

Ville Vinha

KULLAN TALTEENOTTOMENETELMÄT JÄTTEENPOLTTOLAITOKSEN POHJATUHKASTA

Kandidaatintutkielma
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Ville Vinha: Kullan talteenottomenetelmät jätteenpolttolaitoksen lopputuhkasta
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2024

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda yleiskatsaus jätteenpolttolaitoksen pohjatuhkan sisältämän kullan erottelu- ja talteenottomenetelmistä. Työn päätavoitteena on kuvata paras mahdollinen menetelmä kullan talteenottoon. Työ pyrkii vastaamaan tutkimuskysymykseen: Miten kultaa talteen otetaan jätteenpolttolaitosten pohjatuhkasta ja mikä käytetyistä menetelmistä on paras? Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Tutkimus lähtee liikkeelle jätteenpolttoprosessista, mistä siirrytään nopeasti pohjatuhkaan ja sen koostumukseen. Koostumuksen tarkastelun avuksi työssä tutkitaan pohjatuhkan sisältämiä arvokkaita aineita. Arvokkaiden aineiden tarkastelu osoittaa kullan merkittävyyden teollisena raaka-aineena. Tutkimuksen runko-osan päättää tutustuminen urban mining konseptiin, jonka alle metallien kerääminen pohjatuhkasta sijoittuu. Kullan talteenottomenetelmiä tarkasteleva osuus alkaa mekaanisten peruserottelumenetelmien läpikäynnillä. Perusmenetelmien jälkeen tutkimus esittelee neljä metallien erottelussa käytettyä menetelmäkategoriaa. Kategoriat magneettinen erottelu, pyörrevirtaerottelu, anturierottelu ja tiheyserottelu sisältävät useita erottelusovelluksia, joita käydään pintapuolisesti läpi. Talteenotto osuuden lopussa esitellään varsinaiset talteenottomenetelmät pyrometallurginen sulatus ja hydrometallurginen syanidiliuotus. Työn lopussa sijaitsevassa vertailuosiossa talteenottomenetelmien tietojen pohjalta rakennetaan vastaus tutkimuskysymykseen. Tutkimus päätetään johtopäätösiin.

Tutkimus osoittaa pyrometallurgisen sulatuksen olevan hydrometallurgista syanidiliuotusta parempi menetelmä kullan talteenottoon jätteenpolttolaitosten pohjatuhkasta. Molemmilla menetelmillä on vahvuutensa, kuitenkin sulatuksen ollessa parempi ratkaisu nopeuden, soveltuvuuden, jalostusasteen, tilatarpeen ja luvanvaraisuuden osa-alueissa. Syanidiliuotus voitti sulatuksen käyttökustannusten ja raaka-aineen laatuvaatimusten osa-alueissa. Tutkimuksessa selviää erottelumenetelmien erottelukyvyn olevan avainasemassa tehokkaan talteenottoprosentin saavuttamiseksi. Tutkimuksessa todetaan anturierottelun olevan hyödytön lisä kullanerotteluketjussa.

Avainsanat: kulta, pohjatuhka, talteenottomenetelmä, erottelumenetelmä, hydrometallurgia, pyrometallurgia, urban mining

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tausta	1
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus	2
1.3 Työn toteutus ja rakenne	3
2. JÄTTEENPOLTTOPROSESSI	5
2.1 Jätteenpoltto	5
2.2 Pohjatuhka	7
2.3 Pohjatuhkan koostumus	8
2.4 Arvokkaat raaka-aineet	10
2.5 Urban mining ja kulta	13
3. KULLAN TALTEENOTTOMENETELMÄT	17
3.1 Mekaaninen peruserottelu	18
3.1.1 Magneettinen erottelu	18
3.1.2 Pyörrevirta erottelu	21
3.1.3 Antureihin pohjautuva erottelu	22
3.1.4 Tiheyteen pohjautuva erottelu	23
3.2 Hydrometallurgia	26
3.3 Pyrometallurgia	27
4. MENETELMIEN VERTAILEMINEN	30
4.1 Vertailu	30
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	32
LÄHTEET	34

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Maanosien jätteen tuotannon kehitys. Lukumäärät miljoonaa tonnia/ vuosi. Mukailien lähteestä (Jędrusiak et al. 2023).....	1
Kuva 2.	Työn rakenne.....	4
Kuva 3.	MSWI-laitoksen toiminta. Mukailien lähteestä (Deltaway Energy 2024).	7
Kuva 4.	Kullan esiintyminen eri pohjatuhka jakeissa. Mukailien lähteestä (Morf et al. 2013).....	10
Kuva 5.	Euroopan Unionin kriittiset materiaalit (Jędrusiak et al. 2023).	12
Kuva 6.	Yhdysvaltojen kriittiset materiaalit (Jędrusiak et al. 2023).	12
Kuva 7.	Urbanin kaivostoiminnan sijoittuminen kiertotalouden kokonaisuuteen. Mukailien lähteestä (Cossu & Williams 2015).	13
Kuva 8.	Kullan keskimääräiset pitoisuudet vuonna 2010 Hinwilin MSWI-laitoksen pohjatuhkajakeissa verrattuna malmiarvoihin. Mukailien lähteestä (Morf et al. 2013)	16
Kuva 9.	Pohjatuhkan erottelu ja talteenotto. Mukailien lähteestä (Yazıcı & Deveci 2009).....	17
Kuva 10.	Magneettiset erottelumenetelmät: yläpuolinen magneetti (vas. ylä), poisto rumpu magneetti (oik. ylä) ja poikkeutus rumpumagneetti (kesk. ala). Mukailien lähteestä (Bunge 2018).....	20
Kuva 11.	Magneettisen vetovoiman vaikutus erikokoisiin kappaleisiin. Mukailien lähteestä (Bunge 2018).....	20
Kuva 12.	ECS-erottimen toiminta. Mukailien lähteestä (Bunge 2018)	21
Kuva 13.	Samankeskisen oik., epäkesko (STEINERT) kesk. ja siirretty palautusrulla (ANDRIN) vas. (Bunge 2018).....	22
Kuva 14.	Anturi erottimen toiminta. Mukailien lähteestä (Bunge 2018).....	23
Kuva 15.	Keskipakorikastutin (Holm et al. 2018)	24
Kuva 16.	Magneettisen tiheyden erottimen nesteessä tiheimmät aineet painuvat pohjalle. Mukailien lähteestä (Muchova et al. 2009).....	25
Kuva 17.	Ilmapöytäerottimen toimintaperiaate. Mukailien lähteestä (Back et al. 2020).....	25
Kuva 18.	Hydrometallurginen prosessi kullan talteenottoon. Mukailien lähteestä (Li et al. 2023).....	27
Kuva 19.	Yksinkertaistetun sulattokattilan toimintaperiaate. Mukailien lähteestä (YaClass 2024)	29

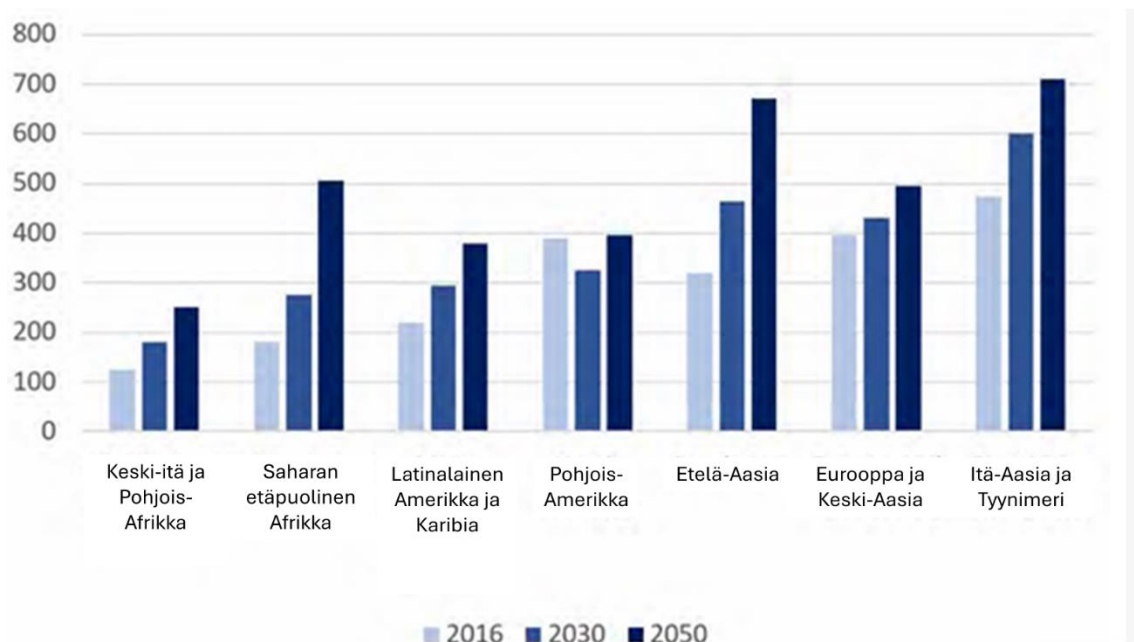
LYHENTEET JA MERKINNÄT

CIP	Carbon in pulp
ECS	eddy current separator, pyörrevirtaerotin
HIMS	high intensity magnetic separators
LIMS	low intensity magnetic separators
MS	magnetic separator, magneettierotin
MSWI	Municipal Solid Waste Incineration
SS	sensor sorters, anturierotin
bl	Barrels of petroleum liquids, barreli
dmtu	dry metric ton units, kuiva metrinen tonni
mtu	metric ton units, metrinen tonni
RMB	CNY, renminbi, yuan
rpm	revolutions per minute, kierrosta minuutissa
troz	troy ounce, troy-unssi
US\$	Yhdysvaltain dollari
€	euro

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

Jättemäärät määrät ovat maailmanlaajuisesti kasvussa. Maapallon alueiden jättemäärien kasvunennuste esitettynä Kuva 1. Jätteet ovat myös paljon monimutkaisempia variantteja koostuen yhä useammista materiaaleista. Tämä vaikeuttaa huomattavasti jätteiden lajittelua ennen niiden jatkojalostamista. Suuri osa jätteistä poltetaan jätteenpolttolaitoksien voimakattiloissa jätteen korkean energiapotentiaalin vuoksi. Poltettava jäte eli energijäte on pääasiassa yhdyskunta- ja rakennusjätettä, mikä tekee energijätteen koostumuksesta heterogeenistä. Energijäte sisältää lukuisia erilaisia jätelajikkeita, kuten paperi, kartonki, metalli, pienelektroniikka ja muovi. Lajikkeiden soveltuvuus energijätteeksi riippuu lajikkeen lämpöarvosta ja sen polttamisesta muodostuvista päästöistä. Ideaaltilanteesta poiketen energijäte sisältääkin paljon huonosti energijätteeksi soveltuvia tai täysin palamattomia lajikkeita. Näiden lajikkeiden pienimmät materiaali partikkelit kulkeutuvat polttoprosessin läpi aina pohjatuhkaan asti, mistä niiden erittely hyötykäyttöön tapahtuu erilaisilla koneellisilla tai kemiallisilla menetelmillä.



Kuva 1. Maanosien jätteen tuotannon kehitys. Lukumäärät miljoonaa tonnia/vuosi. Mukailten lähteestä (Jeđrusiak et al. 2023).

Prosessin lopputuotteet voidaan jakaa savukaasuihin sekä kiinteisiin loppujakeisiin. Kiinteissä loppujakeissa on suuria ja helposti eriteltäviä jakeita sekä keskenään sekoittunutta massaa eli lopputuhkaa. Lopputuhkan käsittely tuottaa suuria kuluja jätteenpoltosta vastaaville yrityksille, minkä seurauksena yritykset pyrkivät hyödyntämään lopputuhkaa mahdollisimman paljon vielä polttoprosessinkin jälkeen. Lopputuhkaa on viime vuosina alettu hyödyntää rakennusmateriaalina esimerkiksi tienpohjissa ja sementtiseoksissa (Ada *et al.* 2023; Chen *et al.* 2023). Lopputuhkan seassa piilee kuitenkin myös arvokkaita materiaaleja, kuten jalometalleja. Jalometalleista etenkin kulta on potentiaalinen kohde urbaanille kaivostoiminnalle. Kullan laajat käyttöominaisuuden ja harvinaisuus kasvattavat kullan hinnan hyvin korkealle kansainvälisellä markkinalla. Kyky talteenottaa arvokas kulta tehokkaasti ennen tuhkan loppusijoitusta luo yrityksille kustannustehokkaamman toimintamallin ja ihmiskunnalle kestävämmän materiaali kierron.

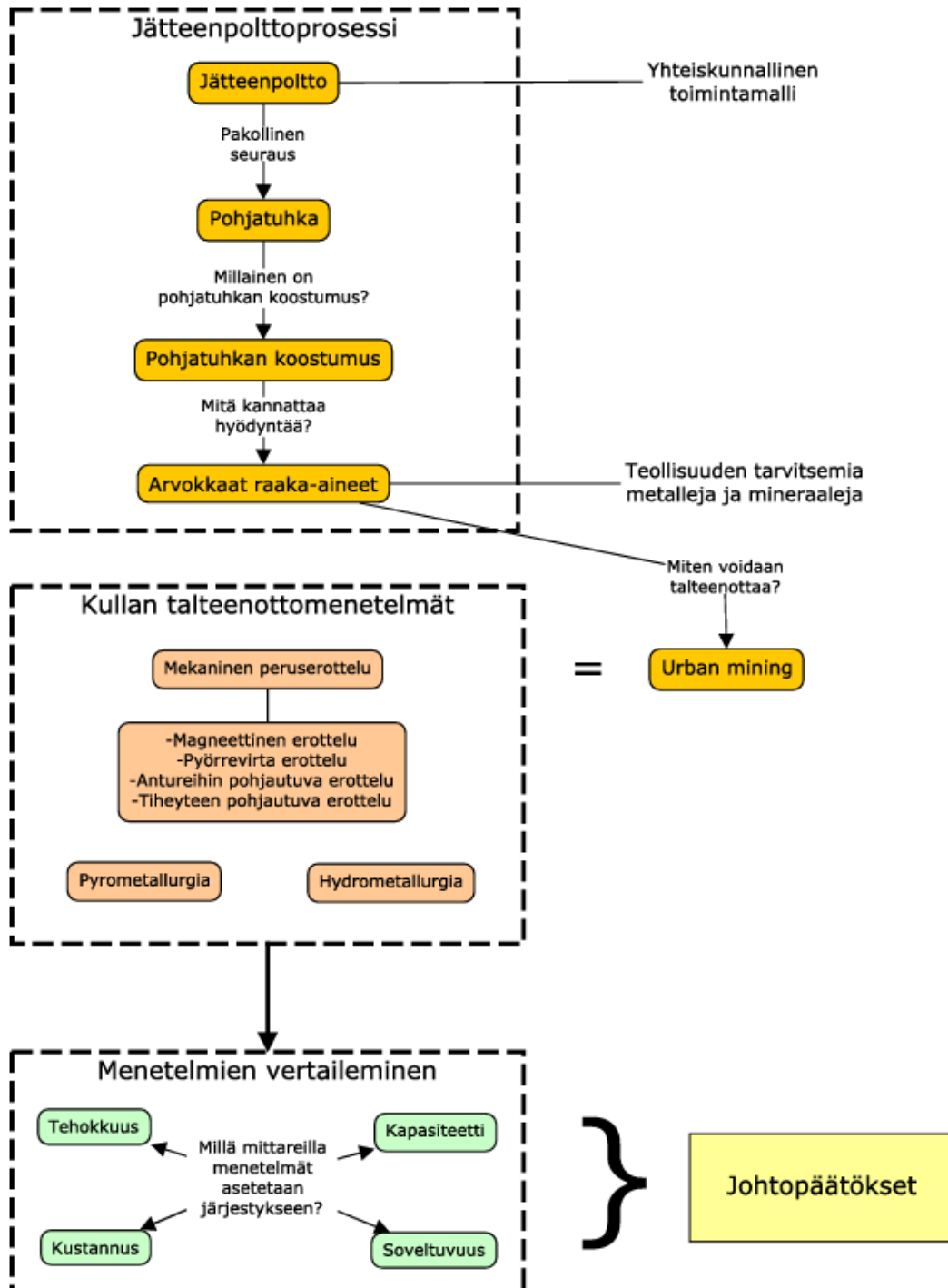
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda yleiskatsaus jätteenpolttolaitoksen pohjatuhkan sisältämän kullan erottelu- ja talteenottomenetelmistä. Työn päätavoitteena on kuvata parempi kahdesta tarkastellusta menetelmästä. Tutkittavat menetelmät ovat pyrometallurginen sulatus ja hydrometallurginen syanidiliuotus. Työssä esitetyt pohjatuhkan alkuainepitoisuudet ovat alantutkimusten pohjalta määritettyjä paikallisia pohjatuhkan koostumuksia. Työssä tarkkailu rajoittuu yleiselle tasolle ympäri maailman, ottamatta kantaa minkään tietyn alueen tai maan tilanteeseen. Huomioitavaa on, että jokaisella maalla on yksilöllinen jätekanta ja näin ollen myös yksilöllinen lopputuhkakanta (Beikmohammadi *et al.* 2023). Työ pyrkii vastaamaan tutkimuskysymykseen: Miten kultaa talteenotetaan jätteenpolttolaitosten pohjatuhkasta ja mikä käytetyistä menetelmistä on paras?

Työssä käydään läpi jäteteollisuudessa käytössä olevia materiaalien erottelumenetelmiä. Työssä tutustutaan erilaisten erottelumenetelmien toimintaperiaatteisiin ja pohjatuhkan arvokkaiden aineiden pitoisuuksiin. Peruserottelun jälkeen tutkitaan ja vertaillaan kullan talteenottomenetelmiä. Menetelmiä vertaillaan kustannuksien, talteenottotehokkuuden, talteenottokapasiteetin ja yleissoveltuvuuden näkökulmista. Työ keskittyy kahteen talteenottomenetelmään, jotka ovat käsittelykapasiteetiltaan kykeneviä käsittelemään jätteenpoltosta syntyvän lopputuhka määrän.

1.3 Työn toteutus ja rakenne

Kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, joka kokoaa yhteen aihealueen vertaisarvioituja julkaisuja ja muita lähteitä, joihin on viitattu vertaisarvioituissa julkaisuissa. Työn runko kulkee perusteoriasta kohti työn päätavoitetta parhaasta mahdollisesta kullan talteenottomenetelmästä Kuva 2 mukaisesti.



Kuva 2. Työn rakenne.

Työn rakenne jaetaan viiteen osioon, jotka ovat johdanto, aiheen tarkennus, menetelmien esittely, menetelmien vertailu ja johtopäätökset. Osiot jakautuvat työn päälukujen mukaan, ja johdanto on ensimmäinen luku. Aiheen tarkennus sisältää luvun 2, jossa tutustutaan jätteenpolttoprosessin toimintaan ja lopputuotteena syntyvään lopputuhkaan. Luvun 2 lopussa keskitytään lopputuhkan käsittelyyn. Käsittelyn näkökulmaksi valitaan arvomateriaalien ja erityisesti kullan talteenottomenetelmät. Menetelmien esittelyssä, luvussa 3, talteenottomenetelmiä tarkastellaan yleisellä tasolla tuoden esiin menetelmien ominaisuuksia. Menetelmien vertailussa, luvussa 4, tarkastellaan tuloksia vertailemalla menetelmiä keskenään. Vertailujen pohjalta valitaan paras menetelmä kullan talteenottoa varten. Työ päätetään Johtopäätökset-lukuun, jossa pohditaan kaikkien tutkittujen menetelmien käyttöä tulevaisuudessa sekä arvioidaan työn onnistumista.

2. JÄTTEENPOLTTOPROSESSI

Ihminen synnyttää eläessään erilaisia jätteitä. Kaikki ylimääräinen materiaali, josta ihmiset pyrkivät eroon, on jätettä. Ihmiskunnan kehittymisen vuoksi ihmisen käyttämät materiaalit ovat vaihtuneet biohajoavista luonnonmateriaaleista aina enemmän kohti synteettisiä materiaaleja, kuten muoveja. Yleisesti näillä keinotekoisilla materiaaleilla on hyvä kestävyys. Kestävyyden käänköpuolena materiaalien itsenäinen hajoaminen luonnossa tapahtuu melko hitaasti jätteen syntymisnopeuteen verrattuna. Maailmanpankin mukaan yhdyskuntajätteen vuotuisen tuoton odotetaan kasvavan 3,88 miljardiin tonniin vuoteen 2050 mennessä (Beikmohammadi *et al.* 2023). Valtaosa yhdyskuntajätteistä loppukäsittelään polttamalla tai sijoittamalla sellaisenaan loppusijoitusalueille (Jędrusiak *et al.* 2023). Jätteenpolto on kuitenkin viemässä voiton vallitsevana loppukäsittelymenetelmänä sen energiapotentiaalin ja tilatehokkuuden ansiosta. Poltettaessa jätteen tilavuus pienenee noin kymmenesosaan alkuperäisestä syöttömäärästä, kuitenkin säilyttäen jopa neljänneksen syöttöpainostaan. Tämän lopputuhkaksi kutsutun lopputuotteen suuri massa ja pieni tilavuus johtuu sen sisältämistä tiheistä aineista ja mineraaleista. Näissä tiheissä aineissa piilee lopputuhkan arvokkuus. (Beikmohammadi *et al.* 2023; Jędrusiak *et al.* 2023)

2.1 Jätteenpolto

Jätetuotanto on maailmanlaajuisesti valtavaa. Tuotannon kärkipäässä on kulutus orientoituneet Yhdysvallat, jotka tuottavat vuosittain noin 816 kiloa jätettä asukastaan kohden (2018). Verrattane EU jäsenmaat tuottivat vuonna 2020 kiinteää yhdyskuntajätettä noin 505 kiloa kansalaistaan kohden. EU:n ja Yhdysvaltojen kokonaisjätetuotannot ovat samassa mittaluokassa EU:n suuremman väkimäärän takia. EU tuotti vuonna 2020 noin 226 miljoonaa tonnia jätettä, kun Yhdysvallat tuottivat kaksi vuotta aikaisemmin noin 265,3 miljoonaa tonnia. Yhteensä alueet tuottavat yli viidenneksen maailman yhdyskuntajätteistä. (Jędrusiak *et al.* 2023) Aiemmin Kuva 1 Jędrusiak *et al.* esittelivät näkemyksiä maapallon alueiden jätemäärien kehityksestä, mikä antaa painavaa viitettä jätteenpolto käsittelyn tarpeellisuudesta maailmanlaajuisella tasolla. Myös ympäristön hyvinvointi vaikuttaa maiden ja alueiden jätelainsäädäntöön, minkä seurauksena EU:ssa ja Yhdysvalloissa on vähennetty jätteiden kaatopaikoille sijoittamista (Jędrusiak *et al.* 2023). Jätteenpolttolaitoksien perustaminen on järkevää myös teknisistä lähtökohdista tarkkailtuna. Vaaraton, tehokas

ja kooltaan kompakti *MSWI*-laitos saa kaatopaikkoja täyttävän yhdyskuntajätteen muuttumaan uusiutuvaksi energianlähteeksi. (Beikmohammadi *et al.* 2023)

EU yleisimpiin jätteenkäsittelymenetelmiin kuuluva jätteenpolttotapahtuu kiinteän yhdyskuntajätteen polttolaitoksissa (*MSWI*). Jędrusiak *et al.* (2023) tutkimuksessa Euroopassa toimii 516 *MSWI*-laitosta. Toimintaperiaatteiltaan laitokset jakautuvat kolmeen pääryhmään, joita ovat (Jędrusiak *et al.* 2023):

1. lämmön talteenoton ja sähköntuotannon yhteislaitos (251 *MSWI*-laitosta)
2. lämmön talteenottolaitos (94 *MSWI*-laitosta)
3. sähkön talteenottolaitos (161 *MSWI*-laitosta).

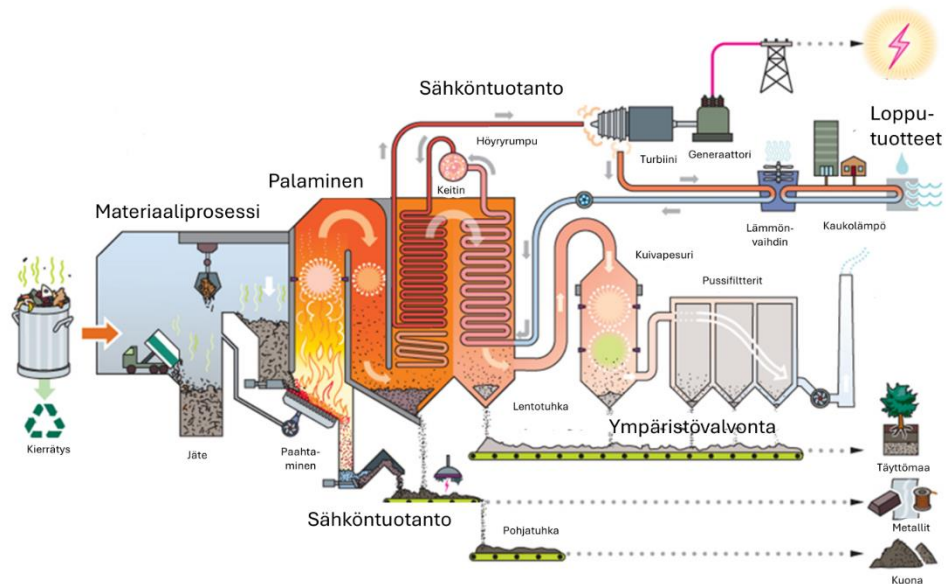
Lämmön talteenotolla tarkoitetaan voimalaitoksen lämpöenergian valjastamista veden avulla kaukolämmöksi kiinteistöjen lämmittämistä varten. Sähkön talteenotto tarkoittaa tehtaan omaan käyttöön ja sähköverkkoon johdettavan sähkön luomista vesihöyryturbiineilla. Hybridilaitos tekee näistä molempia tuottaen kaukolämpöä ja sähköä kuluttajamarkkinoille. Jędrusiak *et al.* (2023) mukaan Yhdysvalloissa *MSWI*-laitoksia toimii noin 75 kappaletta, joka on huomattavasti vähemmän kuin EU:ssa.

MSWI-laitoksen toimintaperiaatetta käsiteltiin Ozturk ja Dincer tutkimusartikkelissa vuonna 2020. Artikkelissa kuvattiin yksinkertaistettu nykyaikainen *MSWI*-laitoksen toiminta. Laitoksen yhteydessä on saastumisenhallintayksikkö ja Rankine-sykli, joka on idealisoitu termodynaaminen sykli höyryturbiinien mekaanisen työn kuvaamiseen (William Rankine mukaan). Peruseriaatteeltaan edellä kuvattu *MSWI*-laitos toimii seuraavasti (Wilson *et al.* 2013; Ozturk ja Dincer 2020):

1. Polttokammion liikkuvalla arinalle syötetään yhdyskuntajätettä ja ilmaa (happea), jossa jätteet pyörivät palaen tasaisesti ja tehokkaasti 850–1000 °C:n lämpötilassa. (Beikmohammadi *et al.* 2023)
2. Kuumat savukaasut nousevat polttokammion yläosan keittimen (boiler) lävitse saastumisenhallintayksikköön.
3. Lämpötilaltaan 210 °C savukaasu kulkee kuivapesurin läpi, jossa poistetaan korkea happoiset kaasut.
4. Kuivapesurin jälkeen kaasut kulkevat pumppuavusteisesti pussifilttereiden lävitse, mikä poistaa ilmasta pienhiukkaset.
5. Lopulta puhdistetut palokaasut vapautuvat ulos savupiipunkautta.

Pohjatuhkaa prosessissa kertyy polttokammion pohjalle arinalta ja enne keitintä. Keittimen jälkeisiltä vaiheilta kertyvä lopputuhka on lentotuhkaa. Keittimen sisältämä

välitysaine (usein vesi) toimii energian välittäjänä höyryturbiinille (sähköntuotanto) ja lämmönvaihtimelle (kaukolämpö). Lämmönvaihdin on prosessin lauhdutin, joka ottaa talteen viimeiset lämpöenergiat ennakoin vesi uudelleen paineistetaan ja syötetään takaisin keittimeen. (Ozturk & Dincer 2020) Kuva 3 on esitetty edellä kuvatun MSWI-laitoksen toimintaperiaate pohjautuen Ozturk ja Dincer tutkimusartikkeliin ja Deltaway Energy:n MSWI malliin.



Kuva 3. MSWI-laitoksen toiminta. Mukailten lähteestä (Deltaway Energy 2024).

2.2 Pohjätuhka

Jätteenpoltosta syntyviä ilmaa raskaampia jäännösaineita kutsutaan lopputuhkaksi tai lopputuotteiksi. Lopputuhka on laaja kokonaisuus, johon sisältyy erikokoisia ja -painoisia jakeita. Lopputuhkan rajaamisessa on lähtökohtana tuhkan määränpää, kiinteisiin jäännösaineisiin tai palokaasuihin. Palokaasujen joukkoon päätyvää tuhkaa kutsutaan lentotuhkaksi. Tämä hienojakoinen tuhka sisältää vain kaikista pienimpiä partikkeleita, jotka voivat kuitenkin olla jopa raskasmetalleja. Polttokattilan pohjalle valuvaa tuhkaa kutsutaan pohjätuhkaksi. Kaikesta syntyvästä lopputuhkasta pohjätuhkaa on noin 80–95 %, minkä seurauksena pohjätuhkaa jaotellaan tarkemmin erilaisiin jakeisiin ja raekokoihin. (Beikmohammadi *et al.* 2023) Pohjätuhkan painosta 5–15 % on ferriittisiä metalleja ja 1–5 % ei-ferriittisiä metalleja (Jeđrusiak *et al.* 2023).

Pohjätuhka on koostumukseltaan heterogeeninen seos, joka sisältää erilaisia yhdisteitä sekä puhtaita alkuaineita. Yleisesti pohjätuhka voi sisältää metallisia ja ei-metallisia yhdisteitä, lasia ja keraamisia yhdisteitä sekä lukuisia palamattomia orgaanisia yhdisteitä

ja silikaatteja. Pohjatuhka koostuu useista raeko'oista. Tuhkan partikkelit ovat halkaisijaltaan vain muutamista mikrometreistä yli 16 mm. (Beikmohammadi *et al.* 2023) Tarkempi raekoon jaottelu liitetään usein teknisiin rajoitteisiin tai tietyn kokoisen jakeen tarpeisiin esimerkiksi jatkojalostusta varten. Hienojen ja karkeiden kiviainesten seula-analyysi standardimenetelmän ASTM C136-AASHTO T27 (2014) mukaiset raekokoluokat ovat yleisiä tuhkan- ja kiviainneiden- tutkimisessa käytettyjä kokoluokkia.

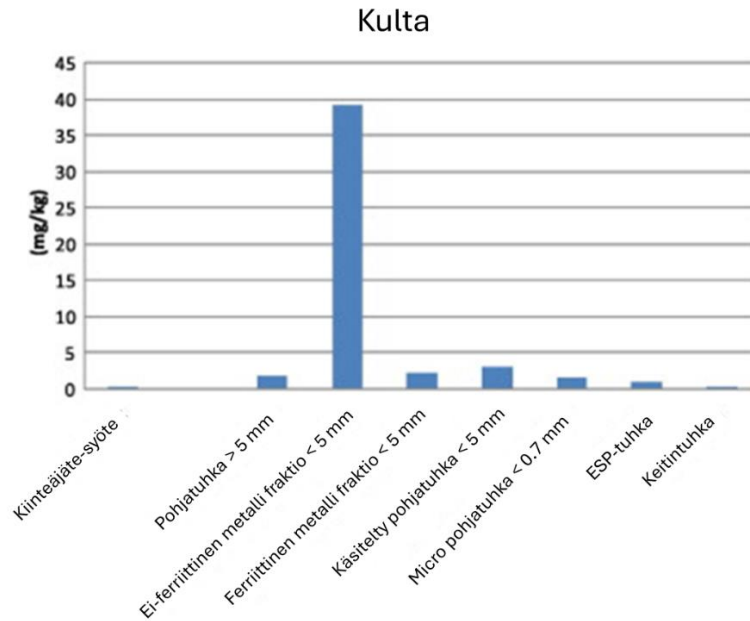
Pohjatuhka loppusijoitetaan lopulta kaatopaikoille, joissa se haudataan maan alle. Kaikki tuhkassa olevat aineet päätyvät maahan, jossa ne ajan kuluessa liukenevat maan eri kerroksiin ja pohjavesiin. Aineita on lähes mahdotonta poistaa maaperästä liukenemisen jälkeen, joten poistaminen on tehtävä ennen loppusijoitusta. Pohjatuhka sisältää lukuisia alkuaineita. Alan tutkimuksissa (Morf *et al.* 2013; Funari *et al.* 2015; Beikmohammadi *et al.* 2023) on listattu lähes 60 alkuainetta, joiden pitoisuuksia pohjatuhkasta on tunnistettu. Aineiden joukossa on metalleja, puolimetalleja ja epämetalleja. Jotkin näistä aineista ovat joko hyvin vaarallisia ympäristölle tai arvokkaita teollisuudelle, mikä tekee niiden talteenotosta tärkeää.

2.3 Pohjatuhkan koostumus

Morf *et al.* (2013) tutkimus sveitsiläisen MSWI-laitoksen pohjatuhkan koostumuksesta osoitti keskimääräisiä pitoisuuksia 39:n eri alkuaineelle. Tutkimuksessa alkuaine määrät ovat annettu painoyksikkönä yhtä käsiteltyä syöttö kiloa kohden. Alkuaine pitoisuutta ei siis verrata tuhkan kokonaismassaan vaan jätesyöttövirran massa. Morf *et al.* (2013) työryhmän tuloksissa syötetty yhdyskuntajäte sisälsi jalometalleista keskimäärin 0,4 mg/kg kultaa ja 5,3 mg/kg hopeaa. Platinaryhmän metallien osalta löydettiin seuraavia pitoisuuksia: platina 0,06 mg/kg, rodium 0,09 µg/kg ja rutenium 0,5 µg/kg. Iridium ja palladium pitoisuuden jäivät liian pieniksi niiden erillisten pitoisuuksien toteamisen kannalta. Harvinaisista maametalteista löytyi gadoliniumia 0,75 mg/kg, neodyymia 7,3 mg/kg, praseodyymia 1,9 mg/kg ja yttriumia 7,8 mg/kg. Näiden lisäksi jäljelle jääneistä alkuaineista Morf *et al.* nostaa kahdeksan kriittisen metallin pitoisuudet: koboltti 11 mg/kg, volframi 56 mg/kg, niobium 2,5 mg/kg, gallium 2,2 mg/kg, tantaali 1,2 mg/kg, skandium 0,96 mg/kg, indium 0,29 mg/kg, beryllium 0,28 mg/kg ja germanium 0,21 mg/kg. Monilla alkuaineilla tuloksen RSD on kuitenkin suuri. Edellä mainituista alkuaineista yli 40 % suhteellinen keskihajonta aineen esiintymismäärässä oli kullalla, rodiumilla, neodyymilla, praseodyymilla, yttriumilla, tantaalilla ja voframilla, jonka suhteellinen keskihajonta oli peräti 85 % (Morf *et al.* 2013). Epävarmuus johtui näytteen pienestä koosta.

Morf *et al.* (2013) tutkimuksessa tehty ennusteita vuotuisille alkuainevirroille ja niiden epävarmuus tekijöille. Tuloksiksi saatiin seuraavanlaisia vuosittaisia massavirtoja sveitsiläisen MSWI-laitoksen sisään virtauksissa. Jalometallit: kulta 81 ± 40 kg/a ja hopea 1070 ± 14 kg/a. Platina ryhmän metallit: platina 12 ± 4 kg/a, rodium $0,018 \pm 0,01$ kg/a ja rutenium $0,1 \pm 0,03$ kg/a. Harvinaiset maametallit: gadoliumia 150 ± 35 kg/a, neodyymia $1,5 \pm 0,6$ t/a, praseodyymia 380 ± 170 kg/a ja yttriumia $1,6 \pm 0,7$ t/a. Muut kriittiset metallit ovat: koboltti $2,2 \pm 0,2$ t/a, volframi $11 \pm 9,6$ t/a, niobium $0,5 \pm 0,02$ t/a, gallium 440 ± 30 kg/a, tantaali 250 ± 100 kg/a, skandium 192 ± 16 kg/a, Indium 58 ± 4 kg/a, Beryllium 56 ± 6 kg/a ja germanium 41 ± 3 kg/a. (Morf *et al.* 2013) Vuotuiset virrat vaihtelevat alkuaine kohtaisesti alle kilogrammasta tuhansiin kiloihin. Vuotuisen massavirran merkittävyys on ainekohtaista. (Morf *et al.* 2013)

Alkuaine partikkeleille on tyypillisiä ominaisuudet, jotka saavat alkuaine esiintymät sijoittumaan suurimmaksi osaksi tiettyihin raekokoluokkiin. Alumiini partikkelit sijoittuvat noin 60 % 6–20 mm halkaisija luokkaan (Beikmohammadi *et al.* 2023, Muchová 2010 mukaan). Kuparista 70 % esiintyy alle 7 mm:n partikkeleina (Böni 2013). Beikmohammadi *et al.* mukaan jalometalleista merkittävä osuus sijoittuu yli 2 mm:n raekokoihin. Morf *et al.* ovat myös tutkineet tapauksessaan, miten alkuaine pitoisuudet jakautuvat sveitsiläisen MSWI-laitoksen seulontaprosessin loppujakeisiin. Puhdistamon jakeet ovat alle 5 mm halkaisijan ferriittinen metallijae (0,7–5 mm), alle 5 mm halkaisijan kevyt ja arvokas ei-ferriittinen metallifraktio (0,7–3,0 ja 3,0–5 mm), käsitelty pohjatuhkafraktio (0,7–5 mm) ja mikrohieno pohjatuhka (<0,7 mm) (Morf *et al.* 2013). Tulokset Kuva 4 mukaan osoittavat kullan esiintyvän lähes täysin alle 5 mm halkaisijan ei-ferriittisessä metallifraktiossa. Muissa jakeissa kultapitoisuus ei poikkea juurikaan normaalista kullan malmipitoisuudesta (Morf *et al.* 2013).



Kuva 4. Kullan esiintyminen eri pohjatuuhka jakeissa. Mukailten lähteestä (Morf et al. 2013)

2.4 Arvokkaat raaka-aineet

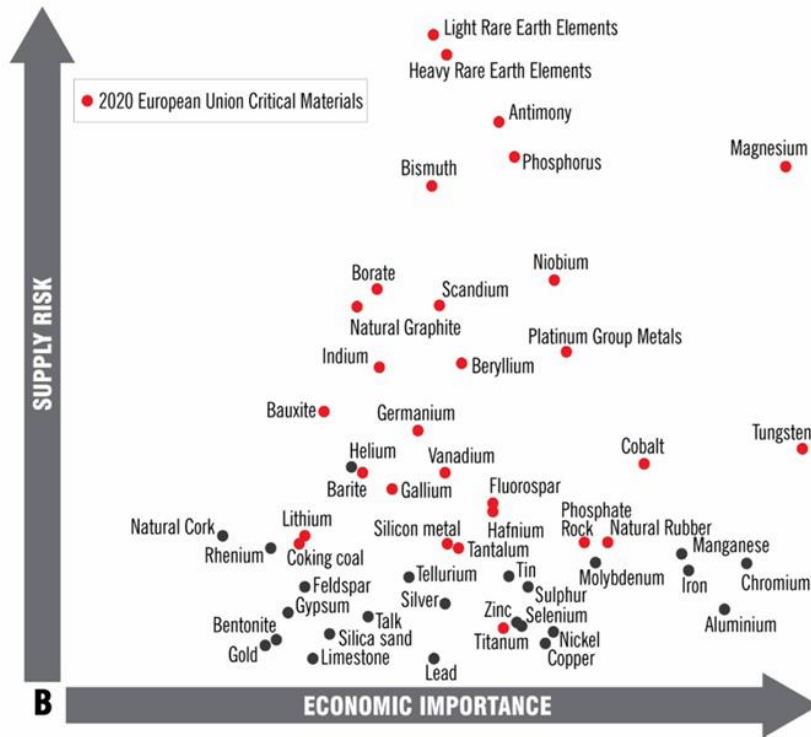
Alkuaineiden arvokkuus perustuu niiden harvinaisuuteen ja käyttötarpeeseen. Arvokkaimpia raaka-aineita ovat sellaiset aineet, joita esiintyy vähän maankuoressa suhteutettuna niiden korkeaan kysyntään teollisuudessa. Raaka-aineiden markkinahinta vaihtelee teollisuuden kysynnän mukaisesti. Arvo järjestyksen muodostamiseksi on järkevää rajata alkuaineiden tarkkailu määrää. Rajataan alkuaineista pois kaikki synteettiset alkuaineet. Kaikkein arvokkaimpina aineina pidettyjä synteettisiä alkuaineita ei esiinny luonnollisesti maapallolla. Lisäksi tarkkaillaan vain sellaisia aineita, joilla on teollinen markkina-arvo kansainvälisessä raaka-aine kaupankäynnissä. Tällaisten raaka-aineiden hintavaihteluista maailmanlaajuisella markkinalla pitävät kirjaa valtiolliset instituutiot, mikä mahdollistaa raaka-aineiden pidemmän aikavälin keskihinnan määrittämisen.

Dera:n tuottama Preismonitor (2024) on Saksan kansallinen raaka-aine hinnasto, joka listaa eri kauppapaikkojen ja pörssien listahintauksia primäärisesti ja sekundaarisesti hankituille materiaaleille ja alkuaineille. Preismonitoria voi käyttää havainnollistavana lähteenä eri aineiden arvokkuudelle. Preismonitor ei sovellu suoraan vertailuun, sillä kauppapaikoilla ja materiaaleilla on erilaisia standardeja ilmoittaa listahinta. Listahintojen yksikkö on normaalisti valuutta suhteessa massaan. Preismonitor:issa käytettyjä valuuttayksiköitä ovat US\$, € ja RMB. Massan yksiköinä on käytössä kg, t, mtu, dmtu ja troz. Poikkeuksena tynnyri tilavuus bl (Barrels of petroleum liquids, barreli), jolla mitataan

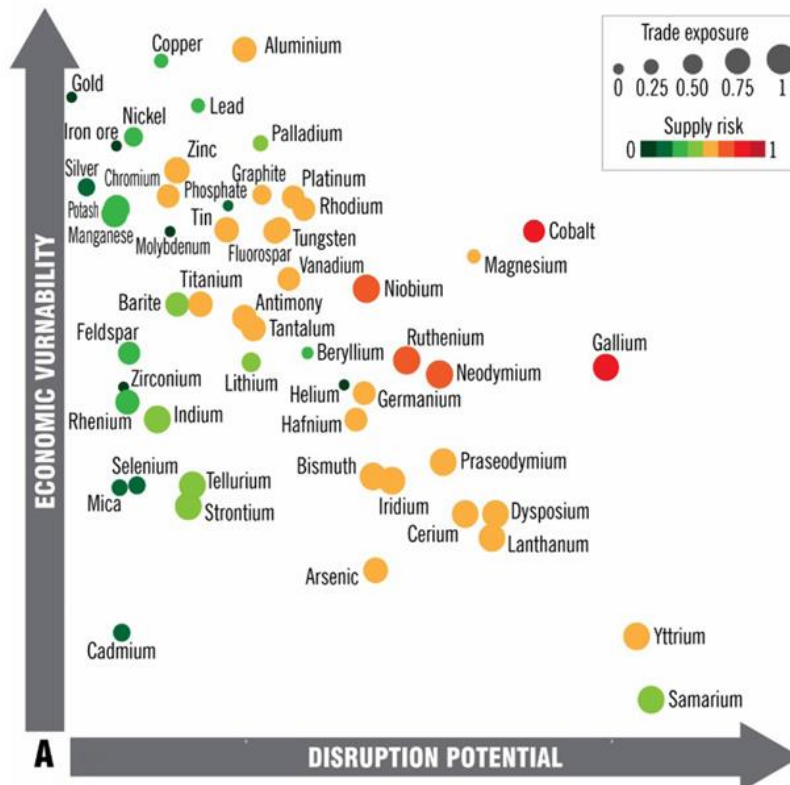
öljyjen hintaa. Kun hintoja muuttaa vertailukelpoisiksi voidaan Preismonitorista nostaa viisi arvokkainta pörssilistattua keskihintaa vuosilta 2019–2023: rodium 424678,5 US\$/kg, kulta 55996,1 US\$/kg, platina 30666,6 US\$/kg, germanium 745,8 US\$/kg ja hopea 688,1 US\$/kg. Tulokset osoittavat suuria eroja primaarisesti hankittujen alkuaineiden hinnoissa. (Preismonitor 2024)

Kriittiset materiaalit ovat korvaamattomia ja hankinta ketjultaan häiriönherkkiä aineita tai mineraaleja, mitkä ovat välttämättömiä taloudellisen tai kansallisen turvallisuuden kannalta (Jędrusiak *et al.* 2023). Kriittiset materiaalit määräytyvät erilailla riippuen esimerkiksi maantieteellisestä sijainnista. Jędrusiak *et al.* artikkelissa kriittisistä materiaaleista on listattuna erikseen Euroopan unionin ja Yhdysvaltojen kriittiset materiaalit. Listauksissa maanosien kesken on paljon yhtäläisiä materiaaleja, mutta niiden kriittisyys vaihtelee. Kaikista kriittisimpiä ovat materiaalit, joiden taloudellinen vaikuttavuus ja hankintaketjun häiriöherkkyys ovat korkealla tasolla.

Kuva 5. Euroopan Unionin kriittiset materiaalit (Jędrusiak *et al.* 2023). ja Morf:n tutkimuksessa (Morf *et al.* 2013) Euroopan unionin listauksessa kaikkein kriittisimpiä materiaaleja ovat magnesium, fosfori, antimoni sekä raskaat ja kevyet harvinaiset maametallit, joihin kuuluvat skandium, yttrium, lantaani, cerium, praseodyymi, neodyymi, prometium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium ja lutetium (U.S. Geological Survey 2024). Kuva 6. Yhdysvaltojen kriittiset materiaalit (Jędrusiak *et al.* 2023). mukaan Yhdysvaltojen kriittisimmiksi materiaaleiksi voidaan nimetä gallium, koboltti, magnesium ja alumiini. Kulta ei kuulu kummankaan alueen kriittisimpiin materiaaleihin.



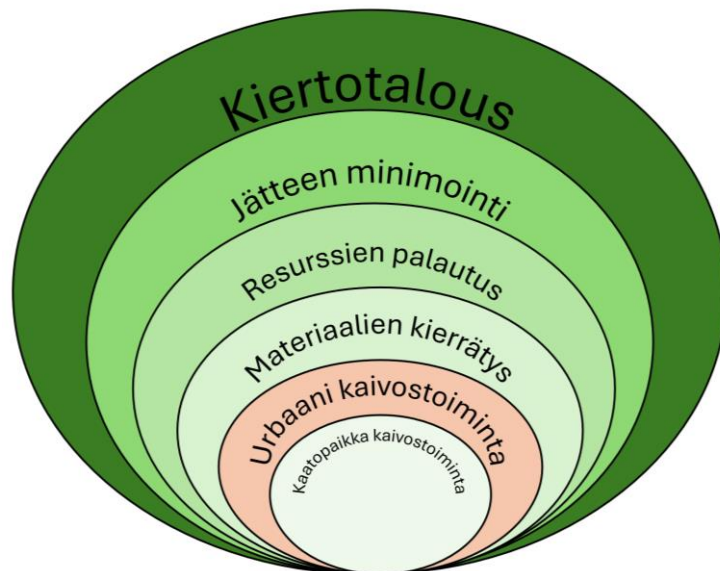
Kuva 5. Euroopan Unionin kriittiset materiaalit (Jędrusiak et al. 2023).



Kuva 6. Yhdysvaltojen kriittiset materiaalit (Jędrusiak et al. 2023).

2.5 Urban mining ja kulta

Urban mining eli urbaani kaivostoiminta tai kaupunkikaivostoiminta on käsite, jota yleensä käytetään kiertotalouden ja kierrätyksen yhteydessä. Urbaani kaivostoiminta on kierrätysmenetelmä, mutta kaikki kierrätys ja materiaalien uudelleen käyttö ei ole urbaania kaivostoimintaa. Konseptina urbaanin kaivostoiminnan raja on paikoin häilyvä, kuitenkin määrittävän niin, että yhdisteet ja aineet otetaan talteen kaikista ihmisen tuottamista kannoista eli antropogeenisistä lähteistä (Cossu & Williams 2015). Antropogeenisistä lähteistä jää pois kaatopaikkojen loppusijoitusmassa, koska sen sisältämien aineiden talteenottoa kutsutaan kaatopaikkakaivostoiminnaksi (landfill mining) (Cossu & Williams 2015). Kuva 7 osoittaa urbaanin kaivostoiminnan olevan osa kiertotaloutta ja sijoittuvan kaatopaikka kaivostoiminnan kanssa materiaalinkierron viimeisiin käyttöönotto keinoihin. Urbaani kaivostoiminta on näin ollen kierrätyksen jälkituotteiden seulonta konsepti. Kierrätys on kokonaisvaltaisempi konsepti, jossa pyritään ajattelemaan kaikkia jätteen sisältämiä raaka-aineita, kun taas urbaanissa kaivostoiminnassa pyritään näkemään jätemassa malmina, jota voidaan rikastaa käsittelemällä. Esimerkiksi jätteidenpolton katsotaan johtavan tiettyjen aineellisten resurssien menetykseen, mutta urbaanin kaivostoiminnan kannalta se tehostaa ”malmin” sisältämien alkuaineiden, kuten metallien konsentraatiota ja erottamista (Cossu & Williams 2015).



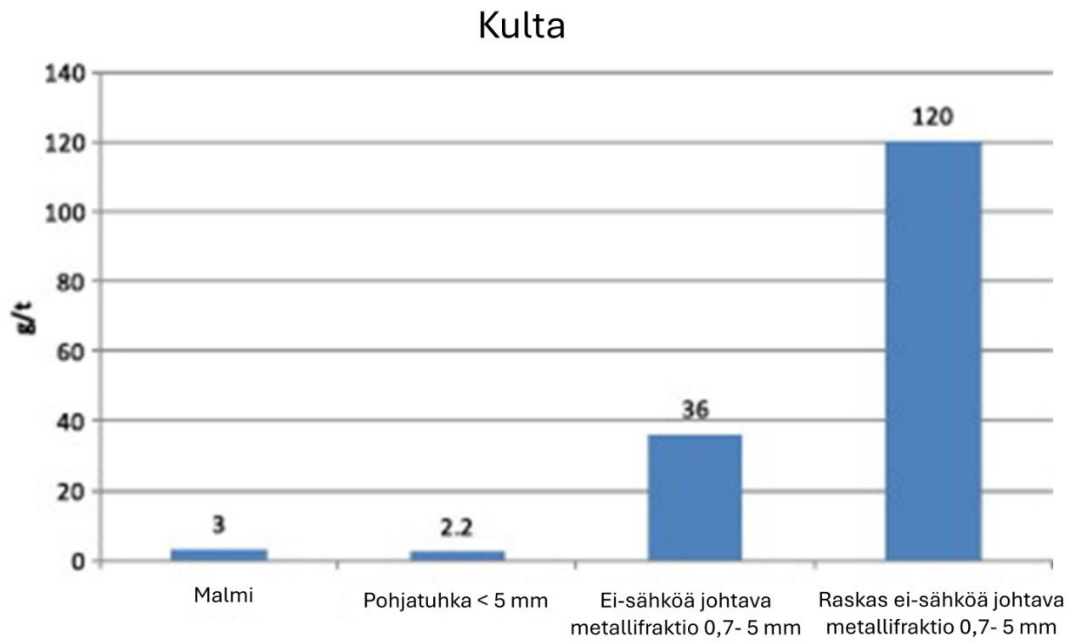
Kuva 7. *Urbaanin kaivostoiminnan sijoittuminen kiertotalouden kokonaisuuteen. Mukailten lähteestä (Cossu & Williams 2015).*

On monia syitä harjoittaa urbaania kaivostoimintaa. Syyt peilautuvat kuitenkin aina yhteiskunnallisiin ja poliittisiin lähtökohtiin. Poliittisena syynä varsinkin Euroopassa ja Yhdysvalloissa pidetään Kiina-riippuvuuden vähentämistä eli alueellisen omavaraisuuden kasvattamista. Kiina on merkittävä tuottaja monien kriittisten ja tärkeiden alkuaineiden sekä raaka-aineiden kohdalla (Jędrusiak *et al.* 2023). Tunnetusti Euroopan maaperä on varsin köyhää harvinaisimpien alkuaineiden osalta. Yhteiskunnallisia syitä ovat taloudelliset, ympäristölliset ja sosiaaliset syyt (Jędrusiak *et al.* 2023). Syyt voivat olla moninaisia. Esimerkiksi taloudellisesti urbaanin kaivostoiminnan puolesta puhuu tuontikustannusten aleneminen ja toimitusketjun lyheneminen, kuin myös taloudellisena syynä voidaan nähdä omalle alueelle perustettavan primaarin kaivoksen korkeat perustamiskulut. Ympäristö syyt kattavat kaikki tilanteet, joissa ympäristöä säästyy harjoittamalla urbaania kaivostoimintaa primaarin sijaan. Sosiaalisiiin syihin liittyy ihmisten mielipiteet ja vakaumukset kierrätystä ja kaivostoimintaa kohtaan. Yhtenä suurimmista syistä harjoittaa urbaania kaivostoimintaa on *MSWI*-tähteiden potentiaali arvokkaiden ja kriittisten raaka-aineiden lähteenä.

MSWI-tähteiden potentiaali on arvokkaissa aineissa. Jędrusiak *et al.* (2023) tarkentaa potentiaalin syntyvän pohjatuhkan sisältämien lukuisten aineiden keskittymisestä yhteen massaan äärettömän rikkaina esiintyminä verrattane maankuoren arvoihin. Esimerkiksi vismutti ja antimoni omaavat 5000 kertaa suuremmat pitoisuudet, sekä hopea, kulta, sinkki ja tina omaavat sata kertaa suuremmat pitoisuudet kuin maankuoressa (Jędrusiak *et al.* 2023). Alkuaineiden louhintamäärät paikallisesti määrittävät marginaalin alkuaineiden merkittäville määrille. Jędrusiak *et al.* (2023) mukaan EU:ssa ei louhita lainkaan harvinaisia maametalleja, mikä nostaa EU:n jätteen sisältämien 1574 tonnin vuotuiset ainevirrat potentiaalisiksi urbaanin kaivostoiminnan kohteiksi. Morf *et al.* (2013) tutkivat Hinwil WI:n tietoja tuottaen arvion, että noin 83 % taloudellisesta kokonaispotentiaalista koostuu seitsemäs metallista. Nämä seitsemän alkuainetta ja niiden osuus kokonaispotentiaalista (100 %) ovat: kulta (26 %), skandium (17 %), alumiini (17 %), kupari (11 %), hopea (6 %), platina (4 %) ja neodyymi (3 %). Muiden metallien osuus jää kukin alle kahteen prosenttiin (Morf *et al.* 2013). Taloudelliseen potentiaaliin on olemassa myös esimerkkejä Euroopan maissa sijaitsevista pohjatuhkan käsittelylaitoksista. Toiminnan kannattavuus saavutetaan laitoksissa, joiden raaka-aineen (pohjatuhkan) massavirta ylittää 20 000 tonnin vuosittain (Bruno *et al.* 2021). Tutkimuksessa Bruno *et al.* (2021) laskivat kyseisten yritysten talousindikaattoreiden keskiarvot luokkiin: nettonykyarvo (NPV) 83 miljoonaa euroa ja sijoitetun pääoman tuotto (ROI) 20 %.

Kullan valinta urbaanin kaivostoiminnan ja tämän kandidaatintyön kohteeksi tapahtui kolmesta syystä, jotka ovat kullan korkea arvo, kullan laajat käyttökohteet teollisuudessa ja kullan esiintymispotentiaali pohjatuhkan fraktioissa. Kullan markkina-arvoa käsiteltiin luvussa 2.4, jossa arvon todettiin olevan 55996,1 US\$/kg. Verrattuna useisiin muihin alkuaineisiin kullan kilohinta oli suuri. Kullan laajat käyttökohteet ovat seurausta kullan ominaisuuksista, jotka on tunnettu teollisuudessa jo pitkään. Chaston (1977) kirjoitti artikkelissaan *Industrial uses of gold* kullan johtavista ominaisuuksista, joita ovat tahrautumattomuus, hapettumisenkestävyys, korroosionkestävyys, sähkönjohtavuus ja säteilyn selektiivinen heijastavuus. Käyttökohteina on elektroniikka, avaruus- ja lentokonetekniikka, korut ja lääketiede. Kullan potentiaaliin pohjatuhkassa paneudutaan seuraavassa kappaleessa.

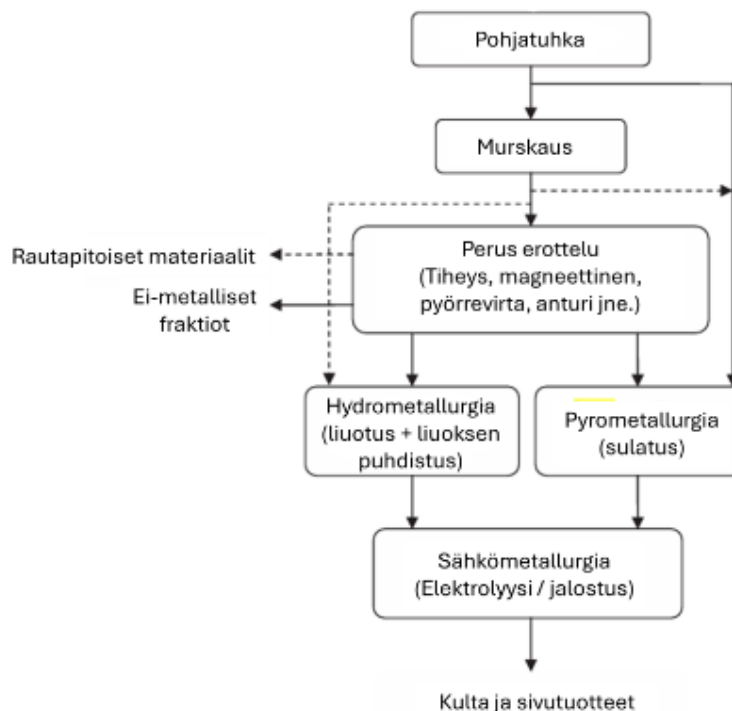
Morf *et al.* (2013) mukaan kultaa on yhdyskuntajätteessä suhteellisen vähän, mutta prosessissa syntyvässä pohjatuhkassa sen pitoisuudet ovat suuret. Kuva 4 osoitti kullan pitoisuuksien esiintymisen pääosin alle 5 mm:n ei-ferriittisessä metallifraktiossa (40 mg/kg). Kuva 8 tulokset Morfin *et al.* (2013) tutkimuksesta näyttävät erään sveitsiläisen MSWI-laitoksen pohjatuhkajakeiden kultapitoisuudet osoittaen jopa 40 kertaa suuremman pitoisuuden raskaassa ei-ferriittisessä metallifraktiossa verrattuna tyyppilliseen malmin kultapitoisuuteen. Aiemmin mainittiin kullan kattavan noin neljänneksen taloudellisesta kokonaispotentiaalista. Morf *et al.* (2013) esittävät myös valistuneen arvauksen kulta määrän taloudellisesta arvosta Sveitsin jätteenpolttolaitoksien pohjatuhkissa. Arvion mukaan todennäköisimmin vuoden 2011 kulta määrät vastasivat noin 55 miljoonaa euroa. Arvaukseen täsmentäväksi korjauskertoimeksi Morf *et al.* lisäävät 80 % hyödyntämistä, mikä saa mahdollisen taloudellisen arvon täsmentymään noin 45 miljoonaan euroon aikansa valuuttakursseilla ja kullan hinnalla. Jalometallien tapauksessa on myös merkitystä alkutuotannon aiheuttamista ympäristövaikutuksista (Morf *et al.* 2013). Alkutuotannolla tarkoitetaan primaarisen malmin hankinnan työvaiheita, kuten kaivostoiminta, louhinta ja jalostus (Morf *et al.* 2013). Hagelüken ja Corti (2010) sekä Wäger (2011) tutkimuksissaan viittasivat metallien ympäristövaikutuksien eroihin. Morf *et al.* (2013) käytti tutkimuksessaan esimerkkinä alumiinin ja kullan ympäristövaikutuksia seuraavasti: 1 t primaarisen alumiinin ympäristövaikutukset vastaavat vain 0,7 kg primaarisen kullan tuotannon ympäristövaikutuksia.



Kuva 8. Kullan keskimääräiset pitoisuudet vuonna 2010 Hinwilin MSWI-laitoksen pohjatuhkajakeissa verrattuna malmiarvoihin. Mukailen lähteestä (Morf et al. 2013)

3. KULLAN TALTEENOTTOMENETELMÄT

Kullan erottaminen ja talteenotto on teollisuudessa lähes poikkeuksetta monivaiheinen kokonaisuus. Erottelumenetelmiä tuetaan toisillaan ja talteenotossa käytetään useampia menetelmiä, milloin lopputuloksena saadaan mahdollisimman paljon eroteltavaa ainetta. Peruserottelu tapahtuu pääsääntöisesti samaan tapaan ennen jokaista talteenottomenetelmää. Pohjatuuhkan käsittelyyn peruserottelumenetelmiä ovat magneettinen erottelu, pyörrevirta erottelu, tiheyteen pohjautuvaa erottelu ja antureihin pohjautuva erottelu (Šyc *et al.* 2020). Erotteluketjun jälkeen on valittava jokin talteenottomenetelmä, joista työssä tarkastellaan pyrometallurgiaa ja hydrometallurgiaa. Huomattavaa on, että kaikki edellä mainitut menetelmät ovat yleiskuvauksia eli sisältävät lukuisia yksilöityjä ja toisinaan patentoituja toimintamalleja. Tässä luvussa pyritään luomaan yleiskuvaus menetelmille ja niiden sisältämille laitteistoille ottamatta kantaa yksilöllisiin toimintamalleihin. Luku etenee Kuva 9 sekä yleisen käsittelyprosessin mukaisesti.



Kuva 9. Pohjatuuhkan erottelu ja talteenotto. Mukailten lähteestä (Yazıcı & Deveci 2009)

3.1 Mekaaninen peruserottelu

Peruslähtökohtana on, että pohjatuhkaa käsitellään jollain seuraavista prosesseista: märän pohjatuhkan kuivakäsittely, märän pohjatuhkan märkäkäsittely tai kuivan pohjatuhkan kuivakäsittely. Näistä kuivan pohjatuhkan kuivakäsittelyllä on etuja metallientalteenottotehokkuuden kannalta (Šyc *et al.* 2020, Kahle 2015 mukaan). Märät pohjatuhka prosessit ovat kuitenkin yleisempiä niiden yksinkertaisemman toteutuksen vuoksi. Prosessin mukaan ensimmäisenä vaiheena jätteenpolton jälkeen on kypsyttäminen, joka tapahtuu varastossa seisottamalla. Šyc *et al.* (2020) mukaan kypsyttäminen parantaa pohjatuhkan huuhtoutumisominaisuuksia ja laskee tuhkamassan vesipitoisuutta. Kypsyttäminen on pääasiassa märän pohjatuhkan kuivakäsittelyn työvaihe. Kaikkien kolmen edellä mainitun menetelmän seuraava ja hyvin tärkeä vaihe on seulonta. Tarkkojen raekokojen saavuttaminen parantaa huomattavasti metallien talteenottoa. Luvussa 2.3 mainittiin kullan jakautuvan vahvasti alle 5 mm ei-ferriittiseen fraktioon. Seulonta on kuitenkin liian epätarkka paljastaakseen suoria alkuaine virttoja, mikä luo tarpeen erottelumenetelmille.

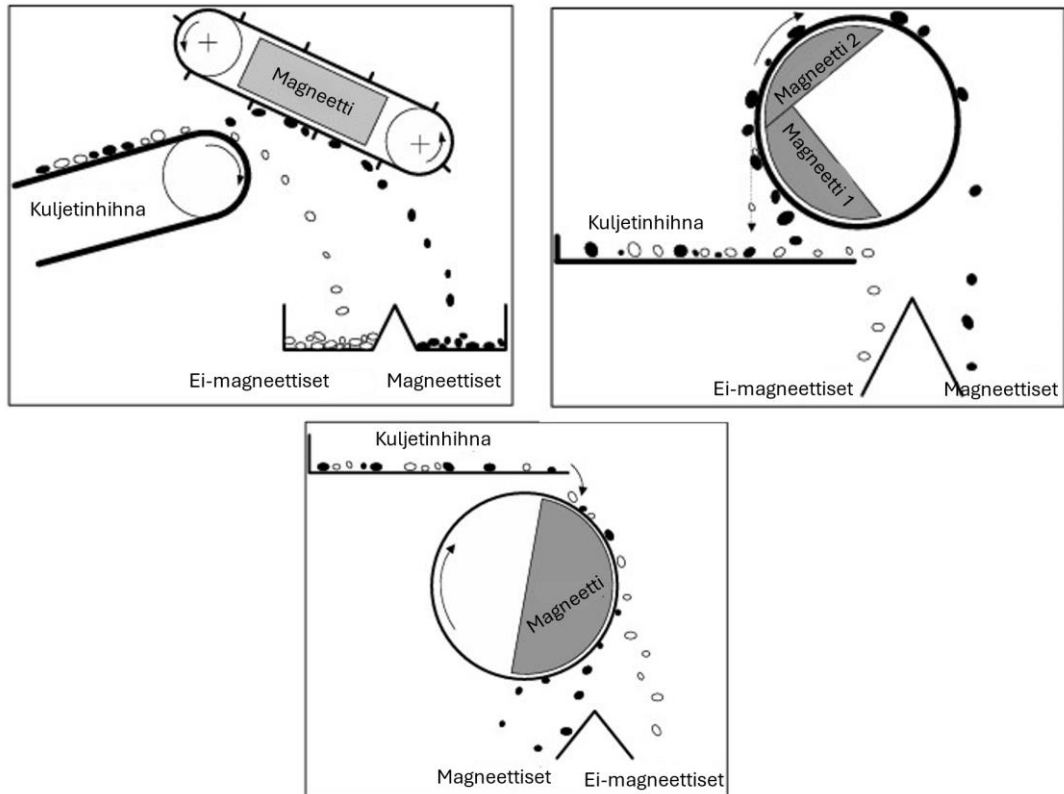
Useat erottelumenetelmät vaativat suhteellisen pienen raekoon ja rakeiden mahdollisimman yksilöllisen koostumuksen. Tämän takia suurimpia raekokoja pienennetään murskaamalla. Bunge (2018) tutkimuksessaan toteaa murskaamisen myös vapauttavan metallihiukkasia mineraaleista. Valmiit fraktiot päästään erottelemaan ja hyödyntämään rakennusteollisuudessa ja infrassa. MSWI-laitosten pohjatuhkan peruserottelumenetelmiin kuulu magneettinen, pyörrevirta ja anturi erottelumenetelmät. Näillä menetelmillä pohjatuhka saadaan jaettua magneettisuuden, sähköjohtavuuden, metallisuuden ja tiheyden mukaan. Vaikka näiden erotusmenetelmien jälkeiset fraktiot ovat jo paljon homogeenisempiä kuin alkuperäinen syöttötuhka, eivät menetelmät kykene kullan ainekohtaiseen erotteluun. Näiden valmistelevien menetelmien läpikäynti on kuitenkin välttämättömyys, jotta päästään soveltamaan työssä tarkasteltuja talteenottomenetelmiä

3.1.1 Magneettinen erottelu

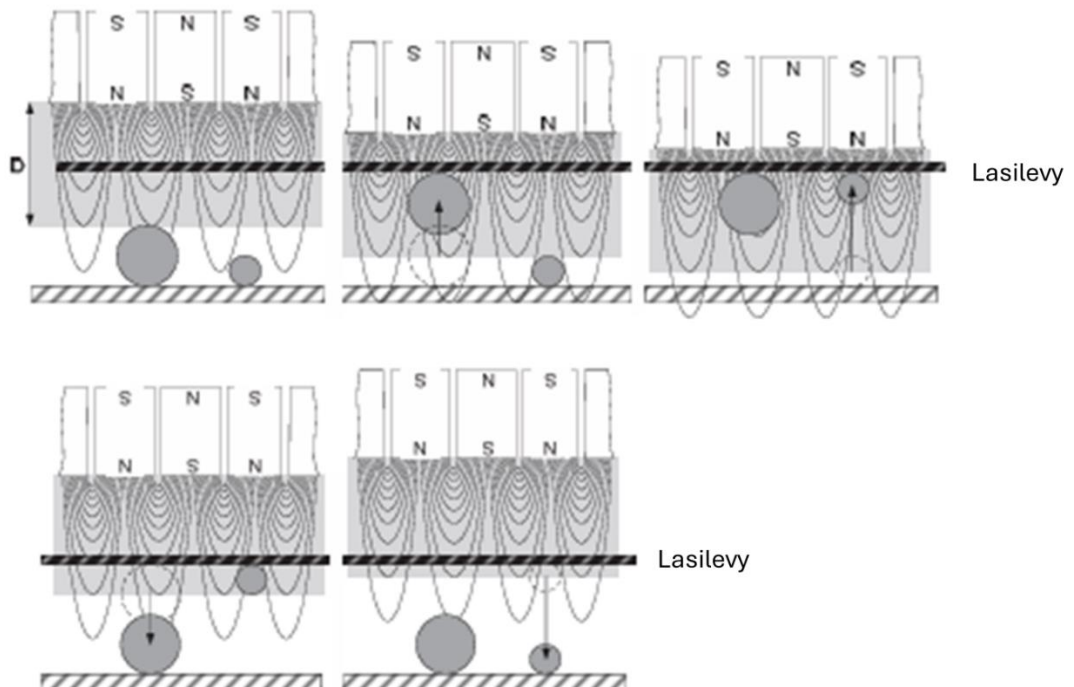
Magneettisessa erottelussa MS (eng. magnetic separation) sähkömagneettien ja kestopagneettien avulla voidaan erotella magneettisia kappaleita ja hiukkasia erilaisista massavirroista, kuten pohjatuhkasta. Tämän erottelumenetelmän yhteydessä pohjatuhka jakautuu kolmeen erilliseen fraktioon, jotka ovat ei-magneettinen aines, paramagneettinen aines ja ferromagneettinen aines. Ei-magneettiset aineet eivät reagoi magneetteihin. Paramagneettiset aineet reagoivat vahvassa ulkoisessa magneetikentässä, jonka vuontiheys on Bunge (2018) tutkimuksessa yli 0,2 T

tarkemmin 0,6 T eli noin 6000 Gaussia. Ferromagneettinen aines reagoi heikomman pintavuon magneetteihin, joiden vuontiheys on $<0,2$ T (Bunge 2018). Nykyaikaisissa *MS*-laitteissa hyödynnetään usein kestromagneetteja, joiden vastakkaiset navat on sijoitettu vierekkäin. Näin sijoiteltuna napojen väliin ei synny erotusrakoa jonne hiukkaset voisivat jumittua (Bunge 2018). Bunge kertoo tutkimuksessaan heikompien *MS*-laitteiden eli *LIMS* (eng. low intensity magnetic separators) käyttävän edullisempia ferriittimagneetteja ja vahvempien *MS*-laitteiden eli *HIMS* (eng. high intensity magnetic separators) käyttävän neodyymiin pohjautuvia harvinaisia maametalli magneetteja.

Pohjatuhkan käsittelyssä hyödynnetään kolmenlaisia *MS*-erottimia: poikkeutus rumpumagneetti, poisto rumpumagneetti ja yläpuolinen magneetti. *MS*-erottimien toiminta periaate esitetty Kuva 10. Poistorumpu ja yläpuolinen magneetti toimivat pääasiassa suurempien kappaleiden erottamiseen, koska niiden magneettisen vetovoiman alue on kauempana kuljetinhihnasta ja hiukkasista. Poikkeutusmagneetin tapauksessa partikkelit pääsevät niin lähelle magneettia kuin teknisesti on mahdollista. Kuva 11 Bunge (2018) esittelemä erottelumagneetin toimintaperiaate, josta havaitaan magneettisen vetovoiman erilaiset vaatimukset erikokoisille kappaleille. Julkaisussaan Bunge toteaa yleisesti ei-magneettisena pidetyn kullan hiukkasten jäävän melkein 50-prosenttisesti vahvimpiin *HIMS* magneetteihin kiinni.



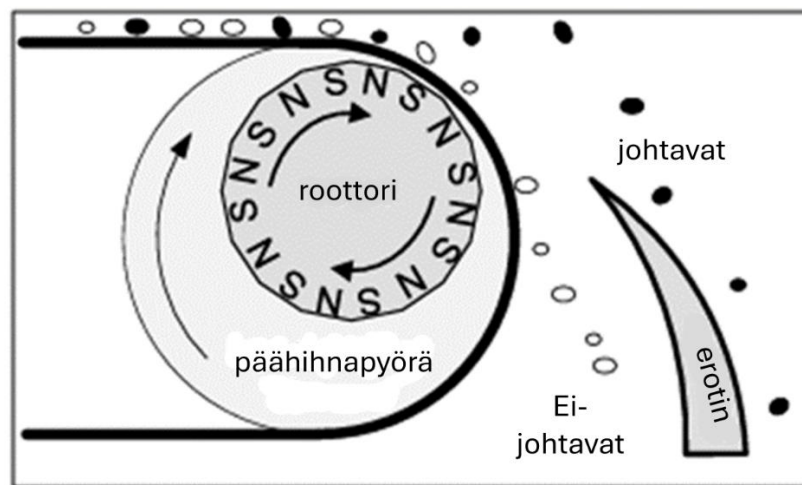
Kuva 10. Magneettiset erottelumenetelmät: yläpuolinen magneetti (vas. ylä), poisto rumpu magneetti (oik. ylä) ja poikkeutus rumpumagneetti (kesk. ala). Mukailten lähteestä (Bunge 2018)



Kuva 11. Magneettisen vetovoiman vaikutus erikokoisiin kappaleisiin. Mukailten lähteestä (Bunge 2018)

3.1.2 Pyörrevirta erottelu

Pyörrevirta erottelumenetelmät perustuvat sähkönjohtavuuteen. ECS-erottimet (eng. Eddy current separator) seuloivat pohjatuhkan kahteen fraktioon, jotka ovat sähköä johtava aines ja sähköä johtamaton aines (Bunge 2018). Erottelu tapahtuu magneettien avulla, kuitenkin hyödyntäen magneettisuuden nopeasta vaihtelusta syntyviä pyörrevirtoja. Nopeasti vaihtuva magneettikenttä saadaan aikaiseksi pyörittämällä magneettinapakiekkoa kovalla nopeudella (2000–4000 rpm) (Šyc *et al.* 2020). Tähän magneettikenttää joutuessaan sähköä johtavan hiukkasen sisälle syntyy pyörrevirtoja, joista hiukkaselle muodostuu magneettikenttä. Tämä hiukkasen magneettikenttä hylkii magneettikiekon magneettikenttää muodostaen työntövoiman, joka lennättää sähköä johtavat hiukkaset erotinterän ylitse Kuva 12 mukaisesti. Kuljetinhihna pyörii huomattavasti hitaammin kuin magneettikiekkok (noin 2 m/s), minkä seurauksesta sähköä johtamattomat partikkelit, kuten monet mineraalit, putoavat hihnanreunalta erotinterän alitse. Parhaan mahdollisen toimivuuden saavuttamiseksi magneettikiekon tulisi olla mahdollisimman lähellä eroteltavia hiukkasia, joten hihnan ja hihnapyörän tulee olla mahdollisimman ohuita. ECS käytettäessä korostuu ainepartikkeleiden irrallisuus mineraaleista (murskaus). (Bunge 2018; Smith *et al.* 2019)

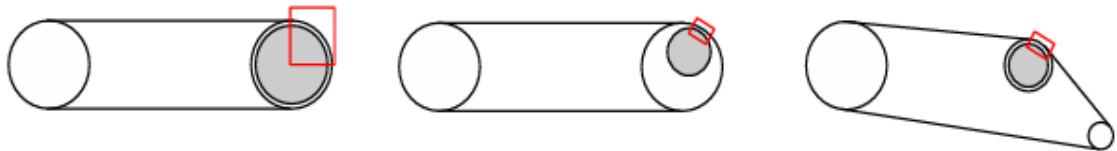


Kuva 12. ECS-erottimen toiminta. Mukailten lähteestä (Bunge 2018)

Korkea sähkön johtavuus lisää kappaleen kokema hyljintävoimaa erotteluvyöhykkeellä, mutta korkea sähkön johtavuus ei ole ainoa eroteltavuuteen vaikuttava tekijä. Magneettinen kappale kokee samaan tapaan vetovoiman kohti magneettipyörää kuin aiemmassa luvussa käsitellyssä magneettisten erottimen tapauksessa. Ferromagneettinen voima on usein niin suuri, että se ylittää pyörrevirroilla saavutetun hylkimisvoiman. Bunge mukaan magneettiset partikkelit on poistettava ennen ECS-erottelua realistisen ja laadukkaan tuloksen saavuttamiseksi. Huomioitavaa on myös partikkeleiden tiheys. Tiheämpiin kappaleisiin kohdistuu suurempi gravitaatiovoima,

mikä näkyy kappaleiden lentoradan jyrkemmässä kaareutumassa irrottuaan kuljetinhihnasta. Bunge puhuu työssään johtavuuden ja tiheyden suhteesta, jolla voidaan indikoida eri alkuaineiden erotustehokkuutta. Näin mitattuna kullan potentiaalinen erotustehokkuus *ECS* on vahvalla keskitasolla. Gravitaatiovoiman ja ferromagneettisenvoiman lisäksi ilmanvastusvoima on merkittävässä roolissa kappaleen lentoradan kannalta, kun kappaleen halkaisija on <2 mm. Myös pienten hiukkasten pyörimissuunta vaikuttaa Magnus-ilmiön periaatteilla hiukkasen lentorataan. (Bunge 2018; Smith *et al.* 2019)

Pohjatuhan käsittelyssä hyödynnetään kolmenlaisia *ECS*-erottimia: samankeskinen, epäkesko (STEINERT) ja siirretty palautusrulla (ANDRIN). *ECS*-erottimien toiminta on esitetty Kuva 13. Menetelmät toimivat pääasiassa täysin samalla periaatteella pois lukien STEINERT ja ANDRIN mallien optimaalisempaa asettelua, jolla ”hylkivyyden vyöhykettä” on saatu rajattua lähelle 30° aluetta. Perinteisessä samankeskisessä hihnapyörämallissa hylkivyyden vyöhyke on peräti 90° , joka hankaloittaa erottelun tarkkuutta. Perusmallien lisäksi on kehitelty *ECS*-menetelmiä, joilla on potentiaalia, mutta ne eivät ole päässeet täysimittaiseen käyttöön. Tällaisia *ECS* johdannaistekniikoita ovat märkäpyörrevirtaerotin (*WECS*), Magnus *ECS* ja taaksepäin pyörivä *ECS* (Šyc *et al.* 2020). (Bunge 2018)



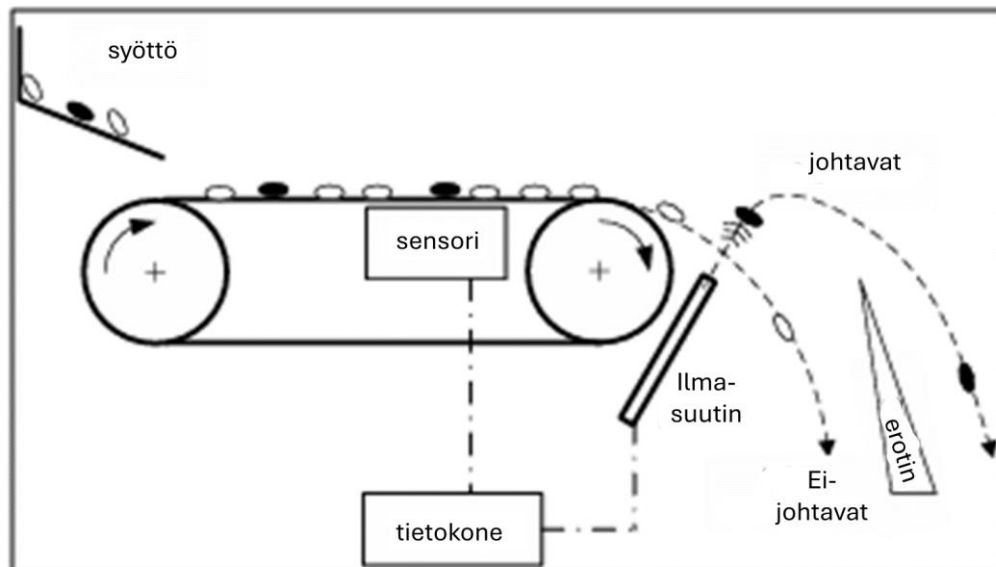
Kuva 13. Samankeskinen oik., epäkesko (STEINERT) kesk. ja siirretty palautusrulla (ANDRIN) vas. (Bunge 2018)

3.1.3 Antureihin pohjautuva erottelu

Antureihin pohjautuva lajittelu järjestelmä *SS* (eng. sensor sorters) kykenee tunnistamaan metallia sisältävät kappaleet pohjatuhkasta. Tunnistaminen tapahtuu sähkömagneettisen metallinpaljastin sensorin avulla, joka on Kuva 14 mukaisesti sijoitettu kuljetin hihnan alle ennen paineilmaerotinta. Sensorin havaitessa metallisen kappaleen lähettää se tulosignaalin tietokoneelle, joka laskee kohde kappaleen paikan ja ajoittaa poistoon tarkoitetun tarkan paineilma purkauksen (Pretz & Julius 2012; Bunge 2018). Ilman voimasta metallinen kappale muuttaa lentorataa pudoten erotinterän ylitse metallijakeeseen. Muut tuhkan sisältämät partikkelit putoavat hihnan päästä poistojakeeseen. *SS*-erottimet kykenevät erottelemaan kaikenlaiset metalliset kappaleet niiden magneettisista ominaisuuksistaan riippumatta (Pretz & Julius 2012; Bunge 2018). Bunge mainitsee *SS*-erottimien eduksi myös sellaisten metallikappaleiden erottamisen,

jotka ovat vielä sidoksissa muihin mineraaleihin. Tällaisia heterogeenisiä kappaleita ei välttämättä kyetä erottelemaan ECS-erottimien avulla.

SS-erottimet ovat MS- ja ECS-erottimiin verrattuna kalliita käyttöönottaa ja ylläpitää (Bunge 2018). Bungen mukaan käyttökustannuksiin vaikuttaa käytetyn paineilman määrä, minkä takia SS-erottimia hyödynnetään usein jo pidemmälle seulotuissa jakeissa. SS-erottimissa on ongelmana pohjatuhkan sisältämä hiilikuitu, joka johtaa sähköä ja näin ollen käynnistää ketjureaktion, jossa paineilma levittää hiilikuidun korvausilman mukana sähkölaitteisiin synnyttämään oikosulkuja. SS-erottimet kykenevät erottelemaan vain yli 4 mm:n kappaleita, mutta tässä kokoluokassa omaa yli 90 % hyödyntämisasteen. SS-erottimien eri sovelluksissa anturit ovat erilaisia tai antureita on yhdistelty. Muita SS käytettyjä antureita ovat: röntgenfluoresenssi anturit, optiset anturit, laser anturit ja kamerat, joilla voidaan havaita materiaalien värejä tai muotoja (Šyc *et al.* 2020).

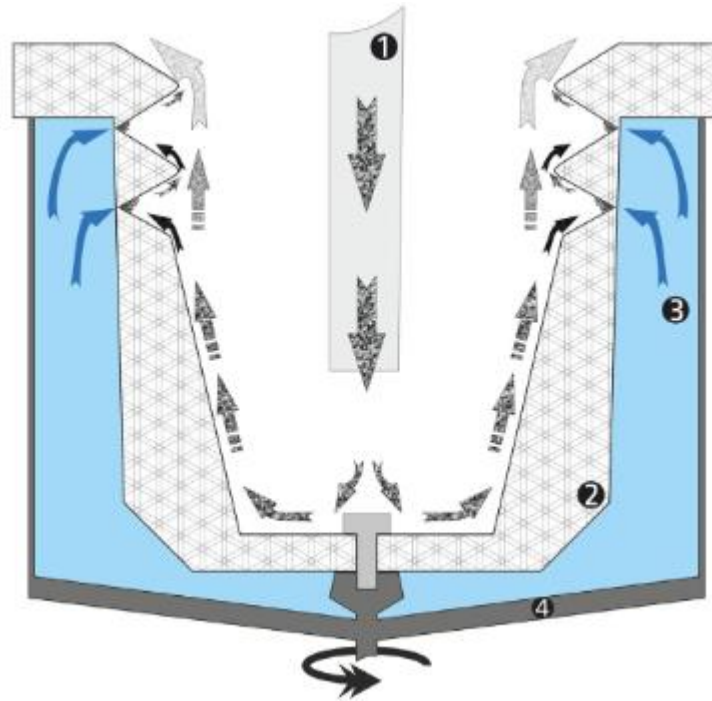


Kuva 14. Anturi erottimen toiminta. Mukailten lähteestä (Bunge 2018)

3.1.4 Tiheyteen pohjautuva erottelu

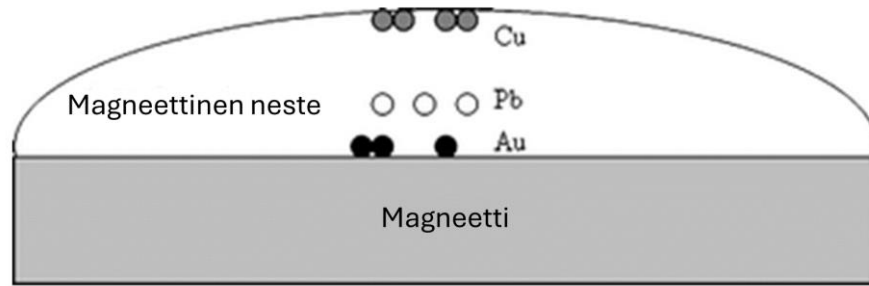
Tiheyteen pohjautuvassa erottelussa kohderyhmästä kyetään poistamaan tiheimmät partikkelit, kuten arvokkaat jalometallit. Bungen (2018) mukaan pohjatuhkan tyypillinen tiheys on alle 2700 kg/m^3 , joka mahdollistaa esimerkiksi kullan erottamisen kullan yli 19000 kg/m^3 tiheyden ansiosta. Lähellä pohjatuhkan tiheyttä olevia aineita ei voi erotella tuhkasta tiheys menetelmillä. Tällaisista aineista esimerkkinä alumiini, jonka tiheys on noin 2700 kg/m^3 (Bunge 2018). MWSI pohjatuhkan käsittelyyn on useampia tiheyserottimia, jotka toimivat usein märän tai kuivan pohjatuhkan kanssa. Eräs merkäkäsitellyssä käytävä erotin on Holm *et al.* (2018) tutkimuksessaan käyttämä

keskipakorikastutin. Kyseisen erottimen toimintaperiaate on esitetty Kuva 15 seuraavasti (Holm *et al.* 2018): Erottimen pyörivän kulhon pohjalle syötetään prosessoitavaa pohjatuuhkaa ja vettä syöttökanavasta. Keskipakovoiman vaikutuksesta liete virtaa tasaisena kalvona ylöspäin pitkin kulhon seinämää lopulta ylittäen seinämän ja poistuen järjestelmästä. Kuitenkin tiheimmät partikkelit jäävät loukkuun kulhon yläosassa oleviin loviin. Lovien pohjissa olevista rei'istä virtaa keskipakovoimaa vastustava veden virtausvoima, joka mahdollistaa paremman ylivuodon pois kulhosta. erottimen toimintaa voi säätää pyörimisnopeuden ja edellä mainitun vastavirtaveden syöttöpaineen avulla.



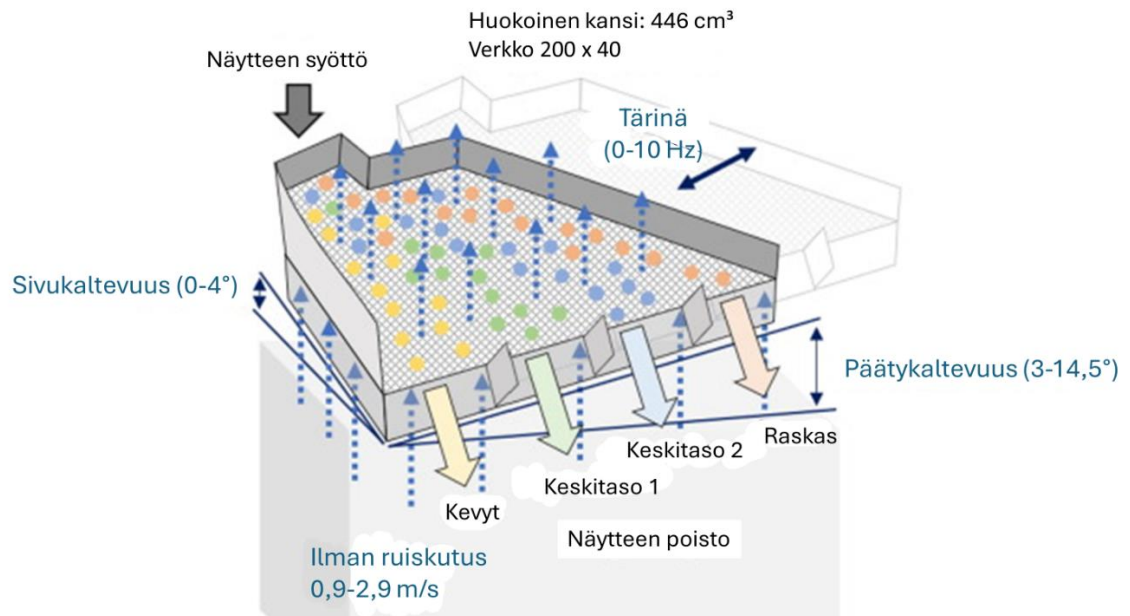
Kuva 15. Keskipakorikastutin (Holm *et al.* 2018)

Toinen tiheyden pohjautuva märkäsäätelymenetelmä on magneettinen tiheyden erotin, joka hyödyntää magneettista nestettä eri tiheiden partikkeleiden erottelukseen (Sink float periaate) (Böni 2013). Muchova *et al.* (2009) tutkimuksessaan toteaa, että normaalitilassa magneettinen neste vastaa suunnilleen veden tiheyttä. Kuitenkin nesteen alapuolelta kohdistuvassa ulkoisessa gradienttimagneettikentässä tällaiseen nesteeseen kohdistuu painovoiman lisäksi magneettinen voima. Tarkalla magneettisella induktiolla voidaan keinotekoisesti muokata nesteestä kevyempää tai raskaampaa (Muchova *et al.* 2009). Magneettisen induktion vaihdellessa pystysuunnassa saadaan aikaiseksi efektiivinen väliaineen tiheys, joka niin ikään vaihtelee pystysuunnassa (Muchova *et al.* 2009). Magneettina tässä sovelluksessa toimii säädettävä sähkömagneetti. Toiminta periaate on kuvattu Muchova *et al.* (2009) tutkimuksen esittämän pelkistetyn kuvan mukaan Kuva 16.



Kuva 16. Magneettisen tiheyden erottimen nesteessä tiheimmät aineet painuvat pohjalle. Mukailten lähteestä (Muchova et al. 2009).

Tiheyteen perustuvista kuivaerottelumenetelmistä nostetaan tarkasteluun ilmapöytä lajittelu, jonka eräs malli on esitetty Kuva 17. Back et al. (2020) tutkimuksessaan, metallipitoisista suuritiheyshiukkasista, käyvät läpi tarkasti ilmapöytäerottimen toimintaperiaatteen. Ilmapöydässä säädellään samanaikaisesti ilman ruiskutusnopeutta, värinän voimakkuutta ja tason kaltevuutta (Back et al. 2020). Ilmaa ruiskutetaan huokoisen pinnan lävitse, jossa pintahiukkaset saadaan käyttäytymään nesteen tavoin, kun ruiskutus nopeus tapahtuu pienimmän fluidisaationopeuden ja terminaalinopeuden välillä (Dodbiba et al. 2003). Ilman ruiskutusnopeus määräytyy hiukkasten koon ja tiheyden mukaan (Back et al. 2020). Yksinkertaistettuna kallistus ohjaa kevyitä partikkeleja alemmas seulassa samanaikaisesti, kun värinä kuljettaa raskaammat hiukkaset erottimen yläosaan (Back et al. 2020). Lopulta eri tiheet partikkelit poistuvat erottimesta omia kanaviaan pitkin eri tiheysfraktioihin.



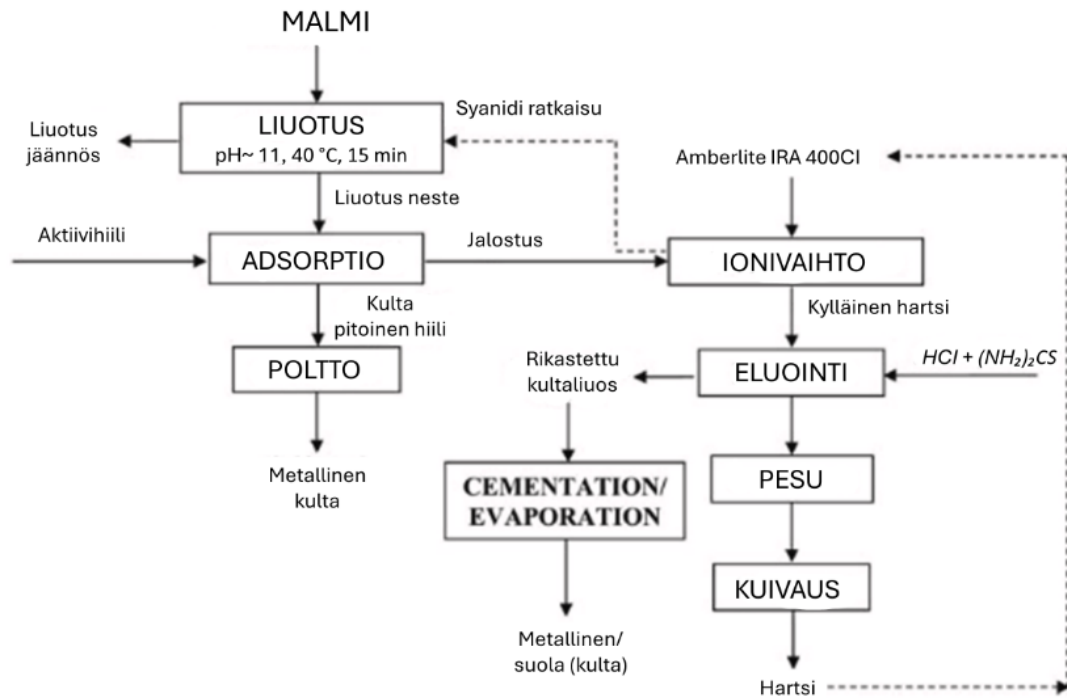
Kuva 17. Ilmapöytäerottimen toimintaperiaate. Mukailten lähteestä (Back et al. 2020)

3.2 Hydrometallurgia

Hydrometallurgiassa talteenotto tapahtuu liuottamalla kulta sopivaan liuottimeen, jonka jälkeen liuotin erotetaan loppufraktiosta ja liuotin voidaan pelkistää takaisin kullaksi. Kullan liuotus tapahtuu mineraalihapoilla tai syanidipohjaisilla liuottimilla (Li *et al.* 2018). Kulta liuottavia mineraalihappoja ovat esimerkiksi väkevä typpihappo (HNO_3) ja kuningasvesi, jossa on niin ikään typpihappoa ja suolahappoa (HCl) (Li *et al.* 2018). Kuningasvesi on pidetty kullan liuotin, sillä se voi liuottaa kullan valikoivasti hopean ja palladiumin joukosta (Park & Fray 2009). Syanidi (pH: 10–10,5) on kyvykäs liuottamaan kulta korkealla hyötysuhteella ja alhaisilla kustannuksilla (Cui & Zhang 2008). Syanidi-ioni (CN^-) on ratkaisevassa osassa liukenemisprosessissa ja se voi olla useassa muodossa, kuten syanidivetyinä (HCN) tai puhtaana syanidina (CN^-) (Li *et al.* 2018). Dietyylimalonaatti ($\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_4$) nostetaan Chmielewski *et al.* (1997) raportissa kaikkein parhaaksi teollisuuden kullan liuottimeksi sen korkeiden uuttokertoimen, selektiivisyyden ja kyllästyskapasiteetin ansiosta. Liuottamisen jälkeen liuksille tehdään erotus- ja puhdistus. Tällaisia toimenpiteitä ovat epäpuhtauksien saostaminen, liuotinuutto, adsorptio ja ioninvaihto. Näin ollen liukset käsitellään elektrolyysillä, sementoimalla, kemiallisella pelkistyksellä tai kiteyttämällä kullan talteenottoa varten (Syed 2012; Sadegh Safarzadeh *et al.* 2007).

Syanidiliuotus on edellä käsitellyistä yleisin kullan talteenottomenetelmä, joten valitaan se vertailukohteeksi hydrometallurgiasta. Kuva 18 esitetään yksinkertaistettu kullan syanidiliuotuksen työvaihekaavio. Liuotusta suoritetaan kahdenlaisissa laitoksissa, joista tehokkaampi mittakaavassaan on *CIP*-laitos (eng. Carbon in pulp) (Fleming *et al.* 2011). *CIP*-laitoksessa liuotus on valmis ennen ensimmäistä adsorptiosäiliötä, minkä jälkeen kulta otetaan talteen liuottimesta sarjaan kytketyissä absorptiosäiliöissä (tyypillisesti 4–10 säiliötä) (Fleming *et al.* 2011). Fleming *et al.* (2011) tutkimuksessaan toteavat natriumsyanidiliuoksen liuotustehosta seuraavaa: *CIP*-laitosten liuotus sovelluksissa liuotusaika on noin 36 tuntia ja sillä saavutetaan 96 % liuotus erään malmin kokonaiskultamäärästä. Aktiivihieleen absorptio on yleisin liuottimesta erottelutapa teollisissa sovelluksissa ja Fleming *et al.* mukaan *CIP*-laitoksella absorptiossa kestää 48 tuntia jokaista absorptiosäiliötä kohden, mikä tekee kokonaisajaksi 10 vrk. Viimeisissä vaiheissa (eluutio ja elektrolyysi) puhtaan kullan saattamiseksi kuluu aikaa tavasta riippumatta alle vuorokauden (Conradie *et al.* 1995). Käsittelykapasiteetti syanidiliuotuslaitoksilla on moninkertainen käsiteltävän kultafraktion tuottonopeuteen verrattuna. Liuotuslaitokset kykenevät käsittelemään kustannustehokkaasti myös köyhempiä malmeja. Kustannuksiltaan liuotustekniikat ovat suhteellisen edullisia.

Syanidiliuotus on pääsääntöisesti kullan liuotusmenetelmä ja näin ollen sivutuotteita ei synny prosessin aikana, vaikka niitä olisi syöttömalmissa.



Kuva 18. Hydrometallurginen prosessi kullan talteenottoon. Mukailten lähteestä (Li et al. 2023)

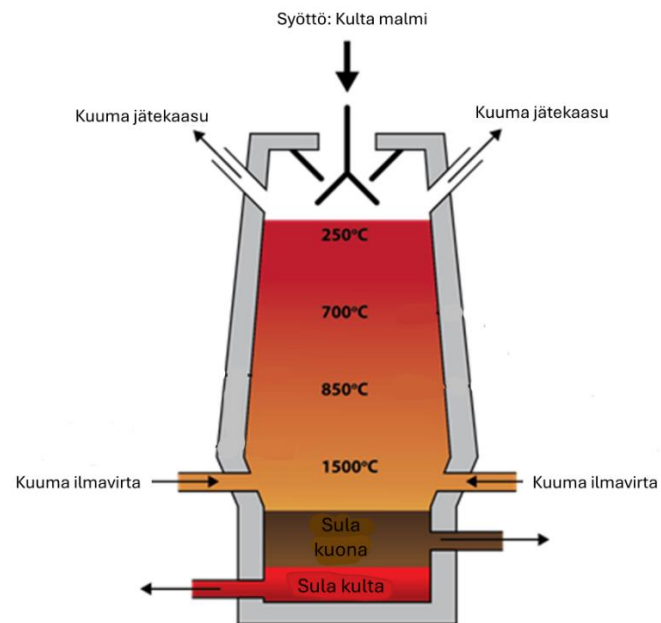
3.3 Pyrometallurgia

Pyrometallurgia hyödyntää erotellussa korkeaa lämpötilaa, jonka avulla malmi (tuhkan fraktio) sulatetaan. Sulamisen avulla voidaan puhdistaa ja erotella aineita niiden eroavien fysikaalisten ominaisuuksien ansiosta. Epäpuhtaudet muuttuvat sulatuksessa kuonaksi, joka nousee sulan metallin pinnalle, tai lietteiksi, jotka vajoavat pohjaan (Lee 2007; Syed 2012). Yleisiä vaiheita pyrometallurgisessa prosessissa ovat kalsinointi (puhdistus), pasuttaminen (reaktiovaihe) ja sulattaminen, jossa ainekohtaisesti saatetaan käyttää lisäainetta eli sulatetta (Rajahalme 2017, Nivaldo 2011 mukaan). Seuraavia toimenpiteitä voidaan pitää pyrometallurgisina: polttaminen, sulatus erilaisilla uuneilla, sintraus ja reaktiot kaasufaasissa korkeissa lämpötiloissa (Syed 2012). Näin ollen myös energiapolttaminen on jo pienimuotoinen pyrometallurginen prosessi, kun ajatellaan kullan tuottamista sekundaarisesti jätteistä.

Talteenottomenetelmän erottaa erottelumenetelmästä se, että talteenotosta saadaan lopputuotteena ”puhdasta” raaka-ainetta. Metallien talteenotto malmista ja tässä sovelluksessa erotellusta tuhkafraktiosta tapahtuu sulattamalla metallinsulattamossa. Yksinkertaistettu pyrometallurginen prosessi sisältää paahtamisen, sulattamisen ja rikastamisen. Paahtamisessa malmin kuumennetaan lähes sulatuslämpötilaan, jotta

haihtuvat aineet saadaan poistettua enne sulatusvaihetta. Sulatus on aikaa ja energiaa vievä vaihe, jossa malmin sisältämät epäpuhtaudet ja jalometallit erottuvat toisistaan. Sulatus tapahtuu Kuva 19 mukaisessa sulatusuunissa. Kulta sulaa noin 1064°C , jolloin uunin lämpötilan on oltava liki 1500°C . Usean tunnin prosessin aikana tuhkafraktiosta muodostuu pinnalle nousevaa kuonaa ja raskasta sulaa kultaa, joka asettuu sulatusuunin pohjalle. Sulatuksen valmistuessa kulta ja kuona erotellaan valamista ja jatkokäsittelyä varten. Rikastamisessa kullasta tehdään puhdasta. Ei-jalometallit saadaan hapetettua pois kullasta 1100°C kuppiuunissa, jonne kulta asetetaan pieninä palloina magnesiitti kulhoissa. Aktiivihiili käsittelyssä hiiltä (C) poltetaan niukan hapen (O_2) kanssa saaden aikaiseksi hiilimonoksidia (CO), joka reagoi prosessoidun kullan kanssa vapauttaen kultaan jääneet happiatomit synnyttäen hiilidioksidia (CO_2). Rikastuksella päästään jopa 99 % alkuaine pitoisuuteen. Kultasulan sisältämän hopean (Ag) poisliuotus suoritetaan typpihappokylvyn avulla. (Bunge 2018; MKS PAMP 2024; YaClass 2024)

Sulatus käsittelyä pystytään hyödyntämään usein samanaikaisesti usealle malmin sisältämälle metallille. Sulat metallit asettuvat päällekkäin sulatuskattilaan, josta niitä voidaan erotella omiin jatkojalostuksiinsa. Sulattamon talteenottokyky on yli 97 % (Amankwah *et al.* 2010). Aiemmassa kappaleessa mainittiin jo sulatuksen vaativan energiamäärän olevan suuri. Lämpö kattilaan tuotetaan polttamalla tai sähkövastuksilla. Lämmöntuotto nostattaa käyttökustannuksia, minkä seurauksena sulattamon käsittelemän malmin on oltava ensiluokkaista eli puhtasjakoista ja rikasta. Sulattamon kapasiteetti rajoittuu lämpökattiloiden kokoon, joka ei voi olla rajattoman suuri. Kuitenkin teollisuuden sulatot pystyvät jalostamaan satoja tonneja kultaa vuosittain. (MKS PAMP 2024). Kullan sulatus prosessi on nopea kullan suuren lämmönjohtavuuden ansiosta, kuitenkin malmista harkoiksi käsittely kestää kymmeniä tunteja.



Kuva 19. Yksinkertaistetun sulattokattilan toimintaperiaate. Mukailen lähteestä (YaClass 2024)

4. MENETELMIEN VERTAILEMINEN

Menetelmiä vertaillessa päädytään hyvin nopeasti hankalaan tilanteeseen. Menetelmien vertaileminen asettaa menetelmät kilpailuasemaan ja osaltaan tasavertaisiksi vaihtoehtoiksi valinnan kannalta. Valinta kuitenkin harvoin perustuu pelkkään haluun tai talteenotto prosessin paremmuuteen. Teollisuudessa punnitaan usein mahdollisuuksia hyödyntää paikallista tai sovellettavaa teknologiaa. Tässä luvussa käydään vertailevaa pohdintaa hydrometallurgisen syanidiliuotuksen ja pyrometallurgisen sulatuksen välillä. Vertailuun johdetaan erottelumenetelmien käyttöä ja toiminnallisuutta ennen talteenottomenetelmiä. Vertailua suoritetaan tehokkuuden, kustannusten, kapasiteetin ja yleissoveltuvuuden näkökulmista. Lopulta pyritään muodostamaan näkemys paremmalle kullan talteenottomenetelmälle.

4.1 Vertailu

Tehokkuus on laaja mittari sisältäen tässä työssä ajankulutuksen ja talteenottomäärän tarkastelun. Kullan talteenotto pohjatuhkasta ei ole nopea prosessi. Kultrafraktion päästessä vertailtaviiin prosesseihin on kullan talteenottoaika noin 13 vrk (liuotus) ja noin 1 vrk (sulatus). Liuotuksesta saadaan hiekkamainen lopputuote ja sulatuksesta usein harkko. Sulatusprosessin läpimeno- tehokkuus on parempi kuin liuotuksen, kuitenkin muistaen, että prosessit ovat teollisuudessa usein jatkuvia. Talteenotto kykyä on helpompi tarkastella prosessien välillä. Jo alkuvaiheen erottelumenetelmiltä jää erottelematta osa pohjatuhkan kullasta. Kuitenkin jos tarkastellaan talteenottoprosesseihin saapuneen fraktion kokonaiskultamäärän säilymistä, saadaan syanidiliuotukselle 96 % ja sulatukselle yli 97 % talteenottokyky. Talteenottokyvyissä ei prosessien välillä ole suurta eroa, joten alkuvaiheen erottelumenetelmien erottelukyvyn merkitys kasvaa.

Kustannuksiltaan liuotusprosessi on halvempi ylläpitää kuin sulatus. Toisaalta sulatuksen ollessa tehokkaampaa täytyisi prosessien kustannuksia tarkkailla esimerkiksi tuottomäärien mukaan. Kustannuksista on vain vähän vertaisarvioitua tutkimustietoa, mikä johtuu tarkastelun perusteella prosessien erilaisuudesta, yksilöllisyydestä ja raaka-aineen laadusta. On myös huomioitavaa, että sulatus saattaa kullan ”pidemmälle” jalostus asteelle (harkoiksi). Sulatusprosessia ei kuitenkaan yleensä hyödynnetä maamalmille. On hyvin tavallista, että liuotusprosessi suoritetaan erottelumenetelmänä enne sulatusta. Jätteenpoltosta saadaan energiaan ja lämpöä, joita voidaan hyödyntää

käsittelyprosesseissa MSWI-laitosten yhteydessä. Tällainen toimintamalli voisi alentaa käsittelyn kustannuksia.

Liutuslaitoksilla staattinen kapasiteetti on suurempi kuin sulattamon, koska liutusaltaat ovat suuria ja talteenotto tapahtuu lähes passiivisella reaktiolla. Sulattamoissa aktiiviset reaktiot saadaan aikaan käyttämällä energiaa. Kapasiteetti vertailussa on järkevää tarkastella kapasiteettien riittävyksiä pohjatuhkan ”kultafraktion” tuottomäärän käsittelylle. Molemmat käsittelymenetelmät kykenevät käsittelemään suuria määriä raaka-ainetta. Kuitenkin syanidiliuotus on jatkuvuuden ja passiivisuuden kannalta kannattavampaa. Jos tarkastellaan menetelmien riippuvuuksia, ymmärretään syanidiliuotuksen riippuvan syanidin saannista. Syanidilla on myös huono maine myrkyllisyytensä takia, mikä asettaa laitokset korkeamman luvanvaraisiksi. Sulattamot ovat monissa sovelluksissa pienempiä kuin liutuslaitokset, joten voidaan ajatella, että sulattamon perustaminen uudelle alueelle on helpompaa.

Menetelmän soveltuvuus muiden metallien kuin kullan erotteluun voidaan havainnollistaa kolmella tasolla. Hyvä talteenottomenetelmä kykenee talteen ottamaan useita aineita yhtäaikaisesti. Keskitason menetelmä kykenee ottamaan talteen vain tiettyä ainetta kerrallaan, mutta soveltuu useammille aineille alasajon ja uudelleen asettamisen jälkeen. Huono menetelmä kykenee talteen ottamaan vain yhtä tiettyä ainetta. On tyypillistä, että tämän tulkinnan mukaisiin huonoihin menetelmiin kuuluu hyvin innovatiivisia ja edistyksellisiä menetelmiä. Nämä menetelmät on saatettu luoda tarkkaan tarpeeseen tutkimusten perusteella ja niissä halutaan korostaa kullan talteenottoa. Keskitason menetelmiin kuuluu tarkat, mutta välilliset menetelmät. Nämä menetelmät pohjautuvat tiiviisti tietyn aineen talteen ottamiseksi esimerkiksi liutinaineen, jännitteen tai magneettivuon avulla. Syanidiliuotus kuuluu keskitason menetelmiin, koska prosesseissa ja sovelluksissa sitä käytetään kerrallaan vain yhteen aineeseen. Hyvät menetelmät pohjautuvat sellaisiin ominaisuuksiin, jotka erottavat kohderyhmän osapuolet toisistaan. Metallien talteenotossa tällainen menetelmä on sulatus, joka kykenee jakamaan syötteen metallit sulamispisteen saavuttamisen jälkeen tiheyden mukaan. Sulatusta voidaankin pitää laajempi käyttöisenä menetelmänä kuin syanidiliuotusta. Mikään luokka ei pidä sisällään muiden kuin metallisten aineiden talteenoton tarkastelua.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Jätteenpoltto tuottaa tulevaisuudessa paljon pohjatuhkaa. Pohjatuhkan käsittelystä pyritään saamaan kustannustehokasta. Pohjatuhkassa on maailmanlaajuisesti korkea kultapotentiaali. Kulta on hyvin arvokasta, mutta ei silti kuulu Yhdysvaltojen tai Euroopan unionin kriittisiin raaka-aineisiin. On osoitettu, että kulta sijoittuu pääosin raekooltaan alle viiden millimetrin ei-ferriittiseen metallifraktioon. Urbaani kaivostoiminta luo pohjan kullan talteenotolle. Kulta kyetään valitsemaan erottelun kohteeksi. Erotteluvaihe on hyvin kriittinen kullan talteenottoprosentin kannalta. Väärin suoritettulla erottelulla voidaan pilata kullan saanti. Magneettinen erottelu on tärkeä vaihe magneettisten metallien poistamiseksi. Liian voimakkaiden *HIMS* magneettien käyttö voi johtaa merkittävän kultamäärän menettämiseen. Magneettinen erottelu on suoritettava ennen pyörrevirtaerotusta. Anturierottelusta ei ole merkittävää hyötyä kullan pohjatuhkaerottelussa, sillä erottelu toimii hyvin vain yli neljän millimetrin partikkeleihin. Tiheyteen perustavat erottelumenetelmät soveltuvat hyvin kullalle. Tiheyserotteluun on useita sovelluksia, jotka toimivat kaikkien käytössä olevien tuhkanpurkumenetelmien kanssa. Märkäerotteluun soveltuvat keskipakorikastutin ja magneettineste-erotin. Magneettineste-erottelu toimii kullalle hyvin, mutta vaatii ensin magneettisen erottelun. Ilmapöytäerottelu on hyvä erottelemaan kuivaa pohjatuhkaa. Puhtaan kullan saantiin tarvitaan erottelun lisäksi talteenottomenetelmä. Hydrometallurgian keinoin kultaa kyetään talteen ottamaan pätevästi. Sulatus on varma ja perinteinen keino talteenottaa kultaa.

Sulatusta ja syanidiliuotusta vertailtiin ja saatiin seuraavat tulokset: Sulatus on nopeampi ja energiaa vievämpi prosessi. Liuotuslaitokset vaativat sulattamoja enemmän tilaa johtuen useista absorptioaltaista. Sulattamon perustaminen on luvallisesti helpompaa, koska syanidin käyttö vaatii ympäristöluvan. Käsittelykapasiteettien vertailussa ei huomattu eroavaisuuksia. Menetelmien talteenotto prosentit ovat hyvät eivätkä eroa merkittävästi toisistaan. Sulatus jalostaa kullan harkoiksi asti. Liuotus tuottaa ”kultahiekkaa”, jonka jalostus harkoiksi vaatii sulatuksen ja valamisen. Energiatavallisin sulatusprosessi vaatii ensiluokkaista malmia. Syanidiliuotus ei ole niin riippuvainen malmin laadusta. Hyvän energiatavallisuuden saavuttamiseksi kulta voidaan erottaa syanidiliuotuksella ennen sulatusta. Syanidiliuotus soveltuu kerrallaan vain kullan talteenottoon. Edistynyt sulatuslaitos voi talteenottaa useampia metalleja samasta sulasta. Yleensä sulatus kuitenkin kohdistuu vain tietyn metallin talteenottoon. Näiden

tulosten pohjalta pyrometallurginen sulatus esittäytyy parempana kullan talteenottomenetelmänä jätteenpolttolaitosten pohjatuhkasta.

Työ osoitti monessa kohdassa aiheen laajuuden ja menetelmien moninaisuuden luovan haastetta rakentaa tarkkaa yleiskuvausta tutkitusta aiheesta. Kullan talteenottotehokkuus osoittautui riippuvaksi erottelutehokkuudesta. Erottelumenetelmien kehitys pohjatuhkan seulonnassa on realistinen teollisuuden ja urbaanin kaivostoiminnan kehityskohde. Erottelutehokkuuden ollessa avainasemassa kullan talteenotolle voisi erottelumenetelmäketojen optimointia lähteä tutkimaan jatkossa. Talteenottomenetelmistä löytyi vain vähän vertaisarvioitua tietoa. Työ olisi kaivannut tutkittua tietoa erilaisten sulattamoiden ja liuotuslaitosten toimivuudesta pohjatuhkasta erotetulle kultafraktiolle. Tietoa talteenottomenetelmien toimivuudesta joutui perustamaan verkkolähteisiin ja yleisiin tietoihin. Moni tutkimus osoitti pohjatuhkan sisältävän kultaa, mikään löydetyistä tutkimus ei osoittanut tuloksia kullan realistiseen talteenottoon. Tulevaisuudessa tutkimuksen voisi viedä pidemmälle talteenottoon ja tuottaa tuloksia, jotka osoittavat pohjatuhkan sisältämän kullan talteenoton sulatus- ja liuotuslaitoksissa.

Työn aihe oli hyvin laaja ja vaikka tarkoitus oli luoda yleiskatsaus tutkitusta aiheesta, olisi työn aiherajaus voinut olla tarkempi. Alkuperäisessä suunnitelmassa tutkimus olisi lähtenyt liikkeelle pohjatuhkasta leikaten työn laajuutta. Kuitenkin polttoprosessista lähtenyt malli antaa työn yleiskatsaus rakenteelle paremman pohjan. Aihetta käsitteleviä tutkimuksia ja lähteitä löytyi runsaasti pois lukien talteenottomenetelmien osuutta. Tämä hankaloitti vertailu luvun tekemistä, minkä seurauksena vertailu jäi suppeaksi. Alkuperäisen tiedon löytäminen oli paikoin haasteellista puuttuvien tai maksullisten julkaisujen takia. Työstä tuli selkeä, jatkuva ja rakenteellisesti hyvä. Työ osoitti myös tulevaisuuden tutkimuskohteita ja päätyi tulokseen, mikä nostaa työn arvoa tieteellisenä julkaisuna.

LÄHTEET

- Ada, E. et al. (2023). Barriers to Cement Industry Towards Circular Economy. International journal of mathematical, engineering and management sciences. Vol.8(4), s. 612–631. Saatavissa: <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.4.035>
- Amankwah, R. K. et al. (2010). The application of direct smelting of gold concentrates as an alternative to mercury amalgamation in small-scale gold mining operations in Ghana. International journal of environment and pollution. Vol.41(3–4), s. 304–315. Tiivistelmä. Ei saatavilla kokonaisuudessa: <http://dx.doi.org/10.1504/IJEP.2010.033238>
- ASTM C136/C136M-14 (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International. Saatavissa: [compass \(astm.org\)](compass.astm.org)
- Back, S. et al. (2020). Determination of metal-abundant high-density particles in municipal solid waste incineration bottom ash by a series of processes: Sieving, magnetic separation, air table sorting, and milling. Waste management (Elmsford). Vol.112 s. 11–19. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.002>
- Beikmohammadi, M. et al. (2023). Analysis of heavy metal, rare, precious, and metallic element content in bottom ash from municipal solid waste incineration in Tehran based on particle size. Scientific reports. Vol.13(1), s. 16044–16044. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43139-1>
- Bruno, M. et al. (2021). Material flow, economic and environmental assessment of municipal solid waste incineration bottom ash recycling potential in Europe. Journal of cleaner production. Vol.317, s. 128511. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128511>
- Bunge, R. (2018). Recovery of metals from waste incinerator bottom ash. Removal, Treatment and Utilisation of Waste Incineration Bottom Ash. TK Verlag, Neuruppin, s. 63-143. Saatavissa: [Studie-Bunge-Internetversion.pdf \(vbsa.ch\)](Studie-Bunge-Internetversion.pdf (vbsa.ch))
- Böni, L. (2013). Accumulation of recovered gold from bottom ash. How Waste Management Can Turn Into Resource Management. Thesis Kantonsschule Zürcher Unterland, s. 1–18. Saatavissa: [2013_Maturitaetsarbeit_L_Boeni.pdf \(zar-ch.ch\)](2013_Maturitaetsarbeit_L_Boeni.pdf (zar-ch.ch))
- Chaston, J. C. (1977). Industrial uses of gold. International materials reviews. Vol.22(1), s. 25–38. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1179/imtr.1977.22.1.25>
- Chen, B. et al. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. Journal of Building Engineering. Vol.71, s. 106386. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106386>
- Chmielewski, A. G. et al. (1997). Separation technologies for metals recovery from industrial wastes. Hydrometallurgy. Vol.45(3), s. 333–344. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(96\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(96)00090-4)

Conradie, P. J. et al. (1995). Elution and electrowinning of gold from gold-selective strong-base resins. *Hydrometallurgy*. Vol.37(3), s. 349–366. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00032-X](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00032-X)

Cossu, R. & Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste management*, Elmsford, Vol.45, s. 1–3. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>

Cui, J. & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of hazardous materials*. Vol.158(2), s. 228–256. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>

Deltaway Energy (2024). Waste incineration plant. Saatavissa (viitattu 25.4.2024): [HowitWorks.jpg \(880×574\)](HowitWorks.jpg) (deltawayenergy.com)

Dodbiba, G. et al. (2003). Separation Performance of PVC and PP Plastic Mixture Using Air Table. *Physical separation in science and engineering*. Vol.12(2), s. 71–86. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1080/1478647031000139385>

Fleming, C. A. et al. (2011). Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. *Minerals engineering*. Vol.24(6), s. 484–494. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.021>

Funari, V. et al. (2015). Solid residues from Italian municipal solid waste incinerators: A source for “critical” raw materials. *Waste management*, Elmsford, Vol.45 s. 206–216. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.wasman.2014.11.005>

Hagelüken, C. & Corti, C. W. (2010). Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through ‘Design for Recycling.’ *Gold Bulletin*, Vol.43(3), s. 209–220. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03214988>

Holm, O. et al. (2018). Recovery of copper from small grain size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation. *International journal of sustainable engineering*, Vol.11 (4), pp. 250–260. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1355415>

Jędrusiak, R. et al. (2023). From waste to value: recovering critical raw materials from urban mines in the European Union and United States. *Gospodarka surowcami mineralnymi*. Vol.39(3), s. 43–63. Saatavilla: <https://libproxy.tuni.fi/login?url=https%3A%2F%2Fwww.proquest.com%2Fscholarly-journals%2Fwaste-value-recovering-critical-raw-materials%2Fdocview%2F2871840003%2Fse-2%3Faccountid%3D14242>

Lee, J. et al. (2007). Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea. *Resources, conservation and recycling*. Vol.50(4), s. 380–397. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.010>

Li, H. et al. (2018). Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review. *Resources, conservation and recycling*. Vol.139, s. 122–139. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

- Li, X. guang et al. (2023). Review on the gentle hydrometallurgical treatment of WPCBs: Sustainable and selective gradient process for multiple valuable metals recovery. *Journal of environmental management*. Vol.348, s. 119288–119288. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.jenvman.2023.119288>
- Morf, L. S. et al. (2013). Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant. *Waste management, Elmsford*, Vol.33 (3), s. 634–644. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.010>
- Muchova, L. et al. (2009). Precious Metals in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. *Water, air & soil pollution: Focus*. Vol.9(1–2), s. 107–116. Saatavissa: [Precious Metals in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash | Water, Air, & Soil Pollution: Focus \(springer.com\)](https://doi.org/10.1007/s11265-009-9311-1)
- Ozturk, M. & Dincer, I. (2020). An efficient waste management system with municipal solid waste incineration plant. *Greenhouse gases: science and technology*. Vol.10(4), s. 855–864. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1002/ghg.1955>
- Park, Y. J. & Fray, D. J. (2009). Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of hazardous materials*. Vol.164(2), s. 1152–1158. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.043>
- Preismonitor (2024). Preismonitor, Januar 2024 Saatavissa (viitattu 20.4.2024): 2024-01-preismonitor.pdf;jsessionid=70F1F464AECCF656B2F58549F81F7BD2.internet971 (deutsche-rohstoffagentur.de)
- Pretz, T. & Julius, J. (2012). Sensor Based Sorting in Waste Processing. *Separating Pro-Environment Technologies for Waste Treatment, Soil and Sediments Remediation*. Vol. 1, s. 59–76. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1108010&ppg=1>
- Rajahalme, J. 2017. Kullaan talteenotto sähkö- ja elektroniikkaromusta. s. 37, Saatavissa: [URN:NBN:fi:jyu-201706192937.pdf](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:fi:jyu-201706192937.pdf)
- Sadegh Safarzadeh, M. et al. (2007). A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources. *Minerals engineering*. Vol.20(3), s. 211–220. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.07.001>
- Smith, Y. R. et al. (2019) Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. *Minerals engineering*. Vol.133(C), s. 149–159. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.025>
- Šyc, M. et al. (2020) Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. *Journal of hazardous materials*. Vol.393, s. 122433–122433. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.jhazmat.2020.122433>
- Syed, S. (2012). Recovery of gold from secondary sources—A review. *Hydrometallurgy*. Vol.115–116, s. 30–51. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
- U.S. Geological Survey. (2024). Mineral commodity summaries 2024: U.S. Geological Survey. s. 212. Saatavissa: <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.
- Wilson, B. Williams, N. Liss B and Wilson, B. (2013). A Comparative Assessment of Commercial Technologies for Conversion of Solid Waste to Energy. *EnviroPower Renewable*. Boca Raton. s. 1–38. Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/280080635_A_Comparative_Assessment_of_Commercial_Technologies_for_Conversion_of_Solid_Waste_to_Energy

World Bank. (2022). Solid Waste Management. Päivitetty 11.2.2022. Saatavissa (viitattu 15.4.2024): [Solid Waste Management \(worldbank.org\)](https://www.worldbank.org)

Wäger, P. (2011). Scarce metals – applications, supply risks and need for action. *Notizie di Politeia*. Vol. 27(104), s. 57–66. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/231513584_Scarce_metals_-_Applications_supply_risks_and_need_for_action

Yazıcı, E.Y., Deveci, H. (2009). Recovery of metals from E-wastes. *The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey*. Vol.48(3), s. 3–18. Saatavissa: [375432 \(dergipark.org.tr\)](https://dergipark.org.tr)

YaClass. 2024. Smelting Process. Kuva 1. Saatavissa (viitattu 25.4.2024): [Smelting Process — lesson. Science State Board, Class 10. \(yaclass.in\)](https://www.yaclass.in)

MKS PAMP. (2024). Refining. Saatavissa (viitattu 3.5.2024): <https://www.mkspamp.com/refining/excellence>