

SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN ALA

SÄHKÖSUODATTIMEN TOIMINNAN OPTIMOINTI BIOTIITTIPROSESSISSA

TEKIJÄ Janne Komulainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Janne Komulainen	
Työn nimi Sähkösuodattimen toiminnan optimointi biotiittiprosessissa	
Päiväys	28.4.2025
	26/1
Yhteistyötaho Yara Suomi Oy Siilinjärven Kiilletehdas	
<p>Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Yara Suomi Oy ja työn kohteena on Siilinjärven Kiilletehdas, jonka yhteydessä toimii myös biotiitin tuotanto. Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää biotiittiprosessin yhteydessä olevan sähkösuodattimen toiminnan optimoinnin mahdollisuutta sekä suorittaa koe nostamalla tuotantomäärää. Koe kertoi sähkösuodattimen toiminnan poistokaasujen suhteen suuntaa antavasti.</p> <p>Opinnäytetyö aloitettiin perehtymällä toimeksiantajan perustietoihin ja biotiitin valmistusprosessiin käytössä olevaan Ion Blast-sähkösuodattimeen. Toimintaan ja rakenteeseen perehtyminen auttoi ymmärtämään, kuinka sähkösuodatin toimii poistokaasujen yhteydessä ja antoi hyvän tiedot optimoinnin tutkimiseen. Opinnäytetyössä sähkösuodattimen optimoinnissa hyödynnettiin lisäksi pohjatietoa, joka oli tullut työskentelystä biotiitin tuotantoprosessista Kiilletehtaalla sekä lisäksi oppimalla saaduista tiedoista energiatekniikan insinöörikoulutuksesta. Asioista saatu kokonaisuuden ymmärtäminen auttoi opinnäytetyön tekemistä ja syvensi ammattiosaamista prosessioperaattorin työhön</p> <p>Opinnäytetyö tuotti tuloksen, joka toimii osana pohjatietoa biotiittiprosessin tulevaisuutta miettiessä työn toimeksiantajalle sähkösuodattimen toiminnan optimoinnissa poistokaasujen suhteen. Lisäksi tutkiminen antoi mahdollisia kehitysideoita, joilla olisi mahdollista parantaa tuotantoprosessin energiatehokkuutta.</p>	
Avainsanat Ion Blast-sähkösuodatin, biotiittiprosessi, optimointi, energiatehokkuus	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	6
2	YRITYSESITTELY	7
2.1	Yara Suomi Oy historiaa	8
3	KIILLETEHDAS SIILINJÄRVI.....	9
4	BIOTIITIN TUOTANTO	10
4.1	Biotiitti.....	11
5	SÄHKÖSUODATIN	13
5.1	Sähkösuodattimen toimintaperiaate	13
6	ION BLAST- SÄHKÖSUODATIN.....	15
7	ION BLAST- BIOTIITTITUOTANNON LAITTEISTO	18
8	SÄHKÖSUODATTIMEN OPTIMOINNIN LÄHTÖARVOT	20
8.1	Sähkösuodattimen toimintaan vaikuttavat tekijät.....	20
8.2	Optimointiin käytettävä menetelmä	21
9	TULOKSET SÄHKÖSUODATTIMEN TOIMINNASSA OPTIMOINNISSA.....	22
10	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	23
11	POHDINTA.....	24
	LÄHTEET	25
	LIITE 1: SALATTU	26

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kuvaleike Yara Suomi Oy:n verkkosivulta Siilinjärven tehdas (Yara Suomi 2025d).....	7
Kuva 2. Kuvaleike LKAB Mineralsin verkkosivulta Phlogopite Mineral MicaFort (LKAB Minerals Oy 2025).....	9
Kuva 3. Biotiitin rumpukuivain (Komulainen 2025a)	10
Kuva 4. Kuvaleike Yara Suomi Oy:n verkkosivulta Yaran Biotiittinäyte (Yara Suomi Oy 2025a).....	11
Kuva 5. Kuvaleike Oamk Journalin verkkosivulta: ”Biotiitti on erinomainen maanparannusaine kaliumköyhille pohjoisen maille. Levitys onnistuu esimerkiksi kalkkivaunulla.” (Suomela 2023.)	12
Kuva 6. Kuvaleike EPA verkkosivulta Sähkösuodattimen toimintaperiaate (Parker 2004)	14
Kuva 7. Ion Blast- sähkösuodattimen rakenne (Komulainen 2025c)	15
Kuva 8. Ion Blast- toiminnan periaatekuva (Ion Blast Oy 2001c).....	16
Kuva 9. Ion Blast- sähkösuodatin sisältä (Komulainen 2025d).....	17
Kuva 10. Ion Blast PI-kuva (Ion Blast Oy 2001a).....	18
Kuva 11. Ion Blast- sähkösuodatin Kiilletehdas (Komulainen 2025b).....	19

KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT.

EMISSIOELEKTRODI: Toimii elektrodien lähteenä, joka ionisoi kaasuvirrassa olevat hiukkaset keräämistä varten sähkösuodattimessa.

EROTUSELEKTRODI: Varmistaa hiukkasten oikeanlaisen varauksen ja niiden liikkumisen tehokkaasti kohti keräyslevyjä sähkösuodattimessa.

IONITUULI: Ionisointuneet hiukkaset liikkuvat sähkö tai magneettikentän vaikutuksesta ja voi tapahtua esimerkiksi ionisoituneen kaasun sisällä.

IONIPUHALLUS: Prosessi, jota käytetään ionisoidun kaasun tai ilman puhdistamiseen.

KORONAPURKAUS: Käyttökieleessä korona tarkoittaa sitä, että sähköjohtimen jännite tuottaa voimakkaan sähkökentän ja ylittää ympäröivän kaasun läpilyöntilujuuden. Kaasu ei enää toimi eristimenä vaan se on ionisoitunut ja alkaa johtamaan sähköä

LÄPILYÖNTI LUJUUS: Viralliselta nimeltään Dielektrinen lujuus on materiaalissa oleva sähköinen ominaisuus, josta saadaan selville, kuinka suuri jännite on oltava, jotta kappaleessa tulee läpilyönti

MIGRAATIO: Mekanismi, joka vaikuttaa sähkösuotimen tehokkuuteen ja kykyyn poistaa epäpuhtauksia tai hallita sähköisiä häiriöitä.

kV: Kilovoltti. Jännitteen yksikkö.

A: Ampeeri. Virran yksikkö.

mA: Milliampeeri. Sähkövirtayksikkö.

U: Jännite. Sähköjännite yksikkö.

L/h: Litraa tunnissa. Tilavuusvirran yksikkö.

°C: Celsiusaste. Lämpötila asteikko.

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on sähkösuodattimen toiminnan optimointi biotiittiprosessissa. Opinnäytetyön tekemiseen on avautunut monipuolisia näkökulmia energiatekniikan insinöörin opinnoista sekä työskentelystä samanaikaisesti prosessioperaattorina. Opinnäytetyön tilaajana toimii Yara Suomi Oy. Opinnäytetyö toteutetaan Siilinjärvellä sijaitsevalle Kiilletehtaalle, joka tuottaa biotiittia. Työn tarkoituksena on tuoda lisää tietoa biotiittiprosessissa sijaitsevan Ion Blast- sähkösuodattimen optimointimahdollisuudesta poistokaasujen suhteen sekä mahdollisista kehitysideoista.

Opinnäytetyön ohjaajana ja yhteyshenkilönä toimii Kiilletehtaalla työskentelevä prosessi-insinööri Ari Juntunen. Opinnäytetyön tekijän esihenkilönä hänellä vankka kokemus biotiittiprosessista. Opinnäytetyön aihe lähti muotoutumaan Yara Suomi Oy:n tarpeesta tutkia biotiittiprosessin poistokaasujen suodatuksen käytettävää sähkösuodattimen toimintaa. Aihetta ei ole aikaisemmin tutkittu, joten tarve koettiin todelliseksi toimeksiantajan puolelta. Tästä avautui oiva mahdollisuus opinnäytetyön tekemiseen.

Opinnäytetyö tulee lisäämään sekä opinnäytetyöntekijän ammatillista osaamista että tietopohjaa biotiittiprosessista Yara Suomi Oy:lle tulevaisuutta ajatellen. Tässä opinnäytetyössä sähkösuodattimen optimoinnilla tarkoitetaan sen kapasiteettia toimia tuotannonprosessin yhteydessä, mahdollisesti parantaa sen toimintaa sekä löytää uusia näkökulmia aiheeseen.

Biotiittiprosessissa kuivatuksesta tulee erilaisia märkeä poistokaasuja, jonka suodattamiseen käytetään Ion Blast Oy:n valmistamaa sähkösuodatinta. Rakentaminen on toteutettu vuonna 2001 Siilinjärven Kiilletehtaan toimipisteeseen, jossa biotiitin tuotanto sijaitsee. Opinnäytetyön tavoite on käytännössä tutkia nykyisen sähkösuodattimen optimointia. Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää sähkösuodattimen toimintaa, kun biotiittiprosessin tuotantomäärää nostetaan. Samalla arvioidaan mahdollista sähkösuodattimen hyödyn parantamista esimerkiksi lämmöntalteenottoa arvioitaessa.

Tutkimuksessa karttuneen tiedon määrää on tarkoitus jakaa ja hyödyntää myös operaattoreiden päivittäisissä työtehtävissä biotiittiprosessissa.

2 YRITYSESITTELY

Yara Suomi Oy:llä Suomessa toimii neljä tuotantolaitosta. Uudessa kaupungissa, Kokkolassa, Nokialla ja Siilinjärvellä. Siilinjärvellä sijaitsee kemiantehdas ja kaivos. Kemiantehdalla on neljä erituotantolaitosta samalla alueella: lannoitetehtas, fosforihappotehtas, typpihappotehtas ja rikkihappotehtas. (Yara Suomi Oy 2025e.)

Kaivoksella päätuote on apatiittirikaste. Sitä hyödynnetään raaka-aineina fosforihapon, rikkihapon ja typpihaposta tehtävien tuotteiden valmistuksessa esimerkkinä lannoitteet, joiden käyttäjien asiakas-kuntana toimii maatalous ja rehuteollisuus. Ammoniumnitraattiliuos on louhosräjähteen raaka-aine, joka on tehtailla yksi monista siellä jalostettavista tuotteista. Tuotteita toimitetaan ympäri maailmaa myyntiin. Toimipiste jakautuu kahteen eri osaan eli tehtaiden puoleen (kuva 1) sekä kaivokseen. Yaran Siilinjärven kaivos on ainoa laatuaan EU-alueella oleva fosfaattikaivos. Kaivoksen mineraali-esiintymä on iältään 2600 miljoonaa vuotta vanha, joka onkin maailman vanhimpia karbonaattiesiintymiä. Päätuotteiden tuotannossa tulee sivuvirtoja, joita hyödynnetään monipuolisesti. Esimerkkinä biotiitti ja kalsiitti maanparannusaineena, joita maatalous voi hyödyntää viljelynäpuna. (Yara Suomi Oy 2025e.)



Kuva 1. Kuvaleike Yara Suomi Oy:n verkkosivulta Siilinjärven tehdas (Yara Suomi 2025d)

2.1 Yara Suomi Oy historiaa

Yara Suomi Oy:n historia alkaa 1920-luvulle. Valtion Rikkihappo- ja Superfosfaattitehtaat perustettiin auttamaan ja parantamaan Suomen köyhää maaperää. Vuonna 1961 tehdas sai uuden ja lyhyemmän nimen Rikkihappo Oy ja reilun kymmenen vuoden kuluessa vuonna 1972 nimeksi tuli tutumpi Kemira Oy. 80 vuoden aikana Kemira Oy:n toiminta on laajentunut lannoitteiden ja rikkihapon tuotannosta lukuisiin erilaisiin teollisuuskemikaaleihin. (Yara Suomi Oy 2025b.)

Kansainvälistyminen Kemiralla alkoi 1960-luvun loppupuolella lannoiteviennillä eri ulkomaan kohteisiin. Tärkeimpänä olivat Euroopan maat. 1980-luvulla toiminta sai uudet mittasuhteet ja aloitti virallisesti globaalin toiminnan. Kemiran ulkomaiset yritysostot alkoivat ostamalla lannoitteen valmistukseen käytettäviä tuotantolaitoksia Iso-Britanniasta, Alankomaista, Belgiasta, Ranskasta ja Tanskasta. Tämän vuoksi oli järkevä perustaa myyntikonttoreita ulkomaille viennin mahdollisuuksien noustessa. Suomen heikkona talouden aikaan perustetusta lannoitetehtaasta oli kehityksen ansiosta tullut tärkeä ja suuri globaali vientiyritys. (Yara Suomi Oy 2025b.)

Kemira-konserni sai uuden liiketoimintarakenteen, kun 1990-luvulla uudistus yhtiöitti liiketoimintayksikön. Kemiran osakkeiden listaus 1994 Helsingin Pörssiin jatkoi muutosten aikaa. Kemira Agro nimi tuli lannoiteliiketoiminnalle jo 1970-luvun loppuessa, kun yritys erotti lannoite- ja kemianteollisuuden erilleen. (Yara Suomi Oy 2025b.)

1990-luvun aikana Kemira Agro laajeni Baltiaan, Puolaan sekä Unkariin yritysostojen myötä. Samoin toimittiin myös Lähi-idän ja Aasian markkinoilla. Markkina-aseman vahvistaminen sekä sen rakentaminen tuli ajankohtaiseksi uusille markkinoille. Kemira Agro Oy vuonna 2004 irtautui Kemira Oyj:stä ja nimi muuttui Kemira GrowHow:ksi. Samalla tuli ajankohtaiseksi listautua Helsingin pörssiin. Vuonna 2007 Suomen valtio myi osuutensa Kemira GrowHow:sta Yara International ASA:n tytäryhtiöksi, jonka kotipaikka sijaitsee Norjassa. (Yara Suomi Oy 2025b.)

Yara-konsernin juuret saivat alkunsa vuonna 1905, kun yhtiökumppanit Sam Eyde ja Kristian Birke-land perustivat Norjaan yrityksen, joka tunnettiin nimellä Norsk Hydro. Vesivoimavarojen hyödyntäminen auttoi tuottamaan kivennäislannoitteita vesivoiman saatavan sähkön turvin, jota teollisuus tarvitsi. Norsk Hydro oli ensimmäinen maailmassa, joka kehitti prosessimenetelmän, jonka avulla saatiin sidottua typpeä ilmasta ja hyödyntämällä sen lannoiteteollisuuteen. (Yara Suomi Oy 2025b.)

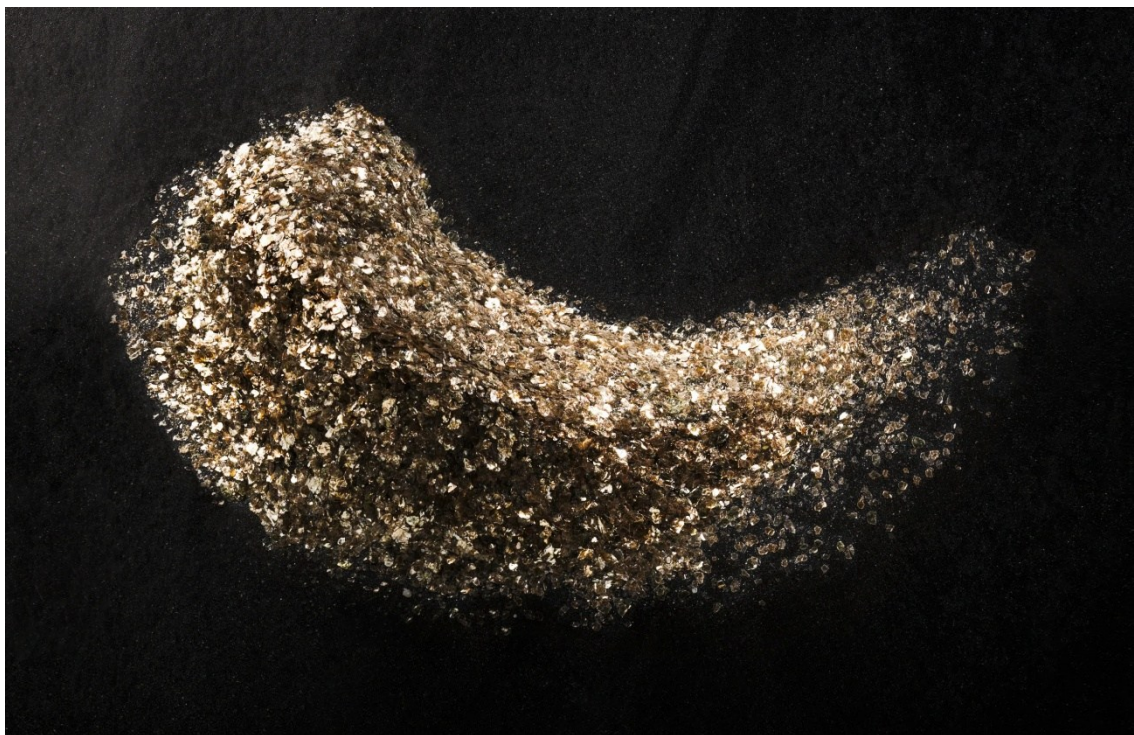
Yaran pitkä historia on tuonut hyvät perusteet toimia tänäkin päivänä, kun edelleen yritys kehittää uusia ratkaisuja maataloudelle ja ympäristösuojeluun. Sekä olemalla myös kasvisravitsemuksen edellä kävijänä. Yara Suomi Oy:n tavoite suomessa on tuottaa puhdasta ruokaa kannattavasti ja kestävästi. (Yara Suomi Oy 2025b.)

3 KIILLETEHDAS SIILINJÄRVI

Yaran Siilinjärven toimipisteellä sijaitsee vuodesta 1985 lähtien toiminut Kiilletehdas, joka päätuotteenaan jalostaa kiillettä. Tällä hetkellä Kiilletehtaan omistajana on ollut jo pitkään LKAB Minerals Oy, jonka alaisuudessa Kiilletehdas toimii. LKAB Minerals Oy omistaa kiilletehtaan käytettävät koneet ja laitteet sekä vastaa yrityksen kiilletehtaan toiminnasta. Kiilletehtaan tuotannon toimitilat on vuokrattu Yara Suomi Oy:ltä. (Juntunen 2025b, 1.)

Kiille on tuote, jota saadaan apatiittirikasteen sivutuotteena jalostettavaksi Kiilletehtaalla. Siilinjärven apatiittimalmi sisältää runsaasti kiillemineraaleja. Rikastamosta saatava raakakiille saadaan erotettua apatiitin tulleesta vaahdotuksen jäännöslietteestä painovoimaa ja seulontaa hyödyntämällä. Rikastamolta tuleva tuote seulotaan ja jauhetaan kuiva- ja märkäjauhatusta hyväksi käyttäen oikeanlaiseen partikkelikokoon. Prosessin päättyessä tuloksena on puhdas flogopiittikiillettä sisältävä rikaste, joka kuivataan kevyttä polttoöljyä hyödyntävillä Flash-kuivureilla. Valmiit prosessissa tulleet kiillete tuotteet varastoidaan tehtaalla oleviin terässiiloihin pakkaamon käsiteltäväksi ja eteenpäin toimistusta asiakkaan tarpeen mukaan, joko irtotavarana tai pakattuna. (Juntunen 2025b, 1.)

Kiille on hyvä raaka-aine ja sen ominaisuuksien vuoksi sitä esimerkiksi käytetään muun muassa teknisissä muoveissa, rakennusmateriaaleissa sekä palolevyjen valmistuksessa (kuva 2). Kiilteen ominaisuutena on toimia hyvänä eristeenä sekä palosuojalevyinä parantaen sen palokestävyyttä. Rakennusteollisuuden käytössä kiilteen ominaisuudet parantavat mm. seinälevyjen murtolujuutta ja kestävyyttä. (Juntunen 2025b, 1.)



Kuva 2. Kuvaleike LKAB Mineralsin verkkosivulta Phlogopite Mineral MicaFort (LKAB Minerals Oy 2025)

4 BIOTIITIN TUOTANTO

Biotiitin tuotanto sijaitsee samoissa Kiilletehtaan tiloissa, jotka LKAB Minerals Oy on vuokrannut Yara Suomi Oy:ltä. Erona tässä on se, että tuotannonlaitteet omistaa Yara Suomi Oy. Prosessista vastaa kuitenkin sama tuotannon väki kuin Kiilteen prosessista, jota tuotetaan Kiilteen tehtaassa Siilinjärvellä. (Juntunen 2025a, 1.)

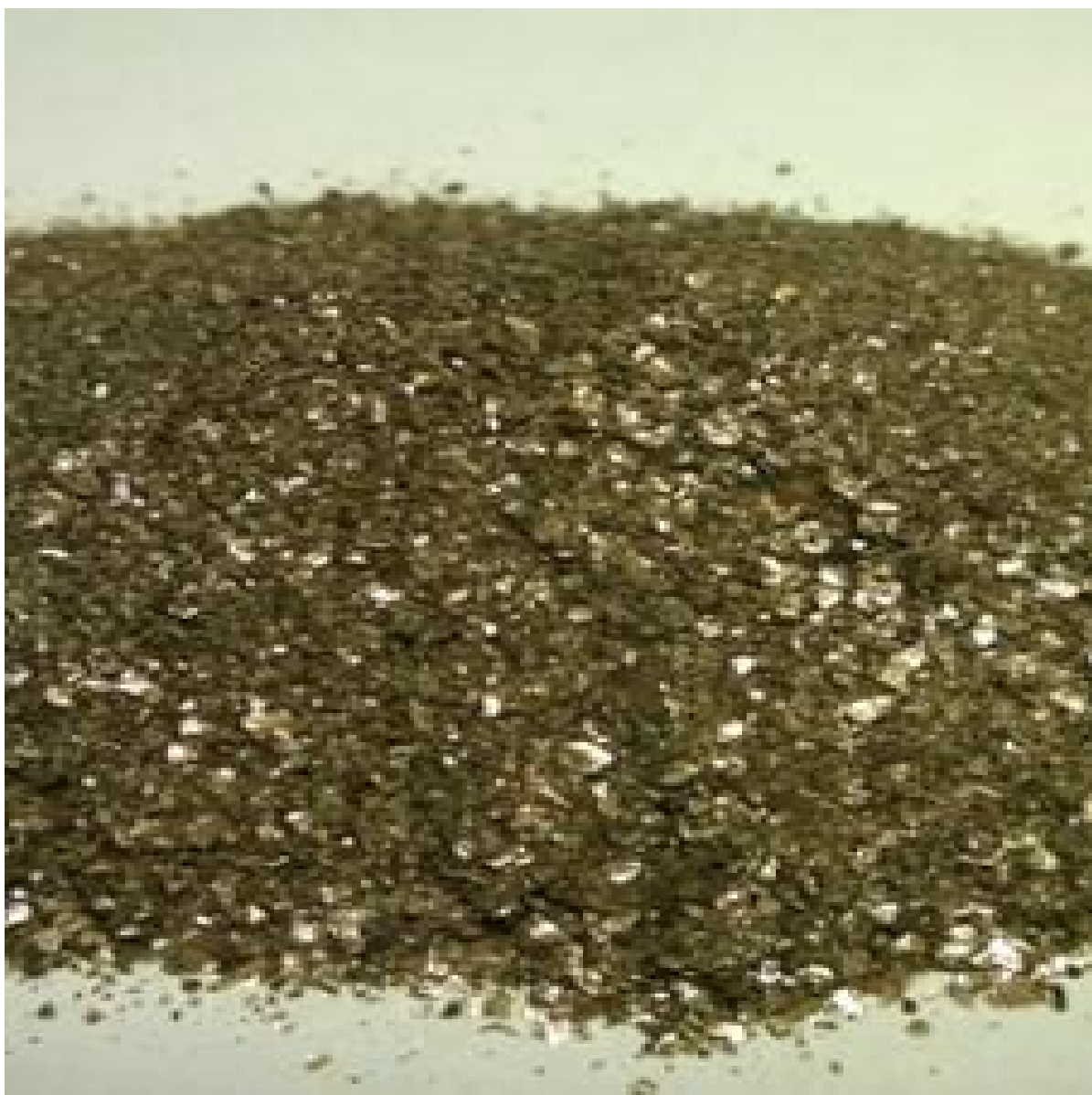
Biotiitti on tuote, jota saadaan apatiittirikasteen sivutuotteena jalostettavaksi Kiilletehtaalla biotiitin tuotantolinjalla. Rikastamosta tuleva raaka-aine on kiilteen tavoin pystyttävä erottelemaan apatiitin tulleesta vaahdotuksen jäännöslietteestä syklonien ja muiden prosessilaitteiden avulla. Tästä tuloksena on syntynyt flogopiittikiillettä sisältävä rikaste. Tuotantoprosessissa rikastetta kuivataan rumpusuodattimen ja kevyttä polttoöljyä käyttävän rumpukuivaimen (kuva 3) avulla oikeaan kosteuteen varastoitavaksi tehtaalla sijaitsevaan silloon, josta asiakkaalle toimitetaan biotiitti irtotavarana. (Juntunen 2025a, 1.)



Kuva 3. Biotiitin rumpukuivain (Komulainen 2025a)

4.1 Biotiitti

Yaran valmistama biotiitti sisältää (5 %) hitaasti liukenevaa kaliumia. Biotiitti on jauhemaiseen muotoon tuotettuna hyvä vaihtoehtona kalium-, magnesium- ja kalsiumpohjaiseen lannoitukseen. Biotiitin toiminta maanparannusaineena perustuu kykyyn nostaa viljelymaan pH-arvoa 0,2–0,4 yksikköä. Luvun nostoon vaikuttaa biotiitin käyttömäärä sekä viljeltävän alan maalaji. Ensimmäisten viiden vuoden aikana kaliumista liukenee 2/3 sen määrästä. Biotiitti (kuva 4) lisää vähäkaliumisten maiden varastokaliumin määrää ja tasapainottaa nurmirehun kivennäiskoostumusta. Tumman biotiitin hyötyjä käytetään erityisesti luomuviljelyssä. (Yara Suomi 2025c.)



Kuva 4. Kuvaleike Yara Suomi Oy:n verkkosivulta Yaran Biotiittinäyte (Yara Suomi Oy 2025a)

Maanparannustuotteena viljelyssä biotiitin käyttömäärät viljavuustutkimuksien mukaan on 4–10 tn/ha. Biotiittia on hyvä levittää säännöllisin ajoin pellolle 2–4 vuoden sykleissä, jolloin siitä saadaan paras hyöty ja pystytään pitämään viljeltävän alueen maan pH-arvot oikeanlaisena viljelylle. Biotiitti toimitetaan irtotuotteena Siilinjärven tehtaalta asiakkaalle yleensä kippiautoilla kohteeseen. Biotiitti (kuva 5) levitetään pelloille kalkin levityksessä käytettävillä koneilla. (Yara Suomi 2025c.)



Kuva 5. Kuvaleike Oamk Journalin verkkosivulta: "Biotiitti on erinomainen maanparannusaine kalliunköyhille pohjoisen maille. Levitys onnistuu esimerkiksi kalkkivaunulla." (Suomela 2023.)

5 SÄHKÖSUODATIN

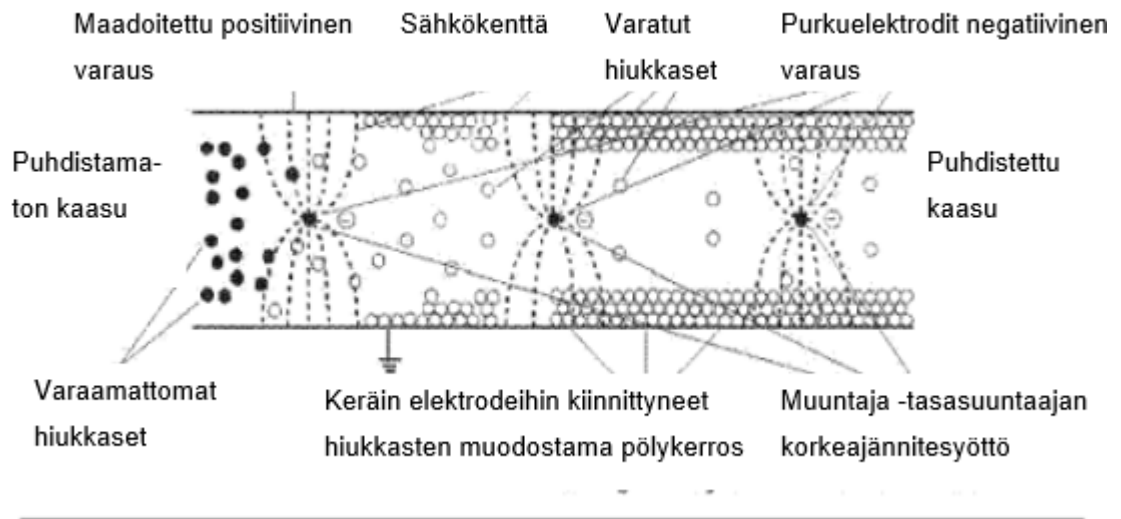
Sähkösuodatin on ollut yli 100-vuoden ajan käytetty teollisuudessa savukaasussa sisältävien hiukkasten poistoon. Savukaasujen puhdistuksessa sähkösuodatin on yleisesti maailmalla käytetty laite kirstyneiden hiukkaspäästö määräyksiensä vuoksi. Sähkösuodattimen suosio perustuu erittäin hyvään toimintavarmuuteen ja kykyyn erotella hiukkaspartikkeleita savu- ja poistokaasuista. Sähkösuodatin on monipuolisten käyttömahdollisuuksien ja saatavien räätälöityjen sovellusten vuoksi moneen kohteeseen sopiva. Kun otetaan huomioon laitteen hyvä hyötysuhde, lämpötilan kestävyys, korkea käyttöikä, pieni painehäviö, matalat ylläpito- ja käyttökustannukset sekä korkean erotusasteen kyky poistaa hiukkaspartikkeleita, tämä lisää sähkösuodattimen suosiota. (White 2012,166–173.)

Monipuolisten käyttömahdollisuuksien ja siihen liittyvien sovellusten puolesta sähkösuotimesta on tullut yleinen laite teollisuuteen esimerkiksi sähkön ja lämmöntuottamisessa tulevien savukaasujen puhdistuksessa, kun savukaasuista erotetaan lentotuhkaa. (White 2012,166–173.)

5.1 Sähkösuodattimen toimintaperiaate

Sähkösuodattimessa läpi kulkevasta kaasuvirrasta varataan erotettavat hiukkaset negatiivisesti silloin, kun ne kulkevat ionisoituneen alueen läpi. Seuraavaksi varautuneet hiukkaset erotetaan voimakkaassa sähkökentässä. Sähkösuodatin koostuu kahdesta elektrodista, joista käytetään nimeä emissioelektrodi ja erotuselektrodi. Elektrodien välissä on suuri jännite ero 30–70 kV, joka saa aikaan voimakkaan sähkökentän elektrodien väliseen tilaan. Tämän vaikutuksesta syntyy emissioelektrodeille voimakkaan sähkökentän ansioista niin sanottu koronapurkaus, jonka vaikutuksesta syntyy paljon negatiivisesti ja positiivisesti varautuneita kaasumolekyylejä. Siinä vaiheessa, kun emissioelektrodi on negatiivisesti varautunut ja erotuselektrodi positiivisesti varautunut, positiiviset ionit siirtyvät emissioelektrodeille ja luovuttavat oman varauksensa samaan aikaan muuttuen kaasumolekyyleiksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 252–253.)

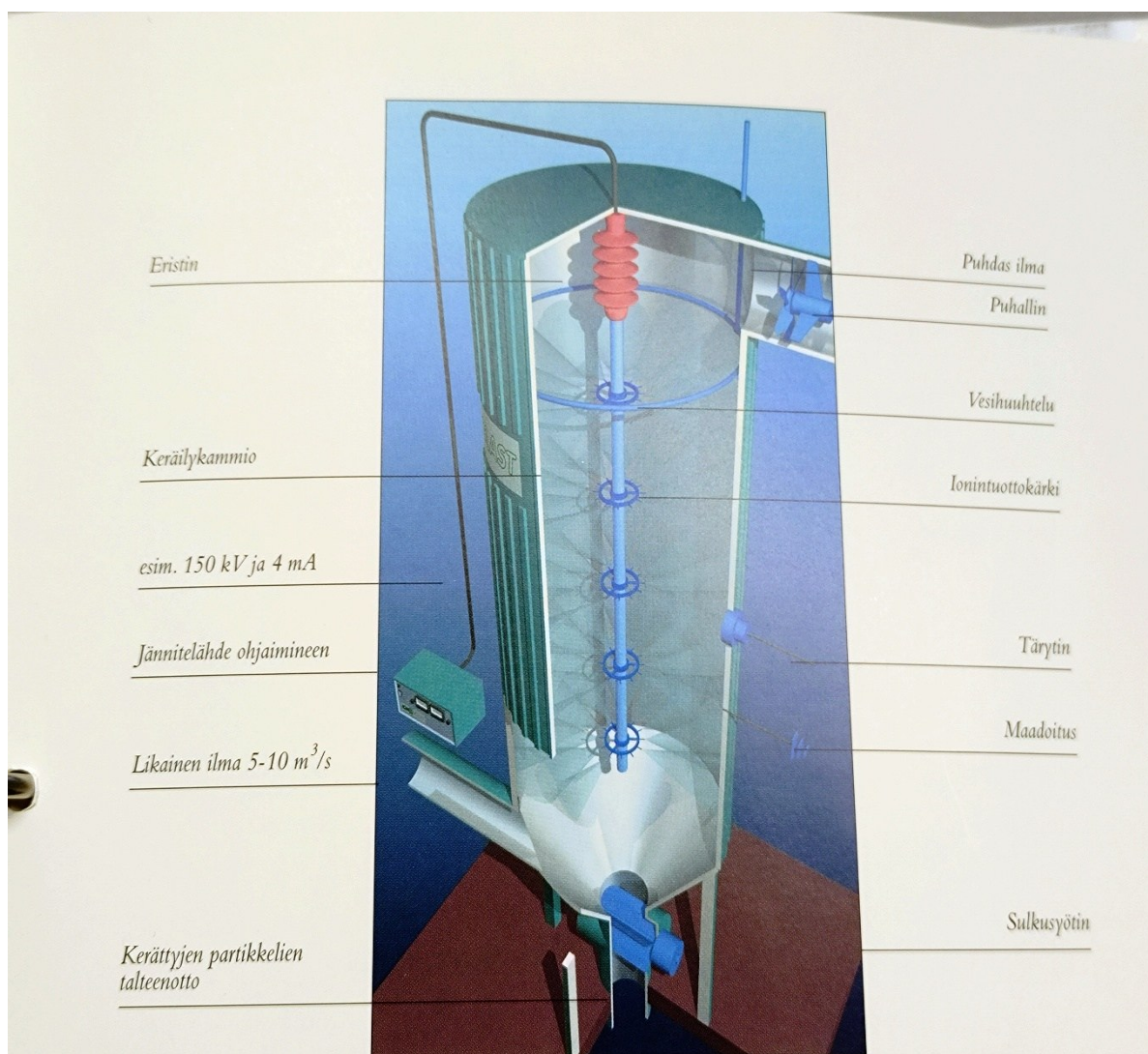
Liikkuessaan kohti erotuselektrodia negatiiviset ionit törmäävät pölyhiukkasiin ja samalla varaavat ne negatiiviseksi. Elektrodien voimakas sähkökenttä aiheuttaa negatiivisesti varautuneiden pölyhiukkasten ja partikkeleiden liikkeen kohti erotuselektrodia. (Kuva 6.) Erotuselektrodeista kiinnittynyt pöly poistetaan joko ravistimien tai vesisuihkun avulla riippuen onko kyseessä kuivia vai märkiä kaasuja. Sähkösuodattimilla voidaan käsitellä suuria kaasumääriä eri prosessien yhteydessä. Käyttäjän kannalta sen käyttöikä on erittäin pitkä ja se on suhteellisen helppo huoltaa. Sähkösuodatin sopii käytettäväksi 420 °C lämpötilaan saakka erilaisten prosessissa olevien pölyjen mukaan. Käyttö on erittäin taloudellista pienen painohäviön ja vähäisen tehonkulutuksen vuoksi. Se voidaan mitoittaa korkeille erotusasteille jopa alle (1µm), jolloin käytetään märkäsuodatinta, jolla saadaan 99.9 % pienhiukkasista talteen. (Huhtinen ym. 2000, 252–253.)



Kuva 6. Kuvaleike EPA verkkosivulta Sähkösuodattimen toimintaperiaate (Parker 2004)

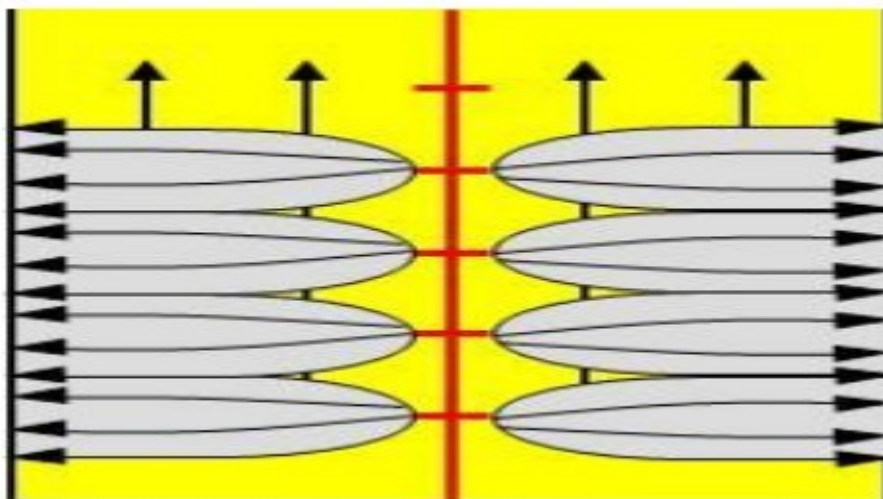
6 ION BLAST- SÄHKÖSUODATIN

Veikko Ilmasti (s 1928) kehitti Ionisuihkupuhalluksen 1990-luvulla, jonka avulla teollisuuden kierrätys- ja poistoilmaa saataisiin puhdistettua entistä paremmin. Keksinnössä ajatus on, että hiukkaset varataan korkealla jännitteellä ja puhalletaan laitteen seinämiin. Tämän jälkeen suodattimessa huuhdellaan sisusta vesihuuhtelulla ja poistuvat partikkelit johdetaan viemäriin erottimen kautta. Ion Blast on sähkösuodatinsovellus, jonka valmistaja oli sen tultua markkinoille Ion Blast Oy. Ion Blast -ilmanpuhdistuslaite eli sähkösuodatin on tyypiltään märksuodatin. Alla oleva kuva (kuva 7) on periaatekuva yksikammioisen ja putkimaisen ulkokuoren sisällä olevasta sähkösuodattimen rakenteesta, joka koostuu korkeajännitelähteestä, ohjausyksiköstä ja keräilykammioista, joissa on ionituottokärki. (Ion Blast Oy 2001b.)



Kuva 7. Ion Blast- sähkösuodattimen rakenne (Komulainen 2025c)

Puhdistettava ilma ohjataan keräilykammioon, jossa toiminta perustuu siihen, että ionintuottokärjillä sekä emissioelektrodeilla kaasu ionisoidaan. Kun tähän johdetaan suurempaa 100–250 kV jännitettä. Korkeajännitteellä saadaan aikaan ionipuhallusilmiö, joka lisää ja kiihdyttää partikkeleiden migraatiota keräinelektrodille. Tämän voi havainnoida alla olevasta periaatekuvasta (kuva 8), jossa keltaisella pohjalla olevat nuolet osoittavat kaasun poistosuuntaa ja harmaat sivuille päin olevat nuolet ionituulesta, jonka Ion Blast- sähkösuodatin saa aikaan. (Ion Blast Oy 2001b.)



Kuva 8. Ion Blast- toiminnan periaatekuva (Ion Blast Oy 2001c)

Ion Blast Oy:n (2001b) mukaan, kerätyt partikkelit poistetaan sähkösuotimen kammioista mekaanisesti, kaapimalla tai vesifilmillä. Vesifilmillä tarkoitetaan kiinteän pinnan ja toisen materiaalin väliin muodostunutta erittäin ohutta vesikerrosta. Vesihuuhdeltua apuna käyttäen kammion sisäpinta pysyy lähes kulumattomana sillä siihen ei kohdistu mekaanista hierontaa (kuva 9).



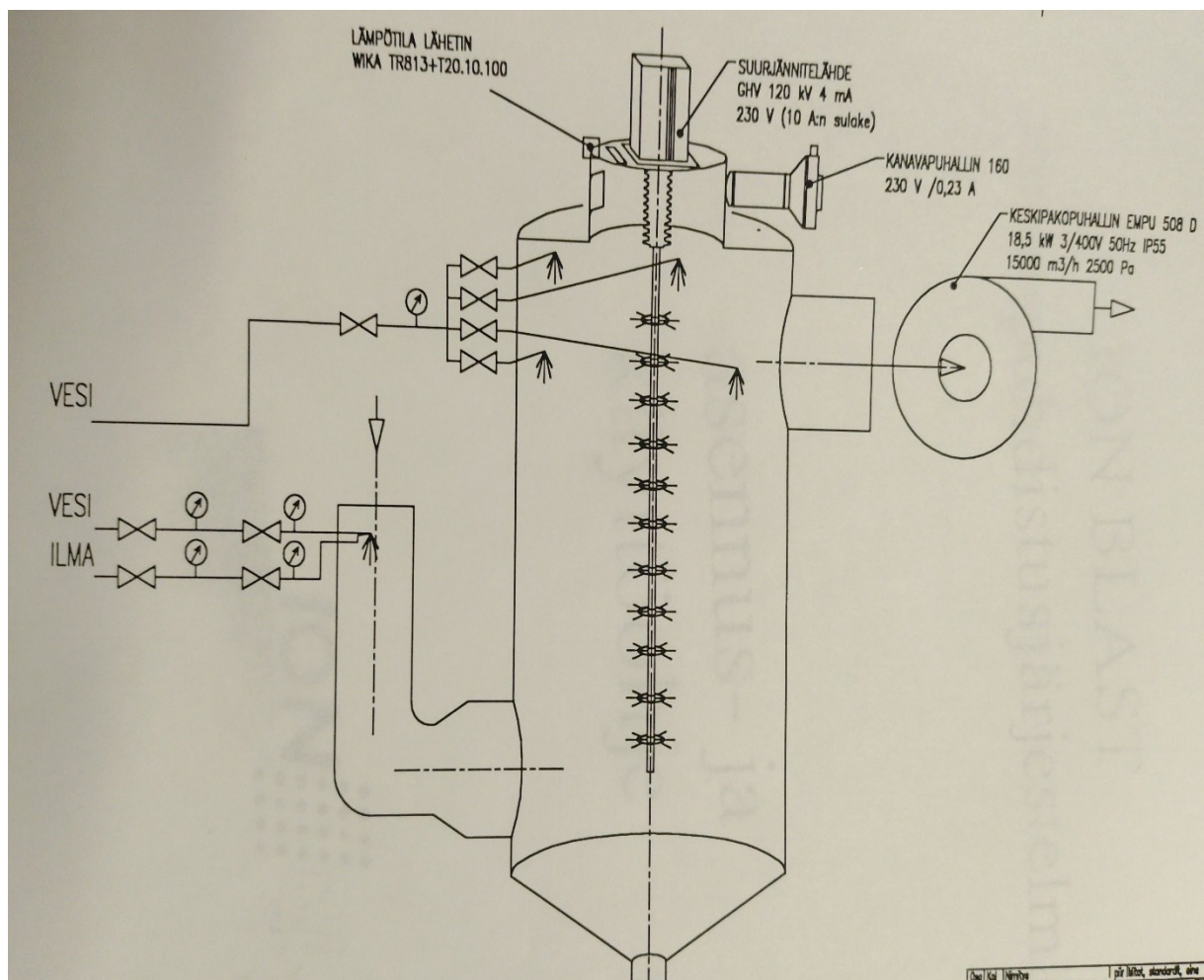
Kuva 9. Ion Blast- sähkösuodatin sisältä (Komulainen 2025d)

Vesifilmi sähkösuodattimen sisäpinnalla kerää pienhiukkasia tehokkaasti ja estää niiden pääsyn ulkoilmaan. Pölynpoisto tapahtuu automaattisesti, mikä vähentää huollontarvetta. Ion Blast- sähkösuodatin sopii monenlaisiin ilmanpuhdistustarpeisiin, toimii 70–150 kilovoltin jännitteellä, muutaman milliampeerin virralla ja kuluttaa 500–2000 wattia, tehden siitä energiatehokkaan verrattuna perinteisiin suodattimiin. (Ion Blast Oy 2001b.)

Keräilykammion halkaisija voi olla enimmillään kaksi metriä, ja ilma liikkuu järjestelmässä 3 m/s nopeudella, riittäen hyvin 10m^3 ilman puhdistukseen. Yhteen jännitelähteeseen voi kytkeä lisää keräilykammioita, mikä moninkertaistaa puhdistettavan ilman määrän. Ion Blast -sähkösuodattimessa on pieni virtausvastus, jolloin puhaltimien teho vaatimukset ovat pienet ja sähkönkulutus matala. Toiminnassa Ion Blast- sähkösuodatin on luotettava ja vähän huoltoa vaativa sekä rakenteeltaan kestävä. Puhdistuksen partikkelit voidaan ohjata takaisin prosessiin. (Ion Blast Oy 2001b.)

7 ION BLAST- BIOTIITTITUOTANNON LAITTEISTO

Ion Blast- sähkösuodatin on tyypiltään märksuodatin kosteille kaasuille (kuva 10). Se on biotiitin tuotantoon vuonna 2001 hankittu. Sen tarkoituksena on puhdistaa kosteita poistokaasuja sekä pölyä. Investoinnin lähtökohdaksi oli kiristynyt ympäristölaki ja halu turvata tulevaisuuden kestävä kehityksen mukainen toiminta biotiitin tuotannossa. (Juntunen 2025a, 1.)

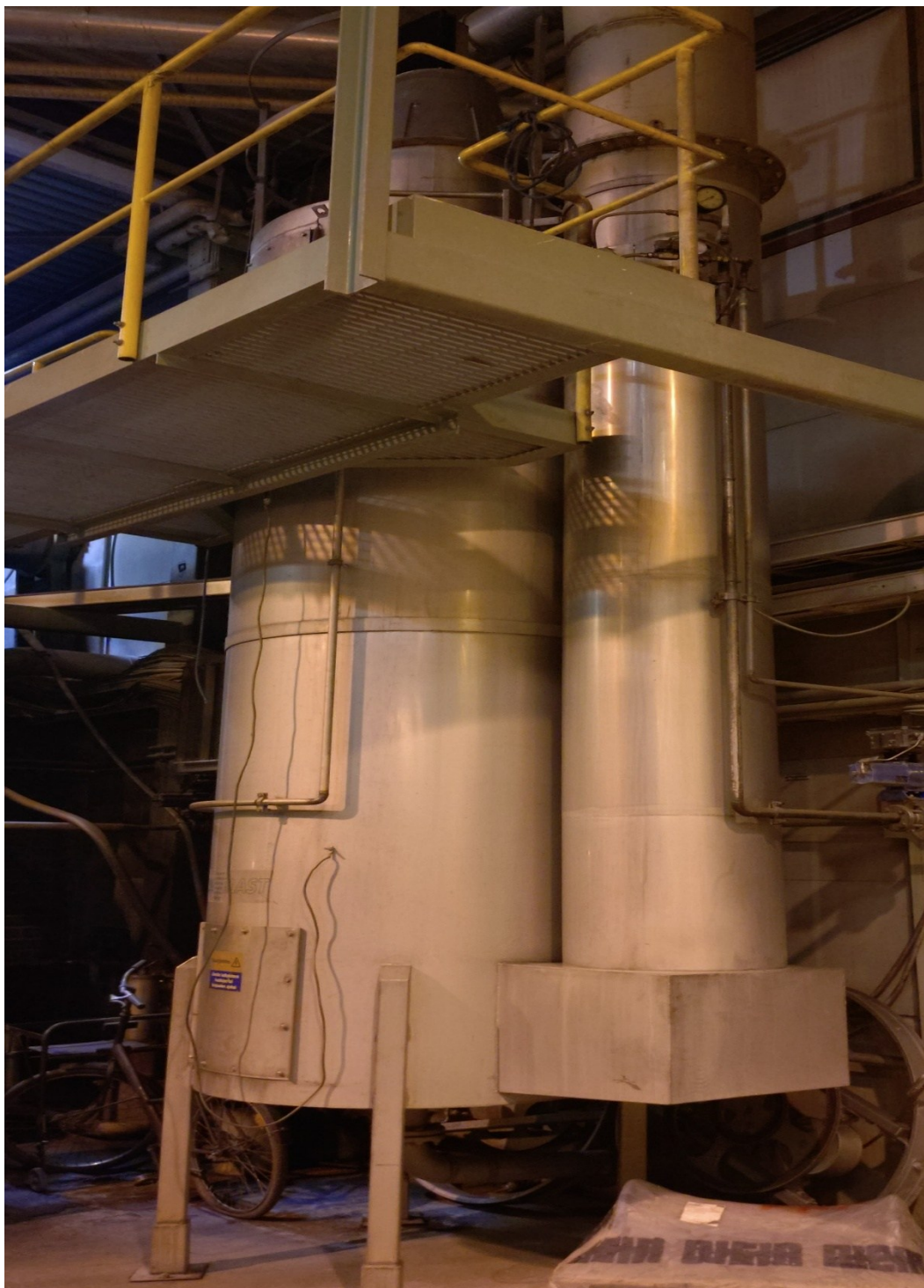


Kuva 10. Ion Blast PI-kuva (Ion Blast Oy 2001a)

Laitteiston keskeisin osa on putkimainen puhdistuskammio, johon on kiinnitetty suurjännitelähde ja Ion Blast- sähkösuodatin (kuva 11). Kammion sisäpuolella ovat neulatanko ja neularenkaat, jotka muodostavat ejektorikärjen. Puhdistuskammiossa on huuhteluvesisuuttimet, jotka syöttävät vettä biotiitin prosessiin putkiston avulla. Kiilletehtaan prosessista saadaan vesi puhdistuskammioon. Puhdistuskammiossa vedenpaineen avulla jäähdytetään sähkösuodattimeen tuleva ilma ja huuhteluosuuttimilla puhdistetaan sähkösuodattimessa olevat epäpuhtaudet pois. Sähkösuodattimen puhdistuksesta tuleva liete palautuu käytön jälkeen tehtaan omaan vedenpuhdistusjärjestelmään uudelleen käytettäväksi esimerkiksi biotiittiprosessissa. Huuhteluvesilinjoilla on sulkusäätöventtiilit ja painemittarit. Puhdistuskammion yläosassa on puhdasilmakanava, johon on asennettu pääpuhallin. (Ion Blast Oy 2001b.)

Korkeajännitesäädin tarvitsee toimiakseen kanavapuhaltimen, jonka tarkoituksena pitää jännitelähteessä oleva posliinieristeen pinta kuivana ja puhtaana sekä jäähdyttää ettei posliinieristeen ja korkeajännitteen säätimen lämpötila nouse yli 80 celsiusasteen. (Ion Blast Oy 2001b.)

Kun järjestelmän osana on korkeajännitelähde, niin lämpötilan mittaus on oltava jatkuva. Mikäli lämpötila nousee liikaa, suojajärjestelmä sulkee sähkösuodattimen toiminnan varotoimenpiteenä. Sähkösuodattimen yhteydessä on säätöyksikkö, johon syötetään ominaiskäyrän tiedot. Sähkösuodattimen operointi tapahtuu muuten etänä Kiilteen ohjaamosta käsin. (Ion Blast 2001b.)



Kuva 11. Ion Blast- sähkösuodatin Kiilletehdas (Komulainen 2025b)

8 SÄHKÖSUODATTIMEN OPTIMOINNIN LÄHTÖARVOT

Sähkösuodattimen optimointiin hyödynnetään biotiitin tuotantoprosessia, joka on toiminnassa optimoinnin aikana. Optimoinnissa käytetään arvona flogobiittirikasteen määrää, joka on viime vuosina vakiintunut perusarvoksi, jolla biotiittiprosessia ajetaan. Optimoinnissa ei voida hyödyntää asennuksen aikaisia alkuperäisiä arvoja eli valmistajan suositusta, koska järjestelmää on jouduttu ajan kuluessa joiltakin osin uusimaan. Eettisistä syistä tarkempia arvoja ei avata tässä opinnäytetyössä, koska ne ovat toimeksiantajan liikesalaisuuksia. Uudistuksissa on käytetty eri teholuokan laitteita alkuperäiseen kokonaisuuteen verrattuna. Esimerkkinä kuivatukseen tarvittavan lämpöenergian tekemiseen käytettävä kevytpolttoaineella toimiva Flash- poltin sekä samassa kokonaisuudessa oleva rumpukuivain. Flash- poltin, joka sijaitsee rumpukuivaimen alkupäässä tuottaa kuivauslämpöä rumpukuivaimen, joka pyörii samanaikaisesti ja sekoittaa tuotetta, jolloin kuivatus tehostuu. On myös otettava huomioon ympäristöluvassa vaadittavien arvojen mukainen toteutuminen, joita ympäristöviranomaiset seuraavat.

Alkuperäisessä suunnitelmassa olleet poistokaasujen mittaukset jouduttiin jättämään tekemättä keväällä tulleiden aikatauluhaasteiden vuoksi.

8.1 Sähkösuodattimen toimintaan vaikuttavat tekijät

Ion Blast- sähkösuodattimen tutkimisen lähtökohtana on hyvä miettiä, mitkä asiat vaikuttavat suoraan biotiittiprosessin toimintaan. Kokemus prosessioperaattorin työstä biotiittia tuottavalla Kiilletehtaalla helpottaa asian ymmärtämistä. Omakohtaisen kokemuksen pohjalta voidaan nostaa esiin kolme päätekijää, jotka vaikuttavat sähkösuodattimen toimintaan osana biotiitin tuotantoprosessia.

Ensimmäisenä vaikuttavana tekijänä on flogobiittirikasteen määrä, jota prosessoimalla biotiittia valmistetaan. Flogobiittirikasteesta poistetaan ensimmäiseksi kosteutta imusuodattimen avulla. Tämä vaihe poistaa suurimman osan biotiitin kosteudesta.

Toisena vaikuttavana tekijänä tuotantomäärän kasvaessa on rumpukuivaimen toiminta. Tuotannon määrän nostettaessa, joudutaan myös polttimen tehoa nostamaan lopputuotteen laadun varmistamiseksi. Polttimen tehonlisäys nostaa poistettavien kaasujen määrää, kun kuivausrummussa olevaa biotiittia kuivataan. Puhdistettavien poistokaasujen määrä kasvaa sähkösuodattimella.

Kolmantena vaikuttavana tekijänä on rumpukuivaimen jälkeinen biotiitin poistokapasiteetti. Jos prosessissa syntyvää biotiittia ei pystytä samassa tahdissa siirtämään rumpukuivaimelta eteenpäin, rumpu alkaa täyttymään ja kuivausteho laskemaan. Tällöin kaasujen ja pölyjen puhdistus alkaa heikkenemään ja sähkösuodattimen pintojen likaantumisen riski kasvaa.

Tuotannon määrää nostettaessa on myös hyvä seurata tuotteen loppukosteutta. Tuotteelle on määritetty laatuominaisuudet, joista oikea kosteus on yksi ominaisuus. Suuremmalla tuotantomäärällä kasvaa riski siihen, että lopputuotteen kosteus kasvaa. Tällöin biotiitti ei enää täytä sille asetettuja laatuvaatimuksia. Kosteuden todentaminen on helppoa prosessissa olevan kosteusmittarin ansiosta. Lopullinen varmuus saadaan tekemällä kosteuden pikatesti laboratoriossa, joka sijaitsee Kiilletehtaalla.

Sähkösuodattimen virran ja jännitteen asetusarvot saadaan kausihuoltojen aikaan tehtyjen asetusten pohjalta. Tässä opinnäytetyössä parametrien muuttamiseen ei lähdetä, koska tämä vaatisi uuden kalibroinnin ja toisi ylimääräisiä kustannuksia.

Prosessioperaattori seuraa prosessinohjausjärjestelmästä jännitteen- ja virran määrää sekä sähkösuodattimen puhdistukseen käytettävää veden kulutusta prosessin erilaisilla kuormituksilla biotiittia tuotettaessa. Automaatio hoitaa pääsääntöisesti sähkösuodattimen toiminnan.

8.2 Optimointiin käytettävä menetelmä

Käytettävänä menetelmänä opinnäytetyössä lähdettiin kokeilemaan prosessinajoa peruslähtötiedoilla. Flogobiittirikasteen määrää haluttiin nostaa 3 % ja seurata tuloksia kahden tunnin välein. Prosessioperaatiokaaviosta otettiin alku- ja lopputrendit, josta tulkinta oli helpompaa tehdä. Kokeelle saatiin lähtötiedot optimointiin ja sen mahdollisuuteen. Trendeistä oli mahdollista tulkita muutokset sähkösuodattimen toiminnassa. Kokeen pohjana oli viimeisen vuoden aikana vakiintunut tuotantomäärä, jolloin 3 % nosto biotiitin tuotannossa on määränä kohtuullinen.

Tämä kaikki tapahtui sillä oletuksella, että biotiittiprosessin tuotanto toimisi ilman sähkösuodattimen toiminnan vaarantumista ja sähkösuodatin toimisi odotetulla tavalla. Kahden tunnin syklit valittiin sopivaksi aikaväliksi tutkimukselle prosessioperoinnin yhteydessä. Tämä aika olisi tarpeeksi pitkä osoittamaan prosessin mahdolliset muutokset. Kokeeseen varatussa ajassa pystyi näkemään kolmen prosentin kapasiteetin noston vaikutukset biotiittiprosessissa sekä sähkösuodattimen toiminnan poistokaasujen suhteen.

9 TULOKSET SÄHKÖSUODATTIMEN TOIMINNASSA OPTIMOINNISSA

Ion Blast- sähkösuodattimen optimointi kokeen aloitusajankohta oli 21.3.2025. Optimoinnin toteutusajankohdaksi valikoitui aamuvuoro, jossa opinnäytetyöntekijä työskenteli kyseisenä päivänä. Suunnitteleamalla toteutusajankohta edellä mainitulle päivälle, pyrittiin ennakoimaan ja varmistamaan, ettei kokeesta ollut haittaa Kiilletehtaan biotiittiprosessin tuotantoon. Samalla tuotantoprosessista pystyttiin toteamaan prosessoitavan flogobiittirikasteen laadun tasaisuus tuotettavan rikasteen määrästä, kosteudesta sekä rikasteessa olevasta kiintoainemäärästä.

Kiilletehtaan prosessioperaattorin työtehtäviin kuuluvat lähtevien kuormien lastaukset muun operoinnin ohella. 21.3.2025 oli ajankohtana optimointiin hyvä, koska aamuvuorolle ei sattunut lastauksia. Tämä helpotti kokeen tekemistä ja sähkösuodattimen toiminnan seuraamista.

Optimointikoe alkoi 21.3.2025 klo 10.30, jolloin tuotantomäärä nostettiin 3 %. Kokeen alkaessa sähkösuodattimen toimintaan vaikuttavat lähtötiedot olivat tiedossa pitkäaikaisen seurannan tuloksena. Seurattavia arvoja olivat savukaasusuodattimen jännite, huuhteluvesi, suodattimen virta sekä korkeajännitelähteen lämpötila. Tämä tieto oli tärkeä, jotta tulevia arvoja pystyi vertaamaan sähkösuodattimen kalibroinnissa määritettyihin arvoihin, joiden mukaan biotiittiprosessia operoitiin ennen suoritettua koetta.

Prosessin edetessä jaettiin savukaasusuodattimen trendi noin 2 tunnin jaksoille, kuten oli suunniteltu. Tämä osoittautui ratkaisuna hyväksi, koska se helpotti analysoimista ja sähkösuotimen toiminnan seuraamista. Trendeistä (liite 1) voidaan nähdä suuntana lievä nousu sähkösuodattimen jännitteen, virran ja korkeajännitelähteen lämmön suhteen. Tämä oli odotettavissa kuormituksen kasvassa. Muutos oli laskennallisesti noin 4.5 %, joka vaikutti olevan varsin järkevällä tasolla. Myös sähkösuodattimen savukaasupartikkelien puhdistukseen käytettävässä vesisumutuksen määrässä oli havaittavissa nousua.

Optimointi kokeen edetessä (liite 1) pystyttiin tulkitsemaan arvojen nousun hiipumista, jolloin sähkösuodattimen toimintaa kuvaavat arvot alkoivat tasaantua. Reilun neljän tunnin kokeen jälkeen arvot alkoivat laskemaan. Kun koetta oli edennyt kuusi tuntia, voitiin huomata arvojen laskemista korkeampien arvojen osalta. Ainoastaan sähkösuodattimen jännite sekä korkeajännitelähteen lämpötila olivat koholla muiden arvojen palautuessa ennalleen.

Sähkösuodattimen optimointikoe kesti noin kahdeksan tuntia. Kokeesta saatiin hyvää tietoa optimoinnista poistettavien savukaasujen suhteen. Koe osoitti myös sähkösuodattimen toiminnan muutoksen tuotantomäärää nostettaessa.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Talouden haastavassa tilanteessa on ymmärrettävää, että tehdas, joka tuottaa raaka-aineita on halukas tutkimaan mahdollisuuksia tehokkaampaan toimintaan. Tehtaan toimintaan ja kannattavuuteen vaikuttavaa monet tekijät, joiden vaikutusten pohjalta joudutaan miettimään vaihtoehtoja kannattavuuden lisäämiseksi. Globaalisti toimiva vientiyritys on myös huomioitava toiminnassaan ympäristönäkökulmat ja kestävä kehityksen periaatteet.

Tämän opinnäytetyön tuloksista voidaan tehdä johtopäätös, että biotiittiprosessista on mahdollista saada useita uusia näkökulmia ja toimivia ratkaisuja tuotantoprosessiin. Olemassa olevat prosessit on mahdollista saada toimimaan tehokkaammin energiaa hukkaamatta ja ympäristöä vähemmän kuormittaen. Tuotantolaitoksen investointeja suunniteltaessa, monipuolinen pohjatieto helpottaa kokonaisuuden ymmärtämisessä sekä antaa käsityksen mahdollisista tarpeista.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia sähkösuodattimen toiminnan optimointia biotiittiprosessissa. Opinnäytetyön tekeminen toi opinnäytetyön tekijälle paljon syventävää tietoa, jota voi jakaa konkreettisesti toisten prosessioperaattoreiden kanssa. Sähkösuodattimen optimointikokeen valmistelussa joutui ottamaan huomioon asioita, joita prosessioperaattorin jokapäiväisessä työssä ei normaalisti tarvita. Lisäksi toimeksiantaja saa tulevaisuutta varten uutta ja hyödyllistä tietoa. Aiheen tutkiminen antoi mahdollisia kehitysideoita lämmön talteenottojärjestelmästä sekä biotiittiprosessissa olevan säätöpiirin kehittämisestä tuotannonprosessin energian säästämiseksi.

Sähkösuodattimen optimointikoe antoi osviittaa siitä, että tuotantomäärän maltillinen nostaminen olisi mahdollista sähkösuodattimen kapasiteettia ajatellen. Ei kuitenkaan pidä unohtaa, että koe oli viitteitä antava. Tutkimusta olisi hyvä tehdä laajemmin pidemmällä aikavälillä sekä samanaikaisesti pitäisi myös olla käytössä jatkuvatoiminen poistokaasujen päästömittaus, jota nyt ei ole käytössä.

11 POHDINTA

Opinnäytetyön tekeminen antoi hyvää tietotaitoa tulevaisuudelle ja valmiuksia toimia tuotantoprosessin vaatimissa haasteissa. Ion-Blast-sähkösuodattimen optimointi mahdollisuus poistokaasujen suhteen näyttää olevan mahdollista ja järkevää kuten koe, joka tehtiin tuotantoa nostamalla, antoi siihen osviittaa. Tässä kohdin tosin on hyvä huomioida, että käytössä ei ole reaaliaikaista poistokaasujen mittausta vaan arvio perustu luettavissa olevaan tietoon sähkösuodattimen toimintaa kuvaavista prosessikaavion trendeistä ja siihen liittyvistä havainnoista ja käsin tehtävistä kosteuden mittauksista valmiista tuotteesta.

Mielestäni sähkösuodattimen lähtevien poistokaasujen mittaukseen olisi hyvä saada jatkuvatoiminen mittaustila, jolloin tiedon seuraaminen prosessin toiminnasta paranisi. Tämä auttaisi reagoimaan välittömästi, mikäli muutoksia tulisi ja toisaalta mahdollistaisi myös tarpeen tulleen tuotannon muutoksia, jolloin hyöty kasvaisi. Aihetta tutkiessa löytyi joitakin mahdollisia vaihtoehtoja myös käsikäyttöisille analysaattoreille, joilla on mahdollista seurata poistokaasuja esimerkiksi prosessioperoinnin vuoron yhteydessä.

Vaikka opinnäytetyö käsittelee sähkösuodattimen toiminnan optimointia biotiittiprosessissa niin vastaan tuli kuitenkin joitakin mahdollisia kehitysideoita, joilla on mahdollista säästää energiaa ja parantaa biotiittiprosessista saatavaa hyötyä energian näkökulmasta ajateltuna. Koen että on hyvä tuoda ne esiin, koska ne tukevat opinnäytetyössä saatuja tuloksia ja ovat avuksi opinnäytetyön tilaajalle.

Ensimmäisenä olisi hyvä keskustella ja kehittää biotiittiprosessin poistokaasujen yhteyteen lämmöntalteenottojärjestelmää esimerkiksi joko ennen tai jälkeen sähkösuodatinta asennettavalla järjestelmällä. Tästä saatavaa hyötyä voitaisiin hyödyntää suoraan prosessissa. Lisäksi lämmöntalteenottojärjestelmän toteuttaminen mahdollisuus tukee ajatus biotiittiprosessissa olevien laitteiden sijainnista ja valmiista olevasta hyödynnettävästä käytössä olevasta tilasta. Tämän valintaa suoraan helpottaisi lämpötila mittauspisteiden lisääminen sähkösuodattimen läheisyyteen, sillä lämpötilan seurannan avulla oikeanlainen laitteiston valinta kohdentuisi oikeanlaiseen laitteistoon. Tällä hetkellä olevat arvot perustuvat rumpukuivaimen jälkeisiin poistokaasun lämpötilan arvoihin, joiden pohjalta olen asiaa tutkinut.

Toisena asiana on mahdollinen automaattisäädön kehitys ja toteutus, jolla huomioitaisiin valmiin tuotteen loppukosteuden ja flogopiittirikasteen tuotantomäärän perustuva säätö. Tämä sujuvoittaisi biotiittiprosessin toimivuutta, vakauttaisi sähkösuodattimen toimintaa ja optimoisi suoraan Flash-poltin tehoa. Tällä ratkaisulla lopputuotteen kosteus pysyy kosteusarvoltaan optimaalisena, kun Flash-poltin toimisi oikealla tehoalueella kuivatustarpeen mukaan. Tämä vaikuttaisi suoraan energian säästymiseen.

Kokonaisuutena opinnäytetyö on syventänyt omaa tietämystäni ja olen pystynyt ottamaan oppimaani hyötykäyttöön saman tien päivittäisissä prosessioperaattorin töissä. Tulevaisuutta ajatellen toimii opiskeluaikana saatu osaaminen hyvänä kokonaisuutena erilaisissa prosessipuolen työtehtävissä.

LÄHTEET

- Huhtinen M., Kettunen, A., Nurminen P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Helsinki: Edita.
- Ion Blast Oy. 2001a. Ion Blast PI-kuva. Valokuva, 10.3.2025. Siilinjärvi: J. Komulaisen kokoelmat.
- Ion Blast Oy. 2001b. Toimitus- ja asennusmateriaali: Ion Blast- sähkösuodatin. Ion Blast Oy.
- Ion Blast Oy. 2001c. Ion Blast- toiminnan periaatekuva. Valokuva, 26.3.2025. Siilinjärvi: J. Komulaisen kokoelmat.
- Juntunen, A. 2025a. Biotiitin tuotanto. Esittelymateriaali. Yara Suomi Oy.
- Juntunen, A. 2025b. Kiillettötuotanto. Esittelymateriaali. Yara Suomi Oy.
- Komulainen, J. 2025a. Biotiitin rumpukuivain. Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Siilinjärvi: J. Komulaisen kokoelmat.
- Komulainen, J. 2025b. Ion Blast- sähkösuodatin Kiillettehdas. Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Siilinjärvi: J. Komulainen kokoelmat.
- Komulainen, J. 2025c. Ion Blast- sähkösuodattimen rakenne. Valokuva 27.1.2025. Siilinjärvi: J. Komulaisen kokoelmat.
- Komulainen, J. 2025d. Ion Blast- sähkösuodatin sisältä. Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Siilinjärvi: J. Komulaisen kokoelmat.
- LKAB Minerals 2025. <https://www.lkabminerals.com/product/micafort/>. Viitattu 25.3.2025.
- Parker, K 2004. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000G9Q.pdf>. Viitattu 13.4.2025.
- Suomela, R. 2023. <https://oamkjournal.oamk.fi/2023/kaliumilla-turvemaat-tuottamaa>. Viitattu 24.3.2025.
- Yara Suomi Oy 2025a. Yara Biotiitti. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/lannoitus/lannoitteet/muut-tuotteet/yara-biotiitti/>. Viitattu 15.3.2025.
- Yara Suomi Oy 2025b. Yara Suomen historia. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/historia/>. Viitattu 24.3.2025
- Yara Suomi Oy 2025c. <https://www.yara.fi/lannoitus/lannoitteet/muut-tuotteet/yara-biotiitti/>. Viitattu 15.3.2025.
- Yara Suomi Oy 2025d. Yara Siilinjärvi. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/siilinjarvi/>. Viitattu 15.3.2025.
- Yara Suomi Oy 2025e. Yaran toimipaikat Suomessa. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/>. Viitattu 24.3.2025.
- White, H.J 2012 Fifty Years of Electrostatic Precipitation, Journal of the Air Pollution Control Association. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00966665.1957.10467797>. Viitattu 11.3.2025.

LIITE 1: SALATTU