



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Sorttaus esirikastusmenetelmänä - Online-XRF- menetelmän käyttö sorttauksessa

Jonne Lukkarila

Kaivos- ja rikastustekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Elokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Sorttaus esirikastusmenetelmänä - Online-XRF-menetelmän käyttö sorttauksessa

Jonne Lukkarila

Oulun yliopisto, Kaivos- ja rikastustekniikan tutkinto-ohjelma

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Markku Seitsaari

Kandidaatintyön tarkoituksena on kartoittaa, millaisia online-XRF-menetelmiä kaivosteollisuudessa käytetään tällä hetkellä esirikastusvaiheessa. Työssä perehdytään röntgensäteilyyn ja erityisesti XRF-teknologiaan ja sen hyviin ja huonoihin ominaisuuksiin. Työssä esitellään tehokkaan ja kilpailukykyisen sorttauksen potentiaalisuutta malmivarantojen ehtyessä ja esitellään aihetta esimerkkien avulla havainnollistaen. Työssä esitellään ja käydään läpi tyypillisimpien sorttausmenetelmien eli partikkelisorttauksen ja bulkkisorttauksen mahdollisuuksia ja rajoitteita. Sorttauksen vaikutusta ja mahdollisuuksia rikastamon prosessinohjauksen toimintaan havainnollistetaan esimerkin avulla. Työssä esitellään XRF:ltä vaadittavia ominaisuuksia, jotta voidaan saavuttaa jatkuvatoiminen ja riittävän tarkka sorttauslaitteisto kaivosteollisuuden tarpeisiin.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto.....	5
2 Röntgensäteily ja XRF.....	8
2.1 Röntgensäteilyn historiaa ja teoriaa.....	8
2.2 XRF välineistö.....	9
2.3 Röntgensäteilyn lähteet.....	11
3 Sorttaus.....	12
3.1 Sorttauksen potentiaali.....	12
3.2 Sorttausmenetelmät.....	14
3.3 XRF teknologia sorttauksessa.....	16
3.4 Sorttauksen vaikutus rikastamon prosessinohjaukseen.....	17
4 Mittaaminen.....	19
4.1 Mittauksen reaaliaikaisuus.....	19
4.2 Mittauksen tarkkuus.....	19
5 Yhteenveto.....	20
Lähdeluettelo.....	22

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BOS	bulkkisorttaus, Bulk Ore Sorting
Cut-off grade	taloudellisesti kannattavan louhinnan mineraalipitoisuusalaraja
ED-spektrometria	energiadispersiivinen spektrometria
FCA	Fast Conveyor Analyzer
Fotoelektroni	valosähköisessä ilmiössä irronnut elektroni
ROM	kaivoksesta louhittu malmi, Run-Of-Mine
SBOS	sensoripohjainen malmien jaottelu, Sensor Based Ore Sorting
WD-spektrometria	aallonpituusdispersiivinen spektrometria
XRF	röntgenfluoresenssispektrometria, X-Ray Fluorescence

1 JOHDANTO

Sorttaus engl. sorting, joka tarkoittaa malmin jonkin ominaisuuden perusteella tapahtuvaa sivukiven/malmin tunnistamista, valikointia ja lopulta niiden erottelua toisistaan. Kiinnostus sorttaukseen on syntynyt toimiessani kaivosteollisuudessa vuorotyönjohtajana rikastamalla, jossa huomasin malmin metallipitoisuuksien vaihtelun olevan suurta ja joskus jopa päivän metallipitoisuuksien keskiarvot alittivat kaivoksen cut-off -pitoisuuden. Tämän johdosta heräsi kysymys, että kuinka paljon sivukiveä todellisuudessa pääsee rikastamon syötteeksi asti ja miten sitä voisi kustannustehokkaasti estää, jolloin rikastamon syöte olisi tasalaatuisempaa, prosessin ohjaaminen helpottuisi ja yhtiö saavuttaisi kustannussäästöjä, kun energiaintensiiviseen jauhatuspiiriin päätyvän sivukiven määrä laskisi. Tutkiessani asiaa törmäsin aiheeseen nimeltään sorttaus ja samaan aikaan yliopistolta tarjottiin sorttaukseen liittyvää kandidaatintyön aihetta. Allekirjoittaneen mielestä on suorastaan ihmeellistä, ettei sorttausta ole vielä valjastettu standardiksi kaivosteollisuuden tuotantoon, mutta aika näyttää yleistykö sorttauspiirin käyttäminen kaivoksilla. Kandidaatintyön aiheena on selvittää online-XRF-menetelmien käyttöä kaivosteollisuudessa ja erityisesti esirikastusvaiheessa. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan online-XRF-menetelmällä suoritettavaa esirikastusta eli sorttausta, joka suoritetaan hihnakuljettimella kulkevalla syötteelle esimurskauksen jälkeen. Tarkasteltavia sorttausmenetelmiä ovat partikkelisorttaus (particle sorting) ja bulkkisorttaus (bulk ore sorting).

Korkeapitoisten malmiesiintymien ehtyessä, jäljelle jäävät malmiesiintymät ovat matalapitoisempia ja hankalampia hyödyntää, vaativat suurempien malmimäärien kaivamista, kuljettamista ja käsittelyä per tonni arvokasta mineraalia kohden. Näiden suurten määrien kuljetus, hienontaminen ja käsittely on kallista ja energiaintensiivistä. Matalapitoiset malmiot sisältävät yleensä suuren määrän vapautunutta harmemineraalia, joka voidaan poistaa ennen jauhatusta. Tätä harmemineraalin poistamista syötemateriaalista kutsutaan esirikastukseksi,

joka vähentää kokonaisuutta ja parantaa malmin pitoisuutta seuraavassa prosessivaiheessa. (Pokrajcic & Lewis-Gray 2010)

Esirikastus voi parantaa merkittävästi projektien taloudellisuutta päivittämällä cut-off -pitoisuutta matalammaksi ja/tai lisäämällä tuotannon tehokkuutta. Lisäksi, harmemineraalit sisältävät usein paljon silikaatteja, jotka ovat usein kovempia ja kuluttavampia mineraaleja kuin arvomineraalit, joten tämän köyhän materiaalin poistaminen ennen jauhatusta voi merkittävästi vähentää energian kulutusta ja prosessin käyttökustannuksia. Malmin kuljetusvaatimukset kuten nostaminen ylös kaivoksesta ja siten rekkojen tai kuljettimien käyttö saattaa vähentyä, ja vedenkulutus vähenee ja pienempi määrä hienoaainesta päätyy hävitettäväksi märäksi rikastushiekkalietteeksi per tonni valmistettua tuotetta kohden. (Valery & Duffy 2017)

Esirikastukseen voidaan soveltaa monenlaisia tekniikoita, kuten painovoimaan perustuvaa erottelua, seulontaa, sensoripohjaista malmien lajittelua (SBOS) ja magneettierotusta. Soveltuvuus riippuu kussakin tapauksessa malmin ominaisuuksista, sijainnista ja taloudellisista olosuhteista. (Valery & Duffy 2017)

Esirikastus voidaan suorittaa myös käyttämällä SBOS:a, joka mittaa yhtä tai useampaa ominaisuutta, mikä vaihtelee arvomineraalin ja harmemineraalin välillä, käyttäen sensoria tai sensorien yhdistelmää hyödyksi. Nykyinen kaupallisesti saatavissa oleva tekniikka perustuu yksittäisten partikkelien mittaamiseen ja erottamiseen, minkä seurauksena sen suorituskyky on rajoitettu. Tämä tekniikka on osoittautunut menestyksekkääksi pienemmissä *niche* -sovelluksissa. Kuitenkin, jotta SBOS olisi käytännöllinen suurten kaivostoimintojen esirikastuksessa, sitä on sovellettava suuriin malmimääriin, kuten käyttäen kaivinkoneiden kauhoja, lastattuja kuorma-autoja tai täydellä kapasiteetilla toimivia kuljetinhihoja. (Valery & Duffy 2017)

Malmien lajittelu perustuu arvomineraalin ja harmemineraalin erottavan ominaisuuden mittaamiseen jonkinlaisen sensorin avulla. Saatavilla on useita sensoryyyppejä, joita käytetään yleisesti teollisuuden sovelluksissa mukaan lukien fotometriset-, sähkömagneettiset-, radiometriset- ja röntgensädesensorit. Yhteenveto yleisimmistä anturityypeistä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Yleisimmät sorttauksen sensorityypit. (Duffy et al. 2015)

Sensor Type	Separation Property	Areas of application	Current application / development status	Speed	Penetration
Magnetic resonance (MR)	Excitation and detection of specific radio frequency spectral lines	Only applicable to selected minerals (currently chalcopyrite)	Development for bulk sorting	Seconds	Penetrating
Radiometric (RM)	Natural gamma radiation	Uranium, precious metals	Particle sorting	Real-time	Penetrating
Dual Energy X-ray Transmission (XRT)	Absorption x-rays (atomic density)	Base and precious metals, industrial minerals, fuel, diamonds	Particle sorting	Real-time	Partly penetrating
X-ray Fluorescence (XRF)	The emission of secondary (fluorescent) X-rays	Diamonds	Particle sorting	Real-time	Surface
Colour (CCD Colour Camera)	Reflection, absorption, transmission	Base and precious metals, industrial minerals, diamonds	Particle sorting	Real-time	Surface
Photometric (PM)	Monochromatic Reflection / Absorption	Industrial minerals, diamonds	Particle sorting	Real-time	Surface
Electromagnetic (EM)	Conductivity, permeability	Base metals	Particle sorting	Real-time	Penetrating
PGNAA	Prompt-gamma neutron activation analysis	Limestone, Fe, Al, Pb, Mn, Cu, Zn	Measurement only	Minutes	Penetrating
PFTNA	Pulsed fast and thermal neutron activation	Ni, Fe, Co, Mg, Si, Al, Mn, Cr, C, H, O	Measurement only	Minutes	Penetrating
Near Infrared Spectrometry (NIR)	Reflection, Absorption	Base metals, industrial minerals	Recycling applications	Real-time	Surface
Infrared (IR)	Heat conductivity, heat dissipation	Base metals, industrial minerals	Development	Real-time	Surface
Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)	Atomic spectroscopy using a highly energetic laser pulse.	Raw materials	Raw material applications	Real-time	Surface
Laser-induced fluorescence (LIF)	A spectroscopic method, measurement of photon emissions	Raw materials	Raw material applications	Real-time	Surface
Eddy-current	High-frequency changing magnetic fields create strong eddy currents in the non-ferrous metal parts	Recycling	Recycling applications	Real-time	Penetrating

2 RÖNTGENSÄTEILY JA XRF

2.1 Röntgensäteilyn historiaa ja teoriaa

Nykyisen modernin atomiteorian kehitys perustuu röntgensäteiden löytämiseen vuonna 1895. Nykypäivän sivistyneessä maailmassa röntgenteknologialla on edelleen tärkeä rooli materiaalitieteiden kehityksessä, tuotantoprosessien laaduntarkkailussa ja lääketieteen diagnostiikassa. (Beckhoff et al. 2007)

Röntgensäteet, jotka Wilhelm Conrad Röntgen havaitsi ensimmäisen kerran vuonna 1895 ovat sähkömagneettisia aaltoja, joiden spektri ulottuu noin 80 nm:n aallonpituudelta (15 eV) tyhjiöultravioletialueen vieressä noin 0,001 nm:iin (1,2 MeV) päällekkäin jossain määrin gammasäteiden alueen kanssa. Ydinprosessien tuottamaa yli 1 MeV:n sähkömagneettista säteilyä kutsutaan yleensä gammasäteilyksi, kun taas elektronien synnyttämää alle 80 nm:n säteilyä, joka hidastuu atomiytimen ulkopinnoilla tai elektronien välisten energiatilojen muutoksissa, kutsutaan röntgensäteilyksi. Röntgen- ja gammasäteiden jaottelu on jokseenkin keinotekoisista ja harhaanjohtavaa. Elektronien hidastumiseen perustuvaa röntgensäteilyä kutsutaan jarrutus säteilyksi, jolla on jatkuva spektri. Elektronien siirtymät sisempien elektronikuorien välillä atomissa muodostavat karakteristista röntgensäteilyä. Elektronikuorten rakenteiden mukaisessa järjestyksessä alkuaineiden karakteristisen säteilyn odotetaan alkavan natriumista. Röntgensäteilyä käytännön sovelluksiin tuotetaan kahdella eri periaatteella, joita ovat tiettyjen isotooppien spontaani radioaktiivinen hajoaminen ja keinotekoisesti kiihdytettyjen elektronien vuorovaikutus, joko röntgenputkessa tai kiihtyvässä magneettikentässä. (Beckhoff et al. 2007)

Elektronisuihkun ja materiaalin välisen vuorovaikutuksen seurauksena atomin sisemmiltä elektronikuorilta saattaa poistua elektroni. Poistuva elektroni lähtee kineettisellä energialla ($E - \phi$), joka on energiaero vuorovaikutuksessa muodostuneen uuden hiukkasen (E) ja atomielektronin sidosenergian (ϕ) välillä. Atomista poistunut elektroni jättää tyhjän paikan elektronirakenteeseen, mutta lyhyen ajan sisällä atomin elektronirakenne järjestäytyy uudelleen, jolloin ylemmältä elektronikuorelta tuleva elektroni täyttää atomista poistuneen alemman elektronikuoren elektronin paikan. Edellä mainitun prosessin avulla atomi läpikäy fluoresenssin tai röntgenfotonin emission, joiden energia on yhtä suuri kuin alku- ja lopputilan

väläinen energiaero. Tämän fotonin havaitseminen ja sen energian mittaaminen mahdollistaa alkuaineen määrittämisen ja spesifisen elektronin siirtymän määrittämisen. Tässä on perusta XRF-spektrometrille, jossa alkuaineet voidaan kvantifioida viritettävän näytteen ominaisluonteisten röntgensäteiden emissioiden perusteella. (Guthrie & Ferguson 2012)

Atomin sisemmiltä elektronikuorilta voidaan poistaa mikä tahansa elektroni ja poistetun elektronin paikan korvaamiseen soveltuvat lukuisat ulompien elektronikuorien elektronit. Tämän johdosta on olemassa useita sallittuja siirtymätyyppejä, joihin sovelletaan kvanttimekaniikan lakeja ja jokaisella siirtymällä on oma spesifinen linjansa tai energia. Kolme pääasiallista siirtymää tai spektrisarjaa on nimetty K:lla, L:llä ja M:llä, mitkä vastaavat elektronikuoria K, L ja M, joilta elektroni alun perin poistettiin. Suurinta energiaa edustaa K-sarjan linja ja toiseksi suurinta L-sarja ja alinta energiaa M-linja. Sarjassa spesifisiä siirtymiä merkitään alaindeksillä α , β , γ jne., mitkä osoittavat, mikä ylempi energiakuori on mukana elektronin vapauttamisessa ja numeerisella alaindeksillä ilmaistaan kvanttitilaa ylemmässä elektronikuoressa. Esimerkiksi molybdeenin $K\alpha_1$ -siirtymä tuottaa fotonin, jonka aallonpituus on 0,071 nm. On tärkeää huomata, että vain korkeimman resoluution spektrometrit pystyvät ratkaisemaan $K\alpha_1$ - ja $K\alpha_2$ -linjat, joten käytännön tarkoituksiin röntgenspektrometriassa mainitaan vain $K\alpha$ -linja. (Guthrie & Ferguson 2012)

Fluoresenssin lisäksi on olemassa myös toinen prosessi millä virittynyt atomi saadaan palautumaan perustilaan. Tämän nimi on Auger-efekti, jossa emittoituu toinen fotoelektroni ensimmäisen lisäksi, pyrkimyksensä palauttaa atomi perustilaansa. Fluoresoivien viritettyjen atomien suhteelliset määrät kuvataan fluoresenssisaannolla, joka kasvaa atomiluvun kasvaessa kaikilla kolmella sarjalla. (Guthrie & Ferguson 2012)

Suuren liike-energian sisältävät elektronit eivät ole ainoita hiukkasia, jotka voivat aiheuttaa fotoelektronien irtoamista sisemmiltä elektronikuorilta ja sen jälkeen emittoivan ominaistyyppillistä fluoresoivaa säteilyä. Saman vaikutuksen voi luoda myös suuren energian sisältävillä röntgensädefotoneilla, jolloin on mahdollista virittää näyte röntgenputken tuottamilla fotoneilla tai millä tahansa fotoneilla, jotka sisältävät tarvittavan määrän energiaa. On olemassa myös XRF-spektrometrisia sovelluksia, missä röntgenputkesta tulevia röntgensäteitä käytetään sekundaarisen fluoresoijan virittämiseen, joka lähettää fotoneja, joita taas edelleen käytetään näytteen virittämiseen. (Guthrie & Ferguson 2012)

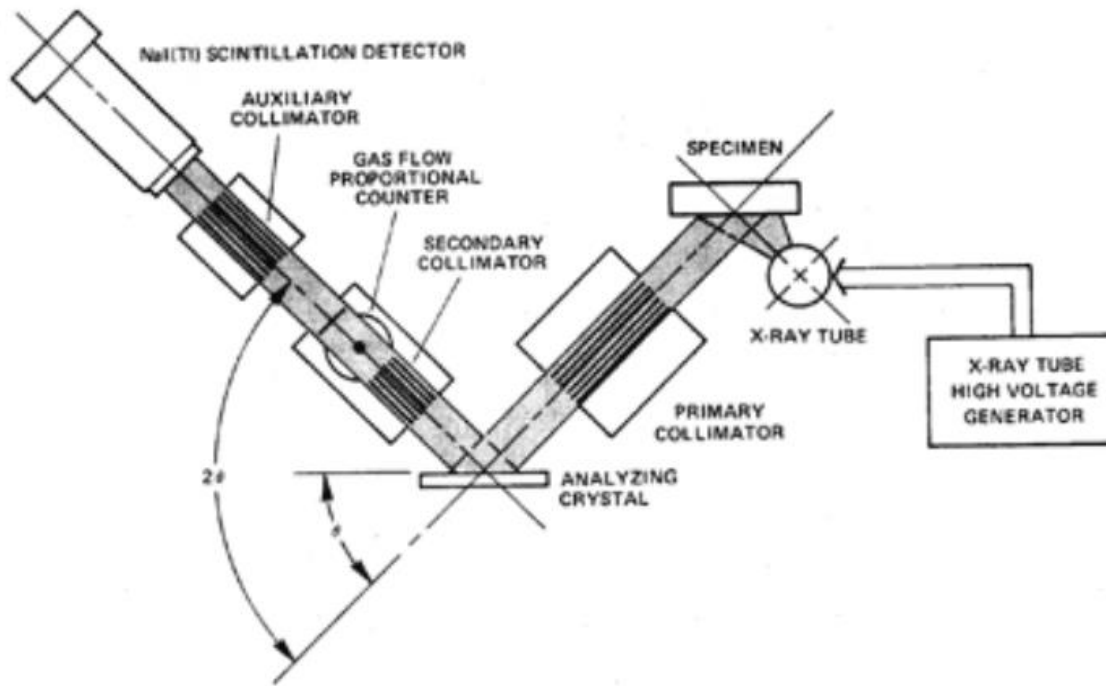
Röntgensäteiden absorboituessa materiaaliin tapahtuu elektronien irtaantumista ja sitä seuraavaa ominaistyyppillistä fotoelektronien emittoitumista, joiden lisäksi röntgensäteet voivat välittyä tai sirottua. Rayleigh-sironnaksi kutsutaan siroamista, jossa ei tapahdu energian muutoksia kun taas Comptonin sironnaksi kutsutaan siroamista, jossa osa energiasta menetetään. Sironneet röntgensäteet ovat monesti ongelmallisia XRF:ssä, koska ne luovat korkeaa taustasäteilyä. (Guthrie & Ferguson 2012)

Aallonpituudet ovat riippumattomia kemiallisen sitoutumisen tilasta, koska vain sisemmät elektronikuoret osallistuvat röntgensäteiden emissioon. Tähän sääntöön on olemassa myös poikkeus, joka koskee matalan järjestysluvun omaavia (Z) alkuaineita, jotka sisältävät vähemmän elektroneja. Kemiallisten reaktioiden puuttuminen mahdollistaa näytteen alkuainekoostumuksen määrittämisen riippumatta siitä ovatko alkuaineet puhtaassa muodossaan vai yhdisteinä. (Guthrie & Ferguson 2012)

2.2 XRF välineistö

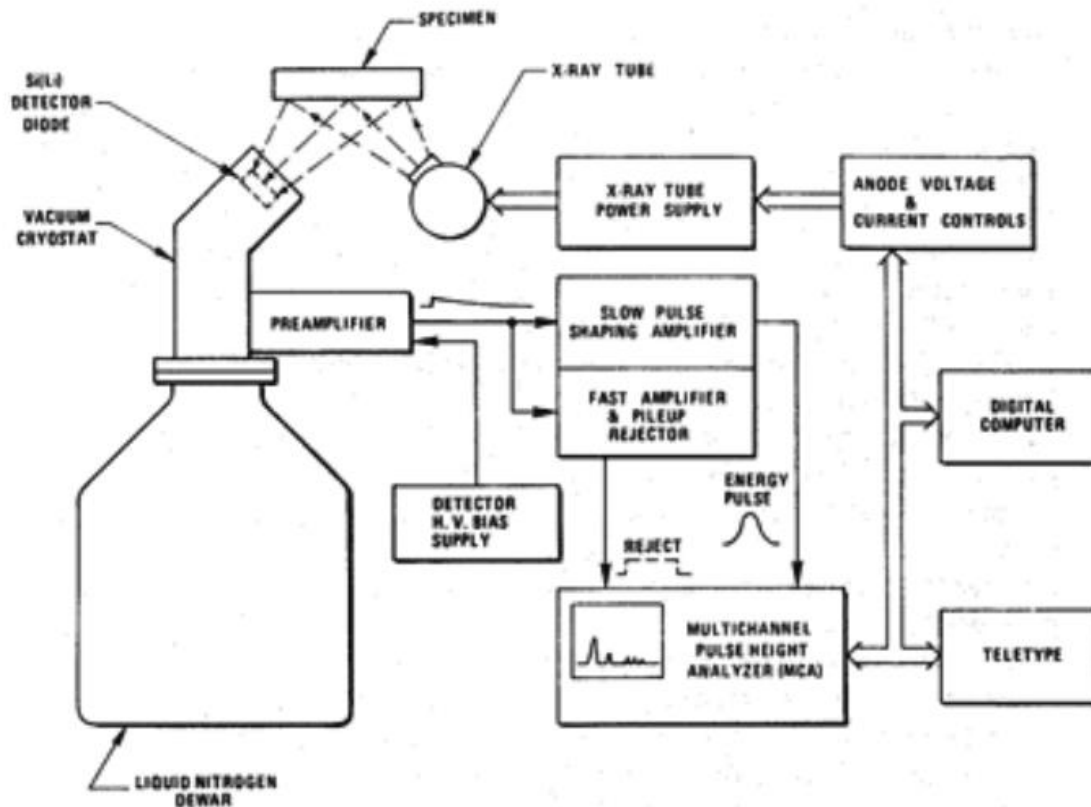
Nykyisin käytössä olevasta XRF-välineistöstä suuri osa pohjautuu kahteen eri luokkaan: energiadiispersiivisiin (energy-dispersive) eli ED-spektrometreihin sekä aallonpituusdispersiivisiin (wavelength-dispersive) eli WD-spektrometreihin. Nämä kaksi luokkaa sisältävät suuren määrän erityyppisiä röntgenlähteitä, kokoonpanoja, optiikkaa ja detektoritekniikoita. (Guthrie & Ferguson 2012). Käsitellään nyt näitä kahta yleisintä instrumenttityyppiä.

Tutustutaan nyt yksinkertaiseen WD-järjestelmään. Kuvassa 1 näkyvä laite toimii kollimoiduilla eli yhdensuuntaistetuilla röntgensäteillä, jotka säteilevät näytteestä. Tämän tyyppinen järjestelmä perustuu Braggin lakiin, joka kuvaa sähkömagneettisen säteilyn siroamista. Detektori on tiettyssä kulmassa ja skannaa analysoitavasta kiteestä siroavan spektrin. (Guthrie & Ferguson 2012)



Kuva 1. WD-XRF -järjestelmä (Guthrie & Ferguson 2012).

Kuvassa 2 esitetään eräs ED-spektrometri, jonka toiminta perustuu näytteestä tulevaan polykromaattiseen spektriin, jonka osuessa detektorille voidaan jokaisen fotonin energia rekisteröidä. Tietojärjestelmä ja ilmaisintekniikka rakentavat röntgenspektrin histogrammina, josta voidaan selvittää fotonien lukumäärä suhteessa energiaan. Tämä tekniikka on soveltuvin online-tunnistamiseen sen lähes reaaliaikaisen toiminnan ansiosta. (Guthrie & Ferguson 2012)



Kuva 2. ED-XRF -järjestelmä (Guthrie & Ferguson 2012).

2.3 Röntgensäteilyn lähteet

Molempien instrumenttityyppien peruslähtökohta on röntgenlähde. Röntgenlähde koostuu yleensä tyhjästä kammiosta, jossa on lämmitetty katodi, joka koostuu yleensä volframilangasta, ja anodista, joiden välillä pidetään useiden kymmenien kilovolttien potentiaaliero. Lämmenneet elektronit irtoavat katodista ja ne kiihdytetään potentiaalieron avulla siten, että ne törmäävät anodiin. Elektronisuihkun törmätessä anodiin muodostuu jarrutussäteilyä sekä anodimateriaalille ominaistyyppillistä röntgensäteilyä. Emittoituneet fotonit pääsevät nyt putken sivuun rakennetun beryllium-ikkunan läpi. XRF:n käyttäminen ei rajoitu pelkästään röntgenputken käyttöön kiihdytyslähteenä. Harvinaisempina kiihdytintyyppinä voivat toimia gammasäteilevät radioisotoopit kuten ^{241}Am , ^{109}Cd ja ^{153}Gd , elektronilähteet ja synkrotronit, jotka tuottavat erittäin intensiivisiä, koherenteja ja monokromaattisia röntgensäteitä. (Guthrie & Ferguson 2012)

3 SORTTAUS

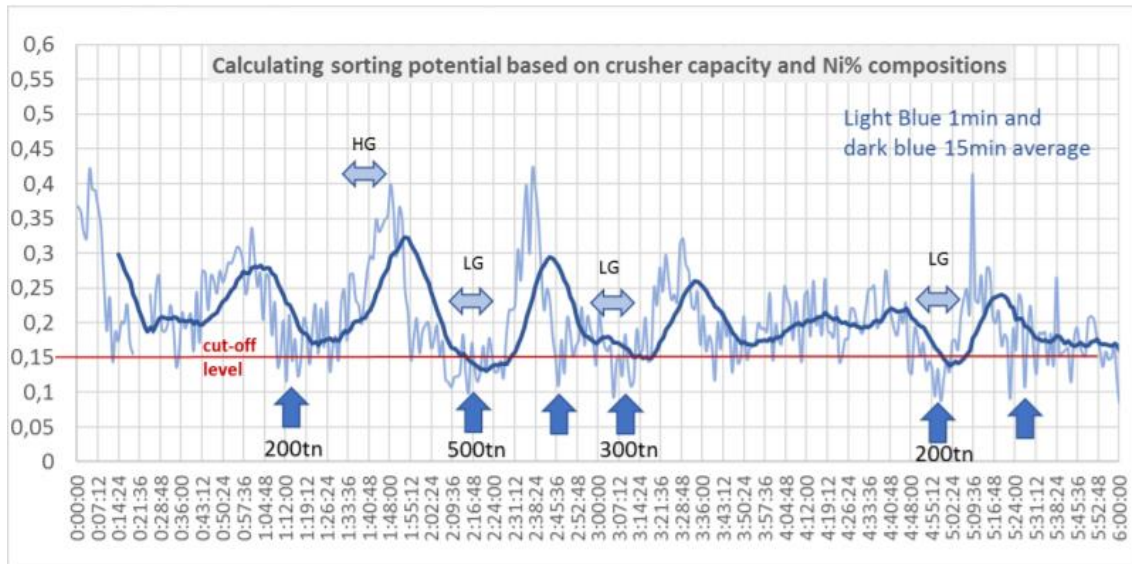
3.1 Sorttauksen potentiaali

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan online-XRF -menetelmällä suoritettavaa esirikastusta eli sorttausta, joka suoritetaan hinnakuljettimella kulkevalla syötteelle esimurskauksen jälkeen. Esimurskauksen jälkeen malmi ja sivukivi eivät ole vielä sekoittuneet keskenään, vaan ne esiintyvät pääosin toisistaan erotettavissa olevina pätkinä kuljetinhihnalla (Raatikainen et al. 2021). Sorttaus on menetelmä, jonka avulla on tarkoitus poistaa sivukivi malmin seasta mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, tässä tapauksessa heti esimurskauksen jälkeen.

Kustannustehokas esirikastus on ollut kaivosteollisuudessa mietinnän alla jo vuosikymmeniä. Uudet innovaatiot, tekniikat ja sovellukset mahdollistavat sivukiven ja malmin erottamisen toisistaan riittävällä tarkkuudella. Kaivoyhtiöt ovat väheksyneet jo pitkään raakkulaimennuksen osuutta kaivoksen taloudellisissa laskelmissa. Perinteisesti avolouhoksissa käytetty noin 5 % raakkulaimennus on paljon vähäisempi kuin mitä lukuisat tutkimukset todistavat. Nyt kaivoyhtiöt kehittävät uusia tapoja, kuten sorttausta, vähentääkseen niin raakkulaimennusta kuin malmitappioitakin. (Auranen & Raatikainen, 2020)

Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty erään kaivoksen esimurskauksen tuotteen pitoisuusvaihtelut 6 tunnin ajanjaksolta kuljetinhihnalta mitattuna. Kuvassa esiintyvät nikkelpitoisuudet on esitetty yhden minuutin (vaaleansininen) ja 15 minuutin (tummansininen) keskiarvopitoisuuksina. Kuten kuvasta havaitaan, 15 minuutin keskiarvolla tarkasteltuna esimurskauksen tuote näyttää pääosin ylittävän kaivoksen cut-off -pitoisuuden, mutta jo yhden minuutin keskiarvopitoisuudella tarkasteltuna havaitaan, että 6 tunnin ajanjaksolla rikastamolle syötetään vähintäänkin yli 1200 tonnia cut-off -pitoisuuden alittavaa sivukiveä. Tässä huomataan kaivosteollisuudessa esiintyvä ongelma keskiarvoistamisesta, jolloin keskiarvopitoisuudet vaikuttavat hyviltä, vaikka tosiasiallisesti sivukiveksi luokiteltua kiviainesta

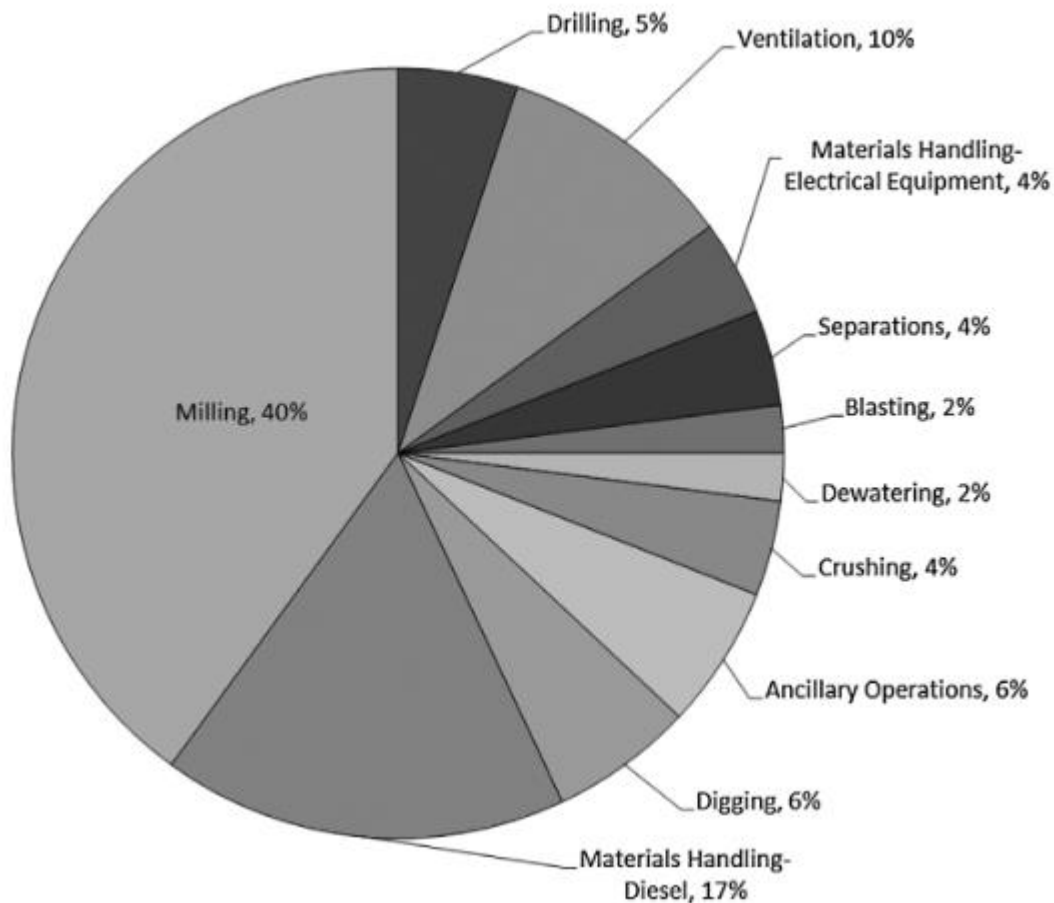
pääsee rikastamon syötteenksi asti huomattavia määriä. (Auranen & Raatikainen 2020). Tähän keskiarvoistumiseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi sorttauksella.



Kuva 3. Sorttaus potentiaalin kartoittaminen murskaimen kapasiteetin ja nikkeliipitoisuuksien avulla käyttäen apuna nikkeliipitoisuuksien minuutin ja 15 minuutin keskiarvoja (Auranen & Raatikainen 2020).

Sorttauksen todellinen arvo piilee siinä, että se mahdollistaa suuremman metallimäärän tuottamisen, kun lisätään louhimiskapasiteettia samalla jauhatuksen ja vaahdotuksen kustannusten pysyessä likimain samalla tasolla (Lessard et al. 2016). Sorttauksen tavoitteena on vähentää energiantensiiviseen jauhatuspiiriin päätyvän syötteen kokonaismäärää, vähentämättä kuitenkaan merkittävästi saantia. Yleensä sorttauslaitteisto asennetaan operoimaan run-of-mine (ROM) -syötevirtaa, joka on läpikäynyt suhteellisen vähän energiaa kuluttavan esimurskauksen. (Lessard et al. 2014). Sorttauksen avulla voidaan myös merkittävästi vähentää muodostuvan rikastushiekkalietteen määrää sekä rikastamon vaatiman prosessiveden määrää.

Alla olevassa kuvassa numero 4 esitetään kaivosteollisuuden sähkönkulutusta. Kuvasta nähdään, että jauhatus on merkittävin kaivosteollisuuden energian kuluttaja. Toisaalta murskaus esittää vain pientä osuutta energiankulutuksesta.



Kuva 4. Energiankulutus kaivosteollisuudessa, jauhatus (milling) kattaa 40 % kokonaiskulutuksesta (Lessard et al. 2014).

Tarkasteltaessa laajan mittakaavan BOS:sen mahdollisuuksia kaivosteollisuudessa, huomataan, että BOS:sen avulla voi olla mahdollista siirtyä käyttämään vähemmän selektiivisiä louhimismenetelmiä. Bulkkisorttausta käytettäessä Sensor Diversion Unit (SDU) on tyypillisesti matalammat kuin kaivoksen itse käyttämät Selective Mining Unit (SMU), käytettäessä noin 15 000 t louhosmallia (Gleeson 2021).

3.2 Sorttausmenetelmät

Partikkelisorttaus perustuu käytännössä yksittäisten yli 30 mm kivien lajitteluun jokainen kivi kerrallaan. Partikkelisorttauksessa malmi lajitellaan eri fraktioihin seulomalla ja jakeissa olevat kivet erotellaan yksitellen. Erottelu perustuu identifioimiseen joko massan perusteella röntgentomografialla, värin perusteella tai heijastavuudella käyttäen apuna optisia menetelmiä.

Partikkelisorttausta rajoittaa vaadittava partikkelikoko, joten mitä pienempi partikkelikoko, niin sitä suurempi määrä partikkeleita ja sitä pienempi sorttauskapasiteetti. (Auranen & Raatikainen 2020). Partikkelisorttauksen potentiaalia rajoittaa sen suhteellisen alhainen kapasiteetti (n. 300 t/h) sekä kykenemättömyys pienen raekoon omaavien partikkeleiden sorttaukseen. Lisäksi partikkelisorttaukseen vaaditaan kaksivaiheinen murskaus, kolmivaiheinen seulonta eri fraktioihin (0–30 mm, 30–70 mm ja 70–150 mm), pesu jokaiselle fraktiolle sekä analysointi- ja lajittelulaitteisto jokaiselle fraktiolle erikseen. Partikkelisorttauksessa pystytään käsittelemään 50–70 % materiaalista ja tällöin jäljelle jäävää hienoainesta 30–50 % (0–30 mm) ei pystytä erottelemaan kyseisellä sorttaus tekniikalla. (Raatikainen et al. 2021). Yksittäisten kappaleiden poistaminen kuljetinhihnalta partikkelisorttauksessa voidaan toteuttaa esimerkiksi joko pneumaattisesti, mekaanisesti tai hydraulisesti.

Bulk-ore-sorting (BOS) eli bulkkisorttaus perustuu bulkkimassan lajitteluun kuljetinhihnalla, mikä pitää sisällään kaikki mahdolliset raekoot. Bulkkimassan sorttaus perustuu online-alkuaineanalyysiin tai spektriantureihin (XRF, PGNA, LIBS, LIF, RAMAN ja IR), jotka mittaavat materiaalin alkuaine- tai mineraalikoostumusta liikkuvalla kuljetinhihnalla, josta malmi ja sivukivi ohjataan mekaanisilla ratkaisuilla kumpikin omaan sijoituspaikkaansa. (Auranen & Raatikainen 2020). BOS:n kapasiteetille ei ole ylärajaa ja kaikki mahdolliset raekokoluokat on mahdollista erotella. BOS ei myöskään vaadi seulontaa, pesua eikä useita analysointi- ja lajittelulaitteistoja. Riittää kun on saatavilla yksi kuljetinhihna, analysointi- ja lajittelulaitteisto sekä lajitteluportti. (Raatikainen et al. 2021). BOS:ta voidaan täten pitää partikkelisorttausta potentiaalisempana sorttaustekniikkana useammissa tapauksissa sen yksinkertaisuuden vuoksi.

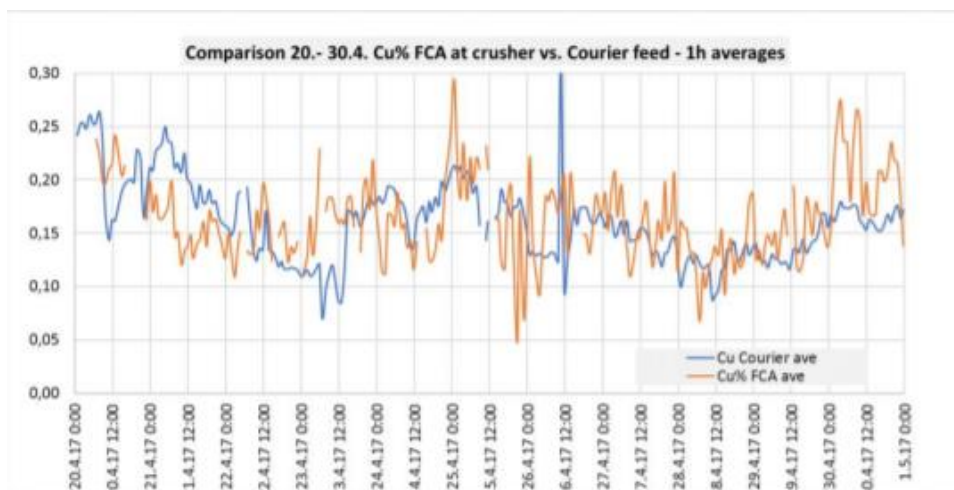
3.3 XRF-teknologia sorttauksessa

XRF on vanha ja hyvin tunnettu teknologia, jota on viime aikoina alettu käyttämään esimurskatun malmin metallipitoisuuksien mittaamisessa. XRF:lla voidaan mitata malmin pintaa useita kertoja sekunnissa ja mittaustietoa voidaan kerätä käytännöllisiin jaksoihin. Huono puoli XRF:ssa on se, ettei sillä voida mitata kalsiumia kevyempiä alkuaineita ja teknologialla pystytään mittaamaan ainoastaan materiaalin pintaosaa. (Rutter 2020). Saatavilla on myös muita sorttaukseen soveltuvia teknologioita, joilla voidaan läpäistä kokonaan

analysoitava materiaali, mutta yleensä kokonaan läpäisevät teknologiat eivät mahdollista reaaliaikaista mittaustulosta, joka voidaan havaita taulukosta 1.

3.4 Sorttauksen vaikutus rikastamon prosessinohjaukseen

On havaittu, että esimurskauksen jälkeen hinnakuljettimelta analysoitavan malmin metallipitoisuus korreloi rikastamalla jauhatuksen tuotteesta otettujen näytteiden metallipitoisuuksien kanssa. Kyseinen korrelaatio on todistettu eräässä kuparikaivoksessa tehdyssä kokeessa, jossa analysoitiin matalapitoisen kuparimalmisyötteen pitoisuutta käyttäen FCA:ta (Fast Conveyor Analyzer) esimurskauksen jälkeen. FCA:lla saatuja analyysiejä verrattiin rikastamalla olevan näytteenotinanalyysaattori COURIER:in antamiin analyysieihin jauhatuksen tuotteesta. COURIER analysoi näytteitä tyypillisesti kerran 15–20 minuutissa. Kokeessa eliminoitiin aikaviiveen vaihtelu 6–8 tuntiin, mikä johtuu tuotantosyötöstä ja esimurskatun malmin tilavuuden vaihteluista. Käyttämällä pidempiä keskiarvoja ja aikajaksoja havaittiin, kuinka analyysaattorit antoivat samankaltaiset trendiviivat matalapitoiselle kuparimalmille. FCA:n yhden minuutin analyysiarvoja käytettiin tunnin keskiarvojen laskemiseen, jonka jälkeen verrattiin FCA:n ja COURIER:in tunnin keskiarvoja. (Raatikainen et al. 2021)



Kuva 5. FCA:n ja COURIER:in analysoimien kuparipitoisuuksien tunnin keskiarvot aikaviive eliminoituna (Raatikainen et al. 2021).

FCA antaa kyseisessä kaivoksessa tulokset 6–8 tuntia ennen kuin malmi saapuu jauhatukseen. Tämän aikaikkunan aikana rikastamon operaattoreilla on mahdollisuus säätää rikastamon prosessia ja erityisesti vaahdotuskemikaalien määrää optimaalisen saannin varmistamiseksi ennen kuin FCA:n avulla analysoitu malmi saapuu jauhatukseen. Esimurskatun malmin analysoinnin tärkein hyöty on kuitenkin sivukiven poistaminen prosessista ennen rikastamolle saapumista (Raatikainen et al. 2021). Sorttausanalyysilaitteistosta saatavan datan avulla voidaan esimerkiksi selvittää myös eri harmemineraalien pitoisuudet ja suhteelliset osuudet rikastamolle syötettävässä malmissa, joiden avulla voi teoriassa olla mahdollista säätää primäärijauhatuksen jauhatustehoa, kun harmemineraalien työindeksit tiedetään.

4 MITTAAMINEN

4.1 Mittauksen reaaliaikaisuus

Sorttauksessa esimurskauksen jälkeen hihnakuuljettimella etenevän materiaalin analysoinnista saatavan tiedon tulee olla reaaliaikaista tai lähes reaaliaikaista ja kuten taulukosta 1 nähdään, XRF:n avulla saatava informaatio on reaaliaikaista. Tällöin mittaustekniikkana täytyy olla jatkuva mittaus, jolloin mittaustulos on reaaliaikainen. Tällä hetkellä XRF:lla voidaan saavuttaa parhaimmillaan 10 sekunnin integraatioaika jopa 2000 tonnia tunnissa kuljettavalle kuljetinhihnalle, jolloin keskiarvopitoisuus voidaan kyseisessä tapauksessa laskea noin 5,6 tonnille materiaalia kerrallaan (Rutter 2020). Toisaalta PGNAA:lla voidaan saavuttaa parhaassa tapauksessa vain 30 sekunnin integraatioaika, josta voidaan laskea keskiarvopitoisuus noin 16,7 tonnille materiaalia kuljetinhihnan kuljettaessa 2000 tonnia materiaalia tunnissa (Rutter 2020). Malmion ollessa erittäin heterogeeninen, XRF saattaa soveltua PGNAA:ta paremmin sorttaukseen sen lyhyemmän integraatioajan seurauksena.

4.2 Mittauksen tarkkuus

Sorttauksessa mittaustarkkuuden ei tarvitse olla laboratorioissa vaadittavalla tasolla, vaan tärkeää on metallipitoisuuksien havaitseminen riittävällä tarkkuudella. Vaatimuksena yleensä on havaita metallipitoisuudet tiettyjen virherajojen sisäpuolella ja tehdä päätös syötteen hyväksymisestä tai hylkäämisestä mittaustietojen pohjalta.

YHTEENVETO

Työssä keskityttiin tarkastelemaan sorttausta esirikastusmenetelmänä, joka toteutetaan online-XRF-teknologian avulla ja kahta sen päätyyppiä: partikkelisorttausta ja bulkkisorttausta. Johdannossa esiteltiin kustannustehokkaan esirikastuksen tuomia mahdollisuuksia kaivosteollisuudessa. Tärkeimpinä mahdollisuuksina voidaan mainita malmin metallipitoisuuden paraneminen, malmin kokonaisuuden väheneminen, energiankulutuksen pieneminen per tonni tuotetta kohden, rikastushiekan määrän väheneminen, veden kulutuksen pienentyminen ja kaivoksen cut-off -pitoisuuden päivittyminen matalammaksi. Johdannossa myös mainittiin yleisimmät esirikastustekniikat kuten painovoimaan perustuva erottelu, seulonta, sensoripohjainen malmien lajittelu (SBOS) ja magneettierotus. Tarkemmin perehdyttiin SBOS:iin esirikastustekniikkana ja ymmärrettiin sen tuomat mahdollisuudet sekä rajoitteet, kuten rajallinen kapasiteetti tällä hetkellä. Tutustuttiin taulukon 1 avulla tärkeimpiin SBOS:in sensoriteknologioihin, joita ovat esimerkiksi MR, RM, XRT, XRF, CCD, PM, EM, PGNAA, PFTNA, NIR, IR, LIBS, LIF ja Eddy-current.

Teoriaosiossa tutustuttiin röntgensäteilyn ja XRF:n teoriaan, jonka jälkeen keskityttiin XRF-menetelmiin, jotka voidaan jakaa ED- ja WD- spektrometreihin. Havaittiin ED-spektrometrian olevan soveltuvampi online-tunnistamiseen, sen lähes reaaliaikaisen toiminnan ansiosta. Perehdyttiin röntgenputken käyttöön röntgensäteilyn lähteenä ja tutustuttiin myös muihin mahdollisiin röntgensäteilyn lähteisiin kuten gammasäteileviin isotooppeihin (^{241}Am , ^{109}Cd ja ^{153}Gd), elektronilähteisiin ja synkrotroneihin.

Perehdyttiin sorttaukseen menetelmänä, jonka avulla on tarkoitus poistaa sivukivi malmin seasta mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, tarkasteltavassa tapauksessa heti esimurskauksen jälkeen, kun malmi ja sivukivi esiintyvät vielä pääosin erillisinä pätkinä kuljetinhinnalla. Työssä kyseenalaistettiin avolouhintana suoritettavan kaivostoiminnan raakkulaimennuksen arviointi kaivosten taloudellisissa laskelmissa, joka on yleensä alhaisempi kuin mitä se todellisuudessa on, ja etsittiin ongelmaan ratkaisua kustannustehokkaista

esirikastusmenetelmistä kuten sorttauksesta, jolla voidaan vaikuttaa niin raakkulaimennukseen kuin malmitappiohinkin. Työssä havainnollistettiin esimerkin avulla sorttauksen potentiaalia, kun kuljetinhihnalla esimurskauksen jälkeen etenevän materiaalin metallipitoisuutta mitattiin 6 tunnin ajan ja verrattiin keskenään datasta saatuja 15 minuutin keskiarvopitoisuuksia 1 minuutin keskiarvopitoisuuksiin. Havaittiin cut-off -pitoisuuden alittavaa sivukiveä olevan huomattavasti enemmän 1 minuutin keskiarvopitoisuuksilla tarkasteltuna kuin 15 minuutin keskiarvopitoisuuksilla. Tämän seurauksena havaittiin kaivosteollisuudessa esiintyvä keskiarvoistumisen ongelma, jonka seurauksena rikastamoille syötetään huomattavat määrät sivukiveä. Tähän keskiarvoistumisen ongelmaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi esimurskauksen jälkeen suoritettavalla BOS:lla.

Työssä kerrottiin sorttauksen todellisen arvon piilevän suuremman metallimäärän tuottamisessa lisäämällä louhimiskapasiteettia samalla, kun jauhatuksen ja vaahdotuksen kustannukset pysyvät likimain samalla tasolla. Sorttauksen tavoitteena on vähentää energiaintensiiviseen jauhatuspiiriin päätyvän syötteen kokonaismäärää, vähentämättä kuitenkaan merkittävästi saantia. Yleensä sorttauslaitteisto asennetaan operoimaan run-of-mine (ROM) -syötevirtaa, joka on läpikäynyt suhteellisen vähän energiaa kuluttavan esimurskauksen. Työssä tutustuttiin kahteen eri sorttausmenetelmään: partikkelisorttaukseen ja bulkkisorttaukseen. Bulkkisorttauksen todettiin olevan partikkelisorttausta potentiaalisempi useimmissa tapauksissa sen yksinkertaisuuden, kyvyn sortata kaikki raekokoluokat ja rajoittamattoman kapasiteetin vuoksi.

Työssä kerrottiin XRF:n olevan hyvin tunnettu ja vanha teknologia, jota on alettu viime aikoina käyttää metallipitoisuuksien mittaamiseen liikkuvalla kuljetinhihnalla. XRF:n huonoja puolia ovat sen heikko läpäisevyys ja sen kykenemättömyys mitata kalsiumia kevyempiä alkuaineita, mutta XRF:llä voidaan saavuttaa suhteellisen hyvä 10 sekunnin integroimis aika, jopa 2000 t syötettä tunnissa kuljettavalle kuljetinhihnalle, jolloin voidaan laskea keskiarvopitoisuus noin 5,6 tonnille malmia kerrallaan.

LÄHDELUETTELO

Auranen, I & Raatikainen, J., 2020. Preconcentration and ore processing by on-line sensors. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ima.fi/news/2021/01/22/on-line-sensors-in-preconcentration> [Viitattu 15.4.2021]

Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R. & Wolff, H., 2007. Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=c6d8EPYHn1EC&oi=fnd&pg=PA1&dq=x-ray+fluorescence+technique+%22elemental+analysis%22&ots=IpUlyhH1VY&sig=160YGCkJI69iEWcTQ5XmGTjWWbI&redir_esc=y#v=onepage&q=x-ray%20fluorescence%20technique%20%22elemental%20analysis%22&f=false [Viitattu 23.3.2021]

Duffy, K., Valery, W., Jankovic, A & Holtham, P., 2015. Integrating Bulk Ore Sorting into a Mining Operation to Maximise Profitability. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/283119643_Integrating_Bulk_Ore_Sorting_into_a_Mining_Operation_to_Maximise_Profitability [Viitattu 16.3.2021]

Gleeson, D., 2021. CRC ORE simplifies complexity for value. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://im-mining.com/2021/02/18/crc-ore-simplifies-complexity-for-value/> [Viitattu 20.5.2020]

Guthrie, M & Ferguson, R., 2012. Overview of X-ray fluorescence. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://archaeometry.missouri.edu/xrf_overview.html [Viitattu: 6.4.2021]

Lessard, J., Bakker, J. D & McHug, L., 2014. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0892687514001903?token=EB49014A52D0C451B766435A7C52A7A3EEAA176199C59660E52775F51D3BB70D5A9F17988D351B9E6439603D01BE1826&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210426160029> [Viitattu 11.4.2021]

Lessard, J., Sweetser, W., Bartram, K., Figueroa, J & McHugh, L., 2016. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0892687515300686?token=E21175C719CC41D292B5561718735A3DF5B13121B5CD4B43B966BB663AEFD83231D1292447852546D078C2A12283973E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210426160328> [Viitattu 10.4.2021]

Miningmagazine, Why preconcentrate and how. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.miningmagazine.com/plant/news/1331378/why-preconcentrate-and-how> [Viitattu 16.3.2021]

Pokrajcic, Z & Lewis-Gray, E., 2010. Advanced comminution circuit design – essential for industry, AusIMM Bulletin, August 2010, pp 38 – 42

Raatikainen, J., Auranen, I & Perez, N., 2021. Ore Sorting Automation for Copper Mining with Advanced XRF Technology: From Theory to Case Study. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/350372489_Ore_Sorting_Automation_for_Copper_Mining_with_Advanced_XRF_Technology_From_Theory_to_Case_Study [Viitattu 20.5.2021]

Rutter, J., 2020. Quantification of Surface Sensor Representivity of Primary Crushed Ore for Bulk Ore Sorting. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ceecthefuture.org/resources/quantification-of-surface-sensor-representivity-of-primary-crushed-ore-for-bulk-ore-sorting> [Viitattu 11.5.2021]