettävä valkaisukemikaali, mitä käytetään pääosin alkalivaiheessa, mutta myös muissa valkaisuprosessin vaiheissa. Lisäksi NaOH on yleisesti käytetty neutralointiaine kuitulinjalla. Kemikaalia tuodaan 50 %:n väkevyisenä veteen sekoitettuna seoksena tehtaalle ja käyttöväkevyys on noin 5–10 %. NaOH on vahvasti emäksinen ja syövyttävä kemikaali, joka on siten erittäin vaarallinen. Sen käsittelyssä on oltava varovainen ja tunnettava mahdolliset vaarat. Valkolipeää voidaan myös hapettaa ilmalla tai puhtaalla hapella, jolloin muodostuu kuitulinjan happivaiheessa tarvittavaa hapetettua valkolipeää (EVO). Hapetusreaktiossa syntyvää EVO:a tarvitaan, koska valkolipeän sisältämä rikki kuluttaa paljon happea ja näin heikentäisi valkaistun massan laatua. (KnowPulp 2023.)

2.3.5 Päästöt

Ilmaan päätyvät päästöt ovat osa teollisuuden ja palamisen prosessia, kuten myös sellutehtaalla ja hajukaasujen polttamisessa. Päästöjen määrä on kuitenkin vähentynyt huomattavasti vuosien aikana tekniikoiden parantuessa ja tiedon määrän lisääntyessä (kuva 11). Lisäksi metsäteollisuus on mukana monien tahojen ja säännösten piirissä, jotka ohjaavat päästöjen pienentämiseen, kuten Yhdistyneet kansakunnat, Euroopan unioni ja valtio. Päästökauppa on myös osana metsäteollisuuden toimintaa. Merkittävimpiä sellutehtaiden ilmastopäästöjä ovat rikkidioksidi (SO_2), TRS–yhdisteet, typen oksidit (NO_X), hiukkaset ja hiilidioksidi (CO_2). (KnowPulp 2023.)



Kuva 11. Sellu–, paperi– ja kartonkiteollisuuden päästöt ilmaan aikavälillä 1992–2023 (Metsäteollisuus ry 2024).

Kuvasta 11 nähdään huomattava tiputus päästöissä etenkin hiukkasten ja rikkipäästöjen osalta. Myös hiilidioksidi ja typenoksidi päästöt ovat vähentyneet, mutta nämä noudattelevat enemmän kokonaistuotantomäärässä tapahtuneita muutoksia. Erityisesti typenoksidien muutos on kulkenut 2000–luvulta lähtien tuotannon mukaisesti. Vertailuindeksinä on käytetty arvoa 1 vuonna 1992. (Metsäteollisuus ry 2024).

Rikkidioksidin lähteinä selluteollisuudessa ovat soodakattila, meesauuni ja hajukaasukattila, eli rikkidioksidia muodostuu pääosin palamisen seurauksena. Rikin oksidit ovat terveydelle ja ympäristölle haitallisia, minkä takia niiden päästöjä seurataan tarkasti. SO_2–päästöt muodostaa rikkihappoa ilmassa olevan vesihöyryn kanssa, mikä päätyy maahan happamina sateina. TRS–yhdisteet hapettuvat ilmaan päätyessään rikkidioksidiksi ja vaikutukset ovat siten samat kuin edellä mainitut. Lisäksi TRS–päästöt aiheuttavat aiemmin käsiteltyjä haju ja maine haittoja. Rikkidioksidi päästöt ovat pienentyneet metsäteollisuudessa merkittävästi ja ovat enää vain 10 % vuoden 1992 tasosta. (KnowPulp 2023.)

NO_X–päästöt yhteisnimitystä käytetään typpimonoksidista (NO) ja typpidioksidista (NO_2), joita muodostuu palamisreaktiossa, kun ilmassa oleva typpi reakoi hapen kanssa. NO_X–päästöjen määrään vaikuttavat mm. palamislämpötila, palamisilman koostumus ja polttoaineen typpipitoisuus. NO_X–päästöt aiheuttavat happamaa laskeumaa ja lisäävät otsonin muodostumista alailmakehässä. Myös CO_X–päästöjä muodostuu pääosin palamisreaktiossa. Tosin sellutehtailla niiden osuus on pieni ja niiden tarkastelu jää muita päästöjä vähemmäksi. CO_X–päästöt ovat yleisin ilmaan päätyvä kasvihuonekaasupäästö. (KnowPulp 2023.)

Hiukkaspäästöt johtuvat suurilta osin polttoaineen tuhkapitoisuudesta, joka kaasuilla ja öljyillä on lähes nolla. Hiukkaset ovat pieniä kiinteitä kappaleita, jotka lähtevät savukaasujen mukana lentoon ja päätyvät siten ympäristöön. Hiukkaset heikentävät hengitysilman laatua sekä toimivat kuljetuspintoina monille orgaanisille ja epäorgaanisille aineille mahdollistaen niiden leviämisen ympäristöön. Jokaiseen edellä mainittuun päästöön on olemassa paljon erilaisia tekniikoita, joilla päästöjä voidaan vähentää. (Suhr et al. 2015, s. 93–98.) Päästöjen vähennyskeinoja ei lähdetä tässä työssä kuitenkaan tarkemmin avaamaan.

2.3.6 Hajukaasujen vaikutukset soodakattilan päästöihin

Hajukaasujen polttamisella on vaikutuksia soodakattilan päästöihin, erityisesti NO_X–päästöihin. Lisäksi hajukaasut ovat happamia, jolloin ne voivat pienentää soodakattilan tuhkan pH:ta. Ylimääräinen rikki hajukaasuissa alentaa myös tuhkasuolan karbonaatin osuutta, kun karbonaatti loppuu ylimääräinen rikki muodostaa SO_2–päästöjä. Karbonaatti korvaantuu sulfaatilla. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 15.)

Soodakattilan TRS-päästöihin hajukaasujen polttaminen ei yleensä vaikuta, kun hajukaasujen syöttö on toteutettu oikeaan kohtaan kattilassa (lämpötila yli 900 °C). Päästöissä voidaan havaita nousua, jos hajukaasujen poltto aloitetaan liian aikaisessa vaiheessa kattilan käynnistyessä, jolloin kattila ei ole vielä saavuttanut sopivaa lämpöä. Tässä tilanteessa hajukaasut saattavat päästä kulkeutumaan savukaasujen mukana ilmaan, jolloin hetkellisesti päästöarvot saattavat nousta. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 15.)

NO_X–päästöihin vaikuttavat metanoli ja stripperikaasut. Ne sisältävät paljon typpiyhdisteitä, joka on pääosin ammoniakkia. Hajukaasujen polttaminen soodakattilassa nostaa tutkitusti savukaasujen NO_X–päästöjä. Lisäksi puuhun on sitoutunut typpiyhdisteitä, jotka keittämisvaiheessa siirtyvät mustalipeän joukkoon ja sieltä haihduttamon kautta päätyen edelleen soodakattilalle. Noin 1/3 osa tästä typestä hapettuu typpioksidiksi ja näkyy soodakattilan NO_X–päästöissä. Loput jatkavat matkaa kattilan pohjasulaan natriumsyanaattina (NaOCN) ja edelleen liuottajan kautta viherlipeään, jossa se alkaa muuttua ammoniakiksi. Ammoniakin muodostuminen jatkuu valkolipeässä. Ammoniakki säilyy valkolipeän mukana siirtyessä uudelleen keittämiseen ja taas mustalipeän kautta haihduttamoon, josta se lopulta siirtyy väkeviin hajukaasuihin ja metanoliin. Voidaan siis todeta, että hajukaasujen poltto soodakattilassa lisää NO_X–päästöjä. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 16–17.)

Laimeiden hajukaasujen ja liuotinhönkien vaikutus soodakattilan NO_X–päästöihin on molemmilla vain 1–2 % luokkaa. Vaikutus on näiden osalta siis lähes merkityksetöntä. Väkevien hajukaasujen ja metanolin poltolla on yleensä suuremmat vaikutukset kattilan NO_X–päästöihin. Kattilan reduktioon hajukaasuilla ei ole havaittu olevan vaikutusta. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 17–19.)

Väkevien vaikutus soodakattilan typpioksidipäästöihin voidaan karkeasti määrittää seuraavan yhtälön avulla (Soodakattilayhdistys 2023, s. 18).

$$NO_x = \frac{A + K \times X \times B}{A} - 1 \qquad (2)$$

jossa A on kattilan NO–taso [ppm], K on ammoniakin konvertoituminen NO:ksi [%], X on väkevien hajukaasujen osuus koko kattilan ilmamäärästä [%] ja B on ammoniakkipitoisuus kuivissa kaasuissa [ppm].

Ammoniakin oletetaan konvertoituvan yleensä noin 30 % luokkaa NO:ksiksi ja tyypillinen väkevien osuus ilmamäärästä kattilaan on 0,2–3 %. Karkeasti väkevine vaikutus NO_X–päästöihin on siten noin 6 % luokkaa, jos väkevien osuus on 1 % koko kattilan ilmamäärästä, kattilan NO–taso 100 ppm ja ammoniakkipitoisuus kuivissa kaasuissa luokkaa 2000 ppm. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 18). Kaukaan arvoilla laskettuna vaikutus NO_X–päästöihin on luokkaa 1,2 %. Tällä ei ole siis suurta vaikutusta lopullisiin päästöihin.

Vastaavasti metanolin vaikutus soodakattilan typpioksidipäästöihin voidaan karkeasti määrittää seuraavan yhtälön avulla (Soodakattilayhdistys 2023, s. 18).

$$NO_x = \frac{A \times S \times \frac{L}{1000000} + K \times P}{A \times S \times \frac{L}{1000000}} - 1 \qquad (3)$$

jossa A on kattilan NO–taso [mg/Nm^3], S on savukaasujen määrä [Nm^3/kg k.a.], L on lipeäkuiva-ainemäärä [kg k.a./ADt] ja P on ammoniakkipitoisuus metanolissa [kg/ADt].

Metanolia muodostuu noin 10 kg/ADt, josta ammoniakin osuus yleisesti on 2 % luokkaa, eli 0,2 kg/ADt. Noin 30 % ammoniakista konvertoituu NO:ksi ja kattilan NO–taso on luokkaa 200 mg Nm^3. Savukaasujen määrä noin 3,5 Nm^3/kg k.a. ja 1 600 kg k.a./ADt on lipeäkuiva-ainemäärä. Metanolin vaikutus NO_X–päästöihin on siten noin 5 % luokkaa. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 18.)

Kaikkien NO_X–päästöihin vaikuttavien komponenttien suuruus riippuu tietysti monista arvoista, joten täysin tarkkoja tuloksia on vaikea määrittää. Todellisten arvojen mittaaminen on samoin haastavaa jatkuvasti muuttuvien olosuhteiden takia. Edelliset yhtälöt antavat kuitenkin tarpeeksi tarkan tuloksen vaikutuksien suuruusluokasta.

Sellutehtaalla hajukaasujen polttaminen on keino vähentää kokonaisrikkipäästöjä verrattuna tilanteeseen, jossa hajukaasut vapautettaisiin suoraan ilmaan käsittelemättöminä. Polton seurauksena rikkiä sitoutuu tehtaan kemikaalikiertoon ja vaikuttaa siten kemikaalitaseisiin. Soodakattilalla poltettaessa rikki sitoutuu pohjasulaan ja päätyy siitä liuottajan kautta tehtaan kemikaalikiertoon. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 18.)

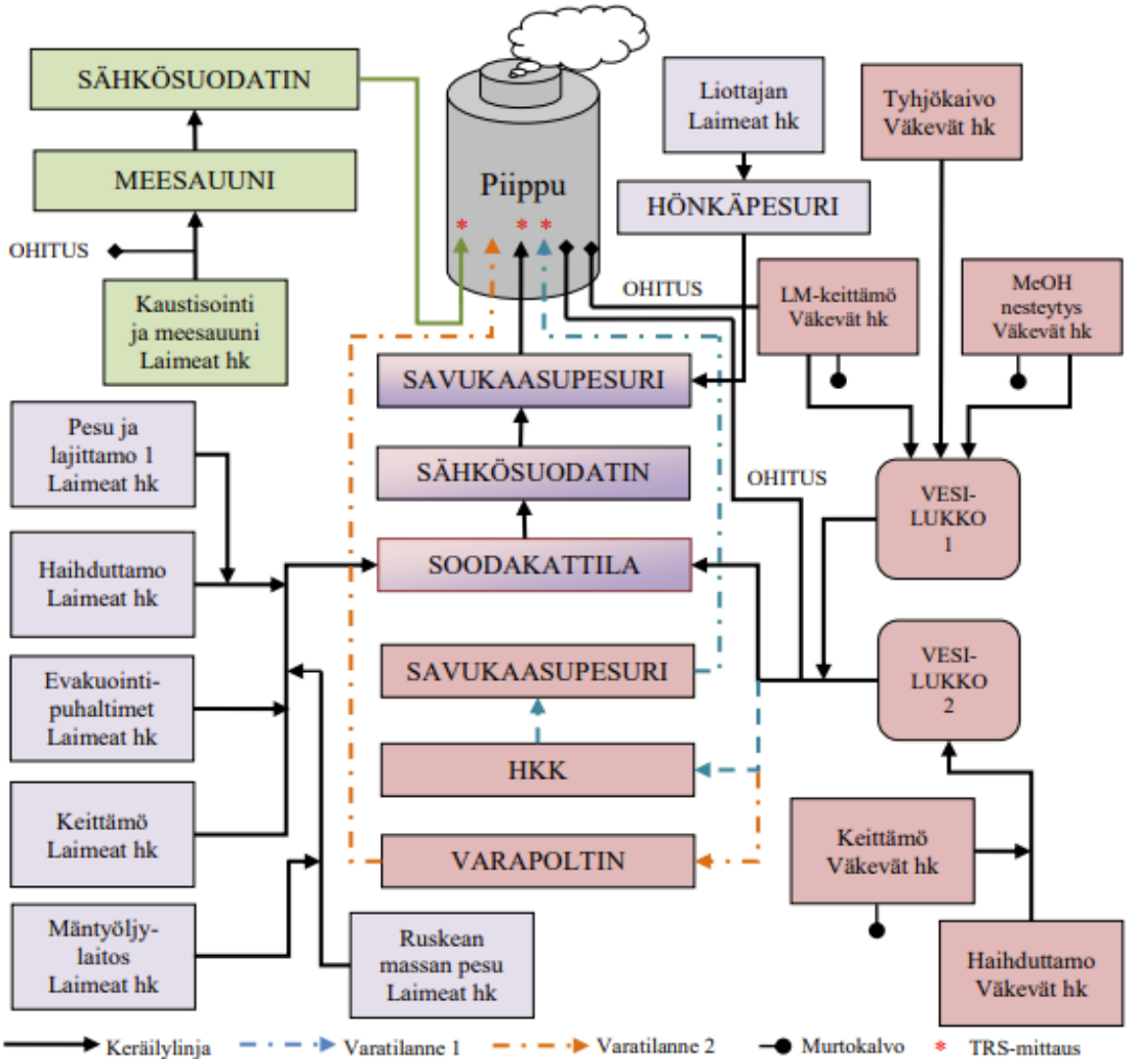
3 Tehtaan hajukaasujen nykyinen tilanne

Tässä kappaleessa käydään läpi Kaukaan sellutehtaan hajukaasujen nykyinen tilanne. Tutustutaan hajukaasujen muodostumiseen kuitulinjalla ja talteenottojärjestelmän puolella. Lisäksi tarkastellaan hajukaasujen keräilyä ja käsittelyä sekä niihin liittyviä järjestelmiä. Tämän jälkeen siirrytään päästöihin, kemikaalien käyttöön ja muodostumiseen hajukaasuihin liittyen. Päästöt osiossa esitetään kuvaus vaatimuksista, toteutuneista arvoista ja tulevaisuuden tavoitteista.

3.1 Muodostuminen ja keräily

Kaukaalla hajukaasuja muodostuu aiemmin käsitellyn mukaan kuitulinjan ja talteenottojärjestelmien osastoilla sellunvalmistusprosessissa. Molemmilla osastoilla muodostuu niin väkeviä kuin laimeitakin hajukaasuja, jotka kerätään erillisiin keräysjärjestelmiin ja siirretään polttokohteisiin. Laimeiden hajukaasujen keräys tapahtuu puhaltimien avulla hajukaasulähteestä. Tämän jälkeen laimeat hajukaasut johdetaan lauhduttimen sekä pisaranerottimen läpi polttoon. (Aluehallintovirasto 2015, s. 19.)

Kuvassa 12 on esitetty Kaukaan sellutehtaan hajukaasujärjestelmä kokonaisuudessaan. Kuvassa on lueteltuna eri hajukaasujen keräilykohteet karkeasti yläluokkia käyttäen, kuten keittämön väkevät hajukaasut. Kuvassa on yhdessä niin laimeiden kuin myös väkevien hajukaasujen järjestelmät. Tämän lisäksi hajukaasujen polttopaikat ja niiden järjestys on havainnollistettu kuvassa. Kuvasta poiketen väkeviä hajukaasuja poltetaan myös HKK:lla, eli varatilanne 1 reitti on nykyisin myös aktiivisessa käytössä. Lisäksi soodakattilalle meneviä laimeita hajukaasuja on mahdollisuus polttaa HKK:ssa tai varapolttimessa.



Kuva 12. Hajukaasujärjestelmä keräilyn ja käsittelyn osalta kokonaisuudessaan Kaukaan sellutehtaalla (Immonen 2014, s. 48).

3.1.1 Kuitulinja

Kuitulinjoilla kerätään väkeviä hajukaasuja keittämön ja lisämassalaitoksen alueelta. Lisämassalaitos tunnettaan myös tuttavallisemmin purukeittämönä. Väkeviä hajukaasuja kerätään lisämassalaitoksella vinokeittimestä ja puskusäiliöstä. Keittämöltä väkevien hajukaasujen keräily suoritetaan paineellisista lipeäsäiliöistä. Keittimien kaasaukset kuuluvat myös osaksi keräilyä. Nämä keittimien kaasaukset johdetaan paineellisiin lipeäsäiliöihin, josta ne siirtyvät hajukaasujen keräilyjärjestelmään. Laimeita hajukaasuja keräillään kauttaaltaan koko kuitulinjan alueelta. Laimeiden hajukaasujen keräilykohteet noudattelevat melko tarkasti luvussa 2.2.1 läpikäytyjä säiliö, prosessilaite ja muita kohteita.

3.1.2 Talteenottojärjestelmä

Kaukaalla talteenoton puolelta kerätään väkeviä hajukaasuja haihduttamon likaislauhdesäiliöstä, esihaihduttimelta, haihdutinyksiköltä 2A, polttolipeäsäiliöstä, tyhjökaivosta sekä metanolin nesteytyksen yhteydessä. Lisäksi tärpätin erotuksesta kerätään väkeviä hajukaasuja. (Aluehallintovirasto 2015, s. 19.)

Laimeita hajukaasuja kerätään haihduttamon säiliöalueelta, soodakattilan ympäristöstä, kaustisoinnista sekä mäntyöljylaitokselta. Mäntyöljylaitoksella on oma rikkivetypesuri, jossa kerätyt laimeat hajukaasut pestään ennen syöttöä meesauuniin polttoon (Aluehallintovirasto 2015, s. 20). Tarkemmin yleiset talteenoton alueen keräilykohteet on esitelty luvussa 2.2.1. Nämä keräilykohteet vastaavat aika pitkälti tilannetta myös Kaukaan laimeiden hajukaasujen keräilyn osalta.

3.2 Hajukaasujen käsittely

Kaukaan sellutehtaalla väkeviä hajukaasuja poltetaan pääosin soodakattilassa ja erillisessä hajukaasukattilassa. Hajukaasukattilassa on mahdollisuus polttaa laimeita hajukaasuja, mutta yleensä niiden poltto suoritetaan lähes kokonaan soodakattilassa. Lisäksi meesauunissa poltetaan kaustisoinnin alueella sekä mäntyöljylaitoksella muodostuvat laimeat hajukaasut. Meesauunissa ei Kaukaalla polteta väkeviä hajukaasuja, vaikka sekin on monesti sellutehtailla mahdollista.

3.2.1 Soodakattila

Kaukaan sellutehtaan nykyinen soodakattila on otettu käyttöön vuoden 1991 aikana. Tämän jälkeen kattilaa on päivitetty muun muassa polttokapasiteetin osalta vuosina 1996 ja 2003, minkä seurauksena polttokapasiteetti on noussut alun 2700 tn/k.a./vrk (tonnia/kuiva-ainetta/vuorokausi) nykyiseen 4100 tn/k.a./vrk. Lisäksi hajukaasujen osalta on tehty päivitystä, kun soodakattilaan lisättiin vuoden 2014 aikana hajukaasupoltin (liite 1). Nykyisin väkeviä voidaan siis polttaa soodakattilassa, vaikka se ei niiden ensisijainen polttopaikka tehtaalla olekaan. Väkevien lisäksi soodakattilassa poltetaan suurin osa laimeista hajukaasuista, jotka ohjataan palamisilmana kattilan tertiääri–ilmavaiheeseen.

Hajukaasupolttimen asentamisen seurauksena väkevien hajukaasujen polttamiskohteiden määrä laajeni ja sen avulla saavutettiin käyntivarmempi tilanne hajukaasujen polttamisen osalta. Soodakattilassa hajukaasujen osuus koko polttoainemäärästä on pieni. Pääasiallinen polttoaine on mustalipeä, minkä lisäksi kattilassa poltetaan tarpeen mukaan maakaasua startti– ja tukipolttimien avulla. (Aluehallintovirasto 2015, s. 18–19.)

3.2.2 Hajukaasukattila

Kaukaan hajukaasukattila on otettu käyttöön vuonna 1991. Hajukaasukattila on väkevien hajukaasujen pääasiallinen polttopaikka, mutta mahdollinen polttopaikka myös laimeille hajukaasuille. Hajukaasukattila koostuu erillään olevista pääpolttimesta ja varapolttimesta. Puhuttaessa hajukaasukattilasta tarkoitetaan yleensä pääpoltinta. Pääpolttimen yhteydessä on lämmöntalteenottojärjestelmä, jolla tehdään höyryä tehtaan höyryverkkoon 6 MW teholla (35 bar, 240 °C). Muodostuneen höyryn virtaus vaihtelee noin 1,2–2,4 kg/s välillä. Pääpolttimen välittömässä läheisyydessä on varapoltin, jolla voidaan myös polttaa hajukaasuja, jos pääpoltin olisi pois käytöstä. Varapoltin on siis erillinen laite, joka ei ole yhteydessä pääpolttimen kanssa millään tavalla. Varapoltinta ei ole varustettu lämmöntalteenotolla tai savukaasupesurilla, kuten hajukaasukattilan pääpoltin. Varapoltinta käytettäessä rikkipäästöt ovat suuremmat, koska savukaasut eivät kulje rikkipesurin kautta. Tyypiltään hajukaasukattila on lieriökattila, jossa on yksi hajukaasupoltin, eli hajukaasut syötetään yhden syöttölähteen kautta polttoon. (Aluehallintovirasto 2015, s. 19, 46.)

Pää– ja varapolttimessa on erilliset linjat metanolin/tärpätin polttoa varten. Metanoli ja tärpätti muodostuvat likaislauhteesta, joka käsitellään ensin strippauskolonnissa, jossa lauhtunut puhdistettu jae johdetaan sekundäärilauhdesäiliöön ja lauhtumaton jae jatkaa metanolikolonniin. Tässä metanolikolonnissa metanoli ja tärpätti lauhtuvat nesteeksi. Metanolikolonnissa muodostuneet lauhtumattomat kaasut poltetaan väkevien hajukaasujen mukana. Molemmissa polttimissa on lisäksi mahdollisuus käyttää maakaasua tukipolttoaineena ja tietysti myös starttipolttoaineena. (Aluehallintovirasto 2015, s. 12, 18.)

Erillisen hajukaasukattilan käyttö hajukaasujen polttamisessa on varmatoimista, sillä järjestelmä on suunniteltu juuri hajukaasujen polttoa varten. Tosin kustannukset erillisillä polttokattiloilla ovat yleensä korkea verrattuna muihin polttopaikkoihin, niin investointien kuin käyttökustannuksienkin osalta. (Lin 2005, s. 9.)

3.2.3 Meesauuni

Kaustisoinnin alueelta muodostuvia laimeita hajukaasuja poltetaan meesauunissa. Meesauuni on osa sellunvalmistuksen prosessia ja tarkemmin kemikaalikiertoa, mitä käytiin läpi aiemmassa pääluvussa. Meesauunissa pääasiallinen polttoaine on vähärikkinen maakaasu ja varapolttoaineena on kevytpolttoöljy. Näiden lisäksi uunissa voidaan polttaa biopohjaisia polttoaineita, kuten metanolia, tärpättiä ja mäntyöljyjohdannaisia, joita muodostuu valmistusprosessin sivuvirtoina. (Aluehallintovirasto 2015, s. 18–19.)

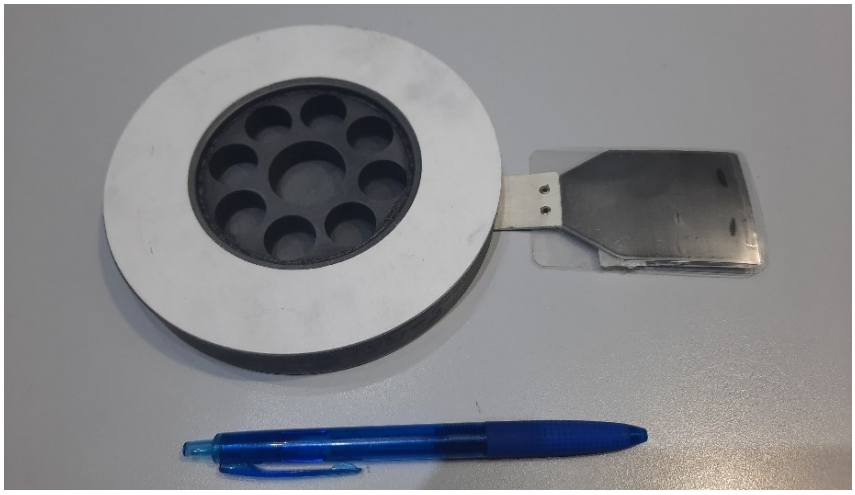
Meesauunissa poltettaessa etuna on, että osa hajukaasujen rikkioksideista sitoutuu takaisin kalkkikierron ja takaisin prosessiin. Meesauunien ongelmana hajukaasujen poltossa on yleensä liian suuri uunin kuormitus ja hapen määrän riittävyys palamisilmassa, jolloin kaikki TRS–päästöt eivät palamisen aikana pääse reakoimaan kunnolla hapen kanssa. Hajukaasujen polttaminen meesauunissa on havaittu edistävän renkaiden muodostumista uunin sisällä, mikä on haitallista uunin toiminnan kannalta. Väkevien hajukaasujen syöttäminen uuniin tapahtuu yleisesti erillisen suuttimen kautta. Tätä suutinta on kuitenkin jäähdytettävä aktiivisesti, jotta hajukaasut eivät syty ennenaikaisesti suuttimessa ja suutin ei kärsi liiallisesta lämmöstä. Jäähdyttämisaineena voidaan käyttää ilmaa, vettä tai höyryä. (Lin 2005, s. 8–9.)

Kaukaan meesauunille on aikanaan tehty väkevien hajukaasujen polttolinjasto, mutta sitä ei ole ikinä käytetty. Nykyisin tämä linja on sokeoitu, eli linjan toimimattomuus on varmistettu. Kaukaan sellutehtaan meesauunissa poltetaan ainoastaan laimeita hajukaasu.

3.2.4 Hajukaasujärjestelmän muut komponentit

Hajukaasujärjestelmässä on polttopaikkojen ja siirtoputkiston lisäksi muita tärkeitä komponentteja, jotka takaavat hajukaasujen oikeanlaisen ja turvallisen käsittelyn. Näihin komponentteihin kuuluvat muun muassa liekinsammuttimet, pisaranerottimet ja murtokalvot. Liekinsammuttimien tehtävänä väkevien hajukaasujärjestelmässä on estää polttopaikan liekin etenemisen väärään suuntaan, eli takaisinpäin hajukaasuputkistoon. Liekinsammuttimia on hyvä olla polttopaikan läheisyydessä, jotta liekki ei pääse etenemään kovin pitkälle putkistossa ja samalla minimoidaan takaliekin aiheutumien vahinkojen laajuus. (Lin 2005, s. 4.)

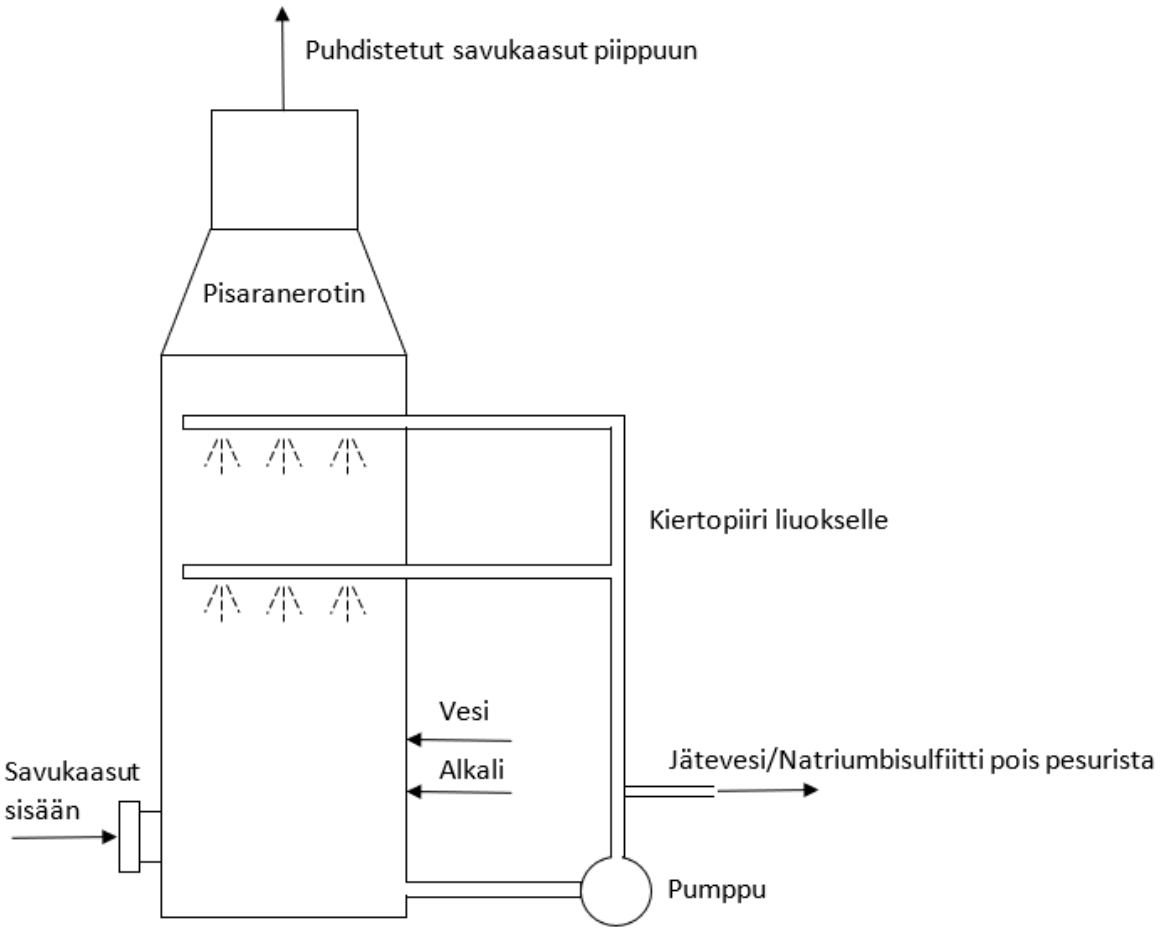
Pisaranerottimien avulla poistetaan kaasujen mukana kulkevaa kosteutta, joka tiivistyy lauhteeksi. Putkistojen täytyy olla kaltevia ja sisältää tyhjennyksiä, joiden kautta lauhdetta voidaan poistaa. Hajukaasujen seasta poistettava lauhde on likaista, joka käsitellään erillisessä likaislauhteen käsittelyssä. Murtokalvot, eli räjähdyskalvot, ovat hajukaasujärjestelmään asennettavia levyjä, jotka antavat periksi paineen muuttuessa siirtoputkistossa. Tällöin paine pääsee purkautumaan putkiston ulkopuolelle, eikä siten aiheuta vaurioita itse järjestelmään. Tämä purkautumiskohta pitää vain määrittää hyvin, jotta purkautunut hajukaasu ei aiheuta ongelmia. (Lin 2005, s. 5–7.) Kuvassa 13 on eräs malli murtokalvosta, joka asennetaan putkilinjaan.



Kuva 13. Eräänlainen murtokalvo.

Hajukaasujen lauhteenpoistoyhteiden yhteydessä on vesilukot tai yhteinen vesilukkosäiliö, joilla estetään hajukaasujen pääseminen järjestelmän ulkopuolelle lauhteiden poiston yhteydessä. Vesilukkojen avulla poistoyhteen läpi ei pääse kaasuja. Vesilukon pinta on kuitenkin pidettävä tarpeeksi korkealla ja varmistettava ettei se pääse kuivumaan. Tästä syystä vesilukkoihin on asennettava pinnankorkeuden mittaus ja vesivirtaus, jolla varmistetaan vesilukolle lisäveden saanti. Vesilukkojen täytyy olla mitoitettu toimimaan muuttuvien paineolosuhteiden varalta. Tällaisia painevaihteluita voivat seurata esimerkiksi pullotuksen ja höyryejektorien vaikutuksista. (Soodakattilayhdistys 2023, s. 44–45, 61.)

Savukaasupesurit ovat keskeisessä roolissa SO_2–päästöjen vähentämisessä. Pesureita on useita erilaisia sekä rakenteeltaan että toiminnaltaan. Perusperiaatteena on kuitenkin savukaasujen kontakti prosessin ulkopuolelta tuotavan kemikaalin tai muun reagoivan yhdisteen kanssa. Pesurit jaetaan läpivirtaaviin ja regeneroitaviin, joista kumpikin luokitellaan edelleen kuiviin ja märkiin pesureihin. (Pandey et al. 2005, s. 571–578). Kuvassa 14 on esitetty läpivirtaavan märkäpesurin yksinkertainen rakenne ja toimintamalli.



Kuva 14. Savukaasupesurin yksinkertainen rakenne ja toimintaperiaate (mukailtu: Pandey et al. 2005, s.587).

Kaukaalla hajukaasukattilan savukaasut kulkevat savukaasupesurin läpi. Pesurissa savukaasut pestään alkalisella liuoksella. Käytettävä alkali on natriumhydroksidi. Savukaasupesurin oheistuotteena saadaan natriumbisulfiittia, jota hyödynnetään tehtaan omaan kemikaali tarpeeseen. (Aluehallintovirasto 2015, s. 19.)

Kaukaalla HKK:n savukaasupesuri on kaksivaiheinen. Kontakti savukaasujen ja pesuliuoksen välillä tapahtuu molemmissa vaiheissa kaasu–neste kosketuksen avulla. Yläkierrosta pesuliuos voi palata takaisin yläkiertoon tai poistua pesurista. Alakierrosta liuos voi kulkeutua pesurista ulos tai palata ylä– tai alakiertoon. Nämä kaksi vaihetta ovat rajattu erilleen, mutta yläkierrosta pesuliuosta pääsee kaatamaan alakiertoon, eli vaiheet vuorovaikuttavat myös keskenään. Savukaasujen lämpötila laskee näiden kahden vaiheen läpi kulkiessaan, kun lämpö siirtyy pesuliuokseen. (Tampella power 1991.)

Savukaasupesurin alaosaan syötetään savukaasuja, jotka jäähdytetään pesurin sisääntulossa vettä suihkuttamalla. Jäähdytyksen jälkeen savukaasut altistetaan natriumhydroksidi vesi liuokselle, jota suihkutetaan alemmassa ja ylemmässä tasossa erikseen. Savukaasujen rikki reakoi pesuliuoksen alkalin kanssa muodostaen natriumbisulfiittia. Pesuliuoksen pH:ta säädetään natriumhydroksidi annostusta muuttamalla. Ennen piippuun päätymistä savukaasut kulkevat vielä pisaranerottimen läpi. (Tampella power 1991.)

3.3 Päästöt

Sellutehtaiden päästöille on asetettu määräyksiä ja raja-arvoja, mitkä pitää täyttää ympäristöluvan mukaisesti. Hajukaasuihin suoranaisessa yhteydessä ovat erityisesti ilmapäästöt, joille ympäristölupa määrittää tarkat rajat. Hajukaasut eivät yksin aiheuta näitä sellutehtaalla muodostuvia ilmapäästöjä, mutta ovat osana polttopaikkojen savukaasuja ja siten kuuluvat asetettujen rajojen piiriin. Hajukaasuille on määritetty keräily– ja käsittelylaitteiston käsittelyaste, mikä on vähintään väkevien osalta 98 % ja laimeiden 95 % kuukausittaisesta käyntiajasta. Hajukaasut voidaan johtaa keräily– ja käsittelyjärjestelmän häiriötilanteiden aikana ilmaan väliaikaisesti, mutta 48 tunnin kuluttua toiminta on keskeytettävä, mikäli häiriötä ei pystytä palauttamaan normaaliin tilaan. (Aluehallintovirasto 2015, s. 60–62, 132.)

Typenoksidi–, rikkidioksidi– ja TRS–ominaispäästöt kuivattua sellutonnia kohden on määritetty erikseen jokaiselle polttopaikalle. Lupamääräyksessä esitetyt rajat ovat esitetty taulukossa 1. Rikkidioksidi– ja TRS–ominaispäästöjä käsitellään yhdessä. Jokaista polttopaikkaa tarkastellaan päästöjen osalta erikseen. (Aluehallintovirasto 2015, s. 122.)

Vuoden 2018 aikana tehtiin tämä muutos, jolloin luovuttiin sellutehtaan yhteisistä päästöistä kuivattua sellutonnia kohden. Nyt yksilöityjen ominaispäästörajojen seurauksena jokaisen polttopaikan on saavutettava omat luparajansa päästöjen osalta. Aiemmin yhteisillä luparajoilla toinen polttopaikka on voinut olla vähäpäästöisempi ja toinen taas aiheuttaa suuremmat päästöt, vaikka kokonaisuudessaan on oltu luparajojen alapuolella.

Taulukko 1. Lupamääräyksen ilmapäästöjen ominaispäästörajat sellutehtaalla (Aluehallintovirasto 2015, s. 122).

Päästölähde	**SO_2 ja TRS (kgS/ADt)**	**NO_X (kgNO_2/ADt)**
Soodakattila	0,13	1,7
Meesauuni	0,07	0,3
Hajukaasukattila	0,05	0,2
Hajapäästöt	0,2	-

Todellisuudessa soodakattilan NO_X–päästöjen raja-arvona on 1,6 kgNO_2/ADt. Tämä johtuu siitä, kun Kaukaalla on siirrytty tuottamaan pelkästään havupuusellua. Aiempi 1,7 kgNO_2/ADt on ollut raja-arvona, kun tehtaalla on tuotettu myös lehtipuusellua. Arvot pohjautuvat BREF–dokumentin (Best Available Technique Reference Document) esittämiin arvoihin ja sen BAT–rajoihin (Best Available Techniques). (Aluehallintovirasto 2015, s. 109.)

Sellutehtaan vuorokausikohtaiset päästöpitoisuusrajat eri huomioitaville päästölähteille ovat esitetty taulukossa 2. NO_X–päästöillä ei ole päiväkohtaisia rajoja, kun taas TRS–päästöille on määritelty rajat jokaiselle päästölähteelle erikseen. SO_2–päästöillä ja hiukkasilla rajat ovat asetettu osalle päästölähteistä. Pitoisuusrajat määritetään päästöjen painon suhteella savukaasujen tilavuuteen.

Taulukko 2. Lupamääräyksen ilmapäästöjenpitoisuusrajat vuorokautta kohti sellutehtaalla. (Aluehallintovirasto 2015, s. 122).

Päästölähde	**NO_X (mg/m^{3}N)**	**TRS (mgS/m^{3}N)**	**SO_2 (mg/m^{3}N)**	**Hiukkaset (mg/m^{3}N)**
Soodakattila	-	10	50	50
Meesauuni	-	20	-	50
Hajukaasukattila	-	10	-	-

Taulukosta 2 havaitaan, että soodakattilalla on eniten ilmapäästöjenpitoisuusrajoja, kun taas meesauunin ja hajukaasukattilan osalta rajoja on vähemmän. Hiukkaspitoisuusrajat soodakattilalla ja meesauunilla ovat yhtä suuret. TRS–rajoissa on taas vaihtelua, kun meesauunin raja on kaksi kertaa suurempi kuin sooda- tai hajukaasukattilalla.

Valkaisukemikaalien valmistuksessa, valkaisimossa ja pesemössä muodostuvien klooridioksidipitoisten hönkäkaasujen klooripitoisuudelle on myös asetettu raja. Ilmaan johdettavien hönkien pitoisuuden rajana on 30 $mgCl_{tot}/Nm^3$. (Aluehallintovirasto 2015, s. 62.)

3.4 Natriumbisulfiitin käyttö

Natriumbisulfiittia käytetään Kaukaalla molemmilla kuitulinjoilla kahdessa eri vaiheessa. Yhteensä natriumbisulfiittia syötetään siis neljään eri kohteeseen valkaisuvaiheissa. Molemmilla kuitulinjoilla syötetään natriumbisulfiittia klooridioksiditornien jälkeen. Natriumbisulfiitin avulla poistetaan klooridioksidijäämiä prosessista. Klooridioksidi on yksi valkaisussa käytettävistä kemikaaleista. Haluttu kemikaalijäämätaso määrittää natriumbisulfiitin virtauksen määrän prosessiin. Lisäksi yksi natriumbisulfiitin syöttökohde on kuitulinjan hönkäpesuri, jolla valkaisussa muodostuvia hönkiä pestään. Pääosin nämä höngät koostuvat klooriyhdisteistä, eivätkä ne sisällä haisevia rikkiyhdisteitä. Kuitulinjan hönkäpesurissa, kuten muissakin alkalipesureissa, savukaasut johdetaan pesurin läpi ja savukaasujen sekaan ruiskutetaan nestemäistä liuosta. Hönkäpesurin tapauksessa höngät ovat virtaavana kaasuna, joiden sekaan ruiskutetaan natriumbisulfiitin ja veden seosta.

4 Hajukaasujen polton optimointi

Tässä luvussa käydään läpi Kaukaan hajukaasujen polton jakautumista ja mahdollisia reunaehtoja, jotka voivat asettaa vaatimuksia hajukaasujen käsittelyä ja polttoa varten. Tämän jälkeen arvioidaan mahdollisia ajomalleja ja vertaillaan niitä keskenään. Lopuksi vielä käydään läpi koeajojen suorittamista yleisesti ja tutustutaan savukaasupesuriin.

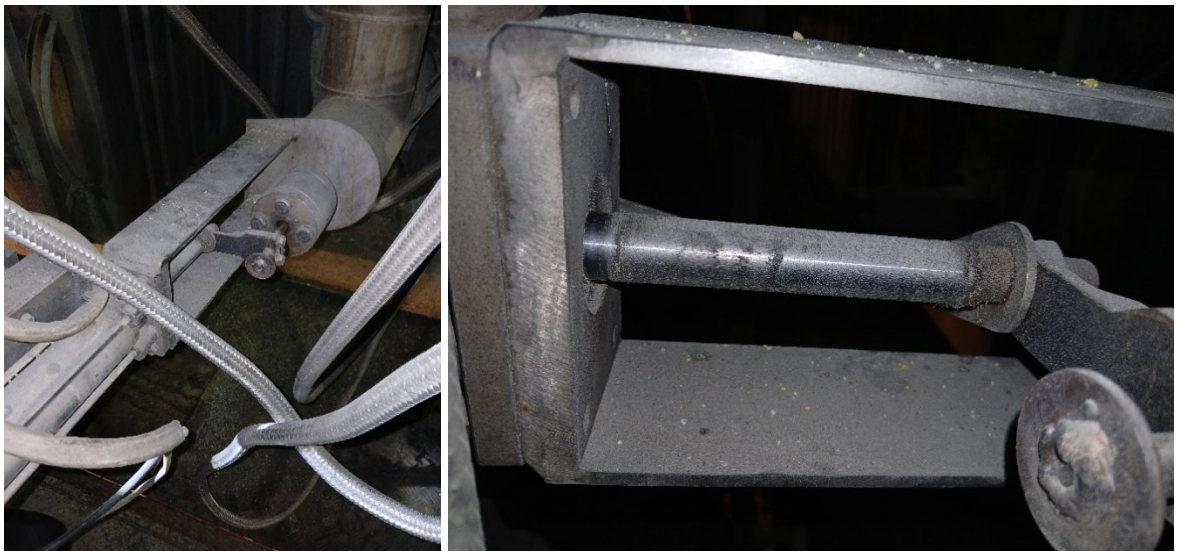
4.1 Hajukaasujen polton jakautuminen

Väkevien hajukaasujen polttaminen kokonaisuudessaan soodakattilan hajukaasupolttimella herätti aluksi avoimia kysymyksiä. Suurimpana pohdinnan aiheena oli polttokapasiteetin riittävyys. Yleisen tiedon ja laskennallisten lukujen mukaan tämä olisi mahdollista, mutta asiasta ei kuitenkaan oltu täysin varmoja. Joidenkin aiempien kokemusten ja polttoyritysten perusteella kapasiteetin riittävyydessä oli havaittu ongelmia. Tämä on tullut ilmi esimerkiksi tilanteissa, joissa hajukaasukattila on syystä tai toisesta pudonnut pois ajosta. Tällöin hajukaasujen keräilyjärjestelmän ja putkistojen paineet ovat lähteneet nousemaan, ja lopulta väkevät ovat purkautunut piipun kautta ympäristöön.

Päällimmäisenä oletuksena oli kuitenkin, että polttokapasiteetti olisi riittävä. Tämä täytyi kuitenkin osoittaa todeksi. Päätettiin suorittaa testi, jossa väkevien hajukaasujen poltto hajukaasukattilan pääpolttimella keskeytettiin kokonaan ja käännettiin kaikki väkevät soodakattilan polttimelle. Tämä aiheutti kuitenkin paineen nousua väkevien hajukaasujen linjassa ja hajukaasujen keräilyjärjestelmässä paine alkoi siirtyä alipaineen puolelta ylipaineelle, mikä ei ole toivottava tilanne. Väkevät hajukaasut eivät siis kulkeneet halutulla tavalla soodakattilaan poltettavaksi.

Asiaa lähdettiin selvittämään. Ongelmakohdaksi paikantui eräs venttiili (kuva 15), mikä oli jumittunut. Tämän jumittumisen seurauksena venttiilin liikerata oli vajavainen. Sylinterin männänvarsi oli likainen, mikä viittaa siihen, ettei venttiili ollut avautunut kunnolla vähään aikaan. Männänvarren alussa oli vain lyhyt puhdas kohta, eli varsi oli liikkunut vain hyvin rajallisesti viime aikoina. Kyseinen venttiili sijaitsee juuri ennen soodakattilan poltinta.

Venttiiliä korjattiin ja herkisteltiin, jotta se liikkuisi pienemmällä voimalla koko liikeradan mitan. Kyseinen venttiili säätää hajukaasujen virtausta soodakattilan.



Kuva 15. Väkevien hajukaasujen venttiili, joka oli jumittunut ennen soodakattilaa ja esti hajukaasujen virtauksen polttimelle.

Testiä lähdettiin yrittämään uudelleen. Testissä havaittiin paineen pysyvän hajukaasuputkistossa nyt normaalilla tasolla. Tämä osoitti venttiilin tulleen kuntoon ja kaikkien hajukaasujen mahtuvan palamaan soodakattilassa. Korjatun venttiilin ei edes tarvinnut avautua täysin auki, vaan riitti, että venttiiliä avattiin noin kaksi kolmasosaa ilmasylinterin liikeradasta. Tämän perusteella hajukaasujen määrä voisi tarvittaessa olla vieläkin suurempi, ainakin ilmasylinterin asennon mukaan.

4.2 Reunaehdot hajukaasujen käsittelyä ja polttoa varten

Väkevien hajukaasujen polttaminen soodakattilassa onnistuu todistetusti kapasiteetin puolesta kokonaisuudessaan. Hajukaasukattilaa ei siis suoranaisesti tarvita hajukaasujen polttamista varten. Hajukaasujen palaessa ainoastaan soodakattilassa, ollaan kuitenkin tilanteessa, jossa välitöntä varapolttopaikkaa väkeville hajukaasuille ei ole. Soodakattilan väkevien hajukaasujen polton ongelmatilanteessa hajukaasujärjestelmä kykenee pullottamaan, eli keräämään hajukaasuja putkistoon, noin 3 minuutin ajan. Tarvittaessa

väkevät hajukaasut saadaan kuitenkin nopeasti palamaan hajukaasukattilan pääpolttimelle, jos pääpoltin on käytössä metanoli poltolla. Mikäli pääpoltin ei olisi ajossa, on kuitenkin mahdollista saada poltin ajoon tuon 3 minuutin pullotuksen aikana. Toki yrityksiä ei siinä ajassa ole kuin yksi, sillä polttimen lämpötilan täytyy nousta tarpeeksi ylös, ennen kuin hajukaasut voidaan kääntää sinne polttoon.

Metanolin muodostumismäärä tehtaalla edellyttää, että hajukaasukattilassa poltetaan ainakin osan metanolista. Metanolia poltetaan hajukaasukattilassa ja soodakattilassa. Soodakattilan polttokapasiteetti ei kuitenkaan nykyisellään riitä vastaamaan muodostuvaan metanolin määrään, siksi hajukaasukattilassa on poltettava metanolia. Polttaminen voidaan suorittaa jatkuvalla poltolla tai jaksoittain. Jaksottainen vaihtoehto ei ole kovin hyvä kattilan toistuvan ylös– ja alasajojen takia. Hajukaasukattilan ylös– ja alasajojen aikana päästöt piikittelevät palamisolosuhteiden muuttuessa nopeasti. Jatkuvassa metanolin poltossa palamisolosuhteet ovat stabiilit ja siten myös muodostuneet päästöt ovat hyvällä tasolla. Aiheutuvien päästöjen lisäksi ylös- ja alasajot vaativat starttipolttoaineena aina maakaasua, jotta kattilan lämpötila saadaan nostettua tarvittavalle tasolle. Jatkuvassa poltossa voidaan testien mukaan polttaa metanolia yksinään, jollei kattilan lämpötila lähde laskuun ja tarvita maakaasua tukipolttoaineiksi hetkellisesti.

Hajukaasukattilalla muodostuu natriumbisulfiittia, jonka tuotanto on tehtaalle olennainen tekijä. Natriumbisulfiittia tarvitaan kuitulinjoilla klooridioksidijämien tappoon neljässä eri vaiheessa ja valkaisun hajukaasujen venturipesurille. Koska natriumbisulfiittia käytetään kohtalaisen tasaisella virtausnopeudella, voidaan määrittää säiliön pinnan laskunopeus, kun natriumbisulfiittia ei tuoteta. Tällöin säiliöön ei tule uutta ainetta, vaan sitä ainoastaan kulutetaan ja savukaasupesurilla syntyvä natriumbisulfiitti ohjataan liuottajalle. Vastaavasti voidaan määrittää kokeellisesti ja laskennan avulla säiliön pinnan nousunopeus, kun natriumbisulfiittia tuotetaan. Nämä pinnan vaihtelun nopeudet ovat erityisen tärkeitä, kun suunnitellaan erätuotantomallia natriumbisulfiitin osalta. Nykyisessä tilanteessa ennen koeajoja natriumbisulfiittisäiliön pinta laskee noin 2,5–3,0 % tunnissa ja täyttyy noin 3,5–4,0 % tunnissa. Muodostuminen on siten kulutusta suurempaa.

Hajukaasukattila tuottaa prosessihöyryä Kaukaan integraatin höyryverkostoon. Sen tuottama osuus koko höyryn tuotannosta on kuitenkin vain prosenttien luokkaa, joten sen vaikutus höyryverkon tasapainoon on lähes olematon. Höyryn muodostuminen ei siten aiheuta minkäänlaista reunaehtoa.

Hajukaasukattilan katsotaan olevan normaaliajossa, kun täyttyvät seuraavat kolme ehtoa. Hajukaasupolttimen lämpötila on yli 630 °C, muodostuneen välipainehöyryn virtaus hajukaasukattilalta on yli 0,5 kg/s ja väkevien hajukaasujen poltto hajukaasukattilassa tilatieto on voimassa. Mikäli jokin näistä ehdoista ei täyty, niin kattilan oletetaan olevan häiriö–, käynnistys– tai alasajotilassa. (Valmet 2023, s. 15.)

4.3 Vaihtoehtoisia ajomalleja

Kaukaalla väkevien hajukaasujen polttaminen voidaan toteuttaa usealla eri ajomallilla. Taulukko 3 havainnollistaa hajukaasujen polttopaikkojen jakautumista eri ajomalleissa. Ensimmäinen vaihtoehto on polttaa hajukaasuja hajukaasukattilan pääpolttimella ja soodakattilalla yhtä aikaa. Tässä ajomallissa voidaan polttopaikkojen suhdetta säätää, niin että väkevien osuus eri polttopaikoissa muuttuu. Toinen vaihtoehto on polttaa hajukaasuja ainoastaan soodakattilalla. Kolmantena on mahdollisuus polttaa hajukaasuja pelkästään hajukaasukattilalla. Arvioidaan seuraavaksi näiden vaihtoehtojen kustannuksia, kemikaalikiertoa, päästöjä ja käyttövarmuutta.

Taulukko 3. Hajukaasujen vaihtoehtoisien ajomallien jakautuminen eri polttopaikoille.

Ajomalli vaihtoehto	**Väkevien hajukaasujen poltto**	
	Soodakattila	**Hajukaasukattila**
1.	X	X
2.	X	
3.		X

Vaihtoehdoissa ei otettu huomioon hajukaasukattilan erillistä varapoltinta, sillä se on suunniteltu käytettäväksi vain tarpeen vaatiessa. Varapoltin ei sisällä savukaasujen käsittelyä tai lämmöntalteenottoa, siksi se on viimeisiä vaihtoehtoja hajukaasujen käsittelyä varten. (Aluehallintovirasto 2015, s. 46.)

Hajukaasujen tilavuusvirta polttoon on suurimmillaan noin 360 Nl/s. Tehtaan ylösajo tilanteessa määrät voivat olla tätäkin suurempia. Tämä määrä on todettu soodakattilan väkevien polttimelle menevän putken mittauksesta. HKK:n suurin virtaus on ollut 230 Nl/s, mikä kuvaa lähemmin todellista tilavuusvirtausta. Tarkkoja hetkellistä huippuarvoa hajukaasujen tilavuusvirtaukselle on vaikea määrittää muuttuvien olosuhteiden takia. Myöskään kyseiset mittaukset eivät ole kaikista luotettavimpia. Jakautuneessa ajomallissa väkevien tilavuusvirtaus HKK:lle on noin 160 Nl/s ja soodakattilalle 90 Nl/s. Kaikki edellä esitetyt tilavuusvirran arvot sisältävät höyryejektorien höyryn virtauksen. Soodakattilan polttimen linjassa on ylimääräinen höyryejektori, joka tarkoittaa kyseisessä linjassa olevan suuremmat virtausmäärät, kun höyryn määrä on suurempi.

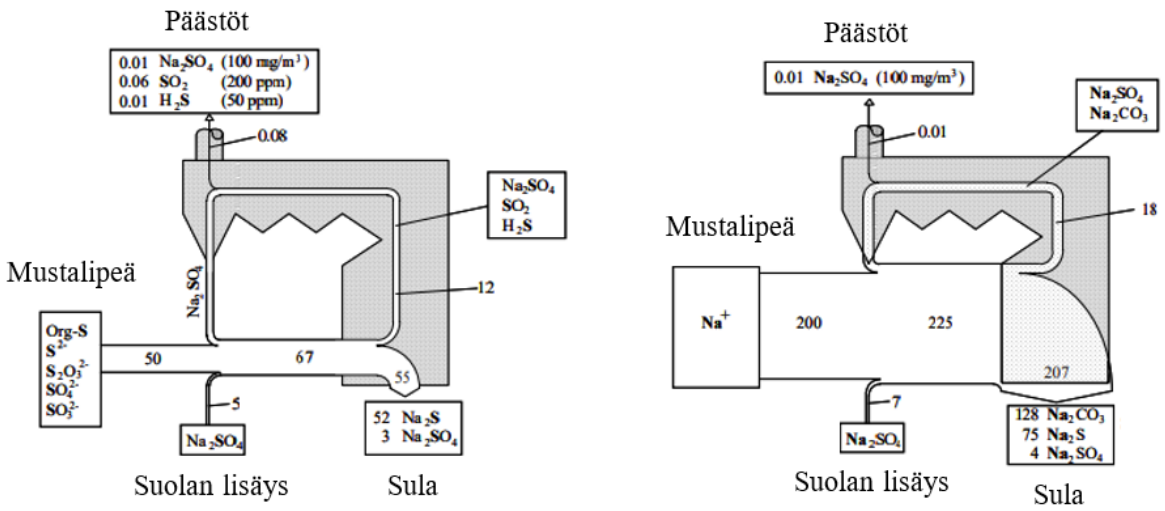
Ensimmäisessä vaihtoehdossa väkevien jakaantuminen soodakattilan ja HKK:n välillä poltto painottuu hieman enemmän HKK:lle suhteella 3:2. Tämä johtuu siitä, että HKK:n venttiiliä ei voida sulkea riittävän pieneksi, jolloin väkevien tilavuusvirtaa voitaisiin pienentää. Venttiilin sulkemisen ongelmana on paineen mittaus ja linjan tukihöyryn syöttö. Tästä on kerrottu tarkemmin luvussa 7, jossa käsitellään havaittuja parannusehdotuksia hajukaasujärjestelmään.

Kustannukset eri ajomallien osalta muodostuvat pääosin savukaasupesuriin syötettävästä natriumhydroksidin määrästä ja mahdollisesta tukipolttoaineesta. Muita merkittäviä huomioon otettavia kustannustekijöitä ei ole. Tukipolttoaineiden tarve ei ole jatkuvaa, vaan ainoastaan satunnaista lämpötilojen laskiessa kattilassa tai kattilan ylösajotilanteissa. Tällaisia tilanteita tapahtuu hyvin harvoin. Tarkastelussa voidaan siis tehdä oletus, ettei tukipolttoaineille ole tarvetta, eikä niitä siksi huomioida kustannusten laskennassa.

Natriumhydroksidin määrästä kustannuksista käydään tarkempi katsaus luvussa 6, jossa käsitellään työn keskeisimpiä tuloksia. Tässä vaiheessa on kuitenkin tiedossa ensimmäisessä ajomallissa käytettävän NaOH–kemikaalin määrä savukaasupesurissa. Oletuksena on, että toisessa vaihtoehdossa, jossa väkevät hajukaasut poltetaan soodakattilassa, NaOH:n kulutus olisi huomattavasti pienempää. Mahdollisesti NaOH:n annostelulle ei ole lainkaan tarvetta, mikä olisi kustannusten kannalta paras vaihtoehto. Vastaavasti kolmannessa ajomallissa arvioidaan, että NaOH:n kulutus olisi suurempaa kuin ensimmäisessä vaihtoehdossa, jolloin tämä ajomalli olisi kustannuksiltaan kallein vaihtoehto. Poltettavien hajukaasujen määrä määrittää pitkälti tarvittavan NaOH:n virtauksen tarpeen savukaasupesurille.

Kemikaalikiertoon eri ajomalleilla on omat vaikutuksensa. Ensimmäisessä valinnassa hajukaasujen rikki päätyy joko liuottajan kautta kemikaalikiertoon, savukaasujen mukana ilmaan tai natriumbisulfiittiin. Kuitulinjoille syötetty natriumbisulfiitti kiertää valkaisun eri vaiheissa ennen kuin se päätyy jätevedenkäsittelyyn, eli puhdistamolle, muun valkaisun liuosten mukana. Valmistettu natriumbisulfiitti ja lisätty NaOH päätyy siten osittain liuottajalle ja osittain natriumbisulfiitin mukana jätevedenkäsittelyyn tai ilmaan, eli ulos prosessista.

Rikistä ja natriumista vain hyvin pieni osuus päätyy kattilasta savukaasujen mukana ilmaan. Suurimmaksi osaksi ne kiertävät liuottajan kautta takaisin prosessiin ja palaavat lopulta mustalipeän kautta takaisin soodakattilaan. (Hupa 2017, s. 2.) Kuvassa 16 on vasemmalla rikin ja oikealla natriumin kemikaalitaseet soodakattilassa. Kuvasta nähdään kuinka rikki ja natrium kiertävät soodakattilassa. Suurin osa molemmissa kemikaaleissa päätyy liuottajalle ja vain hyvin pieni osuus poistuu savukaasujen mukana ilmaan asti. Osa savukaasujen mukaan lähteneistä kemikaaleista palautetaan savukaasujen puhdistuksen kautta takaisin kiertoon.



Kuva 16. Oikealla rikin ja vasemmalla natriumin kemikaalitaseet soodakattilassa (muokattu Hupa 2007, s. 2).

Toisessa ajomallissa hajukaasukattilalta liuottajalle siirtyy vähemmän rikkiä ja NaOH–kemikaalia. Enemmän rikkiä muodostuu soodakattilalla, josta rikki sitoutuu pohjasulaan ja päätyy liuottajan kautta kiertoon. Prosessista poistuvan rikin määrä on tässä ajomallissa oletettavasti alhaisempi ja siten se vaikuttaa sulfiditeetin arvon nousuun jossain määrin.

Vastaavasti kolmannessa ajomallissa, kun oletetaan NaOH:n kulutuksen olevan suurempaa ja syntyvän enemmän natriumbisulfiittia, liuottajalle päätyy enemmän natriumia. Kolmannessa ajomallissa liuottajalle menevä natriumin määrä kasvaa, kun natriumbisulfiitin kulutus kuitulinjoilla pysyy jokseenkin samana. Rikki natrium tasapaino on tässä ajomallissa siten parempi.

Päästöjen osalta suurin vaikutus eri ajomallien välillä näkyy hajukaasukattilan päästöissä. Aiemmin (luvussa 2.3.6) käytiin hajukaasujen ja metanolin polton vaikutukset soodakattilan päästöihin. Väkevien aiheuttama muutos käyttämällä yhtälöä 2 ja määritettyjä arvoja, voidaan todeta muutoksen olevan noin 1,0–1,5 % välillä Kaukaan soodakattilan NO_X–päästöihin. Metanolia täytyy polttaa molemmissa kattiloissa ja poltettava määrä vaihtelee jatkuvasti, jolloin metanolin vaikutusta päästöihin on vaikea arvioida tarkasti. Metanolin vaikutuksista päästöihin saadaan toivottavasti tuloksia koeajojen aikana.

Hajukaasukattila on pienempi ja siellä poltetaan pääosin vain metanolia ja väkeviä hajukaasuja. Soodakattila on vastaavasti suurempi ja siellä hajukaasujen sekä metanolin osuudet ovat pieniä koko poltettavaan materiaaliin nähden. Mikäli hajukaasujen ja metanolin määrää muutellaan ajomallien mukaan, niin näkyy se HKK:n päästöissä. Ajomallien tuomaa muutosta HKK:n päästöihin on vaikeaa arvioida. Oletuksena on kuitenkin, että mitä vähemmän väkeviä tai metanolia poltetaan, niin sitä pienemmät HKK:n päästöt ovat. Mikäli poltettavan materiaalin määrä on pienempi, niin silloin päästöjä muodostuu oletetusti vähemmän. Paras ajomalli olisi tämän perusteella toinen vaihtoehto.

Käyttövarmuuden osalta hajukaasujen polttamisessa parhain tulos saadaan useamman polttopaikan ollessa samaan aikaan käytössä. Tällöin on olemassa heti saatavilla varapolttopaikka, mikäli jokin polttopaikoista ajetaan alas hallitusti tai ongelmatilanteen seurauksena. Väkevien hajukaasujen palaessa samaan aikaan toisella polttopaikalla, voidaan kyseisen polttopaikan polttoa lisätä niin, että väkevät hajukaasut pysyvät poltossa. Poltto siis painottuu kokonaan toiselle polttopaikalle kapasiteetin salliessa, eikä keräilyjärjestelmässä tapahdu huomattavia muutoksia. Tämän perusteella ensimmäinen ajomallivaihtoehto on käyttövarmuuden kannalta paras ratkaisu

Toinen ja kolmas ajomalli ovat molemmat tilanteessa, jossa väkevien hajukaasujen poltto on yhden käyttöpaikan varassa. Toki kummassakin vaihtoehdossa varapolttopaikka on toiminnassa, sillä siellä poltetaan prosessissa syntyviä muita tuotteita. Väkevien

hajukaasujen palaessa soodakattilalla on hajukaasukattila metanolipoltolla, jolloin soodakattilan polttohäiriöiden myötä voidaan väkevät hajukaasut kääntää metanolin rinnalle polttoon. Kolmannessa ajomallissa voidaan väkevät hajukaasut kääntää soodakattilalle HKK:n ongelmien takia. Soodakattilalla on kuitenkin jatkuvasti poltto päällä, joten väkevien hajukaasujen ottaminen polttoon on nopea toimenpide. Toisen ja kolmannen ajomallin tapauksissa polttopaikan vaihto on yleensä nopea ja yksinkertainen toimenpide. Toki aina voi ilmetä ongelmia, jolloin kääntäminen ei onnistu aivan yksiselitteisesti.

Huonoin ajomallivaihtoehto käyttövarmuuden kannalta olisi, jos varapolttopaikkoja ei olisi heti saatavilla. Esimerkiksi kääntämisen tarpeen ilmetessä varapolttopaikkaa jouduttaisiin käynnistelemään täysin kylmästä tilasta. Kaukaalla tällaisia tilanteita esiintyy harvoin. Tällainen tilanne voisi tulla esiin lähinnä seisokkien ja huoltotöiden yhteydessä. Muuten poikkeuksetta ainakin kaksi polttopaikkaa on jatkuvasti ajossa, vaikka siellä ei juuri sillä hetkellä poltettaisikaan väkeviä hajukaasuja.

Käyttövarmuus on merkittävä tekijä prosessiturvallisuuden varmistamisessa. Kun hajukaasujen käsittely on luotettavaa, pienenevät myös erilaiset onnettomuusriskit ja turvallisuustaso paranee. Turvallisuus kaikkineen on yksi avaintekijöistä, ja siksi tärkeä huomioida myös hajukaasujen käsittelyssä.

Lopulliset ajomallien väliset vertailut paremmuusjärjestyksessä on koottu taulukkoon 4. Värikoodeilla kuvataan paremmuus järjestystä jokaisessa tarkasteltavassa luokassa. Vihreä paras vaihtoehto, oranssi keskiverto ja punainen huonoin.

Taulukko 4. Ajomallien vertailun lopputulokset paremmuusjärjestyksessä.

Ajomalli vaihtoehto	**Tarkasteltavat luokat**			
	Kustannukset	**Kemikaalikierto**	**Päästöt**	**Käyttövarmuus**
1.				
2.				
3.				

Näiden ajomallien eri ominaisuuksien vertailun pohjalta päädytään tarkastelemaan tarkemmin ensimmäistä ja toista ajomallia. Nämä ajomallit erottuivat tarkasteltavien luokkien osalta parhaimmiksi kolmesta eri ajomallista. Ajomalli vaihtoehto 3 on vertailussa kaikista huonoin vaihtoehto, etenkin kustannusten ja päästöjen osalta. Seuraavaksi suoritetaan kahdella valitulla ajomallilla tarvittavia koeajoja, jotta erot niiden välillä voidaan huomata ja todeta käytännössä. Ensimmäisestä ajomallista tietoja onkin jo paljon saatavilla, koska se on perinteinen ajomalli Kaukaalla. Tarkemmassa tarkastelussa on siis toinen ajomalleista. Myös jaksoittainen väkevien poltto HKK:lla on eräs ajomalli, jossa yhdistyy ensimmäinen ja toinen vaihtoehto. Tätä päästään myös koeajojen myötä tarkastelemaan syvemmin.

4.4 Koeajojen suorittaminen

Työtä varten suoritettiin koeajoja hajukaasujärjestelmän ja –kattilan osalta. Koeajot toteutettiin neljässä vaiheessa. Ensimmäinen koeajo toteutettiin 10.12.–13.12.2024. Toisen koeajon ajankohta oli 17.12.–20.12.2024. Kolmas pidempi jakso suoritettiin 9.1.–16.1.2025. Viimeinen ja kaikkein pisin koeajojakso suoritettiin 4.3.–13.3.2025. Koeajovuorokausia kertyi yhteensä noin 22, kun oletetaan koeajojen alkaneen ja loppuneen samoihin aikoihin ajanjaksojen alussa sekä lopussa. Todellisuudessa pientä vaihtelua aloitus– ja lopetusajankohtien välillä oli.

Natriumbisulfiitista otettiin kolme näytettä, joista analysoitiin taulukon 5 mukaiset arvot laboratoriossa. Kolmas näyte oli ainut mistä määritettiin natriumsulfaatti (Na_2SO_4) ja natriumbisulfiitti ($NaHSO_3$) arvot. Ensimmäinen ja toinen näyte sisälsivät vähemmän analysoituja arvoja. Näytteet otettiin seuraavina ajankohtina: 12.12.2024, 16.12.2024 ja 14.1.2025. Ensimmäisen näytteenoton aikana väkevät hajukaasut paloivat soodakattilalla, eli muodostunut näyte on otettu pelkän metanolin palaessa HKK:lla. Toisen näytteen aikana HKK:lla oli normaali tilanne, eli sekä väkevät että metanoli paloivat yhdessä. Viimeisen näytteen kohdalla taas pelkkä metanoli paloi HKK:lla, kuten ensimmäisessä näytteessä. Tämä näyte haluttiin ottaa, kun savukaasupesurin alakiertoon menevä ylimääräinen vesi oli suljettu. Tämä tehtiin siksi, että oletuksena oli ylimääräisen veden laimentavan muodostuvaa natriumbisulfiittia. Eikä kyseisellä vedellä ollut pesurin toiminnan kannalta tarvetta.

Taulukko 5. Natriumbisulfiitti näytteistä määritettävät laboratorioarvot ja yksiköt.

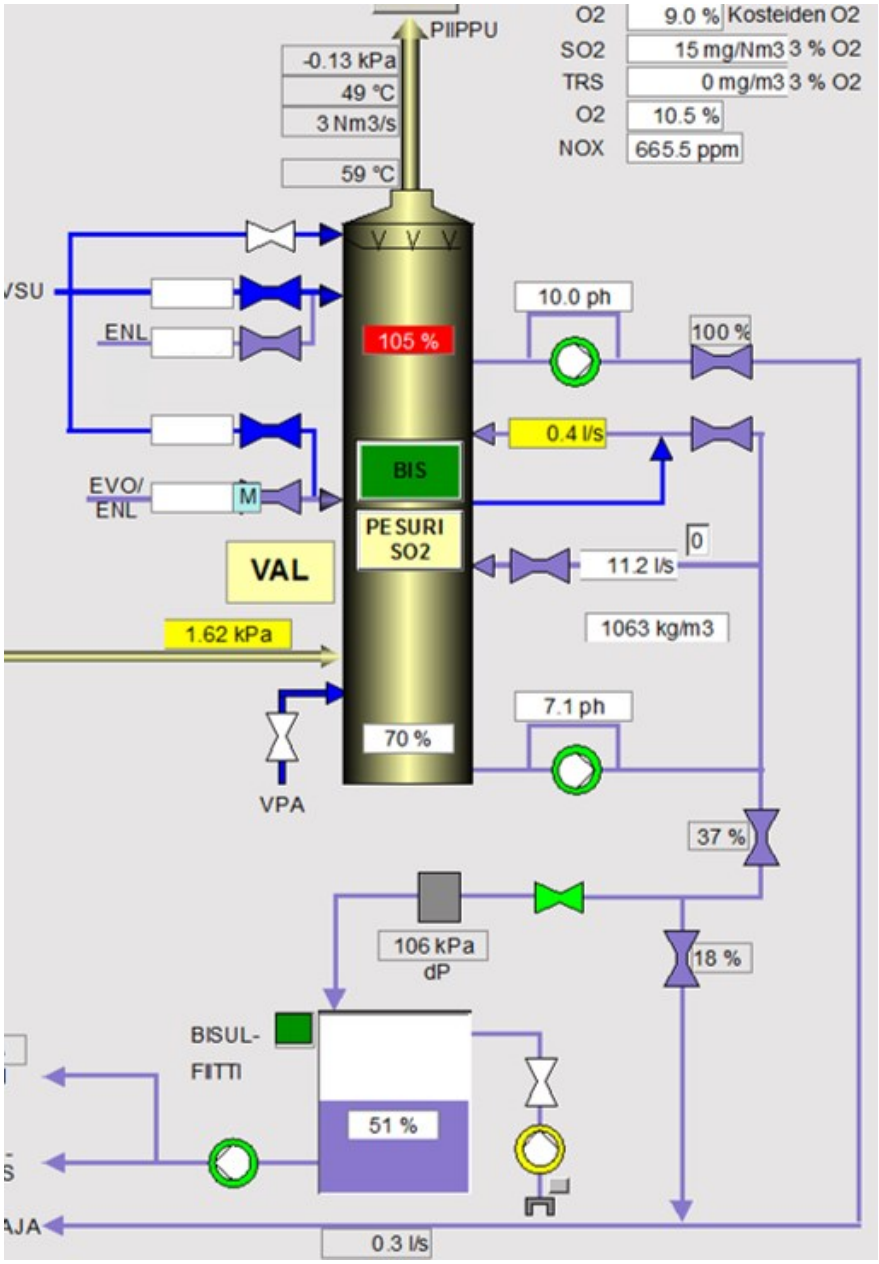
Tiheys	Sulfiitti	Sulfaatti	Na2SO4	NaHSO3	Tiosulfaatti	Tehollinenalkali	pH
g/cm3	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g NaOH/l	-

Koeajojen aikana otetuista näytteistä havaittiin kiertoliuoksen pH:n arvon eroavan ajokuvan jatkuvasta mittauksesta. Kaikista kolmesta näytteestä saatujen pH:n arvojen perusteella voitiin todeta mittauksen näyttävän väärin noin 0,3–0,4 pH:n verran. Lisäksi suoritettiin yksi erillinen pH:n mittaus 12.2.2025, jolloin mittauksen ja laboratoriotuloksen välinen pH ero oli noin 0,3. Mittauksen pH näytti siis pienempää lukemaa, mitä kiertoliuos todellisuudessa oli. Tämän havainnon myötä pH:n mittalaitteelle suoritettiin kalibrointi. Kalibroinnin jälkeen mittaus on luotettavampi ja antaa todellisemman kuvan kiertoliuoksen pH:n tasosta, jolloin NaOH–kemikaalin annostuksen ei tarvitse olla niin suuri. Kalibroitu pH:n mittaus näkyy alla olevassa SO_2–pesurin ajokuvassa (kuva 14), keskellä kuvaa, pesurin alhaalta lähtevästä linjasta.

Viimeisen pidemmän koeajojakson päällimmäisenä tavoitteena oli tarkkailla natriumbisulfiitin riittävyyttä ja muutenkin pidemmän koeajon ongelmia sekä muutoksia. Lisäksi tarkkailtiin sulfiditeetin käyttäytymistä koeajojen aikana.

4.5 SO_2–pesuri

SO_2–pesurin kiertonesteen pH:ta pidetään vakiotasolla annostelemalla NaOH–kemikaalia veden sekaan. Kuvassa 17 on SO_2–pesurin ajokuva Honeywell–järjestelmästä. Seosta syötetään pesuriin ylä– ja alatasoille. Lisäksi kiertonestettä pumpataan pesurin pohjalta kahdelle eri tasolle pesurissa. Tavoite pH:n arvo on noin 6,5–7,5. Poltossa olevat polttoaineet, niiden määrät ja palamisparametrit vaikuttavat pH:n arvoon. SO_2–pesurilta natriumbisulfiitti ohjautuu suodattimen kautta säiliöön tai vaihtoehtoisesti liuottajalle tuotannon ollessa kulutusta suurempaa.



Kuva 17. SO_2–pesurin ajokuva Honeywell–järjestelmästä Kaukaalla.

NaOH:n määrä pelkällä metanolin poltolla on niin pieni, että alakierron kemikaalin syötöllä ei päästä näin pieneen arvoon. Putkilinja ja venttiilit ovat liian suuria pienille virtauksille. Venttiiliä ei saada ajettua niin pieneen kulmaan kuin olisi tarvetta. Tästä syystä alakierto on kokonaan suljettu, kun NaOH:n tarve on vähäinen. Yläkierto on ainoa paikka, johon NaOH:n annostelu on tällöin päällä. Lisäksi NaOH kiteytyy helposti, jolloin se tukkiin pieniä virtausväyliä.

Savukaasupesurin yläkierrosta lähtee suora linja liuottajalle. Tässä linjassa on pH:n mittaus, pumppu ja venttiili. Linjassa oleva venttiili toimii automaattisesti savukaasupesurin ylätason pinnanmittauksen mukaan. Pinnan ollessa korkealla venttiili avautuu ja päin vastoin. Tällä hetkellä linja on kuitenkin tukossa, sillä pinta näyttää jatkuvasti 105 % ja säätävä venttiili on täysin auki. Oletuksena on, että NaOH on kiteytynyt ajan saatossa ja tukkinut halkaisijaltaan pieniläpimittaisen putkilinjan. Pesurin ylätasolta ei ole siten toimivaa suoraa yhteyttä ulos pesurista. Kiertävä neste siirtyy sen sijaan pesurin sisällä alakierron tasolle ja jatkaa sieltä ulos pesurista. Savukaasupesuri toimii ilman tukkeessa olevaa yläkierron linjaa, vaikka ei yhtä tehokkaasti.

5 Koeajojen tulokset

Tässä kappaleessa käydään läpi koeajoista saatuja tuloksia ja niiden vaikutuksia. Aluksi tarkastellaan muodostuneessa natriumbisulfiitissa havaittuja muutoksia. Tämän jälkeen analysoidaan kuitulinjojen kemikaalijäämiä, joihin natriumbisulfiitin muutokset vaikuttavat. Seuraavaksi selvitetään, miten koeajomalli vaikuttaa hajukaasukattilan ja soodakattilan päästöihin. Lopuksi esitellään havainnot muutoksista hajukaasukattilalla, SO_2–pesurilla sekä kemikaalien kulutuksessa koeajojen aikana.

5.1 Natriumbisulfiitin muutokset

Hajukaasukattilan ollessa pelkästään metanolipoltolla, jolloin kaikki väkevät hajukaasut ohjautuivat soodakattilaan, havaittiin muodostuneessa natriumbisulfiitissa eroja verrattuna normaaliin ajotilanteeseen. Molemmilla ajotyyleillä otettiin näytteen natriumbisulfiitista. Näytteet analysoitiin laboratoriossa, jotta voitiin todeta lopputuotteiden erot yksityiskohtaisemmin.

Eri näytteiden tuloksia tarkastellessa havaitaan selkeä ero biojalostamon ja hajukaasukattilan natriumbisulfiiteissa. Tulokset osoittavat jalostamolta tulevan natriumbisulfiitin olevan väkevämpää kuin savukaasupesurilta muodostuva aine. Molemmat natriumbisulfiitti laadut päätyvät lopulta samaan säiliöön ja sieltä käyttöön. Tämä eri lähteistä tulevien natriumbisulfiittien väkevyys ero näkyy seuraavaksi tarkasteltavassa kuitulinjojen kemikaalijäämissä. Jäämien mittauksessa huomataan, milloin käyttöön menee väkevämpää jalostamolta tulevaa ainetta ja milloin HKK:lla muodostunutta ainetta.

Väkevyyden merkitys näkyy kemikaalin määrän tarpeessa. Väkevämpää natriumbisulfiittia tarvitaan vähemmän, jotta saadaan sama vaikutus klooridioksidi jäämien tuhoamisessa. Vastaavasti laimeampaa natriumbisulfiittia kuluu enemmän. Koeajon aikana muodostunut natriumbisulfiitti oli hieman laimeampaa kuin normaalissa ajotilanteessa. Natriumbisulfiitin kulutus siis lisääntyy koeajojen aikana käyttökohteissa.

Natriumbisulfiittia muodostuu hajukaasukattilan pesurilla noin 1,8–2,0 litraa/s, kun väkevät ja metanoli ovat poltossa. Tämä määrä menee liuottajalle virtausmittauksen kautta, kun natriumbisulfiittisäiliön pinta on yli tavoitearvon. Vastaava määrä on taas 1,0–1,2 litraa/s, kun väkevät ovat käännettynä soodakattilalle.

Nestebiojalostamolla natriumbisulfiittia muodostuu kuumaöljykattilan savukaasupesurilla. Kuumaöljykattila on hieman samantapainen kuin sellutehtaan hajukaasukattila. Kuumaöljykattilalla muodostuvaa lämpöä hyödynnetään kuumaöljyn lämmittämiseen haluttuun lämpötilaan, kun taas hajukaasukattilalla lämpöenergia hyödynnetään höyryn muodostukseen. Natriumbisulfiitti on nestebiojalostamolle sivutuote, jota se ei itse tarvitse omassa prosessissaan. Tästä syystä syntynyt natriumbisulfiitti hyödynnetään sellutehtaan prosessissa. Natriumbisulfiittia muodostuu tasaisella virralla. Toimitukset sellutehtaalle suoritetaan säännöllisesti. (Tiittanen 2025.)

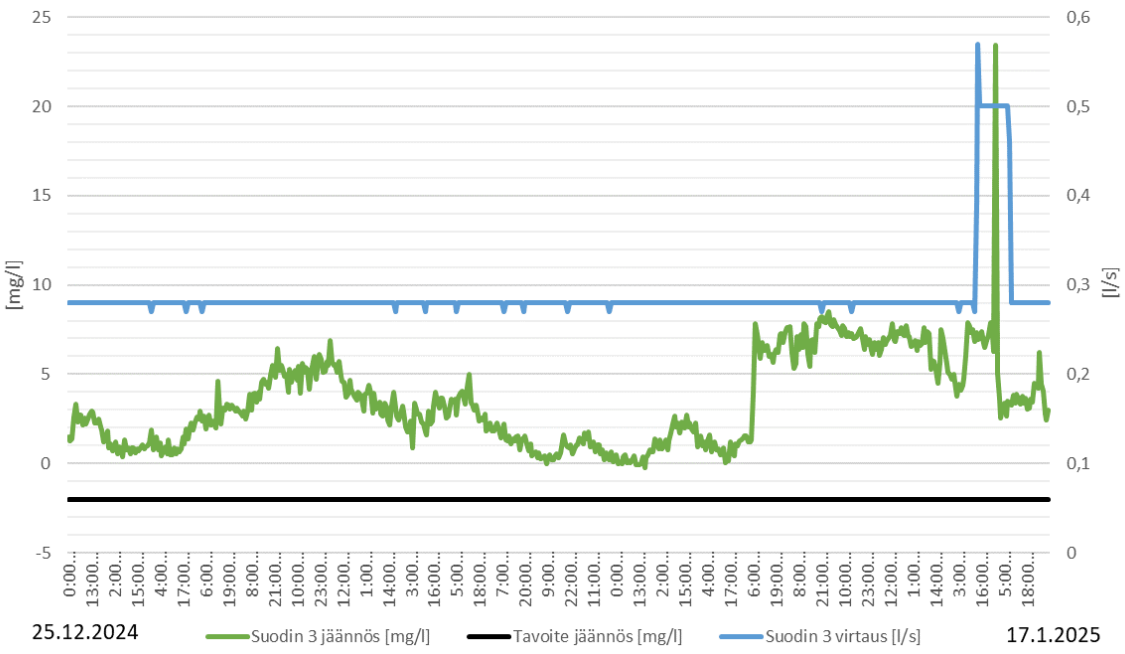
Biojalostamon natriumbisulfiitti puretaan natriumbisulfiittisäiliöön sellutehtaalla. Tähän samaan säiliöön menee myös HKK:lla muodostunut natriumbisulfiitti. Säiliöön tuotu natriumbisulfiittikuorma biojalostamolta nostaa säiliön pintaa noin 18–23 % tuotua kuormaa kohden. Kuorman seurauksena tapahtuva pinnan nousu kääntää HKK:lla muodostuneen natriumbisulfiitin virtauksen liuottajalle, kun säiliön pinnan mittaus saavuttaa asetetun tavoitearvon.

5.2 Vaikutus kuitulinjojen kemikaalijäämiin

Natriumbisulfiitin koostumuksen muutokset vaikuttavat suoraan sen käyttökohteeseen, eli kuitulinjan kemikaalijäämien tappoon. Kun natriumbisulfiitin väkevyys pienenee, sen kulutus käyttökohteissa kasvaa saman vaikutuksen saavuttamiseksi. Vaihtoehtoisesti, jos natriumbisulfiitin syöttövirtaus pysyy vakiona, kemikaalijäämien määrä kuitulinjalla kasvaa.

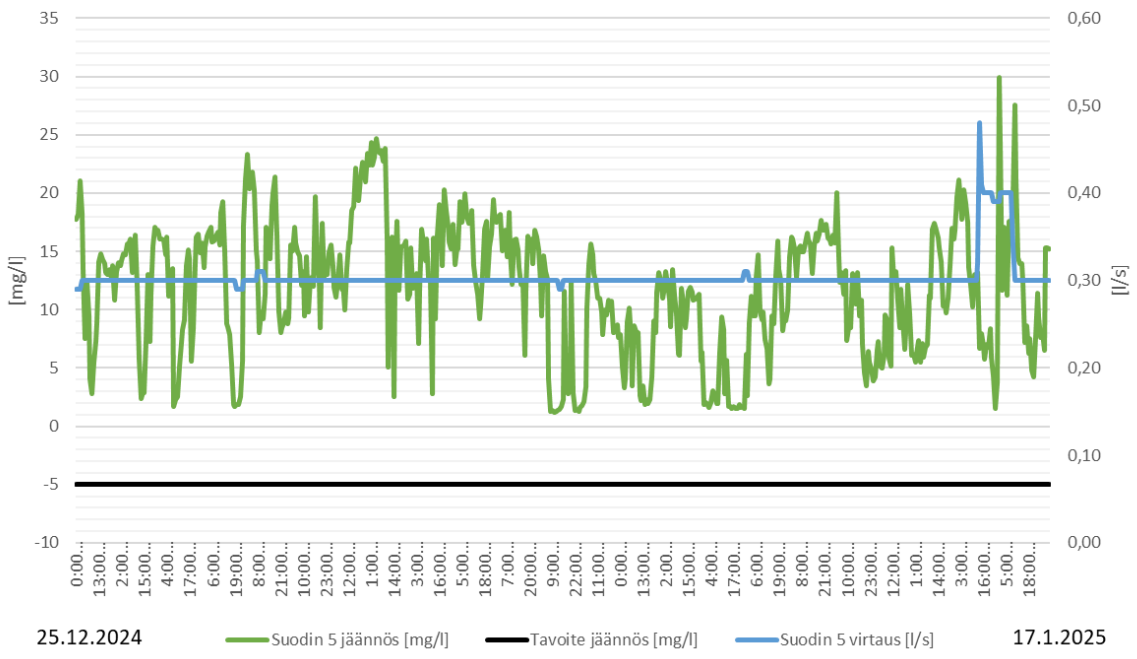
Kuvissa 18 ja 19 on esitetty kuitulinja 1 (KL1) kemikaalijäännökset ja natriumbisulfiitin virtaukset suotimissa 3 ja 5. Vastaavasti kuvissa 20 ja 21 on esitetty samat arvot kuitulinja 2 (KL2) D1– ja D2–vaiheissa. Lisäksi kaikissa kuvissa on tavoite jäännöskemikaalin arvot esitetty mustalla viivalla. Negatiivinen tavoitearvo tarkoittaa, että mittauksessa on natriumbisulfiittia. Positiivinen tarkoittaa klooridioksidi jäämiä mittauksessa.

Jäännöskemikaalien tavoitteissa on vaihtelevuutta eri kohteissa, mutta niiden vaihtelevuuteen ja merkitykseen prosessissa ei oteta tässä työssä kantaa. Kemikaalijäämän suuruuteen vaikuttavat eniten linjaan syötettävän klooridioksidin määrä sekä tuotannon määrä. Kuvissa koeajo on alkanut aikajanalla hieman yli 2/3 kohdalla. Selkeimmin koeajon alkamisen huomaa kuvasta 18, kun jäännösarvo nousee äkillisesti.



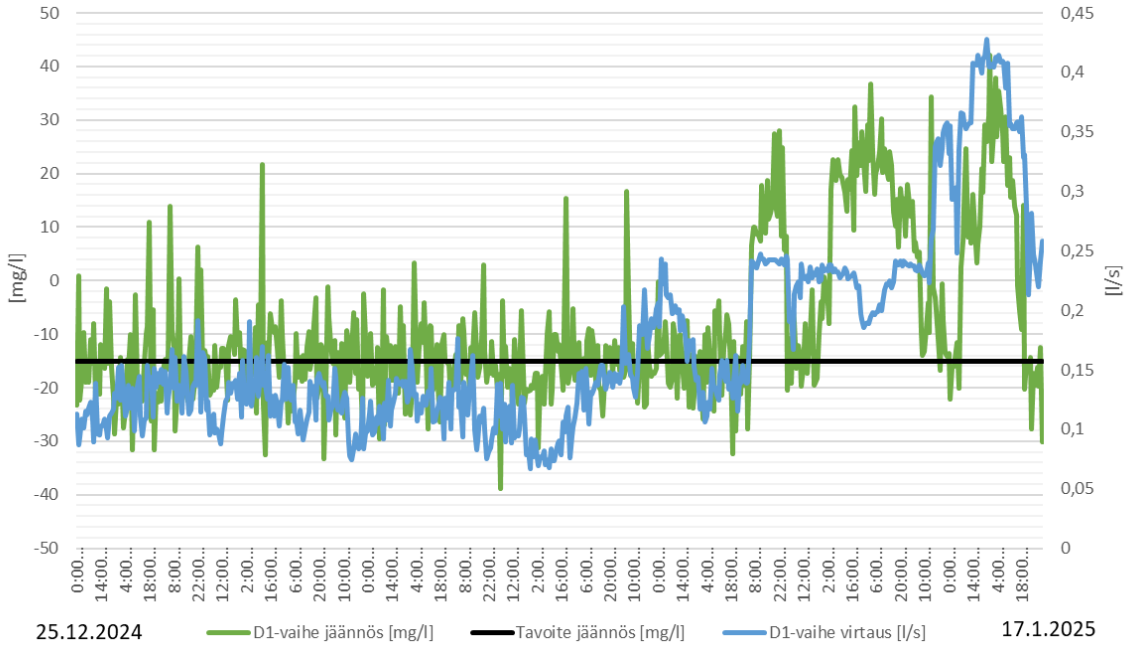
Kuva 18. Kuitulinja 1 suodin 3 muutokset kemikaalijäämissä aikavälillä 25.12.2024–17.1.2025.

Edellisestä kuvasta havaitaan jäännöksen arvon nousseen koeajojakson alettua. Nousu ei lukuarvollisesti ole korkea, mutta prosentuaalinen muutos on huomattava. Kemikaalijäännöksen tavoite on vakio –2 mg/l ja natriumbisulfiitin virtaus on vakio 0,28 l/s, joka nostettiin hetkellisesti 0,50 l/s, kun huomattiin jäännösarvon nousseen. Jäännösarvo on myös aiemmin ollut korkeammalla tasolla, vaikka natriumbisulfiitti HKK:lta on ollut normaalilla tuotannolla. Tarkastelujaksoon tätä aiempaa korkeampaa arvoa ei mahtunut, mutta lukuarvollisesti on jäännöksen osalta pyöritty samoissa lukemissa aiemminkin kuin nykyisen koeajon aikana. Toki biojalostamolta on jatkuvasti tullut 4 päivän välein vahvempaa tavaraa, mikä näkyy jäännöksissä pieninä notkahduksina, kuten juuri ennen virtauksen määrän nostamista.



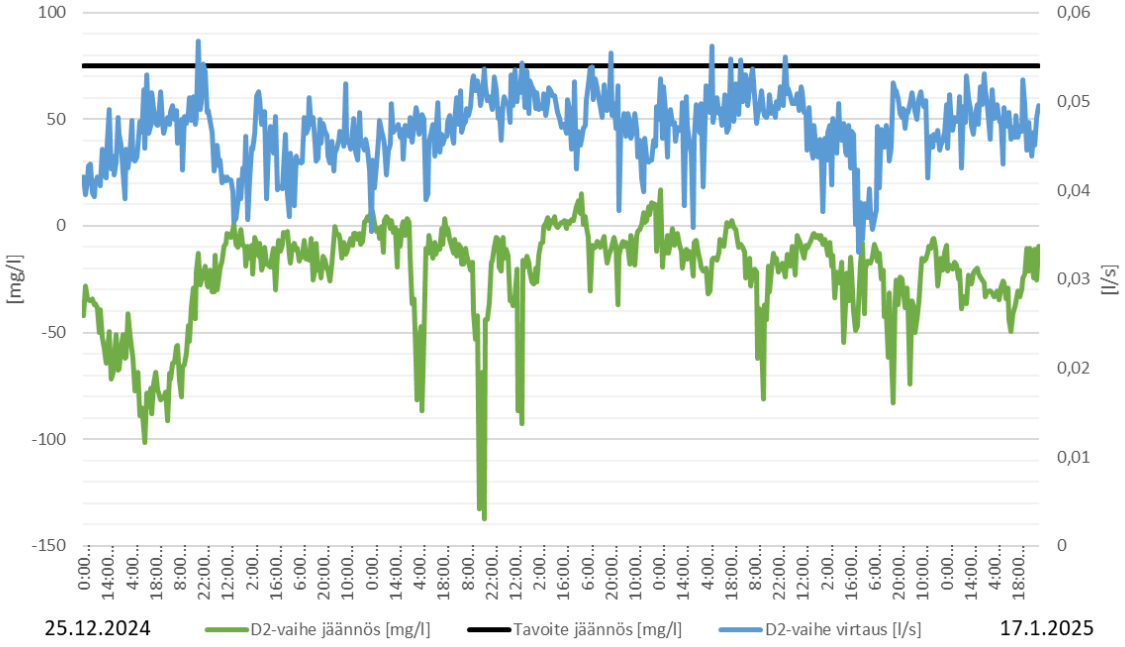
Kuva 19. Kuitulinja 1 suodin 5 muutokset kemikaalijäämissä aikavälillä 25.12.2024–17.1.2025.

Saman linjan myöhemmän vaiheen 5 suotimella kemikaalijäännökset ovat kauttaaltaan suurempia kuin aiemmin, kuten kuvasta 19 havaitaan. Tavoite jäännös on myös asetettu alemmas –5 mg/l. Tässä jäännöskemikaalissa ei ole havaittavissa yhtä selkeää eroa, kun koeajot ovat alkaneet. Virtauksen nosto on tehty samalla tapaa, kun hetkellisesti virtaus on nostettu 0,3 l/s → 0,5 l/s. Tämän jälkeen tiputettu 0,4 l/s tasolle ja melko nopeasti takaisin normaaliin tasoon. Merkittävää muutosta kemikaalijäämissä ei kuitenkaan ole havaittavissa. Heiluntaa on ollut jatkuvasti ja enemmän kuin aiemmassa 3 suotimessa.



Kuva 20. Kuitulinja 2 D1–vaiheen muutokset kemikaalijäämissä aikavälillä 25.12.2024–17.1.2025.

Suuremman kuitulinjan (KL2) D1–vaiheessa klooridioksidin jäännösarvo noudattelee tarkemmin tavoitearvoa, kun natriumbisulfiitin virtaus on vaihteleva. Virtaus määräytyy jäännöksen mukaan. Toki arvollisesti vaihtelu on suurta tavoitearvon ympärillä. Tästä kuvasta on myös selkeä todeta koeajon alkaminen, kun jäännös ja virtaus ovat nousseet normaalia suuremmiksi. Aluksi virtausta oli rajoitettu, mutta rajaa nostettiin suuremmaksi kaksi kertaa. Jäännösarvo pyörii korkeimmillaan 30 mg/l arvoissa. Kaksi suurempaa pudotusta jäännösarvossa lähelle tavoitetta on johtunut biojalostamolta tulleen natriumbisulfaatin vaikutuksesta. Korkeimmillaan virtaus on ollut 0,4 l/s, joka oli rajan yläarvo. Jäännös on ollut silloin myös korkeimmillaan. Linja olisi tarvinnut suuremman virtauksen, jotta jäännöskemikaalia olisi saatu pienemmäksi.



Kuva 21. Kuitulinja 2 D2–vaihe muutokset kemikaalijäämissä aikavälillä 25.12.2024–17.1.2025.

D2–vaiheessa jäännöksen tavoitearvo on 75 mg/l, mikä on huomattavasti toisia korkeampi. Tästä syystä natriumbisulfiitin virtaus on pientä. Virtaus kulkee jatkuvasti lähes minimivirtausta vasten, mihin se on rajoitettu. Jäännösarvossa ei ole havaittavissa lähes lainkaan muutosta. Koska natriumbisulfiitin virtausmäärä tässä prosessivaiheessa on hyvin pieni, sen väkevyydellä ei ole merkittävää vaikutusta kokonaisuuteen.

Taulukossa 6 on kuvattu natriumbisulfiitin virtausta eri käyttökohteisiin kuitulinjoilla. Nykyinen sarake tarkoittaa normaalia ajomallia. Vastaavasti vaihtoehtoinen tarkoittaa koeajon tilannetta. Pienemmällä kuitulinjalla olevat suodin 3 ja 5 ovat käsisäädön perässä, eli venttiilin kulmaa säädetään haluttuun asentoon ja virtaus on sen mukainen. Tästä syystä vaihteluväliä ei ole, vaan arvot ovat kiinteitä. Toisella kuitulinjalla olevat D1– ja D2–vaiheen pesurit taas ovat kaskadi kytkennällä. Tämä tarkoittaa, että venttiili säätää itseään mittauksen perusteella. Natriumbisulfiitin virtaus määräytyy kemikaalijäämien mukaisesti. Tämän takia virtaus määrissä on vaihtelua. Nykyisen ajomallin arvoja on tarkasteltu useiden kuukausien ajalta, kun vaihtoehtoisessa ajomallissa tarkasteluväli oli vain vuorokauden luokkaa. Testiajojen tarkastelussa luotettavuus on siis heikompi, eikä tuloksia voida pitää täysin vertailukelpoisina.

Taulukko 6. Kuitulinjoille virtaavan natriumbisulfiitin muutokset määrissä nykyisellä ja vaihtoehtoisella ajomallilla.

Käyttökohde	Tilavuusvirta [litraa/s]	
	Nykyinen	Vaihtoehtoinen
Suodin 3	0,28	0,28 (hetkellisesti 0,50)
Suodin 5	0,30	0,3 (hetkellisesti 0,40)
D1–vaiheen pesuri	0,05–0,25	0,2–0,44
D2–vaiheen pesuri	0,03–0,06	0,03–0,06
Kemikaalijäännöksien tuhoaminen yhteensä	0,66–0,89	0,81–1,08
Venturi pesuri	0,65–1,20	0,65–1,20
Yhteensä	1,31–2,09	1,46–2,28

Kuitulinjojen venturipesurilla muutos ajomallien välillä on olematon ainakin tämän lyhyen tarkastelujakson aikana. Venturipesurin virtaus nousi hetkellisesti, mutta se on ollut koholla samalla tasolla useasti ennenkin, jopa korkeammallakin tasolla. Virtauksen määrä siis vaihtelee merkittävästi venturipesurilla myös normaalin ajon aikana.

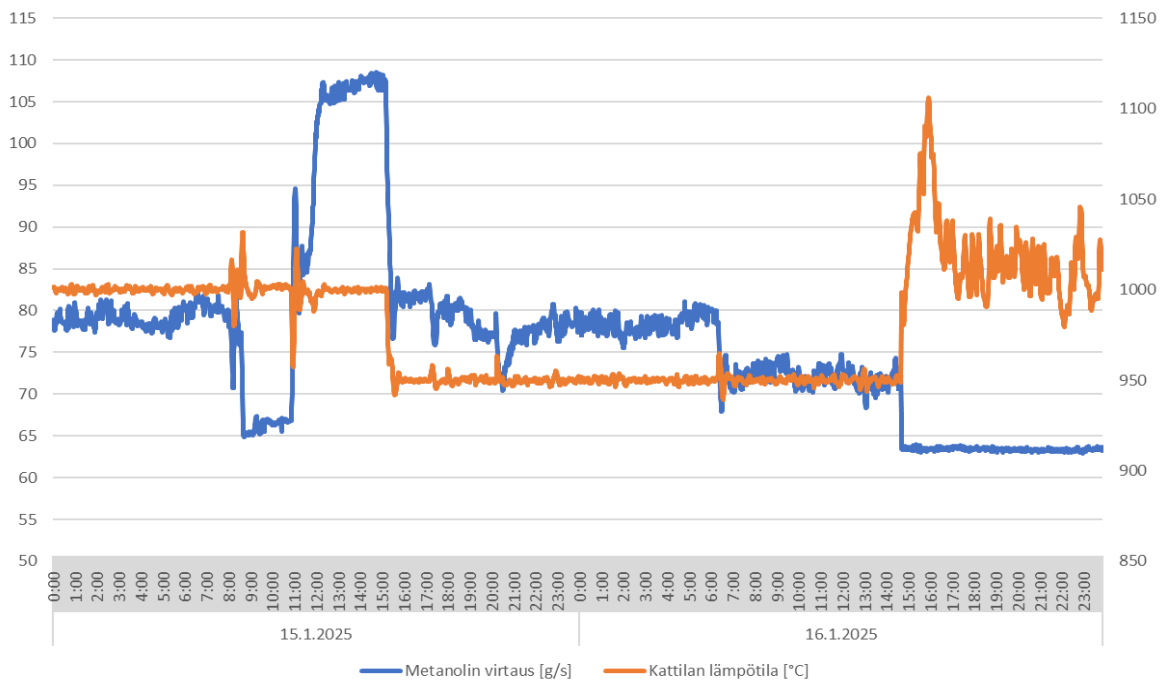
Kokonaisuudessaan natriumbisulfiitin muutokset kuitulinjalla eivät ole kovin merkittäviä. Suurin vaikutus on KL2 D1–vaiheessa. Toinen paikka, josta muutoksen huomaa on KL1 suodin 3, mutta siinä jäännösarvon muutos on lukuarvollisesti hyvin merkityksetöntä. Muuten vaikutuksia natriumbisulfiitin koostumuksen muutoksesta ei juuri huomaa.

Yleisesti on huomioitava kuitulinjojen jatkuva muutos prosessin ja olosuhteiden osalta, joilla on suora vaikutus myös natriumbisulfiitin sekä jäännöskemikaalien määrään. Tästä syystä koeajojen ja laimeamman natriumbisulfiitin todellisia vaikutuksia ei pystytä aivan tarkasti toteamaan. Tulokset tarjoavat yleiskuvan tapahtuvista muutoksista. Mikäli haluttaisiin täysin tarkat tulokset vaikutuksista, täytyisi kuitulinjojen prosessi– ja käyttöolosuhteet pyrkiä pitämään mahdollisimman vakaina testin aikana. Tämä on käytännössä haastavaa, joten suuntaa–antavat tulokset riittävät tässä kohtaa.

5.3 Päästöt

Tarkastellaan seuraavaksi HKK:n käyttäytymistä ja muodostuvia hetkellisiä päästöjä koeajojen aikana. Arvioidaan metanolin polton muutoksen vaikutusta sekä väkevien hajukaasujen aiheuttamaa muutosta kattilan päästöjen tilanteeseen. Tavoitteena on selvittää, kuinka kattilan tilanne muuttuvat. kun väkevät hajukaasut otetaan takasin polttoon.

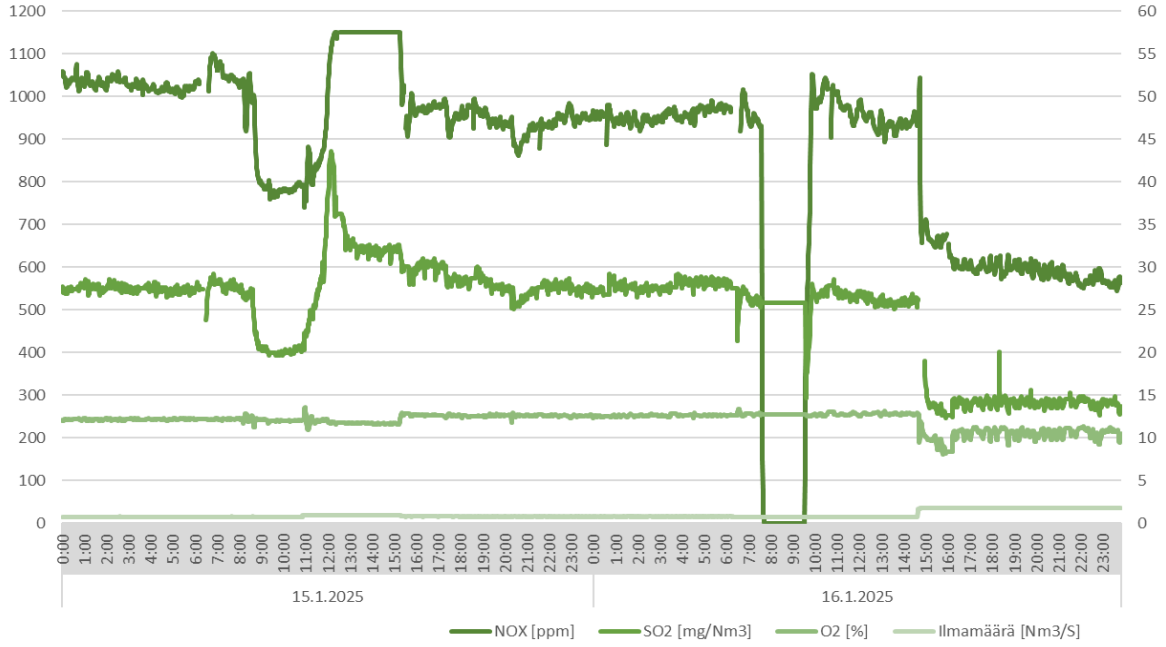
Kuvassa 22 on esitetty hajukaasukattilassa poltettavan metanolin virtaus (vasen akseli) sekä kattilan lämpötila (oikea akseli). Tarkastelujakso on kahden päivän mittainen. Arvot ovat minuutin keskiarvoilla esitettynä. Kuvassa 23 on esitetty samalta aikaväliltä toisia mittaussuureita, niin ikään minuutin keskiarvolla. Kuvasta 22 havaitaan lämpötilan pysyvän vakiona aina tietyn jakson ajan, mikä johtuu kattilalle asetetusta tarkasta lämpötilan pyyntiarvosta. Katilan lämpötilaa säädetään metanolin syötöllä. Aluksi metanoli paloi yksin hajukaasukattilalla. Lämpötilan noustessa väkevät hajukaasut palautettiin HKK:lle polttoon. Sen seurauksena huomataan metanolin virtauksen vähentyneen ja lämpötilan nousseen. Kattila pyrkii pienentämään metanolin virtausta, jotta saavuttaa asetetun lämpötilan. Alussa lämpötilapyynti on 1000 °C ja pyynti lasketaan 15.1. klo 15:00 arvoon 960 °C. Huomataan, että lämpötila ei saavuta lopussa asetettua tavoitetta, vaan on korkeammalla tasolla.



Kuva 22. Hajukaasukattilan metanolin virtaus polttoon ja kattilan lämpötila ajan funktiona.

Kuvassa 23 on esitetty HKK:n päästöt piippuun savukaasupesurin jälkeen sekä kattilaan syötettävä ilmamäärä. Ilmamäärä on pelkän metanolin polton aikana noin 0,75 Nm^3/s ja väkevien palaessa noin 1,8 Nm^3/s. 15.1. klo 12:00–15:00 välisenä aikana ilmamäärä nostettiin 0,95 → 1,8 Nm^3/s, jotta metanolia saatiin poltettua hetkellisesti enemmän. Syynä oli metanolisäiliön pinnan korkeus. Vaikka alussa ilmamäärä on ollut pienempi, niin jäännöshappi [O_2 %] on ollut hieman suurempi kuin suuremmalla ilmamäärällä väkevien hajukaasujen polton aikana. Voidaan todeta, että pelkän metanolin poltossa savukaasuihin jää enemmän jäännöshappea. Tämä johtuu pääosin siitä, että ilman määrää ei voida enää paljoa pienentämään 0,75 Nm^3/s alapuolelle. Tällöin venttiilin kulma on enää auki 10 % luokkaa. Ilmavirtaus alkaa oletettavasti heittelemään venttiilin pienen kulman takia. Jos venttiiliä suljettaisiin lisää, vaarana olisi hajukaasukattilan menevän lukitustilaan ja pysäyttävän polton kokonaan.

Kuvassa 23 on vasemmalla asteikossa esitetty NO_X–päästöjen arvo ja loput esitetyistä trendeistä on oikean puolen asteikon mukaiset. NO_X–päästöjen yksikkönä on ppm (parts per million), joka kuvaa aineen osuutta miljoonassa osassa kokonaismäärästä. SO_2–päästöjen yksikkö on esitetty muodossa mg/Nm^3. Tämä yksikkö on erilainen, sillä siinä on huomioitava savukaasujen kokonaismäärä. Pelkässä metanolin poltossa savukaasuja muodostuu noin 1 Nm^3/s, kun taas väkevien hajukaasujen ollessa mukana määrä on noin 3 Nm^3/s.



Kuva 23. Hajukaasukattilan päästöt piippuun savukaasupesurin jälkeen sekä kattilaan syötettävä ilmamäärä ajan funktiona. Vasemmalla akselilla esitetty NO_X–päästöt [ppm] ja muut kuvaajan suureet oikealla akselilla ovat eri yksiköissä.

NO_X– ja SO_2–päästöjen osalta on mittaustuloksista poistettu yksittäisiä tietoja kuvaajien selkeyden vuoksi. Päästöjen mittauksissa 3 tunnin välein näytelinja huuhdellaan, jolloin päästölukemat heittelevät yleensä huomattavasti ja näyttävät normaalia alhaisempia lukemia. Huuhtelut kestävät noin 5 minuuttia. Tämän huuhtelun aikana päästömittaukset eivät ole todellisia. Kuvaajissa näkyy vielä pieniä yksittäisiä virheitä, mutta yleisen kulun pystyy kyllä hahmottamaan selkeästi. NO_X–päästöjen mittauksessa on 15.1. klo 12:00–15:00 tasainen kohta, koska tiedonkeruu on rajoitettu 1150 ppm arvoon, eli tuon ajan mittaus on ollut yli 1150 ppm. Lisäksi NO_X– ja SO_2–päästömittauksissa on 16.1. klo 7:30–9:30 pieni katkos, joka johtui mittauksen huollosta ja kalibroinnista. Hajukaasujen polton aloittaessa päästömittauksissa oli myös hetkelliset korkeat piikit, jotka on otettu pois tuloksien selkeyden vuoksi. Hajukaasukattilan TRS–päästömittauksia ei ole esitetty, koska ne olivat jatkuvasti hyvin lähellä arvoa 0.

Voidaan todeta metanolin virtauksen polttoon vaikuttavan suoraan piippuun menevien päästöjen määrään. Viive ajat ovat myös lyhyitä, kun muutos tapahtuu metanolin virtauksessa, niin se näkyy lähes välittömästi päästöissä.

Seuraaviin taulukkoihin on koottu soodakattilaa ja HKK:n ominaispäästöt koeajojakson sekä normaalin käyttöjakson aikana aikavälillä 28.2.–.10.3.2025. Ajanjakson alkuosan aikana kattiloilla on ollut normaalin tilanteen mukainen ajomalli. Viimeinen koeajojakso on aloitettu 4.3.2025. Kattiloilla on päivien välillä hieman vaihdellut mm. olosuhteet, tehot ja poltettujen polttoaineiden määrät. Tulokset eivät siis ole täysin vertailukelpoiset keskenään, mutta suuntaa antava tulos saavutetaan. Lisäksi otanta on melko lyhyt. Taulukossa 7 on soodakattilan NO_X– ja SO_2 + TRS–ominaispäästöt esitettyinä kilogrammoina tuotettua sellumäärää kohden vuorokausittain. Ominaispäästöissä SO_2– ja TRS–päästöt lasketaan yhteen. Tässä yksikkönä käytetään kilogrammaa rikkiä tuotettua ilmakuivattua sellutonnia kohti. Vastaavasti taulukossa 8 on samat arvot HKK:n osalta, mutta pidemmällä ajanjaksolla esitettynä.

Taulukko 7. Soodakattilan ominaispäästöt 28.2.–10.3.2025 välisenä aikana.

Päivämäärä	**NO_X [kg/ADt]**	**SO_2 + TRS [kgS/Adt]**
28.2.2025	1,32	0,02
1.3.2025	1,35	0,02
2.3.2025	1,09	0,01
3.3.2025	1,30	0,02
4.3.2025	1,16	0,02
5.3.2025	1,07	0,02
6.3.2025	1,61	0,02
7.3.2025	1,12	0,02
8.3.2025	1,17	0,02
9.3.2025	1,15	0,02
10.3.2025	1,19	0,02

Taulukosta huomataan SO_2 + TRS–päästöjen pysyneen samalla tasolla, yhden päivän pientä muutosta huomioimatta. NO_X–päästöissä päivittäinen vaihtelu on suurempaa. Koeajon vaikutusta ominaispäästöihin ei voida selkeästi havaita. Tuotanto määrä on 6.3. ollut muita päiviä pienempi, jolloin ominaispäästöissä näkyy korkeampi NO_X–päästön arvo.

Taulukko 8. Hajukaasukattilan ominaispäästöt 28.2.–16.3.2025 välisenä aikana.

Päivämäärä	**NO_X [kg/ADt]**	**SO_2 + TRS [kgS/ADt]**
28.2.2025	0,17	0,00
1.3.2025	0,18	0,00
2.3.2025	0,11	0,00
3.3.2025	0,12	0,00
4.3.2025	0,09	0,00
5.3.2025	0,09	0,00
6.3.2025	0,12	0,00
7.3.2025	0,08	0,00
8.3.2025	0,07	0,00
9.3.2025	0,06	0,00
10.3.2025	0,07	0,00
11.3.2025	0,09	0,00
12.3.2025	0,09	0,00
13.3.2025	0,12	0,00
14.3.2025	0,10	0,00
15.3.2025	0,12	0,00
16.3.2025	0,14	0,00

Hajukaasukattilan SO_2 + TRS–päästöissä ei ole tarkastelujakson aikana huomattavissa mitään muutoksia, sillä nämä ominaispäästöarvot ovat olemattomia HKK:lla. NO_X–päästöjen puolella taas on havaittavissa koeajojakson vaikutus, kun 4.3.2025 alkanut koeajo on pudottanut ominaispäästöt alle 0,10 arvoihin. Ainut poikkeama on 6.3., jolloin aiemmin todettuna tuotanto on ollut vähäisempää muihin päiviin verrattuna, jolloin ominaispäästö jäi korkeammaksi. Päivien väliseen vaihteluun vaikuttaa toki myös HKK:lla poltettavan metanolin määrä. Enemmän poltettua metanolia muodostaa enemmän päästöjä, kuten aiemmin tässä kappaleessa todettiin. Metanolin poltto on kuitenkin ollut kohtalaisen tasaista koko tarkastelujakson ajan. Ominaispäästöt ovat nousseet taas korkeammalle tasolle 13.3., jolloin koeajo päättyi. Huomataan siten selvä yhteys koeajon vaikutuksista päästöihin.

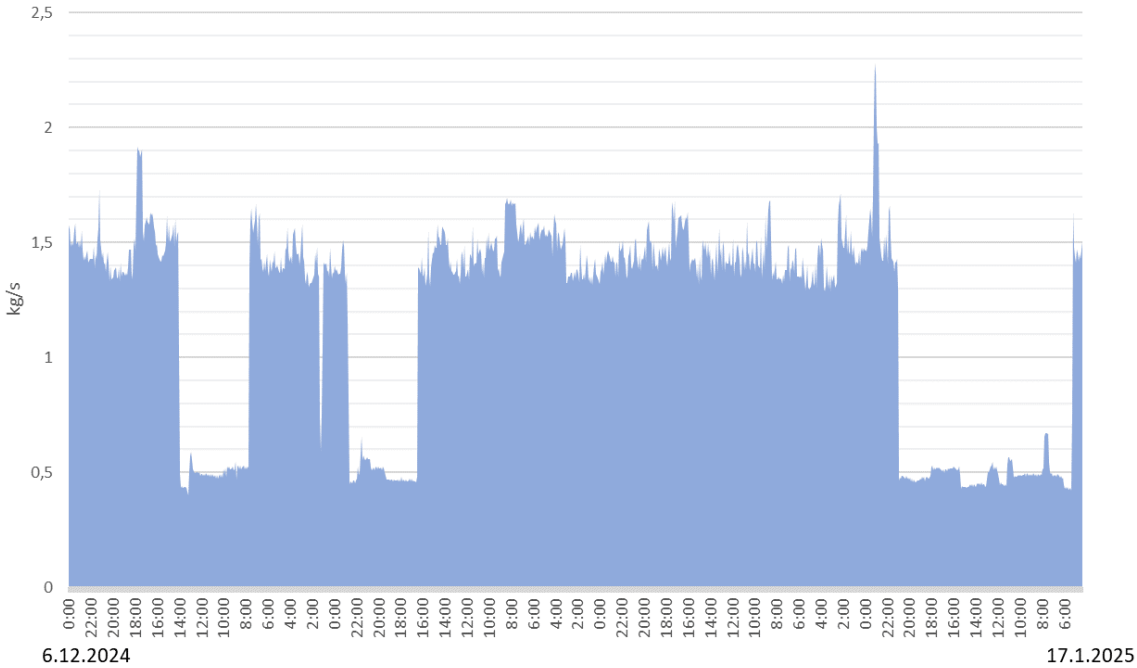
5.4 Hajukaasukattilan muutokset testiajon aikana

Savukaasujen lämpötila normaalilla ajomallilla SO_2–pesurilta lähtiessä on noin 60 °C ja piippuun mennessä noin 50 °C. Vaihtoehtoisessa ajomallissa savukaasujen lämpötilat ovat huomattavasti normaaleja alhaisemmat. Tällöin edellä mainitut lämpötila ovat noin 30 °C ja 20 °C. HKK:n jälkeinen lämpötila normaaliajossa ennen pesuria on 250 °C ja testiajossa 220 °C. Itse hajukaasukattilan polttokammion lämpötila pysyy kuitenkin samalla tasolla, vaikka ajomalleja on vaihdeltu, koska kattila säätä ilman ja polttoaineen suhdetta tavoitelämpötilan saavuttamiseksi. Voidaan siis todeta, että savukaasujen lämpötilat ovat ennen ja jälkeen SO_2–pesuria alhaisemmat HKK:lla testiajon aikana. Keskimäärin savukaasujen lämpötilat pesurin jälkeen ovat puolittuneet ja ennen pesuria ero on noin 30 °C.

Savukaasujen määrässä on havaittavissa myös selkeä ero, kun normaalitilanteessa savukaasuja muodostuu noin 3 Nm^3/s ja testiajojen aikana noin 1 Nm^3/s. Savukaasujen tilavuusvirtojen merkittävän eron aiheuttaa syötettävän ilman tilavuusvirta ja väkevien hajukaasujen tilavuusvirta. Koeajotilanteessa väkevien hajukaasujen tilavuusvirtaa jää pois ja kattilaan syötettävä ilmamäärä on noin 1 Nm^3/s pienempi.

Hajukaasukattilalta lähtevän höyryn tilavuusvirtauksessa on nähtävissä eroja. Kuvassa 24 on nähtävissä, että koeajojen aikana höyryn virtaus on 0,5 kg/s ja normaalilla ajomallilla noin 1,5 kg/s. Koeajon aikana polttoaineen, palamisilman ja siten savukaasujen määrä on vähäisempi, jolloin lämpöenergiaa siirtyy vähemmän veden höyrystykseen. Höyryntuotanto koeajon aikana on noin kolmasosa normaalin tuotantoon verrattuna. Määrällisesti tuotettu

höyry on kuitenkin vähäinen suhteutettuna koko tehtaan höyryntuotantoon. Suurimman osan höyrystä tuottaa soodakattila sellutehtaalla.



Kuva 24. Hajukaasukattilalla muodostuneen välipainehöyryn massavirta.

Hetkellisessä höyryn muodostuksessa on havaittavissa pientä heiluntaa. Koeajojaksojen tuotantomäärien pudotus on kuitenkin hyvin selkeä ja nopea muutos alemmalle höyryntuotanto tasolle.

5.5 SO_2–pesurilla tapahtuneet muutokset ja kemikaalien kulutus

Merkittävin muutos koeajon aikana, mikä havaittiin SO_2–pesurilla, oli NaOH–kemikaalin ja veden virtauksen muutokset. Pesurilla on tavoitteena pitää pH vakaana ja neutraalina noin arvossa 6,5–7,0. Pesurille veden ja kemikaalin syöttö tapahtuu kahdessa vaiheessa, eli ylä– ja alakiertoon. Taulukossa 9 on koottuna veden tilavuusvirtauksien muutokset molempien ajomallien aikana suhteellisina määrinä. Vastaavasti taulukossa 10 on samat arvot NaOH–kemikaalille. Molemmissa taulukoissa on myös kokonaismäärien muutoksien suhteelliset osuudet. Molempien taulukoiden arvot ovat suhteellisia osuuksia, joissa jokaisen rivin

ensimmäistä arvoa käytetään vakiona ja muut rivin arvot ovat suhteellisia muutoksia tähän arvoon verraten.

Taulukko 9. SO_2–pesurin veden virtauksen muutoksen suhteelliset määrät ylä- ja alakiertoon sekä kokonaisvirtauksen määrän suhteellinen muutos.

Veden virtaus	**Normaaliajo**	**Koeajo**
Pesurin yläkierto [l/s]	1–1,33 X	0,44–0,56 X
Pesurin alakierto [l/s]	1–2,15 X	0–0,11 X
Kokonaisvirtaus pesuriin [l/s]	1–2,07 X	0,04–0,15 X

Taulukosta 9 havaitaan veden kulutuksen savukaasupesurissa pudonneen todella vähäiseksi koeajon aika. Pesurin alakierron veden tulo on lähes 0 ja yläkierron virtauskaan ei ole kuin alle puolet normaaliin ajoon nähden. Suhteellisia osuuksia käytetään, koska ei haluta kertoa tarkkoja arvoja kemikaalien osalta, mutta halutaan osoittaa tapahtunut muutos.

Taulukko 10. SO_2–pesurin NaOH–virtauksen muutoksen suhteelliset määrät ylä– ja alakiertoon sekä kokonaisvirtauksen määrän suhteellinen muutos.

NaOH–virtaus	**Normaaliajo**	**Koeajo**
Pesurin yläkierto [l/s]	X	0,42 X
Pesurin alakierto [l/s]	1–1,37 X	0 X
Kokonaisvirtaus pesuriin [l/s]	1–1,27 X	0,12 X

Kuten yllä olevista taulukoista voidaan todeta, että NaOH–kemikaalin suhteellinen osuus on pudonnut noin 12 % tasolle koeajomallissa verrattuna normaaliin ajotapaan. Tämä siis tilanteessa, jossa normaaliajossa menee pienin määrä NaOH–kemikaalia. Vastaavasti normaalissa tilanteessa, jossa NaOH–kemikaalin kulutus olisi suurinta, niin silloin

koeajomallissa kulutus olisi vain 9 % alkuperäisestä. Keskimäärin voidaan siis puhua noin 10 % NaOH:n kulutuksesta normaaliin tilanteeseen nähden.

Pesurin toimintaan kuuluu kierrättää nesteitä pesurissa uudelleen. Osa kiertävästä nesteestä ohjataan pois pesurista muodostuneena natriumbisulfiittina. Nestettä syötetään uudelleen ylä– ja alakiertoon. Alakierron virtaukseen menee huomattavasti suurempi osa noin 12 l/s. Yläkiertoon taas virtauksen suuruus on alle 5 l/s. Viime kevään aikaan yläkierrossa virtaus on ollut suurempi ja marraskuun puolivälin aikoihin virtaus määrässä on tapahtunut selkeä pudotus. Tilavuusvirran ollessa noin 2,5 l/s. Testiajojen alkamisen jälkeen tämä tilavuusvirtaus on pudonnut vieläkin alemmaksi. Ensimmäisten koeajojen aikana, joulukuun ja tammikuun välillä, virtaus yläkiertoon pyöri 0,0–2,0 l/s välillä.

Yläkierron virtauksessa tapahtui helmikuun alussa nousu takaisin ylöspäin. Virtaus vaihtelee tällä hetkellä noin 1,5–2,8 l/s. Virtauksen lisäämiseksi ei ole tehty minkäänlaisia toimenpiteitä, joten herää kysymys, miksi virtauksen suuruus vaihtelee. Onko natriumbisulfiitti tukkinut yläkierron putkilinjaa kiteytymällä ja siten heikentänyt virtauksen hetkellisesti. Tämä on vain arvailua, sillä todellista tietoa ei ole, eikä sitä pystytä mitenkään osoittamaan todeksi.

Kiertoliuoksen tiheydessä on myös havaittavissa pieni muutos. Normaalinajon tilanteessa tiheys on noin 1066 kg/m^3, kun taas testiajojen aikana tiheys on noin 1027 kg/m^3. Tämä muutos ei ole suuri, mutta se selittyy natriumbisulfiitin koostumuksen muutoksesta. Koeajojen aikana muodostuneessa natriumbisulfiitissa on suhteellisesti enemmän vettä kuin kemikaaleja, jolloin tiheys lähenee veden tiheyttä.

5.6 Muutokset sulfiditeetissä ja vaikutukset kemikaalikiertoon

Koeajojen vaikutusta tehtaan sulfiditeettiin haluttiin myös selvittää. Tämän takia suoritettiin vielä yksi koeajo 4.–13.3.2025 välisenä aikana. Ajankohdallisesti tämä oli kuitenkin huono. Samaan aikaan oli monta muuta tekijää käynnissä, jotka nostivat sulfiditeettiä. Esimerkiksi klooridioksidilaitokselta tuli suolaa lisää soodakattilalle suuremmalla märällä ja kuitulinjalla pieneni NaOH:n kulutus. Tarkastelujaksolla sulfiditeetti nousi 3,9 %, mutta koeajon osuutta siitä on vaikea määrittää. Kaukaalla sulfiditeetti on vaihdellut vuoden aikana muutenkin noin ±4 %. Koejakson alussa sulfiditeetti oli alhaisella tasolla ja palautui noin keskimääräiselle

tasolleen. Koeajo kuitenkin lopetettiin ja muut sulfidia nostavat toimet pysyivät lähes ennallaan. Koeajon lopettamisen jälkeen sulfiditeetin nousu pysähtyi ja jäi heilumaan pysäytyksen aikaiselle tasolle. Täysin suoraa yhteyttä koeajon ja nousun pysähtymisen välille on kuitenkin mahdoton todeta. Olisiko nousu pysähtynyt, vaikka koeajoa olisi jatkettu? Tähän kysymykseen kukaan ei osaa selkeästi vastata. Todetaan kuitenkin, että koeajomallilla oli vaikutusta sulfiditeetin nousuun. Enemmän rikkiä jää lipeäkiertoon ja NaOH–kemikaalin määrä on samaan aikaan vähäisempi.

Sulfiditeetti määritetään seuraavalla yhtälöllä rikin ja natriumin välisenä suhteena (Tikka 2008, s. 127).

$$Sulfiditeetti = \frac{Na_2S}{NaOH + Na_2S} \tag{4}$$

Ensimmäisessä ajomallivaihtoehdossa, kun natriumbisulfiittia on valmistettu tarpeeksi, ylimääräinen natriumbisulfiittia ohjautuu liuottajalle. Liuottajalle menee noin 60 % muodostuneesta natriumbisulfiitista ja loput kuitulinjalle käyttöön, mistä ne kulkeutuvat lopulta ulos prosessista. Liuottajalle päätyy myös soodakattilalla poltettavien hajukaasujen sisältämä rikki. Hajukaasujen rikki ja savukaasupesurin NaOH siirtyvät liuottajan kautta kemikaalikiertoon ja palautuvat lopulta suurimmaksi osaksi takaisin mustalipeän mukana. Ensimmäisessä ajomallissa NaOH:n kulutus on suurempaa, jolloin sitä jää myös enemmän rikin kanssa kiertoon.

Vastaavasti toisessa ajomallissa HKK:n natriumbisulfiitista noin 20 % päätyy liuottajalle. Tämä natriumbisulfiitti on laimeampaa, niin rikin kuin myös natriumin osalta. Väkevien hajukaasujen palaessa kokonaisuudessaan soodakattilalla liuottajaan kertyvän rikin osuus kasvaa. Toisessa ajomallissa rikin osuus on siten korkeampi lipeäkierrossa. Natriumin osuus on edellistä pienempi, koska savukaasupesurilta tulee vain pieni määrä NaOH–kemikaalia lipeäkiertoon.

Tämä toinen ajomalli edellyttää sen, että rikkiä tulisi saada pois kierrosta tai vastaavasti lisätä natriumin määrää, jotta sulfiditeetti pysyisi hyvällä tasolla. Yksi vaihtoehto olisi lisätä natriumbisulfidin kulutusta kuitulinjoilla, jonka kautta rikkiä saataisiin ulos prosessista. Tämä ei kuitenkaan ole kovin yksinkertaista, koska natriumbisulfiitin muodostumisen määrä

on pieni ja kattaa juuri kulutuksen tässä mallissa. Pieni lisäys olisi kuitenkin mahdollinen, kun natriumbisulfiittisäiliön pinta nousee kaiken tuotannon mennessä säiliöön. Lisäksi biojalostamolta tulevan natriumbisulfiitin määrä voidaan ottaa huomioon laskettaessa kulutuksen lisäys mahdollisuutta.

Lisäys olisi noin 10–20 % natriumbisulfiitin kulutuksessa. Mikä on hyvin pieni määrä virtauksena. Oletuksena on, ettei se yksin auta rikin määrän pienentämiseen. Kulutuksen lisääminen ei poista enempää rikkiä lipeäkierrosta, mutta estää HKK:lta liuottajalle menevän pienen virtauksen sisältämän rikin pääsyn kiertoon. Lisäksi se pudottaa natriumbisulfiittisäiliön pintaa noin 6,25 %/vrk, jolloin biojalostamolta tulevan natriumbisulfiitin toimituksen tulisi olla vakaata, jotta säiliö ei pääse liian tyhjäksi. Toki aina on mahdollisuus palauttaa väkevät hajukaasut hetkellisesti polttoon, jolloin natriumbisulfiittia alkaa muodostua taas yli hetkellisen kulutuksen.

Kemikaalikierron kannalta on järkevämpää ottaa talteen klooridioksidilaitokselta muodostuva suola (Na_2SO_4), joka sisältää enemmän natriumia kuin natriumbisulfiitti ($NaHSO_3$). Mikäli sulfiditeetti on korkea, niin tämä suola ohjautuu prosessin ulkopuolelle, eikä sitä saada osaksi kemikaalikiertoa. Hyödyntäessä klooridioksidilaitoksen suola natriumbisulfiitin säästämisen sijaan, niin hävitetään vähemmän natriumia, joka on kemikaalikierron rikki–natrium–tasapainon kannalta arvokkaampaa.

Kaukaalla soodakattilan sähkösuodattimia on päivitetty viime vuosina uusiin. Tänä vuonna päivitys jatkuu vielä yhden sähkösuodattimen osalta. Parantunut savukaasujen käsittely tehostaa samalla parempaa rikin talteenottoa, mikä on sulfiditeetin hallinnan kannalta huonompi vaihtoehto. Savukaasujen mukana poistuu vähemmän rikkiä, jolloin rikkiä jää entistä enemmän kiertoon prosessiin. Samalla tehtaalla on vähennetty suoran NaOH:n käyttöä ja yhä enemmän NaOH:n tilalla käytetään hapetettua valkolipeää. Natriumin lisäys prosessiin on siten pienentynyt.

Rikki–natrium–tasapainoa varten tarvittaisiin suunnitelmia ja muutoksia, millä saataisiin rikkiä tehokkaammin ulos prosessista. Yksi mahdollinen ratkaisu olisi rikkihappolaitos, joka valmistaa savukaasujen rikistä rikkihappoa. Tuotettua rikkihappoa voitaisiin hyödyntää sellunvalmistuksen muissa vaiheissa, jolloin ostetun rikkihapon tarve vähenisi.

6 Tulosten läpikäynti ja pohdinta

Tässä kappaleessa käydään läpi työn keskeisimmät tulokset. Tarkastellaan ja pohditaan saatuja tuloksia sekä niiden vaikutuksia. Ensimmäisenä esitellään työn taloudelliset tulokset ja mahdolliset säästöt. Tämän jälkeen päästää tarkastelemaan päästöjen tärkeimpiä tuloksia työn kannalta ja tekemään niistä tarvittavat johtopäätökset.

6.1 Työn taloudellisia tuloksia

Työn taloudelliset säästöt keskittyvät käytettävien kemikaalien ympärille. Tässä tapauksessa NaOH–kemikaalin käyttömäärään. NaOH–kemikaali ostetaan tehtaalle ulkopuolelta. Kemikaalin kokonaiskustannukset muodostuvat itse kemikaalista ja toimituksesta. NaOH–toimitukset suoritetaan tehtaalle tarpeen mukaan säiliöautoilla. Mitä vähemmän tätä kemikaalia tarvitaan, niin silloin kustannukset tehtaalle ovat myös pienemmät. Säästöt kemikaaleista ovat tärkeitä niin taloudellisesti, mutta etenkin ympäristön kannalta. Mitä vähemmän ulkopuolisia kemikaaleja tarvitaan, niin sen parempi kaikkiaan.

NaOH:n hinta tehtaalle toimitettuna on X €/m^3. Tiheyden ollessa noin 1 530 kg/m^3, voidaan määrittää hinta myös muodossa €/kg. NaOH:n kulutus on koeajomallissa 10–12 % luokkaa alkuperäiseen nähden, jolloin myös HKK:n käyttökustannukset ovat 10–12 % tasolla vaihtoehtoisella ajomallilla. Taloudelliseen puoleen HKK:lla ei huomioida muita kustannuksia kuin NaOH:n kulutus. Kattilat ovat kuitenkin molemmissa tapauksissa samalla tavoin ajolla, vaikka toki pumpuissa ja muissa komponenteissa sähkön kulutus muuttuu. Lisäksi kunnossapitokustannukset, joiltakin osin saattaisi olla pienemmät, mutta nämä ovat niin pieniä muutoksia tarkasteltavien ajomallien välillä, että niitä ei ole otettu huomioon laskennassa. Voidaan ajatella käyttö– ja kunnossapitokustannusten siirtyvän osaltaan soodakattilan ympärille, kun väkevien hajukaasujen poltto siirtyy HKK:lta soodakattilalle.

Työn tuomat taloudelliset säästöt uudella ajomallilla ovat siis mahdollisia. Vaikka ajomallilla ei voitaisikaan ajaa jatkuvasti, niin jo lyhyetkin jaksot tuovat säästöjä NaOH–kemikaalin kulutuksessa ja sitä kautta taloudellisia säästöjä.

6.2 Tulokset päästöjen muutoksesta

Aiempien tulkintojen ja tulosten mukaan lopulliset vaikutukset kahden merkittävimmän ajomallin välillä soodakattilan päästöihin ovat lähes olemattomat. Näillä ajomalleilla tarkoitetaan tilanteita, jossa väkevät palavat kaikki soodakattilalla tai osittain soodakattilalla ja HKK:lla. Soodakattilan päästöihin väkevien polton lisääntyessä koeajojen aikana ei havaittu muutoksia. Luvussa 2.3.6 esitetyillä väkevien hajukaasujen vaikutuksilla soodakattilan päästöihin, voidaan todeta vaikutuksien olevan lähes olemattomat. Tätä tukevat myös koeajojen aikana tehdyt havainnot soodakattilan päästöistä.

Hajukaasukattilan päästöihin väkevien hajukaasujen polttopaikan valinnalla on suora vaikutus koeajojen perusteella. Myös polton määrän vähentäminen tietysti pienentää päästöjä, kun palavaa materiaali syötetään kattilaan vähemmin, niin päästötkin jäävät alhaisemmalle tasolle. Vaikutus HKK:lla havaitaan NO_X–päästöissä. Muut päästöt ovat muutenkin alhaisella tasolla ja eroa niissä ajomallien välillä ei huomata.

Metanolin polttoa on molemmissa ajomalleissa suoritettava molemmilla soodakattilalla ja HKK:lla. Koeajoissa huomattiin metanolin syötön lisäämisen HKK:lle aiheuttavan nousua NO_X–päästöissä. Soodakattilalla vastaavia havaintoja ei todettu, vaikka metanolin polton määrää muutettiin. Paremmaksi vaihtoehdoksi metanolin poltolle on siis soodakattila. Tilanteessa, jossa metanolisäiliö on täyteläinen, kannattaa metanolin polttoa mieluimmin kohdistaa soodakattilalle, jolloin vaikutukset päästöihin ovat pienemmät. Suurimpana vaikuttavana tekijänä on kattilan koot ja polttoainemäärät verrattuna toisiinsa, jolloin päästöt soodakattilalla jäävät pienemmiksi.

6.3 Tehdyt muutokset ja mahdollisuudet natriumbisulfiittisäiliössä

Natriumbisulfiittisäiliön pintatavoite nostettiin 50 % → 62 %. Tämä muutos tehtiin, jotta voidaan hyödyntää säilöin koko kapasiteetti optimaalisesti. Varaa olisi ollut vieläkin nostaa pintatavoitetta, mutta tämä 62 % osoittautui sopivaksi. Säiliössä on jatkuvasti tilaa myös biojalostamolta tulevalle natriumbisulfiitille, mutta säiliö ei kuitenkaan ole liian täyteläinen. Tämä nosto takaa myös natriumbisulfiitin riittämisen pidemmäksi aikaa mahdollisten ongelmatilanteiden aikana, jolloin natriumbisulfiittia ei voitaisi hajukaasukattilalla tuottaa.

Biojalostamolta tulevan väkevämmän natriumbisulfiitin laimentaminen voisi olla yksi potentiaalinen vaihtoehto, mikäli joskus näyttäisi, että natriumbisulfiitin määrä olisi liian vähäinen. Väkevämpää natriumbisulfiittia olisi mahdollisuus laimentaa aivan tavallisella vedellä, jolloin natriumbisulfiitin määrä kasvaisi, vaikka samalla siitä tulisi laimeampaa. Vesi täytyisi ajaa suoraan säiliöön, johon myös biojalostamon natriumbisulfiitti puretaan. Tämä edellyttäisi mahdollisesti omaa linjaa vedelle suoraan säiliöön. Toinen vaihtoehto olisi toki lisätä veden määrää savukaasupesurin syöttöihin, mutta säiliön saavuttaessa pintapyynnin ohjautuu savukaasupesurin ylimääräiset virtaukset liuottajalle. Tällöin veden lisäys savukaasupesuriin olisi turhaa ja paras keino olisi erillinen vesilinja säiliölle. Nykyisessä tilanteessa tämä ei kuitenkaan ole aivan välttämätöntä, mutta mahdollisesti potentiaalinen vaihtoehto, jos natriumbisulfiitin kulutus lisääntyisi.

7 Parannusehdotukset hajukaasujärjestelmään

Tässä osiossa käydään läpi mahdollisia parannuskohteita, joita havaittiin työn aikana. Näillä parannuksilla olisi mahdollisuus parantaa hajukaasujärjestelmän toimintaa. Luoda hajukaasujärjestelmästä luotettavampi, turvallisempi ja ympäristöystävällisempi. Osa parannusehdotuksista on rakenteellisia ja osa toimintatavan muutoksia.

Hajukaasukattilan pääpolttimelle johdettavan väkevän hajukaasun virtausta säädetään syöttölinjassa matalapainehöyryn (3,5 bar) avulla. Kun virtaus syöttölinjassa vähenee, paine laskee, jolloin höyrylinja aktivoituu ja alkaa syöttämään höyryä painetason ylläpitämiseksi. Testiajojen aikana havaittiin kuitenkin, että hajukaasulinjan paine alkaa heittelemään, kun höyrylinja alkaa syöttämään höyryä. Höyryventtiilin kulma määräytyy väkevien hajukaasujen virtausmittauksen ja sitä kautta paineen mukaan, koska tilavuusvirtaus mitataan painemittauksien avulla. Tilavuusvirtauksen pienentyessä alle 140 l/s höyryventtiili avautuu. Väkevien hajukaasujen syöttölinjan paine on normaalisti noin 1,5 kPa (0,015 bar). Paine ero säätävän höyryn ja säädettävän linjan välillä on siten lähes 3,5 bar. Syy paineen heittelemiselle höyryn syötön avauduttua on painemittarin, tilavuusvirtausmittarin ja höyryn syötön sijoittelussa.

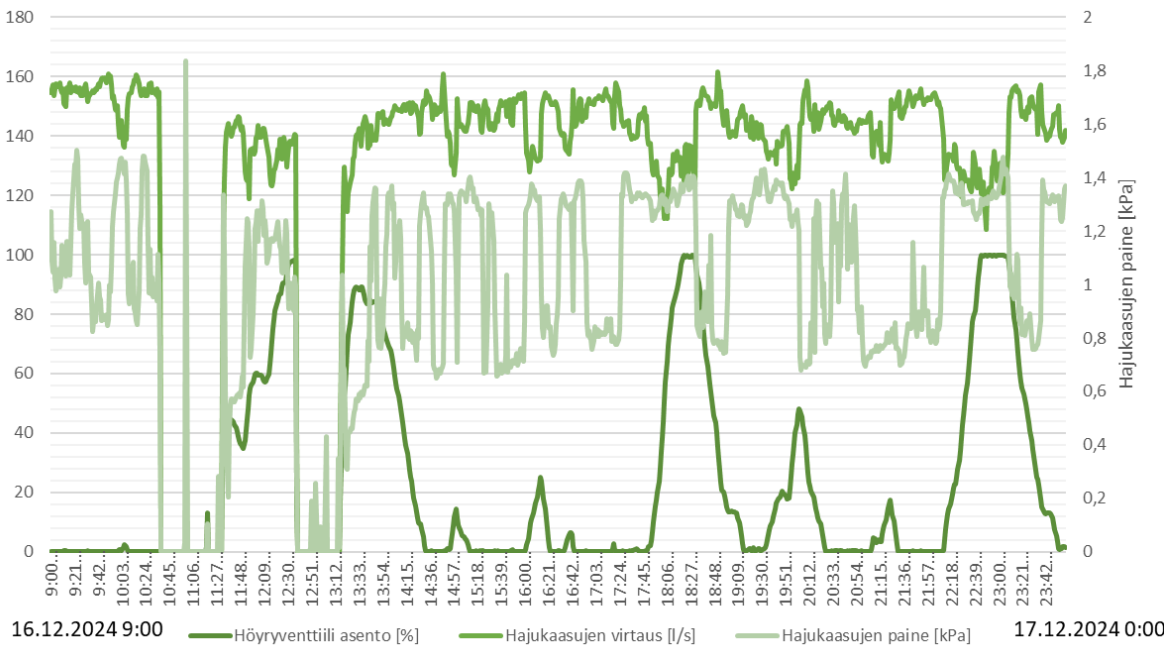
Höyryn syötön ja paineen mittauksen välinen etäisyys pitäisi olla 5–10 kertaa putken halkaisija ennen paineen mittausta. Mittauksen jälkeen 2–5 kertaa putken halkaisija. Virtauksen tulisi olla häiriötöntä esitettyjen mittojen matkalta, jotta mittaustulos olisi luotettava. Paineen mittaus tulisi lisäksi sijoittaa pienimmän virtauksen alueelle ja putken päälle tai sivulle. (SFS 5059 2008, s. 16.)

Paineen mittauksen sijoittelu on toteutettu ohjeen mukaisesti putken sivulle, mutta etäisyys ei ole riittävä. Höyrynsyöttö ja paineenmittaus ovat samassa kohdassa putkea vastakkaisilla puolilla. Myös linjan tilavuusvirtauksen mittaus on vain 1,5 kertaa putken halkaisijan päässä höyrynsyötön jälkeen. Kummassakaan tapauksessa suositellut mitat eivät siis täyty. Paine linjassa heittelee, koska virtaus ja paine eivät ehdi tasaantua ennen mittauksia.

Tämän haasteen takia väkevien hajukaasujen venttiiliä pääpolttimelle ei voida pienentää alle 18–20 %. Muuten paineen heittely kasvaa liian suureksi ja saavuttaa lopulta alalukitusrajan (0,2 kPa). Alalukitusrajan saavutettua väkevät tippuvat pois poltosta. Mikäli höyryn syöttö

ja paineenmittaus olisivat oikealla etäisyydellä toisistaan, niin väkevien hajukaasujen virtausta voitaisiin pienentää ja katsoa millaisia tuloksia silloin saataisiin aikaan. Oletettavasti natriumbisulfiitin väkevyyttä voitaisiin lisätä polttamalla pieni määrä väkeviä hajukaasuja metanolin ohella, mutta testiajoissa päästiin kokeilemaan vain pelkkää metanolin polttoa.

Sama ongelma ilmenee paineen vaihtelussa silloin, kun väkevien hajukaasujen muodostuminen on hyvin vähäistä. Esimerkiksi seisokkien aikaan kuitulinjan tai haihduttamon ollessa pois tuotannosta väkevien hajukaasujen tilavuusvirtaus luonnollisesti pienenee. Väkevien hajukaasujen polttaminen vaikeutuu siten huomattavasti näissä tilanteissa.



Kuva 25. HKK:n pääpolttimen hajukaasulinjan paineen käyttäytyminen hajukaasujen virtauksen ja tukihöyryn venttiilin mukaisesti. Vasemmalla akselilla tukihöyryn venttiilin asento [%] ja hajukaasujen virtaus [l/s]. Tukihöyrylinjassa on matalapainehöyryä (3,5 bar), jolla tuetaan paineen pysymistä oikealla tasolla polttimeen syöttävässä linjassa. Oikealla akselilla hajukaasulinjan paine [kPa].

Kuvasta 25 havaitaan, että hajukaasujen tilavuusvirtauksen pienentyessä alle 140 l/s avautuu tukihöyryventtiili tarvittavan määrän, jotta tilavuusvirtaus pysyy yli 140 l/s. Höyryventtiilin ollessa auki linjan paine pysyy tasaisena korkealla, mutta venttiilin mennessä kiinni paine tipahtaa. Paineessa toki on muutenkin heiluntaa väkevien hajukaasujen tilavuusvirtauksen vaihdellessa. Kuvasta 25 eivät näy nopeat heilunnat lähellä paineen alalukitusrajaa tarkastelujakson ollessa pitkä. Lyhyemmällä tarkasteluvälillä paine käy satunnaisesti lähellä alalukitusrajaa (0,2 kPa).

Hajukaasukattilan SO_2–pesurin alakiertoon NaOH–syöttölinjan tiedettiin ennestään olevan turhan suureksi mitoitettu. Linjan suuri halkaisija ja iso säätöventtiili aiheuttavat vaikeuksia annostella NaOH–kemikaalia riittävän pienellä määrällä pesuriin. Normaaliajon aikana venttiilin säätöasento on noin 3–5 % auki. Pesurin pH:n pitämisessä halutulla tasolla täytyy tehdä kymmenesosan muutoksia venttiilin asentoon. Muutokset ovat niin pieniä, ettei venttiilissä edes aina tapahdu mitään, eikä virtaus muutu. Lisäksi NaOH kiteytyy herkästi, mikä on yksi merkittävä tekijä virtauksen pysymisenä vakiona, vaikka venttiili hieman liikahtaisi. Virtausta saadaan muutettua haluttuun arvoon, kun kulman säätöä käytetään hetkellisesti korkeammalla tasolla ja palautetaan sitten sopivalle tasolle. Kiteytymisen takia virtaus ei tosin ole aina verrannollinen venttiilin kulman säätöön. Vaikka venttiilin kulman säätö olisi siis sama, niin virtauksen arvo ei välttämättä ole aina sama. Kuvassa 26 on esitetty alakierron NaOH–linjan venttiilin säätöasento. Arvoa muuttaessa täytyy säätö käyttää korkeammalla ja sen jälkeen asettaa tavoiteltuun arvoon.

Kuva 26. SO_2–pesurin alakierron NaOH–linjan venttiilin säätöasento.

Parannusehdotuksena olisi pienentää alakiertoon tulevan NaOH–linjan halkaisijaa ja säätöventtiiliä. Tämä mahdollistaisi kulman säätämisen suuremmalla alueella, kuten nyt yläkiertoon syötettävässä NaOH–linjassa onnistuu. Yläkierron venttiilin kulmaa säätyy kaskadikytkennällä normaaliajossa 55–60 % välissä ja koeajotilanteessa käsiohjauksella noin 35–45 % välissä. Säätöalue olisi siis laajempi ja mahdollistaisi pienemmän virtauksen, jolloin alakierron NaOH–virtaus voitaisiin pitää päällä hajukaasujen palaessa soodakattilalla. Koeajoissa alakierron NaOH–virtaus suljettiin juuri tämän liiallisen virtauksen aiheuttaman ongelman takia.

Lisäksi olisi hyvä pohtia soodakattilan hajukaasupolttimen luona olevan hajukaasuventtiilin parannusta. Kyse on siitä jumittuneesta venttiilistä, jota korjattiin koeajojen alussa. Tämä venttiili määrittää mahtuuko kaikki väkevät hajukaasut palamaan soodakattilalla. Alussa huomattiin venttiilin olleen pitkään samassa asennossa, eli riskinä on myös jatkossa venttiilin jumittuminen. Syynä venttiilin vajaalle liike radalle oli vääntynyt tanko, joka työntää venttiilin kiinni hajukaasulinjassa ilmasylinterin antaman voiman avulla. Tämä ilmasylinterin ja tangon välinen liitos kappale oli myös vääntynyt. Syynä molemmille vääntymisille on luultavasti ilmasylinterin sijoittelu venttiiliin nähden. Ilmasylinteri sijaitsee venttiilin linjasta hieman sivussa, jolloin sylinterin liikuttaessa venttiilin tankoa, muodostuu

voiman aiheuttama taivuttava momentti tankoon. Mikäli ilmasylinteri olisi suorassa linjassa, niin silloin voima kohdistuisi suoraan venttiilin liikesuuntaan, eikä aiheuttaisi tankoon ja välikappaleeseen vääntymistä.

Natriumbisulfiitin virtausmittaukset olisi hyvä kalibroida säännöllisesti. Työn aikana havaittiin HKK:lla muodostuneen natriumbisulfiitin määrän olleen pienempää, kuin kuitulinjoilla tapahtuneen usean virtauksen yhteenlaskettu natriumbisulfiitin kulutus. Tuotettu määrä HKK:lla todettiin liuottajalle menevän virtausmittauksen kautta. Tilanteessa, jossa kulutus oli tuotantoa suurempaa, niin natriumbisulfiittisäiliön pinta kuitenkin nousi hitaasti. Todellisuudessa virtausmittauksien mukaan pinnan olisi pitänyt laskea. Tämä osoittaa, että jokin tai jotkut virtausmittauksista eivät näytä aivan oikeaa lukemaa. Työn kannalta sillä ei ollut lopulta merkitystä.

Kuitulinjojen kemikaalijäämämittauksien tarkastus olisi myös syytä suorittaa ajoittain. Kemikaalijäännöksien näyttäessä oikein, voidaan annostella natriumbisulfiittia aina oikea määrä prosessiin. Myös asetettujen kemikaalijäämätasojen tarkastelu ja pohdinta olisi ajankohtaista. Onko nykyiset tasot sopivia prosessin ja kuitulinjan klooridioksidi hönkien osalta. Lisäksi natriumbisulfiitin annostelu KL1 kohteisiin on nykyisin suoritettu vakio tilavuusvirtauksella. Parempi vaihtoehto olisi saada virtauksen säätö automaation taakse, jolloin natriumbisulfiitin määrä olisi aina optimaalinen jäämiin nähden. Mahdollisuus automaattiseen säätöön olisi, mutta nykyinen ajomalli on jäänyt tavaksi. Yksi keskeinen syy on ollut, että kemikaalijäämien mittauksiin ei ole täysin luotettu. Toisella kuitulinjalla tämä homma toimii kuitenkin mallikkaasti, joten madollisuus muutokselle tässä olisi olemassa.

Vielä viimeisenä HKK:n savukaasupesurin pH:n mittaus olisi hyvä kalibroida säännöllisesti, jotta NaOH–annostelu olisi sopivaa pitämään pH:n halutulla tasolla. Koeajojen aikana otetuista näytteistä huomattiin pH:n eroavan mittauksen näyttämästä lukemasta noin 0,3 arvon verran. Ei siis mikään mahdottoman suuri ero, mutta säännöllisen kalibroinnin avulla arvot olisivat lähempänä toisiaan ja NaOH–annos olisi optimaalinen vaihtelevissa tilanteissa.

8 Yhteenveto

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää UPM Kaukaan sellutehtaan mahdollisuuksia optimoida hajukaasukattilaa. Tavoitteena oli löytää keinoja, joilla voitaisiin vähentää kemikaalien kulutusta, minkä seurauksena myös tehtaan kemikaalikustannukset vähenisivät. Kemikaalisäästöjä haettiin hajukaasukattilan savukaasupesurin syötettävästä NaOH–kemikaalista. Tätä kemikaalia käytetään savukaasujen pH:n neutralointiin sekä reagoimaan hajukaasujen sisältämän rikin kanssa muodostaen natriumbisulfiittia. Toisena keskeisenä tavoitteena oli arvioida mahdollisuuksia vähentää päästöjä hajukaasukattilalla. Päästövähennyksiä pyrittiin saavuttamaan ajomallimuutoksella, jonka ensisijaisena tavoitteena oli NaOH:n kulutuksen vähentäminen.

Työn alussa tutustuttiin kirjallisuuden avulla sellun tuotantoon ja sen eri vaiheisiin. Tämän jälkeen käsiteltiin laajasti hajukaasuja. Käytiin läpi muun muassa niiden muodostumista, käsittelyä ja polttoa. Päästöt olivat myös keskeisessä roolissa kirjallisuusosiota. Hajukaasujen vaikutusta soodakattilan päästöihin arvioitiin myös kirjallisen materiaalin avulla. Näiden jälkeen siirryttiin tarkastelemaan Kaukaan sellutehtaan hajukaasujen nykytilaan, jossa käytiin läpi pitkälti samoja asioita kuin hajukaasujen kirjallisuusosiossa, tosin nyt Kaukaan tilanteen näkökulmasta.

Seuraavaksi lähdettiin optimoimaan hajukaasukattilaa, mutta määritettiin ensin mahdollisia reunaehtoja, jotka määrittävät nykyistä toimintaa ja rajoittavat vaihtoehtoista ajomallia. Sitten käytiin läpi myös erilaiset vaihtoehtoiset ajomallit ajatuksen tasolla, mitkä olisivat mahdollisia toteuttaa. Tehtiin vertailua ajomallien haitoista ja hyödyistä, jotta löydettiin parhaimmat mahdolliset ajomallit ja päästiin testaamaan niitä käytännössä. Lopulta vaihtoehtoina olivat nykyinen ajomalli, jossa väkevät palavat puoliksi sekä soodakattilassa että hajukaasukattilassa. Toinen vaihtoehto olisi väkevien hajukaasujen polttaminen pelkästään soodakattilassa, mikä osoittautui työn kannalta kannattavimmaksi ajomalliksi tehtaalle.

Vaihtoehtoisista ajomalleista hylättiin seuraavat: väkevien hajukaasujen polttaminen pelkästään hajukaasukattilassa ja erätuotantomalli. Erätuotantoajomallissa ongelmina olisivat jatkuvat muutoksen tarpeet operaattori tasolla ja hetkellisesti korkeat päästöt, kun

palamisen olosuhteet muuttuisivat jatkuvasti. Natriumbisulfiitin riittävyys voisi lisäksi muodostaa ongelmia erätuotannossa. Ongelmana pelkällä väkevien hajukaasujen poltolla hajukaasukattilassa taas olisivat kustannukset, kemikaalienkäyttö sekä päästöt, mitkä olisivat kaikista korkeimmat tällä ajomallilla.

Työtä varten suoritettiin 4 erillistä koeajoa, jotka kestivät yhteensä noin 22 vuorokautta. Koeajojen aikana kokeiltiin vaihtoehtoista koeajomallia, jossa väkevät hajukaasut paloivat kokonaisuudessaan soodakattilassa ja hajukaasukattilassa paloi pelkästään metanoli. Koeajon myötä saatiin havaintoja nykyiseen ajomallivaihtoehtoon verrattavaksi. Saatuja koeajotuloksia päästiin tulkitsemaan ja tekemään havaintoja saaduista tuloksista. Koeajon myötä havaittiin natriumbisulfiittia muodostuvan myös tällä ajomallilla, eli väkeviä ei tarvittu natriumbisulfiitin muodostumiseen. Toki muodostuva natriumbisulfiitin määrä oli normaalia alhaisempaa, koska savukaasupesurin NaOH:n ja veden virtaukset olivat pienemmät. Laboratoriotuloksista havaittiin lisäksi natriumbisulfiitin olevan tässä ajomallissa laimeampaa, kun verrataan vakiintuneeseen ajomalliin.

Tulokset kuitulinjoilla kemikaalijäämien osalta eivät kuitenkaan olleet kovinkaan paljon normaalia suuremmat, vaikka käytössä oli laimeampaa natriumbisulfiittia. Ainoat selkeät muutokset havaittiin molempien kuitulinjojen ensimmäisen natriumbisulfiitin syöttökohteen osalta, eli KL1 3 suotimessa ja KL2 D1–vaiheessa. Kemikaalijäämissä oli havaittavissa normaalistikin vaihtelua, mutta karkeasti muutokset näissä edellä mainituissa kohteissa olivat seuraavat: 3 → 7 mg/l (3 suodin) ja –15 → 15 mg/l (D1–vaihe). Nousua ja vaihtelua oli, mutta aina biojalostamolta säiliöön tulleen natriumbisulfiitin jälkeen, jäännökset palasivat lähemmäs alkuperäisiä arvoja. Natriumbisulfiitin kulutus koeajojen aikana nousi KL2 puolella, jossa kulutus perustuu kemikaalijäämien arvoon, kun KL1 puolella natriumbisulfiitin virtaus on asetettu vakioksi.

Tärkeimpänä tuloksena havaittiin uuden ajomallin NaOH:n kulutuksen jäävän 10–12 % tasolle normaaliin nähden. Vähennys kemikaalissa on merkittävä ja se heijastuu samalla säästöihin kustannusten puolelle. Hajukaasukattilan taloudelliset kustannukset kostuvat suurimmilta osin vain NaOH–kemikaalin kustannuksista, jolloin uudella ajomallilla hajukaasukattilan kustannukset saatiin 10–12 % tasolle aiemmasta. Säästö on merkittävä ja myös kemikaalien käyttö olisi vähempää, mikä on hyvä asia myös ympäristön kannalta.

Päästöissä havaittiin koeajojen aikana muutoksia etenkin hajukaasukattilan osalta. NO_X–päästöjen määrä väheni noin kolmasosan, kun väkevät hajukaasut poltettiin soodakattilalla. Muutoksia soodakattilan päästöissä ei havaittu. Kummassakaan kattilassa ei havaittu muutoksia SO_2– ja TRS–päästöissä, sillä ne ovat yleisestikin alhaisella tasolla.

Koeajomallilla oli negatiivisia vaikutuksia tehtaan sulfiditeettiin, joka nousi koeajon seurauksena. Koeajon tarkkaa vaikutusta sulfiditeettiin ei kuitenkaan voitu täysin osoittaa, koska samaan aikaan tehtaalla oli muutama muu toimenpide menossa, joiden tiedetään nostavan sulfiditeettiä. Esimerkiksi kuitulinjalla käytettiin hapetettua valkolipeää NaOH:n sijaan ja klooridioksidilaitoksen suolat ohjattiin kemikaalikiertoon. Sulfiditeetti kuitenkin nousee oletettavasti koeajomallilla, koska natriumin määrä on vähäisempää ja soodakattilalla väkevien hajukaasujen sisältämää rikkiä sitoutuu enemmän liuottajalle. Normaalissa tilanteessa rikkiä menee enemmän natriumbisulfiitin mukana ulos prosessista ja natriumia syötetään lähes 10 kertaa enemmän hajukaasukattilan SO_2–pesuriin.

Ongelmaksi osoittautuneen sulfiditeetin nousua voitaisiin hillitä lisäämällä osa säästetystä NaOH–määrästä takaisin kemikaalikiertoon, jolloin natriumin osuus prosessissa nousisi. Toinen vaihtoehto olisi poistaa rikkiä kierrosta, mutta siihen vaadittaisiin tarkempia suunnitelmia, kuinka se olisi paras toteuttaa. Liiallinen rikki kemikaalikierrossa on Kaukaalla muutenkin esillä oleva asia. Yksi varteenotettava vaihtoehto tähän haasteeseen voisi olla rikkihappolaitos, jolla ylimääräinen rikki saataisiin muutettua hyödylliseen käyttöön osaksi sellutehtaan muuta kemikaalikulutusta.

Työtä viimeistellessä HKK:n savukaasupesuriin on lisätty hapetetun valkolipeän putkilinja. Tämä mahdollistaa sen, että pesuriin voidaan syöttää EVO:a NaOH:n tilalla tai tarvittaessa molempia erillisten putkiyhteiden ansiosta. Tämä lisäys tulee vähentämän NaOH:n kulutusta tehtaalla entisestään, mutta samalla oletuksien mukaan pienentämään sulfiditeettiä. Hapetetun valkolipeän vaikutusta mahdollisiin vaihtoehtoisiin ajomalleihin ei valitettavasti päästy nyt tarkkailemaan, eikä sitä ole muutenkaan huomioitu tässä työssä mitenkään.

Lopuksi käydään läpi vielä parannusehdotuksia hajukaasukattilalla ja –järjestelmässä. Parannuksilla on mahdollista parantaa järjestelmän toimintaa ja varmistaa hajukaasujen turvallinen sekä käyttövarma käsittely. Osa näistä parannuksista vaatii rakenteellisia muutoksia, mutta osa on tehtävissä aivan normaaliin kunnossapidon ja toiminnan rinnalla. Tärkeimpänä parannusehdotuksena olisi hajukaasukattilalle menevän hajukaasulinjan

paineen mittauksen tai tukihöyryn syötön sijainnin muuttaminen kauemmaksi toisistaan. Tämä muutos mahdollistaisi väkevien hajukaasujen vähäisen polton hajukaasukattilalla, jolloin tuotettu natriumbisulfiitti olisi luultavasti väkevämpää. Tällä vaihtoehdolla voitaisiin päästä optimaalisimpaan tulokseen, mutta nyt sitä ei päästy käytännön syistä kokeilemaan.

Työ saavutti osittain sille asetetut tavoitteet, eli hajukaasukattilan kemikaalikustannusten ja päästöjen vähentämisen, vaikka toki sulfiditeetin nousu aiheuttaa haasteita uudessa ajomallissa. Tämä olisikin seuraava tutkittava aihe. Sellutehtaan sulfiditeetin nousun ratkaisemisen jälkeen uusi hajukaasukattilan ajomalli olisi todella kustannustehokas ja ympäristöystävällinen vaihtoehto.

Lähteet

Aluehallintovirasto. 2015. Hakemus sellu- ja paperitehdasintegraatin ympäristöluvan (nro 125/05/02, Dnro ISY-2004-Y-71) lupamääräyksen tarkistamiseksi. Dnro ESAVI/348/04.08/2013. Lappeenranta.

Fardim, P. 2011. Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 1, Fibre chemistry and technology. 2nd ed. totally updated version. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.

Hovikorpi, K. & Vakkilainen, E. 2019. Sources, collection, and handling of noncondensible gases in modern kraft pulp mills. TAPPI Journal. Vol. 18, (5), s. 297–305.

Huhtinen, M. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5., uus. p. Helsinki: Edita.

Hupa, M. 2007. Recovery boiler chemical principles. Åbo Akademi University. TAPPI Kraft Recovery short Course. Verkkoaineisto. [Viitattu: 9.1.2024]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/profile/Mikko-Hupa/publication/266218376_Recovery_boiler_chemical_principles/links/54edcedb0cf24a16e60803c2/Recovery-boiler-chemical-principles.pdf

Immonen, M. 2014. Sellutehtaan TRS-hajapäästöjen hallinta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Ympäristöteknologian koulutusohjelma. Lappeenranta. [Viitattu: 28.2.2024]. Saatavilla: https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014101445190

KnowPulp. 2023. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö = Learning Environment for Chemical Pulping and Automation (LUT). Prowledge Oy, VTT Industrial Systems. Palvelu on maksullinen ja vaatii käyttäjälisenssin.

Lin, B. & Eng, P. 2005. Collecting and burning noncondensible gases. A.H. Lundberg systems Ltd. Richmond, B. C. Canada. TAPPI Kraft Recovery short Course. Verkkoaineisto. [Viitattu: 9.1.2024]. Saatavilla: https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/3-6.pdf

Metsäteollisuus ry. 2024. Massa- ja paperiteollisuuden päästöt ilmaan ovat vähentyneet huomattavasti. Tilasto. [Viitattu 5.2.2025]. Saatavilla:

https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/massa--ja-paperiteollisuuden-paastot-ilmaan-ovat-vahentyneet-huomattavasti

Nassimi, A. M. et al. 2017. Constants of explosive limits. Chemical engineering science. Vol. 173, s. 384–389.

Pandey, R. A. et al. 2005. Flue Gas Desulfurization: Physicochemical and Biotechnological Approaches. Critical reviews in environmental science and technology. Vol. 35 (6), s. 571–622. Saatavilla: https://doi.org/10.1080/10643380500326374

Raiko, R. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemiat.

SFS 5059. 2008. Instrumentointi. Instrumenttien sijoittaminen prosessiin. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 27 s.

Suhr, M. et al. 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. European Commission. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.1.2025] Saatavilla: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf

Suomen soodakattilayhdistys. 2023. Recommended procedure for incineration of non-condemsable gases. Revision C. Saatavilla rajoitetusti. Vaatii käyttäjälisenssin.

Tampella power. 1991. Toimintaselostus: Pesuprosessin kuvaus ja säätö. Sisäinen materiaali. Ei saatavilla.

Tiittanen, T. 2025. Prosessi-insinööri. UPM Biofuels. Sähköpostiviesti 10.1.2025.

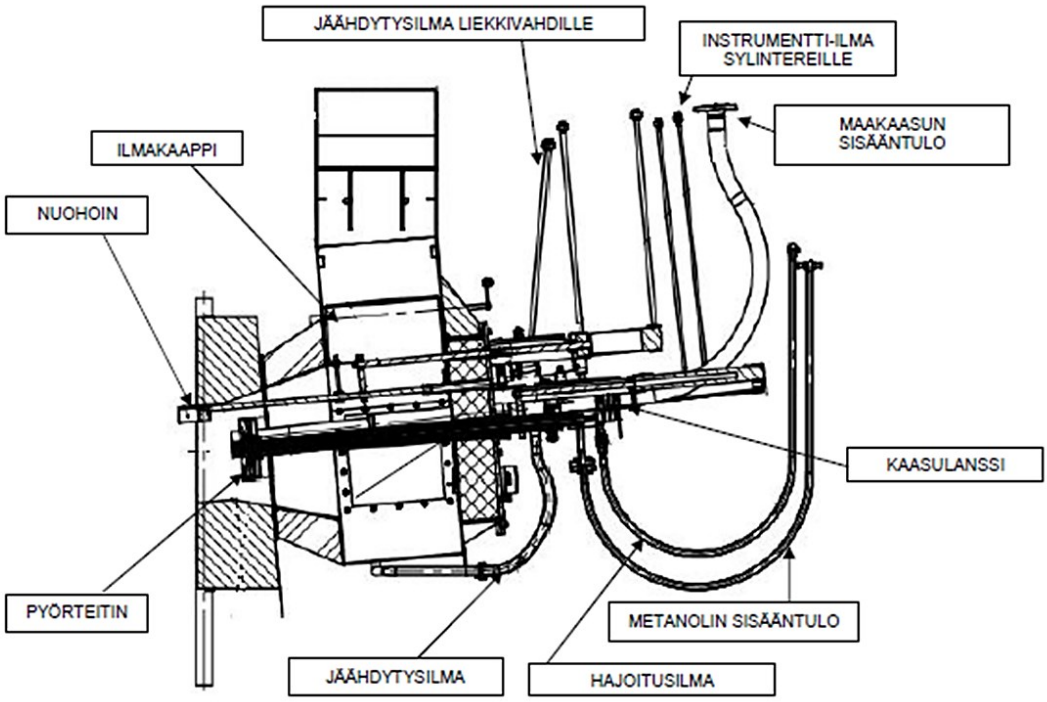
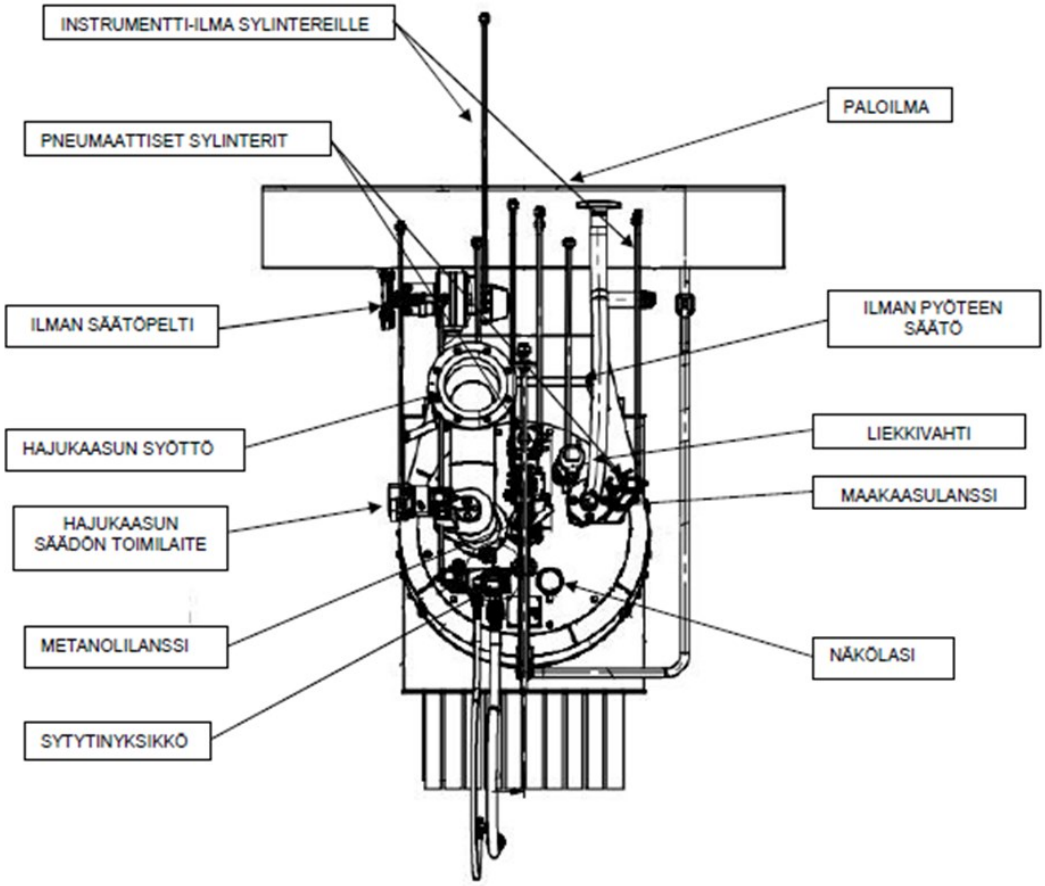
Tikka, P. 2008. Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy. 2nd ed., totally updated version. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.

UPM Intranet. 2024. UPM The Biofore Company. Esitysaineisto. Sisäinen materiaali. Ei saatavilla.

UPM Kaukas. 2024a. Turvallisuus tiedote 2024. Verkkoaineisto. [Viitattu 3.2.2025]. Saatavilla: https://www.upmpulp.com/siteassets/documents/upm_kaukas_turvallisuustiedote_2024_lowres.pdf

UPM Kaukas. 2024b. Ympäristö– ja yhteiskuntavastuu 2023. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.2.2025]. Saatavilla: https://www.upm.com/siteassets/documents/responsibility/certificate-finder/environmental-management-system/emas-report---upm-kaukas-paper-mill-suomi.pdf

UPM Kaukas. 2024c. UPM Kaukas. Verkkoaineisto. [Viitattu 17.2.2025]. Saatavilla: https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/

Valmet. 2023. UPM–Kymmene Oyj, Kaukas: Hajukaasukattila päästöjen tarkkailu ja raportointi. Versio 3.2. Sisäinen materiaali. Ei saatavilla.

Liite 1. Soodakattilan hajukaasupoltin sivulta ja takaa