



**Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu**

Kalle Kekäläinen

Valimohiekan termisen elvytyksen laadunhallinta ja ympäristö- vaikutukset

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.12.2019

Valvoja: Professori Juhani Orkas

Ohjaajat: DI Tommi Sappinen & DI Timo Kronqvist



Tekijä Kalle Kekäläinen

Työn nimi Valimohiekan termisen elvytyksen laadunhallinta ja ympäristövaikutukset

Maisteriohjelma Mechanical Engineering

Koodi ENG25

Työn valvoja Professori Juhani Orkas

Työn ohjaaja(t) DI Tommi Sappinen & DI Timo Kronqvist

Päivämäärä 30.12.2019

Sivumäärä 51 (49+2)

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Hiekkavalimoiden suurin jätemäärä syntyy niiden käyttämästä valimohiekasta. Suomessa kvartsihiekkää, joka on valimoiden eniten käyttämä hiekkatyyppi, on jo pitkään tuotu Belgiasta ja syntynyt jätehiekkä on ajettu kaatopaikoille. Nyt ilmastomuutoksen ollessa entistä ajankohtaisempaa ja kuluttajien kiinnittäessä enemmän huomiota elinkaari-päästöihin, on tätä syntynyttä jätehiekkää alettu elvyttämään Suomessa.

Tämän työn alussa olevassa teoriaosuudessa keskitytään valimohiekkoihin ja erityisesti Suomessa yleisimmässä käytössä oleviin valimohiekkoihin ja niiden sideaineisiin. Kokeellisessa osuudessa suoritettiin elinkaariarvioinnit termisesti elvytetylle valimohiekalle sekä neitseelliselle valimohiekalle noudattaen standardien SFS-EN ISO 14040 ja SFS-EN ISO 14044 asettamia ohjeita ja periaatteita. Lisäksi kokeellisessa osuudessa kehitettiin elvytyslaitoksen laadunhallintajärjestelmää ja kehitettiin polttoprosessin jäännöshapteen perustuva reaaliaikainen laadunhallintatyökalu.

Elinkaariarvioinnin tulosten perusteella havaittiin, että termisesti elvytetyn hiekan käytöstä syntyy huomattavasti vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin neitseellisen hiekan käytöstä. Myös laadunhallintaan kehitetty työkalu toimii toivotulla tavalla. Koeajoista saatujen näytteiden perusteella prosessille pystyttiin asettamaan kontrolliraja, ja voidaan todeta, että jäännöshapteen perustuva mittaus on toimiva ratkaisu polttoprosessin valvontaan.

Avainsanat valimohiekkä, laadunhallinta, elinkaariarviointi, ympäristövaikutus, jäännöshappi



Author Kalle Kekäläinen

Title of thesis Quality control and the environmental impact of thermal reclamation of used foundry sands

Master programme Mechanical Engineering

Code ENG25

Thesis supervisor Professor Juhani Orkas

Thesis advisor(s) MSc (Tech) Tommi Sappinen & MSc (Tech) Timo Kronqvist

Date 30.12.2019

Number of pages 51 (49+2)

Language Finnish

Abstract

The biggest amount of waste produced by foundries is the waste foundry sand which is formed during their processes. In Finland silica sand, which is the most commonly used foundry sand in Finland, has been shipped from Belgium for a long time and the used foundry sands have been deposited to landfills. Now, when global warming is a growing issue and consumers are more interested in the total emissions of commercial products, the reclamation of waste foundry sands has started in Finland.

The theory part at the start of this thesis focuses on foundry sands and especially the most common foundry sands and binders used in Finland. In the practical part a life cycle analysis is conducted on thermally reclaimed sand and virgin sand according to the rules and guidelines of the standards SFS-EN ISO 14040 and SFS-EN ISO 14044. The development of the quality control system and specifically a quality control tool utilizing the leftover oxygen of the combustion process is also introduced in the practical part of this thesis.

According to the results of the life-cycle assessment the carbon dioxide emissions formed by using thermally reclaimed sands are significantly smaller than those formed by using virgin sand. The developed quality control tool also worked as planned. The samples acquired from the trials and the quality control test conducted to these samples allowed a control limit to be set for the thermal process, and during this thesis it was proven that the leftover oxygen can be utilized in the quality control of a combustion process.

Keywords foundry sand, quality control, life-cycle assessment, environmental impact, leftover oxygen

Alkusanat

Näitä alkusanoja kirjoittaessa on aika mykistynyt olo. Kaikki ne vuodet koulun penkillä sekä lukemattomat tentit ja laskarit kulminoituvat tähän työhön. Opiskelijaelämä on ollut elämäni parasta aikaa, mutta nyt on aika siirtyä uusien haasteiden pariin.

Päädyin tekemään tämän diplomityön, kun sattumalta materiaalitekniikan labraan matkallani näin seinällä ilmoituksen diplomityöpaikasta, joka valimotekniikkaan liittyvänä tuntui houkuttelevalta. Aluksi ilmoituksessa mainittu paikka nimeltä Urjala aiheutti kauhistusta, ja mukana ollut kaverikin tokaisi sen sijaitsevan ”alueella, jota maajussitkin kutsuvat pöndeksi”, mutta lopulta päätin hakea paikkaa ja tässä sitä nyt ollaan.

Haluan kiittää tämän työn valvojaa Juhani Orkasta, ohjaajiani Tommi Sappista ja Timo Kronqvistia sekä Finn Recyclingin Toni Wesiniä, Jukka Niemistä ja koko muuta henkilöstöä, joita ilman tämä työ ei olisi ollut mahdollinen. Lisäksi haluan kiittää Kalle Jalavaa, jolla on mystinen kyky tietää Valulabran jokaisen työkalun ja tarvikkeen sijainti, vaikka hän ei itse olisi edes paikalla.

Haluan erikseen vielä kiittää perhettäni tukemisestani koulu-urani läpi, sekä kaikkia niitä, joiden kanssa olen Otaniemessä näinä viime vuosina hajoillut kurssitöihin, suunnitellut tapahtumia, pannut kaljaa, juonut kaljaa tai yleisesti vain rellestänyt.

Espoossa 30.12.2019

Kalle Kekäläinen

Sisällysluettelo

| | |
|---|----|
| Tiivistelmä | |
| Abstract | |
| Alkusanat | |
| Sisällysluettelo..... | 4 |
| Merkinnät | 5 |
| Lyhenteet..... | 6 |
| 1 Johdanto..... | 7 |
| 2 Valimohiekat..... | 8 |
| 2.1 Hiekkasysteemit yleisesti..... | 9 |
| 2.1.1 Yleisimmät valimohiekat | 10 |
| 2.1.2 Yleisimmät sideainejärjestelmät..... | 12 |
| 2.2 Hiekkavaluprosessin päästöt | 14 |
| 2.3 Korkealaatuinen elvytysprosessi ja modernit tekniikat | 16 |
| 3 Ympäristövaikutukset..... | 19 |
| 3.1 Elinkaariarvioinnin pääpiirteet | 19 |
| 3.2 Ympäristövaikutusten määrittäminen | 22 |
| 3.2.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittäminen | 22 |
| 3.2.2 Inventaarioanalyysi..... | 23 |
| 3.2.3 Vaikutusarviointi | 25 |
| 3.2.4 Tulosten tulkinta | 25 |
| 4 Laadunhallinta | 29 |
| 4.1 Laadunvarmistuskokeet | 30 |
| 4.2 Elvytyslaitoksen laboratorio..... | 32 |
| 4.3 Reaaliaikainen laadunhallinta..... | 34 |
| 4.3.1 Koesuunnitelma | 35 |
| 4.3.2 Mittaukset..... | 37 |
| 4.3.3 Tulokset..... | 38 |
| 4.3.4 Tulosten tulkinta | 43 |
| 4.4 Tulevaisuuden kehityskohteet | 44 |
| 5 Yhteenveto..... | 45 |
| 6 Lähdeluettelo | 46 |
| 7 Liiteluettelo..... | 49 |

Merkinnät

| | | |
|---|-------------------|----------------|
| K | mm | Keskiraekoko |
| T | N/cm ² | Taivutuslujuus |

Lyhenteet

| | |
|-------------------|---|
| LCA | Life-cycle assessment, Elinkaariarviointi |
| LOI | Loss on ignition, Hehkutushäviö |
| APNB | Esterikovetteinen fenolihartsihiekka |
| O ₂ -% | Jäännöshappiprosentti |

1 Johdanto

Hiekkavalimoiden suurin jätelähde on niiden kuluttama valimohiekka. Hiekkaan jäävien sideainejäämien takia hiekka katsotaan jätteeksi, josta valimot pystyvät kierrättämään sisäisesti kemiallisesti kovettuvista hiekoista noin 60-80 % ja tuorehiekoista jopa 90 %. Kuitenkin hiekkaa, jota ei ole pystytty elvyttämään, on kasaantunut keoiksi asti valimoiden pihoilta sekä kaatopaikoille samaan aikaan, kun uutta neitseellistä hiekkaa rahdataan maailmalta Suomeen korvaamaan käytöstä poistunutta hiekkaa. Finn Recycling Oy on alkanut elvyttämään tätä jätehiekkaa valimoille, jotta sama hiekka voisi kiertää mahdollisimman kauan Suomen sisällä. Elvytetyn hiekan käytöstä johtuvia ympäristövaikutuksia ei ole kuitenkaan aikaisemmin arvioitu, vaan on vain oletettu, että kierrätetty tuote on ympäristöystävällisempi kuin uusi, niin kuin se usein onkin. Tämän johdosta tässä työssä suoritetaan elinkaariarvioinnit elvytetystä sekä neitseellisestä hiekasta, josta saatuja tuloksia esimerkiksi valimot voivat hyödyntää laskiessaan omia päästöjään. Lisäksi työssä kehitetään elvytyslaitoksen laadunhallintajärjestelmää, jotta itse prosessin omistaja, sekä asiakasvalimot voivat olla varmoja siitä, että syntyvä tuote on tasalaatuista ja vaatimukset täyttävää.

Työn alussa olevassa kirjallisuuskatsauksessa keskitytään valimoiden hiekkasysteemeihin ja niihin vaikuttaviin tekijöihin yleisesti sekä yleisimmin Suomessa käytössä oleviin valimohiekkoihin ja niiden sideaineisiin, kuten kvartsi- ja kromiittihiekkoihin sekä kemiallisesti kovettuviin sideaineisiin ja savisideaineisiin. Samassa luvussa tarkastellaan myös itse hiekkavaluprosessista syntyviä päästöjä sekä tarkastellaan muutamaa korkealaatuista elvytysprosessia.

Ympäristövaikutuksia käsittelevän kappaleen alussa perehdytään kansainvälisten standardien ohjaaman elinkaariarviointiprosessin periaatteisiin, jonka jälkeen esitellään kirjallisuuslähteisiin, tietokantoihin sekä tuotantodataan nojaten edellä mainittujen standardien ohjeiden mukainen elinkaariarviointi Suomessa käytetystä neitseellisestä hiekasta ja elvytetystä hiekasta. Työssä tarkasteltavaksi vaikutusluokaksi valittiin ilmastomuutoksen vaikutusluokka, jonka indikaattoriksi valittiin hiilidioksidipäästöt. Saatuja tuloksia tulkitaan käyttäen hyväksi käytännön tuomia realiteetteja.

Työn lopussa esitellään termisen elvytyksen laadunhallintaa ja sitä varten tehtyjä kehittöitä. Tärkeimpänä asiana esitellään tässä työssä kehitetty elvytyksen polttoprosessin jäännöshapteen perustuva reaaliaikainen laadunvarmistustyökalu. Työssä tehtiin koeajot neljällä eri prosessin ilmansyötön parametreilla, jolloin päästiin simuloimaan tilanteita, joissa hiekassa oleva sideaine palaa epäpuhtaasti tai jopa pyrolyttisesti. Ajoista otetuista näytteistä tehtiin laadunvarmistuskokeet, joiden tuloksia ja niihin perustuvia johtopäätöksiä esitellään tässä työssä.

2 Valimohiekat

Tämän työn teoriaosa käsittelee aluksi yleisimmät valimohiekat ja niiden kanssa käytettävät sideainejärjestelmät. Valimohiekaksi ei kelpaa mikä tahansa hiekka, vaan valimohiekat ovat tarkasti puhdistettuja ja luokiteltuja, ja niiden mekaanisten ja termisten ominaisuuksien on oltava erinomaisia kestääkseen valimoprosessin aikana niihin kohdistuvat fysikaaliset ja kemialliset rasitukset. Kuvassa 1 nähtävä kvartsihiekkä täyttää nämä vaatimukset ja kvartsihiekkä onkin yleisin maailmalla käytössä oleva valimohiekka rautamallivaluissa.

Lisäksi tässä luvussa käsitellään hiekkavaluprosessin päästöjä, mikä tukee työn kokeellisessa osuudessa käsiteltyä termisesti elvytetyn hiekan ja neitseellisen kvartsihiekan elinkaariarviointien eli LCA-laskelmien vertailua.

Lopuksi perehdytään lyhyesti moderneihin elvytysmenetelmiin ja laitteisiin. Pysyäkseen kilpailussa mukana, yrityksillä on jatkuva paine vähentää päästöjään. Jos samalla on mahdollista säästää raaka-ainekustannuksissa, on valimohiekan elvytys loistava investointi muutenkin globaalisti erittäin kilpailullisella teollisuuden alalla, tapahtui hiekan elvytys sitten omalla laitteella valimossa taikka keskitetyllä elvytyslaitoksella.



Kuva 1 Suomessa valimoissa yleisesti käytetty kvartsihiekkä

2.1 Hiekkasysteemit yleisesti

Valimoissa käytettävät hiekkajärjestelmät muodostuvat käytettävästä hiekasta sekä sideainesysteemistä. Sopivan kombinaation valintaan vaikuttavat lukuisat seikat, joista tärkeimpiä ovat itse valumetalli, kappaleen koko, laatuvaatimukset, sideaineen rajoitukset sekä valun taloudellisuus.

Valumetalli sekä kappaleen koko painottavat hiekan valinnassa hiekan tulenkestävyyttä ja sulamispistettä, koska suurissa kappaleissa on varastoitunut suuri määrä lämpöenergiaa, joka vapautuu hitaasti hiekan huonon lämmönjohtavuuden takia. Hiekan tulenkestävyyttä mitataan sintrautumislämpötilalla. Sintrautumisessa hiekka kuumentuessaan valettavan metallin lämpötilasta, kiinnittyy se valukappaleen pintaan. Tämän sintrautuneen kerroksen ollessa erittäin haastavaa poistaa nykyaikaisinkin menetelmin, yritetään sitä välttää kaikin keinoin. Valetun metallin sulamispiste vaikuttaa huomattavasti muotin lämpökuormaan, koska esimerkiksi teräksien ja alumiinien valulämpötiloissa voi olla jo 800° C lämpötilaerot. Suurten kappaleiden valuissa käytetään yleensä karkeaa hiekkaa, mutta esimerkiksi tarkkuusvaluissa pienirakeinen hiekka on pinnanlaatuvaatimusten takia välttämätöntä. [1 & 2]

Valittu sideainetyyppi voi asettaa vaatimuksia hiekan kemiallisille ominaisuuksille; esimerkiksi hartsihiekkakaavauksessa käytettävät happamat koveteaineet eivät toimi hyvin emäksisen oliviinihiekan kanssa. Taloudellisuuden näkökulma hiekkasysteemiä valittaessa taas tulkitaan usein niin, että halvin systeemi, jolla voidaan kyseistä metallia valaa, on paras. Kuitenkin valun taloudellisuutta arvioitaessa tulee huomioida valunpuhdistuskustannukset ja korjauskustannukset esimerkiksi hitsaamisesta, jotka olisi voitu välttää tai ainakin minimoida valitsemalla kalliimpi hiekkasysteemi. Näin pienellä investoinnilla voidaan säästää kokonaiskustannuksissa. [1 & 2]

Valimoteollisuudessa hiekat lajitellaan yleensä kaavaus- ja keernahiekkoihin. Kaavaushiekoilla tarkoitetaan niitä hiekkvoja, joista yleensä valmistetaan valettavan kappaleen ulkopintoja vastaavat muotinosat. Keernahiekoista taas valmistetaan keernat, jotka ovat etukäteen erillisesti valmistettuja valumuotin osia, joilla valukappaleeseen saadaan luotua vaaditut reiät ja ontelot. Keernat joutuvat käytännössä melkein kokonaan sulan metallin ympäröimäksi, joten keernahiekoilta vaadittavat tulenkesto-ominaisuudet ovat yleensä huomattavasti muottihiekkvoja suuremmat. Raja näiden hiekkvojen välillä ei kuitenkaan ole aina selvä ja onkin normaalia, että raskaassa kaavauksessa muotit ja keernat valmistetaan samasta hiekasta. [1 & 2] Tämä helpottaa myös hiekan elvytystä, kun muotin purussa hiekkaa ei tarvitse erikseen lajitella, vaan kaiken purusta syntyvän hiekan voi säilöä keskenään odottamaan elvytystä.

Hiekkaa, joka sisältää jo itsessään savisideaineita, ja on siten kostutettuna jo kaavauskelpoista, kutsutaan luonnon hiekoiksi. Synteettiset hiekat taas ovat hiekkvoja, jotka on valmistettu sekoittamalla sideaineettomaan raakahiekkaan sideaineita. Suomessa ei esiinny luonnonhiekkvoja, eikä niitä tuoda maahan merkittäviä määriä, joten tässä työssä keskitytään synteettisiin hiekkvoihin ja niiden kanssa käytettäviin yleisimpiin sideainejärjestelmiin. [2] Nämä hiekat ja sideainejärjestelmät esitellään seuraavissa alaluvuissa.

2.1.1 Yleisimmät valimohiekat

Yleisin Suomessa käytetty valimohiekka eli raeaines on kvartsihiekkä, jonka lisäksi käytetään yleisesti kromiitti-, oliviini- sekä zirkonihiekkoja. Yleisesti nämä hiekat tuodaan Suomeen ulkomailta, vaikkakin heikompilaatuista kvartsihiekkää on myös saatavilla Suomesta [2]. Tämä laadultaan valimokelpoisen hiekan ulkomailta rahtaaminen Suomeen on toiminut yhtenä motivaatioina kehittää Suomeen myöhemmin tässä työssä esiteltävä mahdollisimman korkean kierrätysasteen omaava valimohiekan terminen elvytyslaitos. Edellä mainitut valimokelpoiset hiekat esitellään tässä alaluvussa lyhyesti kertoen hiekan perusominaisuudet, tuotantopaikat sekä niiden käytöstä saatavat edut ja haitat.

2.1.1.1 Kvartsihiekkä

Kvartsihiekkä muodostuu pääasiassa kvartsista eli piidioksidista (SiO_2) sekä pienistä määristä muita mineraaleja, joita ovat esimerkiksi maasälpä ja granaatti, jotka sisältävät piidioksidin lisäksi rauta- ja alumiinioksideja. Näiden muiden mineraalien puhdasta kvartsia heikompina ominaisuuksien kuten huonomman tulenkestävyyden sekä helpomman murenevuuden takia valimoissa käytettävien kvartsihiekköjen kvartsipitoisuuksien tulisikin olla mahdollisimman suuri. Suomessa tuotetun kvartsihiekan kvartsipitoisuus vaihtelee esiintymän mukaan 76-94% välillä. Koska nämä hiekat eivät enää useinkaan täytä nykyaikaisten valukappaleiden ja sideaineiden vaatimuksia, on Suomeen tuotu jo pitkään kvartsihiekkää ulkomailta. Tällä hetkellä useimmissa suomalaisissa valimoissa on käytössä belgialaista kvartsihiekkää, jonka kvartsipitoisuus vaihtelee 98,4-99,4% rajoissa, ollen näin merkittävästi suomalaisista hiekkäesiintymistä saatavia hiekköjä parempaa. [2]

Kvartsihiekan ominaisuuksista hankalin on sen erittäin nopea noin 0,8% tilavuuden laajeneminen 573°C lämpötilassa kvartsin muuttaessa faasiaan matalakvartsista eli β -faasistaan α -faasiin eli korkeakvartsiksi. Tätä silmänräpäyksessä tapahtuvaa tilavuuden laajenemista pidetään suurimpana syynä valukappaleissa esiintyville kuoriutumavaluviolle. 870°C korkeakvartsi muuttuu tridymiitiksi, joka muuttuu edelleen kristobaliitiksi 1470°C :ssa, mutta näiden faasimuutoksien aiheuttamat tilavuuksien muutokset ovat kokonaisuuden kannalta merkityksettömiä. Äkillinen tilavuuden muutos matalakvartsista korkeakvartsiksi myös luo jännitteitä, jotka rikkovat heikentyneitä rakeita. [1 & 3]

Kvartsihiekan etuja suhteessa muihin hiekkoihin ovat sen korkea sulamislämpötila, hiekan suuri kovuus ja mekaaninen kestävyys, kemiallinen kestävyys sekä suhteellisen halpa hinta. Puhtaan kvartsihiekan sulamislämpötila on noin 1700°C kun taas edellisessä kappaleessa mainitun maasälvän sulamislämpötila on vain noin $1200-1300^\circ\text{C}$, joten kvartsihiekan puhtaudella on suuri vaikutus hiekan sulamispisteeseen. Kvartsihiekan tulenkestävyys riippuu myös kvartsihiekan puhtaudesta. Maasälvällä on puhdasta kvartsihiekkää huomattavasti alempi sintrautumislämpötila, jolloin pienelläkin maasälpäpitoisuudella on suuri vaikutus kvartsihiekan sintrautumislämpötilaan. Kvartsihiekan kemiallinen kestävyys on hyvä, mutta happipitoisen teräksen kanssa reagoidessaan kvartsihiekkä muodostaa alhaisessa lämpötilassa jähmettyviä eutektikumeja, joiden vaikutuksesta kvartsihiekkää sintraantuu teräskappaleen pintaan kiinni. [1 & 4]

Kvartsihiekan käyttö asettaa työympäristölle myös oman haasteensa, mitä muiden rae-
hiekkojen käytössä ei ole. Kvartsihiekan pöly suurissa määrin hengitettynä aiheuttaa sili-
koosia eli kivipölykeuhkoa. [5] Silikoosi on parantumaton keuhkosairaus, joka voi altis-
taa sairastuneen muille hengenvaarallisille keuhkosairauksille. Kehittyäkseen silikoosi
vaatii yleensä yli 10 vuoden altistumisen, mutta silikoosin ongelmana on sen oireetto-
muus sairauden varhaisessa vaiheessa. [6] Silikoosin kehittymistä voidaan varmimmin
ennaltaehkäistä pitämällä hengitettävä ilma riittävän puhtaana, koska tietyn pölypitoisuu-
den alapuolella riskiä sairastua silikoosiin ei ole edes erittäin pitkällä altistumisajanjak-
solla. Tämä asettaakin suuret vaatimukset pölynpoistolle niissä kohteissa, joissa kvartsi-
hiekkia on vielä pölyvässä muodossa, eikä esimerkiksi kostutettuna tai sekoitettuna side-
aineeseen. Pölyntorjunnan toimivarmuuden toteamiseksi tarvitaan myös säännöllisiä pö-
lypitoisuusmittauksia silikoosivaarallisissa kohteissa. [5]

2.1.1.2 Kromiittihiekka

Kromiittihiekat ovat kromimalmista murskaamalla ja rikastamalla valmistettua mahdol-
lisimman puhdasta kromimineraalia [2]. Kromiittihiekka tuodaan Suomeen pääosin
Etelä-Afrikasta, mutta kromiittihiekkaa on myös valmistettu Kemissä Eläjärven kaivok-
sen kromiittimalmista.

Puhtaassa kromiitissa on 63 % Cr_2O_3 , mutta kaupalliset kromiittihiekat sisältävät myös
hiukan sivukiveä. Puhtaan kromiitin sulamispiste on 2200°C ja kaupallisen kromiitti-
hiekan sulamispiste on sen sisältämän sivukiven takia huomattavasti matalampi. Kromiittihiekkaa käy-
tetään yleisesti parantamaan valukappaleiden pinnanlaatua ja puhdistettavuutta. $1000-$
 1200°C lämpötilassa muotin pintaan sintraantuu ohut hiekkakerros, joka estää metallin
tunkeutumisen hiekkään. Syntynyt sintraantunut hiekkakerros on helposti erotettavissa
valukappaleen pinnasta, mikä aiheuttaa mainitun pinnanlaadun ja puhdistettavuuden pa-
ranemisen. Tämän takia kromiittihiekkaa käytetään laajasti rauta- ja teräsvalimoissa pin-
tahiekkana sekä korvaamaan kvartsihiekkaa sellaisissa paikoissa, joissa hiekka joutuu eri-
tyisen suuren lämpörasituksen kohteeksi. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi paksujen va-
lukappaleiden muotit sekä ohuet keernat. [2 & 7] Koska kromiittihiekan lämpölaajene-
minen on huomattavasti kvartsihiekkaa pienempää ilman äkkinäisiä muutoksia, syntyy
kromiittihiekan käytöstä myös huomattavasti vähemmän kuoritusvaluvikoja. [1]

Vaikkakin kromiittihiekalla on korkea sulamispiste, on sen sisältämällä raudalla taipumus
alkaa hapettua 400°C lämpötilassa ja diffuntoitumaan kromiittirakeiden pintaan. Käytet-
täessä bentoniitti- ja vesilasipohjaisten sideaineiden kanssa tämä rakeiden pinnalle hapet-
tunut rauta reagoi sideaineiden kanssa yli 1200°C lämpötiloissa muodostaen rautasili-
kaatteja. Rautasilikaatit alentavat mainittujen sideaineiden sulamislämpötiloja, jolloin
käytettäessä samaa kromiittihiekkaa useita kertoja mainittujen sideaineiden ominaisuudet
heikkenevät merkittävästi, joka johtaa valuvirheisiin ja sitä kautta ylimääräisiin kustan-
nuksiin. [2] Tämä yhdistettynä kromiitin jo valmiiksi noin kymmenkertaiseen hintaan
verrattuna kvartsihiekkään tekee kromiitista huomattavasti kvartsihiekkaa kalliimman
ratkaisun. [8] Kuitenkin oikeissa paikoissa käytettynä kromiitilla voidaan saada huomattavia
laatusäästöjä, koska syntyneen virheen korjaaminen on usein kalliimpaa kuin sen
estäminen.

2.1.1.3 Oliivihiiekka

Oliivihiiekka on oliivinimineraalista murskaamalla ja luokittelemalla valmistettua raehiiekkaa, joka sisältää noin 90 % forsteriittia (Mg_2SiO_4) sekä siihen liuenneena fayaliittia (Fe_2SiO_4) noin 10 %. Lisäksi oliivihiiekat voivat sisältää pieniä määriä karbonaatteja sekä silikaatteja epäpuhtauksina. Oliivihiiekkoja valmistetaan Norjassa sekä Yhdysvalloissa, mutta niitä tuodaan Suomeen vähän niiden pienen kulutuksen johdosta, joka johtuu pääasiassa oliivihiiekan kvartsihiiekkaa suuremmasta hinnasta sekä emäksisyydestä, joka rajoittaa sen käyttöä happokovetteisten kylmähartsihiekkojen kanssa. Oliivihiiekan etuja suhteessa kvartsihiiekkaan ovat sen pienempi lämpölaajeneminen, suurempi jäähdytysvaikutus sekä reagoimattomuus hapettuneen teräksen kanssa. Nämä erot näkyvät parempana valukappaleen laatuna. Oliivihiiekka soveltuu kemiallisen reagoimattomuutensa takia erityisen hyvin korvaamaan kvartsihiiekkaa mangaaniterästen valuissa, joissa kvartsihiiekalla esiintyy paljon teräksen kiinnipureutumista hiekkaan, joka nostaa puhdistuskustannuksia huomattavasti. [2 & 3]

2.1.1.4 Zirkonihiekka

Zirkonihiekka on raskaista kivennäisistä erotettua ja rikastettua hiekkaa, joka on puhdauteltaan noin 98-99,5 % zirkoniumoksidia ($ZrSiO_4$). Zirkoniumhiiekkaa tuodaan Suomeen Australiasta ja USA:sta, jotka ovat zirkoniumhiiekan pääasialliset tuottajamaat. Zirkoniumhiiekan raekoko on aina pientä, vaihdellen 0,05-0,20 mm välillä, mitä hyödynnetään hyvien pinnanlaadun omaavien kappaleiden valmistuksessa. Myöskään useimmat valumetallit eivät kostuta zirkoniumhiiekkaa, jolloin metallin kiinnipureutumista ei tapahdu ja näin ollen puhdistuskustannusten kasvua voidaan välttää käyttämällä zirkoniumhiiekkaa kiinnipureutumiselle alttiissa kohteissa. Korkean sulamislämpötilansa ja pienen lämpölaajenemisen johdosta zirkoniumhiiekka soveltuu erityisesti erittäin vaativiin kohtiin, kuten ohuisiin keernoihin tai muihin erityisen rasitettuihin muotin osiin. Tällöin zirkoniumhiiekkaa on käytettävä sekoittamatta siihen muita hiekkkoja, jotta sen etuja päästään hyödyntämään täysimääräisesti. Tavallisesti zirkoniumhiiekan käyttö pelkkänä peitosteena riittää tavanomaisissa valuissa. Korkean hintansa takia zirkoniumhiiekkaa ei kuitenkaan kannata käyttää tavanomaisten valuseosten kanssa kuin edellä mainituissa haastavissa kohteissa ja muuten kaavaushiekkana vain sellaisissa tapauksissa, joissa asetetut vaatimukset ovat erittäin korkeat, kuten runsasseosteisten jaloteräksien ja muuten vaikeasti valettavien metallien valuissa. Kuitenkin hinnaltaan edullisempi kromiittihiiekka on käytännössä syrjäyttänyt zirkoniumhiiekan käytön suomalaisessa valimoteollisuudessa. [2 & 3]

2.1.2 Yleisimmät sideainejärjestelmät

Sideainejärjestelmät voidaan jaotella kolmeen luokkaan [2]:

- savisideaineisiin
- kemiallisesti kovettuviin orgaanisiin sideaineisiin
- kemiallisesti kovettuviin epäorgaanisiin sideaineisiin

Näistä Suomessa käytetään määrältään eniten kemiallisesti kovettuviin orgaanisiin sideaineisiin kuuluvia esterikovetteisia fenolihartsihiekkoja eli kauppanimeltään Alphasetsideainejärjestelmää, jonka jälkeen käytetyimmät sideainejärjestelmät ovat kemiallisesti kovettuviin orgaanisiin sideaineisiin kuuluvat furaanihartsihiekat ja savisideaineisiin kuuluva bentoniittipohjainen tuorehiekkä.

Savisideaineet ovat vanhimpia ja yksinkertaisimpia sideaineita, joiden kaavaus perustuu yksinkertaisesti hiekan mekaaniseen sullontaan muottiin. Savisideaineiden käyttö on yksinkertaista; raakahiekkaan sekoitetaan sideainetta, josta seuraava kuivaseos ei omaa vielä ollenkaan lujuutta. Vasta kun seokseen lisätään vettä, saadaan tuorehiekan lujuusominaisuudet aktivoitumaan. [9] Tuorehiekan lujuus kasvaa veden lisäyksellä tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen veden lisäys pienentää sideaineen synnyttämien sidoksien lujuuksia. Suomessa yleisin käytetty savisideaine on bentoniitti, joka on vulkaanisen tuhkan rapautumistuote. Bentoniitin pääkivennäinen on montmorilloniitti. [2] Bentoniittia ei ole saatavilla Suomen kallioperästä, vaan sitä tuodaan Suomeen muun muassa Yhdysvalloista [1].

Kemiallisesti kovettuvat orgaaniset sideaineet voidaan lajitella niiden koostumuksen perusteella tärkkelyssidenaaineisiin, öljysideaineisiin sekä hartsisideaineisiin [2]. Näistä hartsisideaineet ovat nykyteollisuuden käytössä merkittävimmät orgaaniset sideaineet.

Hartsisideaineet luokitellaan niiden kovettumismenetelmän mukaan joko kylmähartseihin, kuumahartseihin tai kaasuhartseihin. Kylmähartsit nimensä mukaisesti kovettuvat muotteihin tai keernalaatikoihin kemiallisen kovetteen vaikutuksesta ilman erillistä lämmitystä, kun taas kuumahartsit tarvitsevat kovettuaan lämpöä joko ulkoisesta lähteestä tai kuumennetusta mallista. Kaasuhartsit taas kovettuvat nopeasti hiekan läpi puhallettavalla kovetekaasulla. [10] Hartsisideaineet valmistetaan polymeroimalla hartsisideaineiden komponentteja ja ne toimitetaan valimoille nestemäisinä tai liuotettuina orgaanisiin liuottimiin, jolloin ne on helppo annostella ja sekoittaa hiekan joukkoon [2].

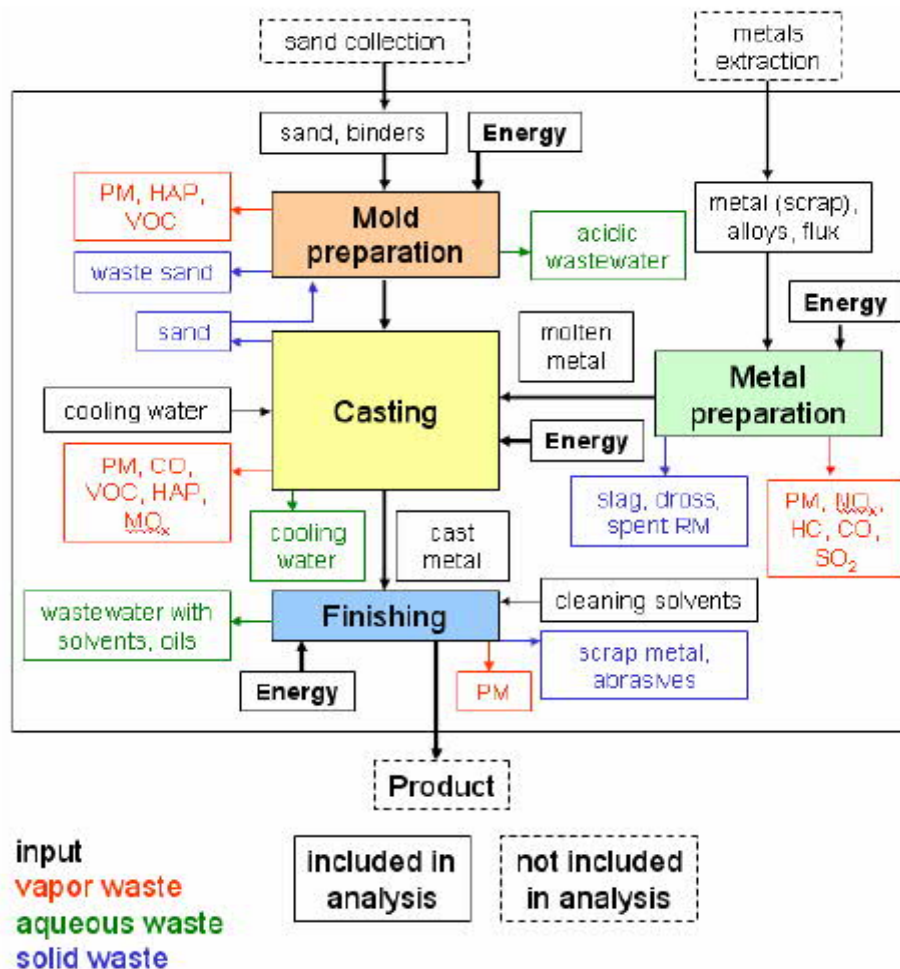
Yleisimmät hartsisideaineet käsin kaavaamisessa ovat furaanihartsi ja fenolihartsi [11]. Furaanihartsi koostuu furfuryylialkoholista, johon on sekoitettu joko ureaformaldehydiä ja/tai fenoliformaldehydiä ja se kovetetaan fosforihapolla [2]. Fenolihartsit ovat fenoli ja formaldehydipohjaisia hartseja, joita käsin kaavatessa kovetetaan estereillä. Esterikovetteiset fenolihartsihiekat (APNB) kehitettiin 1970-luvun lopulla korvaamaan furaanihartsihiekkoja niiden kovettamiseen käytettävän hapon valujen laadulle ja työympäristölle aiheuttamien ongelmien takia [12]. Esterikovetteisten fenolihartsihiekköjen etuja ovat sideainejärjestelmän tyyppi- ja rikkivapaus, erinomainen valukappaleiden pinnanlaatu, laajasti säädeltävä kovettumisaika sekä työympäristöystävällisyys käsiteltäessä, vaikkakin hiekkää käsiteltäessä suositellaan käytettäväksi suojakäsineitä [2].

Lisäksi mainittakoon epäorgaaniset sideaineet, joita Suomessa ei käytetä rautametallivaluissa, mutta joita käytetään Euroopassa alumiinivaluissa sekä laatuvaatimuksiltaan suurissa valuissa keernoissa. Koska epäorgaaniset sideaineet eivät sisällä palavaa orgaanista ainesta, on niiden käyttö erityisesti keernoissa suurien lämpötilojen valuissa edullista, koska keernoissa oleva sideaine ei pala muodostaen valulle haitallisia metalliin tunkeutuvia kaasuja korkeassakaan lämpötilassa.

2.2 Hiekkavaluprosessin päästöt

Perinteiset teollisuuden alat eivät ole joutuneet niin tarkkaan ympäristövaikutusten selvitysten kohteeksi kuin uudet teollisuuden alat. Osaltaan tähän on vaikuttanut valimoyritysten haluttomuus jakaa luotettavaa dataa prosesseistaan, mikä on luonnollista valimoiden usein ollessa yksityisiä voittoa tavoittelevia yrityksiä. Suomessa tähän on puututtu ympäristölainsäädännön ja ympäristölupien avulla, mutta esimerkiksi vähäisestä sääntelystä tunnetussa Yhdysvalloissa sekä kehittyvissä maissa tilanne on toisenlainen. Kuitenkin valumäärien kasvaessa erityisesti kehittyvissä maissa, on valamisen ja sen yleisimmän muodon eli hiekkavalamisen päästöjen oltava tarkastelun kohteena siinä missä muidenkin teollisuuden alojen tuotteiden. Valamisen päästöjä on myös tutkittava, jotta loppuasiakkaille myytävien tuotteiden elinkaariarvioinneista saataisiin todenmukaiset. Esimerkiksi runsaasti valukomponentteja sisältävien autojen elinkaariarviointeja on tehty runsaasti, mutta niiden sisältämistä valetuista osista tiedetään päästöjen osalta huomattavasti vähemmän [13].

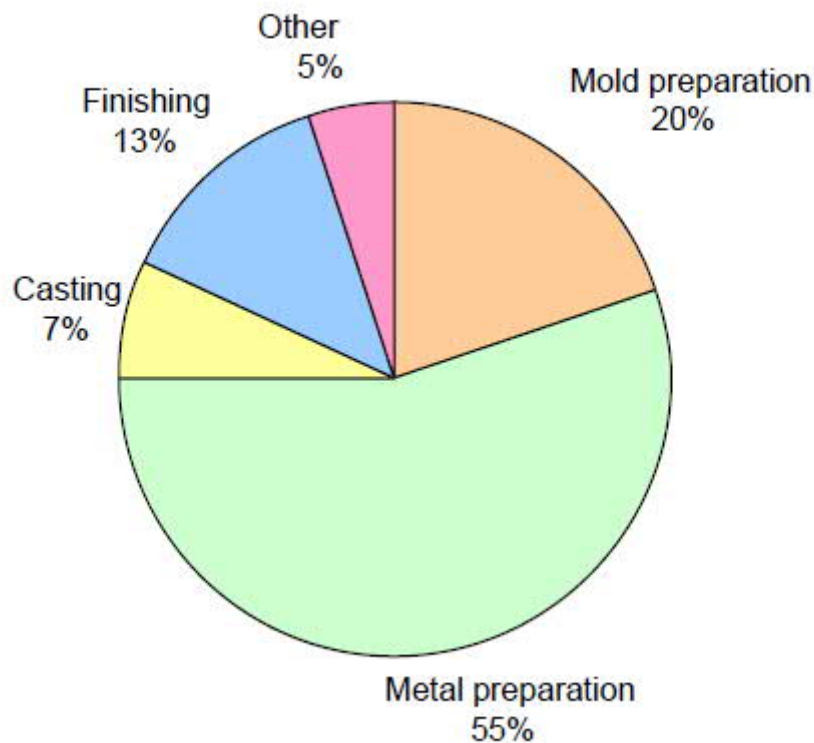
Työssään Dalquist ja Gutowski tutkivat perinteisen hiekkavaluprosessin päästöjä Yhdysvalloissa sekä Yhdistyneissä kuningaskunnissa. Tutkimuksessa tarkasteltiin prosessin kulluttamia resursseja kuten hiekkaa, metalleja, vettä, sekä energiaa, sekä itse valuprosessissa syntyviä päästöjä. Tarkempi kuvaus tutkimuksen systeemirajoista nähdään kuvassa 2. Työssä painotetaan energian kulutusta valutonnin kohden, joten syntyvät päästöt ovat erittäin riippuvaisia sähkön tuotantomenetelmästä sekä metallin sulattamiseen käytetystä tekniikasta. [13]



Kuva 2 Hiekkavaluprosessin systeemirajat sekä materiaalivirrat [13]

Dalquistin ja Gutowskin selvityksen mukaan, jokaista myytyä valutonnia kohden kuluu noin 3200-4400 kWh energiaa informaatiolähteestä riippuen. Data ei kuitenkaan ota kantaa siihen, miten energian kulutus jakautuu eri metallien välillä. Muottien ja keernojen valmistus kulutti noin 300-900 kWh/t, jonka todettiin olevan linjassa teollisuuden esittämän arvion kanssa, jonka mukaan muottien ja keernojen valmistukseen menee noin 20 % valamiseen vaadittavasta energiasta. Energiasta syntyvien päästöjen lisäksi tutkimuksessa todettiin, että muottien ja keernojen valmistuksessa tapahtuvista kemiallisista reaktioista syntyy esimerkiksi furaaanihiekkalla bentseeni, metanoli, tolueni ja fenoli päästöjä ja esterikovetteisilla fenolihartsihiekoilla fenoli ja formaldehydi päästöjä. [13]

Käytetyistä materiaaleista Dalquist ja Gutowski arvioivat, että valimoiden tekemä hiekan kierrätys kulutti noin 300 kWh/t. Tutkimus ei kuitenkaan ottanut kantaa esimerkiksi hiekan valmistuksesta ja kuljetuksesta syntyviin päästöihin. Kuitenkin todettiin, että noin 0,25-0,5 tonnia hiekkaa jokaista valutonnia kohden viedään tutkimuksen kohteina olevissa maissa kaatopaikalle. Vettä valuissa kului noin 1-1,5 tonnia valutonnia kohden. [13] Hiekan kaatopaikkaamisesta syntyy myös ympäristölle haitallisia päästöjä, koska kaatopaikalla valimohiekasta pääsee huuhtoutumaan ympäristöön polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä eli PAH yhdisteitä [14]. Useat PAH-yhdisteet ovat karsinogeneja ja/tai mutaogeneja eli ne voivat altistaa ihmisen sairastumaan esimerkiksi syöpään.



Kuva 3 Hiekkavaluprosessin energian kulutus työvaiheittain [13]

Kuvasta 3 nähdään, että metallin sulatus kuluttaa suurimman osan hiekkavaluprosessin kuluttamasta energiasta. Metallin sulatusmenetelmällä ja energian lähteellä ylipäänsä on siis suuri merkitys hiekkavaluprosessista syntyviin päästöihin, joka taas tekee päästöjen vertailun huomattavan vaikeaksi, koska esimerkiksi sähkön tuotantomenetelmät vaihtelevat suuresti maittain. Tutkimuksen mukaan Yhdysvalloissa ja Yhdistyneissä kuningaskunnissa noin puolet valimoiden käyttämästä energiasta on sähköä, ja loput fossiilisilla polttoaineilla tuotettua lämpöä, mikä johtaa huomattavan suuriin kasvihuonekaasupäästöihin. [13]

2.3 Korkealaatuinen elvytysprosessi ja modernit tekniikat

Korkealaatuksella elvytysprosessilla tarkoitetaan tuotantoprosessia, jossa valimoiden käyttämästä hiekasta saadaan jalostettua neitseellistä hiekkaa ominaisuuksiltaan vastaavaa elvytettyä hiekkaa hyödyntämällä jotain fyysistä, kemiallista tai termistä prosessia. Innovatiivisissa ratkaisuissa näitä prosesseja on myös yhdistelty luomaan korkealaatuisia elvytysprosesseja.

Mekaanisesti hiertämällä käytetystä valimohiekasta saadaan elvytettyä tavallisesti noin 70% [15], mutta yhdistämällä mekaaninen hierto esimerkiksi hiekan pesuun tai termiseen elvytykseen, saadaan jo huomattavasti parempia tuloksia. Sappisen diplomityönsään esittelemää Nuutajärvellä sijaitseva Finn Recycling Oy:n terminen elvytyslaitos

yhdistää juuri mekaanisen ja termisen elvytyksen valimoiden mekaanisesti hiertäessä hiekan juoksevaksi yksiraehiekaksi, jonka jälkeen hiekassa olevat sideaineet poltetaan kemiallisen esikäsittelyn jälkeen rumpu-uunissa [16]. Näin tuotetun hiekan laatua käsitellään myöhemmin tämän työn luvussa 4, mutta hiekasta voidaan tässä todeta sen olevan ominaisuuksiltaan neutseellistä hiekkaa vastaavaa ja elvytyssuhde on noin 95% kun huomioidaan elvytettävästä hiekasta poistettu pöly. Hiekka on kuitenkin neutseellistä hiekkaa emäksisempää, jolloin se soveltuu APNB-hiekaksi, mutta voi olla haastavaa käyttää happokovetteisten furaanihartsien kanssa. Danko on työssään todennut termisen elvytyksen eduksi sideaineen melkein täydellisen poistumisen prosessissa ja prosessin erittäin hyvän hyötysuhteen, mikä nähdään myös Nuutajärven prosessista, sekä prosessissa syntyvän pölyn vähäisen kemiallisen haitallisuuden ympäristölle [17]

Korkealaatuisessa termisessä elvytysprosessissa tuotantokapasiteettia on mahdollista nostaa rikastamalla polttoprosessiin syötettyä ilmaa puhtaalla hapella. Danko on työssään testannut furaanihiekkojen termistä elvytystä rikastetulla ilmalla ja tuloksien perusteella hiekan läpimenoaikoja pystytään lyhentämään ilman rikastuksella [17]. Murphy ja Shaddix taas ovat tutkineet hiilen palamista normaalissa ja rikastetussa ilmassa ja todenneet, että palaminen on nopeampaa ja tapahtuu korkeammassa lämpötilassa, kun poltto toteutetaan rikastamalla ilmaa [18]. Jos sama ilmiö toteutuu myös orgaanisilla yhdisteillä, voidaan termisen elvytyksen lämpötilaa myös laskea, mikä laskisi elvytyksen kustannuksia ja päästöjä lyhentyneen läpimenoajan tuomien hyötyjen lisäksi.

Danko on myös tutkinut mekaanis-kryogeenista elvytystä, jossa hiekka jäädytettiin noin -70 °C, jonka jälkeen sitä hierrettiin mekaanisesti. Jäädytys heikentää sideaineen ja hiekan välisiä sidoksia, jolloin sideaine on helpompaa hiertää irti hiekkarakeista. Tutkimuksessa kuitenkin todettiin, että orgaanisille sideaineille terminen elvytys on tehokkaampi menetelmä sideaineiden poistamiseen. [17]

Märkähierto prosessissa valimohiekka elvytetään hiertämällä sitä mekaanisesti veteen sekoitettuna. Idea on, että veden ja hierron yhteisvaikutuksesta sideaine irtoaa veteen, jolloin sideaine on myös helppo poistaa kokonaan hiekan joukosta veden mukana pesussa. Zanetti ja Fiore tutkivat työssään tuorehiekan elvytettävyyttä juuri märkähierrolla ja tulosten perusteella saavutettu hiekan laatu oli erinomaista. Prosessin heikkouksiksi arvioitiin huomattava lietteen muodostuminen sekä suhteellisen korkeat käyttökustannukset. [19]

Finn Recyclingin Nuutajärven tehtaalle ollaan rakentamassa edellä mainitun kaltaista märkähiertoon perustuvaa elvytyslaitteistoa. Nykyisellä termisen elvytyksen laitteistolla elvytetään vain APNB- hiekkoja elvytetyn hiekan emäksisyyden johdosta, mutta tulevalla märkähierrolla elvytetyn hiekan tulisi kelvata mille tahansa sideainejärjestelmälle. Zanetin ja Fioren mainitsema lietteen muodostuminen on tarkoitus minimoida erottamalla hienoaines mahdollisimman tehokkaasti prosessissa kierrätettävästä vedestä, jolloin saavutetaan myös säästöjä prosessin käyttämän veden suhteen. Kuvassa 4 nähdään Nuutajärvelle asennettu märkähiertolaite. Toisesta päästä allasta syötetään vettä ja hiekkaa, jota lavat pyörittävät ja hiertävät kuljettaen sitä altaan toisessa päässä olevalle putkelle, joka vie hiekan pesuun ja veden erotukseen.



Kuva 4 Finn Recycling Oy:n märkähiertolaite

3 Ympäristövaikutukset

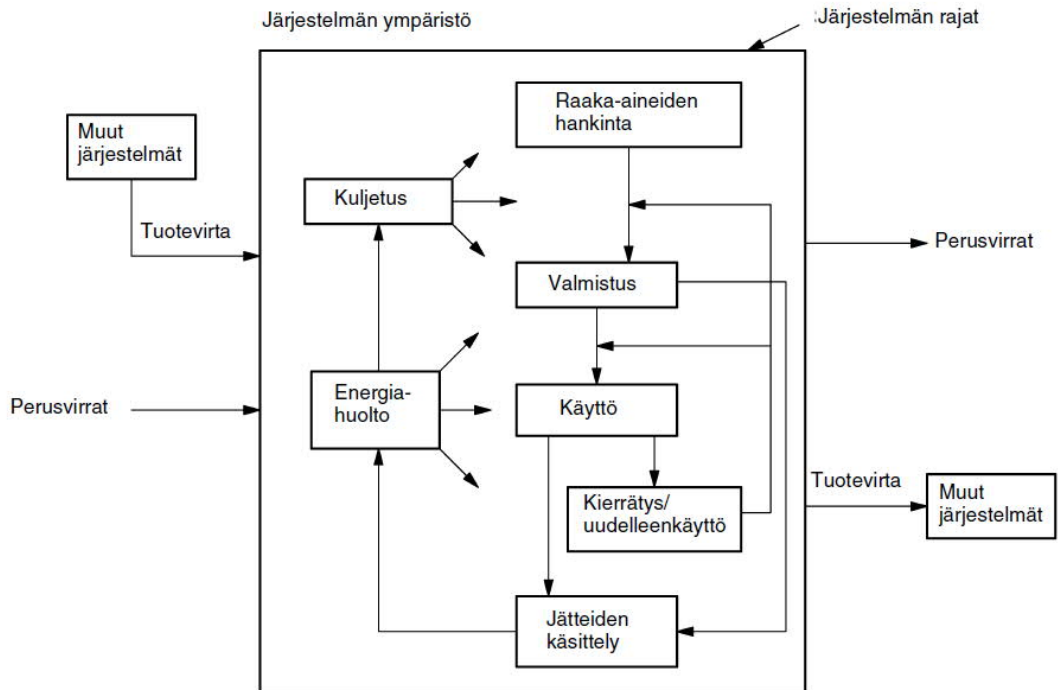
Lisääntynyt tietoisuus ympäristönsuojelun tärkeydestä ja ilmastonmuutoksen torjunnasta lisää paineita vähentää hiilidioksidipäästöjä teollisuuden tuotteiden valmistuksessa. Jotta päästöjä voidaan vähentää, on päästöjen määrät tunnettava ja dokumentoitava vertailukelpoiksi, jotta syntynyttä dataa päästään hyödyntämään ja tuomaan esiin kuluttajille. Yksi tähän tarkoitukseen kehitetty tekniikka on tuotteen elinkaariarviointi eli LCA (Life-Cycle Assessment), jonka käyttökelpoisuuden ja tulosten vertailukelpoisuuden takaamiseksi on elinkaariarviointimenetelmistä asetettu standardi SFS-EN ISO 14040 *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet.*, sekä sitä tukemaan SFS-EN ISO 14044 *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja.*

Tässä luvussa arvioidaan neutseellisen valimohiekan ja termisesti elvytetyn valimohiekan elinkaaren aikana syntyvät hiilidioksidipäästöt ja tuloksia vertaillaan eri kierrätysyysklien lukumäärien mukaisissa skenaarioissa hyödyntäen mainittuja standardeja SFS-EN ISO 14040 sekä SFS-EN ISO 14044. Luvun alussa esitellään standardien mukaisen elinkaariarviointiprosessin pääkohdat ja sen jälkeen siirrytään päästöjen arviointiin standardien ohjeistusta seuraten.

3.1 Elinkaariarvioinnin pääpiirteet

Tuotteen elinkaariarviointi käsittelee ympäristönäkökohtia ja potentiaalisia ympäristövaikutuksia tuotteen koko elinkaaren ajalta raaka-aineen hankinnasta tuotantoon, käyttöön, käytöstä poistoon, kierrätykseen ja jätteiden loppusijoitukseen. Toisin sanoen tuotetta arvioidaan kehdestä hautaan, mikä on elinkaariarvioinnissa vakiintunut termi kuvaamaan koko tuotteen elinkaarta. Arvioinnin toteuttamiseen ei ole yhtä tiettyä menetelmää, vaan organisaatiot voivat toteuttaa elinkaariarvioinnin tässä luvussa mainittujen standardien määrittämällä tavalla organisaatiossa tahdotun soveltamistavan ja organisaation vaatimusten mukaisesti.

Elinkaariarvioinnissa jokaista tuotetta arvioidaan omana tuotejärjestelmänään. Tuotejärjestelmä sisältää yhden tai useamman sille määritellyn toiminnon ja se jaetaan joukkoon yksikköprosesseja. Kuvassa 5 on esimerkki tuotejärjestelmästä, jossa saapuvat perusvirrat voisivat olla esimerkiksi öljyä ja sähköä, lähtevät perusvirrat päästöjä ilmaan, veteen sekä maaperään ja järjestelmään saapuvat ja siitä lähtevät tuotevirrat voisivat olla esimerkiksi kierrätysmateriaaleja sekä uudelleenkäytettäviä komponentteja.



Kuva 5 Esimerkki tuotejärjestelmästä elinkaariarviointia varten [20]

Elinkaariarviointiselvityksessä on neljä vaihetta:

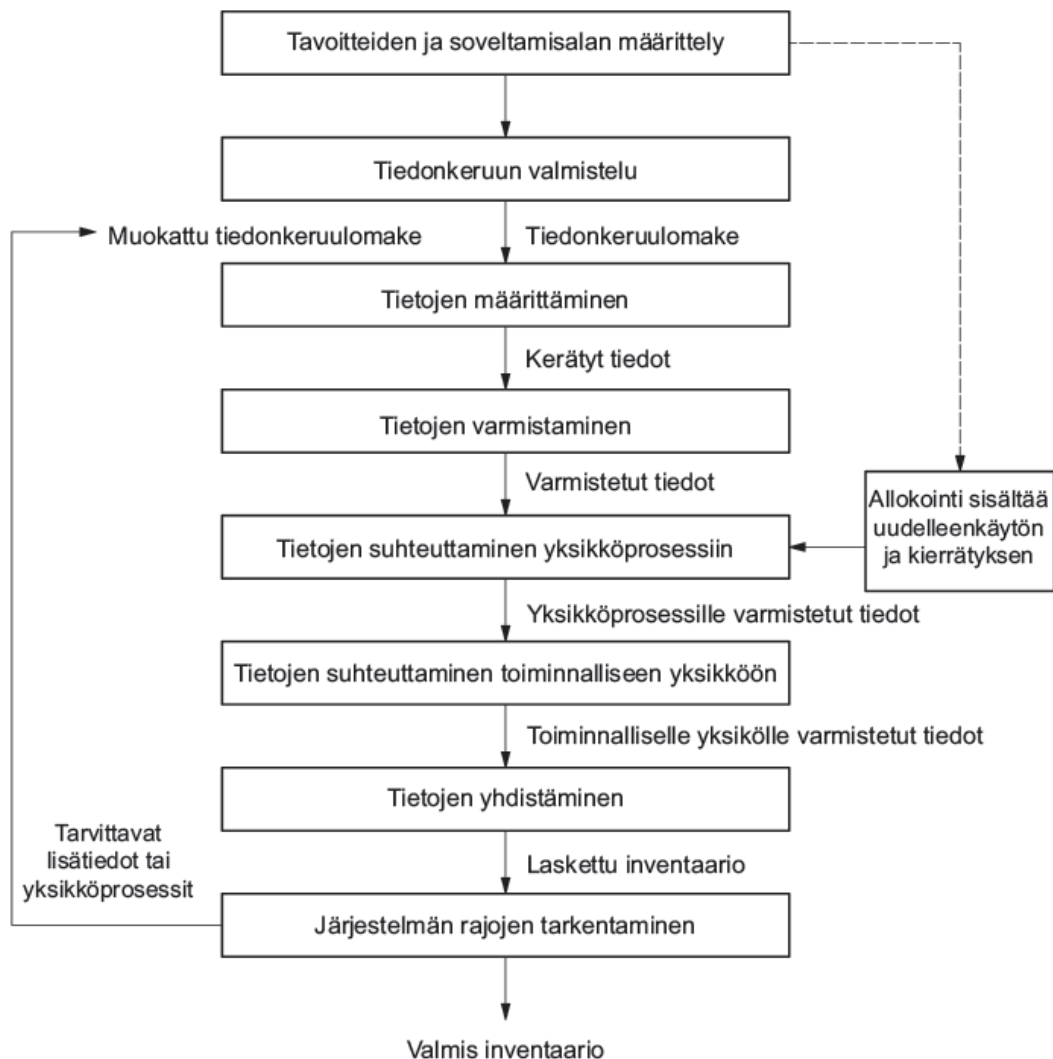
1. tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaihe
2. inventaarioanalyysivaihe
3. vaikutusarviointivaihe
4. tulkintavaihe

[20]

Elinkaariarvioinnin tavoitteissa kerrotaan arvioinnin käyttötarkoitus, syyt selvityksen tekemiselle, kenelle selvityksen tulokset on tarkoitus viestiä sekä aiotaanko elinkaariarvioinnin tuloksia käyttää julkisissa vertailuväitteissä. Soveltamisalan määrittelyssä määritellään tutkittava tuotejärjestelmä, järjestelmän rajat, arvioinnissa tutkittavat ympäristövaikutusluokat, arvioinnissa tiedoille asetettavat vaatimukset, oletukset ja rajoitukset sekä lähtötiedoille asetettavat laatuvaatimukset. Lisäksi määritellään raportin tyyppi ja muoto. [21]

Inventaarioanalyysivaihe sisältää itse tiedon keruun ja ne menettelytavat, joilla tieto saadaan haluttuun määrälliseen muotoon. Inventaarioanalyysi on iteratiivinen prosessi, koska usein tietoa kerätessä ja tuotejärjestelmään paremmin tutustuttaessa tunnistetaan uusia tietovaatimuksia ja –rajoituksia, joiden johdosta tiedonkeruun menettelytapoja joudutaan muuttamaan, jotta selvityksen tavoitteet tullaan saavuttamaan. Tiedon keruun jälkeen suoritettavissa laskentamenettelyissä varmennetaan kerättyjä tietoja ja suhteutetaan

tietoja yksikköprosesseihin sekä muodostetaan tuotejärjestelmien inventaariotulokset. Kuva 6 esittää yksinkertaistetun inventaarioanalyysiprosessin vaiheet. [20]



Kuva 6 Yksinkertaistetut inventaarioanalyysimenettelyt [21]

Vaikutusarviointivaiheessa arvioidaan potentiaalisten ympäristövaikutusten merkittävyyttä inventaarioanalyysin tuloksien avulla. Inventaariotiedot kytketään tiettyihin ympäristövaikutusluokkiin ja vaikutusluokkaindikaattoreihin, jotka ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaiheessa valittu elinkaariarvioinnin pohjaksi. Vaikutusarviointivaiheessa voidaan myös toteuttaa indikaattorituloksien normalisointia, ryhmittelyä ja painotusta, jotta tuloksia voidaan paremmin vertailla keskenään. Inventaarioanalyysivaiheen tavoin myös vaikutusarviointivaihe voi tehdä elinkaariarviointiprosessista iteratiivisen, koska vaikutusarviointivaiheessa voi selvittää, että prosessin alussa valittuihin ympäristövaikutusluokkiin ei löydy tarvittavaa tietoa inventaarioanalyysin jälkeen. Tällöin voidaan joutua määrittelemään elinkaariarvioinnin soveltamisalaa uudelleen valitsemalla arvioinnille tuotejärjestelmää paremmin kuvaavat ympäristövaikutusluokat. [20]

Tulkintavaiheessa inventaarioanalyysissä sekä vaikutusarviointivaiheessa syntyneitä tuloksia tarkastellaan yhdessä. Tulkintavaiheen tavoite on aikaansaada tuloksia, jotka täyt-

tävät elinkaariarvioinnin tavoitteen ja soveltamisalan vaatimukset, ja joiden pohjalta voidaan tehdä johtopäätöksiä ja esittää suosituksia. Tulkintavaiheen tavoite on myös esittää elinkaariarvioinnin tulokset helposti lähestyttävässä ja johdonmukaisessa muodossa määriteltyjen tavoitteiden mukaisesti. [20, 21]

3.2 Ympäristövaikutusten määrittäminen

Työn tavoitteena on määrittää termisesti elvytetyn valimohiekan ympäristövaikutukset eli elinkaari päästöt ja verrata näitä tuloksia neitseellisen hiekan elinkaari päästöihin. Termisesti elvytetyn hiekan elinkaari päästöt lasketaan Finn Recycling Oy:n Nuutajärvellä sijaitsevan elvytyslaitoksen päästöjen mukaisesti ja verrokkina toimivan neitseellisen hiekan päästöt lasketaan, kuin se olisi kulutettu Suomessa, jotta elinkaariarviontien tulokset olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoiset. Seuraavissa alaluvuissa esitetään elinkaariarviointi niin neitseellisestä kuin termisesti elvytetystä valimohiekasta noudattaen standardeja SFS-EN ISO 14040 sekä SFS-EN ISO 14044 siinä laajuudessa, kuin niitä on ollut mahdollista seurata tämän diplomityön laajuus huomioon ottaen.

3.2.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittäminen

Elinkaariarviointeja on tarkoitus käyttää niin akateemisiin tarkoituksiin yliopistolla kuin markkinointiin ja lupahakemusten liitteinä viranomaisilta teollisuudessa. Työn avulla on tarkoitus selvittää termisesti elvytetyn ja neitseellisen valimohiekan ympäristövaikutusten erot, jotta päästäisiin varmuuteen siitä, onko valimohiekan terminen elvytys ympäristön kannalta kannattavampaa kuin neitseellisen hiekan kulutus. Tuloksista on tarkoitus viestiä niin tiedeyhteisölle, teollisuudelle kuin viranomaisillekin.

Tutkittavat tuotejärjestelmät ovat Suomessa käytettävä neitseellinen valimohiekka sekä Suomessa termisesti elvytetty valimohiekka. Diplomityön laajuuden takia vertailu suoritetaan vain yhden vaikutusluokan eli ilmaston muutoksen näkökulmasta ja vaikutusluokkaindikaattoriksi valittiin hiilidioksidipäästöt. Päätöstä tukee myös viimeaikainen ilmaston muutosta käsittelevä keskustelu, jossa hiilidioksidipäästöt ovat nousseet keskiöön, ja niitä yritetään torjua kansainvälisillä sopimuksilla kuten Pariisin ilmastosopimuksella. [22, 23]

Elinkaariarvioinnin tiedot kerätään niin kirjallisuuslähteistä, julkisista tietokannoista sekä termisesti elvytetyn hiekan osalta myös elvytyslaitoksen omasta kulutusdatasta. Arvioinnissa on oletettu, että koska itse valimoprosessin päästöt ovat samat riippumatta siitä, mitä hiekkaa prosessissa käytetään, ovat valimoprosessin päästöt tämän arvioinnin ja vertailun kannalta merkityksettömiä. Lisäksi oletetaan, että neitseellisen hiekan ja elvytetyn hiekan ollessa omia tuotteitaan, joilla on omat elinkaaret, lasketaan elvytetyn hiekan elinkaari alkavaksi siinä vaiheessa, kun valimoprosessissa syntynyt jätehiekkä odottaa päätöstä kaatopaikkaamisesta tai elvytyksestä. Toisin sanoen, koska elvytetyn hiekan raaka-aine on jätehiekkä, ei jätehiekan edellisen elinkaaren päästöjä lasketa mukaan elvytetyn hiekan elinkaareen. Tämä on myös standardin SFS-EN ISO 14040 hyväksymä oletus tapauksessa, jossa jäte muuttuukin uuden tuotteen raaka-aineeksi. Lisäksi, koska arviointi on näin suppea niin kohteidensa kuin vain yhden arvioitavan vaikutusluokan takia, on jo inventaarioanalyysivaiheessa keskitytty vain prosessien kannalta merkityksellisiin päästöihin, ja pienet sekä satunnaiset päästöt on rajattu arvioinnin ulkopuolelle.

Tuotejärjestelmiä tässä vertailevassa elinkaariarvioinnissa on kaksi: neitseellinen hiekka sekä termisesti elvytetty hiekka. Alla käsitellään näiden tuotejärjestelmien kuvaukset.

Suomalaisissa valimoissa käytettävän neitseellisen hiekan elinkaari alkaa Belgiasta, jossa hiekka kaivetaan maaperästä ja kuljetetaan laivalla suomeen Kemiön satamaan. Seulonnan ja kuivauksen jälkeen hiekka kuljetetaan rekoilla valimoille. Lopulta neitseellisen hiekan elinkaari päättyy valimoprosessien jälkeen kaatopaikalle. Näistä hiekan elinkaari-päästöjen laskennan kannalta merkittävät vaiheet ovat hiekan kaivaus ja prosessointi, kuljetus laivalla Suomeen, kuljetus rekoilla valimoille sekä end-of-life päästöt eli hiekan kaatopaikkaamisesta syntyvät päästöt.

Elvytetyn hiekan elinkaari katsotaan tässä työssä alkavan siitä, kun jätehiekka on valimoilla käytettynä ja varastoituna siiloihin tai keoiksi. Hiekka kuljetetaan valimoilta rekoilla elvytyslaitokselle, jossa hiekka kulkee elvytysprosessin läpi ja kuljetetaan takaisin rekoilla valimoille. Kun hiekka on taas käytetty valuihin valimolla, on päädytty takaisin prosessin aloitusvaiheeseen. Koska vielä tässä vaiheessa elvytyslaitoksen kehittämistä ei ole tarkkaa tietoa siitä, kuinka monta kertaa hiekka voi kulkea elvytysprosessin läpi, ei tässä työssä esitettävissä laskuissa lisätä elvytetyn hiekan päästöihin end-of-life päästöjä. Käytännössä prosessissa kiertävän hiekan määrän on arvioitu heikompien rakeiden hajoamisen ja pölynpoiston seurauksena laskevan noin 5% per kierto ja tätä on kompensoitu eri asteisilla neitseellisen hiekan lisäyksillä asiakkaan toiveiden mukaisesti. Merkittävimmät päästöt hiekan elvyttämisestä syntyvät kuljetuksista, sideaineiden ja kaasun palamisesta, prosessin kuluttamasta sähköstä sekä prosessin kuluttaman kaasun valmistuksesta aiheutuvista päästöistä.

3.2.2 Inventaarioanalyysi

Jotta päästöt olisivat arvioinnissa vertailukelpoisia, tulee ne sitoa tuotteisiin. Valimohiekan luonteen takia järkevä yksikkö on tonni(t) eli tuhat kiloa. Näin ollen on luontevaa, että päästöjä laskettaessa tai mitattaessa pyritään tuloksiin, joissa päästään lopuksi hiilidioksidi määrään hiekkatonna kohden eli tässä työssä hiilidioksidikiloa per tonni hiekkaa.

Neitseellisen hiekan yksikköprosesseista, jotka näkyvät kuvassa 7, kerätty data on listattu taulukkoon 1. Samassa taulukossa on myös kerätystä tiedosta johdettu vertailuluku, jonka yksikkö on edellä mainittu CO₂-kg/t.



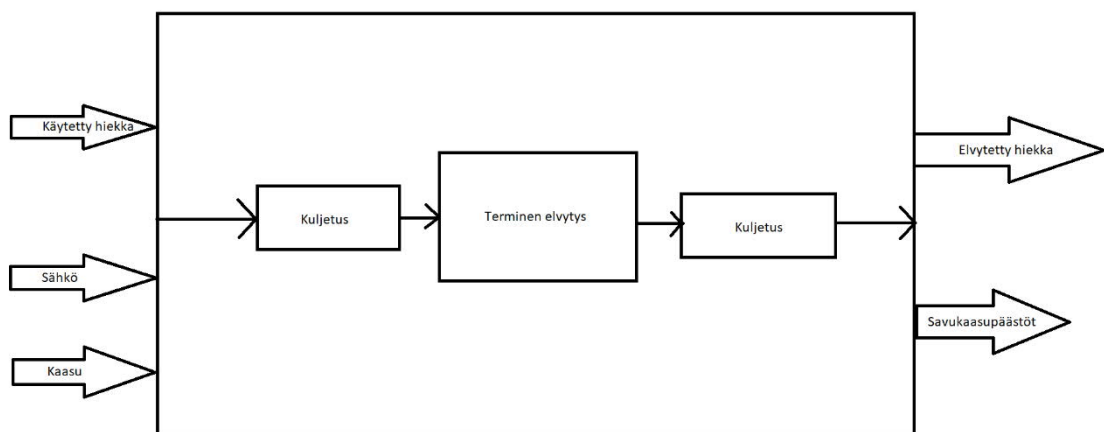
Kuva 7 Neitseellisen hiekan yksikköprosessit

Taulukko 1 Neitseellisen hiekan elinkaaren päästöt

| Yksikköprosessi | Kerätty tulos | Johdettu tulos (CO ₂ -kg/t) |
|------------------------|-------------------------------|--|
| Kaivaus & Prosessointi | 43 CO ₂ -kg/t [25] | 43 |
| Laivaus | 2315 km [26] | 29.417 [24] |
| Maantiekuljetus | 207,5 km [25] | 13.239 [24] |
| End-of-life päästöt | 14 CO ₂ -kg/t [27] | 14 |

Kemiön satamasta valimoille kulkevan maantiekuljetuksen matkan pituus on laskettu kuuden suomalaisen valimon keskiarvoetäisyydestä Kemiön satamaan. Samalla tavalla on myös laskettu elvytetyn hiekan päästöissä elvytyslaitoksen etäisyyden keskiarvo kuuden suomalaisen valimon suhteen. Näin toimimalla on saatu kohdistettua maantiekuljetuksista syntyviä päästöjä enemmänkin osaksi elvytysprosessia, eikä niinkään yksittäisen valimon hiekkasysteemin elinkaari-päästöjä.

Termisesti elvytetyn hiekan yksinkertaistettu tuotejärjestelmä on kuvattu kuvassa 8. Näistä prosesseista kerätty data on listattu taulukkoon 2, joka sisältää myös prosesseista kerätystä datasta johdetut vertailukelpoiset arvot.

**Kuva 8 Termisesti elvytetyn hiekan tuotejärjestelmä****Taulukko 2 Termisesti elvytetyn hiekan elinkaari-päästöt**

| Yksikköprosessi | Kerätty tulos | Johdettu tulos (CO ₂ -kg/t) |
|--|---------------------------------|--|
| Kuljetus valimoilta elvytyslaitokselle | 210 km [28] | 13,431 [24] |
| Termisen elvytyksen savukaasupäästöt | 4.493 m ³ /t [16] | 8,823 |
| Prosessin sähkönkulutus | sähkön kulutus 4,761 kWh/t [29] | 0,524 [30] |
| Kulutetun kaasun valmistuksen päästöt | kaasun kulutus 10,85 kg/t [29] | 5,766 [31] |
| Kuljetus takaisin valimoille | 210 km [28] | 13,431 [24] |

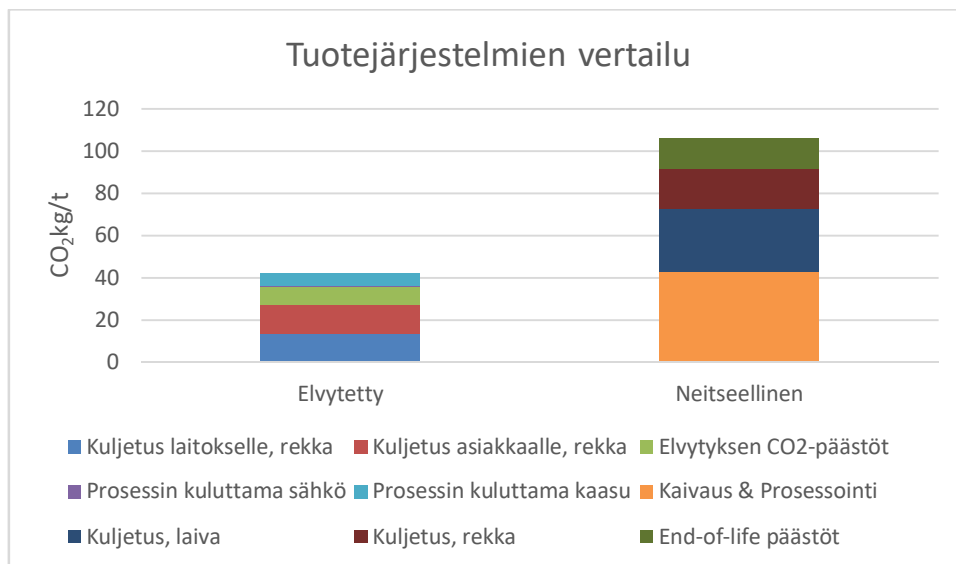
3.2.3 Vaikutusarviointi

Vaikutusarviointi on tässä työssä käytännössä jo suoritettu, koska tavoitteita asetettaessa on jo päätetty, että hiekkojen elinkaaria tarkastellaan vain yhden vaikutusluokan näkökulmasta, ja kaikki tulokset on jo johdettu samaan yksikköön. Lisäksi neitseellisen hiekan kaivauksen ja prosessoinnin [25] sekä termisen elvytyksen kaasun [29] suhteen on jo tehty kyseisten tuotteiden elinkaariarviointilaskelmissa laskijoiden puolesta painotukset, koska kyseisten lähteiden tulokset ovat hiilidioksidi ekvivalenteja, eli niihin on sisällytetty määrättyillä painokertoimilla esimerkiksi hiilimonoksidipäästöt.

3.2.4 Tulosten tulkinta

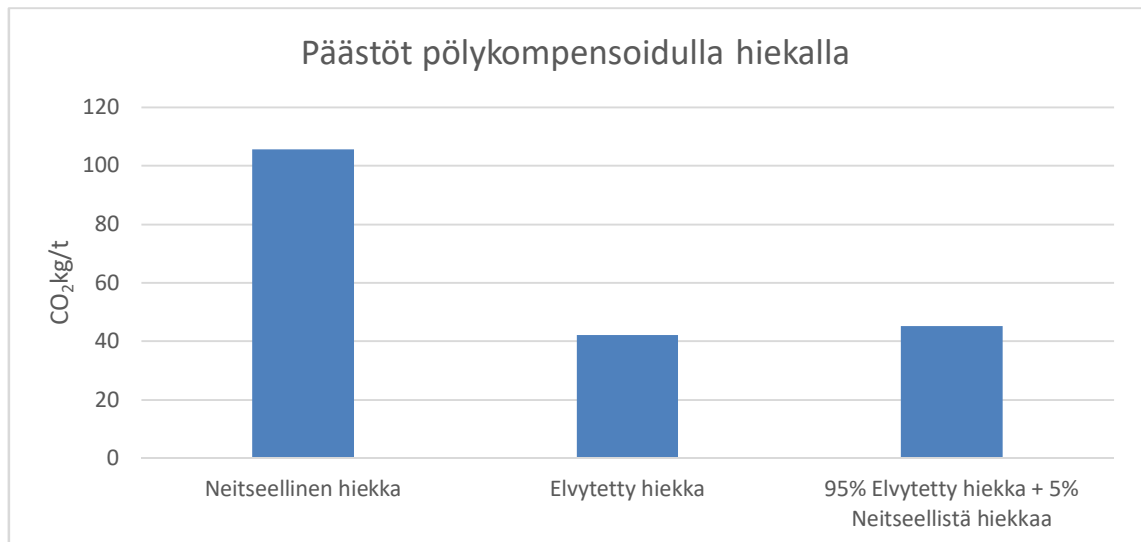
Elinkaariarviointi sisältää merkitykselliset yksikköprosessit kummankin tuotteen kannalta koskien ilmastonmuutosta, ja inventaarioanalyysissä käytetyt lähteet ovat luotettavia. Teollisuuden käyttämän kaasun valmistuksesta syntyvien päästöjen lähde [31] ei ollut tieteellisesti vertaisarvioitu, mutta kyseessä on kuitenkin julkaisu teollisuuden ja ympäristöasiantuntijoiden muodostamalta yhteenliittymältä, jonka tulokset ovat linjassa muiden lähteiden kanssa. Lähteen käyttöön päädyttiin sen sisältämän propaanikaasun tuottamisen päästöjen lukuarvon takia, jota ei muista lähteistä löytynyt.

Alla olevasta kuvasta 9 nähdään, että käytetystä valimohiekasta elvytetyn hiekan päästöt ovat huomattavasti pienemmät jo yhden elvytyskierroksen jälkeen, kuin neitseellisen valimohiekan, ja sama pätee, vaikka neitseellisen valimohiekan käytöstä syntyvistä päästöistä poistaisi hiekan kaatopaikkaamisesta syntyvät päästöt.



Kuva 9 Tuotejärjestelmien vertailu

Kuitenkin käytännössä asia ei ole näin yksiselitteinen, vaan termisessä elvytysprosessissa kierrosta poistuu noin 5 % pölynpoiston ja hartsin palamisen seurauksena. Tätä poistumista tulee siis laskuissa kompensoida neitseellisen hiekan lisäyksenä elvytetyn hiekan prosessin päästöissä.



Kuva 10 Päästöt pölykompensoidulla hiekalla

Kuvassa 10 nähdään vertailu, jossa 5% poistuma on kompensoitu 5% neitseellisen hiekan lisäyksellä. Kuten kuvaajasta näkyy, 5% hiekanlisäyksellä ei ole merkittävää vaikutusta tuotteiden päästöjen eroihin, vaan elvytetyn hiekan päästöt ovat näin edelleen noin puolet neitseellisestä hiekasta.

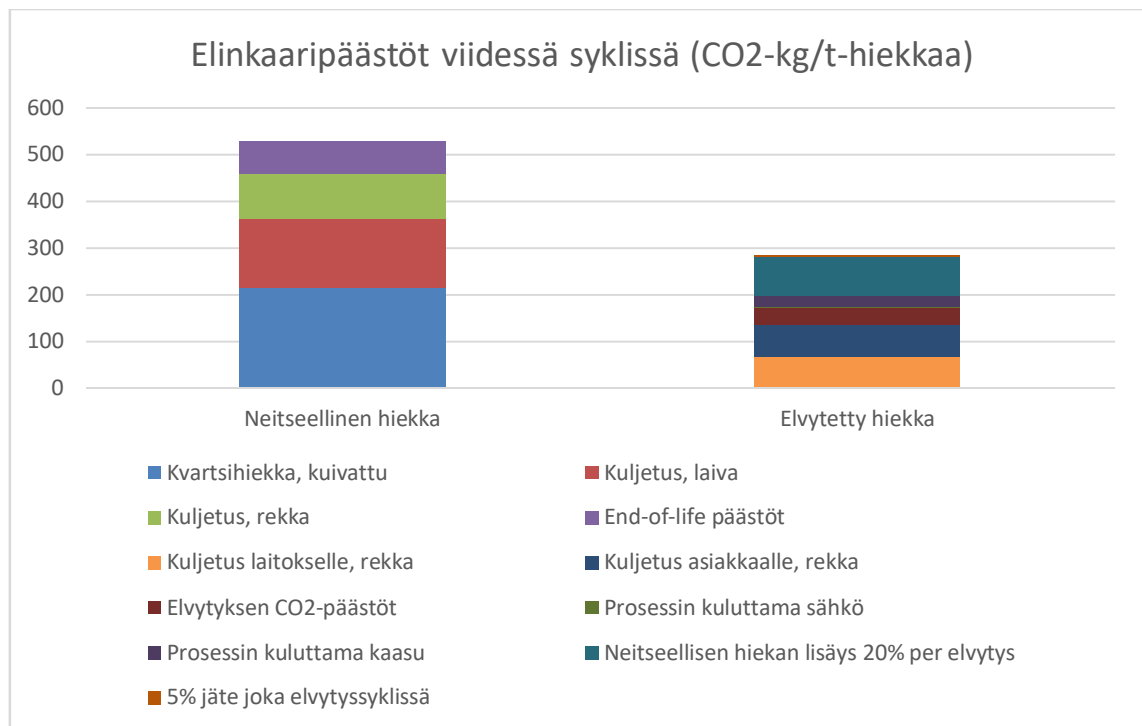
Todellisuudessa valimot eivät vielä käytä 100% elvytettyä hiekkaa eikä 5% neitseellisellä hiekalla kompensoitua elvytettyä hiekkaa, vaan valimot ovat Finn Recyclingin termisen elvytyslaitoksen toiminnan aikana käyttäneet elvytettyä hiekkaa, johon on lisätty noin 10-50% neitseellistä hiekkaa. Osin tässä on taustalla arkuus lähteä käyttämään valimoiden prosesseissa uutta tuotetta, joka ei ole alalla vielä kovin yleisessä käytössä, mutta osin myös se, että pienen neitseellisen hiekan lisäyksen on huomattu parantavan elvytetyn hiekan lujuusominaisuuksia. Pienien koesarjojen tuloksena tämän vuoden aikana on huomattu, että noin 20% neitseellisen hiekan lisäyksellä saadaan tehokkaasti lisättyä elvytetyn hiekan taivutuslujuutta. Optimaalisen hiekan lisäyksen määrittäminen onkin yksi jatkotutkimuksen kohteista ja sitä on tarkoitus tutkia seuraavaksi tämän diplomityön loppuun saattamisen jälkeen.

Tämän noin 20% neitseellisen hiekan lisäyksen takia on järkevää laskea tuosta lisäyksestä johtuva päästöjen kasvu osaksi elvytetyn hiekan päästöjä. Samoin se 5% hiekasta, joka poistuu jokaisessa syklissä pölynä, aiheuttaa vielä tässä vaiheessa lisää päästöjä elvytylle hiekalle kaatopaikkaamisen muodossa, vaikkakin myös tälle poistuvalla ainekselle ollaan parhaillaan kehittämässä uusiokäyttökohdetta. Näin ollen valimolle elvytyslaitokselta lähtevän hiekkakuorman voidaan katsoa koostuvan 80%:sti termisesti elvytetystä hiekasta ja 20%:sti neitseellisestä hiekasta, joiden lisäksi ylimääräinen 5% elvytettyä hiekkaa poistuu kaatopaikalle. Tällä tavalla päästöt saadaan kohdistettua elvytyslaitokselta lähtevän tuotteen määrän mukaisesti, riippumatta valimoilta saapuneen ja elvytyslaitokselta lähteneen hiekkamäärien suhteesta. Koska eri valimoiden käyttämä hiekka on Suomessa muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta raejakaumaltaan samanlaista, pyritään tilanteeseen, jossa valimoilta otetaan vastaan jätehiekkaa elvytyksen raaka-aineeksi, ja elvytettyä hiekkaa lähetetään takaisin valimoille näiden kulloinkin tarvitsema määrä.

Vaikkakin tutkimusta siitä, kuinka monta kertaa sama hiekka voi kiertää elvytysprosessin läpi ei ole vielä tehty, on elvytyslaitoksella kuitenkin arvioitu, että joissakin valimoissa

samaa hiekkaa olisi kokeiluvaiheessa kiertänyt elvytysprosessin läpi jo noin viisi kertaa. Näin ollen viiden syklin vertailu on jo realistista, varsinkin kun hiekasta poistuu jokaisella syklillä heikompaa ainesta ja tuotteeseen lisätään neitseellistä hiekkaa. Ja koska ainakaan tässä vaiheessa ei ole havaittu hiekan ominaisuuksien heikkenemistä johtuen useammista elvytyskiertoista, voidaan alustavasti olettaa, että elvytettyä hiekkaa ei sellaisenaan tarvitse kaatopaikata jonkin tietyn rajallisen kiertomäärän jälkeen, vaan 5% poistuma pölyn muodossa on ainut elvytetyn hiekan elinkaariarviointiin vaikuttava end-of-life päästöjä aiheuttava tekijä.

Näiden kahden edellisen kappaleen oletuksien perusteella voidaankin siis laskea vertailtavat päästömäärät, jotka hiekkojen käytöstä syntyy, kun niitä käytetään viidessä valimosyklissä. Kuvasta 11 nähdään, että käytettäessä viisi tonnia elvytettyä hiekkaa neitseellisen hiekan sijasta, säästetään noin 220,4 CO₂-kg päästöt. Elvytettyä hiekkatonna kohden säästöt ovat siis noin 48,7 CO₂-kg. Koska elvytetyn hiekan sekä neitseellisen hiekan päästöt ovat vakiot, ovat syntyvät säästöt lineaarisia valimoprosessisykliin suhteen.



Kuva 11 Ympäristövaikutukset viidessä syklissä

Vertailun vuoksi lasketaan, että Suomessa valimoissa käytetään vuodessa noin 66 000 tonnia hiekkaa [32]. Jos tämä hiekkamäärä olisikin kokonaan elvytettyä hiekkaa 80/20 suhteella, välttyttäisiin vuodessa siis noin 3,2 miljoonan kilon hiilidioksidipäästöiltä. Se vastaa noin 26800000 ajettua kilometriä uudella autolla [33]. Perspektiivin vuoksi mainittakoon, että kyseinen matka vastaa noin 35 menopaluumatkaa kuuhun.

Elinkaariarvioinnin tuloksista on selvästi nähtävissä, että termisesti elvytetyn hiekan käytöllä on suuri potentiaali vähentää teollisuuden hiilidioksidipäästöjä. Laskuissa käytetyllä 80/20 -sekoituksella saadaan vähennettyä hiekasta johtuvia päästöjä valimoissa 46,1%, mikä on jo erittäin merkittävä säästö. Elvytyslaitoksen prosesseja ollaan myös jatkuvasti

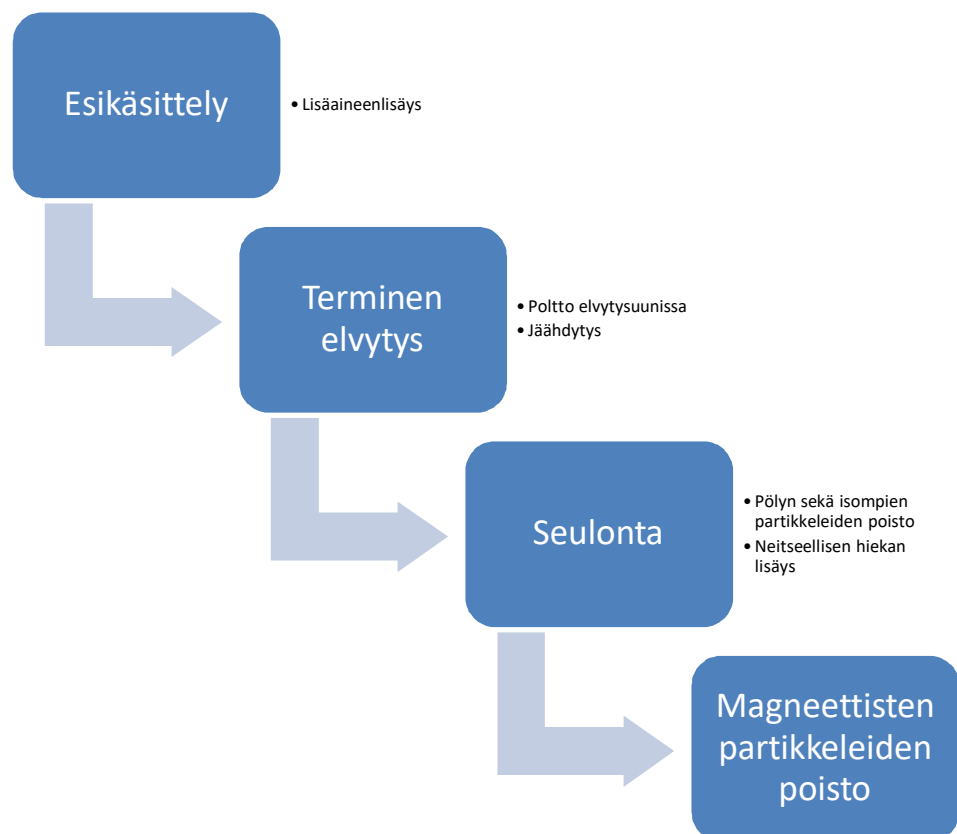
kehittämässä, jolloin säästöjä on mahdollista kasvattaa tulevaisuudessa. Tämä elinkaariarviointi on kokonaisuudessaan iteratiivinen prosessi, ja sitä tullaan jatkuvasti kehittämään tulevaisuudessa prosessin kehittyessä ja tarkemman tiedon ollessa saatavilla.

Kokonaisuudessaan elinkaariarviointi on täyttänyt sille asetetut tavoitteet. Työ onnistuu esittämään neutraalin sekä termisesti elvytetyn valimohiekan ympäristövaikutukset ilmastonmuutoksen suhteen, ja sitä voidaan käyttää verrokkina tulevissa elinkaariarvioinneissa muille elvytysmenetelmille.

4 Laadunhallinta

Ongelmat raaka-aineiden laadussa aiheuttavat valimoille isoja ja turhia lisäkustannuksia, jotka heikentävät niiden kilpailukykyä. Jo muutenkin globalisaation kanssa painivat valimot eivät tarvitse näitä lisähaasteita, ja sen takia laadunhallinnalla on suuri merkitys myös valimohiekan termisessä elvytyksessä. Hyvä laadunhallinta ja tasalaatuinen tuote on myös selvä kilpailuetu muihin hiekantoimittajiin nähden. Ongelmatilanteiden varalta on tärkeää pystyä todistamaan, että hiekka on vastannut sille asetettuja vaatimuksia ja että mahdollinen vika ei ole päässyt syntymään hiekasta johtuvista syistä.

Finn Recyclingin Nuutajärvellä sijaitsevan polttoelvytyslaitoksen tärkeimmät prosessivaiheet nähdään kuvasta 12. Laitoksella elvytetään tällä hetkellä vain esterikovetteista fenolihartsihiekkaa, mutta tarkoitus on alkaa elvyttämään myös furaanihiekkoja sekä mahdollisesti myös tuorehiekkoja, kunhan uusi märkähiertolinjasto saadaan testattua ja siirrettyä tuotantovaiheeseen. Tässä kappaleessa keskitytään prosessista ulostulevan tuotteen laatuun laadunvalvontakokein sekä kehitetään reaaliaikaista polttoprosessin laadunhallintatyökalua, jolla operaattori voisi helposti varmistaa, että koko tuotantoprosessin tärkein vaihe toimii halutulla tavalla.



Kuva 12 Termisen elvytyksen tärkeimmät prosessit

4.1 Laadunvarmistuskokeet

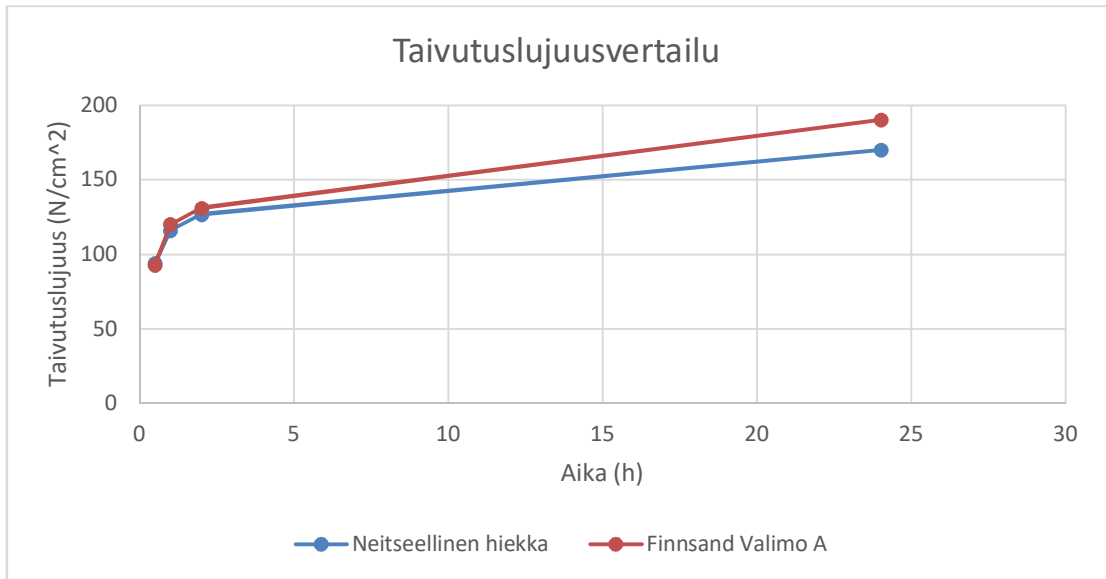
Termisesti elvytetystä hiekasta alettiin tämän työn myötä tekemään jokaiselle asiakasvalimoille viikoittain heidän käyttämästä hiekkasekoituksestaan laadunvarmistuskokeet sekä laadunvalvontapöytäkirja, joka toimitetaan asiakasvalimon laatuosastolle. Valimon hiekkasekoituksella tarkoitetaan sitä suhdetta termisesti elvytettyä hiekkaa ja neutseellistä hiekkaa, jota asiakasvalimo haluaa käyttää. Hiekasta testataan pH, sähkönjohtavuus, hehkutushäviö, keskiraekoko sekä raejakauma ja taivutuslujuus suhteessa 100 % neutseelliseen hiekkaan. Käytössä olevat koemenetelmät ovat samat, joita tuotantolaitoksen ylösajossa tämän työn ohjaajanakin toimiva Tommi Sappinen oli työssään [16] käyttänyt arvioidessaan hiekan laatua. Asiakkaille on luvattu, että elvytetyn hiekan hehkutushäviö ja hienoainespitoisuus ovat kummatkin alle 0,3 %. Laadunvalvonnassa käytetyt koementelmät on selitetty alla.

Sähkönjohtavuus ja pH-arvo tutkitaan standardin AFS 5113-00-S [34] mukaisesti. Näyte, massaltaan 25 ± 0.05 g, sekoitetaan 100 millilitraan ionivaihdettua vettä viiden minuutin ajan, jonka jälkeen näytteen pH-arvo ja sähkönjohtavuus mitataan Hanna Instruments HI98129 mittalaitteella. Ionivaihdetun veden sähkönjohtavuus on lähellä nollaa ja veden pH-arvo säädetään neutraaliksi (pH 7) käyttämällä laimeita HCl- ja NaOH-liuoksia ennen koesuoritusta.

Hehkutushäviöt (LOI) tutkitaan soveltaen standardeja AFS 5100-12-S [35] ja VDG Merkblatt P 33[36]. Kokeen hehkutuslämpötila on 900° C ja hehkutusaika 3 tuntia. Näytteitä, massoiltaan 25 ± 5 g hehkutetaan vastusuunissa ilman suojakaasua. Kaikki näytteet kuivattiin 100° C:ssa ennen hehkutusta. Näytteet asetettiin kuumaan uuniin.

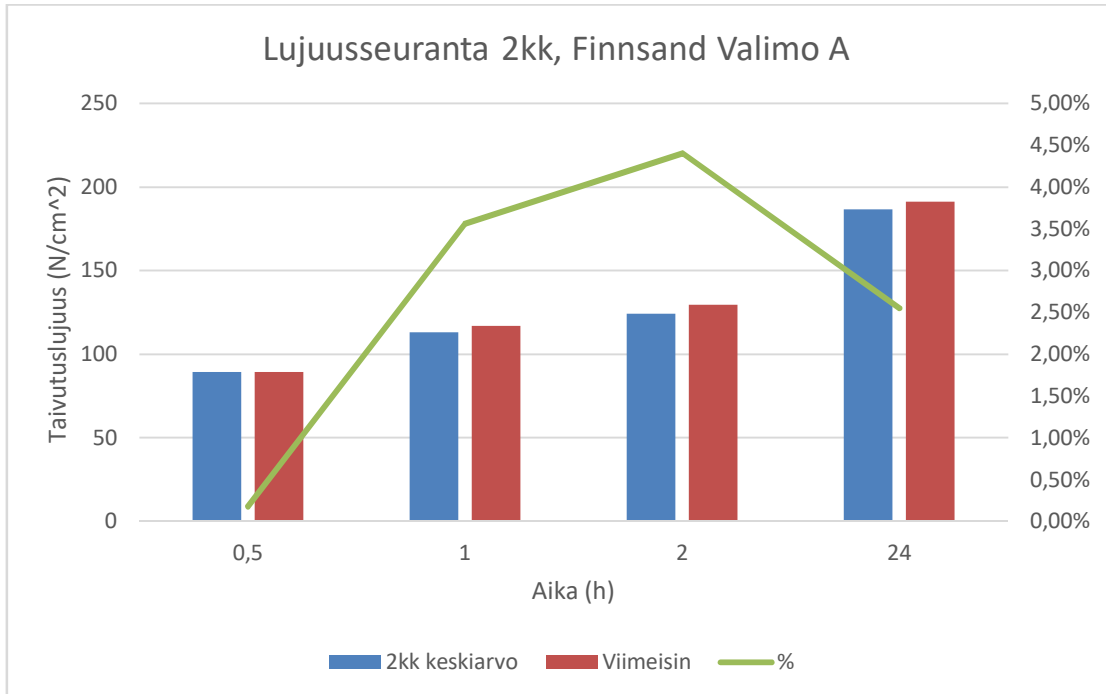
Seula-analyysi, jolla määritetään keskiraekoko sekä raejakauma, toteutetaan soveltaen standardeja AFS 1105-12-S [37], SFS-EN 933-1[38] sekä VDG Merkblatt P 27[39]. Näytteen koko on 50-70 g riippuen näytteenä olevan hiekan ominaispainosta ja koneellisen seulonnan kesto on 15 minuuttia.

Lisäksi näytteestä tehdään koesauvat, joista mitattuja taivutuslujuuksia verrataan neutseellisestä kvartsihiekkasta valmistettuihin sauvoihin. Koesauvojen poikkipinta-ala on standardin VDG Merkblatt M 11[40] mukaisesti $22,7 \times 22,7 \text{ mm}^2$, joita taivutetaan digitaalisella Morek Multiserw LRu-2e lujuuskoekoneella. Hartsia käytetään 1,5% hiekan määrästä ja käytetyllä kovetteella on 3 minuutin työskentelyaika sekä 30 minuutin mallinvento-aika. Kuvassa 13 nähdään erään hiekkasekoituksen taivutuslujuusvertailu ajan suhteen neutseellisen hiekan kanssa. Kuten kuvasta näkyy, on elvytetty hiekka lujuusominaisuuksiltaan yhtä hyvää tai parempaa kuin neutseellinen hiekka. Tämän on arveltu johtuvan elvytetyn hiekan sisältämästä pienemmästä hienoainespitoisuudesta verrattuna neutseelliseen hiekkaan. Suurempi hienoainespitoisuus tarkoittaa suurempaa määrää hiekan pinta-alaa, jolloin tarvitaan enemmän sideainetta, jotta voitaisiin saavuttaa sama lujuustulos kuin vähemmän hienoainesta sisältävällä hiekalla. Näin valimoille kertyy myös selvää säästöä sideainehankinnoissa niiden käyttäessä elvytettyä hiekkaa neutseellisen hiekan sijasta.



Kuva 13 Taivutuslujuusvertailu erään elvytetyn hiekkaseoksen ja neitseellisen hiekan välillä

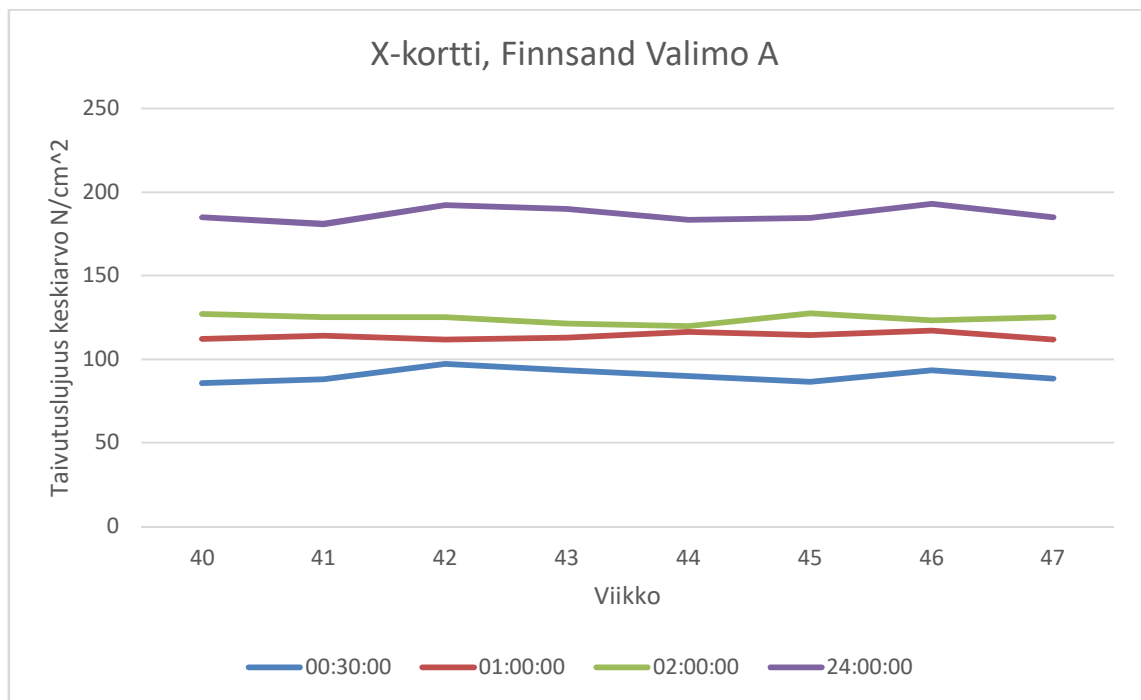
Jotta mitattuja laadunvarmistuskokeiden tuloksia pystytään hyödyntämään, kehitettiin niitä varten erilaisia prosessikontrollissa yleisesti käytettyjä työkaluja. Saatua lujuuksuloksia käytetään kontrollikorttien avulla seuraamaan, esiintyykö prosessin laadussa trendejä suuntaan tai toiseen. Tilastollisessa prosessinohjauksessa käytetty seurantakortti, joka nähdään kuvassa 14, vertaa viikoittain kulloisenkin hiekkaseoksen lujuuksutuloksia 2 kuukauden keskiarvotuloksiin.



Kuva 14 Elvytetyn hiekan lujus seurantakortti

Lisäksi tuloksien eroa seurataan X-korteilla, joista esimerkki nähdään kuvassa 15. Kortti näyttää viikoittain eri kovettumisajoilla saatujen tuloksien keskiarvot kahdeksan edellisen viikon ajalta. X-kortti näyttää siis trendit tuotteen laadussa, mutta sen luotettavuus ei prosessin luonteen takia ole täysin varmaa prosessissa esiintyvien erikoismuuttujien takia.

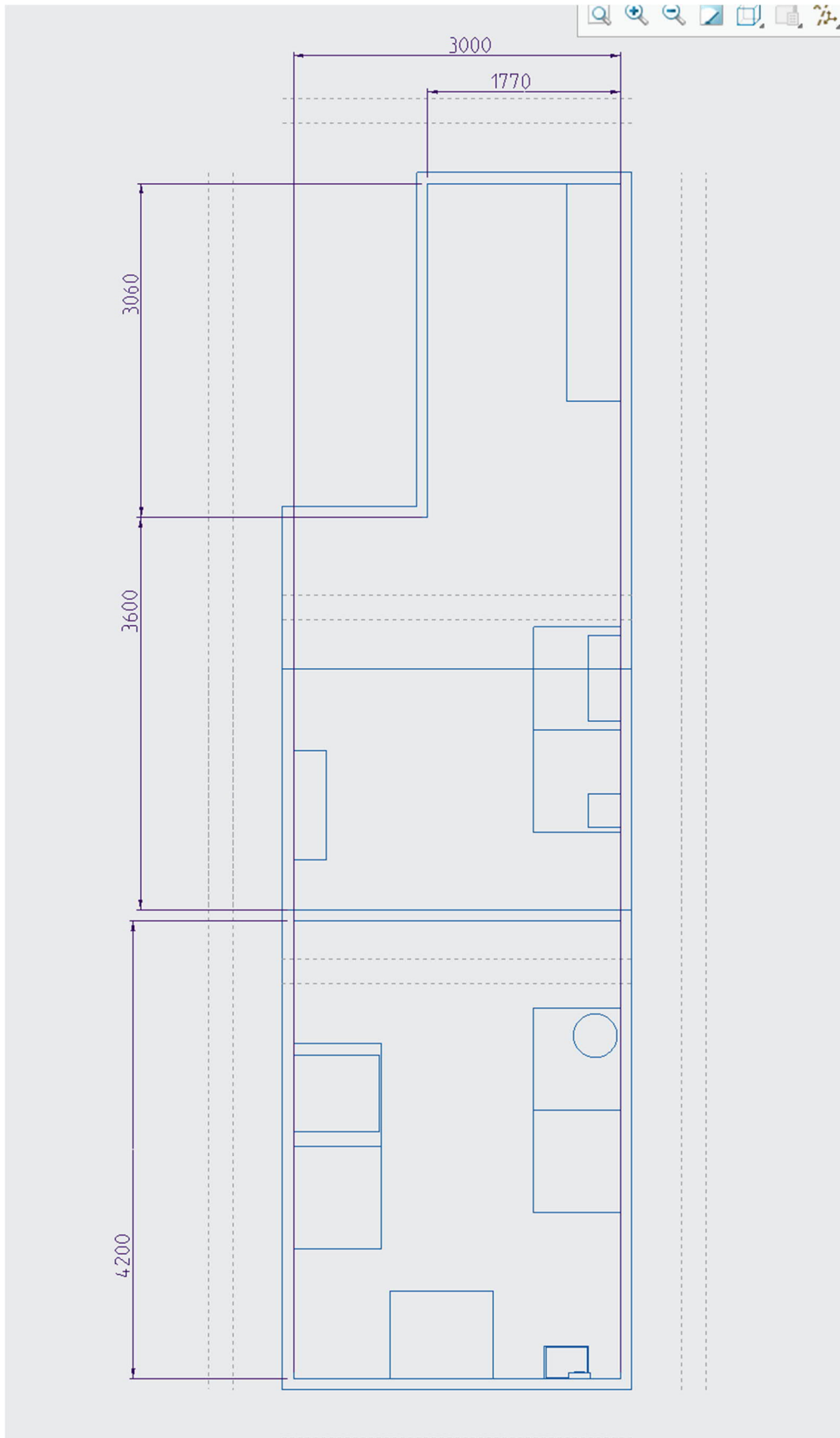
Erikoismuuttajalla tarkoitetaan prosessin ulkopuolista muuttujaa, joka ei ole osa prosessin sisäistä satunnaista vaihtelua. Elvytyslaitoksella tällainen muuttuja on esimerkiksi raaka-aineena käytetty valimoilta saapuva jätehiekkä, jossa voi muuttua esimerkiksi käytetyn hartsin määrä suhteessa hiekkaan tai kromiittihiekan määrä kvartsihiekan joukossa. [41] Samanlaisin seurantakortein valvotaan myös tuotteiden hehikutushäviöitä, hienoainespitoisuutta sekä pölypitoisuutta eli alle 0,1 mm partikkeleiden määrää.



Kuva 15 Erään elvytetyn hiekkasekoituksen X-kortti

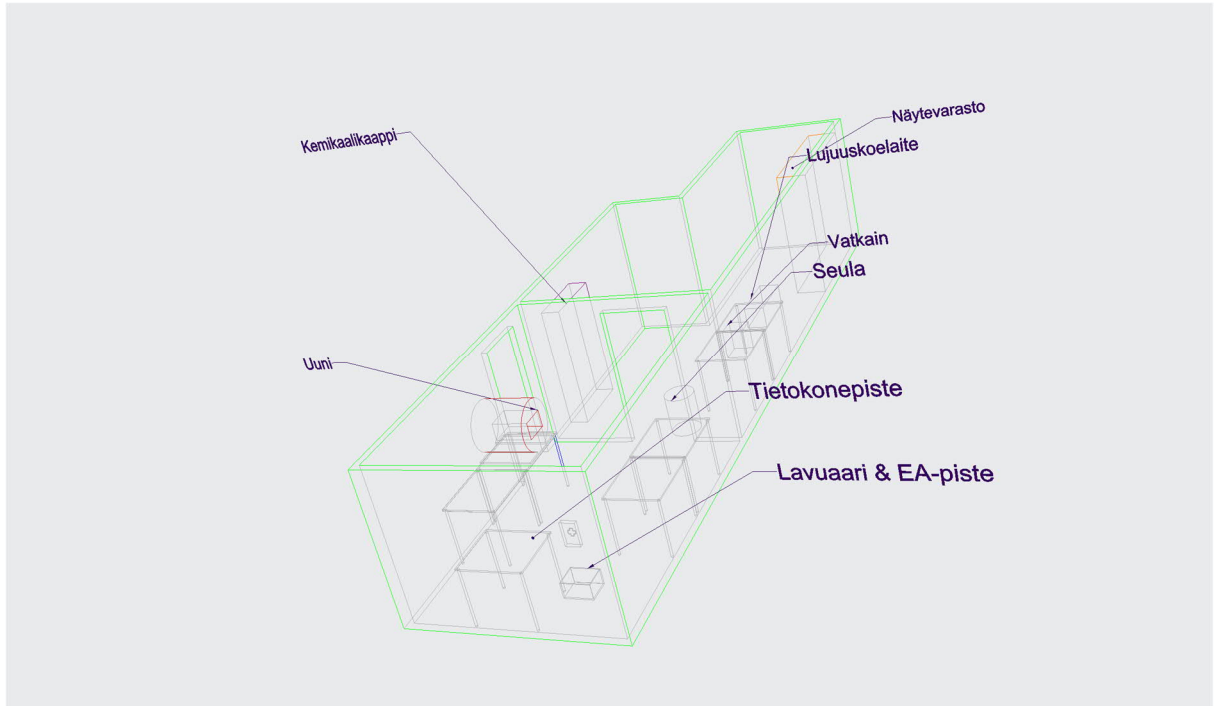
4.2 Elvytyslaitoksen laboratorio

Jotta laadunhallinta olisi mahdollista, tarvitaan tila, jossa tarvittavia kokeita voidaan tehdä. Tähän mennessä kokeet on suoritettu Aalto-yliopiston Valulaboratoriossa, mutta tulevaisuutta varten sekä välimatkan tuomista logistisista haasteista johtuen Nuutajärvellä sijaitsevalle tehtaalle tarvitaan oma laboratorio. Oma laboratorio myös mahdollistaa kokeiden esittelyn nykyisille ja tuleville asiakkaille tehdasympäristössä, sekä laadunvarmistuskokeiden kouluttamisen tulevaisuudessa mahdollisten ulkomaille rakennettavien tehtaiden toimijoille. Tämän takia tässä työssä on myös lyhyesti suunniteltu laboratorio Nuutajärvellä sijaitsevan vanhan lasitehtaan käyttämättömiin tiloihin. Kuvassa 16 on esitelty tulevan laboratorion mittasuhteet.



Kuva 16 Laboratorion pohjapiirros

Joulukuussa 2019 viimeiset laboratoriovarusteet ovat tilauksessa ja tehtaalle vedetyn uuden valokuituyhteyden asennuksen yhteydessä laboratorioon saadaan internetyhteys, joka helpottaa huomattavasti toimintaa. Kuvassa 17 nähdään luonnos laboratorion tulevasta varustuksesta ja sijoittelusta. Varustuksella tulisi pystyä suorittamaan samat kokeet, joita näytteistä on tähänkin mennessä tehty. Lisäksi laboratoriosta on myös hyötyä laitokselle valmistuvan uuden mekaanista hiertoa ja pesua hiekan elvyttämässä hyödyntävän linjan ylös ajossa.



Kuva 17 Havainnekuva laboratorion varustuksesta

4.3 Reaaliaikainen laadunhallinta

Koska hiekanäytteistä suoritettavien kokeiden suorittamiseen menee aikaa, joka hidastaa havaittuihin poikkeamiin puuttumista, tarvitaan elvytysprosessiin osaksi myös reaaliaikainen laaduntarkkailutyökalu, joka mahdollistaa operaattorilta välittömän puuttumisen prosessin laadun tippuessa. Termisen elvytyksen luonteen takia mittariksi valittiin polttoprosessin jäännöshappi, jota tarkkailemalla saadaan informaatiota polttoprosessista. Oletuksena työssä on, että polttoprosessissa olevan happipitoisuuden laskiessa tietyn rajan alle, hartsi alkaa palamaan epäpuhtaasti tai paikoittain kokonaan ilman happea pyrolyttisesti, jolloin hiekkaan jäävät orgaaniset ainejäämät heikentävät sideaineiden tehoa kaavauksessa.

Pyrolyysi on reaktio, jossa orgaaniset yhdisteet kuumentuessaan eivät pääse reagoimaan hapen kanssa, vaan alkavat hajota muiksi yhdisteiksi. Pyrolyysireaktion tuotteita ovat yleensä erilaiset hiilivedyt, hiilimonoksidi, fenolit ja orgaaniset emäkset. [42] Orgaanisia sideaineita sisältävien valimohiekkojen pyrolyysiä tutkittaessa on huomattu, että hiekkaan jää pieniä määriä epävakaita orgaanisista yhdisteistä kuten esimerkiksi bentseeniä,

fenoleita sekä tolueenia [43]. Pyrolyysiä on historiallisesti käytetty muun muassa puuhii-
len ja tervan valmistuksessa, ja nykyään pyrolyysiä hyödynnetään esimerkiksi muovin
kierrätyksessä [44].

4.3.1 Koesuunnitelma

Työn tavoite oli selvittää kontrollirajat polttoprosessin jäännöshapelle, joiden alapuolelle
mentäessä tuotteen laatu alkaa kärsimään. Näin saataisiin automaation avulla luotua linjaa
operoivalle työntekijälle mittari, joka alkaisi hälyttämään jäännöshapen tippuessa kont-
rollirajan alapuolelle. Tarkoituksena oli selvittää jäännöshappi ilmansyötön ollessa täy-
dellä teholla, jonka jälkeen tehtäisiin koeajot hakemalla maksimaalisen jäännöshappilu-
keman alapuolelta sopivalla jaotuksella eri jäännöshappiarvoja, kuitenkin vain noin nel-
jällä eri asetuksella yhteensä, koska kaikki koeajotoiminta olisi pois jo muutenkin tiukasta
tuotantoaikataulusta. Jokaisessa koeajossa otettaisiin näytteet hiekasta, joista tehtäisiin
normaalit laadunvarmistuskokeet, jotka esiteltiin luvussa 4.1. Kaikki muut polttoproses-
sin asetukset pidettäisiin koeajojen aikana vakioina.

Termisen elvytyksen polttouunissa on on/off kytkennällä varustettu lisäilmansyöttö, teh-
dasautomaation ohjaama polttimen ilmansyöttö sekä liukuvalla säädöllä varustettu savu-
kaasuja imevä sykloni. Näistä polttimen ilmansyötön arveltiin voivan johtaa ongelmiin
mittauksissa, koska automaation säätelee polttimen tehoa pitääkseen polttouunin lämpö-
tilan asetusarvossaan, jolloin ilmansyöttö on pitkällä aikavälillä tasaista, mutta hetkittäin
epätasaista. Poltinta ei kuitenkaan pystytty ohjaamaan manuaalisesti koska silloin lämpö-
tilat eivät olisi suurella todennäköisyydellä pysyneet vakiona.

Ennen koeajoja syklonia edeltävään savukaasukanavaan asennettiin kuvan 18 mukainen
anturi, jonka käyttöpäate näkyy kuvassa 19. Jo sopivan anturin löytäminen oli hankalaa,
koska anturin tulisi samanaikaisesti kestää sekä kuumia lämpötiloja kuin suuria partikke-
lipitoisuuksia. Pohjana anturin vaatimuksille käytettiin Sappisen diplomityön liitteenä
olevaa aiemman savukaasumittauksen tuloksia [16]. Lopulta päädyttiin valitsemaan sak-
salaisen Lamtecin LT3 KS1D anturipaketti, joka täytti sille asetetut vaatimukset ja jonka
hapen mittausalue on 0-21 % [45].



Kuva 18 Jäännöshappianturi



Kuva 19 Savukaasuanalysaattori

4.3.2 Mittaukset

Mittaukset saatiin suoritettua elvytyslaitoksella 5.12.2019. Koska käytössä ollut aika oli rajallinen, eikä se olisi riittänyt etsimään syklonin tehoa säätämällä ennalta määriteltyjä jäännöshappiarvoja, päädyttiin ajamaan linjaa neljällä eri ilmansyöttöasetusten kombinaatiolla ja kirjaamaan niiden jäännöshappilukemien keskiarvot. Käytetyt asetuskombinaatiot olivat seuraavat:

- Sykloni 100 % sekä lisäilma päällä
- Sykloni 75 % sekä lisäilma päällä
- Sykloni 50 % sekä lisäilma päällä
- Sykloni 100 % sekä lisäilma pois päältä

Näistä sykloni 100 % teholla lisäilman kanssa on toiminut normaalina asetuksena tuotantoajossa, joten se tuntui luontevalta aloituspisteeltä. Koeajojen alussa koettiin hämmennystä erittäin epäuskottavista jäännöshappiarvoista, joiden syyksi osoittautui asennus- ja käyttömanuaaliin turvautumisen jälkeen väärin kytketyt piuhat. Korjauksen ja koko mitausjärjestelmän huolellisen tarkistuksen jälkeen koeajot pystyttiin aloittamaan uudestaan, ja koeajoista saatiin taulukon 3 mukaiset jäännöshappiarvot.

Taulukko 3 Eri ilmansyöttöasetuksilla saadun jäännöshappipitoisuudet

| Ilmansyöttöasetus | Jäännöshappi (O ₂ -%) |
|---|----------------------------------|
| Sykloni 100 % sekä lisäilma päällä | 13,7 |
| Sykloni 75 % sekä lisäilma päällä | 10,4 |
| Sykloni 50 % sekä lisäilma päällä | 4,5 |
| Sykloni 100 % sekä lisäilma pois päältä | 11,4 |

Sappisen diplomityössä [16] suoritetuissa savukaasumittauksissa APNB-hiekoilla jäännöshappiarvoksi saatiin 17,7%, joka on hieman korkeampi kuin tässä työssä saatu normaalin tuotantoajon mittaustulos. Ero voisi kuitenkin olla selitettävissä sillä, että normaalia tuotantomäärää on nostettu vuoden 2018 alun jälkeen, jolloin myös palavan aineksen määrä polttouunissa on kasvanut. Tällä erolla ei kuitenkaan ole tämän työn tarkoitukseen nähden merkitystä, koska nykyistä anturia tullaan käyttämään jatkossa reaaliaikaiseen jäännöshappiarvojen tarkkailuun, jolloin tuotantoajon jäännöshappia verrataan samalla anturilla määritettyihin kontrollirajoihin.

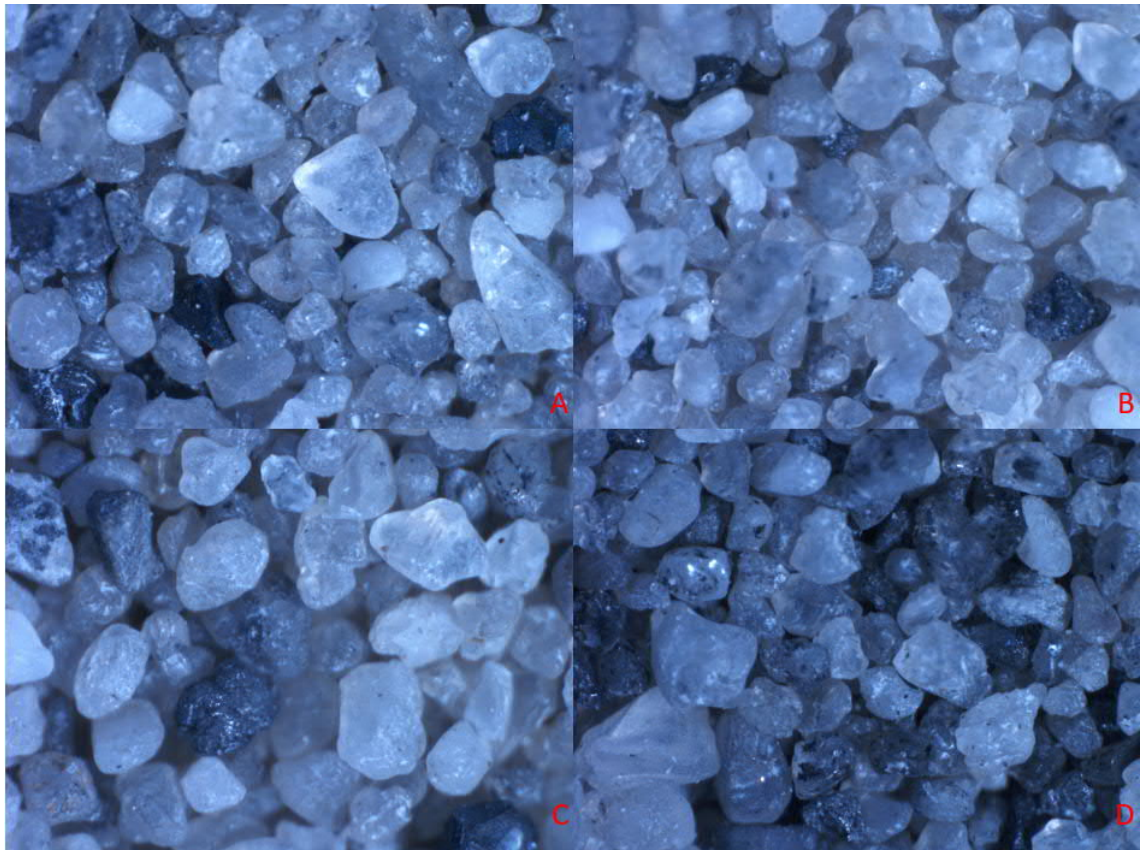
Kuvassa 20 nähdään koeajoista saadut hiekanäytteet 100 % ja 50 % syklonin tehoilla ajettaessa. Hiekka kerättiin jäähdyttimen jälkeen pois linjasta, jotta mahdollisesti huonoa hiekkaa ei päätyisi asiakkaille. Hiekasta otetut näytteet jäähdytettiin kuvassa 20 näkyvissä peltisissä astioissa ennen kuin ne ajettiin seulan ja magneettierottimen läpi. Lopuksi näytteet pakattiin 10 l kannellisiin muovikäpäreihin laboratoriolle kuljettamista varten.



Kuva 20 Väriero 100 % ja 50 % syklonitehoilla saatavasta hiekasta

4.3.3 Tulokset

Alla on esitelty luvun 4.1 mukaiset laadunvarmistuskokeet koeajoista saaduille hiekkänäytteille. Tässä kappaleessa on esitetty tärkein tieto kokeista, ja liitteestä 1 löytyy yksityiskohtaisemmat tiedot kokeiden tuloksista. Kuvassa 21 nähdään makroskooppikuvat hiekkänäytteistä. Kuvista nähdään, että mitä vähemmän savukaasuissa on ollut jäänöshappea, sitä enemmän hiekkajyvien pintaan on jäänyt orgaanisen aineen jäämiä.



Kuva 21 Makroskooppikuvat hiekanäytteistä. A= 13,7% B=11,4% C=10,4% D=4,5%

Taulukossa 4 on listattu hehkutushäviötulokset, joista nähdään hiekan olevan sitä parempaa, mitä suurempi jäännöshappipitoisuus on ollut. Tämä tukisi teoriaa, että epäpuhtaasti palaneeseen hiekkaan jää orgaanisen aineen jäämiä. Kaikki hiekat kuitenkin täyttävät niille asetetun <0,3% hehkutushäviön.

Taulukko 4 Hehkutushäviötulokset(massa-%) eri jäännöshappimäärillä

| O ₂ -% | 13,7 | 11,4 | 10,4 | 4,5 |
|-------------------|------|------|------|------|
| LOI-% | 0,11 | 0,18 | 0,20 | 0,27 |

Taulukosta 5 nähdään, että suurempia eroja hiekkojen välillä ei ollut tarkastellessa pH- ja sähkönjohtavuusarvoja.

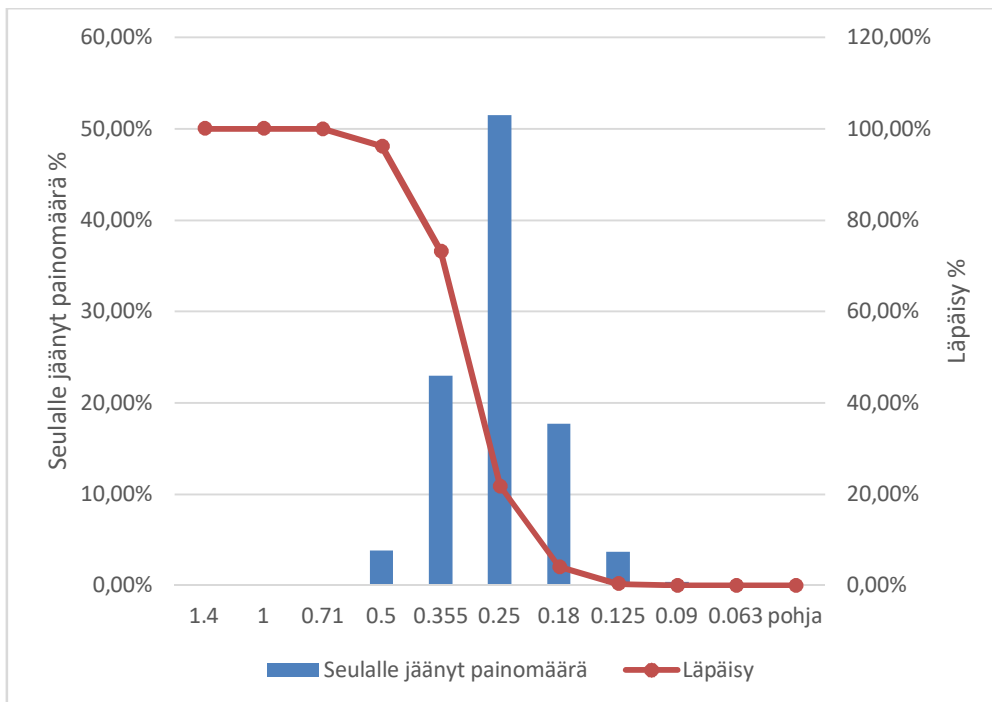
Taulukko 5 Hiekkojen pH- ja sähkönjohtavuusarvot

| Näyte | massa (g) | pH | Sähkönjohtavuus (μS) |
|-------|-----------|-------|----------------------|
| 13.7% | 24.99 | 10.28 | 291 |
| 11.4% | 25.01 | 10.40 | 291 |
| 10.4% | 25.02 | 10.20 | 255 |
| 4.5% | 25.01 | 10.35 | 277 |

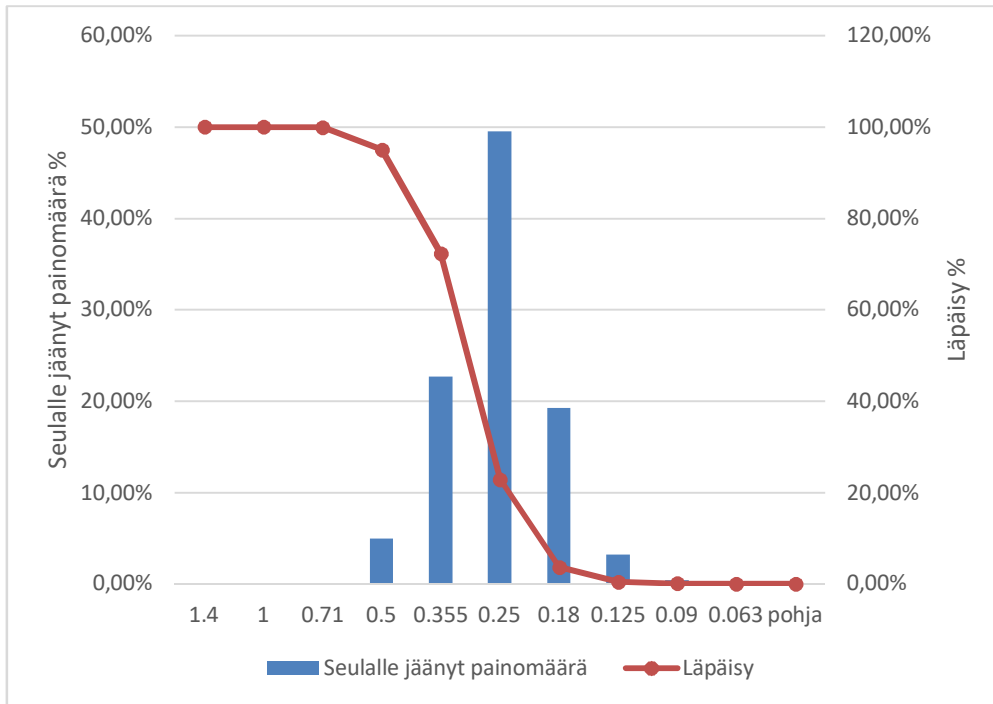
Taulukossa 6 ja kuvissa 22, 23, 24 ja 25 ovat seulakokeiden tulokset. Tuloksista nähdään, että hiekka on ollut tasalaatuista koko koesarjan ajan, joten itse hiekasta johtuvat syyt eivät ole vaikuttaneet tämän työn lopputuloksiin.

Taulukko 6 Seula-analyysin tulokset

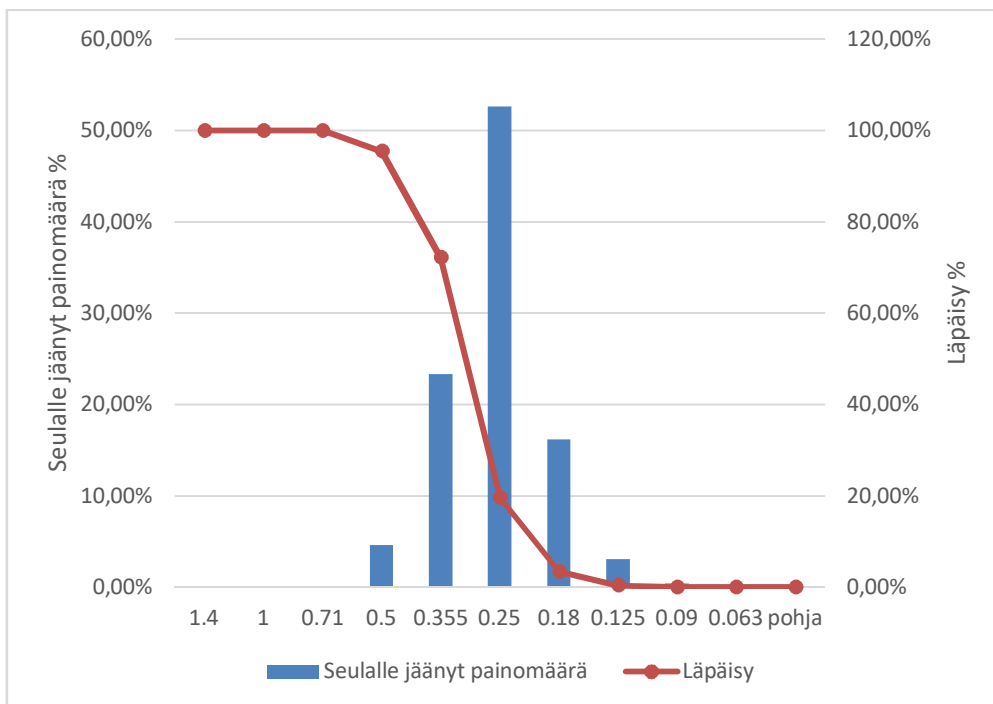
| Hiekkänäyte | 13.7 O ₂ -% | 11.4 O ₂ -% | 10.4 O ₂ -% | 4.5 O ₂ -% |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Keskiraekoko K (mm) | 0.345 | 0.346 | 0.351 | 0.343 |
| Hienoainespitoisuus (%) | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Pölypitoisuus (%) | 0.38 | 0.42 | 0.38 | 0.44 |



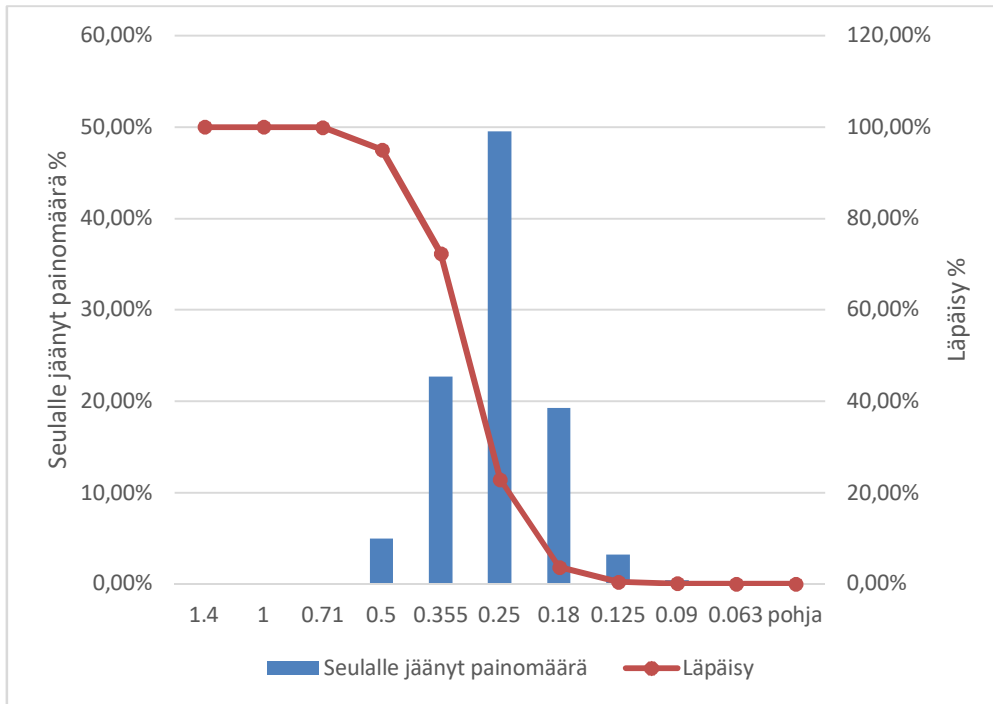
Kuva 22 13,7 O₂-% hiekan raejakauma



Kuva 23 11,4 O₂-% hiekan raejakauma

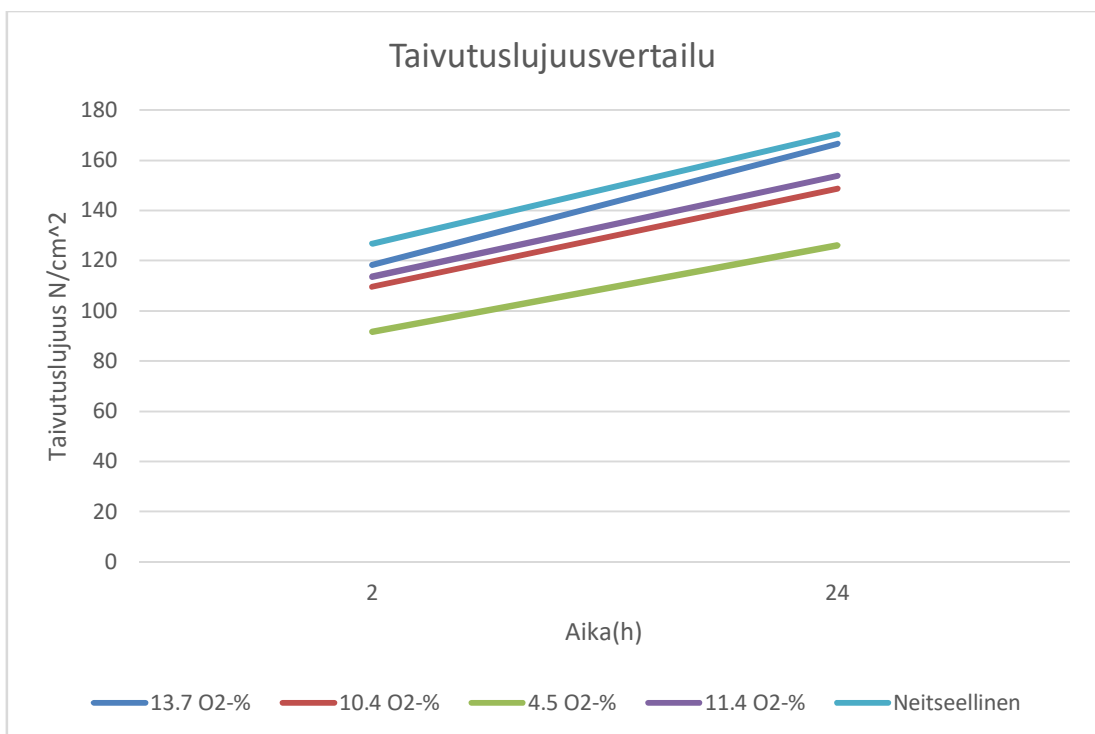


Kuva 24 10,4 O₂-% hiekan raejakauma



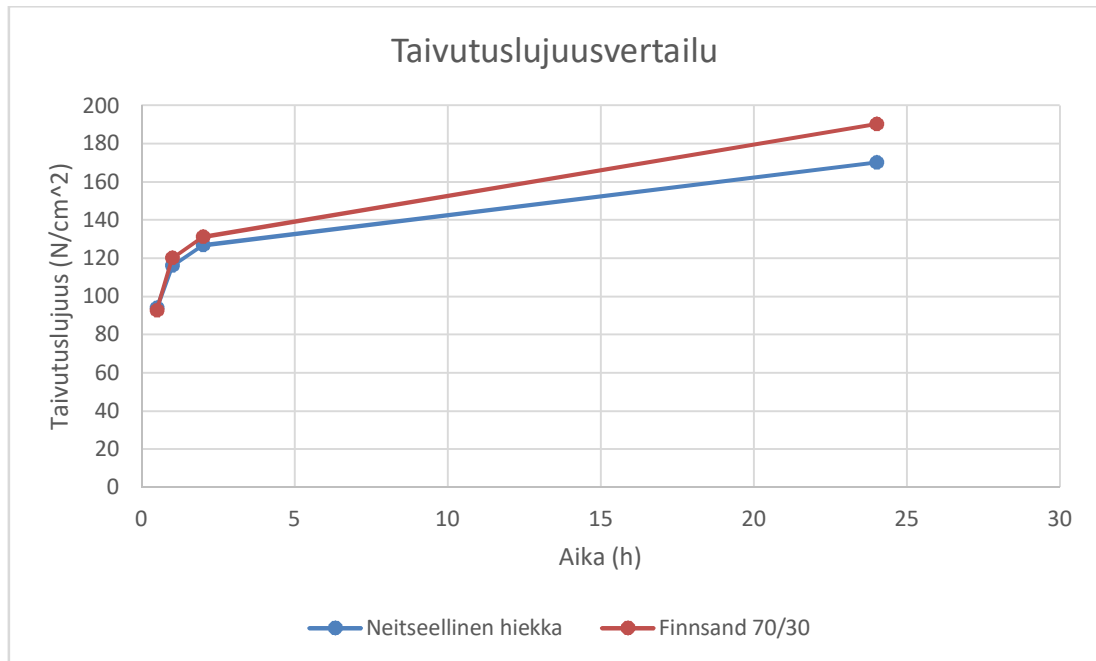
Kuva 25 4,5 O2-% hiekan raejakauma

Hiekkänäytteistä valmistettiin myös 3-piste taivutuslujuuskoetta varten koesauvoja, joista mitattiin kahden tunnin sekä yhden vuorokauden kovettumisajoilla taivutuslujuudet. Kuvasta 26 nähdään, että vain korkeimmalla ilmansyötön määrällä tuotettu hiekka pääsee pitkässä juoksussa lähelle neutseellisen hiekan lujuustasoja.



Kuva 26 Taivutuslujuusvertailun tulokset

Lisäksi 13.7 O₂-% tehtiin myös kattavampi sarja 30 % neitseellisen hiekan lisäyksellä ja sen tuloksia verrattiin neitseellisen hiekan vastaaviin. Kuvasta 27 nähdään että 30 % neitseellisen hiekan lisäyksellä vahvistettu suurimmalla ilmansyötöllä elvytetty hiekka on yhtä lujaa tai lujempaa kuin neitseellinen hiekka.



Kuva 27 Elvytetyn hiekan ja neitseellisen hiekan taivutuslujuuksien tarkempi vertailu

4.3.4 Tulosten tulkinta

Mittaustuloksista on nähtävissä, että kaikki hiekanäytteet täyttävät heikutushäviönsä ja hienoainespitoisuutensa puolesta vaaditut alle 0,3 % arvot. Kuitenkin taivutuslujuuksia tarkastellessa voidaan todeta, että jäännöshapen tulisi olla lähellä 13,7 %, jotta hiekka vastaisi ominaisuuksiltaan neitseellistä hiekkaa. Kontrollirajana voisi toimia esimerkiksi 13 % puolen minuutin mittauskeskiarvolla, jonka alapuolelle mentäessä käynnistyisi hälytys, joka ilmoittaisi operaattorille, että prosessissa on jotain vialla. Noin puolen minuutin keskiarvon seuraaminen on pakollista, jotta välttyttäisiin turhilta hälytyksiltä, jotka vain aiheuttavat ylimääräistä turhaa työtä operaattoreille sekä heikentävät luottoa kyseiseen laadunhallintatyökaluun. Kontrollirajaa ei voi asettaa kuitenkaan liian lähelle mitattua 13,7%, koska mittauksessa saattaa aina ilmetä niin ympäristöstä kuin itse hiekan ominaisuuksista, kuten valimolla käytetyn hartsin määrästä, johtuvaa vaihtelua. Koska asiakkaiden vaatima tuotelaatu saavutettiin suurimmalla mahdollisella ilmansyötön arvoilla, ei kehitetystä laatutyökalusta kuitenkaan saada ulosmitattua kaikkea mahdollista hyötyä. Jos hiekalta vaadittu laatu olisi saavutettu alemmalla jäännöshappilukumella, olisi tuotannossa voitu alentaa ilmansyötöparametrejä valittuun kontrollirajaan, jolloin kertyisi esimerkiksi energiasäästöjä. Kuitenkin nyt saatua tulosta pystytään hyödyntämään myös esimerkiksi prosessin maksimaalisen tuotantokapasiteetin määrittämiseen.

Mainitun hälytyksen luominen on myös yksi seuraavista toimenpiteistä. Jotta kontrollirajan alituksesta johtuva hälytys saataisiin operaattorille nähtäväksi, tulee savukaasuanalysaattorilta vetää kaapeli valvomoon, jota kautta jäännöshappimittausdata saadaan analy-

soitavaksi valvomon koneelle. Tehdasautomaation osaksi tulee yhdessä sen luoneen insinööri-toimiston kanssa koodata oma trendikäyrä jäännöshapelle, ohjelmoida jäännöshapen keskiarvoa laskeva aliohjelma sekä lisätä valvomon hälytyksiin laatuhälytys jäännöshapen keskiarvon alittaessa sille asetettu kontrolliraja. Kokonaisuudessaan tämän ei uskota vievän kuin muutaman päivän henkilötyöpanoksen, koska aiemmin esimerkiksi tuotantomääriä seuraavan laskurin toteutus mainitun insinööri-toimiston kanssa onnistui parissa päivässä.

Operaattoreiden hoitaessa erilaisia huoltotehtäviä, saattavat he satunnaisesti olla pidempiä jaksoja poissa valvomosta. Tämän takia on suunniteltu, että valvomossa olevan kaasuvuodonilmaisuhälytyksen sattuessa operaattoreille lähtisi tekstiviesti, jolloin he saisivat tiedon ollessaan esimerkiksi syömässä taukotilassa tai suorittamassa huoltotöitä jollakin linjaston laitteella. Samaa tekstiviestiratkaisua voisi myös soveltaa käytettäväksi tässä polttoprosessin laatuhälytyksessä.

Kaiken kaikkiaan mittaukset onnistuivat hyvin. Työllä saatiin todistettua, että jäännöshapetta mittaava laadunhallintatyökalu on mahdollinen ja toimiva ratkaisu valvomaan elvytyslaitoksen polttoprosessia.

4.4 Tulevaisuuden kehityskohteet

Seuraavana tutkimuskohteena termisellä elvytyspuolella on optimaalisen lisäyshiikkämäärän selvittäminen. Nykyisellään valimot vaativat omaan kokemukseen tai arvioon perustuen tietyn lisäyshiikkaprosentin. Tämä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia, koska elvytyslaitoksella tulee silloin olla kapasiteettia varastoida jokaisen valimon hiekkaa erillään sekä olla kyseisiä hiekkasekoituksia valmiina kuljetusta varten. Varastointikyvyyn vaatimus kasvattaa infrastruktuurikustannuksia ja hiekan varastointi sitoo pääomaa, mikä on kuitenkin pakollista toimitusvarmuuden ylläpitämiseksi. Pitkässä juoksussa useiden valimoiden kanssa tilanne voi osoittautua kestävämmäksi ottaen huomioon, että likipitään kaikki isot valimot Suomessa käyttävät raejakaumaltaan identtistä hiekkää. Tämän takia tulee tehdä kattavat koesarjat, jotta voidaan selvittää hiekan ominaisuuksien kannalta optimaalinen neitseellisen hiekan lisäys, jotta valimoita voidaan alkaa faktoihin perustuen ohjata kaikkien kannalta teknisesti sekä taloudellisesti kannattavimpaan hiekkasekoituksen käyttöön.

Finn Recyclingin elvytyslaitokselle ollaan rakentamassa uutta hiekan märkähierto- ja pesulinjastoa, kuten aikaisemmin tässä työssä on jo mainittu. Kyseisellä linjastolla on tarkoitus elvyttää sekä furaani- että esterikovetteisia fenolihartsihiekkvoja, ja pesurin veden laatua tarkkaileva ja säätävä laitteisto tulee vattimaan paljon koeajoja sekä säätämistä, samoin kuin koko linjan läpi kulkeva tuote ja linjaston säätö ylipäänsä. Kyseisestä elvytysmenetelmästä tullaan myös tekemään elinkaariarviointi, kunhan koetoiminnasta päästään siirtymään normaalin tuotantoon. Lisäksi yrityksellä on käynnissä tuorehiekkojen elvytettävyyteen liittyvä projekti, joka tulee vaatimaan myös paljon aikaa ja resursseja.

5 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin termisesti elvytetyn hiekan ympäristövaikutuksia sekä kehitettiin tuotantoprosessin laadunhallintaa. Työn alussa tarkasteltiin teoriaa tyypillisistä Suomessa käytetyistä valimohiekoista ja sideaineista, sekä perehdyttiin hiekkavaluprosessin päästöihin sekä korkealaatuisiin elvytysmenetelmiin. Hiekkasysteemeissä keskityttiin erityisesti kvartsi- ja kromiittihiekkoihin sekä esterikovetteisiin fenolihartseihin sekä furaa-nihartseihin niiden ollessa Suomessa yleisimmin käytetyt valimoiden hiekkasysteemien komponentit. Teoriaosaan lopussa käsiteltäessä korkealaatuisia elvytystekniikoita sivuttiin lyhyesti myös Finn Recyclingin uutta märkähiertoon ja vesipesuun perustuvaa elvytyslinjastoa.

Työn ympäristövaikutuksiin keskittyvässä kappaleessa perehdyttiin elinkaariarvioinnin periaatteisiin ja niitä ohjaaviin standardeihin sekä suoritettiin elinkaariarvointi Suomessa käytetyille neitseelliselle ja elvytetylle valimohiekalle. Tutkimuksessa käytettiin kirjallisuuslähteitä sekä elvytyslaitokselta saatua tuotantodataa. Vaikutusluokkana käytettiin ilmastomuutosta ja vaikutusluokkaindikaattorina syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Tulosten perusteella elvytetyn hiekan käyttö suomalaisissa valimoissa vähentää hiekasta johtuvia hiilidioksidipäästöjä noin 46 %, joka on jo erittäin merkittävä säästö.

Työn kokeellisessa osuudessa keskityttiin elvytysprosessin laadunhallinnan kehittämiseen. Suoritetuista laadunvarmistuskokeista saatuja tuloksia alettiin hyödyntämään prosessitrendien seuraamiseen ja elvytyslaitokselle suunniteltiin oma laboratorio laadunhallintakokeita varten. Tärkeimpänä osana kokeellista työtä elvytyslaitoksen polttoprosessiin kehitettiin polttoprosessin jäännöshapteen perustuva reaaliaikainen laadunhallintatyökalu. Tulosten perusteella saatiin asetettua jäännöshapelle kontrollirajat, joiden avulla operaattori pystyy seuraamaan reaaliajassa polttoprosessia. Työ onnistui kaiken kaikkiaan hyvin, vaikkakin kaikkea hyötyä laatutyökalusta ei korkealle asettuneen kontrollirajan takia saatu ulosmitattua.

6 Lähdeluettelo

- [1] Keskinen, R. *Kaavausaineet. Opetushallitus, Hervannan Ammattioppilaitos. 1995. ISBN 952-5059-01-4*
- [2] Autere, E. Ingman, Y. Tennilä, P. *Valimotekniikka 2. Insinööritieto Oy. 1986. ISBN 951-795-140-X*
- [3] Autere, E. Ingman, Y. Tennilä, P. *Valimotekniikka 1. Insinööritieto Oy. 1986. ISBN 951-793-538-2*
- [4] Rajkolhe, R. Khan, J. G. *Defects, causes and their remedies in casting process: A review. International Journal of Research in Advent Technology, 2014, 2.3: 375-383.*
- [5] Siltanen, E. Koponen, M. Kokko, A. Engström, B. Reponen, J. *Valimopölyt. Työterveyslaitos. 1975. ISBN 951-801-000-5*
- [6] *Silikoosi eli kivipölykeuhkosairaus. Työterveyslaitos. Viitattu 27.3.2019. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/tyontekija/ammattitaudit/silikoosi-eli-kivipolykeuhkosairaus/>*
- [7] Asanti, P. *Kromiitti- ja oliviinihiekkojen käyttö rautavalimoissa. Konepajamies, n:o 5. 1978*
- [8] Asanti, P. *Kromiitti- ja oliviinihiekkojen käyttö rautavalimoissa, 2. osa. Konepajamies, n:o 11. 1978*
- [9] Lemon, P.H.R. *Second report of institute working party T30 Mould and core production, The clay bonded process. The Foundryman, s. 221 – 227. Heinäkuu 1993.*
- [10] Keskinen, R. Niemi, P. 17. *Kemiallisesti kovettuvat orgaaniset sideaineet. Valuatlas. 2011.*
- [11] Meiskanen, S. *Valumenetelmät. Valuatlas. 2015.*
- [12] Nybergh, C-J. *AlpHaset®-menetelmä ja sen käyttö. Oy Lux Ab. 2006*
- [13] Dalquist, S. Gutowski, T. *Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: sand casting. ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2004. p. 631-641. DOI: 10.1115/IMECE2004-62599*
- [14] Ji, S. Wan, L. Fan, Z. *The toxic compounds and leaching characteristics of spent foundry sands. Water, Air, and Soil Pollution. 132.3-4: 347-364. 2001.*
- [15] Orkas, J. *Valimohiekkojen elvytysmahdollisuudet Suomessa. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 1993.*
- [16] Sappinen, T. Kronqvist, T. Orkas, J. *Valimohiekkojen terminen elvytys osana teollista symbioosia. Aalto-yliopisto. 2018.*

- [17] Danko, R. *Innovative developments in sand reclamation technologies*. *Metalurgija-Zagreb*. 50.2: 93. 2011.
- [18] Murphy, J. Shaddix, C. *Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments*. *Combustion and flame*. 144.4: 710-729. 2006.
- [19] Zanetti, M. Fiore, S. *Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations*. *Resources, conservation and recycling*. 38, s. 243 – 254. 2002.
- [20] SFS-EN ISO 14040:2006 *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet*. 2. Painos. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 49 s.
- [21] SFS-EN ISO 14044:2006 + A1:2018 *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja*. 2. Painos. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 109 s.
- [22] National Aeronautics and Space Administration NASA. *Vital signs of the planet: The relentless rise of carbon dioxide*. Viitattu 01.10.2019 Saatavissa: https://climate.nasa.gov/climate_resources/24/graphic-the-relentless-rise-of-carbon-dioxide/
- [23] United Nations. *Sustainable Development Goals. Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts*. Viitattu 01.10.2019. Saatavissa: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/>
- [24] European Life Cycle Database of the Joint Research Centre. 2018. Viitattu 15.02.2019. Saatavissa: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>
- [25] Grbes, A. *A Life Cycle Assessment of Silica Sand: Comparing the Beneficiation Processes*. *Sustainability*. 8.1: 11. 2016. DOI:10.3390/su8010011
- [26] Sea Route Calculator. Ports.com. *Etäisyys Amsterdamin satamasta Kemiön satamaan*. Viitattu 10.02.2019. Saatavissa: [http://ports.com/sea-route/#/?a=3030&b=15380&c=Port%20of%20Amsterdam,%20Netherlands&d=Kemie%20\(Kimito\)%20Harbour,%20Finland](http://ports.com/sea-route/#/?a=3030&b=15380&c=Port%20of%20Amsterdam,%20Netherlands&d=Kemie%20(Kimito)%20Harbour,%20Finland)
- [27] ANSYS Granta. *CES Edupack 2019*. Viitattu 19.02.2019. Saatavissa: <https://grantedesign.com/education/ces-edupack/>
- [28] Alphabet Inc. Google Maps. Viitattu 10.02.2019. Saatavissa: <https://www.google.fi/maps>
- [29] Finn Recycling Oy. *Termisen elvytyslaitoksen tuotanto- ja kulutusdata*. Kevät 2019.
- [30] Energiateollisuus. *Sähköntuotannon polttoaineet ja CO₂-päästöt*. 2019. Viitattu: 20.02.2019. Saatavissa: https://energia.fi/files/1414/a_Sahkontuotannon_kk_polttoaineet_Tammikuu.pdf
- [31] Autogas for America: *Total Carbon Emissions For Various Fuels*. 2019. Viitattu 20.2.2019. Saatavissa: <http://www.autogasforamerica.org/why-autogas/cleaner>

- [32] CAEF – The European Foundry Association. *Production ferrous 2017*. Viitattu 19.02.2019. Saatavissa: <https://www.caef.eu/downloads-links/#statistics>
- [33] Liikennefakta.fi: Henkilöautokanta. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. 2019. Viitattu 22.10.2019. Saatavissa: <https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/henkiloautot>
- [34] AFS 5113-00-S, pH of sand. *Mold & Core test handbook*. 4. Painos. Schaumburg, USA. American Foundry Society. 2015. ISBN 978-0-87433-430-2
- [35] AFS 5100-12-S, Loss On Ignition, LOI. *Mold & Core test handbook*. 4. Painos. Schaumburg, USA. American Foundry Society. 2015. ISBN 978-0-87433-430-2
- [36] VDG Merkblatt P 33. *Prüfung von tongebundenen Formstoffen. Bestimmung des Gehaltes an Kohlenstoffträgern*. Verein Deutscher Giessereifachleute VDG. 1997.
- [37] AFS 1105-12-S, Sieve Analysis (Particle Size Determination of Sand). *Mold & Core test handbook*. 4. Painos. Schaumburg, USA. American Foundry Society. 2015. ISBN 978-0-87433-430-2
- [38] SFS-EN 933-1. *Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuu- den määrittäminen. Seulontamenetelmä*. 2012. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- [39] VDG Merkblatt P 27. *Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der granulometrischen Kennwerte*. Düsseldorf. Verein Deutscher Giessereifachleute. 1999.
- [40] VDG-Merkblatt M 11. *Beheizbares Formwerkzeug für die Herstellung von Bieges- täben*. Düsseldorf. Verein Deutscher Giessereifachleute. 1974.
- [41] Grant, E. Leavenworth, R. *Statistical quality Control*. 7. Painos. WCB McGraw-Hill. 1996. ISBN 0-07-116320-4
- [42] Eagleson, M. *Concise Encyclopedia Chemistry*. Walter de Gruyter. pp. 240–. 1994. ISBN 978-3-11-011451-5.
- [43] Dungan, R. Reeves, J.B.III. *Pyrolysis of foundry sand resins: a determination of organic products by mass spectrometry*. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 40.8: 1557-1567. 2005. DOI: 10.1081/ESE-200060630
- [44] Punkkinen, H. Et al. *Pyrolyysin potentiaali jätemuovin käsittelymenetelmänä. Ym- päristökuormitukset ja kustannusvaikutukset*. VTT. 2011. ISBN 978-951-38-7518-3
- [45] Lamtec GMBH. *System Overview: LT3 Lambda Transmitter KS1D Combination Probe*. 2015.

7 Liiteluettelo

Liite 1. Laatukokeiden tulokset eri jäännöshappiarvoilla elvytetyistä hiekoista. 2 sivua.

| Hehku- tushäviö | 13.7% | Hehku- tushäviö | 10.4% | Hehku- tushäviö | 4.5% | Hehku- tushäviö | 11.4% |
|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| Tavoite | <0.3% | Tavoite | <0.3% | Tavoite | <0.3% | Tavoite | <0.3% |
| Näyte 1 alku | 20.38 | Näyte 1 alku | 20.81 | Näyte 1 alku | 21.65 | Näyte 1 alku | 21.46 |
| Näyte 1 loppu | 20.36 | Näyte 1 loppu | 20.77 | Näyte 1 loppu | 21.58 | Näyte 1 loppu | 21.42 |
| Tulos 1 | 0.10% | Tulos 1 | 0.19% | Tulos 1 | 0.32% | Tulos 1 | 0.19% |
| Näyte 2 alku | 23.46 | Näyte 2 alku | 25.09 | Näyte 2 alku | 22.45 | Näyte 2 alku | 22.65 |
| Näyte 2 loppu | 23.43 | Näyte 2 loppu | 25.04 | Näyte 2 loppu | 22.4 | Näyte 2 loppu | 22.61 |
| Tulos 2 | 0.13% | Tulos 2 | 0.20% | Tulos 2 | 0.22% | Tulos 2 | 0.18% |
| Keskiarvotulos | 0.11% | Keskiarvotulos | 0.20% | Keskiarvotulos | 0.27% | Keskiarvotulos | 0.18% |

| Tuote | 13,7% | | |
|--------------------|--------------|---------------------------------------|------------------|
| kovettumisaika (h) | massa (g) | Taivutuslujuus T (N/cm ²) | Keskiarvo |
| 2 | 152.36 | 121.5 | |
| 2 | 152.89 | 114.6 | |
| 2 | 153.93 | 120.4 | |
| 2 | 152.88 | 117.5 | |
| 2 | 152.01 | 117.1 | 118.22 |
| 24 | 152.42 | 170.6 | |
| 24 | 149.27 | 162.1 | |
| 24 | 150.63 | 160.9 | |
| 24 | 151.08 | 164.2 | |
| 24 | 151.9 | 175.2 | 166.6 |

| Tuote | 10.4% | | |
|--------------------|--------------|---------------------------------------|------------------|
| kovettumisaika (h) | massa (g) | Taivutuslujuus T (N/cm ²) | Keskiarvo |
| 2 | 149.31 | 107.3 | |
| 2 | 150.65 | 110.6 | |
| 2 | 153.14 | 111.9 | |
| 2 | 151.23 | 109.2 | |
| 2 | 150.44 | 108.7 | 109.54 |
| 24 | 149.08 | 145.8 | |
| 24 | 151.15 | 149.3 | |
| 24 | 151.66 | 146.2 | |
| 24 | 152.11 | 153.7 | |
| 24 | 148.61 | 148.5 | 148.7 |

| Tuote | 5% | | |
|--------------------|-----------|---------------------------------------|------------------|
| kovettumisaika (h) | massa (g) | Taivutuslujuus T (N/cm ²) | Keskiarvo |
| 2 | 149.38 | 89.2 | |
| 2 | 149.01 | 94.3 | |
| 2 | 152.84 | 91.8 | |
| 2 | 149.57 | 87.2 | |
| 2 | 151.83 | 95.7 | 91.64 |
| 24 | 149.55 | 129.2 | |
| 24 | 152.12 | 125.6 | |
| 24 | 152.17 | 128.7 | |
| 24 | 152.67 | 124.9 | |
| 24 | 149.03 | 121.9 | 126.06 |

| Tuote | 11.4% | | |
|--------------------|--------------|---------------------------------------|------------------|
| kovettumisaika (h) | massa (g) | Taivutuslujuus T (N/cm ²) | Keskiarvo |
| 2 | 151.78 | 115.6 | |
| 2 | 150.45 | 110.2 | |
| 2 | 148.4 | 112.4 | |
| 2 | 151.62 | 118.3 | |
| 2 | 150.14 | 111.3 | 113.56 |
| 24 | 149.93 | 160.3 | |
| 24 | 150.89 | 152.7 | |
| 24 | 150.26 | 147.2 | |
| 24 | 149.71 | 159.6 | |
| 24 | 150.97 | 149.3 | 153.82 |