

Simo Alatarvas

KUONAN RAKEISTUKSEN HIUKKASPESURIN KÄYTTÖNOTTO

KUONAN RAKEISTUKSEN HIUKKASPESURIN KÄYTTÖÖNOTTO

Simo Alatarvas
Opinnäytetyö
Kevät 2019
Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, tuotantotalous

Tekijä: Simo Alatarvas
Opinnäytetyön nimi: Kuonan rakeistuksen hiukkaspesurin käyttöönotto
Työn ohjaajat: Jouni Sorsa ja Kai Jokinen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2019
Sivumäärä: 35 + 1 liite

Opinnäytetyön aiheena on käyttöönottaa kuonanrakeistuksen hiukkaspesuri. Työn toimeksiantajana on Torniossa sijaitseva Outokumpu Chrome Oy, joka on osa Outokumpu-konsernia. Chrome Oy tuottaa kromiittirikkaasta malmista ferrokromia, joka on yksi ruostumattoman teräksen raaka-aine. Kromin sulatuksessa syntyy sivutuotteena kuonaa, jonka rakeistusprosessia tässä työssä tutkitaan.

Työn ensisijaisena tavoitteena on vähentää kuonan rakeistuksesta aiheutuvia hiukkaspäästöjä. Hiukkaspesurin tehokkuus todennettiin hiukkaspäästömittauksilla. Lisäksi työn tavoitteena on säätää hiukkaspesuria niin, ettei se vaikuta merkittävästi kuonan rakeistuksen vesisuihkuun.

Työ aloitettiin pesurin käyttöönotolla, joka vaiheistettiin järjestelmällisesti alkaen laitteiston toimintaperiaatteeseen tutustumisesta ja päättyen hiukkaspäästömittauksiin. Käyttöönoton aikana kaikki komponentit testattiin ja laitteistolla tehtiin useita testiajoja virheettömän toiminnan varmistamiseksi. Käyttöönoton aikana havaittiin laitteistossa puutteita, joiden korjaaminen oli tärkeä osa työtä. Puutteita löydettiin muun muassa venttiilien toiminnassa, putkisaumojen sekä laippojen tiiveydessä.

Opinnäytetyön aikana laitteistoa ei saatu käyttöönotettua, koska ulos purkautuvan kaasun hiukkaspitoisuudet kasvoivat noin seitsemänkertaisiksi. Tästä syystä työlle asetettua ensisijaista tavoitetta ei saavutettu. Käyttöönoton testaukset olivat onnistuneita, eikä pesuri vaikuttanut merkittävästi kuonan rakeistusvesisuihkuun tai piippujen luonnolliseen vetoon. Työn lopputuloksena löydettiin juurisyy päästöjen lisääntymiselle, joten pesurilaitteisto on mahdollista käyttöönottaa tulevaisuudessa. Päästöjen lisääntyminen aiheutui epäpuhtaasta rakeistusvedestä, jota kulkeutui pisaroina hiukkasnäytteisiin.

Lisäksi lopputuloksena ideoitiin useita testauksen arvoisia kehitysideoita, esimerkiksi piippujen vetoa rajoittavat ovet, rakeistusaltaan syvennys ja piippuihin asennettavat piisaraerottimet.

Asiasanat: hiukkaspäästöt, ilmansuojelu, savukaasu

ALKULAUSE

Tahdon kiittää Outokumpu Chrome Oy:n kunnossapitoinsinööri Jouni Sorsaa opinnäytetyöni ohjaamisesta. Lisäksi kiitän prosessi-insinööri Aale Grekulaa työn avustamisesta. Kiitän myös koko Outokumpu Chrome Oy:n henkilökuntaa mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyötäni. Lisäksi haluan kiittää Oulun ammattikorkeakoulun yliopettaja Kai Jokista työn ohjauksesta sekä lehtori Tuija Juntusta teksti ohjauksesta.

Suuri kiitos perheelle ja ystäville kannustamisesta sekä kohtuullisesta painostamisesta työn loppuun saamiseksi.

12.12.2018 Simo Alatarvas

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 FERROKROMI	8
2.1 Kuona	8
2.2 Outokumpu Chrome Oy	9
3 ILMANSAASTEET	12
4 ILMANSAASTEIDEN RAJOITTAMINEN	14
5 SUUTTIMIT	18
6 KUONANRAKEISTUKSEN HIUKKASPESURI	22
7 KÄYTTÖÖNOTTO JA TESTAUKSET	24
8 RAKEISTUKSEN HIUKKASMITTAUKSET	27
8.1 Mittaustulokset	29
8.2 Rakeistusveden analyysi	31
9 POHDINTA	32
LÄHTEET	34
LIITTEET	35
Liite 1 Hiukkaspesurin PI-kaavio	

LYHENTEET

bar = baari

cm = senttimetri

g/l = grammaa litrassa

kg/h = kilogrammaa tunnissa

mg/m³n = milligrammaa normikuutiometrissä

m³/h = kuutiometriä tunnissa

m³n/h = normikuutiometriä tunnissa

m/s = metriä sekunnissa

N₂O = dityppioksidi

NO_x = yhteisnimi typen oksideille

SO₂ = rikkidioksidi

VKU = valokaariuuni

VOC = haihtuva orgaaninen yhdiste eli volatile organic compound

µm = mikrometri

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty Outokumpu Chrome Oy:n toimeksiannosta. Sen lähtökohtana on käyttöönottaa kuonan rakeistuksen hiukkaspesuri. Outokumpu Ferrochrome tuottaa ferrokromia kromiittirikkaasta malmista. Ferrokromi on yksi ruostumattoman teräksen valmistuksessa käytettävä raaka-aine. Ferrokromin sulatusprosessissa syntyy sivutuotteena kuonaa, jonka rakeistusta eli granulointia tässä työssä tarkastellaan.

Kuonan rakeistuksen hiukkaspesurilla on tarkoitus vähentää rakeistuksessa syntyviä hiukkaspäästöjä. Hiukkaspäästöjen vähentäminen oli yksi Tornion tehtaiden ympäristötavoitteista vuonna 2017. Rakeistuksessa aiheutuvien hiukkaspäästöjen muutokset todennetaan päästömittauksilla, jotka suorittaa ulkopuoliset mittajat. Laitteisto asennettiin kesällä 2017 valokaariuuni 3:lle. Asennuskohteena oli sulanlaskureikä 1:n kuonanrakeistusallas ja sen kolme piippua.

Opinnäytetyön tavoitteen saavuttamiseksi on tärkeää selvittää kolmen eri suutinvyöhykkeen merkitys ja tehokkuus. Tavoitteet pyritään saavuttamaan hiukkaspesurilaitteistoa säätämällä ja testaamalla niin, ettei vaikuteta merkittävästi kuonanrakeistuksen toimintaan.

Tärkeä osa työtä on laitteistoon tehtyjen muutoksien, käyttöönoton testauksien ja mittauksien dokumentointi, koska samanlaista laitteiston toimintaperiaatetta voidaan hyödyntää muihin hiukkaspäästölähteisiin. Esimerkiksi samanlaisia kuonanrakeistuspiippuja on neljä Tornion ferrokromitehtaalla.

2 FERROKROMI

Ferrokromi on yksi ferroseosmetalleista. Muita seoksia ovat muun muassa ferromangaani, ferromolybdeeni, ferronikkeli, ferropii, ferrotitaani, ferrovolfraami ja ferrovadaniini (1, s. 1–3). Vuonna 2014 Suomessa tuotettiin noin 450 000 tonnia ferrokromia, vastaavasti Etelä-Afrikassa sitä tuotettiin 3,6 miljoonaa tonnia (1, s. 11, 13).

Rauta- ja terästeollisuus käyttävät pääasiassa ferroseosmetalleja teräksen seosaineena, koska se on taloudellisin tapa muuttaa terässulan ominaisuuksia. Ferrokromilla parannetaan raudan ja ruostumattoman teräksen mekaanisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Lisäksi ferrokromia käytetään tiettyjen alumiiniseosten valmistuksessa. Kromi reagoi hapen kanssa ja muodostaa kromioksidirikkaan passiivikalvon metallien pintaan. Ferrokromi koostuu pääasiassa raudasta ja kromista, jotka ovat metallisessa muodossa. Yleensä ferrokromi sisältää 45–80 % kromia, muiden alkuaineiden, kuten raudan ja hiilen osuudet vaihtelevat. (2, s. 7–8.) Torniossa valmistettavan ferrokromin ainepitoisuudet ovat noin 53–55 % kromia ja rautaa 37 %, lisäksi hiiltä, piitä ja fosforia on vaihtelevina pitoisuuksina (3, s. 6).

Ferrokromia valmistetaan pääsääntöisesti sähköisissä valokaariuuneissa, jotka voivat olla avoimia, osittain suljettuja tai suljettuja. Lisäksi sulatukseen voidaan käyttää tasavirtaplasmaa, joka soveltuu hyvin pienelle tuotannolle. Yleisesti prosessissa metallioksidit sulatetaan sähköenergian ja pelkistimen avulla, milloin syntyy metallia ja pelkistinoksideja. Raaka-aineena käytetään kromirikasteita ja pelkistimenä koksia. Muita raaka-aineita ovat kvartsi, bauksiitti, oliviini, dolomiitti, kalkkikivi ja kalsiitti. (2, s. 13.)

2.1 Kuona

Ferrokromin sulatusprosessissa muodostuu aina kuonaa, jota syntyy kromimalmin ja lisäaineiden sisältämistä oksideista. Kuona sisältää pääasiassa pii-, alumiini- ja magnesiumoksidia sekä pienempiä määriä kalsium-, kromi ja rautaoksidia. Ferrokromi on kemiallisesti raskaampaa kuin kuona, jolloin se kelluu ferrokromin pinnalla. (2, s. 15.)

Kuonalla täytyy olla oikea sulamispiste ja sen täytyy erottua metallista hyvin, jotta sulatusprosessi toimii oikein. Sen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat viskositeetti, resistiivisyys ja

sulamispiste. Kuonan ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäämällä muita mineraaleja kuin kromimalmia. Käytettäviä lisäaineita ovat esimerkiksi kvartsi, alumiinioksidi, magnesiumoksidi ja kalsiumoksidi. (2, s. 10.)

Viskositeetti määrittää metallien ja kuonan erottumisen ja näin ollen myös metallien talteenoton. Korkea viskositeetti voi aiheuttaa kuonan vaahtoutumista, jolloin sulatusprosessi ei toimi oikealla tavalla. Kuonan resistiivisyyden avulla pystytään määrittämään sähköjohtavuus ja elektrodin pituus. Korkeampi resistiivisyys sallii pitemmän elektrodin, korkeamman jännitteen ja näin ollen paremman tehon. Sulamislämpö määrittää yleisen toiminta lämpötilan ja sulatusnopeuden. Sulan kuonan lämpötila on noin 1700 °C. (2, s. 10.)

Yleensä kuona sisältää pieniä pisaroita metalleja, joiden osuus vaihtelee 2–12 %:n välillä. Kuonan sisältämät metallit voidaan ottaa talteen, riippuen käytettävissä olevasta teknologiasta ja sen aiheuttamista kustannuksista. Sulanlaskutavalla on suuri merkitys, kuinka paljon kuona sisältää metalleja. (2, s. 15.) Kuonaa voidaan käsitellä useilla tavoilla, jotka määräytyvät sulanlaskutavan mukaan. Yleensä kuona erotetaan ferrokromista ylivuotona. Metallisten senkkojen täytyessä raskaammasta ferrokromista, suurin osa kuonasta valuu ylivuotona kuonaseenkaan, kuonamonttuun tai rakeistukseen. Kuonaseenkaa käytettäessä kuona valutetaan monttuun tai ojaan, jossa se jäähtyy vapaasti tai vesisuihkun avulla. Rakeistuksessa sula kuona johdetaan suoraan vesisuihkuun, jossa se hajoaa pieniksi murusiksi. Tätä tapaa kutsutaan myös granuloinniksi. (2, s. 19.)

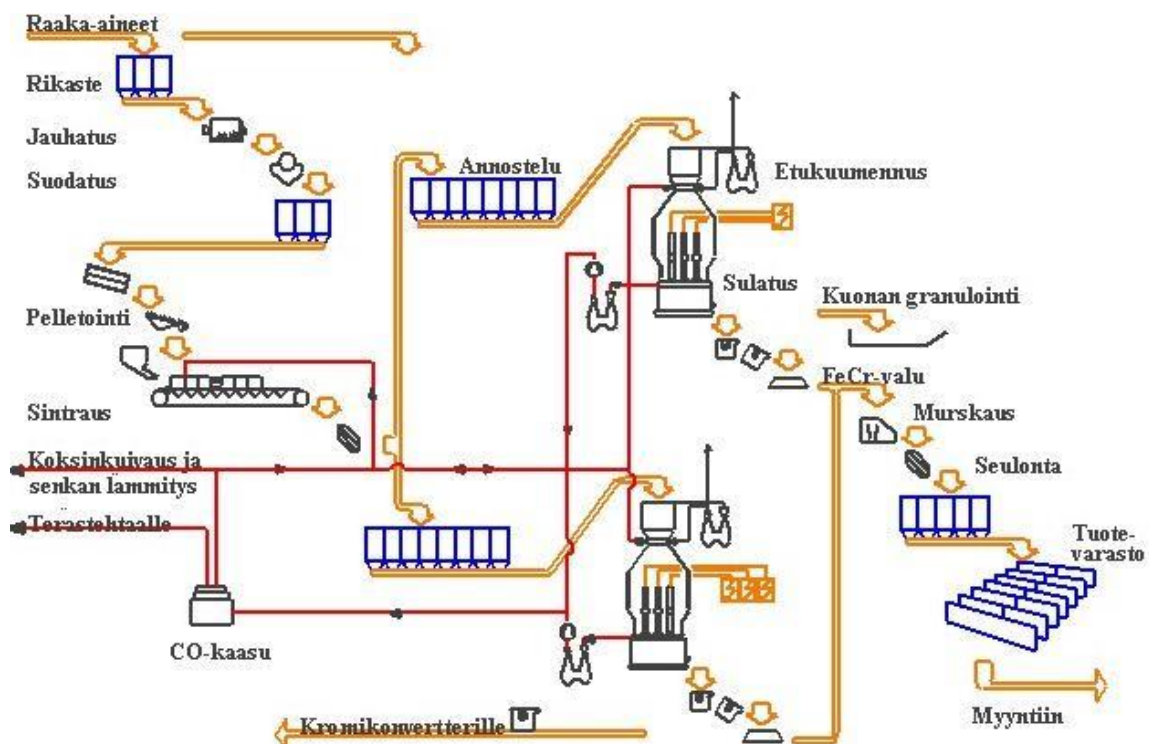
Kuona voidaan hyödyntää useissa eri käyttökohteissa. Se on kemiallisesti hyvin vakaa ja sen mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat kuin useimmilla kivilajeilla. Käyttökohteita ovat esimerkiksi tien pohjat ja muu maarakentaminen. Granuloitua kuonaa voidaan käyttää myös hiekkapuhallukseen tai tulenkestävien valumassojen raaka-aineena. (2, s. 20.)

2.2 Outokumpu Chrome Oy

Outokumpu-konserni koostuu neljästä liiketoiminta-alueesta, joista yksi on Outokumpu ferrochrome. Siihen kuuluvat Keminmaassa sijaitseva kromikaivos ja Tornion ferrokromitehdas. Outokummun Tornion tehtaat ovat yksi maailman integroiduin ruostumattoman teräksen valmistaja, oman ferrokromituotannon vuoksi. Kemin kaivoksen malmituotanto

on 2,7 miljoonaa tonnia vuodessa ja koko mineraalivarannot arvioidaan olevan yli 90 miljoonaa tonnia. Tornion ferrokromitehtaan tuotantokapasiteetti on 530 000 tonnia vuodessa. (4.)

Kemin kaivos toimii maan alla, josta esimurskattu malmi nostetaan kuilunostimella maanpinnalle. Maanpinnalla malmi murskataan ja jauhetaan uudelleen, jolloin syntyy pala- ja hienorikastetta. Seuraavaksi raaka-aineet kuljetetaan kuorma-autoilla Tornion ferrokromitehtaan. Siihen kuuluvat koksi-asema, kaksi sintraamoja, kolme sulattoa ja murskaamo. Kuvassa 1 esitetään ferrokromitehtaan koko tuotantoprosessi. (4.)



KUVA 1. Ferrokromitehtaan prosessikaavio (3, s. 8)

Tuotantoprosessi alkaa sintraamoilta, joissa kaivokselta saapuva hienorikaste käsitellään. Hienorikaste täytyy saada suurempaan partikkelikokoon, jotta se voidaan käyttää sulatusuuneissa. Ensimmäiseksi hienorikaste jauhetaan pienemmäksi märkäjauhatuksessa, jossa sekaan sekoitetaan koksia ja vettä. Jauhatuksesta syntyvä liete suodatetaan ja kosteusprosentti säädetään halutunlaiseksi. Seuraavassa vaiheessa syntynyt materiaali pelletoidaan pyörivässä pelletointirummussa, jossa mukaan sekoitetaan vielä bento-

niittia. Pyörimisliikkeen vaikutuksesta materiaalit alkavat pelleteitua ja kappalekoko kasvaa. Pyöreät pelletit seulotaan kahdella rullaseulalla, joilta sopivan kokoiset pelletit syötetään sintrausuuniin. Väärän kokoiset pelletit murskataan, ja palautetaan takaisin pelletointiprosessiin. Sintrausuunissa pelletit kulkevat uunin lävitse, rei'itetyn teräsnauhan päällä, jossa pelletit käyvät lävitse eri lämpötilavyöhykkeitä. Sintrausuunissa pelletit saavat tarvittavan lujuuden ja kuumuudenkestävyyden. Seuraavaksi pelletit seulotaan ja varastoidaan tai kuljetetaan suoraan sulatusuunien annostelusiiloihin. (3, s. 7.)

Koksiasemalla koksi kuivataan ja seulotaan ennen sulatusuuneille syöttämistä. Prosessilla parannetaan kaksin annostelutarkkuutta ja vähennetään siiloihin kamittumisen riskiä. Kuivaus suoritetaan kahdella kuilu-uunilla ja seulonta kolmitasoseulalla. Seulan ylimmältä tasolta tuleva karkea koksi varastoidaan ja myöhemmin murskataan. Seulan keskimmäiseltä ja alimmalta tasolta tuleva koksi ajetaan sulatusuunien annostelusiiloihin. Seulan viimeisimmän tason alite, johdetaan sintraamon märkäjauhatukseen. (3, s. 8.)

Annostelusiiloista kaikki ferrokromin valmistuksessa tarvittavat raaka-aineet syötetään etukuumennussiiloon määrättyllä suhteella. Materiaalit kuumennetaan etukuumennussii-
lossa, jonka jälkeen syötemateriaalit valuvat painovoimaisesti syöttöputkia pitkin sulatusuuniin. Kaikki Torniossa käytössä olevaa uunia, ovat tyypiltään suljettuja uppokaariuuneja. Sulatukseen tarvittava sähköenergia kulkee elektrodeja pitkin syötteeseen. Uunien elektrodit ovat täysin syötteen peitossa, mistä uunien nimitys syntyy. Noin 2,5 tunnin välein sula ferrokromi ja kuona valutetaan sulanlaskureiän kautta senkkoihin, joista kuona valuu ylivuotona granulointiin eli kuonan rakeistukseen. Sula ferrokromi voidaan kuljettaa suoraan terässulaton prosessiin tai se kaadetaan valuojiin. Ferrokromin ja kuonan lisäksi sulatusuuneissa syntyy häkäkaasua, joka puhdistuksen jälkeen hyödynnetään eri koh-teissa ympäri Tornion tehdasaluetta. (3, s. 8.)

Valuojissa jähmettynyt ferrokromi siirretään välivarastointilaareihin, joissa valanteet jäähtyvät ja halkeilevat pienemmiksi kappaleiksi. Seuraavaksi jäähtyneet kappaleet syötetään murskaamon ensimmäiseen leukamurskaimeen, jossa ferrokromi saadaan pienempään palakokoon. Seuraavassa vaiheessa on toinen leukamurskain ja kaksitasoinen seulonta. Murskattu ferrokromi lajitellaan varastolaareihin tietyn palakokojakauman mukaan. Varastolaareista kromi myydään maailmalle tai käytetään Outokummun omissa tehtaissa. (3, s. 12.)

3 ILMANSAASTEET

Ilmansaasteet ovat vähentyneet ja ilmanlaatu on parantunut Euroopassa viimeisten vuosikymmenien aikana. Tähän ovat vaikuttaneet useat tekijät, muun muassa päästölähteiden teknisten rajoitustoimien käyttöönotto ja kehittyminen sekä 1980- ja 1990-luvuilla tehdyt valtioiden väliset sopimukset. Esimerkiksi tutkittaessa Suomen kokonaishiukkaspäästöjä vuodesta 1990 vuoteen 2000, ovat hiukkaspäästöt vähentyneet noin puoleen vuoden 1990 tasosta. Esimerkiksi vertailtaessa saman ajanjakson teollisuuden prosessipäästöjä, on määrä tippunut noin 70 prosenttia. (5, s. 151–152.)

Ilmansaasteisiin kuuluvat kaasut, nestepisarat ja kiinteät hiukkaset, mitkä syntyvät luonnon omista lähteistä tai ihmisen toiminnasta. Ilmansaasteeksi luetaan materiaalit, joita on ilmakehässä niin paljon, että ne aiheuttavat haittaa ja vahinkoa ihmisen terveydelle ja viihtyisyydelle, kasveille ja eläimille sekä muulle luonnonympäristölle. Myös melu, lämpö, kylmyys ja sähkömagneettinen säteily voidaan luokitella ilmansaasteeksi. Ilmansaasteet voidaan jaotella seuraavanlaisesti:

- rikkiyhdisteet (SO₂, COS)
- typpiyhdisteet (N₂O, NO_x)
- halogeeniyhdisteet
- hiiliyhdisteet
- metallit
- hiukkaset
- hapettimet. (6, s. 10.)

Esimerkiksi happamat sateet, vetyionit ja radioaktiiviset aineet eivät suoraan kuulu kyseisiin ryhmiin. Ilmaan pääsevät päästöt voivat olla kaasumaisia tai hiukkaspäästöjä. Lisäksi kaasumaiset päästöt voivat olla joko epäorgaanisia tai orgaanisia päästöjä. (7, s. 31.)

Päästölähteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, liikkuviin ja paikallaan pysyviin lähteisiin. Esimerkiksi teollinen prosessi eli tehdas tai energiantuotanto ovat paikallaan pysyviä lähteitä. Esimerkiksi auto on liikkuva lähde. (6, s. 11.) Eniten päästöjä aiheuttavat energiantuotanto, prosessiteollisuus ja liikenne (7 s.31).

Hiukkaspäästöt

Työlle tärkeintä on keskittyä hiukkaspäästöihin, koska niiden vähentämistä hiukkaspesurilla tavoitellaan. Kuonan rakeistuksessa syntyvien hiukkasten kokojakauma on hyvin laaja. Esisuunnitteluvaiheen laskennoissa on huomioitu usean kokoiset partikkelit. Ne voivat olla suurimmillaan yli 100 µm ja pienimmillään alle 2,5 µm (8, s. 2).

Ilmakehän hiukkaspäästöjä ovat pölyt, sumut, savut, tuhkat, koksijäännökset ja noet. Hiukkaspäästöt koostuvat erilaisista kiinteistä partikkeleista ja nestepisaroista, joiden koko on alle 1000 µm. Pienhiukkasiksi määritetään ne hiukkaset, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 2,5 µm (5, s.151.) Esimerkiksi prosessiteollisuuden pölyt voivat olla koluokaltaan 1–50 µm:ä. Vastaavasti öljykattilasta syntyvät hiukkaset ovat paljon pienempiä, kooltaan 0,02–1,0 µm:ä. (6, s. 50.) Hiukkaspäästöjen haitallisuus perustuu niiden sisältämiin ja kuljettamiin useamman ilmansaasteryhmien aineisiin ja yhdisteisiin (6, s. 34).

Liikenne aiheuttaa leijuvaa pölyä, joka koostuu karkeista hiukkasista ja pienhiukkasista. Karkeat hiukkaset ovat käytännössä hiekoituksesta ja teiden kulumisesta syntyvää pölyä, jonka vaikutus on käytännössä ympäristöä likaava. Pakokaasujen osuus koko liikenteen hiukkaspäästöistä on vähäinen. Kuitenkin se sisältää pienhiukkasia, jotka tunkeutuvat syvälle keuhkoihin ja ovat terveydelle haitallisimpia. (6, s. 34–35.)

4 ILMANSAASTEIDEN RAJOITTAMINEN

Ilmansaasteiden rajoittamiseen on käytettävissä useita menetelmiä. Niitä ovat muun muassa erilaisia suodattimet, kemialliset menetelmät ja polttomenetelmät. Keskeisimpiä ilmaa saastuttavia päästöyhdisteitä ovat haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet, haihtuvat orgaaniset yhdisteet, hiukkaset, rikkioksidit ja typpioksidit. (6, s. 44.) Tässä työssä keskitytään ainoastaan hiukkasten rajoittamiseen, koska tavoitteena on vähentää hiukkaspartikelien määrää. Taulukossa 1 esitetään ilmansaasteiden rajoittamiseen soveltuvia menetelmiä (6, s. 45).

TAULUKKO 1. Ilmansaasteille käytettävissä olevat rajoitusmenetelmät (6, s. 45)

	Haihtuvat epä- orgaaniset yhdisteet	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)	Hiukkaset	SOX/NOX
Absorptio	X	X		
Adsorptio		X		
Elektrostaattinen saostus			X	X
Kemiallinen pelkistys				X
Kondensointi		X		
Märkäpesu	X		X	X
Poltto (muunnelmat)				X
Polttouuni		X		
Suodatus			X	X

Pölynerotuslaitteet

Pölynerottimien tarkoituksena on puhdistaa savukaasuista pääasiassa kiinteät partikkelit, mutta ne soveltuvat myös muille epäpuhtauksia. Pölynerottimien erotuskykyyn vaikuttaa pölyhiukkasten koko ja hiukkaskokojakauma. Pölynerotuslaitteet jaetaan niiden toimintaperiaatteen mukaisesti

- mekaanisiin erottimiin
- pölysuodattimiin
- sähköisiin erottimiin

- märkäerottimiin. (6, s. 48–49.)

Jokainen pölynerotuslaite on erilainen toimintatavaltaan, minkä vuoksi ne soveltuvat parhaiten tietyn kokoisille partikkeleille. Laitteiden välillä erotuskyky ei juurikaan vaihtele. Märkäpesurit eivät kykene samanlaiseen erotuskykyyn kuin kangas- tai sähkösuodattimet (9, s. 69). Taulukossa 2 esitetään erilaiset pölynerotuslaitteet ja niiden hiukkaskoon käyttöalue ja erotuskyky.

TAULUKKO 2. Pölynerotuslaitteiden käyttöalueet (6, s. 50)

Laite	Hiukkaskoko [µm]	Erotuskyky [%]
Mekaaniset erottimet		
-laskeutin	>50	>50
-sykloni	5 - 50	50 - 90
-multisykloni	1 - 50	50 - 99
Pölysuodattimet		
-letkusuodatin	0,5 - 50	50 - 99,9
Sähköiset suodattimet		
-kylmä sähkösuodatin	0,1 - 50	50 - 99,9
Pesurit		
-venturipesuri	0,2 - 50	50 - 99,9

Märkäpesurit

Märkäpesurit soveltuvat parhaiten hiukkasten tai muiden haitallisten kiinteiden aineiden erottamiseen kaasuvirrasta. Kuonan rakeistuksen hiukkaspesuri toimii samantyyppisellä periaatteella kuin pesurit, joiden toiminta perustuu nestepisaroiden ja hiukkaspartikkelien törmäykseen. Nestepisaroilla on kyky siepata ja yhdistää savukaasussa olevia kiinteitä hiukkaspartikkeleita, milloin painavimmat partikkelit on helpompi erottaa virtaavasta kaasusta. (7, s. 90.) Yleisimpiä märkäpesurityyppejä ovat venturipesuri ja pesutorni (10, s. 199–200).

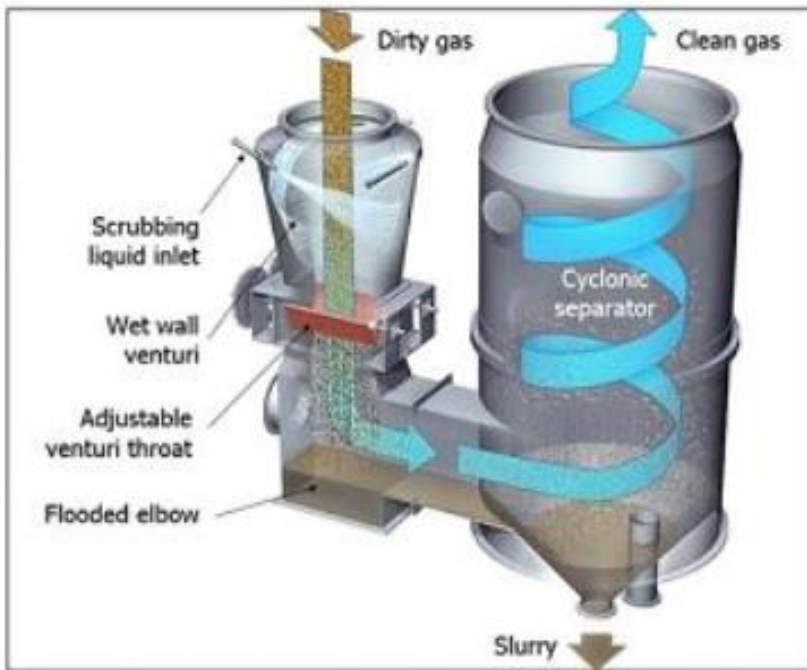
Virtaavaan savukaasuun suihkutetaan nestettä suuttimien avulla myötä- tai vastavirtaan. Nesteinä käytetään yleensä vettä, koska se on suhteellisen taloudellinen aine käyttää. Jos pesurilla tavoitellaan muiden epäpuhtauksien vähentämistä kuin hiukkaspartikkelien,

voidaan käyttää myös muita nesteitä tai nesteseoksia. Esimerkiksi käytettäessä alkaliveseosta, voidaan vähentää rikkidioksidipäästöjä. (9, s. 69.)

Kaikkien pesurien teho on riippuvainen pisaroiden ja hiukkasten välisestä nopeuserosta, jolla voidaan kasvattaa todennäköisyyttä yhteentörmäyksille (11). Lisäksi märkäpesureiden tehokkuus määräytyy nestepisaroiden koon ja hiukkaspartikkelien kokojakauman mukaan. Tehokkuus vähenee, kun hiukkaspartikkelien koko pienenee. Pesurilaitteistossa voi olla myös sumunkerääjä, jolla poistetaan savukaasuvirran mukana kulkeutuvia nestepisaroita. (9, s.69–70.)

Kaikki märkäpesurit tarvitsevat jäteveden puhdistusta, koska epäpuhtaudet jäävät käytettyyn nesteeseen. Puhdistuksen jälkeen neste voidaan käyttää uudelleen. Lisäksi nesteiden ja epäpuhtauksien ruiskutus aiheuttaa muita ongelmia, muun muassa korroosiota ja jäätymisvaaraa. (11.)

Yleisin ja tehokkain märkäpesurityyppi on venturipesuri. Venturipesurin putkessa on suppilomainen kavennus, johon neste suihkutetaan. Kavennuksen kohdalla kaasuvirran nopeus kasvaa mutta nesteen nopeus pysyy vakiona. Nopeuseron kasvaessa, partikkelien ja nestepisaroiden törmäysten määrä lisääntyy. Putken levetessä kaasuvirran ja pisaroiden nopeus pienenee. Raskaammiksi muuttuneet partikkelit on helpompaa erottaa kaasuvirrasta. Nestepisarat ja hiukkaspartikkelit erotetaan pesuriin liitettyssä syklonissa. (10, s. 199.) Venturipesurin pölynerotuskyky on parempi mitä suuremman painehäviön venturi aiheuttaa (7, s. 91). Venturipesurin toiminta kuvataan kuvassa 2 (12.)



KUVA 2. Venturipesurin toiminta (12)

5 SUUTTIMET

Suuttimilla on useita muita käyttökohteita, kuten esimerkiksi pesut, suihkukuivaus ja kaasunkäsittely (13, SSF Spraying Systems Finland Oy). Olennaisinta tässä työssä on keskittyä suuttimien käyttöön pölynsidonnassa, johon kuuluu kaksi vaihetta. Pöly sidotaan ennen ilmaan pääsemistä ja pölypartikkelit sidotaan tai pestään ilmasta. Olennaisinta on keskittyä suuttimien käyttöön ilmasta tai kaasuvirrasta poistettaviin pölypartikkeleihin.

Suuttimien päätarkoitus on rikkoa ja pisaroida nestevirtaus suihkukuvioksi. Tarkoitus voi olla myös halutun tilavuusvirtauksen tuottaminen tietyllä paineella, halutun tyyppinen ja muotoinen suihku sekä nesteen pisaroittaminen haluttuun kokoon. Nestesuuttimet voidaan jaotella suihkun muodon mukaan seitsemään suutintyyppiin, joita ovat

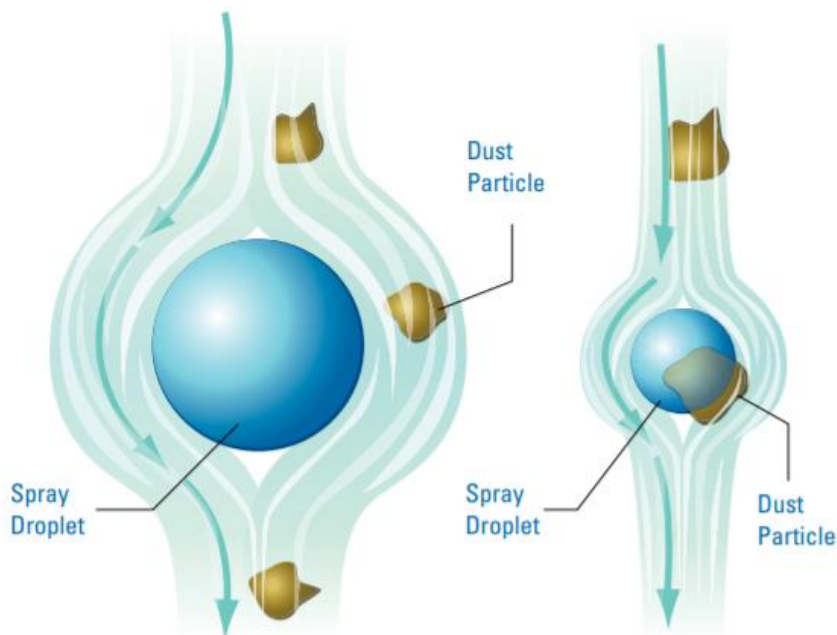
- täyskartiosuuttimet
- viuhkasuuttimet
- avokartiosuuttimet
- pistesuihkusuuttimet
- onttokartiosuuttimet
- sumutussuuttimet
- hajoitusilmasuuttimet. (14, s. 1–2.)

Tärkeimmät käsitteet, joihin suuttimella vaikutetaan ovat partikkelin koko verrattuna nestepisaran kokoon, ruiskutusaine, suutintyyppi ja koko. Hiukkapesurin toimivuuden kannalta suuttimet ovat erittäin tärkeässä roolissa, koska vesipisarat halutaan juuri oikeanlaiseksi. Laitteisto ei toimi halutulla tavalla, jos vesipisarat ovat liian suuria tai liian pieniä.

Pisarakoko on suure, millä määritetään suihkun muodostavien pisaroiden halkaisija tai tilavuus. Suurin pisarakoko saadaan aikaan täyskartiosuuttimissa ja pienin pisarakoko hajoitussuuttimissa. Lisäksi paineen nostamisella saadaan aikaan pienempiä pisaroita mutta vain tiettyyn pisteeseen saakka. Todellisuudessa suihkun pisarat eivät ole kooltaan identtisiä, minkä vuoksi pisarakoko ilmoitetaan mittausmenetelmien mukaan. Yleisin käytettävä mittausmenetelmä on VMD (volume median diameter). Se kertoo, että puolet ruiskutetun tilavuuden pisaroista on VMD-arvoa suurempia ja puolet pienempiä. Lisäksi on kaksi muuta pisarakoon mittausmäärettä, joita ovat SMD (Sater median diameter) ja MND

(Median number diameter). SMD ilmoittaa yksittäisen pisaran halkaisijan, jolla on sama tilavuuden suhde pinta-alaan kuin suihkun muodostavien pisaroiden yhteen laskettu tilavuuden suhde pinta-alaan. MND-luku kertoo, että puolet suihkun muodostavista pisaroista on suurempia ja puolet pienempiä kuin MND-arvoon verrattava halkaisija. (14, s. 8.)

Testauksilla on osoitettu, että 2–3 µm:n pölyhiukkaset saatiin parhaiten sidottua noin sata kertaa suuremmilla nestepisaroilla. Suuremmat hiukkaset saatiin sidottua samansuuruisilla tai hieman kookkaammilla nestepisaroilla. (16.) Nestepisaran halkaisijan ollessa suurempi kuin pölyhiukkasen halkaisija, milloin hiukkanen seuraa ilmavirtaa pisaran ympärillä. Halkaisijoiden ollessa vertailukelpoisia, pölyhiukkanen ei seuraa ilmavirtaa vaan törmää pisaraan. Pisaran ja partikkelien koon merkitys on havainnollistettu kuvassa 3 (15, s. 5).



KUVA 3. Nestepisaran ja pölypartikkelin koon merkitys (15, s. 5)

Kaasuvirran puhdistus perustuu partikkelien ja nestepisaroiden törmäykseen, jolloin tehokkuus määrittyy törmäysnopeuden mukaan. Pisaroiden nopeuteen vaikutetaan kasvattamalla ruiskutuspainetta, jota kasvattamalla voidaan puhdistuksen tehokkuutta parantaa paineen optimiarvoon asti. Yleisesti 27 bar:n arvoa pidetään ruiskutuspaineen optimiar-

vona. Testauksilla on osoitettu, että paras tehokkuus saavutetaan 6,9–55 bar:n ruiskutusaineella. (16.) Painetta suurennettaessa on otettava huomioon sen vaikutus suuttimen suihkukulmaan ja pisaroiden kokoon. Paineen kasvattaminen suurentaa suihkukulmaa ja pienentää pisarakokoa (14, s. 12).

Suuttimien valinnassa yksi tärkeimmistä tiedoista on suihkukulma, jolla määritetään suihkun teoreettinen peittoalue. Nestesuuttimien suihkukulmaan vaikuttavat käyttöpaine, nesteen lämpötila, viskositeetti ja pintajännitys. Lisäksi virtauksen käyttäytymisellä ja ilmanvastuksella on vaikutuksensa, kun suihkua tarkastellaan kauempana suutinaukosta. (14, s. 6.) Suihkukulma myös määrittää kulman, jolla nestepisaran ja hiukkasen yhteentörmäys tapahtuu. Kapeakulmaisilla suuttimilla ja pistesuihkusuuttimilla on parhain kulma pölynsidonnassa. Nämä suutintyypit eivät ole käytännöllisiä pölynsidonnassa, koska suihku osuu vain pienelle alueelle. Laajakulmaisilla suuttimilla on heikko pesuteho mutta laaja peittoalue, jolloin mahdollisia partikkelien ja pisaroiden yhteentörmäyksiä syntyy enemmän. Testaukset ovat todentaneet optimaalisen suihkukulman, joka on 55–70 astetta. (16.)

Nesteen ominaisuuksien vaikutus suihkuun

Yleensä suuttimien virtaustaulukot määritetään vettä käyttäessä. Käytettävän nesteen tiheyden vaikutus voidaan laskea kaavan 1 mukaisesti. Tiheyden vaikutus on otettava huomioon, kun lasketaan suuttimen läpi vaikuttavaa virtausta. (14, s. 10.)

$$Q = Q_w \times \frac{1}{\sqrt{d}}$$

KAAVA 1

Q = todellinen kapasiteetti

Q_w = kapasiteetti vedelle

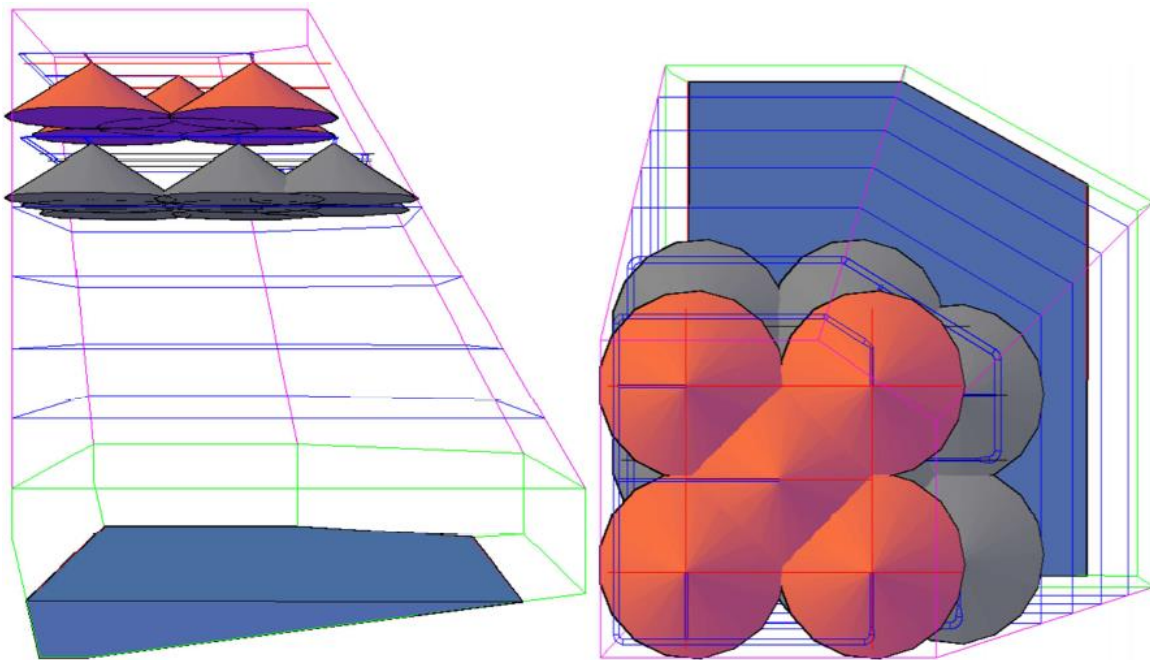
d = nesteen tiheys

Nesteen viskositeetillä on suurin vaikutus syntyvän suihkun ominaisuuksiin ja käytössä olevan suuttimen toimintaan. Viskositeetti vaikuttaa kaikkiin suutintyyppeihin samalla tavalla. Sen kasvaessa suuttimen suihkukulma pienenee. Viskositeetin aiheuttamia muutoksia voidaan vähentää nostamalla painetta tai lämmittämällä nestettä. (14, s. 11.)

Nesteen pintajännityksen lisääntyminen aiheuttaa suuttimella suihkukulman kaventumisen. Pisarakoolle ja suihkun laatuun pintajännityksen muutokset ovat kuitenkin lähes merkityksettömiä. Pintajännityksen muutokset voidaan poistaa nostamalla painetta tai vaihtamalla suuttimen aukkoa pienempään. (14, s. 12.)

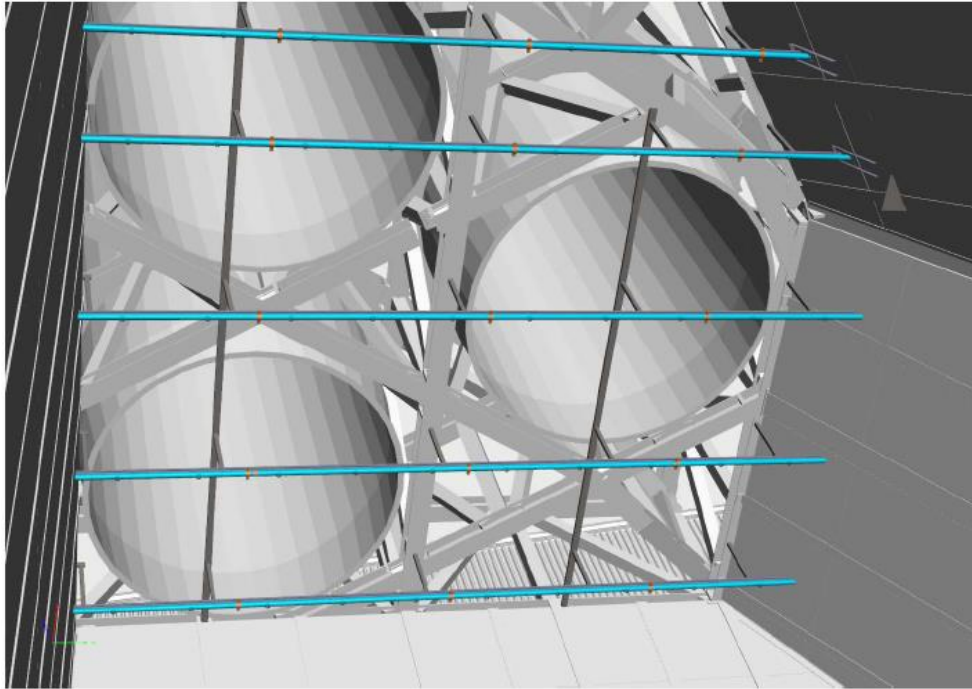
6 KUONANRAKEISTUKSEN HIUKKASPESURI

Hiukkaspesuri koostuu kolmesta eri suutinryhmästä. Laitteiston putket, suuttimet ja muut komponentit asennettiin kesä- ja heinäkuun aikana, jolloin VKU 3:lla pidettiin vuosihuolto. Kuonanrakeistuspumput, rakeistussuutin ja niiden putkisto sekä huuva ja piiput olivat jo entuudestaan valmiina. Elomatic Oy on suunnitellut hiukkaspesurin ja siihen kuuluvat rakenteelliset lisäykset. Pesuri suunniteltiin kahdelle suutinryhmälle, jonka konsepti-idea on esitetty kuvassa 4 (8, s. 10).



KUVA 4. Hiukkaspesurin konsepti (8, s. 10)

Hiukkaspesurissa on kolme erillistä suutinvyöhykettä, joissa jokaisessa on eri määrä suuttimia. Laitteistossa on yhteensä 37 suutinta, jotka jakautuvat suutinvyöhykkeiden kesken: seinässä kymmenen suutinta, huuvan katossa on 24 suutinta sekä jokaisessa piipussa on yksi suutin. Jokainen suutinryhmä voidaan sulkea pois käytöstä käsiventtiileillä. Lisäksi huuvan katossa oleva suutinryhmä koostuu viidessä putkesta, joissa jokaisessa on viisi suutinta. Poikkeuksena kulkuaukon yläpuolella olevassa putkessa on neljä suutinta. Huuvan katossa olevan suutinryhmän 3D-malli on esitetty kuvassa 5. (8, s.9.)



KUVA 5. Huvun suutinryhmä ja rakeistuksen piippujen lähdöt (17, s.9)

Jokaiselle laitteiston suutinvyöhykkeelle asennettiin samat Lechler 405.328 suuttimet, joita on käytetty suunnitteluvaiheiden laskennoissa. Lechler 405.328 suutin on tyypiltään täyskartiosuutin, jolla saadaan aikaan laaja ja tasainen peittävyys. Käytettäväksi valittiin laajakulmainen 120 asteen malli. Valintaan päädyttiin, koska peitettävät alueet ovat laajat. Suuttimen valmistajan antamat pisaroiden koko tiedot ovat pisaroiden keskihalkaisijalle $790,8 \mu\text{m}$ ja tilavuusmediaanille $947,7 \mu\text{m}$, kun paine on 3 bar. (17, s.12.)

Laitteistossa on kaksi Sulzerin valmistamaa pumppua. Normaalisissa ajoissa käytetään vain yhtä pumppua, koska se riittää tuottamaan riittävän tilavuusvirran rakeistuksen vesisuihkulle. Yksi rakeistuspumppu tuottaa $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ tilavuusvirran ja 10 bar paineen, joiden arvioidaan riittävän myös hiukkaspesurille. Laitteiston PI-kaavio on esitetty liitteessä 1.

Laitteistoa käytetään prosessitietokoneelta, josta operaattori käynnistää rakeistuspumpun sulanlaskun aloituksessa. Pumpun pyöriessä vesi virtaa myös hiukkaspesurille, kun juuriventtiili on auki-asennossa. Putkiston ja suuttimien jäätyminen on estetty kallistamalla vaakatasossa olevia putkistoja kohti juuriventtiiliä. Syntyvä jätevesi puhdistetaan vesien käsittelylaitoksessa, jossa myös muut tehtaan prosessivedet käsitellään.

7 KÄYTTÖÖNOTTO JA TESTAUKSET

Työ aloitetaan aloituspalaverilla, jossa suunnitellaan alustava aikataulu käyttöönotolle ja mittauksille. Ensimmäinen aikataulutusta muodostuu kuukausittaisesta suunnitelmasta. Syyskuussa laitteiston käyttöönotto, säätö ja ensimmäiset päästömittaukset. Lokakuussa laitteiston uudelleen säätäminen ensimmäisten mittausten pohjalta, minkä jälkeen uusia mittauksia.

Käyttöönotto aloitetaan tutustumalla laitteiston suunnittelumateriaaliin ja PI-kaavioon. Niiden avulla selvitetään putkistot, venttiilit ja muut laitteistoon liittyvät osat ja niiden fyysiset sijainnit. Samanaikaisesti tehtiin aistinvarainen tarkkailu putkistoon ja komponentteihin. Lisäksi testattiin automaattisten venttiilien toiminta ohjaamalla niitä valvomon prosessi-automaatiolla. Yhden venttiilin asento ei täsmännyt prosessikoneen asentotietoon, joka myöhemmin korjattiin.

Seuraavassa vaiheessa putkistoon johdettiin ensimmäistä kertaa vettä. Testauksen aikana tutkittiin silmämääräisesti suuttimien muodostamia vesipisaroita ja pesurin vaikutusta kuonanrakeistuksen vesisuihkun voimakkuuteen. Samalla testauskerralla tutkittiin virtaus- ja painemittareiden toiminta. Kakkien mittareiden lukuja verrattiin prosessi-automaatiossa näkyviin arvoihin. Mittareiden ja prosessikoneen arvot eivät täsmänneet, minkä vuoksi automaation parametreihin tehtiin tarvittavia muutoksia. Lisäksi testauksen aikana selvitettiin putkiliitosten ja hitsaussaumojen vuodot, joita löydettiin useita. Vuotokohdat merkittiin maalilla korjauksen helpottamiseksi. Laitteiston rakentanut urakoitsija suoritti korjaukset.

Korjauksien jälkeen kokeiltiin laitteiston toiminta eri suutinvariaatioilla, ilman kuonanrakeistuksen mahdollisesti aiheuttamia ongelmia. Testaus suoritettiin 14.9.2017, jolloin testattiin jokaista yksittäistä suutinryhmää, kahden suutinryhmän yhdistelmiä ja kaikkia suuttimia samanaikaisesti. Testin aikana havainnoitiin silmämääräisesti vesipisaroiden kokoa ja vesisumun tiheyttä. Samalla tutkittiin laitteiston eri suutinryhmien vaihtoehtojen muodostamia virtausmääriä ja -paineita. Testauksen aikana huomattiin vesipisaroiden olevan yllättävän hienojakoista, oletuksiin verrattuna. Lisäksi seinällä olevien suuttimien vaikutus

näkyi noin 30 cm etäisyydellä suuttimista, jolloin niiden vaikutus hiukkaspäästöihin arviointiin olevan vähäinen. Hiukkaspesuri ei vaikuttanut kuonanrakeistuksen vesisuihkun voimakkuuteen. Lisäksi yksi rakeistuspumppu kykeni tuottamaan riittävän tilavuusvirran ja paineen hiukkaspesurin kaikille suuttimille ja rakeistussuihkulle.

Ensimmäinen koekäyttö sulanlaskun aikana suoritettiin syyskuun 19.päivä, jonka aikana käytössä olivat seinä- ja huuvasuuttimet. Sen aikana rakeistuspumpun teho pidettiin 70 %:ssa ja säätöventtiili täysin avoinna. Havainnoitiin, ettei piippujen luonnollinen veto häiriinny vastavirtaan ruiskutettavien vesipisaroiden vaikutuksesta. Rakeistuksessa syntynyt vesihöyry purkautui välillä huuvan aukosta ulos, mikä ei ollut toivottu tapahtuma. Tämän ehkäisemiseksi päätettiin sulkea huuvasuuttimista kulkuaukon yläpuolinen putki. Testauksen aikana operaattorit seurasivat kamerasta piipuista purkautuvan höyryn määrää. Operaattorit arvioivat höyryn vähenevän hiukkaspesurin käynnissä ollessa.

Käyttöänoton aikana päätettiin, ettei hiukkasmittauksia tehdä itse, vaan ne suoritetaan ulkopuolisen yrityksen toimesta. Näin varmistetaan lopputulosten yhteneväisyys aikaisempiin mittauksiin. Ennen päästömittauksien suorittamista pidettiin palaveri, jossa päätettiin suutinryhmien testausjärjestys ja sulan laskujen määrä jokaista näytettä kohti. Testattavat suutinryhmät ja testausjärjestys olivat

- kaikki suuttimet
- huuvan suuttimet
- piipun suuttimet
- huuvan ja piipun suuttimet yhdessä.

Lisäksi varalle valittiin seinän suuttimet sekä katto- ja seinäsuuttimien yhdistelmän testaus. Ennen virallisia päästömittauksia, laitteiston toiminta varmistettiin simuloimalla mittauksien mukaiset ajot sulan laskujen yhteydessä. Simulointitestit suoritettiin 13.–18.10.2017. Yhden sulan laskun aikana syntyi ongelma, jossa piippujen virtaus loppui ja höyryä purkautui rakeistuksen rakenteiden aukoista ulos. Tilanne loppui välittömästi, kun pesurin virtausmäärää kuristettiin säätämällä automaattista venttiiliä. Tilanne ei toistunut, vaikka testaus uusittiin samoilla asetuksilla. Kuvassa 6 on havainnekuva ongelmatilanteesta.



KUVA 6. Rakeistuksen höyryjen purkautumista, kun piippujen luonnollinen veto häiriintyy

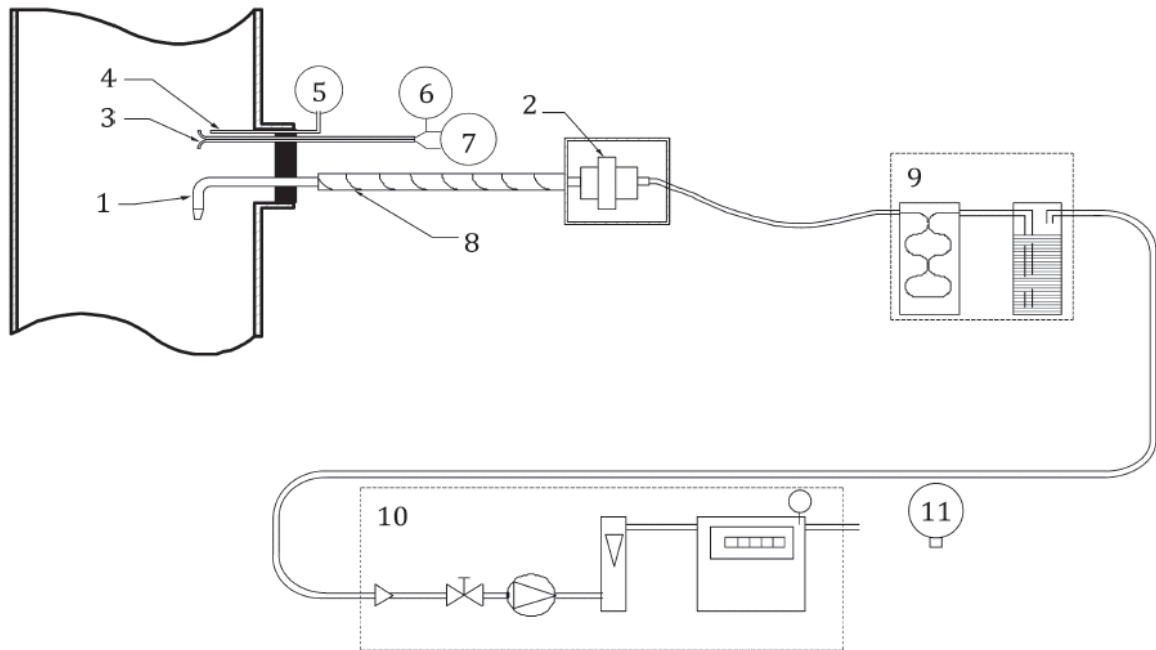
Käyttöönoton aikana ei ilmennyt suurempia ongelmia, vaikka se oli kokonaisuudessaan aikaa vievä projekti. Sulanlaskuja ei aina suoriteta ensimmäiseltä sulanlaskureiältä. Silloin laitteiston testaus ei ollut mahdollista. Tästä syystä aiheutui yleensä vuorokauden viivästyksiä. Lisäksi aikaa kului urakoitsijan korjauksiin ja ulkopuolisen mittajaan saamiseen tehtaalle.

8 RAKEISTUKSEN HIUKKASMITTAUKSET

Työn tavoitteena on vähentää kuonan rakeistuksessa syntyviä hiukkaspäästöjä, joiden määrä selvitetään mittauksien avulla. Pidemmällä aikajaksolla pesurin tehokkuus, suuremmille partikkeleille, selviää esimerkiksi rakennuksen katolle kertyvän kuonan määrästä. Tässä työssä keskitytään ainoastaan hiukkasemissiolla suoritettavaan päästömittaukseen.

Kuonan rakeistuksen ensimmäiset hiukkaspäästömittaukset suoritettiin 26.10., 2.–3.11. ja 23.11.2017. Ulkopuolinen yritys suoritti mittaukset, tulosten verrattavuuden ja luotettavuuden varmistamiseksi. Ensimmäisten mittauksien tuloksien jälkeen, päädyttiin suorittamaan lisämittaukset. Lisämittaukset suoritettiin 19.4.–20.4.2018. Jokaisella mittauskeralla prosessin tila oli normaali ja näytteenotto toteutettiin samalla tavalla. Kolmesta erillisestä piipusta kerättiin oma näyte samanaikaisesti. Jokaiseen näytteeseen kerättiin kahden sulanlaskun hiukkaset. Jokainen keräysjakso kesti 10–20 minuuttia.

Hiukkaspäästömittaukseen kuuluu neljä mittausmenetelmää, joita ovat kaasun virtausnopeus, kosteus, lämpötila ja hiukkasemissio. Kaasun virtausnopeuden avulla saadaan matemaattisesti määritettyä kaasun tilavuusvirta. Virtausnopeus määritetään dynaamisen paineen avulla, mikä mitataan S-tyyppin pitot-putkella ja mikromanometrillä. Lämpötila mitataan K-tyyppin termoelementillä. Hiukkasemissiossa partikkelit absorboidaan tislattuun veteen, joka myöhemmin laboratoriossa haihdutetaan pois. (18, s. 3.) Hiukkasmittaukseen käytetään EMES-mittauslaitetta, jonka periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 7.



Key

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 entry nozzle | 7 dynamic pressure measurement |
| 2 filter housing | 8 suction tube (out-stack device) |
| 3 pitot tube | 9 cooling and drying system |
| 4 temperature sensor | 10 suction unit and gas metering device |
| 5 temperature indicator | 11 pressure gauge |
| 6 static pressure measurement | |

KUVA 7. Manuaalisen päästömittauslaitteiston periaatekuva (19, s. 14)

Kaikki mittaukset suoritettiin samoilla menetelmillä, minkä vuoksi ne ovat vertailukelpoisia keskenään. Mittauksia ei voida suorittaa standardin SFS-EN 13284-1 mukaisesti, koska rakeistuksen piipuissa virtaavan kaasun ominaisuudet eivät täytä sille asetettuja kriteereitä. Esimerkiksi näytteenoton isokineettisyysuhde täyttää sille asetetut vaatimukset vain seitsemässä näytteessä 24 näytteestä. Tämän vaikutuksen arvioidaan olevan vähäistä näytteiden lopputuloksissa. (18, s. 4.)

Päästömittauksien tuloksissa on huomioitu epävarmuustekijät, jotka muodostuvat mittalaitteiston, mittamenetelmien ja mittaustapahtuman epätarkkuuksista ja vaihteluista. Mittausraportissa epävarmuudet ovat laskettu FINAS s 12/1992 sekä ISO GUM 1995 antamien suositusten mukaisesti. (18, s. 4–5.) Näytteiden välistä yhteneväisyyttä on erittäin hankalaa arvioida, koska jokainen sulanlasku on erilainen ja rakeistettavan kuonan

määrä ja sen virtausnopeus vaihtelevat suuresti. Lisäksi sään vaikutukset voivat olla merkittävät. Lämpötilan vaihtelu vaikuttaa savukaasun tilavuusvirtaan. Lämpötilaerot ovat mittauskertojen välillä kymmeniä asteita. Tuulen suunta ja voimakkuus vaikuttavat savukaasun virtausnopeuteen, nestepisaroiden käyttäytymiseen ja tuulen mukana kulkeutuvien hiukkaspartikkelin määrään. Esimerkiksi 23.päivä marraskuuta suoritetuissa mittauksissa sää oli erittäin myrskyinen. Tuulen voimakkuus oli erittäin kova, lisäksi satoi lunta ja lämpötila oli useita miinusasteita. Kyseisellä mittauskerralla, savukaasun virtausnopeuksien maksimi ja minimi eivät täytyneet.

Pesurikokeiden tuloksia voitaisiin verrata vuoden 2017 hiukkaspäästömittauksiin. Kuitenkin tästä päätettiin luopua, koska prosessin tila ei ollut silloin normaali ja rakeistetun kuonan koostumus oli poikkeava.

8.1 Mittaustulokset

Ensimmäisten pesurikokeiden hiukkaspitoisuus on keskimäärin $446 \text{ mg/m}^3\text{n}$ eli päästöjä syntyy keskimäärin 81 kg/h . Vastaavasti toisella mittauskerralla hiukkaspitoisuus pesuria käyttäessä on keskimäärin $100 \text{ mg/m}^3\text{n}$. Kun pesuri ei ole käynnissä, määrä on $35 \text{ mg/m}^3\text{n}$. Toisella mittauskerralla päästöjä syntyy pesuria käytettäessä 31 kg/h ja ilman pesuria 13 kg/h . Kaikkien piippujen keskiarvotuloksista havaitaan, että hiukkaspesuri kasvattaa päästöjä ja pitoisuuksia. Lisäksi tuloksissa on merkittävän paljon hajontaa.

Tutkittaessa kaasun kosteusprosenttia, nähdään pesurin lisäävän kosteutta 20–30 %. Tästä päätellen pesurin nestepisarot kulkeutuvat savukaasun mukana näytteenkeräykseen. Isokineettisyysuhteella on kyseisessä tilanteessa suuri merkitys, koska liian suuri imu näytteenkeräyksessä imee enemmän pisaroita ja epäpuhtauksia. Korkea vesimäärä lauhdepulloissa osoitti nestepisaroiden kulkeutumisen näytteenkeräykseen, mikä havainnoitiin jo mittauksien aikana.

Hiukkaspesurin käyttö kasvattaa virtausnopeutta $1\text{--}2 \text{ m/s}$, tilanteen ajateltiin olevan päinvastainen. Vastaavasti laskennallinen, kuiva tilavuusvirta, pienenee pesurin päällä ollessa. Pesurin kanssa tilavuusvirran keskiarvo on ensimmäisissä testeissä $235\,770 \text{ m}^3\text{n/h}$ ja toisella kerralla $284\,680 \text{ m}^3\text{n/h}$. Ilman pesuria tilavuusvirran keskiarvo on $294\,710 \text{ m}^3\text{n/h}$.

Tutkittaessa piippujen välisiä eroavaisuuksia hiukkaspitoisuuksien ja päästöjen osalta, huomataan piipun 3 päästävän vähiten päästöjä ja piipun 2 eniten. Piippujen välillä päästöt jakautuvat taulukon 3 mukaisesti.

TAULUKKO 3. Hiukkaspitoisuuksien ja päästöjen jakautuminen rakeistuksen piipuissa

			Piippu 1	Piippu 2	Piippu 3
Ensimmäinen mittaus	Hiukkaspitoisuus (mg/m ³ n)		445	789	103
	Päästö (kg/h)		100,6	124,7	33
Toinen mitaus	Hiukkaspitoisuus (mg/m ³ n)	Pesuri	115	122	63
		Ilman pesuria	41	26	19
	Päästö (kg/h)	Pesuri	32,9	40,7	20,1
		Ilman pesuria	12,2	12,1	7

Syy suurimmille päästöille piipussa kaksi, epäillään johtuvan piipun ja kuonan rakeistus-suihkun asemasta. Rakeistussuihku osuu seinää, jonka yläpuolella on piippu kaksi. Suihkun törmätessä seinään muodostuu enemmän pisaroita ja kiintoaineita, mitkä päätyvät suoraan piippuun. Tuloksista voidaan huomata, että piippujen välillä on suurta eroavaisuutta. Toisella mittauskerralla tilanne on samankaltainen. Ensimmäisen ja toisen mitauskertojen väliset eroavaisuudet pysyvät lähestulkoon ennallaan, joten mittaus-tuloksista ei ole syytä epäillä virheitä.

Mittausten lopputuloksien perusteella työlle asetettua tavoitetta ei saavutettu, koska hiukkaspitoisuudet ja päästöt kasvoivat. Tästä syystä todettiin, ettei hiukkaspesuria voi ottaa käyttöön nykyisellä toimintatavalla. Mittauskohde on mittausteknisesti hyvin haastava, minkä vuoksi mittaus-tuloksia kannattaa tarkastella kriittisesti. Piipuissa savukaasun virtaus ei ole vakio, minkä vuoksi mittalaitteisto ei välttämättä toimi kuten sen pitäisi. Esimerkiksi suurimmassa osassa mittauksissa isokineettisyys-suhde ei täyty.

8.2 Rakeistusveden analyysi

Mittaustuloksien vuoksi päätettiin kuonan rakeistusvedelle tehdä tutkimuksia. Tutkimuksissa selvitettiin rakeistusveden sisältämät suolat ja kiintoainemäärät. Rakeistusvedelle tehtiin haihdutuskokeet, joiden lopputuloksena vedestä löydettiin noin 1 g/l liuenneita epäpuhtauksia. Tutkimukset tehtiin Outokummun tutkimuskeskuksen laboratoriossa.

Rakeistusveden analyysien pohjalta olisi seuraavaan testiin syytä vaihtaa jokin toinen vesi. Esimerkiksi raakavesi, jonka haihdutuskokeen lopputulos on noin 0,08 g/l. Ongelmaksi saattaa muodostua riittävän paineen muodostuminen.

9 POHDINTA

Opinnäytetyön ensisijainen tarkoitus oli käyttöönottaa kuonan rakeistuksen hiukkaspesuri, jonka toimivuus todennettiin hiukkaspäästömittauksilla. Mittausten lopputuloksena hiukkaspitoisuus kasvoi noin seitsemänkertaiseksi ja päästöt noin viisinkertaisiksi. Tästä syystä työlle asetettua tavoitetta ei saavutettu. Hiukkaspäästöjen nousun seurauksena laitteistoa ei otettu käyttöön opinnäytetyön aikana. Päästöjen lisääntymiselle löydettiin juurisyy, joka on rakeistaveden sisältämät epäpuhtaudet eli kiintoaineet ja suolat. Nestepisarat kulkeutuivat savukaasun mukana näytteenkeräykseen, mikä lisää rakeistusveden vaikutusta hiukkasnäytteissä. Hiukkaspesurin käyttöönotto on tulevaisuudessa mahdollista, kun käytetään puhtaampaa vettä.

Toisena tavoitteena oli löytää oikeanlaiset säädöt hiukkaspesurille, ettei se vaikuta kuonan rakeistukseen tai savukaasun virtauksiin. Käyttöönoton aikana huomattiin, ettei laitteisto aiheuta kuonan rakeistuksen vesisuihkulle merkittäviä muutoksia. Rakeistuspumppu pystyi tuottamaan riittävän tilavuusvirran ja paineen, kun hiukkaspesuri toimii maksimivirtauksella. Tältä osin laitteiston käyttöönotto on onnistunut

Laitteiston ohjaamista varten ei rakennettu automaatiota, koska koekäyttöjen aikana nähtiin se tarpeettomaksi. Kuonan rakeistus käynnistyy, kun operaattori käynnistää rakeistuspumppun ohjausnäytöltä. Laitteiston venttiilejä ei tarvitse säätää jatkuvasti. Hiukkaspesurin juuriventtiiliä ei tarvitse sulkea käyttökertojen välillä. Kaikki venttiilit on parempi olla auki-asennossa. Näin estetään veden jäätyminen putkistossa.

Tulevaisuudessa hiukkaspesurilla pitää tehdä enemmän testauksia, että laitteiston toimivuus saadaan varmistettua. Ensimmäinen testaus on helpointa suorittaa puhtaammalla vedellä. Testausta varten tarvitaan uudelle vesilinjalle yhde. Tämän jälkeen pesurille voitaisiin asentaa erikokoisia suuttimia, jolloin pesuri muodostaisi erikokoisia pisaroita. Toisena vaihtoehtona on rakentaa rakeistusaltaan kulkuaukolle piippujen vetoa rajoittavia sermejä, minkä jälkeen suoritettaisiin uudet hiukkasmittaukset pesurin kanssa ja ilman pesuria. Kaksi ensimmäistä testausideaa on kohtalaisen helppo toteuttaa, eivätkä ne vaadi suuria investointeja.

Rakeistuksessa ja hiukkapesurissa voitaisiin kokeilla myös suurempia muutoksia. Ensimmäinen kehitysvaihtoehto on rakentaa piippuihin pisaraerottimet, jotka poistavat savukaasussa olevia nestepisaroita ja rajoittaisi piippujen vetoa. Tulevaisuudessa pisaraerotinta voitaisiin hyödyntää lämmöntalteenotossa. Toisena vaihtoehtona voitaisiin rakeistusallasta syventää ja suurentaa, minkä jälkeen rakeistuksen vesisuihku osuisi suurimmaksi osaksi veteen. Tällä tavalla vesisuihkun aiheuttamia nestepisaroita ja epäpuhtauksia saataisiin mahdollisesti vähennettyä. Näiden muutoksien lisäksi rakeistussuuttimen asentoa muuttamalla saataisiin vesisuihku osumaan paremmin altaaseen. Useat Chromen operaattoreista antoivat idean altaan ja rakeistussuuttimen muutoksille. Kolmantena kehitysideana voitaisiin rakeistuksen piippuihin rakentaa kavennus, jolloin piipuista saataisiin venturipesurin tyyppisiä. Venturipesurin tehokkuus on korkeampi kuin märkäpesurin.

Kuonan rakeistukselle ja hiukkapesurille tehtävien muutoksien lisäksi on syytä miettiä vaihtoehtoisia hiukkaspäästömittausmenetelmiä. Nykyisellä testauksella tulokset ovat erittäin riippuvaisia kaasuvirran käyttäytymisestä. Lisäksi tuloksissa näkyvät vain pienet hiukkaset, joiden massa kattaa vain murto-osan päästöistä. Nykyaikaisia kuvantamismenetelmiä voitaisiin hyödyntää mittauksessa. Silloin kaasun käyttäytymisellä tai partikkelien koolla ei ole niin suurta merkitystä.

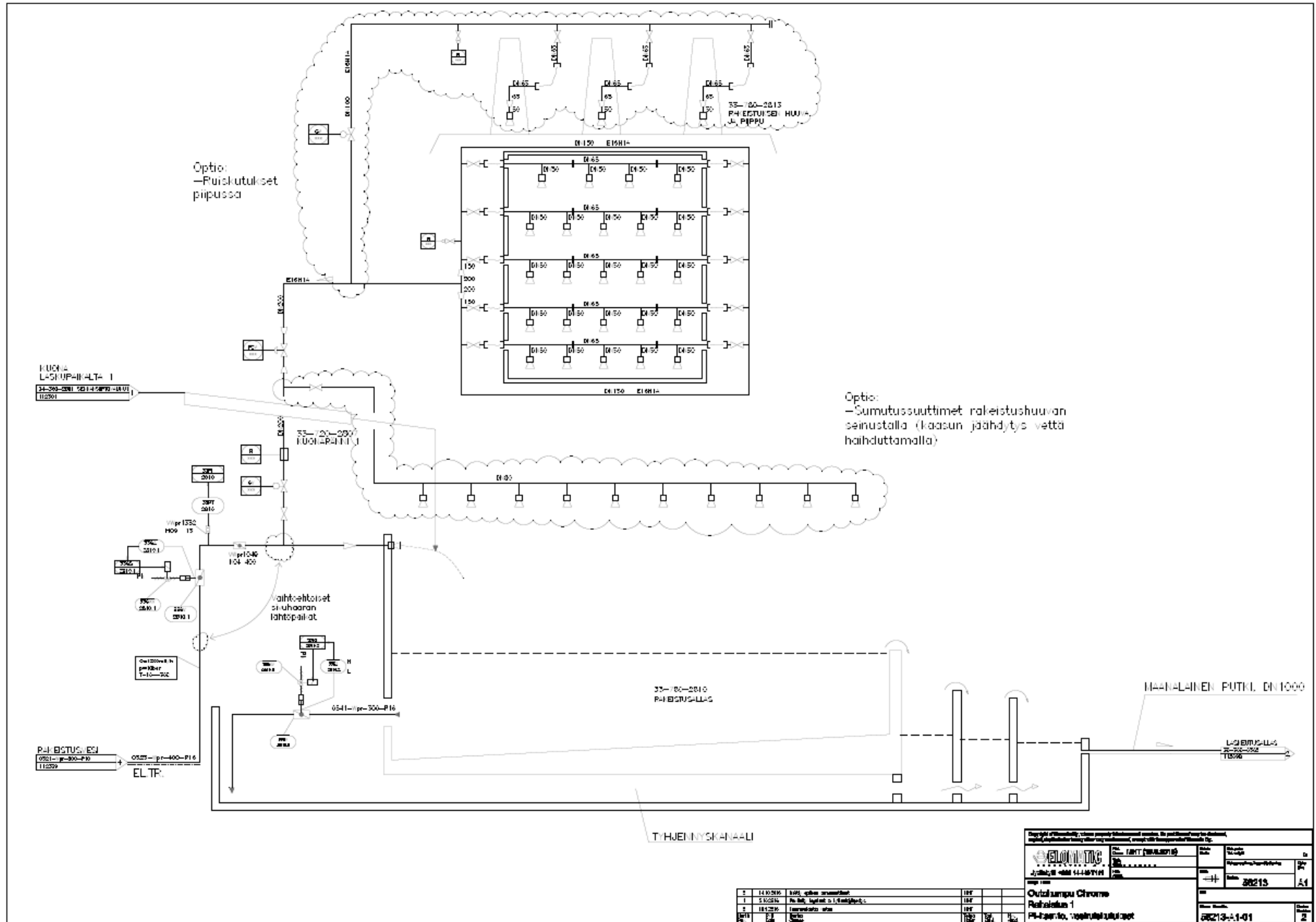
Käyttöönoton työosuus pysyi jotakuinkin aikataulussa, aikaa kuluttavista haasteista huolimatta. Suurimmat ongelmat olivat laitteiston korjaukset ja mittaajien saaminen kohteeseen. Työn kirjallista osuutta ei tehty projektimaisesti eikä säännöllisesti, joten se ei valmistunut tavoiteajassa.

Työ oli erittäin haasteellinen, koska aikaisempaa tietoa aiheesta ei ollut. Tästä syystä tietoa oli käsiteltävä paljon, minkä jälkeen hyödyllisen tiedon rajaaminen tuotti hankaluutta. Kaiken kaikkiaan työ oli erittäin opettavainen ja näin ollen valmiudet työskennellä pölynpoistolaitteistojen tai hiukkasmittausten parissa ovat huomattavasti kehittyneet.

LÄHTEET

1. Bedinger, George M. – Corathers, Lisa A. – Kuck, Peter H. – Papp, John F. – Polyak, Désirée E. – Schnebele, Emily K. – Shedd, Kim B. – Tuck, Christopher A. 2016. 2014 Minerals yearbook ferroalloys. U.S. Department of the Interior. Saatavissa: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/ferroalloys/myb1-2014-feall.pdf>. Hakupäivä 10.8.2018.
2. Reikkola-Vanhanen, Marja 1999. Finnish expert report on best available techniques in ferrochromium production. Helsinki: Finnish environment institute.
3. Tervetuloa Ferrokromitehtaalle 2017. Esite. Outokumpu Ferrochrome Oyj, Tornion tehtaat.
4. Tornion tehtaat ja Kemin kaivos 2017 2017. PowerPoint-diasarja. Outokumpu Oyj.
5. Savolainen, Ilkka – Syri, Sanna – Vuori, Seppo 2004. Energia Suomessa: Energia ja ympäristö. Helsinki: VTT Prosessit.
6. Keiski, Riitta – Koskenkari, Tuomo – Heino, Jyrki 2002. 480002A Ympäristötekniikan peruskurssi. Oulu: Oulun Yliopisto.
7. Hämälä, Sirpa – Laine, Jouko – Vesa, Paula 1992. Ilmansuojelutekniikka. Jyväskylä: Tammertekniikka.
8. Tulonen, Miikka 2016. Outokumpu Chrome Oy Kuonan laskupaikkojen kehitys, hiukaspäästöjen rajoittaminen märkäpesurilla, alustavat mitoituslaskelmat ja pesurikonseptin luonnostelu. Raportti. Elomatic Oy.
9. Korpela, Timo – Leinonen, Anna-Liisa – Leskelä, Jukka – Lyyra, Tommi – Raiko, Markku – Puttonen, Jari 2001. Finnish expert report on best available techniques in large combustion plants. Helsinki: Finnish environment institute.
10. Plyem, Harald 1991. Ympäristötekniikka. Jyväskylä: Tammertekniikka.

11. Kulma, Ilpo – Heinonen, Kimmo – Riipinen, Hannu – Säämänen. Arto – Wellin, Irma 2004. Poistoilman puhdistus. VTT Oy. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/kpl_6_6.htm. Hakupäivä 1.9.2018.
12. Venturi Scrubber System. Maestro Engineers. Saatavissa: <http://www.maestroengineers.com/venturi-scrubber-system.htm>. Hakupäivä 17.8.2018.
13. SGN tekniikka. Saatavissa: <http://www.sgntekniikka.fi>. Hakupäivä 11.12.2018.
14. Suutin tärkeä osa prosessia. SGN Tekniikka Oy. Saatavissa: http://www.sgntekniikka.fi/wp-content/uploads/2015/03/Suutin_tarkea_osa_prosessia.pdf Hakupäivä: 23.4.2018.
15. A guide to spray technology for dust control. Spraying Systems Co. 2008. Saatavissa: http://www.sgntekniikka.fi/wp-content/uploads/2015/03/b652_dust_control.pdf Hakupäivä: 20.10.2018.
16. Pölyn torjunta. SGN Tekniikka Oy Saatavissa: <http://www.sgntekniikka.fi/wp-content/uploads/2015/03/polyn-torjunta.pdf> Hakupäivä: 13.10.2018.
17. Tulonen, Miikka 2016. Outokumpu Chrome Oy VKU 3, rakeistus 1, ruiskutusjärjestelmän suunnittelun Yhteenveto. Raportti. Elomatic Oy
18. Pärjälä, Olli – Tammisto, Sari 2017. Outokumpu Chrome Oy Ferrokromitehdas, VKU 3, Kuonan rakeistus 1 (F3-20) Pesurikoe 2017. Raportti. Lahti: Ramboll Finland Oy.
19. SFS-EN 13284-1. 2017. Stationary source emissions. Determination of low range mass concentration of dust. Part 1: Manual gravimetric method. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
20. Mustikkamäki Harri – Nuutinen, Kati 2018. Outokumpu Chrome Oy Ferrokromitehdas, VKU 3, Kuonan rakeistus 1 (F3-20) Pesurikokeet 2018. Raportti. Lahti: Ramboll Finland Oy.
21. Tulonen, Miikka 2016. Outokumpu Chrome Rakeistus 1 PI-kaavio. Tekninen piirustus. Elomatic Oy.



		Projekti: HIUKKASPESURIN PI-KAAVIO Piirustuksen nimi: PI-KAAVIO Piirustuksen numero: 33215 Piirustuksen versio: A1
S: 14.05.2010 I: 15.05.2010 T: 16.05.2010 M: 17.05.2010	K: 1000, optio arvioinnin K: 1000, optio arvioinnin K: 1000, optio arvioinnin K: 1000, optio arvioinnin	L: 1000 L: 1000 L: 1000 L: 1000
Outoilupumppi Chrome Rakentelu 1 PI-KAAVIO, purkututukset		Piirustuksen nimi: 33215 Piirustuksen numero: A1 Piirustuksen versio: 2