

NFR-murskeen esikäsittely

Pesulaitosprosessin kehittäminen



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Konetekniikka, insinööri (AMK)

Riihimäen kampus

Syksy 2020

Aki Nurminen

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön aiheena on NFR-murskeen esikäsittely Kuusakoski oy:n Heinolan alumiinitehtaan pesulaitoksella. Työn tilaaja on Kuusakoski oy. Työ on osa laajempaa metallien erotteluprosessien kehitysprojektia ja keskittyy tarkastelemaan pesulaitosprosessin tämänhetkistä tilaa ja mahdollisia ongelmakohtia, sisältäen muutosehdotuksen seulontatehokkuuden parantamiseksi ja laitoksen volyymin kasvattamiseksi.

Työssä tarkasteltiin nykyisen prosessin tilaa, laitteiston mahdollisia ongelmia ja matemaattisesti tämänhetkisen laitteiston teoreettista mitoitus. Osana kehitysprojektia toteutettiin materiaalitutkimuksena kattava seulontakoe, jonka tarkoituksena oli selvittää laitoksen syötteenä käytettävän materiaalin jakautuminen eri fraktioihin.

Nykyprosessin tilaa ja ongelmia tarkastellessa havaittiin kunnossapidon ja prosessin ohjauksen ongelmia, joilla on suuri vaikutus esikäsittelyprosessin seulontatehokkuuteen. Laitteiston mitoituksessa on myös selittämättömiä mitoituksellisia epäkohtia, jolloin tällä hetkellä tavoitteena oleviin materiaalijakaumiin fraktioittain on käytännössä mahdotonta ylittää. Muutosehdotus sisältää matemaattisen tarkastelun uuden laitteiston mitoitukseen, huomioiden tavoitteena olevan kasvun käsiteltävän materiaalin volyymeissa, kuin myös ehdotuksen muiden seulontateknisten ongelmien korjaamiseksi.

Avainsanat prosessinohjaus, kierrätysmateriaalit, seulonta

Sivut 44 sivua

ABSTRACT

The subject of this thesis is pretreatment of non-ferrous residue in Kuusakoski Oy Heinola aluminum washing plant. The commissioner for this project was also Kuusakoski Oy. This thesis project was a part of their large-scale process improvement project for the sorting process of non-ferrous residue. This project showcased the current state of the washing plant. The goal in the project was to point out the washing plant's possible bottlenecks, and to give a proposal for better screening results. The project also studied the possibility to increase the volume of the sorted materials.

This thesis includes a report on the current process and its problems. A mathematical approach to the current screening device capabilities is included as well. A large-scale screening test was also a part of the thesis project as a materials research to define the mass fractions in the feed of the washing plant.

While examining the current state of the process some problems with process control and maintenance were detected. These have a major impact on the screening efficiency of the pretreatment process. In the design of devices there were also some inexplicable faults that made it impossible to reach the fractions as set. The proposal for a new screening process includes a mathematical approach to designing the new devices by taking into account the possible increase of the feed in the washing plant and the increase on the screening efficiency.

Keywords process control, recycling, screening

Pages 44 pages

Sisällys

1	Johdanto	3
2	Pesulaitoksen prosessissa käsiteltävät materiaalit	4
2.1	NFR-murske	4
2.2	Zorba ja Twitch (levy-/valumurske)	6
2.3	Polttolaitosmetallit	6
3	Upotuskellutus.....	6
3.1	Periaate	6
3.2	Laitteiston toimintaperiaate	7
3.3	Kellutusrumpu.....	7
3.4	Huomioon otettavaa	8
4	Pesulaitosprosessi	8
4.1	Esiseulonta	9
4.2	Materiaalin syöttö pesulaitokselle.....	9
4.2.1	Huomioita materiaalin syötöstä pesulaitokselle.....	10
4.3	Rumpuseula	10
4.3.1	Huomioita käytössä olevasta rumpuseulasta	12
4.4	Ylitteen käsittely.....	15
4.5	NFR <40 mm jatkokäsittely	16
4.6	NFR 40 mm-120 mm jatkokäsittely.....	18
5	Prosessivesi pesulaitoksella.....	19
5.1	Prosessiveden kierto	20
5.2	Vedenkierron ongelmat	26
6	Materiaalitutkimus	26
6.1	Toteutus	27
6.2	Johtopäätökset.....	29
7	Uusi prosessi.....	31
7.1	Materiaalin syöttö pesulaitokselle.....	31
7.2	Seulonta	33
7.3	Rumpuseulan matemaattinen tarkastelu	34
7.3.1	Seulontatehokkuus.....	34
7.3.2	Partikkelin liike rummussa	35
7.4	Uuden rumpuseulan matemaattinen tarkastelu	40
7.5	Ylitteen käsittely.....	42

7.6	NFR <50 mm seulonta.....	43
8	Pohdinta	43
	Lähteet.....	45

Lyhenteet ja termit

Alite = seulan leikkauspistettä pienempi materiaali

ASR = Auto Shredder Residue – autojen murskauksessa syntyvä ei-magneettinen jae

Eddy Current = pyörrevirtamenetelmä

ELV = End of Life Vehicle – käytöstä poistettu elinkaarensa loppuun tullut ajoneuvo

Magnetiitti = Fe_3O_4

Ferropii = FeSi15%-jauhe, rauta-pii-jauhe, jossa piitä 15 %

NFR = Non Ferrous Residue – murskainlaitoksen ei-magneettinen jae

NFe = Non Ferrous – ei-magneettinen

UK = Upotuskellutus – nesteen ja metallien ominaispainoon perustuva erottelutekniikka

Ylite = seulan leikkauspistettä suurempi materiaali

a = rumpuseulan reikäkoko

b = materiaalikerroksen paksuus rummun pinnalla

d = partikkelin koko

$E(x_0, x_m)$ = erottelutehokkuus kokoluokassa $x_0 \leq x \leq x_m$

f = osa rummun kierroksesta partikkelin törmäyssyklin aikana

$F(x_0, x_m)$ = osa partikkeleista syötteessä kokoluokassa $x_0 \leq x \leq x_m$

g = putoamiskiihtyvyys

h = korkeus jolle partikkeli nousee rummussa

ℓ = partikkelin etenemä rummussa per törmäyssykli

L = rumpuseulan pituus

M = syöttösuhde

n = haluttuun tehokkuuteen vaadittavat törmäyssykli

p = todennäköisyys partikkelin seuloontumiseen per törmäys

P = todennäköisyys partikkelin seuloontumiseen n määrällä törmäyksiä

Q = seulan reikien suhde koko seulan pinta-alaan

R = seularummun säde

t = partikkelin lentoaika

α = kulma jolle partikkeli nousee rummun keskilinjan yläpuolelle

β = rumpuseulan kallistuskulma

η = partikkelin törmäyskulma kohtisuoraan nähden

ρ_b = materiaalin tiheys rummussa

T = partikkelin viipymä rummussa

ϕ = johdettu vakio

ψ = johdettu vakio

ω = rumpuseulan kulmanopeus

1 Johdanto

Valmistavassa teollisuudessa erilaisten muovien ja muiden keveiden materiaalien käyttö on lisääntynyt huomattavasti viime vuosien aikana. Näillä materiaaleilla pyritään kevyisiin, mutta kestäviin rakenteisiin muun muassa autoteollisuudessa. Toisaalta Euroopan unionin asetukset, esimerkiksi autojen kierrätysasteessa (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi romuajoneuvoista 2000/53/EY/2000) ovat kiristyneet huomattavasti samaan aikaan. Maapallon hupenevat luonnonvarat, metallien osalta, ohjaavat uusiomateriaalien käyttöön valmistavassa teollisuudessa. Kierrätysmateriaalien edullisuus on myös merkittävä kilpailuetu valmistavan teollisuuden markkinoilla. Jos tarkastellaan vaikkapa sekundäärialumiinin tuotantoa verrattuna primäärialumiiniin, on sekundäärialumiinin valmistusprosessin energiankulutus vain noin 5 - 10 % primäärialumiinin vastaavasta. Opinnäytetyön tilaaja Kuusakoski oy sijoittuu liiketoiminnallaan valmistavan teollisuuden syklien väliin materiaalin talteenottajana ja prosessoijana uudelleenkäyttöä varten.

Kuusakoski oy on kansainvälinen kierrätysyritys, jonka Heinolan tehtaiden alumiinitehtaalle tämä opinnäytetyö sijoittuu. Alumiinitehtaalla tuotetaan erilaisia sekundäärialumiinituotteita noin 26000 tn/vuosi. Alumiinin kierrätyksen ohessa talteen otettavia materiaaleja ovat muun muassa kupari, sinkki, messinki, lyijy ja ruostumaton teräs. Tarkemmin opinnäytetyö koskee alumiinitehtaan upotuskellutuslaitoksen esikäsitelyprosessia – pesulaitosta. Pesulaitoksen tehtävä on valmistaa automurskaimelta tuleva NFR-murske ja muut alumiinipitoiset epäpuhtauksia sisältävät materiaalit kellutukselle edulliseen muotoon. Tehtaan sekundäärialumiinin valmistuksessa käytettävästä alumiinista noin 60 % on upotuskellutuksella käsiteltyä alumiinia. Pesulaitos on vanha mutta toimiva, joskin erottelutehokkuudeltaan heikohko. Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella laitoksen toiminnallisia epäkohtia ja pyrkiä erilaisten tutkimusten avulla, joita olivat kierrätettävän materiaalin seulontakokeet ja laitteiden matemaattiset tarkastelut, tehdä muutosehdotus nykyprosessiin pesulaitoksen ja upotuskellutuslaitoksen toiminnan tehostamiseksi ja käsiteltävän materiaalin volyymin kasvattamiseksi.

2 Pesulaitoksen prosessissa käsiteltävät materiaalit

Opinnäytetyön kohteena olevassa prosessissa käsitellään pääasiassa yhtiön omassa kierrätysliiketoiminnassa ja yhteistyökumppaneiden kierrätysprosesseissa syntyviä ei-magneettisia jakeita. Yhteinen nimittäjä näille prosessin raaka-aineille on erilaiset hienojakoiset epäpuhtaudet, jotka pyritään poistamaan tässä esikäsittelyprosessissa, jotta ne eivät rasittaisi itse upotuskellutus-prosessia, joka on metallien erotteluprosessin seuraava vaihe. Pesulaitosprosessin päätehtävä on käsitellä materiaalia kellutusprosessille mahdollisimman edulliseen muotoon. Taulukossa 1 on koonti kaikista kellutusprosessissa käsiteltävistä materiaaleista.

Taulukko 1 Pesulaitoksen syötemäärät vuonna 2019 (Kuusakoski, Tuotantoraportti, 2019)

PipeName	RawMatTN	%
AL	1,956	6%
405402 AI IV - levy-/valumurske (shredder sheet/cast)	1,956	6%
SHRNFR	32,411	94%
650001 NFR - Murske (shredded)	16,169	47%
650006 NFR - Seulonnan ylite (overflow)	170	0%
650010 NFR 15 - 40 mm	189	1%
650014 NFR-murske esikäsitelty	9,592	28%
650202 IN - Polttolaitosmetalli ECS (incinerator)	610	2%
655001 ECS - Rikastetut metallit (Zorba)	1,217	4%
Total	34,367	100%

Kuten taulukosta 1 voimme havaita, on käsittelemätön NFR-murske pääsyöte pesulaitoksella. Esikäsitelty NFR-murske on käytännössä samaa materiaalia, mutta siitä on seulottu hienoainesta (sakkaa) pois. Tämä työvaihe on kuvattu nykyistä pesulaitosprosessia kuvaavassa osiossa.

2.1 NFR-murske

NFR-murske syntyy yhtiön kierrätysliiketoiminnassa peltiromun- ja metalliromun murskauksen yhteydessä. Kansainvälinen termi vastaavalle tuotteelle on ASR (Auto Shredder Residue), koska se syntyy pääosin kierrätettävien autojen murskauksesta. Kuusakoskella murskaimen syöte, on alle 6 mm seinämävahvuudeltaan olevaa pääosin magneettista kierrätysmateriaalia. Tämä syöte on lähinnä sekalaista peltiromua, joka koostuu erilaisista ohutlevytuotteista, joiden maksimi seinämävahvuus on 6 mm ja ELV-autoista. Kun syöte on

murskattu vasaramurskaimella kappalekokoon, joka pääsääntöisesti on alle 120x120mm (vahvuus tuo mainittu max 6 mm, toki myös seinämävahvuudeltaan vahvempia kappaleita myös seassa), erotellaan se kahdeksi jakeeksi, raskas ja kevyt, tuuliseulalla. Raskas jae jatkaa rumpumagneettierottimelle, joka erottelee syötteen magneettiseen fraktioon ja ei-magneettiseen fraktioon. Magneettinen fraktio on käsin varmistuksen jälkeen valmista myyntituotetta, murskattua teräsromua. Ei-magneettisesta fraktiosta pyritään saamaan viimeiset rautapitoiset kappaleet pois vetotelamagneetin avulla, jolloin tuotteena jää ei-rautapitoinen jae (non-ferrous residue, NFR). Keskimääräinen koostumus NFR-murskeelle on esitelty liitteessä. Ominaista tälle materiaalille on metallien lisäksi suuri kumin, muovin, hienoaineksen eli sakan ja puun määrä. Taulukossa 2 on 18 käsinlajittelunäytteen mukaan laskettu NFR-murskeen keskimääräinen koostumus. NFR-murske muodostaa valtaosan, noin 75 %, pesulaitoksen vuotuisesta syötteestä. Taulukko vuodelta 2018 käsinlajittelunäytteiden perusteella tehty analyysi NFR-murskeen materiaalijakaumasta, otanta 18 näytettä.

Taulukko 2 NFR-murskeen keskimääräinen koostumus vuonna 2018, otanta 18 käsinlajittelunäytettä (Kuusakoski, Tuotantoraportti, 2019)

Results	Assayed weighth-%				Sample weight		
	<5 mm	5-15mm	15-40mm	40-120mm	>120mm	g	%
Al		16.3	29.0	29.0	20.3	11481.8	21.2
Al Light		0.5	0.7	0.9	0.0	256.8	0.5
Al+Fe		0.0	1.7	5.0	5.9	1984.8	3.7
Al+metals/non-metals		0.5	1.1	2.5	5.6	1046.6	2.0
Al / Cu Coolers		0.0	0.1	0.3	0.0	71.1	0.1
Metals + metals/non-m		2.2	3.5	3.0	3.2	1326.2	2.4
Mg		0.1	0.1	0.1	0.0	29.1	0.1
Zn		3.3	2.2	0.4	0.0	529.6	1.0
Cu		3.1	1.4	1.0	0.7	556.6	1.0
Brass		3.2	2.9	1.8	0.1	876.1	1.6
Stainless		3.0	6.5	17.1	21.0	5934.2	11.0
Pb		0.3	0.2	0.0	0.0	49.3	0.1
Wires		1.8	1.9	2.8	3.7	942.7	1.8
Fe		1.5	1.1	1.0	0.0	482.1	0.9
Circuit Boards		0.1	0.1	0.1	0.1	57.8	0.1
FluffNonMetal		64.1	47.5	34.7	38.7	18922.6	35.2
-Al / Fe / Muu		0.0	0.3	0.5	0.6	179.8	0.3
Kondensaattorit		0.0	0.0	0.2	0.0	18.7	0.0
		100.13	100.21	100.22	100.19		82.94

Prosenttisummasta puuttuvat kyseisen näytteen kosteus 7,77 % ja hienoaines, eli <5 mm partikkelikooltaan oleva aines 9,29 %.

2.2 Zorba ja Twitch (levy-/valumurske)

Vaikkakin jakeet ovat hieman erilaisia analyttisiltä olemuksiltaan, ne syötetään pesulaitokselle samanaikaisesti niiden hyvin samankaltaisten ominaisuuksiensa vuoksi, eli niissä on metallien lisäksi verrattain vähän epäpuhtauksia. Zorba on käytännössä NFR-mursketta, joka on käsitelty pyörrevirtaerottimella (eddy current). Tässä erotteluprosessissa siitä erottuu metallit ei-metalleista. Twitch on puolestaan pääasiassa alumiinista levy-/valumursketta, joka sisältää verrattain vähän muita metalleja. Zorban ja twitchin keskimääräiset koostumukset on esitetty liitteessä. Koska näiden materiaalien pesulaitos- ja kellutusprosessissa ei ole juurikaan ongelmia, en käsittele opinnäytetyössä näiden jakeiden esikäsittelyä, joskin niiden esikäsittelyprosessi on sama NFR-murskeen kanssa. Zorba ja twitch muodostavat yhdessä 10 % pesulaitoksen vuotuisesta syötteestä.

2.3 Polttolaitosmetallit

Polttolaitosmetallit, joita prosessissa käsitellään, koostuvat yhdyskuntajätteen polttoprosessissa jäljelle jäävästä pohjatuhkasta erilaisilla erottelumetodeilla talteen otetuista NFe-metalleista. Materiaalille ominaista on suuri hienoaineksen, eli sakan määrä. Polttolaitosmetallit muodostavat vain 2 % pesulaitoksen vuotuisesta syötteestä.

3 Upotuskellutus

Pesulaitosprosessi käsittää UK-laitoksella käsiteltävien materiaalien esikäsittelyn siihen muotoon, että itse upotuskellutus olisi mahdollisimman tarkkaa ja tehokasta. Jotta olisi helpompi ymmärtää käsiteltävien materiaalien tarpeellinen esikäsittely (pesulaitosprosessi), käydään ensin läpi upotuskellutusprosessin pääperiaatteet ja toimintamalli.

3.1 Periaate

Upotuskellutus perustuu eri metallien ja ei-metallisten kappaleiden erilaisiin ominaispainoihin. Yksinkertaisuudessaan niin, että neste on ominaispainoa kevyemmät kappaleet kelluvat pinnalla, kun taas painavammat kappaleet painuvat pinnan alle/kellutuslaitteiston (kyseessä olevassa laitoksessa kellutusrumpu) pohjaan. Prosessissa

kelluttavana nesteenä käytetään yleensä vettä, jonka ominaispainoa säädellään magnetiitilla ja/tai ferropiillä. Eli käytännössä yhdessä kellutusympäristössä (rummussa) prosessin syöte voidaan leikata kahteen ominaispainoiltaan eriä oleviin jakeisiin.

3.2 Laitteiston toimintaperiaate

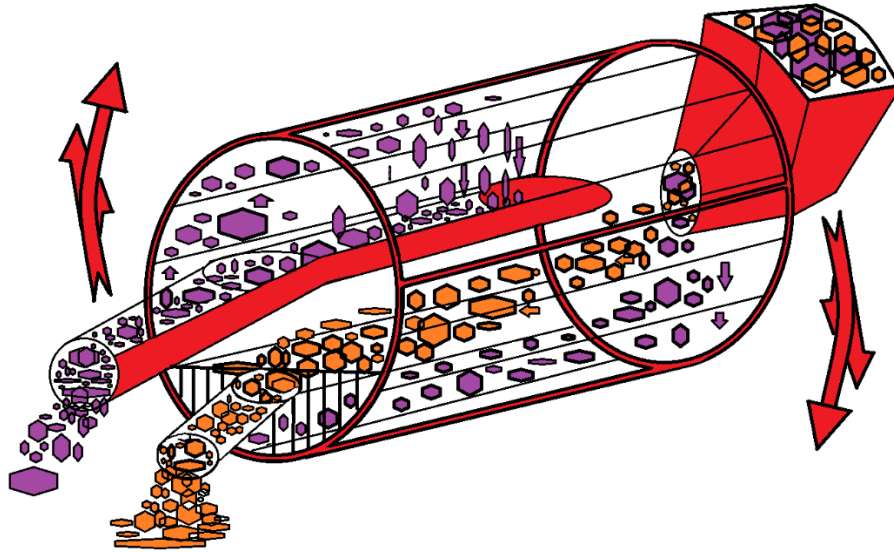
Kuusakoski Oy:n Heinolan alumiinitehtaan UK-laitoksen erotteluprosessi nojautuu kahteen kellutusrumpuun. Näissä rummuista ensimmäisessä on veden ominaispaino nostettu noin 2 kg/l, jotta metallit saadaan erotettua ei-metalleista. Laitoksessa käsiteltävissä materiaaleissa tämä tarkoittaa käytännössä metallien erottamista puusta, kumista ja muovista. Joskin kivi ja betoni säilyvät metallisen jakeen mukana, koska niiden ominaispaino on yli tuon mainittu 2 kg/l. Tässä kellutusrummussa myös magnesium erottuu muista metalleista kelluvan jakeen mukaan, josta se talteen otetaan pyörrevirtaerottimella (Eddy Current).

Jälkimmäisessä rummussa nesteen ominaispaino on nostettu noin 3 kg/l, jotta alumiini saadaan erotettua ominaispainoltaan raskaammista metalleista. Kivi ja betoni kelluvat pääosin tässä rummussa alumiinin tavoin, mutta ne saadaan erottumaan alumiinista rummun jälkeisellä pyörrevirtaerottimella. Rumpujen nesteen ominaispainoja pystytään muuttamaan säätelemällä magnetiitin ja ferropiinin määrää. Kuvassa 1 on esitelty kellutusrummun periaate.

3.3 Kellutusrumpu

Kuljetin syöttää rumpuun (kuva 1) johtavaa syöttötäryä, joka siirtää eroteltavan materiaalin itse kellutusrumpuun. Rummussa olevan nesteen ominaispainoa kevyemmät kappaleet kelluvat nesteen pinnalla ja tulevat ulos rumpuun synnyttävän virtauksen (alavirtaus) mukana. Ominaispainoa raskaammat kappaleet painuvat rummun pohjalle. Rummun sisäkehällä on haitat, tai siivet, jotka nostavat raskaan jakeen keskellä rumpua olevaan ränniin, jota pitkin ne tulevat ränniin virtauksen (ylävirtaus) mukana ulos rummusta.

Kuva 1 Kellutusrummun havainnekuva



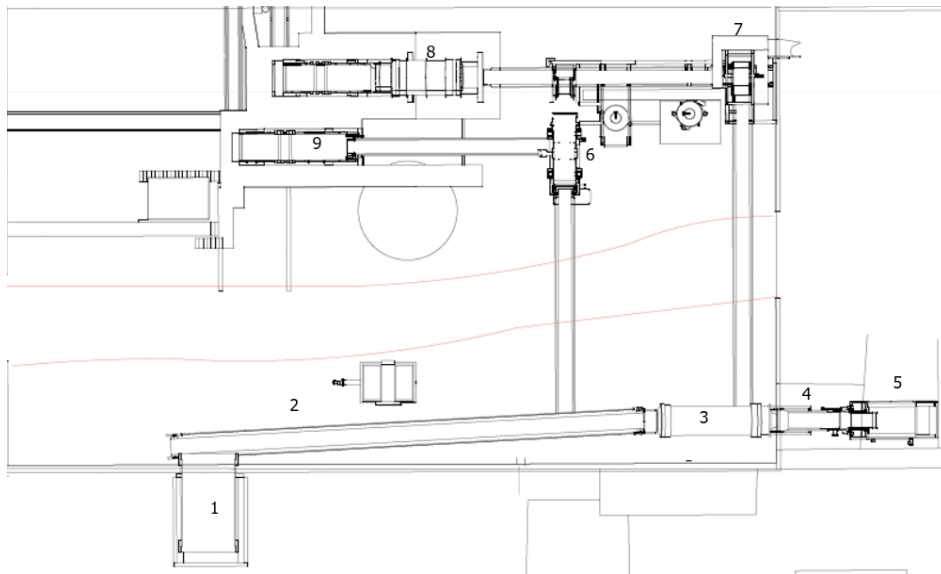
3.4 Huomioon otettavaa

UK-laitoksella käsitellään myös materiaaleja, jotka eivät kulje pesulaitosprosessin läpi. Näitä ovat erilaiset murskatut alumiinipitoiset materiaalit, jotka eivät sisällä juurikaan ei-metallisia epäpuhtauksia. Ne syötetään prosessiin ”sivusyöttönä” omasta syöttösuppilostaan syöttötäryyn ja lokerokuljettimen avulla suoraan UK:n ykkösrummulle.

4 Pesulaitosprosessi

Pesulaitosprosessin tehtävä on valmistaa käsiteltävä materiaali kellutukselle mahdollisimman edulliseen muotoon. Tämä käytännössä tarkoittaa hienojakoisen aineksen <5 mm, pieniköisen 5 mm – 15 mm ja isokokoisten >120 mm seulomista syöttestä. Kuvassa 2 on pesulaitoksen laitteisto.

Kuva 2 Pesulaitoksen asemapiirustus (Kuusakoski, Pesulaitoksen asemapiirustus, 2019)



4.1 Esiseulonta

Prosessoitavalle materiaalille suoritetaan koneellinen seulonta. Pyöräkuormaaja syöttää materiaalin tasoseulalle, jossa materiaali seulotaan kokoihin >120 mm, 120 mm - 40 mm, 40-10 mm ja <10 mm. Seulontaa ei suoriteta niin sanotulla talvikaudella, seulan jäätymisen takia. Seulan kapasiteetti on noin 100tn syötettä per 8 h.

4.2 Materiaalin syöttö pesulaitokselle

Kun materiaali on saatu seulottua, siirretään siitä ainoastaan hienoin jae, alite >10 mm, odottamaan jatkokäsittelyä tehtaan omalla fines-linjalla. Muut jo kerran erotellut fraktiot siirretään kaikki samaan syötekasaan odottamaan sen syöttämistä pesulaitokselle, eli jo kerran erotellut jakeet yhdistetään. Pesulaitoksen syöttö tapahtuu lamellikuljettimella (kuva 2 nro 1). Lamellilta materiaalit tippuvat rumpuseulaa syöttävälle kuljettimelle (kuva 2 nro 2). Tämän kuljettimen rumpuseulan puoleisessa päässä on vaaka, jonka tehtävä on säädellä jatkuvasti pyörivän syöttölamellin pyörimisnopeutta.

4.2.1 Huomioita materiaalin syötöstä pesulaitokselle

Rumpuseulan ja samalla pesulaitoksen syötemäärää mittaava vaaka on epäkunnossa. Joten pesulaitoksen syötteen automatisoitu säätely on mahdotonta. Lisäksi lamellikuljetin (kuva 3) toimii jaksotettuna, suhteella 15 sekuntia käynnissä/ 60 sekuntia taukoa. Tämä siitä syystä, että ennen jatkuvasti ja portaattomasti pyörineen lamellikuljettimen vaihdelaatikko rikkoontui, tätä ongelmaa ei ole jostakin syystä korjattu, vaan on tyydytty pyörittämään pesulaitoksen syöttöä kellolla jaksotettuna. Lisäksi tuotantoteknisistä syistä, lähinnä pyöräkuormaajien työkuorman takia, pyöräkuormaajat panostavat syöttölamellilla paksun patjan materiaalia. Näiden edellä mainittujen ongelmien vuoksi pesulaitokselle tapahtuva materiaalin syöttö on impulssimaista, tällöin suuri määrä materiaalia syötetään lyhyessä ajassa prosessiin, joka vaikuttaa seulojen erottelukykyyhin. Selkeää vastausta, miksi näihin laitoksen toiminnallisiin epäkohtiin ei ole puututtu, ei esitetty.

Kuva 3 Syöttölamelli ulkoapäin kuvattuna



4.3 Rumpuseula

Rumpuseula (kuvat nro 4 ja 5) on putkimainen pyörivä seula. Suurin osa rumpuseuloista on käytössä kaivosteollisuudessa, mutta niitä on myös huomattava määrä erilaisten kiinteiden

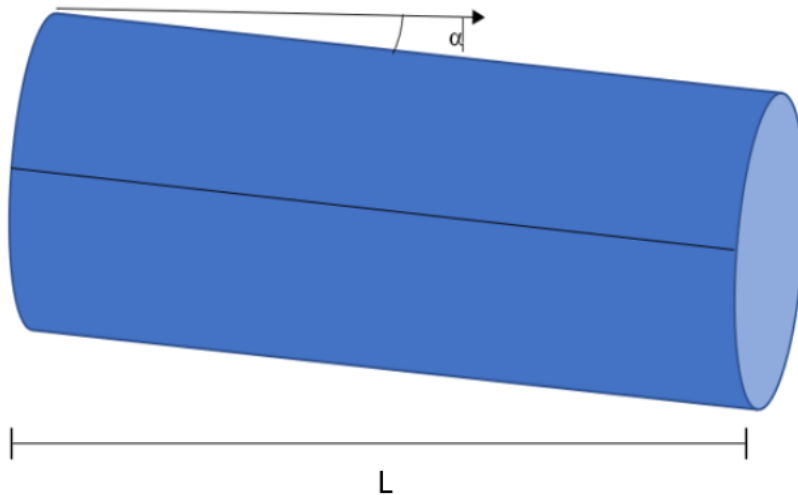
jätteiden kappalekokoan perustuvassa seulonnassa. Ne ovat yksinkertaisia tekniikaltaan ja halpoja käyttökustannuksiltaan. Pienemmissä rumpuseuloissa voi lieriömäinen seulaverkko toimia koko seulan runkorakenteena. Suuremmissa seuloissa on erillinen runko, johon seulaverkot on kiinnitetty. Rumpuseulan päissä on kantokehät, joiden varassa seula pyörii. Kantokehät makaavat kantopyörien päällä, joilla tapahtuu myös rumpuseulan pyöritys, eli käyttö. Usein rumpuseulojen mitoitus ja eri mitoitusparametrit ovat pohjautuneet hyvin paljon empiriisiin. Pesulaitoksen rumpuseulan tehtävä on jakaa materiaali kolmeen eri kokoluokkaan. Nämä ovat <40 mm (pieni NFR), 40-120 mm (iso NFR) ja >120 mm (ylite). Näitä eri kokoluokkien raja-arvoja kutsutaan myös materiaalin leikkauspisteiksi. Jo rumpuseulan suunnittelupiirustuksia tutkiessa voidaan todeta, että rumpuseulan rakenne on väärä edellä mainittujen leikkauspisteiden saavuttamiseksi. Kaksi ensimmäistä segmenttiä rummista, joiden yhteispituus on 3000 mm, on seulaverkon reikäkoko 30 mm, kolmiojaolla 60 mm. Viimeinen segmentti on 1700 mm ja sen reikäkoko on 120 mm, kolmiojaolla 160 mm. Rumpuseulan halkaisija on 1700 mm ja kallistuskulma 4°. Rummun pyörimisnopeudeksi on ilmoitettu 10 kierrosta/min. Vastausta kysymykseen, miten näihin parametreihin on päädytty ei esitetty. Rumpuseulan mitoittamisen kannalta oleellisiin laskutoimituksiin ja kaavoihin palataan prosessin muutosehdotuksiin liittyvässä opinnäytetyön osiossa.

Kuva 4 Rumpuseula ylitepäästä kuvattuna



nykyisen seulan toimintaa matemaattisesti. Jos kuitenkin haluamme hieman tarkastella esimerkiksi <30 mm jakeen seulontatehokkuutta, täytyy ensin hahmottaa seulottavan materiaalin liike rummussa (kuva 6).

Kuva 6 Rumpuseulan <30 mm jakeen segmentin havainnekuva



Rummun kallistuskulma $\alpha=4^\circ$. Segmentin pituus $L=3000$ mm. Silmämääräisesti materiaalin liikkumista rummussa seurattaessa, voitiin todeta, että materiaali "nousi" rummun pyöriessä noin rummun keskitasolle (havainnekuvassa mustalle viivalle). Rummun halkaisijan ollessa tiedossa (1700 mm), voidaan todeta sen olevan vertikaalisti 850 mm rummun pohjalta. Jos oletetaan materiaalin vertikaalin liikkeen alaspäin olevan pystysuoraa, voidaan materiaalin etenemä x rummussa per nousu laskea johtamalla kaavaa 13

Kaava 1

$$\tan(4^\circ) = \frac{x}{850} = 59 \text{ mm}, \rightarrow x = 59 \text{ mm}$$

Kun yhdellä nousulla materiaali etenee 59 mm, tapahtuu 3000 mm matkalla 51 nousua. Vaikkakaan materiaalin liike ei rummussa ole optimaalista seulontatehokkuuden kannalta, saamme siitä hieman osviittaa rummun toimintatehokkuuteen. Kun tiedämme rummun reikien pinta-alan suhteen rummun kokonaispinta-alaan ($Q=0,219$) ja nousujen määrän

segmentillä (3000 mm: 59 mm = 51), voimme laskea suuntaa antavan seulontatehokkuuden kaavalla 9

Kaava 2

$$P = \frac{1}{30} \int_0^{30} \left\{ 1 - \left[1 - 0,219 \left(1 - \frac{x}{30} \right)^2 \right]^{51} \right\} dx = 0,737$$

Jos sama tehdään rummun toiselle segmentille, jossa L = 1700 mm, nousujen määrän segmentillä (1700 mm: 59 mm = 29) Q= 0,311 saadaan tulokseksi

Kaava 3

$$P = \frac{1}{70} \int_{50}^{120} \left\{ 1 - \left[1 - 0,311 \left(1 - \frac{x}{120} \right)^2 \right]^{29} \right\} dx = 0,505$$

Jotka ovat yhtä kuin seulan tehokkuutta kuvaava luku E. Lisäksi voimme pohtia miksi materiaalin liike ei ole vesiputousmaista. Rummun kriittinen pyörintänopeus, jolloin vesiputousmainen materiaalin liike muuttuu sentrifugimaiseksi, voidaan laskea (Vesilin, Peirce & Weiner, 1994) seuraavasti olemassa olevan rummun mitoilla kaavalla 4

Kaava 4

$$n = \sqrt{\frac{g}{4 \times \pi^2 \times R}} = 0,54 \frac{\text{kier}}{\text{s}}, 60\text{s} \times 0,54 \frac{\text{kier}}{\text{s}} = 32,4 \frac{\text{kier}}{\text{min}}$$

eli rummun kriittinen pyörintänopeus on noin kolminkertainen verrattuna tämänhetkiseen pyörintänopeuteen. Toisen laskutavan (Alter, Gavis & Renard, 1981, s. 223-240) mukaan laskettuna kaavalla 10

Kaava 5

$$n = \frac{\omega^2 \times R}{g} = \sin \alpha$$

kriittinen nopeus olisi 0,56 kier/s, joka olisi 33,7 kier/min.

4.4 Ylitteen käsittely

Rumpuseulasta tuleva ylite, eli >120 mm jae, tippuu suppiloon ja jatkaa ulos hallista kuljetinta (kuva 2 nro 4) pitkin. Kuljettimessa on vaaka, jonka tehtävä on havaita painavat kappaleet, yli 3,5 kg. Kun hihnavaaka havaitsee tuon asetetun painorajan ylittävän kappaleen, aukeaa kuljettimen jatkona oleva sylintereillä oleva luiska ja kappale tippuu omaan laariinsa, tätä ylitteen jaetta kutsutaan nimellä ”huge” (suom. suuri, valtava). Alle 3,5 kg painavat kappaleet jatkavat luiskaa (kuvassa 7) pitkin pyörrevirtaerottimelle (kuva 2 nro 5) (Wang, Ma, Zhi & Zhang, 2013, s. 242-248), joka erottelee alumiiniset kappaleet muista. Luiskan sylintereiden ajoitus on väärä. Kun hihnavaaka on havainnut painorajan ylittävän kappaleen, kestää sylintereillä toimivan luiskan (kuvassa 7) aukeaminen liian kauan, jolloin käytännössä kaikki painavat kappaleet liukuvat luiskaa pitkin pyörrevirtaerottimelle. Vastaavasti myös painavaa kappaletta seuraavat kappaleet erottuvat väärään jakeeseen, koska luiska on auki väärään aikaan.

Kuva 7 Ylitekuljettimen sylinteritoiminen luiska



4.5 NFR <40 mm jatkokäsittely

Pieni NFR jatkaa hihnakuuljetinta pitkin kuvassa 8 olevalle kaksoisiskuseulalle (kuva 2 nro 6, flip-flow), jonka seulakoko on 15 mm. Seulan tehtävä on seuloa <15 mm jae eroon tästä jakeesta. Tämä <15 mm jae siirretään käsiteltäväksi tehtaan fines-linjalle. Empiiriseen tietoon perustuen, maksimi kappalekoko 15 mm seulaverkolla on liki 20 mm, lankamaiset kappaleet voivat olla vielä huomattavasti suurempia dimensioiltaan. Yli 15 mm (20 mm viitaten edelliseen) kokoluokaltaan oleva materiaali käsitellään kuvassa 10 olevalla pesuseulalla (kuva 2 nro 9), jonka tehtävä on poistaa mahdollista hienoainesta ennen upotuskellutusprosessia. Todellisuudessa partikkelikoko NFR <40 mm jakeessa on maksimissaan 30 mm, johtuen edellä mainitusta rumpuseulan mitoituksesta. Eli käytännössä NFR <40 mm, joka tulee pesulaitokselta ensimmäiselle upotuskellutusrummulle, on todellisuudessa kokoluokaltaan ~20 mm – 30 mm (kuva 9).

Kuva 8 Kaksoisiskuseula (flip-flow)



Kuva 9 Kaksoisiskuseulan alite <15 mm



Kuva 10 NFR 0 - 40 mm pesuseula



4.6 NFR 40 mm-120 mm jatkokäsittely

Partikkelikooltaan 40 mm-120 mm oleva jae (todellisuudessa 30 mm - 120 mm, viitaten rumpuseulan mitoitukseen) jatkaa kuljettimella pesurummulle. Matkalla kuvassa 11 olevalle pesurummulle, hihnamagneetti (kuva 2 nro 7) poimii seassa olevat magneettiset kappaleet eroon. Pesurumpu (kuva 2 nro 8) on putkimainen pyörivä rumpu, johon johdetaan vettä käsiteltävän materiaalin puhdistamiseksi. Rummun sisäkehällä on siivet, jotka saavat materiaalin vesiputousmaiseen liikkeeseen rummun pyöriessä. Rummun päätyosa on rei'itetty, jotta pesuvesi pääsee valumaan pois materiaalin seasta, eikä kulkeudu kuljettimille. Pesurummun jälkeen iso ja pieni NFR yhdistyvät ja ne ohjataan kuljettimilla upotuskellutuskäsittelyyn.

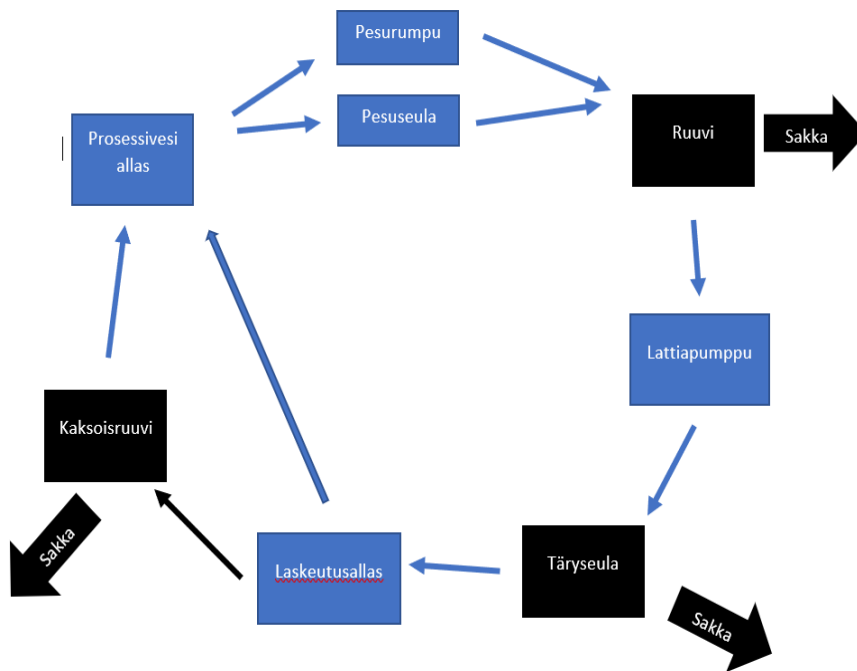
Kuva 11 Pesurumpu



5 Prosessivesi pesulaitoksella

Pesulaitoksen prosessiveden kierto on myös yksi selvitetävistä asioista, se ei varsinaisesti liity NFR-murskeen esikäsitteilyyn, mutta on olennainen osa itse pesulaitosprosessia.

Kuva 12 Prosessiveden kiertokaavio



5.1 Prosessiveden kierto

Prosessiveden kierto alkaa prosessivesialtaalta, josta se pumpataan aiemmin mainituille pesurummulle ja pesuseulalle. Näistä se kerätään suppiloilla talteen ja ohjataan sakkaruuville (kuva 13).

Kuva 13 Sakkaruuvi



Kuten kuvasta 13 on havaittavissa, pesuveden pinnalla on ominaispainoltaan vettä kevyempää ainesta. Tämä aines kulkeutuu huonosti ruuvikuljettimella pois altaasta ja se patoutuu helposti altaan pinnalle. Sakkaruuvi poistaa siis pääosin altaan pohjalle painunutta sakkaa.

Sakkaruuvilta prosessivesi jatkaa ylivirtausputkea pitkin lattia-/ kaivopumpulle (kuva 14).

Kuva 14 Lattia-/ kaivopumppu



Käytännössä siis jo kertaalleen hieman puhdistettu prosessivesi ajetaan lattialle (kuvassa 14), jossa siihen sekoittuu jatko-prosessista vapautuvaa (ongelmat kuvattu myöhemmin) sakkapitoista vettä ja muita epäpuhtauksia.

Lattia-/kaivopumppu pumpkaa lattialta veden täryseulalle (kuvassa 15), josta myös tärysihti nimitystä käytetään. Lattiapumppu on mitoitukseltaan niin tehokas, että se aiheuttaa täryseulalla ongelmia. Täryseulan tehtävä on siivilöidä prosessivedestä jälleen sakkaa ja hienoainesta. Lattiapumpulta tuleva vesimäärä ylittää hetkittäin täryseulan läpäisykyvyn, jolloin vesi tulvii seulan erotteleman sakan kanssa sakkalaariin, sitä kautta hallin lattialle ja

lattiapumpulle. Seulan siivilää joudutaan myös aika ajoin pesemään siihen kertyneestä nukasta.

Kuva 15 Täryseula



Seulalta prosessivesi jatkaa vapaana virtauksena kahta 260 mm halkaisijaltaan olevaa putkea pitkin kohti saostusallasta. Putket yhdistyvät matkalla saostusaltaalle. Putkien liitoskohdassa on 160 mm soviteputki, josta prosessivesilinja jatkuu yhdellä 260 mm halkaisijaltaan olevalla putkella saostusaltaalle. Kun kaksi 260 mm halkaisijaltaan olevaa putkea yhdistyvät hetkellisesti yhteen 160 mm putkeen, pienenee prosessivesilinjan putkien poikkileikkauksen

pinta-ala yhteen viidesosaan (kuvassa 16). Tämä johtaa prosessiveden tulvimiseen alla olevassa kuvassa olevan suppilon yli lattialle.

Kuva 16 Putkien yhdistymiskohta ja suppilo täryseulan ja saostusaltaan välillä



Saostusaltaassa (kuvassa 17) prosessivedessä vielä oleva sakka painuu altaan pohjalle. Saostusaltaan korkeussuunnassa noin puolivälin kohdalta pumpataan osittain puhdistettua vettä takaisin kiertoön prosessivesialtaaseen. Saostusaltaan pohja on kartiomainen muodoltaan. Kartion pohjalle painunut sakka pumpataan pumpulla kaksoisruuveille (kuvassa 18). Kaksoisruuveille lisätään flokkulaattia. Flokkuloinnin tavoitteena on saada erilliset kiintoainehiukkaset muodostamaan löysiä ryhmittymiä, jolloin ne sakkautuvat (Hua, Gao, Jie, Aimin & Hu, 2018). Sakka painuu ruuvialtaan pohjalle, jolloin ruuvi kuljettaa sen sakkalaariin.

Kuva 17 Saostusallas



Kuva 18 Kaksoisruuvi



5.2 Vedenkierron ongelmat

Vedenkierron ongelmia on monissa eri vedenkierron vaiheissa. Lähtökohtaisesti veden puhdistus on tehotonta, esimerkiksi sakkaa poistetaan vedestä kolmessa eri prosessin vaiheessa. Vesi osittain jo hieman puhdistetaan (sakkaruuvi), vain jotta voidaan laskea takaisin lattialle keräämään epäpuhtauksia. Prosessivedestä eroteltua sakkaa ei kuivata ennen sen varastoimista sakkalaariin, sakkalaarista vedet valuvat lattiapumpulle. Talvisin pesulaitoshallin lattia tulvii, johtuen ulkona varastoidun syötteen mukanaan tuomasta vedestä (lumi) prosessiin.

6 Materiaalitutkimus

Jotta prosessin kehitykselle saataisiin tukea materiaalipohjan kannalta, suoritettiin tehtaalla NFR-murskeen koeseulonnat. Kotimaan murskaimilta (Heinola, Vantaa ja Airaksela) kerättiin niiden vuotuisen tuotantomäärään perustuen yhteensä 300 tn koe-erä. Jakauma oli Heinola 32 %, Vantaa 48 % ja Airaksela 20 %. Tarkoituksena oli selvittää materiaalin jakauma eri partikkelikokoihin.

6.1 Toteutus

Seulonta suoritettiin syöttämällä tasoseulaa pyöräkuormaajalla. Tasoseulan seulaverkkoja vaihdettiin seulontajärjestyksen mukaisesti. Yhteensä seulontoja vaadittiin viisi kappaletta, jotta pystyttiin selvittämään materiaalin jakauma seuraaviin kokoluokkiin; 0- 20 mm, 20 mm - 40 mm, 40 mm - 60 mm, 60 mm – 80 mm, 80 mm – 100 mm, 100 mm -120 mm ja >120 mm. Ensimmäisessä seulonnassa materiaali leikattiin kahteen eri jakeeseen, <40 mm ja >40 mm. Tämä osoittautui onnistuneeksi leikkauspisteeksi, koska massataseita tarkastellessa materiaali jakaantui hyvin lähelle tasan molempiin kokoluokkiin. Syötemäärä tähän ensimmäiseen seulontaan oli siis aiemmin mainittu 300 tn. Taulukoissa ylimpänä seulontatehokkuus tn/h, alempana materiaalin prosentuaalinen jakauma seulottuihin kokoluokkiin.

Taulukko 3 Koeseulonta nro 1 (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)

1. Seulonta	
tn/h	24.9
Yli 40 mm	48.7 %
Alle 40 mm	51.3 %

Jakeiden määrät, >40 mm 169 tn ja <40 mm 131 tn. Toisella seulontakierroksella siis syötteenä 169 tn >40 mm jaetta. Toisella seulontakierroksella saatiin selvitettyä >120 mm jakeen osuus materiaalista. Kuten aiemmin todettu, yli >120 mm seuloutuu pesulaitoksen rumpuseulalla ylitteeksi.

Taulukko 4 Koeseulonta nro 2 (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)

2. Seulonta	
tn/h	18.0
Yli 120 mm	6.3 %
40-120 mm	93.7 %

Kolmannella seulontakierroksella materiaalista eroteltiin 100 mm - 120 mm jae. Syötteenä 113 tn 40 mm - 120 mm jaeetta.

Taulukko 5 Koeseulonta nro 3 (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)

3. Seulonta	
tn/h	19.1
100-120 mm	6.1 %
40-100 mm	93.9 %

Neljännellä koeseulonnalla saatiin 40 mm -100 mm jae seulottua kolmeen eri kokoluokkaan, jotka olivat 40 mm – 60 mm, 60 mm – 80 mm ja 80 mm – 100 mm. Syötteenä 87 tn 40 mm – 100 mm jaeetta.

Taulukko 6 Koeseulonta nro 4 (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)

4. Seulonta	
tn/h	18.0
80-100 mm	17.7 %
60-80 mm	29.2 %
40-60 mm	53.1 %








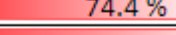

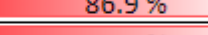

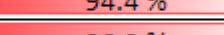

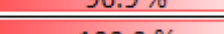

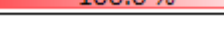

Viimeisellä viidennellä seulontakierroksella saatiin selville 0 - 10 mm, 10 mm - 20 mm ja 20 mm - 40 mm jakeiden määrät. Syötteenä 131 tn 0 - 40 mm jaeetta.

Taulukko 7 Koeseulonta nro 5 (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)

5. Seulonta	
tn/h	23.1
20-40 mm	49%
10-20 mm	26%
0-10 mm	25%

Lopputuloksena saamme kaikkien jakeiden määrät ja koko 300 tn koe-erän jakautumisen eri kokoluokkiin.

Taulukko 8 Seulontakokeen massatase (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)

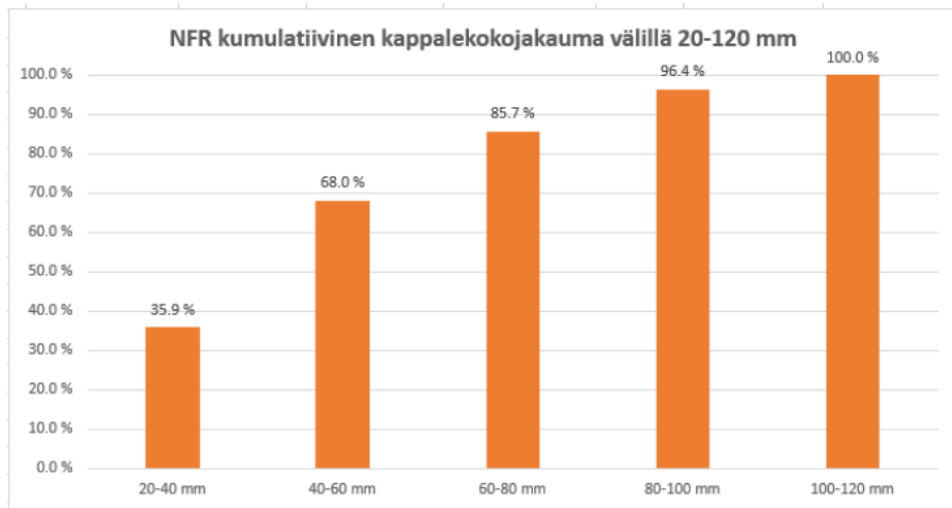
Partikkeli- koko	Jakeen massa (tn)	Kappalekoko-jak auma	Kumulatiivinen kappalekoko-jaka uma
0-10 mm	39,18	 12.8 %	 12.8 %
10-20 mm	42,0	 13.7 %	 26.5 %
20-40 mm	77,54	 25.3 %	 51.8 %
40-60 mm	69,25	 22.6 %	 74.4 %
60-80 mm	38,06	 12.4 %	 86.9 %
80-100 mm	23,09	 7.5 %	 94.4 %
100-120 mm	7,77	 2.5 %	 96.9 %
+120 mm	9,39	 3.1 %	 100.0 %
YHTEENSÄ	306.28	 100.0 %	

6.2 Johtopäätökset

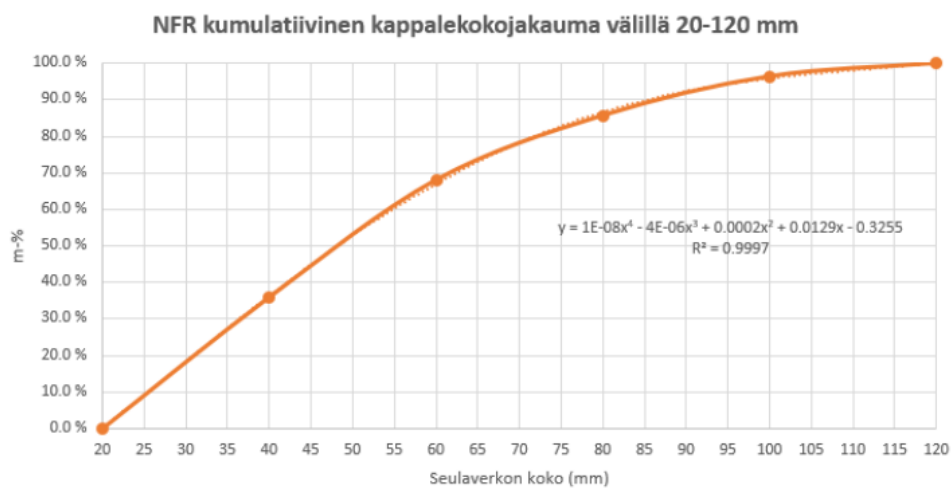
Jos pohditaan materiaalin tasaista jakautumista pesulaitosprosessissa kahteen eri jakeeseen, on yllä olevasta taulukosta helppo lukea leikkauspisteen olevan 40 mm. Mutta jos tarkoituksena on jakaa pesulaitoksella käsiteltävä materiaali kahteen massaltaan liki yhtä suureen jakeeseen, vaatii se hieman pidemmälle vietyä pohdintaa.

Kuten prosessin kuvauksessa aiemmin selvitettiin, materiaalia poistuu pesulaitoksen syötteeseen verraten ennen itse pesuprosessia. Rumpuseula erottaa ylitteen, >120 mm olevat kappaleet. NFR <40 mm jakeesta erotetaan <15 mm (todellisuudessa <~20 mm), siispä täytyy tutkia kappalekokojakaumaa välillä 20 mm – 120 mm.

Kuva 19 Kumulatiivinen kappalekokojakauma välillä 20 mm – 120 mm (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)



Kuva 20 Kumulatiivinen kappalekokojakauma välillä 20 mm – 120 mm (Kuusakoski, Materiaalitasekoe, 2020)



Kuten taulukossa 10 olevasta kuvaajasta voimme päätellä, että jos tavoitteena on pestävän materiaalin leikkaaminen mahdollisimman tasan, on leikkauspisteen oltava 50 mm tasakymmeniin pyöristettynä.

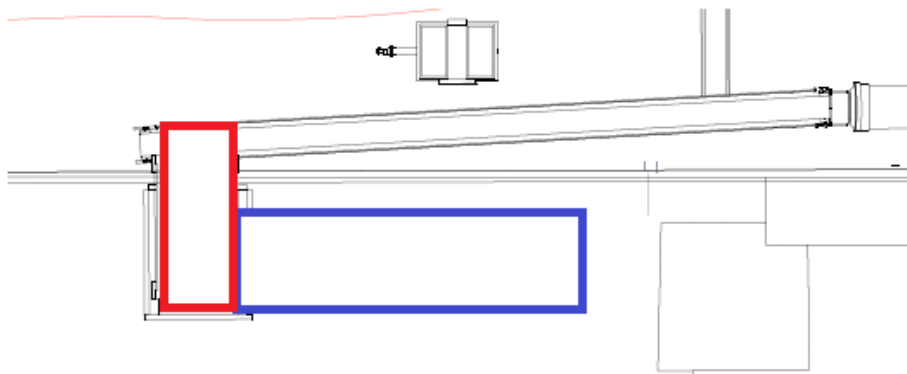
7 Uusi prosessi

Uudessa prosessiehdotuksessa on otettu huomioon nykyisen prosessin puutteet, havaitut epäkohdat, työn tilaajan toiveet ja työn tutkimusvaiheessa heränneet mahdolliset kehitysideat. Ehdotuksessa käydään läpi laitteiden toimintaperiaatteita (pyörrevirtaerotin) ja suunnittelua ohjaavia matemaattisia kaavoja (rumpuseulan mitoitus). Itse laitevalintoja ei tehdä, vaan esitetään niitä ohjaavat käsiteltävän materiaalin volyymit ja vaatimukset erottelukyvylle. Prosessi käydään materiaalin virtauksen kannalta läpi vaiheittain, pohtien käsittelyn vaikutusta jatkoprosessiin.

7.1 Materiaalin syöttö pesulaitokselle

Materiaalin syöttö, sen säännöstely ja hallittavuus vaatii parannuksia, jotta materiaalin seulontaa saadaan tehostettua. Syöttölamellin jatkaminen ja kääntäminen 90°, jotta materiaalia olisi mahdollisuus panostaa kuljettimelle pidemmälle matkalle ja ohuempana mattona, on yksi vartenotettava vaihtoehto.

Kuva 21 Lamellikuljettimen (sin) ja syöttötäryn (pun) havainnekuva (Kuusakoski, Pesulaitoksen asemapiirustus, 2019)



Ongelmana tässä mallissa on lamellin sivujen käyttö varastopaikkoina syötteelle (kuvassa 3). Lisäksi ratkaisussa olisi syöttötäry lamellikuljettimen ja rumpuseulalle materiaalin siirtävän

kuljettimen välille. Täry olisi toki mahdollista lisätä jo nyt käytössä olevan lamellikuljettimen ja siirtokuljettimen väliin (kuva 22).

Kuva 22 Kuvassa punaisella syöttötäryn sijainti (sijainti suuntaa antava)



Syöttötäry jakaisi molemmissa tapauksissa materiaalin virtauksen tasaisemmaksi kuljettimelle, eikä tällöin materiaalivirtaus rumpuseulalle olisi niin impulssimaista. Summaava hihnavaaka, joka mittaa ja ohjaa syötteen määrää rumpuseulalle, olisi hyvä sijoittaa mahdollisimman lähelle hinnan alkupäätä, jotta tieto syötteen määrästä olisi reaaliaikaista. Tällä hetkellä vaaka (toimimaton) sijaitsee kuljettimen rumpuseulan puoleisessa päässä. Syötteen ohjauksen perustuessa vielä vaa'an mittaukseen, aiheutti ongelmia liian pitkä viive syöttölamellin pyörintänopeuden vaikutuksesta syötteen määrään kuljettimella. Tieto siis täytyy saada automatisoituun järjestelmään tarpeeksi lyhyin väliajoin ja jotta se olisi muutenkin reaaliaikaista, täytyy mittaus tapahtua mahdollisimman lähellä syöttötäryä.

7.2 Seulonta

Seulontaan on käytännössä olemassa kaksi eri seulamallivaihtoehtoa, nämä ovat rumpuseula (trommel) ja täryseula (vibrating screen).

Molemmissa on omat etunsa. Molemmat pystyvät seulomaan materiaalia vaadittuun kolmeen eri kokoluokkaan. Rumpuseula on halpa käyttökustannuksiltaan ja oikein mitoitettuna sen seulontateho on hyvä. Materiaalin oikeaoppisen, vesiputousmaisen (Stessel, 1991, s. 1-22) liikkeen vallitessa rummussa on etuna myös mahdollista paakkuuntunutta rakennetta rikkova törmäys (impingement). Rumpuseulan puhtaanapito on hankalaa, reikiin kerääntyneiden lankojen poisto on hidasta laikkaleikkausta. Rummun sisäosat saa puhdistettua vain rummun sisältä. Rumpuseulassa on myös jonkin verran enemmän huoltoa ja kunnossapitoa vaativia osia, kuten pyörästöt ja koneikot. Täryseulat ovat todella monikäyttöisiä ja muunneltavia seuloja (Makinde, Mpofu, Ramatsetse, 2015, s. 17-22). Niiden toiminta perustuu yleensä epäkeskoakseleilla tuotettuun värinänomaiseen kannen liikkeeseen ja kannen kallistuskulmaan. Täryseulat ovat myös seulontatehokkaita. Niissä on vähemmän huoltoa vaativia osia verrattuna rumpuseuloihin. Ne on myös helpompia pitää puhtaan avonaisen rakenteen vuoksi, joskin moneen eri jaekokoon jakavissa monitasoseuloissa on suurempi tukkeutumisriski ja puhdistus hieman hankalampaa. Kosteat ja lumiset syötteen saattavat aiheuttaa myös seulan tukkeutumista. Avoimena kysymyksenä on monien ominaispainoltaan eriä syötteenä olevien materiaalien seulontatehokkuus. Täryseulojen seulontatehokkuuden kannalta pohdittavia seikkoja on myös erikokoisten partikkelien vaatimat eri värähtelytaajuudet (Zhanfu, Xin, Bi, Xiaole & Jingxiu 2018). Täryseulan ominaisuuksien, erottelukyvyn ja värähtelytaajuuden tuotto vaatii myös jatkuvaa seuranta, koska esimerkiksi jousien kuoleentuminen vaikuttaa huomattavasti edellä mainittuihin ominaisuuksiin (Krot, ym., 2020). Täryseulan avonaisen rakenteen vuoksi myös pölyhallinnassa on omat haasteensa. Koska edellä mainituista seulavaihtoehdoista rumpuseula tulotisiin suunnittelemaan ja valmistamaan yrityksen tarpeiden mukaisesti ja täryseula valittaisiin valmistajien antamien tuotteidensa spesifikaatioiden perusteella, tehdään matemaattinen tarkastelu ainoastaan rumpuseulalle.

7.3 Rumpuseulan matemaattinen tarkastelu

7.3.1 Seulontatehokkuus

Tutkitaan matemaattista lähestymistä rumpuseulan mitoitukseen. Yksittäisen partikkelin halkaisijaltaan d , törmätessään (impingement) aukkoon, todennäköisyys läpäistä aukko mitaltaan a (ympyrän muotoisella halkaisija, neliöllä sivu) voidaan laskea (Gaudin, 1939) Q :n ollessa reikien yhteenlasketun pinta-alan suhde koko seulan pinta-alaan seuraavalla kaavalla 6 ($d < a$)

Kaava 6

$$Qp = \left[1 - \frac{d}{a}\right]^2$$

Vastaavasti suorakaiteen muotoisen aukon, jolla a ja A ovat sivujen pituudet, läpäisyn todennäköisyys kappaleelle on kaavassa 7 (Gaudin, 1939)

Kaava 7

$$p = \left[1 - \frac{d}{a}\right] \left[1 - \frac{d}{A}\right] Q$$

Kappaleen kumulatiivinen mahdollisuus läpäistä aukko määrän n törmäyksiä jälkeen voidaan laskea kaavalla 8 (Gaudin, 1939)

Kaava 8

$$p = \sum_{i=1}^n p (1-p)^{i-1} = [1 - (1-p)^n]$$

Todennäköisyys sille, että kappale, joka on kooltaan suurempi tai yhtä suuri kuin x_0 ja pienempi tai yhtä suuri kuin x_m läpäisee aukon, voidaan laskea (Sucher, 1969) kaavalla 9

Kaava 9

$$P(x_0-x_m)=\int_{x_0}^{x_m} f(x)[1-(1-p)^n]dx, \text{ kun } f(x)=\frac{1}{x_m-x_0}$$

Luku P on yhtä kuin seulan tehokkuusluku E.

7.3.2 Partikkelin liike rummussa

Partikkelin liikkeelle rummussa käytetään lähinnä kolmea kuvaavaa (Stessel, 1991, s. 1-22) termiä, ne on havainnollistettu kuvassa 23.

Kuva 23 Eri liikemallit



Partikkelin liikkeeseen rummussa vaikuttavat rummun pyörimisnopeus, mitoitus ja kallistuskulma (Alter ym, 1981, s. 223-240). Rumpuseulan kriittinen pyörimisnopeus voidaan määrittää kaavalla 10

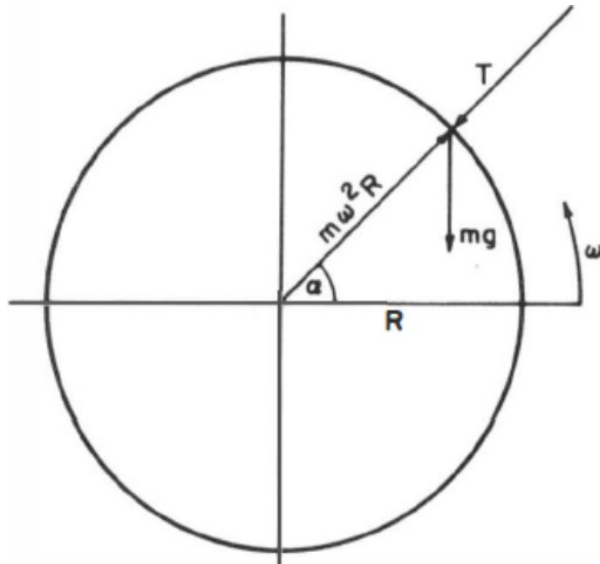
Kaava 10

$$\frac{\omega^2 \times R}{g} = \sin \alpha$$

jossa ovat kulmanopeus ω , rummun säde R. Kulmanopeutta ω , joka vaaditaan vertikaalin $\alpha = \pi/2$ (90°) saavuttamiseksi, kutsutaan myös kriittiseksi nopeudeksi, koska tämän yläpuolella partikkelin liike rummussa on sentrifugimaista, eli se pyörii rummun kehällä liikkeen mukana. Periaatteessa yhtälön vasemman puolen nimittäjä pitäisi kertoa

kallistuskulma β kosinilla, mutta β hyvin harvoin on enemmän kuin $\pi/36$ (5°), joten kun $\beta \sim 1$, ei tämä ole välttämätöntä.

Kuva 24 Kriittinen pyörimisnopeus (Alter ym, 1981, s. 223-240)



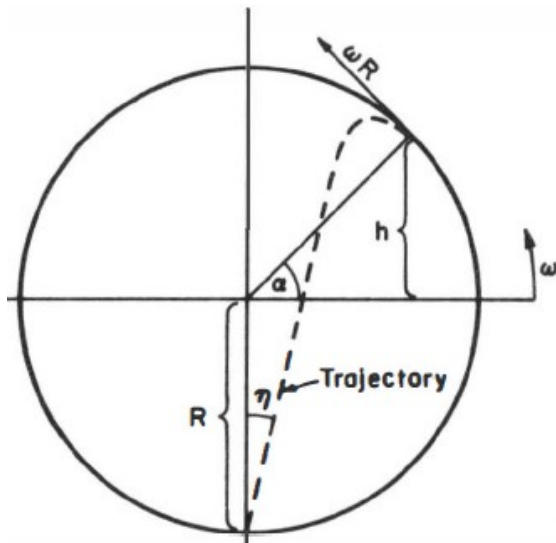
Kappaleen yksityiskohtaisen lentoradan selvittäminen ei ole välttämätöntä. Relevanttia tietoa on partikkelin laskeutumispisteen (rummun pohjalla) yhteys kulmaan α ja partikkelin aikaan ilmassa t . Partikkelin pudotessa rummun alimmalle kohdalle (vertical diameter), voidaan pystysuora putoamismatka laskea kaavalla 11 (Alter ym, 1981, s. 223-240)

Kaava 11

$$t = \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\omega} + \frac{[\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha (1 + \sin \alpha)]^{1/2}}{\omega}$$

jossa yhtälön oikean puolen osa " $\sin \alpha \cos \alpha$ " = aika, joka partikkelin kuluu saavuttaakseen lentoradan apogeumin. Toinen osa $[\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha (1 + \sin \alpha)]^{1/2} =$ aika, joka partikkelin kuluu pudotuksessa apogeumista rummun pohjalle.

Kuva 25 Pohjalle putoavan kappaleen lentorata (Alter ym, 1981, s. 223-240)

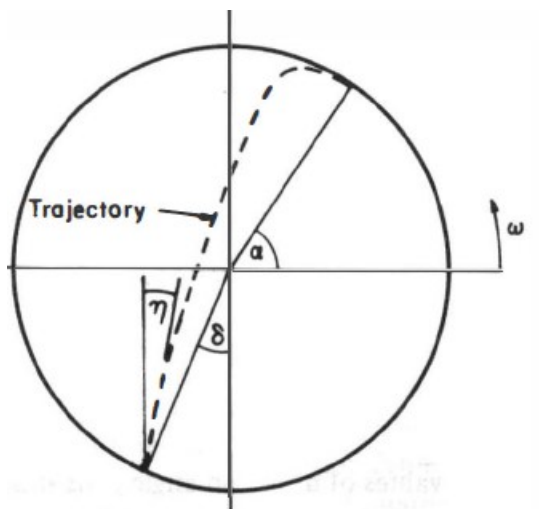


Ei kuitenkaan ole apriorista syytä sille, että partikkelin tulisi laskeutua rummun pohjalle. Jos kappale laskeutuu kulmassa δ , käytetään kaavaa 12 (Alter ym, 1981, s. 223-240)

Kaava 12

$$t = \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\omega} + \frac{[\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha (\cos \delta + \sin \alpha)]^{1/2}}{\omega}$$

Kuva 26 Lentoradan määrittely kulmalla δ (Alter ym, 1981, s. 223-240)



Taulukko 9 Rumpuseulan suunnitteluparametrit (Alter ym, 1981, s. 223-240)

δ	$\sin\alpha$	α	η	ϕ	f	ψ
$\frac{\pi}{6}$ (30°)	0,6428	$\frac{2\pi}{9}$ (40°)	$0,0868\pi$ (15,6°)	3,141	0,758	2,42
$\frac{\pi}{9}$ (20°)	0,5972	$0,204\pi$ (36,7°)	$0,0774\pi$ (13,9°)	3,279	0,712	2,38
$0,0711\pi$ (12,8°)	0,5630	$0,190\pi$ (34,3°)	$0,0711\pi$ (12,8°)	3,340	0,677	2,31
$\frac{\pi}{18}$ (10°)	0,5495	$0,185\pi$ (33,3°)	$0,0687\pi$ (12,4°)	3,355	0,663	2,27
0	0,5	$\frac{\pi}{6}$ (30°)	$0,0605\pi$ (10,9°)	3,366	0,609	2,12
$-\frac{\pi}{18}$ (-10°)	0,488	$0,148\pi$ (26,7°)	$0,0528\pi$ (9,5°)	3,313	0,552	1,92
$-\frac{\pi}{9}$ (-20°)	0,3961	$0,129\pi$ (23,3°)	$0,0455\pi$ (8,2°)	3,193	0,491	1,68
$-\frac{\pi}{6}$ (-30°)	0,3421	$\frac{\pi}{9}$ (20°)	$0,0384\pi$ (6,9°)	3,014	0,427	1,41

Taulukon neljä ensimmäistä saraketta ovat α , $\sin\alpha$ ja η arvoja useille eri δ arvoille. Taulukon neljännellä rivillä δ ja η ovat samoja, tässä tilanteessa partikkeli törmää kohtisuoraan rummun pintaan. Sarakkeet 5, 6 ja 7 ovat johdettuja vakioita.

Partikkelin horisontaalinen siirtymä (etenemä rummussa) per yksi törmäys, sisältää siis nousun rummunseinälle ja tippumisen sieltä tiettyyn pisteeseen, voidaan laskea kaavalla 13 (Alter ym, 1981, s. 223-240)

Kaava 13

$$\frac{\ell}{\beta R} = \phi = (\omega t \cos\alpha + \cos\alpha + \cos\delta)$$

Tämä δ ja α arvoista riippuva suure on ilmoitettu taulukon sarakkeessa 5.

Rummun pituuden määrittely, jotta x määrä törmäyksiä saadaan aikaan, voidaan laskea kaavalla 14 (Alter ym, 1981, s. 223-240)

Kaava 14

$$L = x\ell = \phi x \beta R$$

Taulukon suure f (sarake 6) kuvaa kuinka suuren osan kierroksesta rumpu pyörii yhden partikkelin törmäyssyklin aikana.

Näillä edellä mainituilla tiedoilla voimme laskea partikkelin viipymän rummussa T . Viipymän T kaava 15 on (Alter ym, 1981, s. 223-240)

Kaava 15

$$T = \frac{nf}{(\omega/2\pi)} = 2\pi nf \left[\frac{R}{g \sin \alpha} \right]^{1/2}$$

Rummun mitoitusta, lähinnä säde, täytyy pohdinnassa ottaa huomioon myös, että yksittäisen partikkelin massakeskipiste ei ole rummun sisäkehällä, vaan täytyy se hahmottaa partikkelin keskikoon kautta. Eli jos syötössä partikkelin keskikoko on $\varnothing 60\text{mm}$, on partikkelin massakeskipisteen etäisyys rummun akselista $R - 60 \text{ mm} / 2$.

Kriittinen pyörintänopeus ja partikkelin viipymä rummussa eivät riitä päätökseen rummun mitoituksesta. Ne luovat ainoastaan kaksi riippuvuussuhdetta. Lisäksi huomioon tulee ottaa rummun reikäkoko ja neljä parametria; ω , R , β ja L . Mutta niillä ei ole juurikaan tekemistä rummun syöttösuhteen kanssa. Rummun syöttösuhde voidaan laskea kaavalla 16 (Alter ym, 1981, s. 223-240)

Kaava 16

$$M = \psi g^{1/2} b \rho b \beta R^{3/2}$$

jossa b on materiaalin keskikoko, ρb on materiaalin tiheys. ψ arvot löytyvät taulukon sarakkeesta 7, ollen riippuvainen parametreista δ ja α .

Lähtökohtaisesti rumpuseulan suunnittelu olisi hyvä perustaa oletukseen, partikkeli törmäisi kohtisuoraan rummun pintaan, tämän pitäisi olla edullisin tilanne ajatellen

seulontatehokkuutta ja reikien tukkeumaa. Tällöin parametreina siis olisi $\delta=0,0711\pi$ ($12,8^\circ$), $\sin\alpha=0,5630$, $\alpha=0,190\pi$ ($34,3^\circ$), $\eta=0,0711\pi$ ($12,8^\circ$).

7.4 Uuden rumpuseulan matemaattinen tarkastelu

Ensin täytyy määrittää reunaehdot suunnittelulle. Materiaalintutkimusosiossa todettiin 20 mm - 120 mm fraktion massataseen optimaalisen leikkauspisteen (50/50) olevan 50 mm. Tämä ei merkitse massan leikkaamista puoliksi rumpuseulalla, vaan jatkokäsittelyiden (kaksoiskuseula) jälkeen materiaalin jakautumista tasaisesti 20 mm - 50 mm ja 50 mm - 120 mm jakeisiin. Tällöin rumpuseulan ensimmäisen segmentin reikäkoko on $\varnothing 50$ mm, koska $x_m = 50$ mm ja $x_0 = 0$ mm. Toisessa segmentissä $x_0 = 50$ mm ja $x_m = 120$ mm. Valitaan kallistuskulmaksi β hyvin yleisesti käytetty $\pi/36$ (5°) ja $\sin\alpha=0,5630$, jolloin partikkeli törmää kohtisuoraan seulaverkkoon.

Jos pohditaan ensin seulontatehokkuutta ja sen korrelaatiota partikkelin törmäyksiin (impingements) seulaverkon kanssa, täytyy asettaa jokin tavoitearvo seulontatehokkuudelle. Käytetään tavoitteena 90 % tehokkuutta (0,9). Käytetään Q:lle arvoja 0,3, 0,5 ja 0,7. Ihanteellista toki olisi Q:n arvon olevan mahdollisimman liki 1, rummun lujuustekniset ominaisuudet huomioiden. Kaava tehokkuudelle (kaavasta 9) ensimmäisessä segmentissä (<50 mm) on

$$P = \frac{1}{50} \int_0^{50} \left\{ 1 - \left[1 - Q \left(1 - \frac{x}{50} \right)^2 \right]^n \right\} dx$$

Tarkasti laskettuna, vaadittava törmäysten määrä $n=111$ halutun tehokkuuden 0,9 mukaan laskettuna. Alla olevissa taulukoissa on laskettu seulan tehokkuutta eri Q:n ja eri törmäysmäärien n kanssa. Samoissa taulukoissa on vertailuna sulkeissa samoilla parametreilla, mutta 2 mm suuremmalla reiän halkaisijalla lasketut arvot. Kuten on huomattavissa, seulan tehokkuus, eli toisaalta tarvittavien törmäysten määrä pienenee huomattavasti kasvattamalla reikäkokoja mainitun 2 mm. Mainittu reikäkoon kasvu ei kuitenkaan vaikuta oleellisesti materiaali jakaumaan, eikä jatko-prosessiin.

Taulukko 10 Rumpuseulan tehokkuus eri parametreilla (<0 - 50 mm)

n	Q=0,3	Q=0,5	Q=0,7
40	0,747 (0,776)	0,804 (0,835)	0,834 (0,867)
45	0,761 (0,791)	0,815 (0,847)	0,843 (0,877)
50	0,773 (0,803)	0,824 (0,857)	0,851 (0,885)
55	0,783 (0,814)	0,832 (0,865)	0,858 (0,892)
60	0,792 (0,824)	0,839 (0,872)	0,864 (0,898)
65	0,8 (0,832)	0,845 (0,879)	0,869 (0,903)

Sama tarkastelu 50 mm - 120

Taulukko 11 Rumpuseulan tehokkuus eri parametreilla (50 mm - 120 mm jakeelle mm)

n	Q=0,3	Q=0,5	Q=0,7
40	0,747 (0,776)	0,804 (0,835)	0,834 (0,867)
45	0,761 (0,791)	0,815 (0,847)	0,843 (0,877)
50	0,773 (0,803)	0,824 (0,857)	0,851 (0,885)
55	0,783 (0,814)	0,832 (0,865)	0,858 (0,892)
60	0,792 (0,824)	0,839 (0,872)	0,864 (0,898)
65	0,8 (0,832)	0,845 (0,879)	0,869 (0,903)

Aiemmin mainittu materiaalin syöttösuhteen kaava on käytännöllinen laskettaessa rumpuseulan sädettä. Kun yrityksen tavoitteena on lisätä NFR-murskeesta saatavan alumiinin määrää kellutusprosessista per tunti, tarkoittaa se suurempaa syötemäärää nykyisestä pesulaitokselle. Tällä hetkellä syötemäärä on noin 10 tn/h, asetetaan uudeksi syötemääräksi 14 tn/h, eli 40 % kasvu syötemäärään. Näillä tiedoilla (kaava 16)

Kaava 17

$$M = \psi g^{1/2} b \rho b \beta R^{3/2} = 0,72 \text{ m}$$

Syötteeseen sovitettu rummun säde R on siis 720 mm. Kun tiedämme rummun säteen, voimme laskea muut rummun mitat. Jos <50 mm jakeen tehokkuusluku halutaan olevan 0,9, voidaan mitat laskea käyttäen 65 törmäystä, Ø50 mm reiälle ja Q=0,7. Segmentin tehokkuus on tällöin laskennallisesti P=0,869. Toisen segmentin mitoituksessa tehdään kompromissi, jossa käytetään 65 törmäystä, Ø122 mm reiälle ja Q=0,7. Tämä siksi, koska laskennallisesti toisen segmentin tehokkuus ei oleellisesti nouse törmäysmäärän kasvaessa, ellei reikäkoko kasvateta. Tällöin päästään toisen segmentin osalta tehokkuuteen E=0,801. Jos tavoitteena olisi E=0,9 reikäkoon ollessa Ø120 mm ja Q=0,7, törmäyksiä vaadittaisiin 330 kpl. Koska törmäysten määrä on sama, voidaan etenemä molemmille segmenteille laskea samalla kertaa kaavalla 14

Kaava 18

$$L = x\ell = \phi x \beta R = 13640 \text{ mm}$$

Todennäköisesti rummun mitoituksessa joudutaan tekemään vielä kattavampia kompromisseja, koska yllä mainituilla arvoilla rumpuseula olisi yli 27 m pitkä, joten sen sovittaminen prosessiympäristöön olisi mahdotonta. Vaihtoehtolaskelmana, reikäkoolla Ø52, törmäysmäärällä 30, olisi E=0,841 ja ensimmäisen segmentin mitta 6296 mm. Toinen segmentti samalla törmäysmäärällä ja Ø125 mm reikäkoolla toisi tehokkuuden E=0,73. Rummun nopeuden säädön tulisi olla myös automatisoitua (invertteri tms.), koska rummun nopeuden vaihteluväli halutun vesiputousmaisena liikkeen aikaansaamiseksi on kapea (Stessel, 1991, s. 1-22).

7.5 Ylitteen käsittely

Ylitteen käsittelyn ongelmana on ylittekuljettimen jälkeisen luiskan toiminnan väärä ajoitus. Luiskan toiminnan viiveeksi on asetettu 0,0 s, joten se ei pidä millään tavalla paikkaansa. Lisäksi rumpuseulalta tuleva kuljetin on suhteellisen jyrkässä kulmassa, jolloin kuljettimen takalaita on alttiina isojen kappaleiden iskuille ja kuljetin vuotaa taittopäästään lattialle.

Kuljettimen kulman loiventaminen, hihnavaa'an siirto lähemmäs luiskaa ja luiskan oikea ajoitus olisivat suositeltavia muutostoimenpiteitä.

7.6 NFR <50 mm seulonta

Kaksoisiskuseulan ongelmana olivat lankamaiset kappaleet ja todellisuutta suurempi leikkauspiste. Seulan alitteen jatkokäsittelyssä olisi parempi, jos materiaali olisi kokoluokaltaan <15 mm. Toisaalta myös prosessin kannalta olisi parempi, että alitteeseen seuloutuvat yli >15 mm kappaleet seuloutuisivat kellutusprosessiin menevään jakeeseen, se olisi tuotannollisesti ja käsittelykuluja ajatellen edullisempaa. Käytännössä pitäisi tarkastella onko nykyiseen seulatyyppiin mahdollista saada parempi seulontatulos erityyppisillä seulaverkoilla, vai onko jokin muu seulatyyppi parempi ratkaisu. Jos pesulaitoksen syöte on 14 tn/h, täytyy seulan pystyä käsittelemään 9 tn/h, perustuen koeseulontatuloksiin (<50 mm määrä syötteessä). Tästä määrästä alitetta <15 mm on noin 20 %, eli noin 3 tn.

8 Pohdinta

Pesulaitosprosessin kehittäminen oli ammatillisessa mielessä erittäin mielenkiintoinen haaste opinnäytetyön aiheeksi. Yrityksen toiminnassa prosessi on erittäin merkittävässä asemassa, koska prosessissa käsiteltävät materiaalit ovat jatkokäsittelyiden jälkeen Heinolan tehtaiden tuloksellinen kivijalka. Työ oli mielenkiintoinen myös sen konkreettisuuden vuoksi. Työn tilaajana toiminut yritys oli myös tyytyväinen havaittuihin epäkohtiin ja muutospohdintoihin. Käsitykseni mukaan epäkohtiin puuttuva muutosprojekti on tavoitteena aloittaa pikimmiten. Opinnäytetyö olisi ollut hyvä rajata tarkemmin jo sen suunnitteluvaiheessa, nyt tämä tapahtui työn edetessä.

Opinnäytetyön etenemisen aikana kasvoi itselleni ymmärrys, mistä laitoksen ongelmat johtuvat. Laitteiden mitoitukseen tai toiminnallisiin periaatteisiin ei ole kiinnitetty riittävästi, jos ollenkaan huomiota. Mitään perusteita esimerkiksi rumpuseulan nykyiselle mitoitukselle ei osattu esittää. Myöskään en saanut vastausta siihen, miksi laitoksen syötön säännöstelyä ei ole korjattu, vaan hätäkorjauksesta johtuvasta syöttötavasta oli tullut uusi toimintamalli. Juurisyyden etsintään ei ole kiinnitetty huomiota, vaan on pyritty hoitamaan vain niistä johtuvia oireita. Muutoksia laitteistoon on tehty lähinnä empirismiin perustuen.

Muutosehdotusta olisi voinut jatkaa koko pesulaitosprosessia kattavaksi, mutta tällöin se olisi paisunut valtavan suureksi. Opinnäytetyössä esitetty muutosehdotus on mahdollisuus toteuttaa itsenäisissä osissa, jolloin niiden läpivieminen on jatkuva tuotanto huomioiden helpompaa.

Lähteet

- Alter, H., Gavis, J. & Renard, M. (1981). Design models of trommels for resource recovery processing. *Resources and conservation*, s. 223-240.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/53/EY/2000 Haettu 13.12.2020 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/53/oj/fin>
- Gaudin, A. (1939). *Principles of mineral dressing*, New York: McGraw Hill.
- Hua, W.; Gao, B.; Jie, R.; Aimin, L.; & Hu, Y. (2018). Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research* (Volume 143), s. 608-631.
- Krot, P., Zimroz, R., Michalak, A., Wodecki, J., Ogonowski, S., Drozda, M., & Jach, M. (2020). Development and verification of the diagnostic model of the sieving screen. *Shock and Vibration*.
- Kuusakoski. (2016). Rumpuseulan kokoonpanopiirustus.
- Kuusakoski. (2019). Pesulaitoksen asemapiirustus.
- Kuusakoski. (2019). Tuotantoraportti yrityksen tuotannonohjausjärjestelmästä.
- Kuusakoski. (2020). Materiaalitasekoe, yhteenveto kokeesta.
- Makinde, Mpofo & Ramatsetse. (2015). Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries. *International Journal of Mineral Processing vol 145*, s. 17-22.
- Stessel, R. I. (1991). A new trommel model. *Resources, Conservation and Recycling*, s. 1-22.
- Sucher, R. (1969). Sieving, theoretical and experimental investigations. *Ph.D. Dissertation*. Kansas State Univ.
- Wang, D., Ma, X., Zhi, X. & Zhang, S. (2013). Research Review of Scrap Metals Eddy Current Separation Technology. *Sensors & Transducers*, s. 242-248.
- Vesilin, A., Peirce, J. & Weiner, R. (1994). *Environmental Engineering*. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Zhanfu, L., Xi, T., Bi, Z., Xiaole, G. & Jingxiu, L. (2018). Design and Efficiency Research of a New Composite Vibrating Screen. *Shock and Vibration*.

