

Antti Hamunen

TERÄKSEN, ALUMIININ JA KUPARIN HIILINEUTRAALI TUOTANTO

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jukka Konttinen
5/2022

TIIVISTELMÄ

Antti Hamunen: Teräksen, alumiinin ja kuparin hiilineutraali tuotanto
Carbon neutral steel, aluminum and copper production
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Toukokuu 2022

Teollisuus on yksi paljon hiilidioksidipäästöjä tuottavista sektoreista rakentamisen, liikenteen ja energiantuotannon ohella. Hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään kansainvälisillä sopimuksilla ilmastonmuutoksen haitallisten vaikutusten hidastamiseksi ja ehkäisemiseksi. Tässä tutkimuksessa käsitellään teräksen, alumiinin ja kuparin tuotannosta aiheutuvia päästöjä ja toimenpiteitä, joilla päästöjä voidaan vähentää. Tavoitteena on selvittää kirjallisuuden avulla, miten paljon kyseiset teollisuuden alat tuottavat hiilidioksidipäästöjä maailmanlaajuisesti, mitkä ovat yleisimmät tuotantomenetelmät, ja miten päästöt syntyvät niissä. Lisäksi selvitetään, millä toimenpiteillä päästöjä voidaan vähentää, ja miten toimenpiteitä tulisi kohdistaa tuotantoon. Työssä esitetään myös tutkimustulosten perusteella tehty laskennallinen skenaario päästövähennyksistä vuodelle 2050.

Tutkimuksen perusteella teräs-, alumiini- ja kupariteollisuus aiheuttaa noin kymmenesosan energiantuotannon ja teollisuuden hiilidioksidipäästöistä. Terästä tuotetaan yleisimmin masuuni-konvertterimenetelmällä, alumiinia bayer-prosessin ja Hall–Heroult-prosessin yhdistelmällä ja kuparia pyrometallurgisen prosessin ja elektrolyysin yhdistelmällä. Prosessit vaativat paljon energiaa, jonka tuottaminen fossiililla polttoaineilla aiheuttaa paljon päästöjä. Lisäksi päästöjä syntyy hiilen käytöstä pelkistimenä masuuneissa sekä elektrolyysissä käytettävistä grafiittielektrodeista. Mittaviin päästöihin vaikuttavat myös suuret tuotantomäärät. Tuotantomäärien odotetaan kasvavan merkittävästi vuoteen 2050, mikä lisää mahdollisesti kyseisten teollisuusalojen päästöjä. Tutkimuksessa selvisi myös, että tunnetut kuparivarannot ovat vähenemässä, mikä voi aiheuttaa kuparin saatavuusongelmia seuraavina vuosikymmeninä.

Kirjallisuudesta löydettiin viisi toimenpidettä, joilla tuotannon päästöjä voidaan vähentää: tuotantomenetelmän vaihtaminen vähäpäästöisempään, fossiilisen energian korvaaminen fossiilivapaalla energialla, kierrätyksen lisääminen, hiilidioksidin talteenotto ja energiatehokkuuden kasvattaminen. Tutkimustulosten pohjalta tehty tarkastelu osoittaa, että parhaaseen lopputulokseen päästään, kun toimenpiteitä yhdistetään mahdollisuuksien mukaan. Vanhoissa tuotantolaitoksissa voidaan ottaa käyttöön hiilidioksidin talteenottomenetelmiä ja fossiilivapaata energiaa sekä parantaa prosessien energiatehokkuutta. Uusissa tuotantolaitoksissa voidaan käyttää vaihtoehtoisia tuotantomenetelmiä muiden toimenpiteiden lisäksi. Kierrätysprosessit tuottavat vähemmän päästöjä kuin neitseellisten metallien valmistusprosessit. Kierrätys myös vähentää tarvetta louhia kaivannaismateriaalia, mikä vähentää kaivosteollisuuden päästöjä. Laskennallisen tarkastelun mukaan tuotannon päästöjä voidaan vähentää yhteensä 79 % vuoteen 2050, jos toimenpiteitä otetaan käyttöön skenaarion mukaan.

Avainsanat: teräs, rauta, alumiini, kupari, teollisuus, päästöt, hiilineutraalius, tuotanto, CCS, kierrätys, energiatehokkuus, fossiilivapaa energia.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PROSESSITEOLLISUUDEN GLOBAALI PÄÄSTÖRAKENNE.....	2
2.1 Teräksen, alumiinin ja kuparin globaalit tuotantomäärät ja kysyntä	2
2.2 Päästö rakenne ja päästöjen vähennyspotentiaali.....	4
3. TERÄKSEN, ALUMIININ JA KUPARIN TUOTANTO.....	7
3.1 Teräksen tuotanto	7
3.1.1 Masuuni	8
3.1.2 Teräksen valmistus raakaraudasta	9
3.1.3 Kierrätysteräksen tuotanto	10
3.2 Alumiinin tuotanto	11
3.2.1 Bayer-prosessi.....	12
3.2.2 Hall–Heroult-prosessi.....	13
3.2.3 Alumiinin valmistus kierrätysmateriaalista	15
3.3 Kuparin tuotanto.....	15
3.3.1 Malmin sulatus.....	16
3.3.2 Konvertointi.....	18
3.3.3 Sähkökemialliset menetelmät.....	18
3.3.4 Kuparin kierrätys	19
4. TOIMET HIILINEUTRAALIUDEN SAAVUTTAMISEKSI	21
4.1 Vaihtoehtoiset tuotantomenetelmät	21
4.1.1 Vaihtoehtoiset menetelmät masuunille	21
4.1.2 Vaihtoehtoiset menetelmät alumiiniteollisuudessa	23
4.1.3 Hydrometallurginen kuparin tuotanto.....	23
4.2 Fossiilivapaan energian käyttö prosesseissa	24
4.2.1 Hiilineutraali energia alumiiniteollisuudessa	24
4.2.2 Biopolttoaineiden ja fossiilivapaan sähkön käyttö tuotannossa....	25
4.2.3 Kivihiilen korvaaminen biomassalla masuunissa	25
4.3 Hiilidioksidin talteenotto.....	26
4.4 Kierrätyksen lisääminen	27
4.5 Energiatohokkuuden kasvattaminen	29
4.5.1 Energiatohokkaat masuunit.....	30
4.5.2 Energiatohokkuus kupariteollisuudessa	30
4.5.3 Energiatohokas alumiinin tuotanto	31
5. TOIMENPITEIDEN ARVIOINTIA	33
5.1 Toimenpiteet tuotantolaitosten näkökulmasta.....	33
5.1.1 Uudet laitokset	33
5.1.2 Vanhat laitokset	34
5.2 Bioenergian riittävyys ja sähköistyminen	35
5.3 Kierrätyspotentiaali	36
5.4 Vuoden 2050 skenaariotarkastelu	36
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	41
LÄHTEET	43

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AOD-konvertteri	engl. Argon oxygen decarbonizator, happea ja argonia käyttävä konvertteri
BAT	Best available technology, paras käyttökelpoinen tekniikka
CCS	engl. Carbon capture and storage, hiilidioksidin talteenotto
GrInHy	engl. Green Industrial Hydrogen via reversible high-temperature electrolysis, teollisuuden prosessihöyrystä vetyä tuottava elektrolyysitekniikka.
HTE	engl. High temperature electrolysis, korkeissa lämpötiloissa tapahtuva elektrolyysi
IEA	engl. International Energy Agency, kansainvälinen energiajärjestö
LTE	engl. Low temperature electrolysis, alhaisissa lämpötiloissa tapahtuva elektrolyysi
OBF	engl. Oxygen blast furnace, happipuhallusmasuuni
PEM	engl. Proton exchange membrane, Protoninvaihtokalvoa käyttävä elektrolyysitekniikka
PFC-yhdisteet	engl. Perfluorinated compounds, fluoria ja hiiltä sisältävät orgaaniset yhdisteet
TSL	engl. Touyere submerged lance, upposuutinuuni
UNEP	engl. United nations environmental programme, yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma

1. JOHDANTO

Globaalit hiilidioksidipäästöt ja ilmastonmuutoksen vaikutukset herättävät laajamittaista huolta. Vuonna 2019 ihmisten toiminnasta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt olivat arviolta noin 55,3 biljoonaa tonnia. Mikäli ilmaston lämpeneminen halutaan pitää 1,5–2 °C rajoissa, on päästöjä leikattava vuoteen 2030 mennessä. (Elzen et al. 2019, s. 3–20)

Prosessiteollisuus on yksi isoista, paljon päästöjä tuottavista sektoreista. Muun muassa Kansainvälinen energiajärjestö IEA seuraa päästöintensiivisten teollisuusalojen hiilidioksidipäästöjä ja hiilineutraaliustilannetta. Isoimpia teollisuuden päästöjä aiheuttavia aloja on metallien valmistaminen. Niiden tuotantoprosessit ovat energiantensiivisiä ja tuotantomäärät suuria. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan raudasta valmistettavan teräksen, alumiinin ja kuparin tuotantoa ja etsitään toimenpiteitä, joilla tuotannosta aiheutuvia päästöjä voidaan leikata. Tarkastelun kohteena ovat tuotantomenetelmien päästöt. Esimerkiksi kaivostoiminnasta tai kuljetuksesta aiheutuvat päästöt jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Tutkimuskysymykset ovat:

- Miten paljon hiilidioksidipäästöjä teräksen, alumiinin ja kuparin tuotanto aiheuttaa verrattuna muihin päästöintensiivisiin teollisuuden aloihin?
- Mitkä ovat yleisimmät tuotantomenetelmät ja miten päästöt syntyvät niissä?
- Miten tuotannon päästöjä voidaan leikata?
- Miten toimenpiteitä kannattaa kohdistaa tuotantoon?
- Mitä haasteita toimenpiteiden käyttöönotossa on?

Tuotannon globaaleja päästöjä ja tuotantomääriä tarkastellaan luvussa 2. Luku 3 esittelee yleisimmät käytössä olevat tuotantomenetelmät. Eri toimenpiteitä on esitetty luvussa 4 ja niitä vertaillaan sekä arvioidaan luvussa 5. Lisäksi luvun 5 lopussa on myös esimerkinomainen skenaariotarkastelu kunkin metallin tuotannosta aiheutuvien päästöjen kehittymisestä vuoteen 2050, jos tutkimuksessa esiteltyjä toimenpiteitä otetaan käyttöön.

2. PROSESSITEOLLISUUDEN GLOBAALI PÄÄSTÖRAKENNE

Kuparin, alumiinin ja teräksen hiilineutraalin tuotannon vaikutusten arvioinnin kannalta on oleellista tarkastella kyseisten metallien tuotantomääriä ja tuotannosta aiheutuvia päästöjä globaalilla tasolla. Kun päästöjä verrataan muiden prosessiteollisuuden alojen päästöihin sekä päästöintensiivisiin sektoreihin, voidaan arvioida, miten paljon globaaleja hiilidioksidipäästöjä voidaan leikata hiilineutraaleilla metallien valmistusmenetelmillä.

2.1 Teräksen, alumiinin ja kuparin globaalit tuotantomäärät ja kysyntä

Alumiinia (Al), kuparia (Cu) ja terästä (Fe) käytetään lukuisissa sovelluksissa teollisuuden, rakentamisen ja teknologian aloilla. Yhdessä mangaanin (Mn), sinkin (Zn), nikkelin (Ni) ja lyijyn (Pb) kanssa nämä metallit muodostavat yhteensä hieman yli 98 % kaikesta maailmassa teollisesti tuotettujen metallien massasta. Koska metalleja käytetään niin lukuisissa sovelluksissa, niiden kysyntä on ollut kasvussa teollisen vallankumouksen jälkeen. (Ciacci et al. 2018, s. 2) Metallien tuotantomäärät ja odotettu kysyntä on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. *Teräksen, alumiinin ja kuparin tuotantomäärät miljoonissa tonneissa ja odotettu kysynnän kasvu (Lumley 2011¹⁾; Nilsson et al. 2017²⁾; Bibe et al. 2018³⁾; Ciacci et al. 2018⁴⁾; Enkvist & Klevnäs 2018⁵⁾).*

Metalli	Tuotanto 2018 (Mt)	Odotettu kysyntä 2050 (Mt)	Kasvu (%)
Teräs ^{3), 5)}	1812	4200	231,8
Alumiini ^{1), 2), 3)}	62,7	219,45	350
Kupari ^{3), 2)}	20,6	30	146

Raudasta valmistettava teräs on maailman eniten käytetty metalli. Kansainvälinen teräsjärjestö World Steel Association on arvioinut vuoden 2021 globaaliksi tuotannoksi noin 1 950 miljoonaa tonnia, johon on laskettu mukaan kierrätetty teräs (WorldSteel 2021). Tuotanto on kasvanut 7 % taulukossa 1 esitettyyn vuoden 2018 arvoon nähden (Bibe et al. 2018, s. 35). Kierrätetyn teräksen osuus tuotannosta on noin 30–40 % (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 54–56; Metallinjalostajat ry 2014, s. 106–107). Suurinta kysyntä on kehittyvissä talouksissa, joissa teollinen tuotanto ja infrastruktuurin rakentaminen on voimakkaassa kasvussa. Kehittyneissä talouksissa, kuten Euroopassa ja Yhdysvalloissa,

kasvu ei ole yhtä suurta ja kysyntään vaikuttavat enimmäkseen vanhojen rakenteiden sekä koneiden ja laitteiden korvaaminen uusilla. (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 54–56) Kysynnän arvellaan kasvavan eri skenaarioiden mukaan 3250–5150 miljoonaa tonniin vuoteen 2050 mennessä (Ciacci et al. 2018, s. 3).

Alumiini on teollisessa käytössä uusin kolmesta tarkasteltavasta metallista (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 96–102). Taulukossa 1 esitetystä tuotantomäärästä 62,7 miljoonaa tonnia on uutta primääristä alumiinia (Bibe et al. 2018, s. 2). Sen lisäksi maailmassa tuotetaan noin 18 miljoonaa tonnia kierrätettyä alumiinia (Lumley 2011, luku 4). EU-alueella kysynnän arvellaan kasvavan 80 % nykyisestä 250 kilosta 450 kiloon henkilöä kohden (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 96–102). Kansainvälisen alumiini-instituutin (IAI, International Aluminium Institute) mukaan maailmassa on tuotettu yhteensä noin 1,5 biljoonaa tonnia alumiinia, josta 75 % on yhä kierrossa (IAI 2022).

Kupari on kolmanneksi käytetyin metalli raudan ja alumiinin jälkeen (Nilsson et al. 2017, s. 2). Tuotanto on kasvanut 10 % vuosien 2014–2018 välillä (Bibe et al. 2020, s. 27). Kierrätetyn materiaalin osuus tuotetusta kuparista on noin 35 %. Kuparin tuotannossa huolestuttavaa on, että kysynnän kasvaessa jäljellä olevat kuparivarannot uhkaavat loppua 2000-luvun aikana. Taulukossa 1 esitetyn kuparin odotetun kysynnän arvellaan olevan noin 8 % suurempi kuin kuparin tuotantomäärät vuonna 2030. (Nilsson et al. 2017, s. 2) Tätä on kumminkin vaikeaa arvioida, sillä kysyntään vaikuttaa taloudelliset suhdanteet sekä uudet kuparivarannot. Kuparimalmin kuparipitoisuuden vähentyessä tarvitaan enemmän energiaa ja kaivannaismateriaalia, jotta saadaan tuotettua sama määrä puhdasta kuparia. Mikäli uusia kupariesiintymiä ei löydetä, arvellaan kuparin tuotantohuipun osuvan vuosille 2030–2040, minkä jälkeen kuparin tuotantomäärät siirtyvät laskuun. (Northey et al. 2014, s. 1–10)

Tarkkoja ennusteita metallien tulevaisuuden kysynnälle on vaikeaa antaa, sillä siihen vaikuttavat muun muassa talouden kehitys, prosessi-innovaatiot, markkinoille tulevat uudet koneet ja laitteet sekä kierrätysasteen muuttuminen. Metallit myös pysyvät käytössä pitkään, sillä ne varastoituvat esimerkiksi rakennuskantaan ja infrastruktuuriin. Taulukon 1 perusteella alumiinin kysynnän odotetaan kasvavan eniten. Sen vuotuiset tuotantomäärät ovat myös kasvaneet eniten viime vuosikymmenellä, jolloin tuotanto kasvoi 15–20 %, Teräksen ja kuparin tuotanto kasvoi puolestaan samana aikana 7–10 %. (Bibe et al. 2020) Tämän perusteella voidaan arvioida, että kysynät luultavasti kasvavat seuraavilla vuosikymmenillä.

2.2 Päästörakenne ja päästöjen vähennyspotentiaali

Metallien suurien tuotantomäärien perusteella voitaisiin arvioida valmistuksesta aiheutuvien päästöjen olevan merkittävän kokoiset. Laskemalla tuotannon globaalit hiilidioksidipäästöt ja vertaamalla niitä muihin prosessiteollisuuden alojen päästöihin, saadaan jonkinlainen käsitys teräksen, alumiinin ja kuparin ilmastovaikutuksista. Tämän perusteella voidaan myös arvioida, onko hiilineutraaliuteen pyrkiminen järkevää metallien valmistuksessa, vai kannattaako huomio kohdistaa muihin päästöjä tuottaviin sektoreihin.

Kansainvälinen energijärjestö (IEA, International Energy Agency) seuraa paljon hiilidioksidia tuottavien sektoreiden päästöjä osana maailman energiasektorin tiekarttahankeita. Yhtenä sektorina on prosessiteollisuuden alat, joihin on luettu mukaan rauta ja teräs-, alumiini-, sementti-, paperi- ja sellu- sekä kemianteollisuus. Muita merkittäviä päästölähteitä ovat rakentaminen, liikenne ja energiantuotanto. Kaikkien näiden alojen osalta luokitus on vuoden 2021 seurantaraportissa huonoin mahdollinen. (IEA 2022)

Hiilidioksidipäästöjä laskettaessa on otettava huomioon sekä uuden metallin että vanhasta metallista tehdyn uusiomateriaalin valmistuksesta aiheutuneet päästöt. Tiedot hiilidioksidipäästöistä on koottu taulukkoon 2. Päästöjen arvot vaihtelevat hieman eri lähteissä, joten taulukon arvot on laskettu käyttäen keskiarvoja.

Taulukko 2. *Yhden tonnin tuottamisesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ja kierrätyksen osuus (Lumley 2011¹⁾; Metallinjalostajat ry 2014²⁾; Enkvist & Klevnäs 2018³⁾; Nilsson et al. 2017⁴⁾).*

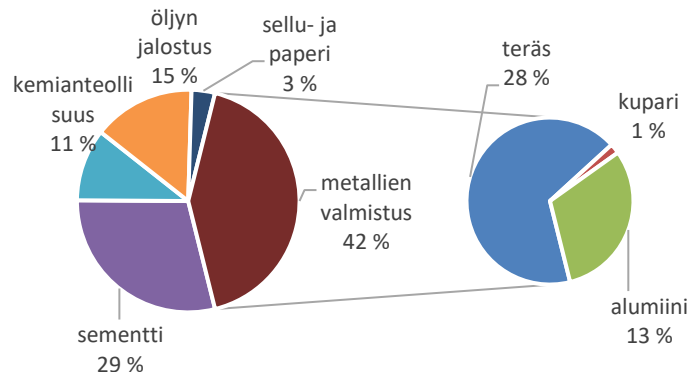
Metalli	Päästöt, uusi metalli (kg CO ₂ ekv. / t)	Päästöt, kierrätysmetalli (kg CO ₂ ekv. / t)	Kierrätyksen osuus (%)
Teräs ^{2), 3)}	1 825	315	36,67
Alumiini ^{1), 3)}	18 000	300	28,7
Kupari ⁴⁾	5 050	1 050	40

Vuotuiset kokonaispäästöt voidaan laskea kertomalla yhden tonnin tuottamisesta aiheutuvat päästöt taulukossa 1 esitetyillä vuotuisilla tuotantomäärillä. Teräkselle käytetään luvussa 2.1 esitettyä tuoreinta arvoa vuodelta 2021. Laskuissa otetaan huomioon, että osa tuotetusta materiaalista on kierrätettyä. Taulukkoon 3 on laskettu metallien valmistamisesta aiheutuvat sekä muiden IEA:n seurannassa olevien prosessiteollisuuden alojen vuotuiset päästöt.

Taulukko 3. *Prosessiteollisuuden alojen vuotuiset hiilidioksidipäästöt miljoonissa tonneissa (Dietz et al. 2019¹⁾; Guan et al. 2021²⁾; Tiseo 2021³⁾; Vass et al. 2021a⁴⁾; Vass et al. 2021b⁵⁾).*

Teollisuusala	Päästöt (Mt CO ₂ ekv. / a)
Teräs	2 479,8
kupari	71,1
alumiini	1 134,0
Sementti ⁴⁾	2 537,0
Kemia ⁵⁾	920,0
öljyn jalostaminen ²⁾	1 300,0
sellu- ja paperi ^{1), 3)}	297,9
Yhteensä	8739,8

Taulukon 3 perusteella teräksen ja sementin valmistus tuottaa eniten päästöjä, jonka jälkeen tulevat alumiinin tuotanto ja öljyn jalostaminen. Kuparin tuotannosta aiheutuvat päästöt ovat suhteellisen pienet, mikä johtuu sen suhteellisen pienistä tuotantomääristä. Alumiinin päästöihin vaikuttaa hiili-intensiivinen valmistusprosessi. Alumiinitonnin tuottaminen aiheuttaa noin 10 kertaa enemmän päästöjä kuin terästonnin tuottaminen. Kuvassa 1 esitetään taulukon 3 prosessiteollisuuden päästörakenne prosenttiosuuksina.



Kuva 1. *Prosessiteollisuuden päästörakenne
Koottu taulukon 3 tiedoista.*

Kuvan 1 mukaan metallien valmistus vastaa 42 % IEA:n seuraamien prosessiteollisuuden alojen päästöistä ja on suurin päästön lähde tarkasteltavilla aloilla. Toinen suuri päästönlähde on sementin valmistaminen. Taulukon 3 ja kuvan 1 perusteella voitaisiin sanoa, että teräksen, alumiinin ja kuparin hiilineutraaliin tuotantoon kannattaa panostaa, mikäli halutaan leikata prosessiteollisuuden päästöjä. Laskujen tulokset eivät vastaa täydellisesti todellista tilannetta, koska tietoja on kerätty eri lähteistä ja eri vuosilta. Lähteissä on voitu käyttää eri laskentamenetelmiä. Sen lisäksi globaaleja arvoja päästöille

on hankalaa määrittää erittäin tarkasti, sillä tuotantolaitosten energiatehokkuudet ja kiertetyn materiaalin käyttöaste vaihtelee tuotantolaitosten ja maiden välillä. Myös päästöjen laskentamenetelmät ja päästöjen seurannan tehokkuus saattavat poiketa eri maiden välillä. Tutkimuksen kannalta tarkkuutta voidaan pitää hyväksyttävänä, sillä pyrkimys on arvioida ja vertailla metallien tuotannon ilmastovaikutuksia.

Yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma (UNEP) arvioi vuoden 2019 päästöraportissaan energian tuotannon ja teollisuuden yhteisiksi globaaleiksi vuotuisiksi päästöiksi 37,5 biljoonaa tonnia ja kaikiksi ihmisten toiminnasta aiheutuviksi päästöiksi 55,3 biljoonaa tonnia (Elzen et al. 2019, s. 3–20). Tämä tarkoittaa, että taulukossa 3 esitettyjen tuotosten perusteella pelkästään teräksen valmistaminen vastaa noin 6,6 % teollisuuden ja energiantuotannon päästöistä ja tutkittavien metallien valmistus yhteensä noin 9,9 %. Vuonna 2030 hiilidioksidipäästöjen arvellaan olevan nykyisellä päästöjen kasvutahdilla noin 58–64 Gt. Mikäli ilmaston lämpeneminen halutaan pitää alle kahdessa celsiusasteessa, on päästöjen oltava noin 15 Gt pienemmät vuonna 2030 kuin nykyisellä trendillä laskettuna. Alle 1,5 °C:n tavoitteeseen puolestaan päästään, jos päästöt ovat 35 Gt pienemmät. (Rogelj & Elzen 2019, s. 21–25)

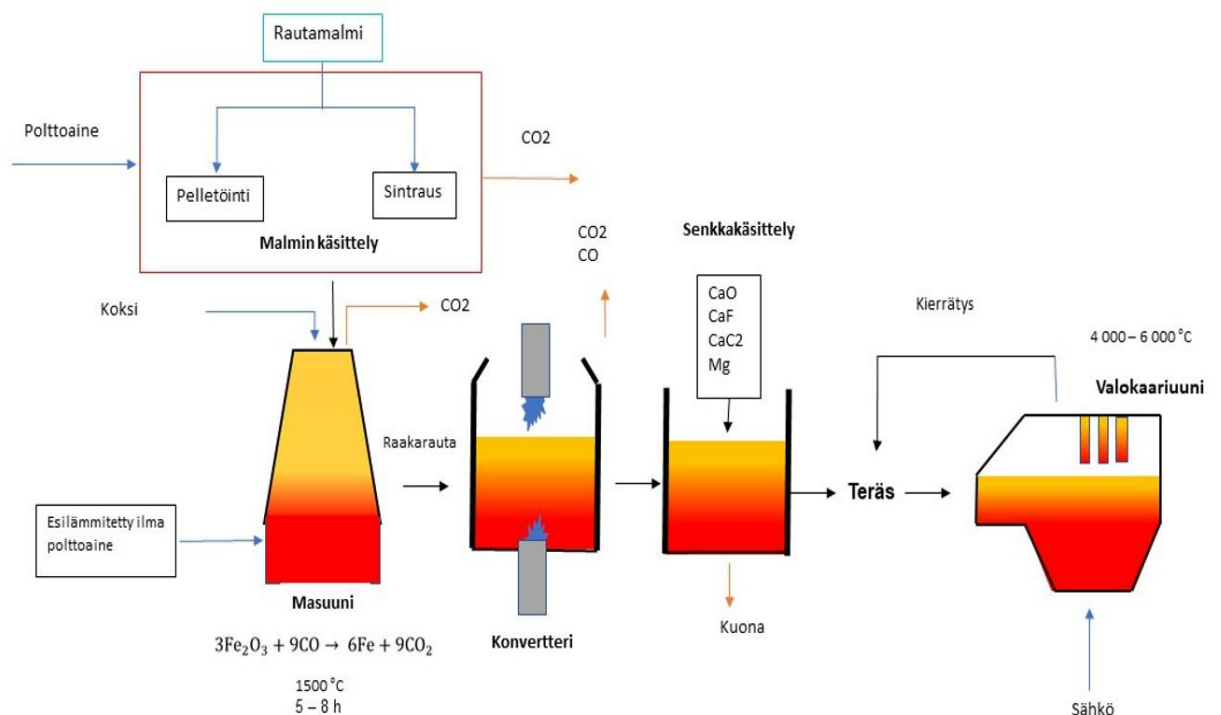
Teräksen, alumiinin ja kuparin tuotanto aiheuttaa taulukon 3 mukaan yhteensä noin 3,7 Gt päästöjä vuodessa ja prosessiteollisuus yhteensä 8,75 Gt. Nykyisillä tuotantomäärillä metallien valmistus vastaa 24,7 % kahden asteen tavoitteesta ja 10,6 % yhden ja puolen asteen tavoitteesta, josta kaikki tarkastellut prosessiteollisuuden alat vastaavat 25 %. Lisäksi on huomioitava, että metallien tuotantomäärien odotetaan kasvavan reilusti vuoteen 2050 taulukon 1 mukaan. Päästömäärät siis todennäköisesti suurenevat, jos tuotantomuodot pysyvät samanlaisina. Tämän perusteella voidaan sanoa, että hiilineutraali metallien valmistaminen auttaisi merkittävästi ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Muutoksen on tapahduttava nopeasti, sillä aikaa tavoitteiden saavuttamiseksi on kahdeksan vuotta.

3. TERÄKSEN, ALUMIININ JA KUPARIN TUOTANTO

Ennen kuin menetelmiä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi metalliteollisuudessa voidaan pohtia, on tutkittava metallien valmistusmenetelmiä. Luvussa esiteetään teräksen, alumiinin ja kuparin käytetyimmät valmistusmenetelmät. Lisäksi luvussa huomioidaan, miten suoria ja epäsuoria hiilidioksidipäästöjä syntyy valmistusprosesseissa.

3.1 Teräksen tuotanto

Teräksen pääasiallinen komponentti on rautamalmista saatava raakarauta, joka muodostaa 99,7 % teräksen painosta (Babich & Senk 2015, s. 505). Teräslaatuja on useita erilaisia. Laadut jaotellaan yleensä käyttökohteen tai teräksen ominaisuuksien perusteella. Erilaisia ominaisuuksia saadaan valmistusvaiheessa esimerkiksi lämpötilan säätelyllä, pintakäsittelyillä ja seosaineilla. Valmistusprosessi sisältää raakaraudan rikastamisen rautamalmista ja teräksen valmistamisen sulasta raakaraudasta ja kierrätetystä teräksestä. (Metallinjalostajat ry 2014, s. 8–26) Prosessikaavio teräksen yleisimmästä valmistusmenetelmästä esitetään kuvassa 2.



Kuva 2. Teräksen tuotantoprosessit. Muokattu lähteestä (Metallinjalostajat ry 2014, s. 14).

Raakarautaa saadaan pelkistämällä rautamalmin. Rautamalmit ovat rautayhdisteitä, joiden rautapitoisuus on vähintään 30 %. Eniten käytetyimmät rautamalmineraalit ovat magnetiitti (Fe_3O_4) ja hematiitti (Fe_2O_3). (Metallinjalostajat ry 2014, s. 12) Käytössä olevia raakaraudan ja teräksen valmistusmenetelmiä on useita, mutta niistä yleisin masuuni-konvertterimenetelmä, jolla tuotetaan noin 65 % teräksestä. Kierrätysmateriaalista valmistetaan noin 25 % teräksestä ja noin 6,5 % suorapelkistysmenetelmällä, jota käsitellään luvussa 4. (Babich & Senk 2015, s. 505)

3.1.1 Masuuni

Masuunimenetelmä on ylivoimaisesti käytetyin raakaraudan valmistusmenetelmä. Masuuniprosessin raaka-aineet ovat kivihiilipohjainen koksi, rautapanos, joka voi olla sintteriä tai pelletoitua malmin, sekä polttoöljy. Prosessissa voidaan käyttää myös seosaineita ja hiilipölyä. (Metallinjalostaja ry 2014, s. 20–21) Masuunit ovat muurattuja suippoja kuilu-uuneja, joiden tilavuus vaihtelee 3 000–5 000 m³:n välillä. Raaka-aineet syötetään sisään uunin yläosassa, josta ne valuvat kohti uunin pohjaa painovoiman vaikutuksesta noin 5–8 tunnissa samalla, kun rautaa pelkistyy. Lämpötila masuunissa on uunin yläosan noin 100 °C:sta hormien suulla olevaan 1 700 °C:n. Rautareiästä poistuvan raudan lämpötila on noin 1500 °C. Masuunin alaosaan syötetään hormeista 1000–1300 °C:n lämpötilassa olevaa esilämmitettyä ilmaa. Ilman mukana voidaan syöttää myös öljyä, hiilipölyä ja muita lisäpelkistimiä. Ilmassa oleva happi reagoi kaksin kanssa puhaltimen edessä aktiivisen kaksin vyöhykkeellä muodostaen hiilimonoksidia (CO), joka on pääasiallinen pelkistin. Ilmassa olevasta kosteudesta ja muista lisäaineista syntyy myös vetykaasua (H_2). Hiilimonoksidi ja vetykaasu virtaavat uunissa ylöspäin pelkistäen raudan oksideja ja poistuvat masuunista yläosasta kaasujen keräysjärjestelmää pitkin. (Metallinjalostajat ry 2014, s. 21; Babich & Senk 2015, s. 512)

Masuunissa tapahtuvat raudan oksidien sekä hiilimonoksidin väliset hapetus-pelkistysreaktiot ovat:



Yllä esitetyt reaktiot (1)–(3) kuvaavat niin sanottua raudan epäsuoraa pelkistymistä hiilen kanssa, sillä pelkistäjänä toimii hiilimonoksidi. Reaktiot vetykaasun kanssa tapahtuvat

samalla tavalla, paitsi pelkistäjänä on hiilimonoksidin sijaa vety. (Babich & Senk 2015, s. 518, 520)

Masuunin ylemmissä osissa syntynyt rauta on vielä kiinteässä olomuodossa. Kiinteä rauta sitoo itseensä hiiltä valuessaan masuunissa alaspäin. Hiili alentaa raudan sulamispistettä, jolloin rauta alkaa sulaa aktiivisen koksi vyöhykkeellä. Sulanut rauta sitoo enemmän hiiltä itseensä. Raakaraudan hiilipitoisuus on noin 3–4 %. (Babich & Senk 2015, s. 525–526)

Masuuniprosesseissa vapautuu merkittäviä määriä hiilidioksidia, mikä johtuu hiilen käytöstä pelkistimenä. Hiilidioksidipäästöjä syntyy myös masuunikaasujen poltosta syöttöilman esilämmityksessä sekä malmin esikäsittelyprosesseissa, kuten sintrauksessa, jossa malmin poltetaan koksen kanssa malmin huokoisuusominaisuuksien parantamiseksi. Yhden sintteritonin valmistamisesta syntyy noin 200 kiloa hiilidioksidipäästöjä. (Lu & Ishiyama 2015, s. 395; Lu et al. 2015, s. 551–558). Epäsuoria päästöjä syntyy esimerkiksi malmien louhinnasta ja kuljetuksesta sekä valmiiden lopputuotteiden kuljetuksesta.

3.1.2 Teräksen valmistus raakaraudasta

Terästä valmistetaan poistamalla raakaraudasta hiiltä ja muita kuona-aineita konvertterissa, joka on suuri ylhäältä avoin säiliö. Konvertterissa olevaan sulaan raakaraudaan lisätään poltettua kalkkia ja säiliöön puhalletaan puhdasta happea. Prosessia kutsutaan mellotukseksi. Happi reagoi hiilen kanssa muodostaen hiilimonoksidia. Ennen rautaa happevat seokseen mahdollisesti jääneet epäpuhtaudet, kuten pii (Si) ja mangaani (Mn). Kun haluttu hiilipitoisuus on saavutettu, teräs kaadetaan ulos konvertterista, minkä jälkeen se käsitellään asiakkaan haluamalla tavalla. Ruostumatonta terästä valmistetaan mellottamalla ensin ferrokromia (FeCr) kromikonvertterissa ja tämän jälkeen sulan teräksen kanssa AOD-konvertterissa (Argon Oxygen Decarbonizator). (Metallinjalostajat ry 2014, s. 35–41)

Laadun parantamiseksi raudasta poistetaan vielä yleensä rikkiä senkkäkäsittelyssä, jossa sulaan rautaan ruiskutetaan poltetun kalkin (CaO) ja kalsiumfluoridin (CaF) seosta, kalsiumkarbidia (CaC₂) tai magnesiumia (Mg). Yhdisteet sitovat sulassa seoksessa olevaa rikkiä, joka siirtyy seoksesta erotettavaan kuonaan. (Metallinjalostajat ry 2014, s. 29)

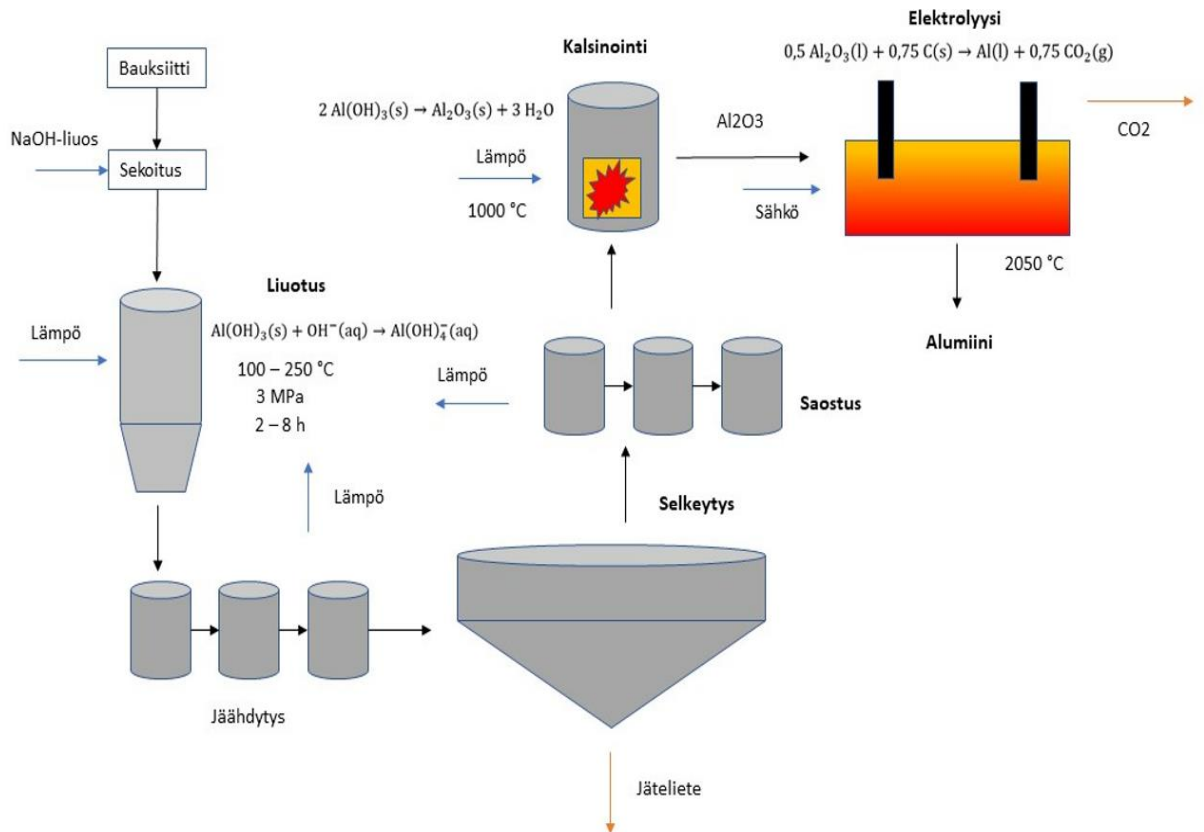
3.1.3 Kierrätysteräksen tuotanto

Kierrätettyä terästä valmistetaan teräsromusta sulattamalla. Sulatus tapahtuu valokaariuunissa, joka on sähkökäyttöinen grafiittielektrodeilla toimiva uuni. Grafiittielektrodeihin johdettu sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi uunin valokaarissa. Lämpötila uunissa on 4 000–6 000 °C. Uunissa tapahtuu myös melloitus, jossa teräksestä poistetaan hiiltä sekä muita hapettuvia epäpuhtauksia. Rautaa raskaammat metallit, kuten kupari ja sinkki saattavat aiheuttaa ongelmia, sillä niitä ei saada poistettua teräksestä melloituksessa. Melloituksen jälkeen teräksen ominaisuuksia muokataan senkkakäsittelyssä. Jos kierrätysterästä käytetään ruostumattoman teräksen valmistamiseen, se syötetään AOD-konvertteriin ferrokromin kanssa. (Metallinjalostajat ry 2014, s. 37)

Ennen sulatusta valokaariuunissa teräsromu murskataan noin kämmenen kokoiseksi silpuksi tai jopa pienemmäksi ja murskeesta erotetaan kaikki muu materiaali. Erotus voi tapahtua lukuisilla eri menetelmillä, kuten magneettierottimella, siivilöimällä tai ilmaerottimella, jossa kevyemmät jakeet poistuvat ilmapirran mukana. Silpusta voidaan tarpeen mukaan poistaa epäpuhtauksia, kuten sinkkiä liuottamalla terästä rikkihapossa. Tinaa saadaan poistettua natriumhydroksidiliuoksessa tapahtuvassa elektrolyysissä. Tämän jälkeen terässilppu sulatetaan valokaariuunissa. Menetelmää käytetään nykyisin myös neitseellisen teräksen valmistamisessa esimerkiksi suorapelkistysmenetelmällä, josta on kerrottu lisää luvussa 4. (Björkman & Samuelsson 2014a)

3.2 Alumiinin tuotanto

Alumiinin valmistamiseen kuuluu kaksi erillistä prosessia. Ensimmäisessä prosessissa alumiinia sisältävästä malmista rikastetaan alumiinioksidia (Al_2O_3) niin kutsutussa Bayer-prosessissa. Tämän jälkeen alumiinioksidista jalostetaan puhdasta alumiinimetallia elektrolyysillä Hall–Heroult prosessissa. (Tabereaux 2018, s. 1–2) Alumiinin tuotantoprosessi esitetään kuvassa 3.



Kuva 3. Alumiinin tuotantoprosessit. Muokattu lähteestä (Lumley 2011; Tabereaux 2018).

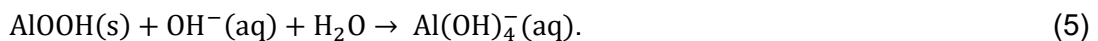
Alumiinia voidaan valmistaa myös niin kutsutulla Petersen-prosessilla. Kyseinen prosessi on muokattu Bayer-prosessista ja ei ole yhtä yleinen, joten prosessia ei käsitellä tässä työssä. (Lumley 2011, luku 2)

3.2.1 Bayer-prosessi

Vuonna 2018 maailmassa operoi noin 87 alumiinioksidia valmistavaa tuotantolaitosta, joista 94 % käyttää Bayer-prosessia tai sen sovelluksia. Bayer-prosessi kehitettiin vuonna 1887 ja se on muuttunut vuosien saatossa vain hieman. (Tabereaux 2018, s. 1–2) Alumiinia esiintyy maaperässä runsaasti erilaisina alumiinin hydraatteina. Yleisin alumiinin teolliseen valmistukseen käytetty malmi on bauksiitti, joka sisältää kolmea erilaista alumiinihydraattia: gibbsiittiä $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ sekä böhmiittiä ja diasporea (AlOOH). Böhmiitin ja diasporen rakenne poikkeaa hieman toisistaan, vaikka niillä on sama kemiallinen kaava. Jos malmi sisältää paljon böhmiittiä ja diasporea verrattuna gibbsiittiin, puhutaan heikompilaatuisesta malmista, sillä prosessi vaatii enemmän energiaa. Bauksiitti sisältää myös muita aineita, kuten silikaatteja ja rautaoksiedeja (Lumley 2011, luku 2) Noin 4–5 tonnista bauksiittia saadaan tuotettua 2 tonnia alumiinioksidia (Tabereaux 2018, s. 1–2).

Itse Bayer-prosessi koostuu neljästä vaiheesta, jotka ovat Liuotus, selkeytys, saostus ja kalsinointi (Lumley 2011, luku 2). Jos malmi on heikkolaatuista, sitä voidaan sintrata ennen liuotusta. Sintteröinnissä malmi murskataan, ja sekoitetaan sekä kuumennetaan natriumhydroksidin (NaOH) ja kalsiumoksidin $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ kanssa. (Tabereaux 2018, s. 1–2)

Liuotus tapahtuu sekoittamalla bauksiittia tai sintteriä kuumaan natriumhydroksidiliuokseen eli lipeään ja sekoittamalla seosta korkeassa paineessa. Lämpötila, paine ja sekoitusaika riippuvat malmin laadusta. Hyvälaatuinen, paljon gibbsiittiä sisältävä malmi voidaan prosessoida noin 100–125 °C. Huonolaatuinen malmi vaatii 200–250 °C lämpötilan. Mitä huonolaatuisempaa malmi on, sitä pidemmän ajan sen liuotus vaatii. Aika vaihtelee 2–8 tunnin välillä. Paine on yleensä 3 MPa:n luokkaa. (Lumley 2011, luku 2; Tabereaux 2018, s. 1–2) Liuotuksessa bauksiitissa olevat alumiiniyhdisteet liukenevat emäkseen lipeäliuokseen muodostaen tetrahydroksoaluminaattia $[\text{Al}(\text{OH})_4^-]$. Reaktiot ovat



Liuotuksen lopuksi seos siirretään prosessiastiasta ja sen paine lasketaan normaaliin ilmanpaineeseen johtamalla seos useiden paisuntasäiliöiden läpi. Prosessista vapautuva kuuma höyry kerätään talteen ja sitä käytetään lämmittämään natriumhydroksidiliuosta, joka palautetaan liuotusprosessiin. (Lumley 2011, luku 2)

Selkeytyksessä alumiiniyhdisteet erotetaan muusta bauksiitissa olleesta liukenemattomasta materiaalista isoissa selkeytysaltaissa. Selkeytys tapahtuu painovoiman vaikutuksesta, mutta seokseen lisätään saostavia yhdisteitä nopeuttamaan erotusprosessia. Jäteliete sisältää lipeää ja suuria määriä rautaa, silikaatteja ja muita maa-aineksia. Liete

pestään useaan kertaan, jotta lipeää saataisiin talteen mahdollisimman paljon. Liete on ympäristölle myrkyllistä ja se aiheuttaa ympäristöongelmia tuotantolaitosten lähetyillä. Jopa puolet bauksiittimalmin painosta voi päätyä lietteeseen. (Lumley 2011, luku 2)

Selkeytyksestä saatavasta alumiinipitoisesta lipeäliuoksesta on haihtunut vettä prosessin aikana, joten liuksen tilavuus on pienentynyt ja lämpötila laskenut. Liuos on siten ylikylläinen, jonka vuoksi alumiinia alkaa saostua puhtaana gibbsiittinä. Saostusvaiheessa seosta johdetaan usean saostussäiliön läpi, joissa lämpötilaa lasketaan ja seokseen lisätään puhdasta gibbsiittiä lisäämään alumiinioksidin saostumista. (Lumley 2011, luku 2)

Saostunut puhdas gibbsiitti seulotaan ja pestään, jonka jälkeen se kalsinoidaan. Kalsinoinnissa saostustuotteita kuumennetaan 1 000 °C lämpötilassa. Kuumennuksen seurauksena gibbsiitissä olevat hydroksyyliiryhmien sidokset alumiinin kanssa katkeavat ja hydroksyyliiryhmät poistuvat vesimolekyyleinä. Reaktio on

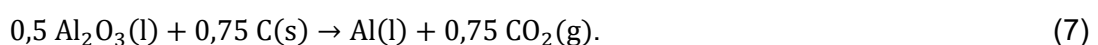


Jäljelle jää alumiinioksidia. (Lumley 2011, luku 2)

Bayer-prosessi on erittäin energiaintensiivinen, sillä siinä käytetään korkeita lämpötiloja ja painetta. Hyvälaatuisen malmin jalostukseen kuuluu käytetyn laitteiston mukaan noin 7–12 gigajoulea yhden alumiinioksiditonin tuottamiseen. Huonolaatuisen malmin jalostus vaatii energiaa 11–18 gigajoulea tonnia kohden. Teoreettinen minimiarvo, jonka prosessin reaktiot vaativat tapahtuakseen on vain 2 gigajoulea tonnia kohden. Sen lisäksi heikkolaatuisen malmin sintraaminen kuluttaa myös energiaa, jolloin energiantarve tonnia kohden voi nousta 22 gigajouleen. (Tabereaux 2018, s. 1–2) Prosessista johtuvat hiilidioksidipäästöt ovat siis riippuvaisia käytetystä energianlähteestä.

3.2.2 Hall–Heroult-prosessi

Alumiinioksidista jalostetaan alumiinia elektrolyysillä, jossa alumiinioksidi pelkistyy alumiinimetalliksi. Käytetyin menetelmä on vuonna 1886 kehitetty Hall–Heroult-prosessi, jossa elektrolyysikennossa on grafiittielektrodit ja elektrolyyttinä sula kryoliittisuola. Elektrolyysikennoja on olemassa useita erilaisia sovelluksia, jotka eroavat toisistaan kennon rakenteen mukaan. Elektrolyysireaktio on



Kennossa syntyy myös paljon syklisiä fluorin ja hiilen yhdisteitä eli PFC-yhdisteitä, joilla on iso GWP (Global Warming Potential). Nämä päästöt kerätään usein

kaasunpuhdistusjärjestelmässä. Sula alumiinin tiheys on $2,30 \text{ g/cm}^3$ ja elektrolyytin noin $2,14 \text{ g/cm}^3$. Alumiini vajoaa painovoiman vaikutuksesta tiheämpänä yhdisteenä elektrolyysikennon pohjalle, josta se kerätään talteen. Prosessista saatua sulaa alumiinia voidaan jatko käsitellä suoraan asiakkaan haluamaan muotoon tai siitä voidaan valaa alumiiniharkkoja. (Lumley 2011, luku 3; Tabereaux 2018)

Prosessissa alumiinioksidi sulatetaan kryoliittisuolan mukana. Alumiinioksidin sulamislämpötila on yli 2050 °C ja sidokset molekyyllissä ovat vahvoja, joten prosessi vaatii paljon lämpö- ja sähköenergiaa. Keskimäärin yhden alumiinitonnin tuottaminen kuluttaa sähköä noin 13 megawattituntia. (Lumley 2011, luku 3) Alumiinin jalostaminen alumiinioksidista vastaa arviolta jopa 5 % globaalista sähköntuotannosta (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 102). Taulukossa 4 esitetään päästöjen osuuksien jakautuminen alumiinin tuotannossa.

Taulukko 4. *Alumiinin tuotannon osaprosesseissa syntyvät päästöt hiiliekvivalenttitoineissa tuotettua tonnia kohden ja niiden osuus tuotannon kokonaispäästöistä. Laskenta on suoritettu käyttäen globaalia keskiarvoa. Muokattu lähteestä (Kvande et al. 2020)*

Osaprosessi	Päästöt (t CO ₂ ekv. / t)	Osuus (%)
Elektrolyysin sähköenergia	10,2	70,8
Bayer-prosessi	1,5	10,4
Katodilta vapautuva CO ₂	1,5	10,4
Muut vaiheet	1,2	8,3
Yhteensä	14,4	100

Bayer-prosessissa ja elektrolyysissä vaadittava energia on yhteensä noin 46,8 gigajoulea tuotettua alumiinitonnia kohden. Tässä ei ole huomioitu elektrolyysissä käytettävää lämpöenergiaa tai bauksiitin kaivamiseen ja materiaalin kuljettamiseen vaadittavaa energiaa. Jos malmi on erittäin huonolaatuista, jolloin sitä joudutaan prosessoimaan esimerkiksi sintraamalla ennen Bayer-prosessia, voi kokonaisenergian kulutus olla keskimäärin 66,8 gigajoulea tonnia kohden. Arviolta 50–60 % elektrolyysissä tarvittavasta sähköenergiasta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Suurin osa päästöistä alumiinin tuotannossa syntyy sähköenergian tuottamisessa. Tämän lisäksi päästöjä syntyy elektrolyysireaktiossa reaktion (7) mukaan. (Lumley 2011, luku 3; Enkvist & Klevnäs 2018, s. 102)

3.2.3 Alumiinin valmistus kierrätysmateriaalista

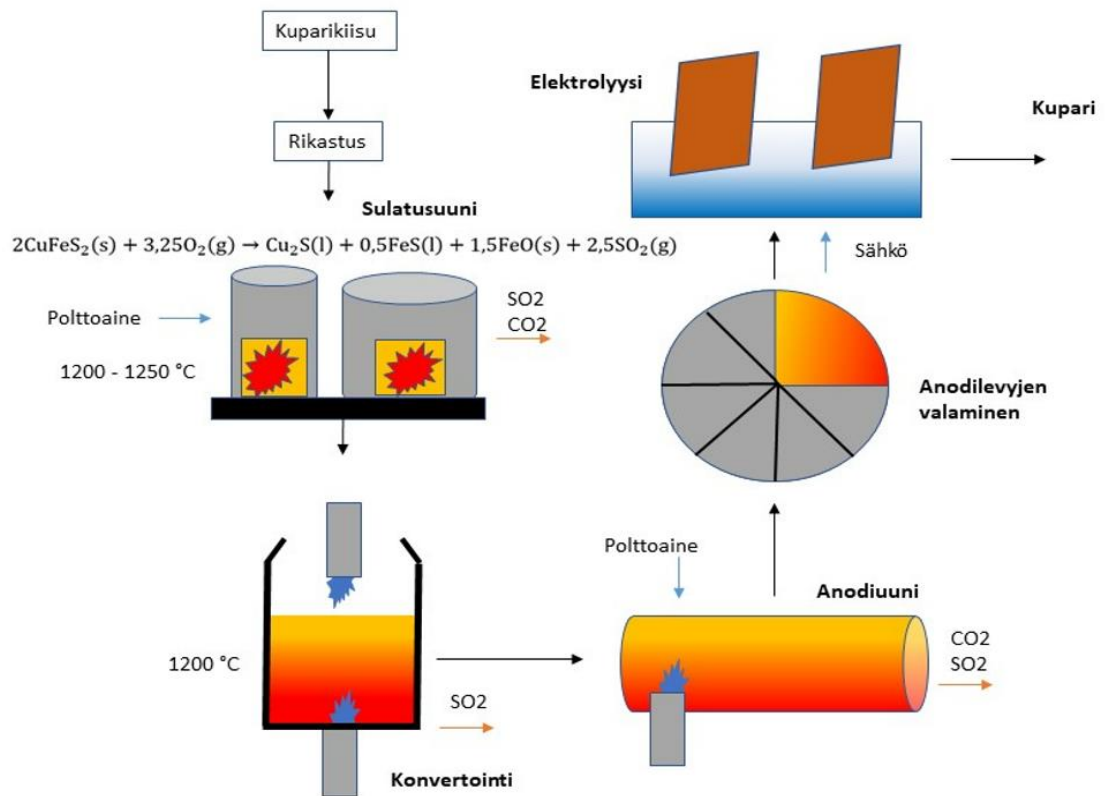
Käytettyä alumiiniromua voidaan hyödyntää erittäin hyvin uusiokäytössä. Taulukon 1 mukaan globaali kierrätyksen osuus on vain 28,7 %, mutta länsimaissa se on paljon suurempi. Arvioituna noin 60 % elintarviketuotteissa, 80 % rakennusteollisuudessa ja 95 % autoteollisuudessa. (Lumely 2011, luku 4)

Kierrätysprosessi ensimmäisessä vaiheessa kerätty romu murskataan ja murskasta erotellaan muu materiaali esimerkiksi ilmavirran avulla (kevyemmät jakeet kulkeutuvat virran mukana, raskaat eivät) tai pyörrevirtaerottimella, jolla voidaan erottaa ei-magneettisia metalleja. Tämän jälkeen romusta poistetaan mahdollinen kosteus. Kuivasta romusta poistetaan maalit ja muut pinnoitemateriaalit, jonka jälkeen romu sulatetaan ja sulasta massasta valetaan uusioalumiinia. Sulatusuuneissa säädellään lämpötilaa niin, että muu mahdollinen alumiinin seassa oleva metalli, kuten rauta, saadaan erotettua sulasta alumiinista. (Lumely 2011, luku 4) Sulatusuunit käyttävät energianlähteenään tyypillisesti hiilivetypolttoaineita, mutta myös sähkökäyttöisiä uuneja hyödynnetään. Sähkökäyttöisissä uuneissa energiatehokkuus on usein parempi ja polttoaineista jäävä tuhka ei ole ongelma sähköuuneissa (Schlesinger 2014, s. 178).

Alumiinin valmistus kierrätysmateriaalista kuluttaa 95 % vähemmän energiaa kuin neitseellisen alumiinin valmistus, minkä vuoksi myös sen päästöt ovat merkittävästi pienemmät. Myös muut haitalliset päästöt ovat 95–100 % pienemmät. Näitä päästöjä ovat esimerkiksi metaani ja fluoria sisältävät kaasut (CF_4 , C_2F_6 ja HF). Sen lisäksi kiinteää jätettä syntyy huomattavasti vähemmän. (Schlesinger 2014, s. 6–10)

3.3 Kuparin tuotanto

Kaupallisen kuparin raaka-aineena käytetään suurimmaksi osaksi kuparikiisua (CuFeS_2). Jonkin verran käytetään myös kuparisulfidia (CuS_2) ja muita kuparia sisältäviä malmeja. Kuparimalmeissa kuparipitoisuus on melko alhainen. Avolouhoksilta saatavassa malmissa kuparia on vain 0,5–1 % ja maanalaisista louhoksista saatavassa malmissa vain 1–2 %. Tämän vuoksi kuparimalmia rikastetaan ennen varsinaista jalostusprosessia, jolloin malmimateriaalin kuparipitoisuus saadaan 20–30 %. (Davenport et al. 2011, s. 1–5) Kuparivarantojen vähentyessä malmin kuparipitoisuus uhkaa laskea entisestään (Nilsson et al. 2017, s. 2). Tämän vuoksi kierrätysmateriaalin merkitys tuotannossa luultavasti kasvaa tulevaisuudessa. Noin 80 % kuparista valmistetaan pyrometallurgisesti. Prosessikaavio on esitetty kuvassa 4. (Davenport et al. 2011, s. 1–5)



Kuva 4. Kuparin tuotantoprosessit. Muokattu lähteestä (Davenport et al. 2011).

Toinen tapa valmistaa kuparia on hydrometallurginen prosessi, jota käsitellään luvussa 4. Hydrometallurgisen prosessin sovellusta tutkitaan erityisesti huonolaatuisen malmin käsittelyssä sekä kierrätyksessä (Davenport et al. 2011).

3.3.1 Malmin sulatus

Ensin louhoksella rikastettu malmi sulatetaan. Sulatuksessa malmista poistetaan rikkiä ja rautaa sekä muita epäpuhtauksia. Malmin mukana voidaan syöttää myös kierrätettyä kuparia, mikäli sen kuparipitoisuus on alhainen. Uniin puhalletaan happirikasta ilmaa, jonka seurauksena happi reagoi raudan, rikin ja muiden epäpuhtauksien kanssa muodostaen oksideja. Kuparia saadaan sulatusuunista kupari(I)sulfidina (Cu_2S). (Davenport et al. 2011, luku 5) Sulatusuuneja on muutamia erilaisia: liekkisulatusuuni, upposuutin-uuni, polttouuni, kuilu-uuni ja sähköuuni. Yleisimmät menetelmät ovat: Outokummun (nykyisin Metso Outotec) kehittämä liekkisulatusmenetelmä, Ausmelt- ja Isasmelt-menetelmät, jotka perustuvat TSL-tekniikkaan (Top Submerged Lance) sekä Mitsubishi-menetelmä. Upposuutinuuneja (submerged tuyere furnace) käyttävät Noranda-, Teniente- ja Vanukov-menetelmät. Yllä mainitut menetelmät poikkeavat toisistaan käytettävän uunin

tekniikan, apuaineiden, prosessin lämpötilan ja polttoaineen käytön sekä prosessin jatkuvuuden (jatkuva vai panosprosessi) suhteen, mutta peruseriaate on kaikissa sama. (Davenport et al. 2011; Bergesen et al. 2016)

Sulatuksessa lämpötila on prosessin mukaan noin 1200–1250 °C. Yleisreaktio on kuvattu alla:



Kiinteät oksidit muodostavat kuonasakan, joka erotetaan sulasta faasista. Kuonassa on raudan lisäksi myös muita oksideja, kuten alumiini-, kalsium- ja mangaanioksideja sekä pieniä määriä muita epäpuhtauksia. Kuonassa saattaa olla myös kupari(I)oksidia (Cu_2O), jota syntyy kuparisulfidin reagoiessa ylimäärähapen tai rautaoksidin kanssa:

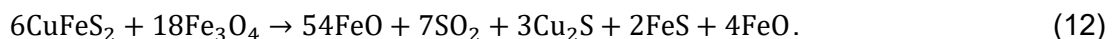


Tämä johtaa kuparin saannon pienenemiseen. Reaktiota yleensä pyritään ehkäisemään optimoimalla hapen pitoisuutta syöttöilmassa sekä syöttämällä uuniin piidioksidia, joka sitoo rautaa itseensä alla olevan reaktion mukaan:

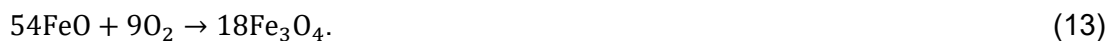


Näin kuparin saanto paranee. (Davenport et al. 2011, s. 5, 83)

TSL-tekniikassa reaktio tapahtuu syvemmällä uunissa kuin liekkisulatuksessa. Myös reaktio eroaa yllä esitetystä reaktiosta (8). Uuniin ei syötetä yhtä paljon piidioksidia, vaan rautaoksidin annetaan reagoida edelleen hapen kanssa, jolloin muodostuu magnetiittia (Fe_3O_4). Magnetiitin ajatellaan toimivan katalyyttinä reaktiossa



Reaktion (12) mukaan syntyy 4 moolia ylijäämä rautaoksidia, joka on esitetty erillään reaktiossa. Rauta oksidi reagoi hapen kanssa muodostaen uutta magnetiittia

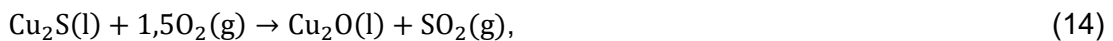


Katalyytti regeneroituu näin reaktiossa. (Davenport et al. 2011, s. 83–164)

Sulatusuuneissa käytetään yleisimmin hiilivetypolttoaineita pitämään yllä tarvittavaa lämpötilaa sekä varsinkin prosessin käynnistysvaiheessa nostamaan lämpötila halutuksi ja käynnistämään reaktio. (Davenport et al. 2011, s. 99) Vuonna 2016 sulatusuunien keskimääräinen energiankäyttö globaalilla tasolla oli 3,83 megawattituntia yhtä tuotettua tonnia kohden (Bergesen et al. 2016).

3.3.2 Konvertointi

Sulatuksesta saatavan sulan massan kuparipitoisuus on menetelmän mukaan 45–70 %. Sulaa massaa käsitellään konvertterilla, jossa massaan puhalletaan happipitoista ilmaa. Mukaan voidaan syöttää myös kierrätettyä kuparia, jos sen kuparipitoisuus on kierrätysmateriaalissa korkea. Happi hapettaa kupari- ja rautasulfidin, jolloin syntyy niiden oksideja. syntynyt kuparioksidi reagoi edelleen kuparisulfidin kanssa muodostaen puhdasta kuparimetallia alla olevan reaktion mukaan:



rikki poistuu konvertterista rikkidioksidina kaasujen mukana. Reaktiot ovat eksotermisiä ja tuottavat prosessissa tarvittavan lämpöenergian. Konvertteriin syötetään myös piidioksidia, joka reagoi rautaoksidien kanssa reaktion (11) mukaan, mikä saa niiden sulamispisteen alenemaan. Seurauksena rautaoksidit sulavat ja ne voidaan erottaa konvertterista. Prosessi tehdään vaiheittain lisäämällä vähitellen sulaa seosta ja piidioksidia. Välissä konvertterissa olevasta massasta poistetaan sulaneita rautayhdisteitä, jotka erottuvat omana faasinaan. Konvertointi lopetetaan, kun seokseen jää pysyvästi kuparioksidia, joka erottuu omaksi faasikseen. Lopputuloksena seoksen kuparipitoisuudeksi saadaan 99 % ja rautapitoisuudeksi 1 %. (Davenport et al. 2011, s. 127–136)

Noin 90 % kuparista konvertoidaan niin kutsutussa Pierce–Smith-konvertterissa, joka on 12 metriä pitkä ja 4,5 metriä halkaisijaltaan. Lämpötila prosessissa on noin 1200 °C. Konvertterissa on suuttimia, jotka puhaltavat happirikasta ilmaa sulaan kuparimassaan. Tuotantokapasiteetti on 500–700 tonnia kuparia päivässä. Pierce–Smith konvertterit ovat vanhin teknologia kuparin konvertointiin. Sen on ollut käytössä jo yli 250 vuotta. Vaihtoehtoisia konvertteritekniikoita menetelmiä on kehitetty eri sulatusmenetelmille, ja ne ovat luultavasti yleistymässä markkinoilla, kun vanha tekniikka tulee käyttöikänsä päähän. (Davenport et al. 2011, s. 127–150)

3.3.3 Sähkökemialliset menetelmät

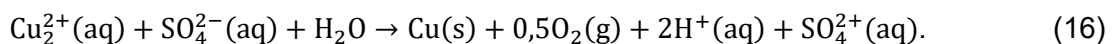
Sähkökemiallisissa menetelmissä kuparia rikastetaan vielä puhtaammaksi. Kaupallisesti myytävän kuparin puhtaus on yleensä 99,99 %, joten konvertterista saatu 99 % kupari ei ole riittävän puhdasta kaikkiin sovelluksiin. Sähkökemiallisilla menetelmillä rikastetaan sekä pyro- että hydrometallurgisesti valmistettua kuparia, mutta prosessit näille poikkeavat hieman toisistaan. Pyrometallurgisesti jalostetusta kuparista valetaan anodilevyjä,

joista saadaan puhdasta kuparia elektrolyysikennossa. Hydrometallurgisesti jalostettu kupari on jalostusprosessin päätteeksi elektrolyyttiliuoksena, josta saadaan kiinteää kuparia elektrolyysillä. (Davenport et al. 2011, s. 251)

Ennen anodilevyjen valamista, kupariseosta käsitellään pyörivässä anodiunissa. Konvertterista saatu massa sisältää alle prosentin rikkiä ja 0,3–0,5 % happea. Rikki ja happi saattavat muodostaa rikkidioksidikuplia tai reagoida kuparin kanssa, mikä heikentää anodilevyjen kestävyyttä, joten anodiunin syötetään happea hapettamaan rikkiä ja lyhytkestäviä hiilivetypolttoaineita poistamaan happea kuparista. Yhden tonnin prosessointiin kuluu energiaa noin 556–833 kWh, joka tuotetaan tyypillisesti maakaasulla tai öljyllä. Anodilevyjä valetaan pyöreässä muotissa, jolla voidaan valaa 16–32 anodilevyä kerralla. (Davenport et al. 2011, s. 243–247)

Anodilevyistä saadaan 99,99 % kuparia elektrolyysissä, jossa kennossa on anodilevy ja katodina puhdas kuparilevy. Elektrolyyttiliuoksena on kuparisulfaatin (CuSO_4) ja rikkihapon (H_2SO_4) seos. Anodilevyistä liukenee kuparia elektrolyyttiliuokseen, josta se pelkistyy katodilevyille. Kupari siis siirtyy liuoksen kautta puhtaammalle katodille. Katodilevy on yleensä ruostumatonta terästä, jonka pinnalle kuparia pelkistyy. Energiaa kuluu prosessissa tonnia kohden 300–400 kWh. Liuokseen jää paljon anodilevyssä epäpuhtautena olleita jalometalleja, kuten kultaa ja hopeaa, jotka voidaan eristää liuoksesta. (Davenport et al. 2011, s. 251–252)

Hydrometallurgisesti tuotetusta kuparielekrolyyttiliuoksesta saadaan puhdasta kuparia myös elektrolyysillä. Kennon rakenne on muuten samanlainen kuin kuparianodilevyjä käyttävä elektrolyysi, mutta anodimateriaalina toimii yleensä lyijy, joka on inertti eli ei osallistu reaktioon. Sen sijaan, että anodilla hapettuisi kuparia liuokseen, anodireaktiona on veden hajoaminen protoneiksi ja happikaasuksi. Kokonaisreaktio on



Vaadittava potentiaali on 0,89 V. (Davenport et al. 2011, s. 349–350)

3.3.4 Kuparin kierrätys

Kuparin on oltava erittäin puhdasta useissa sovelluksissa. Tämä luo haasteita kuparin kierrätykselle varsinkin kulutusjätistä poistetulle materiaalille, joka saattaa olla huonolaatuista. Hyvälaatuinen kupari voidaan erotusprosessin jälkeen sulattaa ja käyttää uudelleen. Huonopilaatuinen kupari on syötettävä jalostusprosessiin sen puhtauden mukaan. 2000-luvulla kulutusjätistä poistettavan kupariromun laatu on huonontunut. Vuonna 2006 noin 29 % globaalista kuparintuotannosta oli peräisin sulatetusta

hyvänlaatuisesta kupariromusta. Vuonna 2016 osuus oli enää 15 %. Taulukon 1 mukaan kuparin globaali tuotantomäärä vuonna 2018 oli 20,6 miljoonaa tonnia. Tästä määrästä arviolta 3,2 Mt päätyi valmistavasta teollisuudesta kierrätykseen hyvänlaatuisena romuna ja loput kulutukseen. Samana vuonna kulutuksesta poistui arviolta 12,9 Mt kuparia, josta kierrätykseen päätyi arviolta 5,66 Mt ja loput 7,24 Mt pois kierrätyksen piiristä. Yhteensä hyvänlaatuista romua oli 5,43 Mt ja huonolaatuista 3,29 Mt. (Loibl & Tercero Espinoza 2021)

4. TOIMET HIILINEUTRAALIUDEN SAAVUTTA- MISEKSI

Luvun 3 perusteella päästöjä syntyy tarkasteltavien metallien tuotannossa sekä epäsuorasti että suoraan prosessista. Epäsuorasti syntyviä päästöjä vapautuu prosesseissa vaadittavan sähkö- ja lämpöenergian tuotannosta, mikäli energia tuotetaan fossiililla polttoaineilla. Sen lisäksi polttoaineita käytetään suoraan prosesseissa esimerkiksi masuunissa ja kuparin sulatuksessa sekä anodiunissa. (Davenport et al. 2011; Lumley 2011; Babich & Senk 2015) Merkittävä päästönlähde on myös kivihiilen käyttö pelkistimenä masuuneissa (Babich & Senk 2015). Päästöjen vähentämiseksi voidaan tehdä useita toimenpiteitä, joita esitellään tässä luvussa.

4.1 Vaihtoehtoiset tuotantomenetelmät

Luvussa kolme läpi käydyt tuotantomenetelmät ovat yleisimmin käytettyjä menetelmiä. Nämä menetelmät ovat usein vanhin tapa valmistaa kyseisiä metalleja, ja ne ovat olleet käytössä satoja vuosia. Vaihtoehtoisia menetelmiä on kehitetty lukuisia, joista osa on kaupallisessa käytössä. Usein menetelmillä halutaan leikata kustannuksia ja parantaa saantoa, mutta myös ympäristönäkökulmat painavat tutkimuksessa ja tuotekehityksessä enemmän. (Davenport et al. 2011; Lumley 2011; Babich & Senk 2015) Luvussa keskitytään menetelmiin, joiden päästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin yleisimmin käytetyissä menetelmissä.

4.1.1 Vaihtoehtoiset menetelmät masuunille

Masuunissa raudan pelkistämistä kutsutaan epäsuoraksi pelkistykseksi, sillä pelkistäjänä toimii pääasiassa hiilimonoksidi, jota syntyy hiilen reagoidessa hapen kanssa masuunissa. Yksi vähähiilisempi vaihtoehto on suorapelkistysmenetelmä, jossa rautamalmia pelkistetään yleisimmin maakaasun (CH_4) avulla. Prosessi tapahtuu erilaisissa kuilu- tai rumpu-uuneissa. Rautamalmi syötetään uuniin joko pelletoituna tai jauhattuna. Alhaisemman lämpötilan (700–1050 °C) vuoksi rauta ei sula, eikä siten sido itseensä yhtä paljon hiiltä kuin masuuniprosessissa, joten konvertointi voidaan suorittaa tehokkaammin. (Metallinjalostajat ry 2014, s. 31) Suorapelkistys vastaa globaalilla tasolla noin 5 % teräksen tuotannosta. Kaupallisesti käytetyin menetelmä on Midrex. Suorapelkistyksellä voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä noin 30–50 % verrattuna masuuniprosessiin.

Hiilidioksidipäästöjä syntyy maakaasun ja rautamalmin reagoidessa. (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 61; Ariyama et al. 2019)

Terästä on myös mahdollista tuottaa täysin fossiilivapaasti käyttämällä pelkistimenä vetykaasua, jolloin lopputuotteena on metallinen rauta sekä vesihöyry. Reaktio hematitille on



Yhtiöt SSAB, Vattenfall ja LKAB ovat suunnitelleet niin sanotun HYBRIT-menetelmän, jonka on tarkoitus valmistaa fossiilivapaata terästä Ruotsissa ja Suomessa vuonna 2026. Menetelmässä käytetään kuilu-uunia, johon syötetään esilämmitettyä vetykaasuseosta. Rautamalmi syötetään pelletoituna uunin yläosasta. Pelletointi suoritetaan käyttäen uusiutuvia polttoaineita. Vetyä tuotetaan hajottamalla vettä elektrolyytisesti käyttäen fossiilivapaata sähköenergiaa. Uunista saatu rauta sulatetaan valokaariuunissa, jossa käytetään myös fossiilivapaata sähköenergiaa. Pohjoismaissa on tarjolla runsaasti sekä biopohjaisia polttoaineita että vesi- ja tuulivoimalla tuotettua sähköä kyseiseen tarkoitukseen. Ainoat hiilidioksidin päästönlähteet prosessissa ovat veden elektrolyysissä käytettävistä grafiittielektrodeista sekä valokaariuuniin lisättävästä kivihiilestä. Päästöt yhteensä ovat arvioituna 98,4 % pienemmät kuin masuuniprosessilla tuotetulla teräksellä. (Pei et al. 2020)

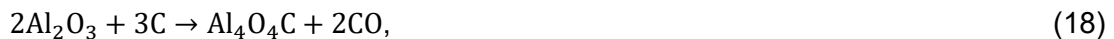
Toinen vetyä käyttävä menetelmä on myös kehitteillä. Voestalpine, Siemens ja Verbund yhdessä tanskalaisen ja itävaltalaisen tutkimuskeskusten ECN:n ja K1MET:n kanssa ovat kehittämässä vuonna 2016 alkanutta hanketta nimeltä H2Future. Hankkeessa käytetään Midrex-menetelmän kuilu-uunia ja vetyä tuotetaan HYBRIT:in tapaan fossiilivapaalla sähköenergialla. Tuotekehityksessä painotetaan Siemensin PEM-elektrolyysitekniikkaa (PEM, Proton Exchange Membrane). (Ariyama et al. 2019)

Metalliteollisuusyhtiö Salzgitter ja teknologian tutkimuskeskus VTT kehittävät myös vetyyn perustuvaa tekniikkaa SALCOS-projektissaan. Projektissa tuotantomenetelmä on muuten samanlainen kuin HYBRIT- ja H2Future-menetelmissä, mutta kehityskohteena painotetaan niin kutsuttua GrInHy-elektrolyysitekniikkaa (Green Industrial Hydrogen via reversible high-temperature electrolysis). Kennoa voidaan käyttää joko elektrolyysikennoa, joka tuottaa vetyä vesihöyrystä, tai käänteisesti polttokennona, joka tuottaa sähköä ja lämpöä vedystä. Projektissa tutkitaan vedyn tuottamista hukkalämmön avulla ja sen käyttämistä teräksen hiilineutraaliin tuotantoon. (Ariyama et al. 2019)

4.1.2 Vaihtoehtoiset menetelmät alumiiniteollisuudessa

Alumiinille ei ole kaupallisessa käytössä olevia vaihtoehtoisia tuotantomenetelmiä. Alumiinioksidin pelkistäminen alumiiniksi suoraan hiilen avulla ei ole mahdollista alumiinin fysikaaliskemiallisten ominaisuuksien vuoksi. Sama pätee myös alumiinin elektrolyysiin vesiliuoksessa, koska katodilla reagoisi vety alumiinin sijaan. Yksi tutkittu menetelmä on alumiinioksidin pelkistäminen karbotermisesti hiilellä. Tämä menetelmä vaatii vähemmän energiaa kuin Hall–Heroult-prosessi ja tuottaa siten vähemmän hiilidioksidipäästöjä. (Tabereaux 2018)

Karbotermistä pelkistystä ei ole käytössä kaupallisessa tuotannossa. Osaksi tähän on vaikuttanut prosessissa vaadittavat korkeat noin 2 000 celsiusasteen lämpötilat, koska pelkistysreaktiot ovat endotermisiä ja prosessi vaatii siten lisäenergiaa pysyäkseen käynnissä. (Tabereaux 2018) Tutkimuksia on tehty prosessin toteuttamisesta alennetussa paineessa, jolloin pelkistysreaktio voidaan suorittaa alhaisemmassa lämpötilassa. Sen lisäksi prosessissa vaadittava lämpöenergia voidaan tuottaa aurinkoenergialla, jolloin prosessin energiantarve ja hiilidioksidipäästöt olisivat merkittävästi alhaisemmat kuin Hall–Heroult-prosessissa. (Epstein & Vishnevetsky 2015) Menetelmässä Bayer-prosessista saatu alumiinioksidi reagoi hiilen kanssa muodostaen ensin kaksi välituotetta



Syntyvä nettohiilimonoksidi kerätään talteen ja poltetaan voimalaitoksessa, josta saadaan prosessissa tarvittavaa sähkö- ja lämpöenergiaa. Yhden alumiinitonnin tuottamisesta karbotermisesti saadaan 4,37 MWh verran energiaa syntyneestä hiilimonoksidista. Tämän lisäksi hiilimonoksidista voidaan tehdä muita kemikaaleja, kuten ammoniakkaa. Tutkimus on vielä laboratorio ja pilottivaiheessa. (Frei et al. 2011; Epstein et al. 2014; Epstein & Vishnevetsky 2015)

4.1.3 Hydrometallurginen kuparin tuotanto

Kuparimalmin laadun huononemisen vuoksi hydrometallurgisen kuparintuotannon odotetaan kasvavan tulevaisuudessa. Menetelmä vastaa nykyisin noin 20 % globaalista kuparintuotannosta. Hydrometallurgisia menetelmiä on myös tutkittu kuparin kierrätyksessä. Esimerkiksi elektroniikkalaitteista kuparia saattaa olla hankalaa erottaa

murskauksella. Hydrometallurgisella menetelmällä käsitellään usein sulfaatti- tai oksidimuotoisia malmeja. (Davenport et al. 2011, s. 281–282)

Hydrometallurgisessa prosessissa kuparia liuotetaan malmimateriaalista happoliuokseen. Tämän jälkeen liuoksesta valmistetaan elektrolyyttiliuos, josta tuotetaan puhdasta kuparia elektrolyysillä. Elektrolyysi on kuvattu luvussa 3. Happoliuoksessa tarvitaan lisäksi jokin hapettava aine, kuten rauta tai happi. Myös bakteerien avulla tapahtuvaa bioliuotusta on käytössä. Kuparia erotetaan happoliuoksesta orgaanisten aineiden avulla, jotka muodostavat kompleksin kupari-ionien kanssa. (Davenport et al. 2011, s. 281–283)

Hydrometallurginen prosessi ei välttämättä tuota vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin luvussa 3 kuvattu pyrometallurginen prosessi, vaan päästöt riippuvat suurimmaksi osaksi malmin laadusta (Nilsson et al. 2017). Menetelmiä arvioitaessa tulisi päästöjen näkökulmasta ottaa käyttöön se, joka tuottaa vähemmän päästöjä.

4.2 Fossiilivapaan energian käyttö prosesseissa

Yksi keino leikata hiilidioksidipäästöjä jo olemassa olevista tuotantolaitoksista, on tuottaa prosesseissa käytettävä sähkö- ja lämpöenergia fossiilivapaasti. Lisäksi masuuneissa ja kuparin tuotannon anodiuneissa käytettävä kivihilli voidaan korvata hiilineutraaleilla vaihtoehdoilla. Alumiinin tuotantoa sekä masuuniprosessia käsitellään tarkemmin niiden merkityksen vuoksi.

4.2.1 Hiilineutraali energia alumiiniteollisuudessa

Suurimmat päästöleikkausmahdollisuudet hiilineutraalilla sähköenergialla ovat Hall–Heroult-prosessissa. Prosessi vaatii 13–15 MWh energiaa tuotettua tonnia kohden ja taulukon 4 mukaan kokonaispäästöt ovat 10,2 tonnia hiilidioksidia. Hiilineutraalilla sähköllä saataisiin elektrolyysin päästöt laskemaan noin 3 000 kiloon tonnilta alumiinia. (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 102) Jäljelle jäävät päästöt syntyvät pääosittain Bayer-prosessissa sekä grafiittielektrodilla. Kyseiset päästöt ovat mainittu taulukossa 4. Jos PFC-yhdisteitä ei puhdisteta elektrolyysissä vapautuvista kaasuista, vastaavat päästöt ovat noin 6 200 kg CO₂ekv. tonnilta (Das 2012).

Bayer-prosessissa energiaa kuluu lämmitykseen ja paineen kasvattamiseen pumpuilla, jotka käyttävät paljon sähköenergiaa. Osa lämpöenergiasta saadaan kumminkin talteen jäähdytysvaiheessa. (Lumley 2011, luku 2) Käyttämällä uusiutuvia energianlähteitä ja fossiilivapaita polttoaineita, voidaan vähentää sekä ottamalla käyttöön grafiittia

sisältämättömiä inerttejä elektrodeja, voidaan käytännössä tuottaa alumiinia hiilineutraalisti, sillä katodilla vapautuisi vain happikaasua. Inerttejä elektrodeja ei ole vielä käytössä laajasti, koska niiden käyttö aiheuttaisi noin 2,8 MWh energiahäviön Hall–Heroult-prosessissa tuotettua tonnia kohden. Inerttejä katodeja on pilottivaiheessa ja markkinoille ne saapuvat arviolta 2024. (Kvande et al. 2020) Kierrätyksen päästöjä voidaan vähentää myös käyttämällä hiilineutraalia sähköenergiaa kierrätysalumiinin sulatukseen.

4.2.2 Biopolttoaineiden ja fossiilivapaan sähkön käyttö tuotannossa

Kuparin tuotannossa polttoaineita käytetään sulatusuuneissa tuottamaan lämpöenergiaa sekä anodiunissa energiantuotannon lisäksi poistamaan seoksesta happea. Sulatusuunit käyttävät polttoaineena tyypillisesti kivihiiltä, öljyä tai maakaasua, mutta myös sähkökäyttöisiä uuneja on olemassa. Anodiuneissa käytetään maakaasua, herkästi haihtuvaa petroolia, öljyä tai propaanin ja butaanin seosta. Kuparin tuotannossa sähköenergiaa tarvitaan elektrolyysissä 300–400 kWh tonnia kohden, mikä on huomattavasti vähemmän kuin alumiinin tuotannossa. (Davenport et al. 2011, s. 89–150, 241) Näiden energianlähteiden korvaaminen biokaasulla tai bio-öljyllä leikkaisi prosesseissa syntyviä hiilidioksidipäästöjä.

Terästeollisuudessa maakaasua ja öljyä käytetään masuunissa tukipolttoaineena, sint-raamossa sekä suorapelkistysmenetelmässä pelkistäjänä. Sähköenergiaa käytetään valokaariuunissa kierrätysteräksen valmistuksessa. (Metallinjalostajat ry 2014) Kivihiilen korvaaminen biopohjaisilla vaihtoehdoilla ei ole yhtä helppoa kuin kupari- tai alumiiniteollisuudessa.

4.2.3 Kivihiilen korvaaminen biomassalla masuunissa

Masuuniprosessissa kivihiili toimii sekä lämpöenergian tuottajana että prosessissa reagoivana aineena. Lisäksi käytetään myös polttoöljyä tai maakaasua tukemaan prosessia. Kivihiiltä käytetään myös sintrattaessa malmia, jolloin syntyy hiilidioksidipäästöjä (Metallinjalostajat ry 2014) Jos kivihiili ja tukipolttoaine vaihdetaan biopohjaisiin vaihtoehtoihin, voidaan prosessissa syntyneet hiilidioksidipäästöt katsoa hiilineutraaleiksi, olettaen, että ne sitoutuvat kasvavaan biomassaan.

Masuuneissa käytettävältä pelkistäjältä vaaditaan tiettyjä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia prosessin laadun takaamiseksi. Näitä ovat esimerkiksi huokoisuus, lämpöarvo ja murenevuus. Biomassaa ei siis voida käyttää suoraan masuuneissa, koska sen

laatu vaihtelee merkittävästi riippuen biomassan alkuperästä. Yleisesti biomassan hiilipitoisuus on pienempi kuin kivihielessä ja se sisältää enemmän haihtuvia yhdisteitä. Biomassa on käsiteltävä ensin esimerkiksi torrefioimalla tai pyrolyysillä, jotta siitä saadaan biohiiltä. Biohiilestä voidaan valmistaa biokoksia. Masuunin alaosasta syötettävä tuki-polttoaine voi olla biohiilipölyä, biokaasua tai bio-öljyä. (Fick et al. 2014)

Lukuisten tutkimusten perusteella käyttämällä biopohjaista pelkistäjää yhdessä kivihielessä kanssa, on saatu parempilaatuista raakarautaa. Sen sijaan prosessissa syntyi enemmän korrosoivia alkalisia aineita tuhkan mukana sekä koksen murenevuus kasvoi. Alhaisempi fyysinen kestävyys biohiilellä on sen käyttöä rajoittava tekijä. Tutkimuksissa voitiin korvata enimmillään noin 30 % kivihielestä. Hiilidioksidipäästöt bruttona olivat suuremmat prosesseissa, joissa käytettiin biopohjaisia aineita, mutta nettopäästöt huomattavasti alhaisemmat. Biopohjaisten aineiden käyttö sintraamossa ja masuunissa tehokkaasti vaativat pieniä muutoksia laitteistoon sekä seurattaviin parametreihin, kuten lämpötilaan sekä aineen syötön nopeuteen. (Cang et al. 2017)

4.3 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidin talteenotto eli CCS (Carbon Capture and Storage) tarkoittaa erilaisia menetelmiä, joilla hiilidioksidia voidaan kerätä päästönlähteistä, niin ettei se päädy ilmakehään. Kaupallisessa käytössä on jo olemassa tekniikoita, mutta CCS ei ole vielä globaalilla mittakaavalla laajasti käytössä päästöintensiivisessä toiminnassa. (Adjiman et al. 2018) Taulukossa 5 on esitetty, missä kaikissa tutkittavissa prosesseissa CCS tekniikka on mahdollista soveltaa.

Taulukko 5. *Mahdolliset CCS tekniikan sovelluskohteet prosesseissa.*

Teollisuuden ala	CCS tekniikan käyttökohte
terästeollisuus	<ul style="list-style-type: none"> • Malmin esikäsittely. • Masuunin kattilalaitos.
alumiiniteollisuus	<ul style="list-style-type: none"> • Bayer prosessin voimalaitos. • Hall–Heroult-prosessin elektolyytikkenno.
kupariteollisuus	<ul style="list-style-type: none"> • Sulatusuuni. • Anodiuuni.
kaikki alat	<ul style="list-style-type: none"> • Tuotantolaitokselle energiaa tuottavat voimalaitokset.

Hiilidioksidin talteenotto soveltuu parhaiten isoihin pistemäisiin päästölähteisiin, kuten voimalaitoksiin, masuuneihin sekä sementtiteollisuuteen. Kupariteollisuudessa sulatus- ja anodiuneihin sekä alumiiniteollisuuden elektrolyysikennoon tekniikkaa on vaikeampaa soveltaa. Sen sijaan CCS-tekniikka soveltuu hyvin terästeollisuuteen ja sitä on tutkittu laajasti, etenkin masuuniprosesseissa. (Adjiman et al. 2018; Mandova et al. 2019) Teollisuuteen parhaiten soveltuva talteenottotekniikka on talteenotto amiinipesureilla, jotka sitovat hiilidioksidia kaasusta emäksiseen amiiniliuokseen. Noin 40°C:ssa olevasta kaasusta hiilidioksidi liukenee pesuveteen, josta se vapautetaan ja säilötään nostamalla lämpötilaa. Talteenottoprosentti on yleensä luokkaa 50–70 %, joten pelkkä CCS ei tee prosessista hiilineutraalia. Tekniikan käyttö edellyttää myös energiaa laitteiston käytössä, joka taas lisää prosessin kokonaisenergiankulutusta. (Adjiman et al. 2018)

Talteenottotekniikan soveltamista teollisuuteen hankaloittaa useat päästölähteet prosesseissa. Tekniikkaa pitäisi soveltaa useissa prosessivaiheissa, mikä lisää investointi ja käyttökustannuksia. (Adjiman et al. 2018) Esimerkiksi EU-alueella CCS tekniikan käyttö maksaa arviolta 80 € tonnilta hiilidioksidia terästeollisuudessa (Mandova et al. 2019). Lisäkustannusten myötä toiminnasta saattaa tulla taloudellisesti kannattamatonta globaaleilla markkinoilla. Myös hiilidioksidin loppusijoitus talteenoton jälkeen tuottaa kustannuksia. Hyötynä menetelmässä on se, että sitä voidaan soveltaa helposti jo olemassa oleviin tuotantolaitoksiin ilman, että prosessia täytyisi muuttaa merkittävästi (Adjiman et al. 2018).

4.4 Kierrätyksen lisääminen

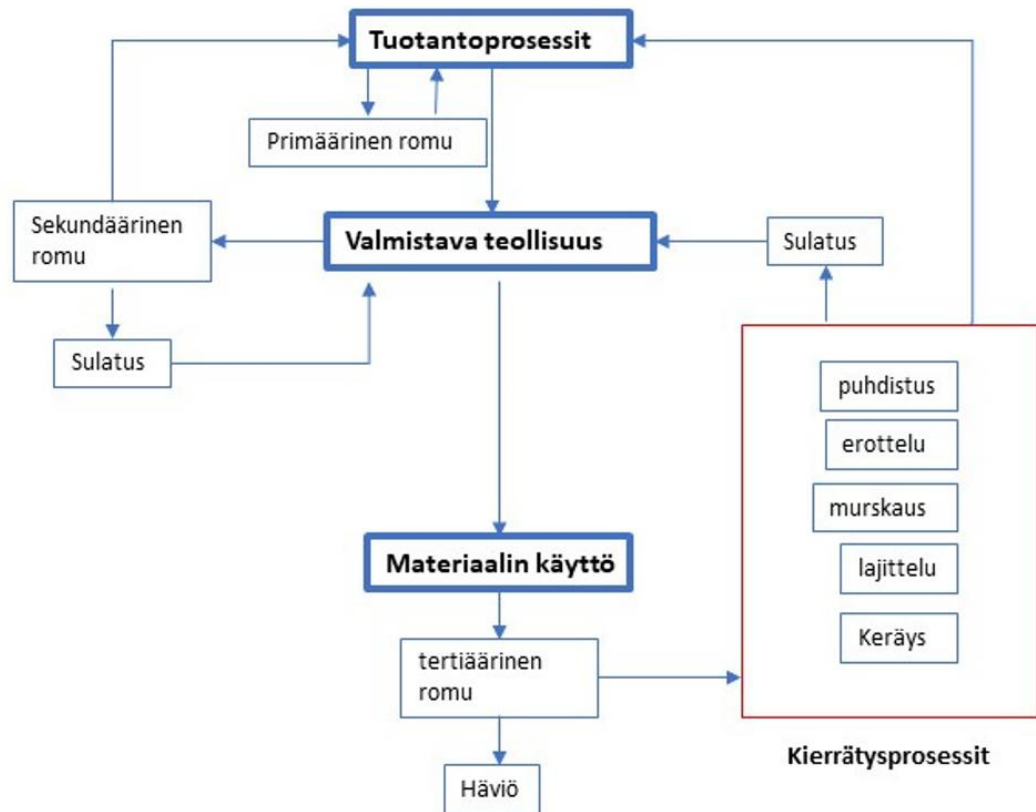
Taulukosta 2 voidaan huomata, että tutkittavien metallien valmistaminen kierrätysmateriaalista synnyttää merkittävästi vähemmän päästöjä kuin neitseellisen metallin valmistaminen. Teräksen ja kuparin päästöt ovat kierrätettäessä noin viidesosan uuden metallin valmistamisen päästöistä ja alumiinin kohdalla jopa 95 % pienemmät. Päästöjä vähentää myös se, että tarve louhia uutta kaivannaismateriaalia maaperästä vähenee. Idealisessa tilanteessa kaikki käytöstä poistuva materiaali voitaisiin saattaa uudelleen käyttöön. Todellisuudessa tämä ei ole mahdollista, sillä prosesseissa on jonkin verran häviöitä ja lisäksi kysynnän kasvaessa markkinoille on tuotava neitseellistä materiaalia.

Potentiaalia kierrätysasteen kasvattamiseen on. Esimerkiksi kasvattamalla teräksen kierrätysastetta, voidaan täyttää teräksen kasvava kysyntä kokonaan kierrätysteräksellä, jos neitseellisen teräksen tuotanto pysyy ennallaan. EU-alueella jopa 85 % teräksen kysynnästä on mahdollista täyttää kierrätysteräksellä vuonna 2050. Globaalilla tasolla noin puolet kysynnästä voitaisiin täyttää kierrätetyllä teräksellä. Alumiinin kohdalla kierrätysasteen nostaminen on hankalampaa, koska alumiinin kysyntä kasvaa nopeasti.

Esimerkiksi sähköautojen kasvanut kysyntä on kasvattanut myös alumiinin kysyntää. Lisäksi alumiinia häviää noin 20–30 % kulutussyklissä, mikä johtuu muun muassa bayer-prosessin mittavasta jätelietteen määrästä. Alumiinia siirtyy helposti jätelietteeseen prosessin aikana, josta sitä on vaikeaa siivota pois. Kierrätysalumiinista valmistetaan usein myös huonolaatuisempaa materiaalia (downcycling), jota ei voi käyttää kaikkiin sovelluskohteisiin. Jos materiaalihukkaa saadaan vähennettyä, arviolta noin puolet globaalista alumiinin kysynnästä voitaisiin tyydyttää kierrättämällä vuonna 2050. (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 64–65, 96–104) Kuparin tuotannossa kierrätyksellä on kaikista tärkein rooli. Ei vain päästöjen hillinnän näkökulmasta, vaan materiaalin saatavuuden turvaamiseksi. Kuparin kierrätyksestä tekee hankalaa sen puhtausvaatimukset eri sovelluksissa. Joissain tuotteissa vaaditaan erittäin puhdasta kuparia, mutta esimerkiksi putkistossa puhtaudella ei ole niin suurta merkitystä. Kuparin keräämisen helppous eri sovelluksista vaihtelee myös. Kuparijohdoista on helppo kerätä kuparia, mutta pienistä elektronisista laitteista se saattaa olla hyvin vaikeaa. (Björkman & Samuelsson 2014b)

Kierrätettävä metalli voidaan yleisesti jakaa kolmeen osaan sen sijainnin mukaan kulutussyklissä. Primäärinen romu syntyy jo tuotantolaitoksissa prosessihäviönä. Se voidaan kerätä talteen ja syöttää takaisin prosessiin. Sekundaarinen romu syntyy tehtaissa työstettäessä metallia. Tämä romu on yleensä hyvin puhdasta ja helppo lajitella sekä prosessoida. Tertiäärinen romu (old scrap) syntyy kuluttajilta, kun tuotteita ei enää käytetä. Tämä romu on vaikeaa kerätä ja lajitella. Se saattaa sisältää paljon epäpuhtauksia sovelluskohteen mukaan. (Björkman & Samuelsson 2014a; Björkman & Samuelsson

2014b; Schlesinger 2014, s. 31) Materiaalivirtojen kulku kierrätysykyllisissä tutkittavien metallien osalta on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Metallien materiaalivirrat kulutusykyllisissä. Muokattu lähteistä (Björkman & Samuelsson 2014a; Björkman & Samuelsson 2014b; Schlesinger 2014, s. 31).

Parhaat keinot kierrätysasteen kasvattamiseksi ovat häviöiden ehkäiseminen jalostus-, tuotanto-, keräys- ja erotteluvaiheissa. Lisäksi kierrätyspotentiaalia voidaan tehostaa kierrätetyn materiaalin jalostusasteen pitämällä korkealla (ei downcycling-ilmiötä) ja välttämällä kontaminaatioita uusiomateriaalien prosessointia haittaavien materiaalien kanssa (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 65). Nämä toimet voidaan toteuttaa parantamalla prosessien tehokkuutta, kehittämällä keräys- ja lajitteluverkostoja sekä parantamalla kierrätysmateriaalin erotusprosesseja. Kierrätystä helpottaa myös tuotteen kierrätysmahdollisuuksien huomioiminen jo tuotekehitys ja suunnitteluvaiheissa.

4.5 Energiätehokkuuden kasvattaminen

Kasvattamalla prosessien energiätehokkuutta, tuotannon vaatima energian määrä yksikköä kohden laskee. Seurauksena syntyy myös vähemmän päästöjä ja tuotannon kustannukset laskevat. Pelkällä energiätehokkuuden lisäämisellä ei voida päästä täysin

hiilineutraaliin tuotantoon, vaan lisäksi vaaditaan muita toimenpiteitä, joita tässä luvussa on esitelty. Energiatehokkaalla tuotannolla voidaan kumminkin minimoida myös vähäpäästöisten ratkaisujen hiilijalanjälkeä sekä tehdä hiilineutraalista tuotannosta taloudellisesti kannattavaa ja kilpailukykyistä kansainvälisillä markkinoilla.

4.5.1 Energiatehokkaat masuunit

Raudan tuotannon energiatehokkuuden parantamista on tutkittu muokkaamalla hieman masuuniprosessia. Energiatehokkuutta sekä päästöjä voidaan vähentää käyttämällä ilmapuhalluksen sijaan happikaasua, jossa ei ole mukana lainkaan typpeä. Näin tapahtuvat pelkistysreaktiot tehostuvat ja koko masuunin tehokkuus paranee. Tehdyissä tutkimuksissa happipuhalluksen käyttö kaksinkertaisti masuunin tehokkuuden. Tutkimuksissa havaittiin myös, että masuunikaasujen lämpöarvo kasvoi, kun ne eivät sisältäneet typpeä. Tämän seurauksena terästehtaan voimalaitosten tehokkuus parani, mikä vaikutti myös prosessin tehokkuuden kasvuun. (Ariyama et al. 2019)

Kun masuunin tehokkuus paranee, niistä voidaan rakentaa pienempikokoisia. Pienemmän koon ansiosta rautamalmin ja hiilen ei tarvitse olla yhtä hyvänlaatuista kuin perinteisessä masuuniprosessissa, jossa malmia sintrataan tai pelletoidaan ja kivihiiltä kokosataan. Tämä johtuu siitä, että pienempikokoisessa masuunissa malmin ja koksen ei tarvitse olla yhtä kestäviä fyysisiltä ominaisuuksiltaan. Huonompilaatuisten lähtöaineiden käyttö vähentää tarvetta esikäsitteilylle, jonka seurauksena energiaa säästyy ja kustannukset laskevat. Tämä mahdollistaa myös biopohjaisen pelkistimen käytön lisäämisen prosessissa. (Ariyama et al. 2019) Luvussa 4.2.3 todettiin, että biopohjainen hiili ja koksi murenee helpommin kuin kivihiilipohjainen koksi, eikä sillä siksi voida korvata kivihiiltä kokonaan perinteisissä suurikokoisissa masuuneissa (Cang et al. 2017). Biopohjaisen pelkistimen käyttö vähentää myös syntyviä nettopäästöjä. Kun käytettiin pelkästään kivihiiltä, voitiin hiilidioksidin nettopäästöjä laskea 10–15 % tavanomaiseen masuuniin verrattuna. Toisaalta happirikkaan puhalluksen seurauksena CCS-tekniikkaa voidaan käyttää tehokkaasti masuunissa, kun kaasut koostuvat suurimmaksi osaksi hiilidioksidista. (Ariyama et al. 2019)

4.5.2 Energiatehokkuus kupariteollisuudessa

Kupariteollisuudessa energiankäyttöä voidaan pienentää keskittymällä energiatehokkaiden laitteistojen käyttöön jokaisessa prosessivaiheessa. Kuparin tuotannossa on monta vaihetta, joten varsinkin tehokkaat uunit vaikuttavat merkittävästi tuotannon päästöihin.

Vuonna 2016 sulatusuuneissa alhaisin energiankäyttö oli 2,05 MWh yhden tonnin tuotamiseen. Parhaan käytössä olevan tekniikan mukaan (BAT, Best Available Technology) energiaa tarvittaisiin tonnia kohden vain 1,75 MWh. Parhaaksi tekniikaksi sulatusuunien kohdalla luetaan Outokummun kehittämä liekkisulatusuuni. Myös Mitshubishin kehittämä jatkuvatoimista prosessia pidetään energiatehokkaana vaihtoehtona. (Bergesen et al. 2016) Lisäksi siirtyminen polttoaineita käyttävistä sulatusuuneista sähköuuneihin pyrometallurgisessa prosessissa ja kierrätysmateriaalin sulatuksessa lisää niiden energiatehokkuutta (Giurco et al. 2022).

Sähkökemiallisessa prosessivaiheessa energiankäyttöä voidaan tehostaa pitämällä kytkennät maksimitehokkuudessa koko laitoksessa. Lisäksi lämpöhäviöitä voidaan vähentää eristämällä kennoja hyvin. (Davenport et al. 2011, s 269)

4.5.3 Energiatehokas alumiinin tuotanto

Alumiiniteollisuudessa energiatehokkuus on ollut huomion kohteena jo pitkään suuren energiankulutuksen vuoksi. Suurimmat mahdollisuudet energiatehokkuuden kasvattamiseen ovat Hall–Heroult prosessissa. (Das 2012) Alumiinioksidin tuotannossa bayer-prosessilla on mahdollista tehdä myös parannuksia, mutta prosessin energiatehokkuutta on jo parannettu esimerkiksi keräämällä jäähdytysvaiheessa lämpöenergiaa talteen ja hyödyntämällä sitä kuumennuksessa liuotus- tai kalsinointivaiheessa (Lumely 2011, luku 2). Taulukossa 4 esitetty 1,5 tonnin päästöarvo bayer-prosessille on parhaalla käytössä olevalla tekniikalla 1,4 tonnia tuotettua alumiinitonnia kohden (Kvande et al. 2020). Yksi merkittävä toimenpide, jolla voidaan parantaa prosessin energiatehokkuutta, on voimalaitoskattilatyypin leijupetien hyödyntäminen kalsinoinnissa nykyisten pyörivien kalsinaattoreiden sijaan (Das 2012).

Hall–Heroult-prosessissa voidaan kehittää uusia katodeja korvamaan vanhoja käytössä olevia grafiittikatodeja ja parantaa kennojen toimintaolosuhteita minimoimaan energiankulutuksen optimoimalla kennojen dimensiot (Das 2012; Tabereaux 2018). Kennojen vaatima energian määrä on vähentynyt 2000-luvulla. Uusimmat tuotantolaitokset vaativat keskimäärin hieman yli 13 MWh energiaa tonnia kohden ja osa tuotantolaitoksista pääsee jopa 12,2 MWh lyhentämällä katodin ja anodin välistä etäisyyttä ja parantamalla reaktion stabiiliutta. (Tabereaux 2018) Tehokkuuden lisäys ei ole kumminkaan ole merkittävässä määrin vähentänyt päästöjä, sillä fossiilisten polttoaineiden käyttö on lisääntynyt ja vähähiilisen ydinvoiman ja vesivoiman käyttö puolestaan vähentynyt alumiinin tuotannossa 2000-luvulla (Das 2012).

Kierrätysalumiinin tuotannossa sähköuunein käyttäminen polttoaineilla toimivien uunien sijaan lisää energiatehokkuutta ja vähentää polttoaineen tuhkasta aiheutuvia ongelmia (Schlesinger 2014, s. 178). Tämän lisäksi sähköntuotannon päästöjä on helpompaa kontrolloida kuin yhden sulatusuunin.

5. TOIMENPITEIDEN ARVIOINTIA

Luvussa 4 esitetyistä toimista mikään ei riitä yksinään viemään työssä tutkittavien metallien tuotantoa hiilineutraaliksi. Uusien tuotantomenetelmien ja tekniikoiden käyttöönotto tapahtuu hitaasti ja niillä ei voida korvata nopeasti jo olemassa olevia vanhempia tuotantolaitoksia, jotka eivät ole käyttöikänsä päässä. Kierrättämällä ei pystytä vastaamaan kaikkeen kysyntään ja fossiilivapaa energia sekä CCS saattaa tehdä toiminnasta kannattamatonta. Globaalilla tasolla on hankalaa arvioida, miten paljon eri toimenpiteitä pitäisi painottaa kunkin metallin kohdalla, jotta tuotannosta tulisi hiilineutraalia, koska eri talousalueilla on erilaiset toimintaedellytykset ja ympäristölliset tekijät. Bioenergian ja fossiilivapaan sähkö saatavuus sekä rahoitusmarkkinoiden kyky ja halukkuus investointeihin vaihtelee. Myös poliittinen tahto vähähiiliseen teollisuuden tukemiseen voi vaihdella. Kun alueellista tuotantoa suunnitellaan, hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamista on tarkasteltava käytössä olevien resurssien mukaan ja valittava niitä parhaiten tukevat toimenpiteet. Optimointi saattaa olla välillä haastavaa, sillä resurssit, kuten kaivannaisesiintymät, osaava tutkimus ja tuotekehityssektori sekä fossiilivapaa energia, saattavat sijaita kaukana toisistaan. Tämän vuoksi myös eri toimijoiden yhteistyö ja verkostoituneisuus on tärkeässä roolissa.

5.1 Toimenpiteet tuotantolaitosten näkökulmasta

Tuotantolaitosten päästöjä vähentävät toimenpiteet ovat siirtyminen fossiilivapaaseen energiaan, uudet tekniikat, energiatehokkuus sekä CCS-tekniikka. Toimenpiteiden allokoinnissa tuotantolaitoksiin, on otettava huomioon tulevaisuudessa rakennettavat laitokset sekä jo olemassa olevat vanhat laitokset.

5.1.1 Uudet laitokset

Suunniteltaessa uusia tuotantolaitoksia, olisi lähtökohdaksi otettava uusimmat vähähiiliset tekniikat ja tuotantomenetelmät. Näin päästään siirtymään pois vähitellen vanhoista saastuttavista tuotantotavoista. Esimerkiksi Alueilla, jossa on saatavilla paljon ydinvoimaa ja vesivoimaa perustuvaa fossiilivapaata sähköenergiaa, kannattaa keskittää alumiinintuotantoa sekä vetyyn perustuvaa terästeollisuutta. Sen sijaan alueilla, jossa on saatavissa paremmin bioenergiaa, kannattaa terästeollisuuden vaihtoehtona tarkastella energiatehokkaita pienikokoisia masuuneja, joissa voidaan käyttää tehokkaasti biohiiltä. Esimerkiksi Etelä-Amerikassa on saatavilla paljon metsäteollisuuden ja maatalouden

residuaalia, jota voidaan hyödyntää bioenergiana. Brasiliassa on jo tehty kokeiluja biohiilen käytöstä perinteisemmissä, mutta pienemmissä masuuneissa (Cang et al. 2017) Energiatehokkaiden masuunien lisäksi voidaan rakentaa suorapelkistykseen perustuvia tuotantolaitoksia, jos saatavilla on runsaasti biokaasua.

Karboterminen alumiinintuotanto sopii päiväntasaajan lähetyville kuumille alueille, jossa voidaan tuottaa tehokkaasti lämpöenergiaa hyödyntäen auringon säteilyä (Epstein & Vishnevetsky 2015). Karboterminen alumiinintuotanto tarvitsee myös lisää tuotekehitys ja tutkimusresursseja, niin että menetelmä olisi varteenotettava vaihtoehto Hall–Heroult-prosessille.

Haasteena saattaa olla kumminkin materiaalien ja energianlähteiden sijoittuminen kauas toisistaan, jolloin kaivannaismateriaalia olisi kuljetettava kauas louhoksilta prosessoitavaksi. Hall–Heroult-prosessiin perustuvissa tuotantolaitoksissa tulisi pyrkiä ottamaan käyttöön inerttejä katodeja.

Hiilivetympolttoaineita tulisi pyrkiä korvaamaan mahdollisuuksien mukaan sähköllä päästöjen vähentämiseksi. Esimerkiksi sulatusuuneissa kuparintuotannossa sekä kierrätysmateriaalin sulatuksessa kupari- ja alumiiniteollisuudessa polttoaineilla toimivan uunin sijasta tulisi käyttää sähköuuneja. Kupariteollisuudessa sähköistymisellä voidaan saavuttaa karkeasti arvioituna noin neljäsosa päästövähennyksistä pelkästään sähköistämällä tuotantoa (Giurco et al. 2022) Sähköntuotannon päästöjä on helpompaa hallita kuin yksittäisten prosessikomponenttien päästöjä.

5.1.2 Vanhat laitokset

Vanhemmissa tuotantolaitoksissa tulisi pyrkiä vaihtamaan fossiilinen energia hiilineutraaliin sähköenergiaan ja biopolttoaineisiin mahdollisimman nopeasti. Jos bioenergia ei ole mahdollinen vaihtoehto sen saatavuuden vuoksi, tulisi ottaa käyttöön CCS-tekniikka. Varsinkin isoissa masuuneissa, joissa kaikkea kivihiiltä ei voida korvata biohiilellä. CCS-tekniikka mahdollistaa myös masuunikaasujen kierrättämisen masuunissa, mikä lisää masuunin energiatehokkuutta (Ariyama et al. 2019).

Päästöjen leikkaamista on mahdollista ohjata poliittisilla päätöksillä esimerkiksi tuemalla CCS-tekniikkaa ja ottamalla käyttöön erilaisia hiiliverotusmenettelyjä, jolloin saastuttaminen tulisi kalliimmaksi kuin päästöjen leikkaaminen.

5.2 Bioenergian riittävyys ja sähköistyminen

Bioenergian käytössä ja tuotannossa on ongelmallista raaka-aineiden tuotantokapasiteetti bioenergian kasvavaan kysyntään nähden. Biomassan käyttö on kestäväällä pohjalla vain, jos biomassassa uusiutuu vähintään yhtä nopeasti kuin sitä käytetään. Kysyntä biomassalle kasvaa, kun pyritään irti fossiilisista polttoaineista biojalostustuotteiden ja bioenergian muodossa. (Enkvist et al. 2021) Kestämätön maa- ja metsätalous ei tee bioenergiasta kestäväää.

Esimerkiksi vuonna 2021 EU-alueella biomateriaalin kysyntä on noin 10,3 EJ energiaa biomassan muodossa, josta 6 EJ on bioenergiaa ja loput biojalostustuotteita. Kysynnän on arvioitu kasvavan osaksi vihreän siirtymän vaikutuksesta vuoteen 2050 noin 18–19 EJ, josta bioenergian osuus olisi 12–13 EJ. Kestäväällä pohjalla olevan tuotantokapasiteetin sen sijaan arvellaan olevan vuonna 2050 vain noin 11–13 EJ. (Enkvist et al. 2021, s. 14–20)

Jos bioenergian kysyntä kasvaa maailmanlaajuisesti vihreän siirtymän myötä, saattaa seurata merkittäviä ongelmia luonnontilan heikkenemisessä ja biotuotteiden saatavuudessa. Tämä vuoksi teollisuudessa olisi pyrittävä käyttämään sähköenergiaa hiilivety-polttoaineiden sijaan. Sähköä voidaan tuottaa esimerkiksi ydinvoimalla, vesivoimalla tai aurinkovoimalla. Luvussa 5.1.1 todettiin lisäksi sähköuunien olevan energiatehokkaampia kuin hiilivety-polttoaineita käyttävät sulatusuunit.

Toisaalta sähköistymisessäkin on omat haasteensa. Sähköä kuluttavat prosessit ovat hiilineutraaleja vain, jos niissä käytettävä sähköenergia on tuotettu hiilineutraalisti. Hiilineutraaliuden takaamiseksi fossiilivapaa sähköntuotantokapasiteetin on oltava tarpeeksi suuri. Mikäli esimerkiksi alumiinin kysyntä kasvaa taulukon 1 mukaan vuoteen 2050 ja tuotantomuodot pysyisivät samanlaisina kuin nykytilanteessa, vaadittaisiin 1,335 terawattituntia hiilineutraalia sähköenergiaa nykyisen sähkönkulutuksen lisäksi pelkästään alumiinin tuotantoon (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 103).

Myös vetyyn perustuvan terästuotannon päästöt ovat pitkälti riippuvaisia vedyn elektrolyysissä käytettävän sähköenergian päästöistä. Oletuksena on, että vetyä tuotetaan fossiilivapaalla sähköllä. Ongelmaksi menetelmän laajenemisessa saattaa nousta fossiilivapaan sähköntuotannon kapasiteetin riittävyys terästeollisuuden käyttöön. LTE-tekniikka (Low Temperature Electrolysis) kuluttaa 50–60 kWh energiaa yhden vetykilon tuottamiseen. HTE-tekniikka (High Temperature Electrolysis) vaatii puolestaan 37 kWh energiaa kiloa kohden, mutta veden on oltava höyrynä, joten energiaa vaaditaan myös veden höyrystämiseen. (Andersson et al. 2020) Oletetaan, että vetyyn perustuva tuotanto tapahtuu reaktion (17) mukaan, teräksen kysyntä vuonna 2050 olisi taulukon 1

mukaan 4 200 miljoonaa tonnia, josta 30 % tuotettaisiin vetytekniikalla, joka kuluttaa energiaa 50 kWh/kg. Rektion (17) mukaan stoikiometrisesti vetyä tarvittaisiin yhden teräskilon tuottamiseen noin 0,054 kg. Jos terästä tuotetaan vetytekniikalla 1 260 miljoonaa tonnia (30 % odotetusta tuotannosta), vaatisi tämä noin 68,22 miljoonaa tonnia vetyä, jonka tuottamiseen kuluisi energiaa noin 4 311 GWh.

5.3 Kierrätyspotentiaali

Tehokkaalla kierrätyksellä voidaan laskea tuotannosta ja kaivoksista syntyviä päästöjä sekä energiankulutusta. Tämä myös parantaa fossiilisen energian käyttöpotentiaalia metallien valmistuksessa laskemalla tuotantoon tarvittavaa fossiilivapaata energiantuotantokapasiteettia. Suurella kierrätysasteella saman metallimäärän tuottamiseen tarvitaan vähemmän energiaa, josta iso osa on mahdollista tuottaa vielä rajallisella fossiilivapaalla energiakapasiteetilla. Kierrätysasteen nopea nostaminen voisi siis nopeuttaa myös vähähiilisten tuotantomenetelmien käyttöönottoa.

Varsinkin kehittyneissä talouksissa kierrätyksellä on suuri potentiaali vastata kysyntään ja laskea päästöjä uusien, vähäpäästöisten tuotantomenetelmien kanssa. Kehittyvissä talouksissa ei ole sen sijaan potentiaali ei ole yhtä suuri, koska käytössä olevan materiaalin määrä on pienempi. (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 54–110) Kehittyviin talouksiin pitäisi investoida kestävästi niin, että tuotantokapasiteettia saadaan rakennettua hiilineutraaliksi.

Lajittelun ja keräyksen tehostaminen saattaa vaatia myös jätelainsäädäntöön ja jätteen maidenvälisen kuljettamiseen liittyvän lainsäädännön päivittämistä. Pitkälle jalostettujen tuotteiden kierrätettävyyteen vaikuttaa suurimmaksi osaksi kierrätyksen huomioiminen tuotesuunnitteluvaiheessa. Suurin osa häviöistä kierrätyksessä tapahtuu kulutussyklissä poistuvan materiaalin keräyksessä ja lajittelussa, jossa materiaali häviää yleensä kaatopaikoille. Materiaalikierron tulisi olla suljetussa syklissä, jossa materiaalin tila on koko ajan tiedossa ja se voidaan viedä siten helposti kierrätettäväksi. (Reuter & Worrel 2014)

5.4 Vuoden 2050 skenaariotarkastelu

Tehdyn katsauksen perusteella voidaan luoda erilaisia skenaarioita päästöjen kehittymisestä. Tehdään tarkastelu, jossa pyritään ennustamaan vuoden 2050 päästöjä, kun luvussa 4 esitetyt toimenpiteet kohdistetaan tietyillä painotuksilla globaaliin tuotantomääriin. Oletetaan kierrätyksen osuudeksi 50 % jokaiselle metallille. Tämän on arvioitu olevan globaalilla tasolla mahdollista ainakin teräkselle ja alumiinille (Enkvist & Klevnäs 2018, s. 54–112). Oletetaan vuoden 2050 globaaliksi kysynnäksi taulukossa 1 esitetyt

kysynnät ja päästöarvot taulukon 2 mukaan. Päästöt saadaan laskettua kertomalla taulukossa 1 esitetyt vuoden 2050 kysynnät taulukon 2 päästöarvoilla. Taulukossa 6 on esitetty tuotantomäärät ja kierrätyksen osuudet sekä oletetut päästöt ilman muita toimenpiteitä.

Taulukko 6. *Tutkittavien metallien tuotantomäärät, kierrätysaste ja päästöt vuonna 2050. Laskennassa on käytetty taulukoiden 1 ja 2 lähteiden tietoja.*

Metalli	Kysyntä (Mt)	Kierrätyksen osuus (%)	Primäärinen tuotanto (Mt)	Kokonaispäästöt (Mt CO ₂ ekv. / a)
Teräs	4200	50	2100	4494
Alumiini	219,45	50	109,73	3983,02
Kupari	30	50	15	91,5
Yhteensä				8568,52

Taulukon 6 kokonaispäästöjä saadaan vielä pienennettyä, kun kohdennetaan tuotantoon päästövähennystoimenpiteitä. Taulukossa 7 on esitetty toimenpiteiden päästövähennyspotentiaaleja tavanomaiseen tuotantomenetelmään verrattuna.

Taulukko 7. *Metallien päästövähennystoimenpiteitä ja niiden vähennyspotentiaaleja tavanomaiseen tuotantomenetelmään nähden. Muokattu lähteistä (Adjiman et al. 2018¹); Enkvist & Klevnäs 2018, s. 61²); Ariyama et al. 2019³); Kvande et al. 2020⁴); Pei et al. 2020⁵); Giurco et al. 2022⁶).*

Metalli	Toimenpide	Vähennyspotentiaali (%)
Teräs	Suorapelkistys ²⁾	40
	Vetyyn perustuva tuotanto ⁵⁾	94,8
	happipuhallus masuuni (OBF) ³⁾	15
	CCS ¹⁾	70
	Biohiili	-
Alumiini	inertit elektrodit ⁴⁾	10,4
Kupari	sähköistäminen & energiatehokkuus ⁶⁾	43

Taulukossa 7 ei ole mainittuna fossiilivapaata energiaa, koska sille on hankalaa antaa yksittäistä numeerista arvoa. Fossiilivapaata energiaa voidaan käyttää jokaisessa prosessissa vähentämään päästöjä.

Tehdään tarkastelu teräkselle. Lasketaan ensin tuotantomäärät eri toimenpiteille. Niiden kautta saadaan laskettua vuotuiset päästöt kertomalla tuotantomäärät taulukon 1 tonnia kohden olevilla päästöarvoilla ja taulukossa 7 olevilla vähennyspotentiaaleilla.

Laskemalla päästöt yhteen saadaan kokonaispäästöt. Taulukossa 8 on esitetty tarkastelu teräksen päästöille. Tuotantomuotojen todellista painotusta on vaikeaa arvioida, joten käytetään oletuksia.

Taulukko 8. *Teräksen tuotantomuotojen oletettu jakautuminen 2050 ja kustakin tuotantomuodosta aiheutuvat päästöt. Laskenta on tehty taulukoissa 1, 6 ja 7 esitetyistä tiedoista.*

Tuotantomuoto	Osuus tuotannosta (%)	Tuotantomäärä (Mt)	Päästöt (Mt CO ₂ ekv. / a)
suorapelkistys	30	630	689,85
vety	30	630	59,79
happipuhallus masuuni + CCS	30	630	293,19
tavanomainen masuuni + CCS	10	210	114,98
yhteensä		2100	1157,80

Päästöjä voidaan vielä alentaa biohiilellä. Oletetaan, että biohiilellä korvataan 20 % kivihiilestä. Päästöjä taulukon 8 masuuniprosesseissa syntyy yhteensä 408,16 Mt. Hiilidioksidin ainemäärä on silloin noin 9,274 Tmol, joka on myös pelkistävän hiilimonoksidin ainemäärä. Malmina on hematitiitti reaktioista (1)–(3) koostetun reaktion $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 9\text{CO} \rightarrow 9\text{CO}_2 + 6\text{Fe}$ mukaan. Hiiltä tarvitaan reaktion $\text{C} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ mukaan. Hiilen kokonaismassa on silloin 111,384 Mt. Jos 20 % korvataan biohiilellä, kivihiilestä peräisin olevan hiilen massaksi jää 89,107 Mt. Hiilen ainemäärä on nyt 7,419 Tmol, joka on myös hiilimonoksidin ja hiilidioksidin ainemäärä. Hiilidioksidin massa masuuniprosesseissa on silloin noin 326,53 Mt. Päästöjä saadaan siis laskettua biohiilellä vielä 81,63 Mt. Kokonaispäästöiksi saadaan nyt noin 1 076,17 Mt.

Oletetuilla tuotantomuotojen osuuksilla sekä CCS-tekniikan käyttöönotolla, päästöjä voidaan vähentää toimenpiteiden avulla 76 % taulukossa 6 esitettyyn arvoon nähden. Tarkastelussa on oletettu, että CCS-tekniikkaa otetaan käyttöön kaikissa masuuneja käytävissä laitoksissa.

Taulukossa 9 esitetään skenaariotarkastelu alumiinille, jonka tuotannossa fossiilivapaan sähköenergian osuuden on oletettu kasvavan 70 % sekä elektrolyysissä että bayer-prosessissa. Grafiittikatodien oletetaan vaihtuneen inertteihin katodeihin fossiilivapaassa tuotannossa. Päästöt fossiilivapaalle tuotannolle sekä grafiittielektrodeille saadaan kertomalla tuotantomäärät taulukon 1 päästöarvoilla sekä taulukon 4 päästöosuuksilla.

Päästöjä syntyy vain muista toimintaa tukevista prosesseista, joiden osuus päästöistä on 8,3 %.

Taulukko 9. *Alumiinin tuotannon päästöt 2050. Laskennassa on käytetty taulukoiden 1, 4 ja 6 arvoja.*

Toimenpide	Osuus tuotannosta (%)	Tuotantomäärä (Mt)	Päästöt (Mt CO ₂ ekv. / a)
Fossiilivapaa energia & inertit katodit	70	76,81	114,75
Fossiilinen energia	30	32,92	592,52
Yhteensä		109,73	707,27

Alumiinin tuotannon päästöjä saadaan laskettua radikaalisti uusiutuvan energian avulla. Päästöt ovat jopa pienemmät kuin taulukossa 3 esitetty arvo, joka on laskettu vuoden 2018 tiedoilla. Lisäksi, kun otetaan huomioon, että alumiinin tuotantomäärä on kasvanut. Kuparin tuotannossa sähköistämisellä ja energiatehokkaalla tuotannolla laskea päästöjä noin 43 %. Tämä tarkoittaisi, että taulukossa 6 ilmoitettu 91,5 miljoonan tonnin arvo saataisiin laskemaan 52,16 miljoonaan tonniin. Päästövähennyskeinojen ohella kuparintuotannossa tulisi ottaa huomioon myös malmin laadun heikkeneminen, joka voi ajaa kuparin tuotantomenetelmien kehitystä tulevaisuudessa enemmän kuin päästöjen vähentäminen, sillä kuparintuotannon päästöt ovat pienet verrattuna teräksen ja alumiinin tuotantoon. Sähköenergiaa kuluu elektrolyysissä keskimäärin 350 kWh tonnilta kuparia. Ottaen huomioon taulukon 15 kuparin tuotantomäärän, kuluu sähköä noin 5 250 TWh. IEA:n mukaan yhden kWh:n tuotannosta aiheutuu hiilidioksidipäästöjä noin 475 g (IEA 2019). Tämän mukaan vuoden 2050 elektrolyysin sähkönkulutuksesta aiheutuu globaalilla tasolla noin 2,49 Mt hiilidioksidipäästöt. Jos sähkö tuotetaan fossiilivapaasti, saadaan kuparintuotannon päästöt laskemaan 49,67 Mt. Taulukossa 10 on esitetty yhteenvedo päästövähennyksistä.

Taulukko 10. Yhteenveto päästövähennyksistä.

Metalli	Päästöt ennen toimenpiteitä (Mt CO₂ekv. / a)	Päästöt toimenpiteiden jälkeen (Mt CO₂ekv. / a)	Vähennys (%)
Teräs	4494	1 076,17	76
Alumiini	3983,02	707,27	82
Kupari	91,50	49,67	46
yhteensä	8568,52	1 833,11	79

Täysin nollapäästöihin ei päästä minkään metallin osalta, mutta vähennykset ovat merkittäviä ainakin kyseisen tarkastelun osalta. Hiilineutraali tuotanto ei välttämättä vaadi täysin nollapäästöjä, vaan päästöt mukautetaan olemassa olevien hiilinielujen mukaan. Tarkastelussa ei huomioitu fossiilivapaata energiaa muuta kuin alumiinin valmistuksessa, sillä sitä voidaan kohdistaa jokaiseen tuotantovaiheeseen ainakin jollain tasolla. Päästöjä on siis vielä mahdollista laskea vaihtamalla energiaa fossiilivapaaseen energiaan. Ainakin kuparin tuotannossa elektrolyysissä tällä voidaan laskea päästöjä.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Teräksen, alumiinin ja kuparin tuotannosta aiheutuu globaalissa mittakaavassa merkittäviä määriä hiilidioksidipäästöjä, mikä johtuu niiden päästöintensiivisistä tuotantomenetelmistä sekä erittäin suurista tuotantomääristä. Kyseisten metallien valmistus vastaa noin 10 % maailman energiantuotannon ja teollisuuden päästöistä. Niiden tuotannolla on siis merkitystä, mikäli päästöjä halutaan leikata ja ilmaston lämpeneminen pitää alle 1,5 °C. Päästöt nousevat entisestään tulevaisuudessa, jos tuotantoa jatketaan samoilla menetelmillä, koska kysyntä todennäköisesti kasvaa tulevaisuudessa kehittyvien talouksien noustessa. Tämä saattaa johtaa etenkin kuparin saatavuusongelmiin, sillä nykyiset kuparivarannot eivät riitä täyttämään kasvavaa kysyntää kierrätysasteen pysyessä samalla tasolla.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella päästöjä voidaan laskea tehokkaasti viidellä eri toimenpiteellä:

- Otetaan käyttöön uusia, vähemmän saastuttavia tuotantomuotoja.
- Korvataan fossiilista energiaa fossiilivapaalla energialla, kuten ydin-, vesi-, tuuli-, aurinko- tai bioenergialla sekä masuuneissa käytettävää kivihiiltä biohiilellä.
- Lisätään kierrätysastetta ja vähennetään häviöitä.
- Käytetään hiilidioksidin talteenottotekniikkaa.
- Parannetaan prosessien energiatehokkuutta.

Parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen päästään, kun sovelletaan kaikkia toimenpiteitä ottaen huomioon toimintaympäristön rajoitteet esimerkiksi fossiilivapaan energian saatavuudessa tai kierrätysmahdollisuuksissa. Uudet tuotantolaitokset tulisi rakentaa vähäpäästöisiksi soveltaen uusia tuotantomenetelmiä ja vanhoissa laitoksissa tulisi ottaa käyttöön CCS-tekniikkaa ja fossiilivapaata energiaa päästöjen leikkaamiseksi. Tehokkaalla kierrättämisellä voidaan laskea päästöjä radikaalisti sekä hidastaa kuparivarantojen vähenemistä.

Ongelmia siirtymisessä hiilineutraaliin tuotantoon saattaa aiheuttaa bioenergian riittävyys niin, että biomassan tuotanto pysyy kestävällä pohjalla sekä fossiilivapaan sähkön tuotantokapasiteetin rajallisuus. Siirtymä hiilineutraaliin tuotantoon voidaan toteuttaa helpommin, jos tehdään määrätietoisia poliittisia päätöksiä tehostamaan siirtymää tekemällä saastuttamisesta taloudellisesti kannattamatonta ja parantamalla jätelainsäädäntöä kierrätysasteen nostamiseksi.

Vähäpäästöiset tuotantomenetelmät voivat avata myös uusia liikemahdollisuuksia yrityksille. Vanhat käytössä olevat menetelmät vastaavat yhä suurimmasta osasta teräksen, alumiinin ja kuparin globaalia tuotantoa, eikä uusia menetelmiä ole vielä laajamittaisessa kaupallisessa käytössä. Yritykset, jotka saavat vähäpäästöisiä tuotantomenetelmiä markkinoille ensimmäisenä, voivat vallata suuren markkinaosuuden tulevaisuudessa, jos saastuttaminen muuttuu entistä kalliimmaksi. Tutkimuksessa käsiteltävän aiheen tutkimusta voisi jatkaa selvittämällä toimenpiteiden käyttöönoton kustannuksia, investointitarpeita sekä aikataulua.

LÄHTEET

Adjiman, C.S., Anthony, E.J., Bardow, A., Boston, A., Brown, S., Bui, M., Fennell, P.S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L.A., Hallett, J.P., Herzog, H.J., Jackson, G., Kemper, J., et al., (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*, Vol.11(5), pp. 1062–1176.

Andersson, J., Cornell, A., Grönkvist, S. & Krüger, A. (2020). Integration of water electrolysis for fossil-free steel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.45(55), pp. 29966–29977.

Ariyama, T., Kawashiri, Y., Nouchi, T. & Takahashi, K. (2019). Diversification of the Ironmaking Process. Toward the Long-Term Global Goal for Carbon Dioxide Mitigation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, Vol.5(3), pp. 276–294.

Babich, A. & Senk, D. (2015). Recent developments in blast furnace iron-making technology. In Lu, L. (eds.). *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Elsevier Science & Technology. pp. 505–547.

Bergesen, J.D., Kulczycka, J., Lelek, Ł., Lewandowska, A. & Wirth, H. (2016). Environmental Impacts of Energy-Efficient Pyrometallurgical Copper Smelting Technologies: The Consequences of Technological Changes from 2010 to 2050. *Journal of Industrial Ecology*, Vol.20(2). pp. 304–316.

Bide, T., Brown, T.J., Deady E.A., Everett, P., Hobbs, S.F., Idoine, N.E., Kresse, C., Raycraft, E.R., Shaw, R.A. & Wrighton, C.E. (2020). *World mineral production 2014–2018*. British Geological Survey. Nottingham, UK. 101 p.

Björkman, B. & Samuelsson C. (2014a). Recycling of steel. In Worrell, E. & Reuter, M.A. (eds.) *Handbook of Recycling: State-Of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier, London, UNITED STATES. pp. 65–73.

Björkman, B. & Samuelsson C. (2014b). Copper recycling. In Worrell, E. & Reuter, M.A. (eds.) *Handbook of Recycling: State-Of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier, London, UNITED STATES. pp. 85–88.

Cang, D., Li, J., Li, X., Wei, R., Xu, C.C. & Zhang, L. (2017). Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.68, pp. 511–524.

Ciacci, L., Elshkaki, A., Graedel, T. E., & Reck, B.K. (2018). Resource Demand Scenarios for the Major Metals. *Environmental Science and Technology*, Vol.52(5), pp. 2491–2497.

CTCN. Smelt reduction for iron and steel sector. UN Climate Technology Center % Network. Available (cited 16.2.2022) <https://www.ctc-n.org/technologies/smelt-reduction-iron-and-steel-sector>

Davenport, W.G., King, M.J., Schlesinger, M.E., Sole, M.J. (2011). *Extractive metallurgy of copper*. 5th edition. Elsevier. Amsterdam. 481 p.

Das, S. (2012). Achieving Carbon Neutrality in the Global Aluminum Industry. *Journal of metals*, Vol.64(2), pp. 285–290.

Dietz, S., Irwin, W., Jahn V., Noels J. & Raus, B. (2019). Carbon Performance Assessment of Paper Producers: Note on Methodology. Transition Pathway Initiative. Saatavissa (viitattu 12.2.2022) <https://www.transitionpathwayinitiative.org/publications/78.pdf?type=Publication>

- Elzen, M.D., Kuramochi, T. & Peters, G. (2019). Global emissions trends and G20 status and outlook. In *The emissions gap report 2019*. United Nations Environment Programme. 108 p.
- Enkvist, P.-A. & Klevnäs, P. (2018). The Circular Economy - a Powerful Force for Climate Mitigation Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry. *Material Economics*. Available (cited 12.2.2022) <https://www.sitra.fi/julkaisut/circular-economy-powerful-force-climate-mitigation/>
- Enkvist, P.-A., Murray, K. & Klevnäs, P. (2021). EU Biomass Use in a Net-Zero Economy. A course correction for EU biomass. *Material Economics*. Available (cited 7.4.2022) <https://www.sitra.fi/julkaisut/eu-biomass-use-in-a-net-zero-economy/>
- Epstein, M., Halmann, M., Steinfeld, A. & Vishnevetsky, I. (2014). Vacuum Carbothermic Reduction of Alumina. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, Vol.35(2), pp. 126–135.
- Epstein, M. & Vishnevetsky, I. (2015). Solar carbothermic reduction of alumina, magnesia and boria under vacuum. *Solar Energy*, Vol.111, pp. 236–251.
- Fick, G., Mirgaux, O., Neau, P. & Patisson, F. (2014). Using Biomass for Pig Iron Production: A Technical, Environmental and Economical Assessment. *Waste and Biomass Valorization*, Vol.5(1), pp. 43–55.
- Frei, A., Halmann, M. & Steinfeld, A. (2011). Vacuum Carbothermic Reduction of Al₂O₃, BeO, MgO-CaO, TiO₂, ZrO₂, HfO₂ + ZrO₂, SiO₂, SiO₂ + Fe₂O₃, and GeO₂ to the Metals. A Thermodynamic Study. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, Vol.32(4), pp. 247–266.
- Gale, W., Kjärstad, J., Kraxner, F., Leduc, S., Mandova, H., Patrizio, P., Wang, C. & Wetterlund, E. 2019. Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production*, Vol.218, pp. 118–129.
- Giurco, D., Hata, S., Nakajima, K., Nansai, K., Northey, S., Watari, T. & Yokoi, R. (2022). Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.179, pp. 106118.
- Graedel, T.E. & Reck, B.K. (2014). Recycling in context. In Worrell, E. & Reuter, M.A. (eds.) *Handbook of Recycling: State-Of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier, London, UNITED STATES. pp. 17–27.
- Guan, D., Lei, T., Liang, X., Meng, J., Shan, Y., Tao, S., Zhang, Q. & Zheng, B. (2021). Adaptive CO₂ emissions mitigation strategies of global oil refineries in all age groups. *One Earth*. Vol.4(8), pp. 1114-1126.
- IEA (2019). *Global Energy & CO₂ Status Report 2019*. Available (Cited 18.4.2022) <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions>
- International Energy Agency (2022). *Tracking clean energy progress*. Available (cited 12.2.2022) <https://www.iea.org/topics/tracking-clean-energy-progress>
- International aluminium institute (2022). *Recycling*. Available (cited 7.2.2022) https://international-aluminium.org/work_areas/recycling/
- Kvande, H., Saevardottir, G. & Welch, B.J. (2020). Aluminum Production in the Times of Climate Change: The Global Challenge to Reduce the Carbon Footprint and Prevent Carbon Leakage. *Journal of metals*, Vol.72(1), pp. 296–308.
- Li, F., Zhao, Q., Chu, M., Tang, J., Liu, Z., Wang, J., & Li, S. (2020). Preparing high-purity iron by direct reduction–smelting separation of ultra-high-grade iron concentrate. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* Vol.27(4) pp. 454–462.

- Loibl, A. & Tercero Espinoza, L.A. (2021). Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.169, pp. 105462.
- Lu, L. Ooi, T.C., Li, X. (2015). Sintering emissions and their mitigation technologies. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Elsevier Science & Technology. pp. 551–558.
- Lu, L. & Ishiyama, O. (2015). Iron ore sintering. In Lu, L. (Eds.) *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Elsevier Science & Technology. pp. 395–504.
- Nilsson, A., Aragonés, M., Torralvo, F., Dunon, V., Angel, H., Komnitsas, K. & Willquist, K. (2017). A review of the carbon footprint of Cu and Zn production from primary and secondary sources. *Minerals*, Vol.7(9).
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G. M., Weng, Z. & Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.83, pp. 190–201.
- Lumley, R. (2011). *Fundamentals of aluminium metallurgy. Production, processing and applications*. Woodhead publishing limited. Cambridge, UK. 828 p.
- Metallinjalostajat ry (2014). Teräskirja. 9. painos. Metallinjalostajat ry. 110 s. Saatavilla <https://metallinjalostajat.teknologiateollisuus.fi/fi/tutkimusstrategia/mita-teras>
- Pei, M., Petäjämäki, M., Regnell, A. & Wijk, O. (2020). Toward a Fossil Free Future with HYBRIT: Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland. *Metals*, Vol.10(7), pp. 972.
- Rogelj, J. & Elzen, M.D. (2019). The emissions gap. In *The emissions gap report 2019*. United Nations Environment Programme. 108 p.
- Schlesinger, M.E. (2014). *Aluminum recycling*. Taylor & Francis. Boca Raton. 276 p.
- Tabereaux, A.T. (2018). Production of Primary Aluminum by Electrolysis. In Anderson, K., Kaufman, J.G. & Weritz, J. (Eds.) *ASM handbook. Volume 2A, Aluminum science and technology*. ASM International.
- Tiseo, I. (2021). Consumption of paper and cardboard 2007-2018. Statista. Available (cited 12.2.2022) <https://www.statista.com/statistics/270319/consumption-of-paper-and-cardboard-since-2006/>
- Vass, T., Levi, P., Gouy, A. & Mandová H. (2021a). Cement. Tracking report November–2021. International energy agency. Available (cited 12.2.2022) <https://www.iea.org/reports/cement>
- Vass, T., Levi, P., Gouy, A. & Mandová H. (2021b). Chemicals. Tracking report November–2021. International energy agency. Available (cited 12.2.2022) <https://www.iea.org/reports/chemicals>
- World Steel Association (2021). Total production of crude steel. World total 2021. Available (cited 7.2.2022) https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND