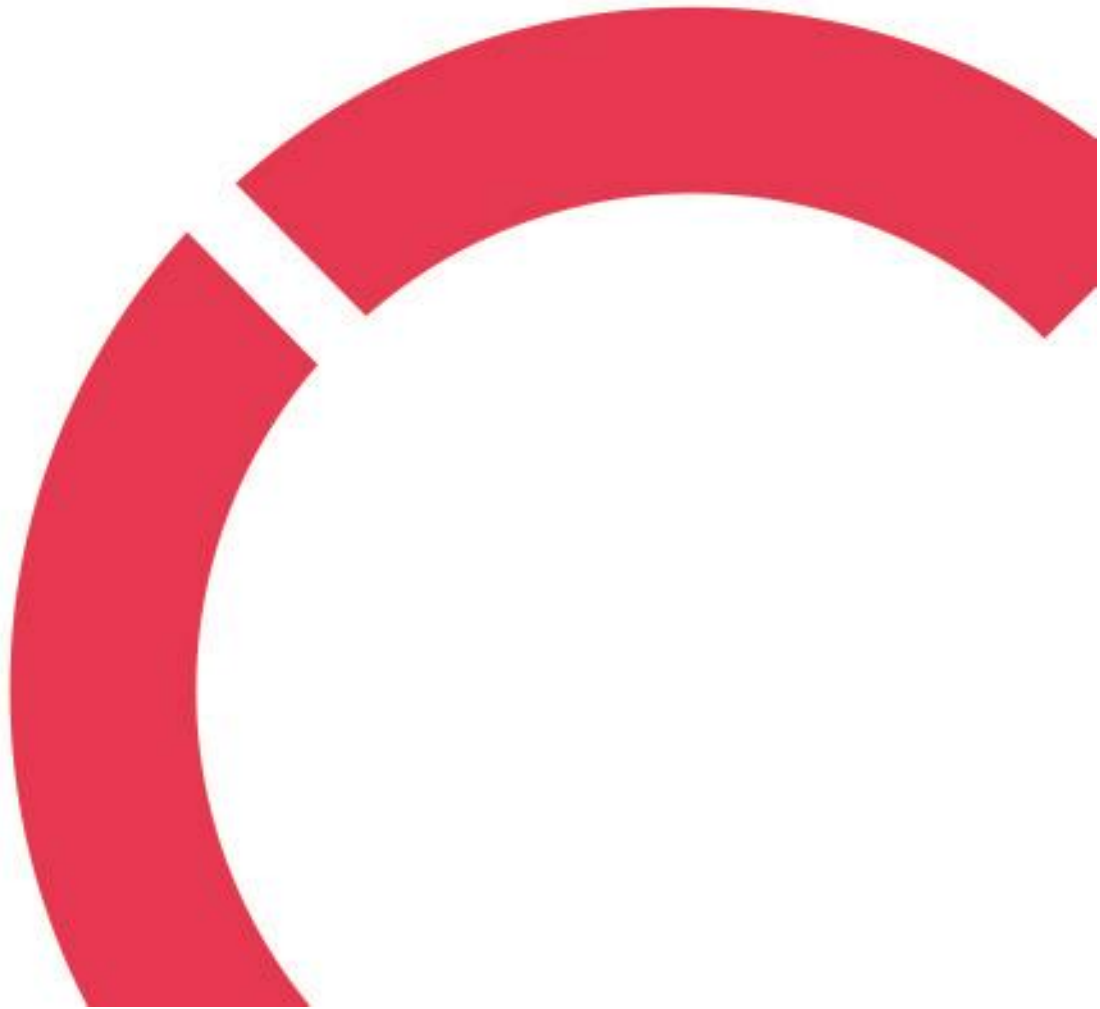


Ville Joki

KOBOLTIN PÄÄMALMIEN ELINKAARIEN VERTAILU

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutus
Kesäkuu 2023**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Kesäkuu 2023	Tekijä/tekijät Ville Joki
Koulutus Kemian tekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi Kobolttin päämalmien elinkaarien vertailu		
Työn ohjaaja Einar Nystedt		Sivumäärä 32
Työelämäohjaaja		
<p>Tämä opinnäytetyö on vertaileva tutkimus kobolttin kolmen päämalmin elinkaarista. Työ pyrkii myös antamaan yleistävän kuvan kobolttin elinkaarista.</p> <p>Keskeisimpinä vertailun kohteina ovat kerrosmaisen sakan isännöimät malmit, magmaattiset sulfidimalmit ja nikkelilateriittimalmit. Elinkaarista vertaillaan erityisesti tuotantoa, rikastusta ja haitallisuutta.</p> <p>Työn vertailumenetelmä tapahtuu korkeimpien ja alhaisimpien arvojen vertailulla. Mittaamattomia merkittäviä seikkoja otetaan myös huomioon. Vertailu onnistui malmeista jalosteisiin asti. Jalosteita tuottaessa elinkaaret alkavat yhdistyä, sillä jotkut elinkaaret tuottavat samoja jalosteita. Jalosteista voidaan periaatteessa valmistaa mitä vain lopputuotetta tarpeeksi pitkällä jatkojalostuksella.</p> <p>Loppuvertailussa tuli ilmi, että kerrosmaisen sakan isännöimillä malmeilla on korkein tuotanto ja saanti, ja ne vaikuttavat vähiten ilmastonmuutokseen kolmesta malmista. Magmaattisilla sulfidimalmeilla oli toiseksi korkein saanti ja vähäisin tarve jätteidenkäsittelylle. Nikkelilateriittimalmeilla saanti oli kaikista alhaisin ja energiankulutus korkea.</p>		

Asiasanat Elinkaari, kerrosmaisen sakan isännöimä kuparikoboltti, koboltti, lateriitti nikkelikuparikoboltti, magmaattinen nikkelikobolttisulfidi, vertailu

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date June 2023	Author Ville Joki
Degree programme Chemical Engineering		
Name of thesis Comparison Of Cobalt's Main Ore Life Cycles		
Centria supervisor Einar Nystedt		Pages 32
Instructor representing commissioning institution or company		
<p>This thesis is a comparative research of life cycles of cobalt's three main ores. The purpose of the thesis was also to give general information about cobalt's life cycles.</p> <p>The comparison mainly focuses on stratiform sediment-hosted ores, magmatic sulfide ores and nickel laterite ores. The comparison especially focuses on production, refining and harmfulness.</p> <p>The comparison method is done by comparing higher and lower values. Immeasurable values are also taken into account. The comparison was successful from ores to refinements. During refinery the life cycles begin to merge since some of the life cycles produced the same refinements. In principle any refinement may be processed into any end product with long enough processing.</p> <p>In the final comparison it was concluded that stratiform sediment-hosted ores had the highest production and recovery and had the lowest effect on global warming. Magmatic sulfide ores had the second highest recovery and the lowest need for waste treatment. Nickel laterite ores had the lowest recovery and a high energy consumption.</p>		

Key words

Cobalt, life cycle, comparison, laterite nickel-copper-cobalt ore, magmatic nickel-cobalt sulfide ore, stratiform-hosted copper-cobalt ore

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 LOUHINTA	2
2.1 Avolouhokset	3
2.2 Maanalaiset louhokset	4
3 RIKASTUS	5
3.1 Cu-Co rikastus.....	5
3.1.1 Painovoimaerotus.....	7
3.1.2 Happoliuotus.....	7
3.1.3 Vaahdotus	7
3.1.4 Pasutus	8
3.1.5 Kuparin liotinuutto	8
3.1.6 Sähkövoitto	9
3.1.7 Sulatus	9
3.2 Ni-Cu rikastus.....	10
3.3 Ni-Co rikastus.....	10
4 JALOSTEET	12
5 LOPPUTUOTTEET	14
5.1 Akut	14
5.2 Metallit	15
6 KIERRÄTYS	16
6.1 Akkujen kierrätys	16
6.2 Volframikarbidien kierrätys	17
7 HAITALLISUUS	18
8 VERTAILU	20
9 LOPPUPÄÄTELMÄ	22
LÄHTEET	23
KUVIOT	
KUVIO 1. Koboltti jalosteet 2020.	12
KUVIO 2. Koboltti tuotteet 2020.	14
KUVIO 3. Koboltti- kupari- ja nikkeli malmien rikastuksen haittojen vertailu toisiinsa.....	19
KUVAT	
KUVA 1. Katangan kupari avolouhos.	4
KUVA 1. Cu-Co-, Ni-Cu- ja Ni-Co malmien elinkaaret jalosteisiin asti.	20

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Kobolttin louhinta ja varannot vuonna 2022.	2
TAULUKKO 2. Kongon kuivatun koboltti hydroksidin tyypilliset arvot.....	6
TAULUKKO 3. Maailmanlaajuisien koboltti metallien tyypilliset arvot.	6
TAULUKKO 4. Valkoisen seoksen tyypilliset arvot.	7
TAULUKKO 5. Koboltti jalosteiden käyttökohteet.	13
TAULUKKO 6. Valettujen koboltti superseoksien tyypillinen koostumus.	17
TAULUKKO 7. Taottujen koboltti superseoksien tyypillinen koostumus.....	17
TAULUKKO 8. Koboltti-, kupari- ja nikkeli malmien rikastuksesta aiheutuvat haitat.	19
TAULUKKO 9. Cu-Co-, Ni-Cu- ja Ni-Co malmien vertailu.	21

1 JOHDANTO

Koboltti on hopeanharmaa ferromagneettinen metallinen alkuaine, jota louhitaan pääasiassa sen teknologisen monikäyttöisyyden vuoksi. Koboltin käyttö kohdistuu akkuihin, superseoksiin ja teollisiin kemikaaleihin. Koboltin lämmönjohtavuus ja sähkönjohtavuus ovat matalia, ja sillä on korkea kulutuksenkeston ja sulamispisteen. Metallialkuaineista koboltilla on kaikista korkein lämmönsietokyky. (U.S. Geological Survey 2017, 1.)

Tämä opinnäytetyö kohdistuu kolmeen kaikista kaivetuimpiin kobolttimalmeihin ja niiden elinkaarien suuntien vertailuun. Työ antaa yleistävän kuvan koboltin elinkaarista vertaillen niitä keskenään. Vuonna 2017 noin 98 % maailman koboltista louhittiin kolmesta eri malmityypistä: kerrosmaisesta sakan isännöimät malmit, magmaattiset sulfidi- ja nikkeliateriittimalmit. Vertailu keskittyy vahvasti näihin malmeihin, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 2. Vertailun pääkohteina ovat louhintamenetelmät, louhintamäärät, kobolttipitoisuus, kannattavuus, rikastuksen mutkattomuus, koboltin saanti, jätteet, ympäristölliset haitat, jalosteet, lopputuotteet ja kierrätys. Kongon demokraattinen tasavalta on ollut pitkään koboltin suurin louhija, ja se tuotti 70 % maailman koboltista vuonna 2022 (U.S. Geological Survey 2017, 1–2; U.S. Geological Survey 2023). Lopputuotteet- ja kierrätysvaiheissa koboltin alkuperäinen malmityyppi hämärtyy, sillä jalosteita voidaan jatkojalostaa mihin tahansa muotoon, kunhan jalostus pysyy kannattavana.

2 LOUHINTA

Kongon demokraattinen tasavalta on ollut pitkään maailman suurin koboltin louhija, lukuun ottamatta 1990-luvun tuotannon romahdusta. Monien kobolttikaivoksien toiminta kestää useita vuosikymmeniä. Vuonna 2022 Kongon tasavalta louhi 130 kilotonnia kobolttia, joka oli 70 % maailman louhinnasta. Toisena ja kolmantena tulivat Indonesia ja Venäjä, joiden molempien osuus oli noin 5 % maailman louhinnasta. Taulukossa 1 on esitetty vuoden 2022 mitatut ja Yhdysvaltojen arvioimat koboltin louhinta- ja varantomäärät eri maissa, sekä niiden prosenttiosuudet koko maailmasta. Maailman kaikkien maanpäällisien kobolttivarojen on arvioitu olevan 25,5 miljoonaa tonnia. (U.S. Geological Survey 2017, 1, 14; U.S. Geological Survey 2023.)

TAULUKKO 1. Koboltin louhinta ja varannot vuonna 2022 (U.S. Geological Survey 2023).

Maa	Louhinta (Tonnia)	% louhinnasta	Esiintymät (Tonnia)	% esiintymistä
Kongo	(arvioitu) 130 000	70,08 %	4 000 000	47,93 %
Indonesia	(arvioitu) 10 000	5,39 %	600 000	7,19 %
Venäjä	(arvioitu) 8 900	4,8 %	250 000	3,00 %
Australia	5 900	3,18 %	1 500 000	17,97 %
Kanada	(arvioitu) 3 900	2,1 %	220 000	2,64 %
Kuuba	(arvioitu) 3 800	2,05 %	500 000	5,99 %
Filippiinit	(arvioitu) 3 800	2,05 %	260 000	3,12 %
Madagascar	(arvioitu) 3 000	1,62 %	100 000	1,20 %
Papua-Uusi-Guinea	3 000	1,62 %	47 000	0,56 %
Turkki	(arvioitu) 2 700	1,46 %	36 000	0,43 %
Morokko	(arvioitu) 2 300	1,24 %	13 000	0,16 %
Kiina	(arvioitu) 2 200	1,19 %	140 000	1,68 %
USA	(arvioitu) 800	0,43 %	69 000	0,83 %
Muut maat	5 200	2,8 %	610 000	7,31 %
Yhteensä	185 500	100 %	8345 000	100 %

Noin 60 % maailman koboltista kaivetaan kerrosmainen sakan isännöimänä kuparikobolttina. Kuparikoboltin nimi on lyhennettynä Cu-Co. Tällaisten varantojen suurin keskittymä on Keski-Afrikan Cop-perbeltilla, jonne sijoittuvat Kongo ja Sambia. (U.S. Geological Survey 2017, 10.) Cu-Co-malmeja löytyy kahtena eri tyyppinä, joita nimitetään ”sulfideiksi” ja ”oksideiksi”. Näillä malmeilla voi olla erilaiset rikastusmenetelmät (Dehaine, Tijsseling, Glass, Törmänen, Butcher 2021, 3). Sulfidi malmit

ovat nimensä mukaan sulfidisesti rikkaita. Oksideissa ei ole varsinaisesti oksidia, vaan ne sisältävät pääasiassa karbonaatteja ja hydroksideja. Oksidit ovat usein lähempänä maanpintaa kuin sulfidit. (Crundwell, Preez, Knights 2020, 2–3.) Noin 23 % maailman koboltista kaivetaan magmaattisena nikkelikupari sulfidina, eli Ni-Cu(-Co-PGE), josta käytetään tässä työssä lyhennettä Ni-Cu. Näitä varantoja löytyy esimerkiksi Kanadasta, Kiinasta ja Venäjältä. Noin 15 % maailman koboltista kaivetaan nikkelikoboltti lateriittina, josta käytetään lyhennettä Ni-Co. Näitä varantoja löytyy esimerkiksi Australiasta, Brasiliasta, Kuubasta ja Uudesta-Kaledoniasta. (U.S. Geological Survey 2017, 10.) Ni-Co-malmeja löytyy limoniitin tai limoniitin sekä saproliitin kanssa, joiden osuus vaikuttaa rikastusmenetelmän valinnassa (Dehaine ym. 2021, 14). Viimeisin 2 % maailman koboltista saadaan muista malmeista (U.S. Geological Survey 2017, 10).

2.1 Avolouhokset

Cu-Co ja Ni-Co-esiintymien kaivamisessa avolouhokset ovat vallitseva valinta (U.S. Geological Survey 2023). Kuva 1 on otettu Katangan kupariavolouhoksesta, joka on Kongon yksi monista Cu-Co-tyyppisistä kaivoksista (Kruger 2017). Tällaisien kaivoksien syvyys on maksimissaan noin 500 metriä. Suuret työkoneet mahdollistavat korkean malmituotannon, mutta ovat samalla kalliita investointeja. Avolouhokset ovat aina luonnonilmiöiden armoilla, ja vaativat suunniteltua rakennetta louhoksen vakauden pitämiseksi sekä hyvän menetelmän vedenpoistoon. Eräs avolouhoksien merkittävä kustannus on tarve suurille kaatopaikoille, jonne hyödyttömät kivimassat viedään. (Altit, Alrawashded, Alnawafleh 2021.) Kivimassojen kuljetus on ainakin 40 % avolouhoksien kustannuksista, minkä vuoksi on tärkeää, että kaatopaikka tehdään louhoksen läheisyyteen (Vergne 2008, 44 [Kaeschager]). Maanpäällisen ympäristön vahingoittuminen voi johtaa reklamaatioihin. Ympäristö usein korjataan tekolammen rakentamisella. (Altit ym. 2021.)



KUVA 1. Katangan kupari avolouhos (Kruger 2017).

2.2 Maanalaiset louhokset

Suuri osa magmaattisista Ni-Cu-esiintymistä joudutaan kaivamaan maanalaisissa louhoksissa. (U.S. Geological Survey 2023). Maanalaistalouhintaa tehdään, kun malmiesiintymät löytyvät syvältä, mutta louhinta on taloudellisesti kannattavaa (Harraz 2010). Suurien kapasiteettien kuparikaivoksissa syvyys on noin 600–1500 metriä (Vergne 2014, 40). Maanalaisissalouhoksissa on monia vaaratekijöitä ja terveysriskejä, joista olennaisimpia ovat tunnelien sortuminen, tulvinta, kaasu- ja pölyräjähdykset, huono ilmastointi, pölyille altistumien, hapenpuute ja tippuminen. (Elgstrand, Sherson, Jørs, Nogueira, Thomsen, Fingerhut, Burström, Rintamäki, Apud, Oñate, Coulson, McMaster, Clarke 2017, 12–13.)

3 RIKASTUS

Usein Ni-Co-malmit vaativat hyvin vähäiset hienonnusvaiheet, mutta tuottavat paljon jätettä. Cu-Co- ja Ni-Cu-malmeista suurin osa viedään läpi standardimurskauksen ja -jauhatuksen, joita usein seuraa vaahdotus. Lopullinen rikastus on yleensä hydrometallurginen- tai sähkömetallurginen prosessi. (U.S. Geological Survey 2017, 14.) Malmien laatu on ajan myötä muuttunut Copperbeltilla. Pinnanläheisten oksidimalmien loppuessa voi tulla esiin muutosmalmeja, joissa on oksidi- sekä sulfidimalmien ominaisuuksia. Uudemmat prosessointilaitokset joutuvat valmistautumaan tähän, sillä sulfidien- ja oksidien osuus vaikuttavat rikastukseen. (Crundwell ym. 2020, 9.)

Cu-Co-malmien koboltti osuus on 0,2–1,00 % (Dehaine ym. 2021, 15). Kobolttin talteenotto malmista on 30–60 % (Mudd, Weng, Jowitt, Turnbull, Graedel 2013). Talteenotto on alhainen, kun malmit sisältävät oksidi- sekä sulfidimalmia. Malmeja on työstettävä paljon suuren kvartsi määrän takia, ja hapon käyttö liuotuksessa on korkea karbonaatin, kloridin ja talkin vuoksi. (Dehaine ym. 2021, 15.) Malmeilla on myös erityisen korkea mangaani pitoisuus, joka on yksi haastavimmista aineista saada eroon. Suuri osa mangaanista jää rikasteeseen yrityksistä huolimatta. (Fisher 2011, 247.)

Ni-Cu-malmien koboltti osuus on 0,02–0,11 % (Dehaine ym. 2021, 15). Kobolttin talteenotto on noin 40–60 % (Mudd ym. 2013). Kobolttia menetetään sulatus vaiheessa korkeisiin rauta- ja magnesium konsentraatioihin. Kobolttia on myös vaikea saada eroon silikaateista. (Dehaine ym. 2021, 15.)

Ni-Co-malmien koboltti osuus on 0,05–0,15 % (Dehaine ym. 2021, 15). Kobolttin talteenotto on noin 60–75 % (Mudd ym. 2013). Hapon käyttö ovat korkea, sillä malmi sisältää magnesiumsiveä. Malmien kosteus ja energiankulutus ovat korkeita. Rikastusta myös vaikeuttaa sekoittuneet limoniitti ja saproliitti mineraalit. (Dehaine ym. 2021, 15.)

3.1 Cu-Co rikastus

Kongon tasavallan koboltille on yleensä kolme eri jalostuskohdetta: kobolttihydroksidi $\text{Co}(\text{OH})_2$, kobolttimetalli ja valkoinenseos. Kobolttihydroksidia valmistetaan hydrometallurgisesti, jonka päävaiheena on happoliuotus. (Crundwell ym. 2020, 3.) Prosessisarja suosii Cu-Co:n oksidimalmeja. Liuotuksen jälkeen liuos neutralisoidaan ja nesteet vastavirtadekantoidaan kiinteistä. Kupari erotetaan liu-

otinuutolla. (Dehaine ym. 2021, 14). Tässä vaiheessa rikaste sisältää kobolttikatodeja ja osittain puhdasta kobolttihydroksidia. Epäpuhdas tuote voidaan jo myydä. Hydroksidin uudelleenliuotus puhtauden vuoksi on valinnanvarainen kysymys, joka vaihtelee Kongon jalostamoissa. (Crundwell ym. 2020, 2.) Kongon kuivatun kobolttihydroksidin tyypilliset arvot löytyvät taulukosta 2. Hydroksidin prosessista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.1.2 (Happoliuotus).

TAULUKKO 2. Kongon kuivatun koboltti hydroksidin tyypilliset arvot (Crundwell ym. 2020, 6).

Aine	Co	Cu	Ni	Mg	Ca	Fe	Mn	Al	Kosteus
%	44	0,4	0,1	2,8	0,2	0,02	0,1	0,05	<1

Kobolttimetallia saadaan, kun malmi viedään läpi vaahdotuksen, pasutuksen, hydrometallurgisen vaiheen ja metallin loppujalostuksen. Vaahdotuksen rikaste kalsinoidaan pasutuksella, ja viedään hydrometallurgiseen prosessiin, joka vastaa kobolttihydroksidin valmistusta (Crundwell ym. 2020, 3–4). Liuos neutralisoidaan ja nesteet vastavirtadekantoidaan kiinteistä (Dehaine ym. 2021, 14). Tämän jälkeen kobolttihydroksidi uudelleen liuotetaan, jolloin rauta, kupari, sinkki ja nikkeli erottuvat. Viimeisin vaihe tapahtuu sähkövoitossa, missä koboltti toimii katodina. Tuotteeksi saadaan hyvin puhdasta kobolttia, jonka hyväksyttävä arvo sisältää 99,3–99,8 % kobolttia. Maailman kobolttimetallien tyypilliset arvot löytyvät taulukosta 3. (Crundwell ym. 2020, 3, 8.) Cu-Co-metallin prosesseista kerrotaan tarkemmin luvuissa 3.1.3 (Vaahdotus), 3.1.4 (Pasutus), 3.1.5 (Liuotinuutto) ja 3.1.6 (Sähkövoitto).

TAULUKKO 3. Maailmanlaajuisien kobolttimetallien tyypilliset arvot (Crundwell ym. 2020. [Fastmarkets. 2020]).

Aine	Co	Ni	Fe	Cu	Cd	Zn	Mn	Mg	Pb	SiO ₂
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Korkea-arvoisenmetalli	>99,8	<1000	<50	<30	<50	<50	<20	<10	<30	<10
Ala-arvoisenmetalli	>99,3	<1500	<100	<50	<50	<100	<50	<30	<60	<20
Seosmetalli	>99,8	(Hyväksytyt tuotemerkit.)								
Standardimetalli	>99,3	(Hyväksytyt tuotemerkit.)								

Valkoistaseosta saadaan, kun malmi viedään läpi vaahdotuksen ja sulatuksen. Tämä prosessi kelpaa Cu-Co:n oksidi sekä sulfidimalmeille, mutta varsinaisesti suosii happikuparin valmistusta. Sulatuksesta syntyy kaksi kerrosta, joista toinen on kobolttia sisältävä valkoinen seos. Tuotteen tyypilliset arvot löytyvät taulukosta 4. (Crundwell ym. 2020, 4.) Valkoisenseoksen prosesseista kerrotaan tarkemmin luvuissa 3.1.3 (Happoliuotus) ja 3.1.7 (Sulatus).

TAULUKKO 4. Valkoisenseoksen tyypilliset arvot (Crundwell ym. 2020, 8).

Aine	Co	Ni	Fe	Cu	Mn
%	31,1	3,59	29,0	23,5	0,58

3.1.1 Painovoimaerotus

Kun Copperbeltilta löytynyt Cu-Co malmi sisältää suuren määrän kobolttia, voidaan käyttää painovoimaerotusta parantamaan konsentraatiota ennen lopullista rikastusta. Käytössä olevia menetelmiä ovat esimerkiksi jigit, tärypöydät tai tiheän median erotus (DMS). DMS erottaa malmit riippuen partikkelin koosta ja koboltti pitoisuudesta. Painovoimaerotuksen jätteet ja rikasteet jakautuvat myöhemmin muihin rikastusvaiheisiin. (Crundwell ym. 2020, 5.)

3.1.2 Happoliuotus

Copperbeltilla happoliuotuksella valmistetaan pääasiassa kobolttihydroksidia. Suuri osa Copperbeltin koboltista löytyy muodossa Co^{3+} , jolla on alhainen liukoisuus vesiseoksiin. Tämän vuoksi kobolttimeraalit usein vaativat pelkistäjän liuetukseen. Pelkistin voi olla natriummetabisulfiitti tai rikkidioksidi kaasuna, jonka ansiosta Co^{3+} saadaan helpommin liukenevaan muotoon Co^{2+} . Prosessissa koboltin varsinaisesti pelkittää rauta Fe^{2+} , joka on pelkistetty muodosta Fe^{3+} . Rauta löytyy valmiiksi malmista, jonka ideaalinen määrä liuoksessa on arvioutu olevan 2–10 g/L. Liuotus tapahtuu atmosfäärissä säiliössä, joihin syötetään happoa ja pelkistintä. Säiliö toimii mekaanisellasekoituksella ja painovoimaan perustuvalla ylivuodolla. Pelkistintä voidaan lisätä prosessiin lisää myöhemmin saannin parantamiseksi. Prosessi kestää neljästä kahdeksaan tuntia. (Crundwell ym. 2020, 7-9.)

3.1.3 Vaahdotus

Kongon tasavallassa on käytetty kahta eri menetelmää sulfidi-Cu-Co-malmien vaahdotukseen: kuparikobolttivaahdotus ja differentiaalivaahdotus. Kuparikobolttivaahdotuksessa sulfidinen koboltti vaahdotetaan kuparisulfiittien kanssa käyttämällä ksantaatti tyypisiä kerääjäreagensseja. Oksidimalmien läsnä ollessa, vaahdotus saadaan toimimaan sulfidoimalla malmit, joka aiheutetaan natriumvetysulfidilla tai natriumsulfidilla. Sulfidoitu oksidimalmi voidaan vaahdottaa tämän jälkeen samoin kuin sulfidimalmin. Differentiaalivaahdotus aloitetaan kuparin ja koboltin tavallisella vaahdotuksella kuten kuparikobolttivaahdotuksessa, ja lopetetaan vaahdotuksella missä koboltin vaahdotusta pyritään estämään, jotta koboltti jäisi vaahdottimen pohjaan. Täydellinen vaahdotuminen ei ole näillä menetelmillä mahdollista. Vaahdotuksen koboltin saanto malmista on tyypillisesti huono, joka on alle 60 %. Koboltirikaste usein sisältää 2–3 % kobolttia ja 6–13 % kuparia. Copperbeltilla sijaitsevan Nkanan jalostamon vaahdotuksissa pH on 9,5, joka säädetään kalkilla ja syanidilla. Vaahdotuksen rikaste kelpaa myytäväksi. Nkanan vaahdotuksen rikaste viedään vielä pasutukseen, liuotukseen ja sähkövoittoon. (Crundwell ym. 2020, 5.)

3.1.4 Pasutus

Kun Copperbeltilta löytynyt Cu-Co malmi sisältää suuren määrän kobolttia, saatetaan käyttää pasutusta. (Crundwell ym. 2020, 7.) Rikasteet pasutetaan 650–710 celsiuskessa nestemäisessä muodossa. Suurin osa malmin raudasta päätyy muotoon Fe_2O_3 . Lämpötilan ollessa 680 °C noin 93 % kuparista muodostaa kuparisulfiittia, ja kun lämpötila nostetaan 720 °C:seen, kuparisulfiitin määrästä jää 50 %, mutta noin 90 % koboltista pysyy sulfaatissa. Koboltti tulee ulos kaasun kanssa, ja menee useiden syklonien tai pesurien läpi, jotka keräävät kobolttipölyn. (Crundwell ym. 2020, 7.) Ni-Co malmit on kalsinoitava pasuttamalla, jos ne päätetään sulattaa (Davis 2000, 346). Pasutuksella tuotettu koboltti saadaan muodossa CoO. (Hamer, Hamer 2004.)

3.1.5 Kuparin liotinuutto

Kuparin liotinuutto on sähkövoiton rinnalla otettu käyttöön kaikissa Kongon tasavallan hydrometallurgisissa laitoksissa. Prosessi parista käytetään termiä SX-EW. Kuparin liotinuutto on kaikista tehokain tapa erottaa kupari koboltista. Koboltti ja muut kuparin epäpuhtaudet vuodatetaan suljettuun uuttopiiriin, missä ala-arvoinen ja korkea-arvoinen raffinaatti kiertää uuton useankerran, tuottaen koboltti-

rikastetta, jossa on kuparia 50 mg/L. SX-EW:n käyttö pelkän sähkövoiton sijasta on vähentänyt kobolttin joutumista sähkövoiton kupariin. Tyypillinen sähkövoitto puhdistaa 10–20 g/L arvoon 2–5 g/L kobolttia kuparissa, kun taas SX-EW puhdistaa 5–10 g/L arvoon 0,2–1,0 g/L kobolttia kuparissa. (Crundwell ym. 2020, 10–11.)

3.1.6 Sähkövoitto

Sähkövoitto suoritetaan polaarissa nesteessä, joka voi esimerkiksi olla vettä. Prosessin periaate perustuu malmin ionien eri varauksiin. Jotkut ionit olisivat tässä tilanteessa mielellään positiivisia (kationeja) ja toiset ionit negatiivisia (anioneja). Kun tasavirtainen jännite syötetään polaariseen nesteseen, positiiviset ionit alkavat liikkua katodia kohti ja negatiiviset ionit anodia kohti. Katodi ja anodi ovat yleensä pitkulaisia metalliosia reaktorin eri puolilla. Anodi on mielellään lyijyä epäpuhtauksien estämiseksi. (Barshai 2016.)

Kobolttin kannalta sähkövoiton lämpötila on pidettävä 40–60 celsiusessa, ja pH:n on oltava joko alle 2 tai yli 4. Kobolttin rikastus sähkövoitolla toimii metalleille kuten: rauta, kromi, kupari, lyijy ja sinkki. Nikkelistä koboltti on lähes mahdotonta rikastaa sähkövoitolla, sillä kobolttin sähkökemiallinenpotentiaali on -0,28 V, ja nikkeliällä se on -0,25 V. Jos prosessissa kuitenkin on nikkeliä läsnä, ja halutaan välttää kobolttinikkeliseosta, on olemassa kolme vaihtoehtoa: liuotinuutto, saostus, lisäaineet tai kamion suunnittelu nikkelin varalle. Liuotinuutto suoritetaan ennen sähkövoittoa, missä voidaan poistaa muitakin epäpuhtauksia nikkelin lisäksi. Saostuksessa voidaan saostaa joko epäpuhtaus tai koboltti itsessään. (Wollschlaeger 2018.) Prosessin hyviin puoliin kuuluvat: vähäiset jätteet, vähäinen veden kuluminen, tehokas operointi, ympäristölupien myöntövyys ja teknologian vakaus. (Barshai 2016.)

3.1.7 Sulatus

Copperbeltin Cu-Co-malmien sulatuksissa valmistetaan kobolttin lisäksi happikuparia. Uuneiksi kelpaavat esimerkiksi KCM uunit tai valokaariuunit. Uuneihin syötetään koksia, kierrätysmetallia ja rikastetta, jotta koboltti saadaan metalliseen muotoon. Nkanan sulattamon lämpötila toimii alueella 1500–1600 °C ja kuona tarvitsee 1150 °C pysyäksään sulana. Kun uunien annetaan jäähtyä hitaasti, syntyy kaksi kerrosta: punainenseos, joka on noin 85 % kuparia ja valkoinenseos, joka on 15–20 % ku-

paria, 40–45 % kobolttia ja 20–35 % rautaa. Valkoinenseos kerätään kuonasta. Prosessin hyvänä puoleena kuonasta voi myös kerätä mangaania. (Crundwell ym. 2020, 4, 6–7.) Koboltin erottaminen valkoi-sestaseoksesta voi olla hankalaa. Erotus usein tehdään liuottamalla seos rikkihappoon, tuottaen kobolt-tisulfaattia. (Nanotech Processing 2021.) Koboltista saadaan talteen noin 60 % malmista. Sulatuksesta saatu happikupari valetaan anodeiksi, joista saadaan korkea arvoista kuparia sähkövoitolla. (Crundwell ym. 2020, 6.)

3.2 Ni-Cu rikastus

Standardimurskauksen ja hienonnuksen jälkeen malmi vaahdotetaan. Rikaste voidaan laittaa joko sala-mauniin tai sähköuniin, jota ennen rikaste on kuivattava. Uunivaihetta kutsutaan mattasulatukseksi. Uunista tullut sulfidimatta liuotetaan (Korkeapainenhappoliuotus), ja sitten liuotinuutetaan, jolloin nik-keli saadaan erilleen. Rikasteesta voidaan valmistaa metallia sähkövoitolla, tai jauhetta vetypelkistyk-sellä. (Dehaine ym. 2021, 14, 19.)

Korkeapaineisen happoliuotuksen alussa kuuma liete syötetään autoklaaviin, mikä on periaatteeltaan suuri painekeitin. Paine pidetään karkeasti noin 30–50 baarissa, ja lämpötila on noin 170–250 °C. Au-toklaaviin myös syötetään rikkihappoa, joka liuottaa nikkelin ja koboltin. Liuotus kestää noin 60 mi-nuuttia. Tämän jälkeen liete palautetaan atmosfääriseentilaan, mikä saavutetaan kahdella tai useam-malla salamavaiheella. Prosessin parhaat puolet ovat Ni-Co-lateriittimalmien nopea rikastus ja hyvä tuottavuus. Prosessin hankaluuksiin kuuluvat: korroosio, eroosio, operointi ja energian tarve. (Caldera Engineering 2016; Shamshuddin 2016, 1.) Korkeapaineinen happoliuotus kelpaa myös Ni-Co-limoniit-timalmeille, mutta rikkihapon sijasta käytetään ammoniakkia (Dehaine ym. 2021, 14, 19).

3.3 Ni-Co rikastus

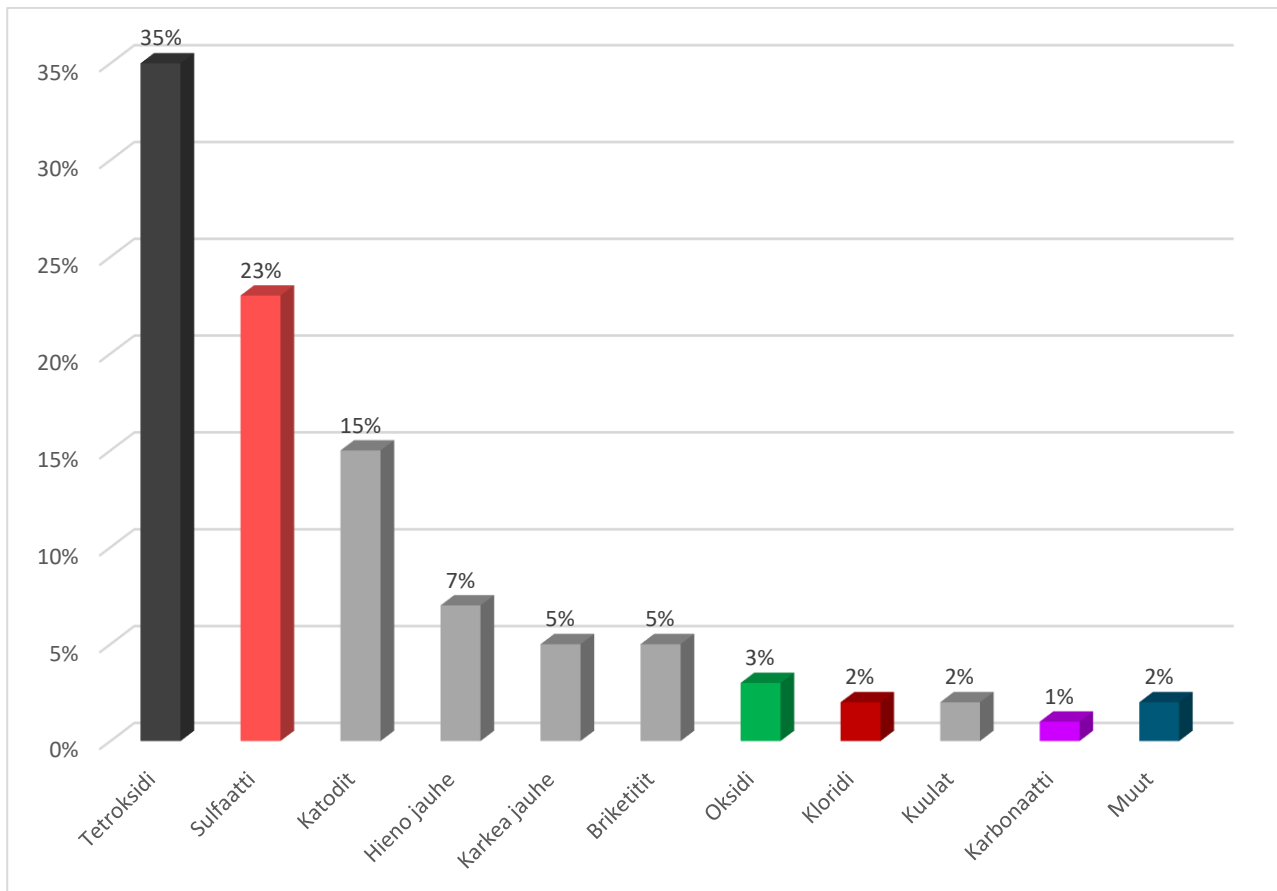
Toisin kuin muilla yleisillä kobolttimalmeilla, Ni-Co-malmit eivät tarvitse vaahdotusta. Malmit jaetaan riippuen sisältävätkö ne limoniittia tai saproliittia sekä limonaattia. Limoniittimalmit ensin seulotaan ja konsentraatiota nostetaan, josta ne voidaan suoraan syöttää korkeapaineiseen happoliuotukseen. Liu-otuksesta kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2 (Ni-Cu rikastus). Liuotettu malmi neutralisoidaan ja nesteet erotetaan kiinteistä vastavirtadekantoinnilla, jolloin saadaan kaksi kobolttivirtaa. Yhdessä virrassa sa-

ostetaan kobolttisulfidia ja toisessa kobolttihydroksidia. Kummatkin virtauksen käyvät läpi uudelleenliuotuksen ja liotinuuton. Sulfidi vetypelkistetään jauheeksi, ja hydroksidista saadaan sähkövoitolla metallia. (Dehaine ym. 2021, 14, 18.)

Limonaatti/saproliti rikkaat malmit ensin kuivataan ja murskataan. Malmit pelkistetään pasuttamalla ammoniakkihappoliuotusta varten. Liuotetut nesteet ja kiinteät erotetaan vastavirtadekantoinnilla ja sakeuttamalla. Nikkeli saadaan seoksesta pois liotinuotolla, jonka jälkeen koboltti saostetaan sulfidiksi vetysulfidikaasulla. (Dehaine ym. 2021, 14, 18.)

4 JALOSTEET

Kuviossa 1 näytetään vuoden 2020 tuotetuimmat kobolttijalosteet (Cobalt institute 2021b). Malmin päärikastusvaiheiden jälkeen koboltti viedään loppujalostukseen, joka riippuu rikasteen laadusta ja halutusta lopputuotteesta. Katodit, hienojauhe, karkeajauhe, briketit ja kuulat ovat kaikki kobolttimetallia (Fastmarkets 2020.) Kobolttitetroksidia Co_3O_4 valmistetaan kuumentamalla kobolttia (II), kobolttia (III) tai kobolttihydroksidia 265–800 °C asteessa. Kobolttihydroksidia voidaan hajottaa 168 °C asteen tyhjiössä kobolttioksidiksi CoO . Kobolttisulfaattia CoSO_4 valmistetaan kobolttioksidista, kobolttihydroksidista tai kobolttikarbonaatista, sekoittamalla yhtä näistä rikkihappoon. Kobolttikloridia CoCl_2 valmistetaan kobolttimetallista, kobolttioksidista, kobolttihydroksidista, tai kobolttikarbonaatista sekoittamalla yhtä näistä suolahappoon. Kobolttikarbonaattia valmistetaan lisäämällä Co^{2+} -suolaliuokseen natriumkarbonaattia Na_2CO_3 . (Brauer 1963, 1513–1516, 1519–1525.) Suolaliuoksen ominaisuuksia vastaavat esimerkiksi kobolttisulfaatti. (PubChem 2023a; 2023b; 2023c; 2023d; 2023f.) Taulukkoon 5 on listattu mihin jalosteita käytetään.



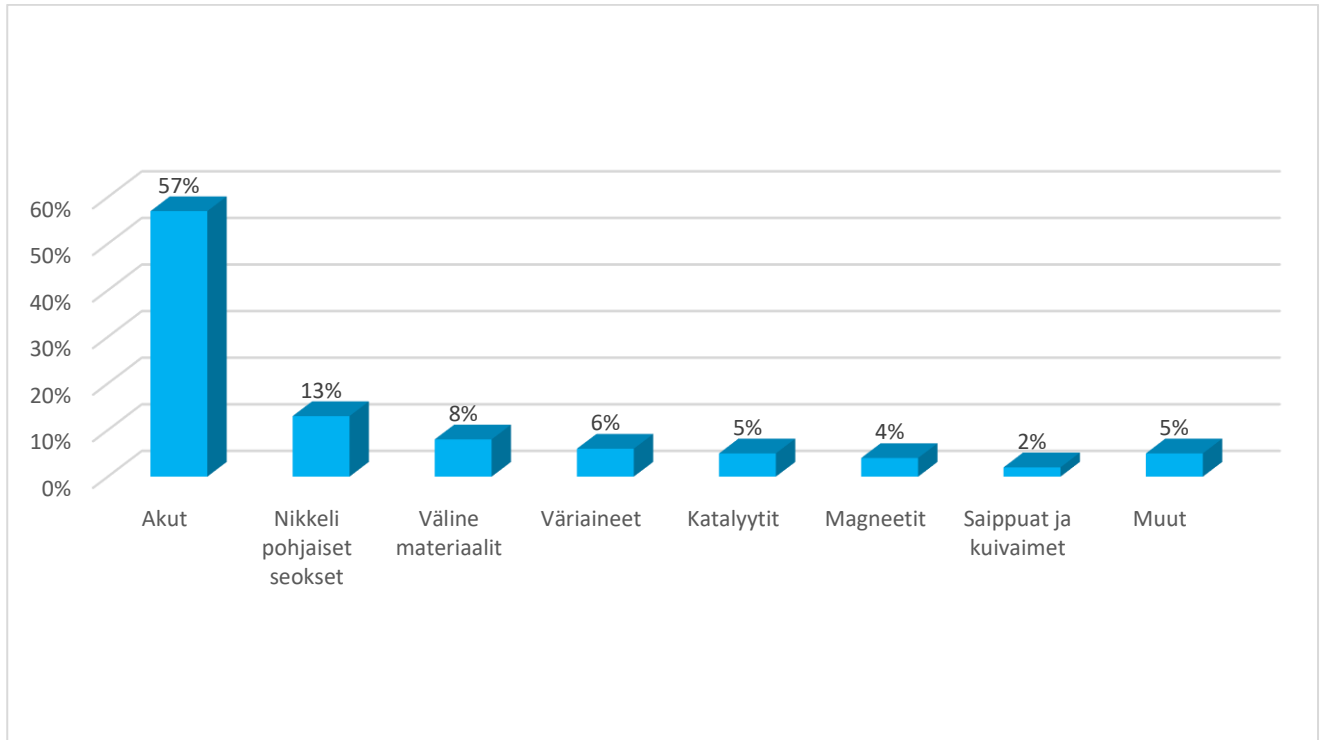
KUVIO 1. Koboltti jalosteet 2020 (Cobalt institute 2021b).

TAULUKKO 5. Koboltti jalosteiden käyttökohteet.

Tetroksidi (35 % jalosteista)	Puolijohteet, emalit, hiomalaikat, maatalous kemikaalit (ei tuholaismyrkyjä), katalyytit, väriaineet, pinnoitusaineet ja prosessiaineet (PubChem 2023f).
Metallit ja jauheet (34 % jalosteista)	Nikkelipohjaiset seokset, väline materiaalit, magneetit, kaasuturbiini moottorit, teräkset, koboltti-60 isotooppi (PubChem 2023a).
Sulfaatti (23 % jalosteista)	Maaperän lisäaineet, väriaineet, katalyytit, kuivaimet, galvanointi ja eläinlääkkeet (PubChem 2023d).
Oksidi (3 % jalosteista)	Katalyytit, kuivaimet, jätekaasunpoistajat, rehujen lisäaineet, volframikarbidit, puolijohteet, emalit, väriaineet, hapettimet, pelkistimet ja prosessiaineet (PubChem 2023c).
Kloridi (2 % jalosteista)	Näkymättömät musteet, ilmankosteuden osoittimet, katalyytit, galvanointi, väriaineet, lannoitteet, ruuan lisäaineet, myrkkukaasujen absorbointiaineet, eläinlääkkeet, juoksutteet, peittausaineet, liimat ja tiivistysaineet (PubChem 2023b).
Karbonaatti (1 % jalosteista)	Katalyytit, lannoitteet, kalsinointi, rehujen lisäaineet ja prosessiaineet (European Chemical Agency 2011, 2–4).
Sulfidi (<1 % jalosteista)	Katalyytit ja prosessiaineet (PubChem 2023e).

5 LOPPUTUOTTEET

Kuviossa 2 esitetään vuoden 2020 kobolttin käyttömäärät eri lopputuotteissa. (Cobalt Institute 2021b.)



KUVIO 2. Koboltti tuotteet 2020 (Cobalt Institute 2021b).

5.1 Akut

Sähköajoneuvoissa kobolttin käyttö rajoittuu litiumioniakkuihin, joissa koboltti on osa katodin yhdistettä. Nämä katodit valmistetaan kobolttitetroksidista (Cobalt Institute 2021a). Sähköajoneuvojen akkujen toimiminen tyypillisesti perustuu litiumionien liikkeeseen katodin ja anodin välillä, johon koboltti soveltuu tehokkaasti (Deng 2015). Litiumioniakut ovat nykyajan laadukkaimpia ladattavia-akkuja, joiden pieni koko ja keveys tekevät niistä myös sopivia pienempiin laitteisiin, kuten kannettaviin tietokoneisiin ja puhelimiin (Deng 2015).

5.2 Metallit

Kobolttimetalleja käytetään yleisesti kulutusta ja korroosiota sietäviin seoksiin, nopealiikkeisiin ja painoa kantaviin osiin. Kobolttin tiivis kuusikulmainen molekyyli-rakenne (HCP) ei ole itsestään vakaa, ja voi muuttua 417 °C:ssa nelikulmaiseen rakenteeseen (FCC). Tämän vuoksi kromia, volframia ja molybdeenia usein lisätään kobolttiin, jotta HCP rakenne pysyy. HCP rakenteella saadaan todella kovaa hankausta sietävää metallia. FCC rakennetta tuetaan raudalla ja nikkellillä. Nikkelipohjaisilla seoksilla on korkea lämmön- ja kulutuksensietokyky. Käyttökohteet voidaan jakaa superseoksiin ja välinemateriaaleihin. Välinemateriaaleina etenkin käytetään sementoitujakarbideja ja steliittiä. Superseoksia ovat nikkeli-, nikkeli-rauta- ja kobolttipohjaiset seokset, joilla on korkea mekaaninen vahvuus, kulutuksenkestävät pinnat ja ovat käyttökelpoisia korkeissa lämpötiloissa (yli 540 °C). Kobolttin superseoksia käytetään etenkin kaasuturbiinimoottoreihin. Valettujen- ja taottujen kobolttisuperseoksien tyypilliset koostumukset esitetään taulukoissa 5 ja 6. Taotut seokset ovat nikkelin ansiosta helpommin muotoiltavia. (Campbell 2008, 557–558, 563–564.)

TAULUKKO 6. Valettujen kobolttisuperseoksien tyypillinen koostumus (Campbell 2008, 570).

Aine	Co	Cr	W	C
%	50–60	20–30	5–10	0,1–1,0

TAULUKKO 7. Taottujen kobolttisuperseoksien tyypillinen koostumus. (Campbell 2008, 570).

Aine	Co	Ni
%	~40	~20

6 KIERRÄTYS

Vuonna 2020 kierrätetystä koboltista saatiin 65 % akuista, 24 % volframikarbidien romumetalleista ja 11 % yhdisteistä ja katalyyteistä (Cobalt Institute 2021a). Cobalt Instituten mukaan noin 5 % koboltista tuotettiin kierrättämällä vuonna 2022. Cobalt Institute odottaa 15 % tuotantoa vuodelta 2030, ja 40 % vuodelta 2040. (Cobalt Institute 2022, 4.)

6.1 Akkujen kierrätys

Litiumioniakkujen kierrätys voidaan jakaa neljään osaan: keräykseen, esikäsitelyyn, metallin talteenottoon ja rikastukseen. Euroopassa keräysvaiheelle on säädetty direktiivi 2000/53/EC, joka määrittää ajoneuvojen litiumioniakkujen keräysmenetelmät. Keräyksen tekee kolmasosapuoli, jolle on myönnetty vastuu akuista. (Euroopan parlamentti ja valtuusto 2000.) Huolettomasti tehty akkujen keräysvaihe voi aiheuttaa esimerkiksi akkujen syttymistä, räjähtämistä tai vaarallisten kemikaalien vapautumista (Diaz, He, Hu, Restuccia, Merinescu, Barreras, Patel, Offer, Rein 2020, 2).

Esikäsitely vaiheessa akut luokitellaan, tyhjennetään, puretaan, deaktivoidaan, silputaan ja erotellaan. Automaattinen esikäsitely on vaikeaa, sillä akuilla ei ole standardisuunniteltua muotoa, joka usein johtaa visuaalisesti ja manuaalisesti tehtyyn esikäsitelyyn. Akkujen tyhjennys ja purkuvaiheen ajankesto ja henkilöstömenot ovat korkeat, joka painottaa automaattisen esikäsitelyn kehitystä ja akkujen merkitsemistä. Purkuvaiheen hyvänä puolena on mahdollisuus kerätä arvometallit, muovit ja elektroniset osat akuista, joka lisää kierrätyksen kannattavuutta. Deaktivointi tehdään, jotta akut voidaan silputa turvallisesti. (Windisch-Kern, Gerold, Nigl, Jandric, Altendorfer, Rutrecht, Scherhauser, Raupenstrauch, Pomberger, Antrekowitch, Part 2022, 129–130.) Deaktivoinnista jääneet osat silputaan ja erotellaan metallin talteenottovaihetta varten. Silppuamisen tavoite on erottaa rautaa, kuparia ja alumiinia ”mustasta aineesta”, joka koostuu pääasiassa anodien ja katodien aktiivisista aineista. (Windisch-Kern, Holzer, Ponak, Raupenstrauch 2021.)

Rikastus suoritetaan hydrometallurgialla, pyrometallurgialla tai biometallurgialla (Zheng, Zhu, Lin, Zhang, He, Cao, Sun 2018, 130). Hydrometallurgialla pyritään erottamaan nikkeli, litium ja koboltti mustasta aineesta. Menetelminä ovat liuotus, uutto, kiteytys ja saostus. Talteenotto usein aloitetaan liuotuksella, jossa käytetään epäorgaanista tai orgaanistahappoa. Uutossa koboltin 40 % ja nikkelin 75 %

saantia voidaan molempia parantaa 80 % saantiin, syöttämällä prosessiin vetyperoksidia, joka pelkistää koboltin Co^{3+} muodosta muotoon Co^{2+} . Pyrometallurgisetmenetelmät ovat tehokkaita Ni-Co-seoksien talteenotossa, mutta menetelmillä on alhainen selektiivisyys ja voivat kerätä lähinnä yhdisteitä. Biometallurgisistamenetelmistä on vähän kirjattua tietoa. (Windisch-Kern ym. 2022, 129–130.)

6.2 Volframikarbideiden kierrätys

Volframin kierrätys koskee pääasiassa volframikarbideja, jotka ovat 65 % kaikista volframituotteista vuonna 2016. Samana vuonna käytössä olevasta volframista 108500 tonnia oli osana välituotteissa kuten metalleissa ja kemikaaleissa, ja 98000 tonnia oli osana lopputuotteissa. Nämä molemmat ryhmät tuottivat yhteensä 37500 tonnia kierrätettävää romua. Romua meni hukkaan välituotteista 2000 tonnia ja lopputuotteista 67000 tonnia. Lopputuotteista saatiin volframia takaisin 29000 tonnia, eli 30 %. Tämänhetkisen arvion mukaan 46 % volframikarbideista onnistutaan kierrättämään. Kierrätystä vaikeuttaa volframikarbideit, jotka on sulatettu tai juotettu kiinni teräsosiin. (Zeiler, Bartl, Shcubert 2021, 3–4.)

Volframikarbidiruomuille on kaksi yleistä kierrätys tapaa. Kovat volframikarbidimetallit pysyvät kasassa sinkin avulla. Sinkki saadaan erilleen laittamalla romumetallit nestemäiseensinkkiin, jolloin volframikarbidi ja koboltti vapautuvat. Koboltti ja sinkki liuotetaan myöhemmin happoliuotuksella, jossa sinkki erotetaan tyhjiössä tapahtuvassa tislauksessa. Tislaus tapahtuu atmosfäärisessä tilassa 907 °C asteessa. Tuotteena saadaan volframikarbidi ja kobolttijauhetta. (Zeiler ym. 2021, 12.)

Romumetallit joissa on pehmeää ja kovaa volframikarbidia, sulatetaan sulansinkin, sinkkihuurujen, argonin ja typen kanssa grafiittiupokkaassa 600-900 °C asteessa. Jos käytetään uunia, lämpötila pidetään 800-1050 °C asteessa. Ennen upokkaaseen syöttöä romumetalleista on poistettava juotot ja pinnoitteet, jotta ne eivät päätyisi uusiin tuotteisiin. Sinkki reagoi koboltin, raudan ja nikkelin kanssa, jonka jälkeen sinkki voidaan tislata pois tyhjiössä. Tislauksen lämpötila on noin 1000-1050 °C astetta. Tislattu sinkki voidaan uudelleen käyttää molemmissa kierrätysprosesseissa.

(Zeiler ym. 2021, 12.)

7 HAITALLISUUS

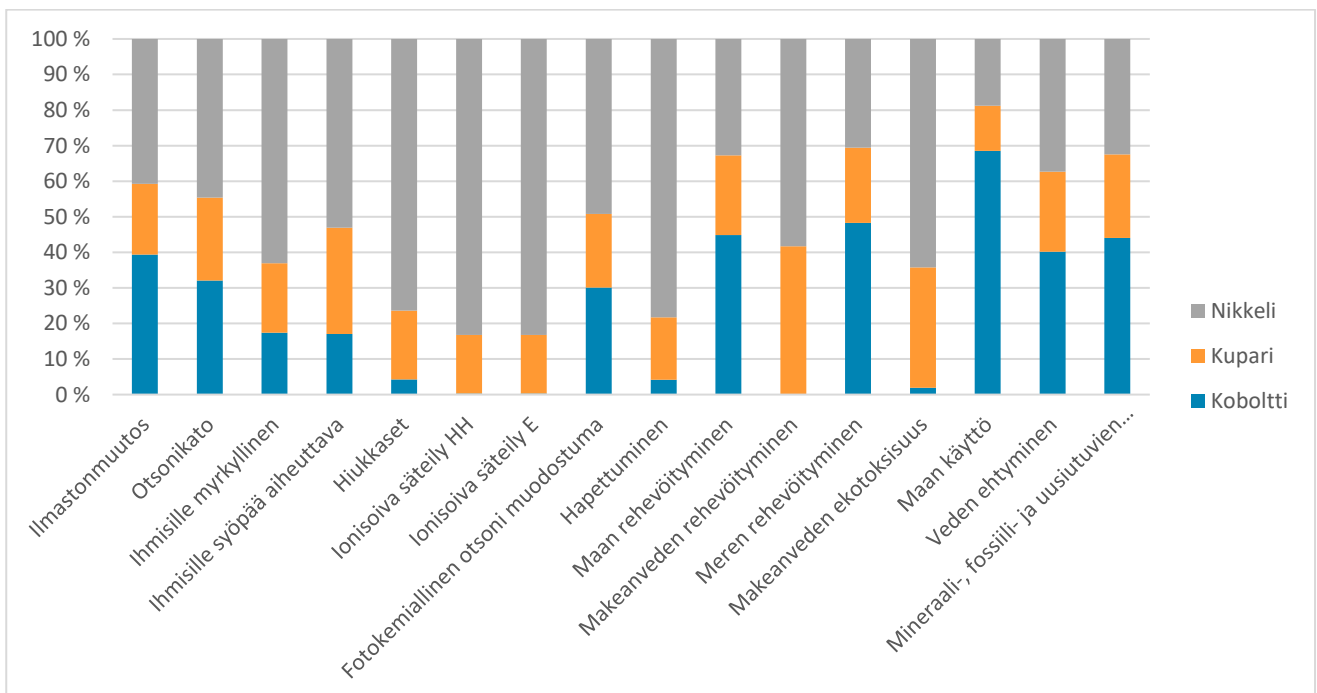
Koboltti on tarpeellinen ravinneaine suurelle osalle elämästä B₁₂ vitamiinin muodossa, mutta on myrkyllistä rikastetuissa määrissä vedessä ja maassa, joka on usein peräisin kaivoksista, jalostamoista ja lopputuotteiden käytöstä. Korkea altistuminen koboltille voi aiheuttaa keuhkon- ja sydämentoimintahäiriöitä. Kaivoksissa ja jalostamoissa tuotetut kobolttisaasteet ovat peräisin lietteen- tai hiekan kokoisista kupari- ja nikkeli malmeista, joiden rikastus on kannattamatonta. Nämä saasteet usein päätyvät lampeen tai patoon kaivosalueella. Monien kaivoksien jätemääriä on vaikea arvioida tai saada. Syynä tähän voi esimerkiksi olla kaivosalueiden reklamaatiot, jotka johtavat pilaantuneiden alueiden korjauksiin. Ni-Co-malmeista on erotettava suuri määrä ylikuormaa ennen jalostamoon vientiä. Tuotetun jätteen määrä usein vastaa koko varannon määrä, mikä on tyypillisellä lateriittivarannolla 20–200 miljoonaa tonnia. Tyypillisesti maanalaiset louhokset tuottavat vähemmän jätettä, mikä on usein tilanne magmaattisten Ni-Cu-malmien kanssa. (U.S. Geological Survey 2017, 16–17.) Tosin Ni-Cu-malmien ongelmana ovat erittäin reaktiiviset sulfidijätteet, jotka voivat tuottaa suuria määriä happokaiivosvettä tai AMD:tä (Acid mine drainage). Jos AMD:tä ei pystytä hillitsemään, on saastunut alue korjattava. (U.S. Environmental Protection Agency 2011). Cu-Co- ja Ni-Cu-malmeilla ei ole paljon ominaisuuksia haitallisen hapettumisen (<3 pH) estämiseksi, paitsi jos kalsiittia tai dolomiittia on läsnä. Copperbeltillä näillä mineraaleilla on onnistuttu lisäämään jätemassojen pH:tä turvallisimpiin arvoihin (6,9–8,5). Ni-Co malmeilla ei ole juurikaan hapettumiseen johtavia mineraaleja, ja niiden pH pysyy noin 5–8 alueella. (Smith, Huyck 1999, 373–409.)

Taulukkoon 8 on listattu koboltin-, kuparin- ja nikkelin rikastuksista aiheutuvat haitat vuonna 2019. Kuparilla on selvästi vähäisimmät haitat näistä kolmesta. Nikkelin haittapuolet ovat paljon vaikuttavampia kuin koboltilla tai kuparilla, etenkin rehevöitymisessä, ilmastonmuutoksessa ja ekotoksisuudessa. Nikkelin rikastus on hyvin energiaakuluttava prosessi, joka usein toimii hiilellä, vesivoimalla ja raskailla polttoöljyillä. Nämä energiantuotantomenetelmät edes tukevat ilmastonmuutosta ja haittaavat ekosysteemejä. (Farjana, Huda, Mahmud 2019, 158.) Kuviossa 3 vertaillaan taulukon 8 malmien arvoja toisiinsa nähden.

TAULUKKO 8. Koboltti-, kupari- ja nikkelimalmien rikastuksesta aiheutuvat haitat (Farjana ym. 2019, 158).

Haitallisuus	Yksikkö	Koboltti	Kupari	Nikkeli
--------------	---------	----------	--------	---------

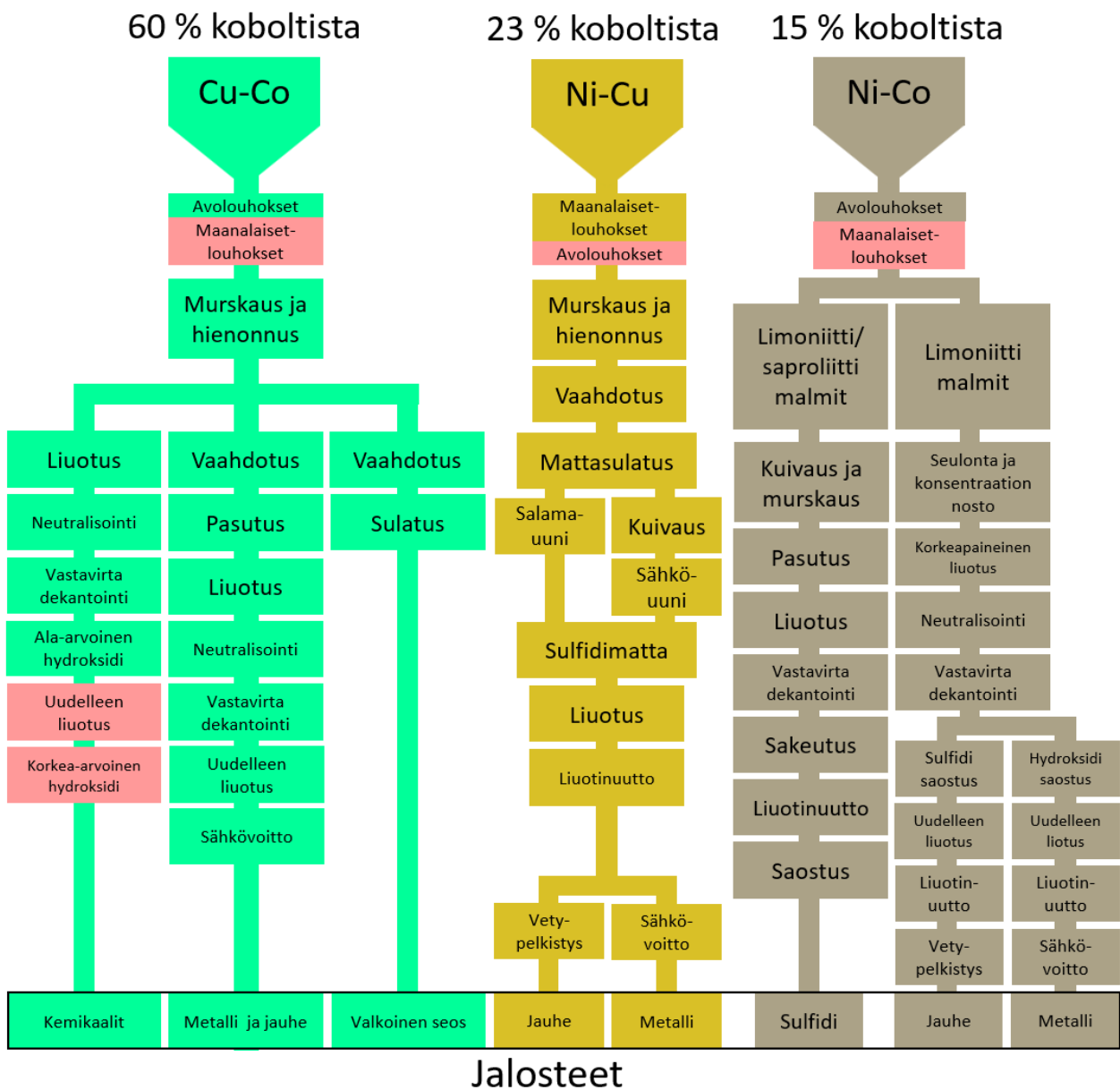
Ilmastonmuutos	kg CO2	10,81	5,44	11,19
Otsonikato	kg CFC-11	0,000000368	0,000000268	0,000000512
Ihmisille myrkyllinen	CTUH	0,000000695	0,000000779	0,00000252
Ihmisille syöpää aiheuttava	CTUH	1,45E-08	2,54E-08	4,51E-08
Hiukkaset	kg PM2,5	0,0053	0,024	0,095
Ionisoiva säteily HH	kBq U235	0,0019	0,103	0,52
Ionisoiva säteily E	CTUE	1,57E-08	0,000000937	0,00000472
Fotokemiallinen otsoni muodostuma	kg NMVOC	0,11	0,076	0,18
Hapettuminen	Mooli konsentraatio H+	0,1	0,42	1,87
Maan rehevöityminen	Mooli konsentraatio N	0,52	0,26	0,38
Makeanveden rehevöityminen	kg PM2,5	0,0000318	0,01	0,014
Meren rehevöityminen	kg NMVOC	0,041	0,018	0,026
Makeanveden ekotoksisuus	CTUE	0,52	9,25	17,52
Maan käyttö	kg C alijäämä	24,69	4,58	6,76
Veden ehtyminen	m ³ vettä	0,057	0,032	0,053
Mineraali, fossiili ja uusiutuvien re- surssien ehtyminen	kg Sb	3,98E-12	2,12E-12	2,93E-12



KUVIO 3. Koboltti-, kupari- ja nikkeli- malmien rikastuksen haittojen vertailu toisiinsa.

8 VERTAILU

Kuvassa 2 esitetään Cu-Co-, Ni-Cu- ja Ni-Co-malmien elinkaaret malmeista jalosteisiin asti, ja siinä punaiset ruudut ovat toissijaisia- tai valinnanvaraisiavaiheita. Hydroksidin kobolttikemikaaleihin kuuluvat esimerkiksi tetroksidi, sulfaatti, oksidi, kloridi ja karbonaatti. Kemikaaleja voidaan tietenkin jatkojalostaa muistakin jalosteista, mutta jatkojalostamisessa on otettava huomioon, onko lopputulos kannattava. Taulukossa 9 vertaillaan koboltin elinkaarien etuja ja haittoja toisiinsa. Annettuja arvoja voidaan vertailla vain koboltin elinkaarien kesken, eivätkä ne ulotu muiden malmien rikastusmenetelmiin.



KUVA 2. Cu-Co-, Ni-Cu- ja Ni-Co-malmien elinkaaret jalosteisiin asti (Dehaine ym. 2021, 14; Crundwell ym. 2020, 6).

TAULUKKO 9. Cu-Co-, Ni-Cu- ja Ni-Co-malmien vertailu.

	Cu-Co	Ni-Cu	Ni-Co
Vallitseva louhintamenetelmä	Avolouhinta: Parempi tuottavuus.	Maanalainenlouhinta: Enemmän vaaratekijöitä.	Avolouhinta: Parempi tuottavuus.
Koboltin osuus	0,2–1,00 %.	0,02–0,11 %.	0,05–0,15 %.
Louhinta	60 % (2017)	23 % (2017)	15 % (2017)
Jättemäärä	Korkea	Vähäinen (sulfidinen)	Korkea
Jäte pH	<3 pH	5–8 pH	<3 pH
Energiankulutus	- (Keskiverto)	- (Keskiverto)	Korkea
Rikastuksen monimutkaisuus	Oksidit ja sulfidit.	-	Saproliitti ja limoniitti.
Koboltin talteenotto	30–60 %,	40–60 %.	60–75 %
Ilmastonmuutos (Kupari ja nikkeli)	Maailman kuparin rikastustuotti 5,44 kg CO ² . (2019)	Maailman nikkelin rikastustuotti 11,19 kg CO ² . (2019)	Maailman nikkelin rikastustuotti 11,19 kg CO ² . (2019)
Ensisijaiset jalosteet	Metalli ja jauhe Valkoinen seos Kemikaalit	Metalli ja jauhe	Metalli ja jauhe Sulfidi

9 LOPPUPÄÄTELMÄ

Cu-Co-malmit ovat hyvin tuottavia ja eniten louhittuja kobolttimalmeja. Lisäksi rikastuksen energiankulutus ei ole korkea, ensisijaisajalosteita on monta, ja kuparin lisäksi ilmastonmuutokseen on vain puolet mitä nikkeli tuottaa. Huonona puolena koboltin talteenotto on kaikista pienin (20–7,5 % pienempi muiden koboltti malmien keskiarvoista.). Alhainen talteenotto voidaan osittain sivuuttaa ylivoimaisen koboltin malmiosuudella, joka voi olla jopa 9–10 kertaa suurempi kuin nikkelipohjaisillamalmeilla. Jos kobolttiosuudet kerrotaan talteenotolla (Pienin arvo kerrotaan pienimmällä, ja suurin suurimmalla.), saadaan tuloksena saannit malmia kohden: Cu-Co: 0,0006–0,006 %, Ni-Cu: 0,00008–0,00066 %, Ni-Co: 0,0003–0,001125 %. Tuloksista voidaan huomata, että Cu-Co-malmilla on kaikista vakain saanti: Korkea minimi ja korkea maksimi. Tosin Ni-Cu-malmilla on korkein maksimisaanti, mutta samoin todella pieni minimisaanti. Ni-Co-malmin molemmat arvot ovat huonommat kuin Cu-Co-malmilla. Tämän perusteella Cu-Co malmi olisi kaikista paras tuotannon ja saannin kannalta, sekä se lisää vähemmän ilmastonmuutokseen muihin verrattuna. Toiseksi parhaana vaihtoehtona on Ni-Cu-malmi, joilla vähäiset jätteet ovat pieni ongelma, jos niiden sulfidisuus onnistutaan pitämään valvonnan alla. Ni-Co-malmien korkea energiankulutus ja vähäinen saanti tekevät niistä kaikista vähiten kiinnostavan vaihtoehdon kolmesta. On myös muistettava, että korkea energiankulutus nikkelin rikastuksessa on suoraan yhteydessä ilmastonmuutokseen (Farjana ym. 2019, 158).

LÄHTEET

- Aliti A. H, Alrawashded R. H, Alnawafleh H. M. 2021. Open Pit Mining. Mining Techniques - Past, Present and Future. Bod Third Party Titles. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92208> Viitattu: 15.5.2023
- Barshai A. 2016. Electrowinning 101: What is electrowinning? Saatavilla: <https://blog.emew.com/electrowinning-101-what-is-electrowinning> Viitattu: 15.5.2023
- Brauer G. 1963. Handbook of Preparative Inorganic Chemistry 1 & 2: 1–1906. New York, Lontoo: Academic Press. Saatavilla: https://archive.org/details/Handbook_of_Preparative_Inorganic_Chemistry_1_2_Brauer/mode/2up Viitattu: 15.5.2023
- Caldera Engineering. 2016. High Pressure Acid Leach. Saatavilla: <https://www.calderaengineering.com/industries-served/high-pressure-acid-leach-and-pressure-oxidation/high-pressure-acid-leach> Viitattu: 15.5.2023
- Campbell. F.C. 2008. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys 2008: 1–573. Materials Park, Ohio: ASM International. Saatavilla: https://books.google.fi/books?id=6VdROgeQ5M8C&pg=PA557&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false Viitattu: 15.5.2023
- Cobalt Institute 2021a. Cobalt Use. Saatavilla: <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/cobalt-use/> Viitattu: 17.5.2023.
- Cobalt Institute 2021b. Cobalt Value Chain Mapping. Saatavilla: <https://www.cobaltinstitute.org/responsible-sourcing/cobalt-value-chain-mapping/#> Viitattu: 17.5.2023.
- Cobalt Institute 2022. Cobalt Market Report 2022. Saatavilla: https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2023/05/Cobalt-Market-Report-2022_final-1.pdf Viitattu: 5.6.2023
- Crundwell F.K, Preez N.B, Knights B.D.H, 2020. Production of cobalt from copper-cobalt ores on the African Copperbelt – An overview. Mineral Engineering 156. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106450> Viitattu: 15.5.2023

- Davis J.R. 2000. Nickel, Cobalt and Their Alloys, 346. Materials Park Ohio: ASM International. Saatavilla: https://books.google.fi/books?id=IePhmnbmRWkC&q=cobalt+copper+nickel+ore+separate&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false Viitattu: 17.5.2023
- Dehaine Q, Tijsseling L.T, Glass H.J, Törmänen T, Butcher A.R. 2021. Geometallurgy of cobalt ores: A review. Mineral Engineering 160. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106656> Viitattu: 18.5.2023
- Deng D. 2015. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. Energy Science and Engineering 3(5): 385–418. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1002/ese3.95> Viitattu: 15.5.2023
- Diaz L.B, He X, Hu Z, Restuccia F, Merinescu M, Barreras J.V, Patel Y, Offer G, Rein G. 2020. Review—Meta-Review of Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Industry Challenges and Research Contributions. Journal of The Electrochemical Society 167(9). Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/aba8b9> Viitattu:15.5.2023
- Elgstrand K, Sherson DL, Jørs E, Nogueira C, Thomsen JF, Fingerhut M, Burström L, Rintamäki H, Apud E, Oñate E, Coulson N, McMaster L, Clarke EE. 2017. Safety and Health in Mining: Part 1. Occupational Health Southern Africa 23(3). Saatavilla: http://www.icoh-minosh.com/Documents/Mining-Paper_Part1.pdf Viitattu: 15.5.2023
- Euroopan parlamentti ja valtuusto. 2000. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council. Saatavilla: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/53/2023-03-30> Viitattu: 15.5.2023
- European Chemical Agency 2011. Background document for cobalt(II) carbonate. Saatavilla: https://echa.europa.eu/documents/10162/17232/backgroundoc_cobalt_carbonate_en.pdf/b2bcd69-d3d3-4d23-9e35-50f7bc594788 Viitattu: 17.5.2023
- Farjana S.H, Huda N, Mahmud. M.A.P. 2019. Life cycle assessment of cobalt extraction process. Journal of Sustainable Mining 18(3): 150–161. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.002> Viitattu: 16.5.2023

Fisher K.G. 2011. Cobalt Processing Developments. 6th Southern African Base Metals Conference 2011: 237–258. Saatavilla: <https://dokumen.tips/documents/cobalt-processing-developments-k-g-fisher-processing-developments-k-g-fisher.html?page=1> Viitattu: 22.5.2023

Hamer F. & Hamer J. 2004. The Potter's Dictionary of Materials and Techniques 5. Lontoo: A & C Black. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=TApnGTVLwxAC&pg=PA69&dq=Cobalt+oxide#v=onepage&q=cobalt&f=false> Viitattu: 15.5.2023

Harraz H. 2010 Underground mining Methods. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2881.1124> Viitattu: 15.5.2023

Kaeschager F. 2008. Viitattu: 15.6.2023

Kruger T. 2017. Glencore buys stakes in Mutanda Mining and Katanga Mining. Saatavilla: <https://www.miningreview.com/news/glencore-buys-stakes-mutanda-mining-katanga-mining/> Viitattu: 15.5.2023

Mudd G.D. Weng Z. Jowitt S.M. Turnbull I.D. Graedel D.E. 2013. Quantifying the Recoverable Resources of Companion Metals: A Preliminary Study of Australian Mineral Resources. Wealth from Waste: Urban Metal Resources and Industrial Ecology 3(4): 657-671. Saatavilla: <https://www.mdpi.com/2079-9276/3/4/657/htm> Viitattu: 22.5.2023

Nanotech Processing 2021. Alliage Blanc Alloy Treatment Development. Saatavilla: <https://www.nanotech.com/portfolio/alliage-blanc-alloy-treatment-development/> Viitattu: 14.6.2023

PubChem 2023a. Cobalt. Saatavilla: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Cobalt#section=Uses> Viitattu: 18.5.2023

PubChem 2023b. Cobalt chloride. Saatavilla: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cobalt-chloride-CoCl2> Viitattu: 17.5.2023

PubChem 2023c. Cobalt(II) oxide. Saatavilla: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cobalt-II-oxide> Viitattu: 17.6.2023

PubChem 2023d. Cobalt Sulfate. Saatavilla: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cobalt-sulfate> Viitattu: 17.5.2023

PubChem 2023e. Cobalt Sulfide. Saatavilla: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cobalt-sulfide#section=Industry-Uses> Viitattu: 21.5.2023

PubChem 2023f. Cobalt tetraoxide. Saatavilla: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cobalt-tetraoxide> Viitattu: 17.5.2023

Shamshuddin M. 2016. Roasting of Sulfide Minerals: 39–69. Saatavilla: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119078326.ch2> Viitattu: 17.5.2023

Smith K.S & Huyck L.O. 1999. Reviews Volume 6 The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits Part A: Processes, Techniques, and Health Issues Part B: Case Studies and Research Topics 6A: 29-70. Saatavilla: <https://www.resolutionmineeis.us/documents/smith-huyck-1999> Viitattu: 16.5.2023

U.S. Environmental Protection Agency. 2011. Explanation of Significant Differences for the Record of Decision for the Blackbird Mine Lemhi County, Idaho. Saatavilla: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P10155K5.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C11thru15%5CTxt%5C00000041%5CP10155K5.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> Viitattu: 17.5.2023

U.S. Geological Survey. 2017. Cobalt. Chapter F of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply: 2330-7102. Saatavilla: <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/f/pp1802f.pdf> Viitattu: 15.5.2023

U.S. Geological Survey. 2023. Mineral Commodity Summaries. Saatavilla: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-cobalt.pdf> Viitattu: 15.5.2023

Vergne J. 2008 Hard Rock Miner's Handbook Edmonton, Stantec Consulting. Saatavilla: https://www.stantec.com/content/dam/stantec/files/PDFAssets/2014/Hard%20Rock%20Miner's%20Handbook%20Edition%205_3.pdf Viitattu: 15.5.2023

Windisch-Kern S, Gerold E, Nigl T, Jandric A, Altendorfer M, Rutrecht B, Scherhauser S, Raupenstrauch H, Pomberger R, Antrekowitch H, Part F. 2022. Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. Waste Management 138, 125-139. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.038> Viitattu: 15.5.2023

Windisch-Kern S, Holzer A, Ponak C, Raupenstrauch H. 2021. Pyrometallurgical Lithium-Ion-Battery Recycling: Approach to Limiting Lithium Slagging with the InduRed Reactor Concept. Advanced Technology of Waste Management 9(1). Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/pr9010084> Viitattu: 15.5.2023.

Wollschlaeger S. 2018. Basic of Cobalt Electrowinning in Under 3 Minutes. Saatavilla: <https://blog.emew.com/basics-of-cobalt-electrowinning-in-under-3-minutes> Viitattu: 15.5.2023

Zeiler B, Bartl A, Schubert W. 2021. Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 98: 454-458. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105546> Viitattu: 15.5.2023

Zheng X, Zhu Z, Lin X, Zhang Y, He Y, Cao H, Sun Z. 2018. A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. Engineering 4(3): 361-370. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018> Viitattu: 15.5.2023