



TERÄSTEOLLISUUDEN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT JA NIIDEN VÄHENTÄMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikka

2023

Aatu Aalto

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Aatu Aalto

Terästeollisuuden hiilidioksidipäästöt ja niiden vähentäminen

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

25 sivua ja 1 kuva

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

Avainsanat: terästeollisuus, hiilidioksidi, päästöt, vety

Työssä käydään läpi teräksenvalmistus ja tutkitaan valmistuksesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen määrää. Päästöjen vähentämiselle on esitelty ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja.

Terästeollisuus vastaa noin seitsemästä prosentista maailman hiilidioksidipäästöjä. Ilmas-
tonmuutoksen hillitsemisen takia päästöjä täytyy pienentää. Teräksenvalmistukseen on
monia tapaa, mutta maailmalla suosituimmat ovat masuuni-happikonvertteri -menetelmä ja
suorapelkistys-valokaariuuni -menetelmä, mitkä vastaavat käytännössä koko maailman te-
rästuotannosta. Päästöjä muodostuu lähes jokaisessa vaiheessa teräksentuotantoa. Suurim-
mat päästöt tämänhetkisisä valmistustavoissa muodostuvat rautamalmin pelkistyksestä ma-
suunissa.

Terästeollisuuden siirtyminen vähäpäästöisempiin valmistusmenetelmiin ei ole nopeaa joh-
tuen innovaatioiden valmiuden tasoista ja laitosten pitkistä elinkaarista. Teräksen päästö-
määrissä on selviä eroja tuotantotapaan perustuen. Terästeollisuuden reiluun päästöjen vä-
hentämiseen on teorian ja pienen mittakaavan tasolla toimivat menetelmät. Tällä hetkellä
uudet menetelmät ovat kalliimpia kuin vanhat, mutta niiden yleistyessä niistä voi tulla hal-
vempia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Aatu Aalto

Steel industry's carbon dioxide emissions and reduction

Bachelor's thesis

2023

25 pages and 1 figure

Examiner: Docent Kari Myöhänen

Keywords: steel industry, carbon dioxide, emissions, hydrogen

The text discusses steel production and examines the amount of carbon dioxide emissions resulting from the manufacturing process. Environmentally friendlier alternatives for reducing emissions have been introduced.

The steel industry accounts for approximately seven percent of the world's carbon dioxide emissions. To mitigate climate change, these emissions must be reduced. There are various methods for steel production, but the most popular ones globally are the blast furnace-basic oxygen furnace method and the direct reduction-electric arc furnace method, which practically account for the entire world's steel production. Emissions occur in almost every stage of steel production. In the current production methods, the largest emissions come from the reduction of iron ore in the blast furnace.

The transition of the steel industry to low-emission manufacturing methods is not swift due to the readiness levels of innovations and the long lifecycles of facilities. There are clear differences in emissions based on the production method. The methods that reduce emissions by a large amount in the steel industry operate at a theoretical and small-scale level for now. Currently, these new methods are more expensive than the old ones, but as they become more widespread, they might become cheaper.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AEL	Alkaline electrolysis (alkalielektrolyysi)
BF	Blast Furnace (masuuni)
BOF	Basic Oxygen Furnace (happipuhalluskonvertteri)
CCS	Carbon capture and storage (hiilidioksidin talteenotto ja varastointi)
CCU	Carbon capture and utilization (talteenotetun hiilidioksidin hyödyntäminen)
CCUS	Carbon capture, utilization and storage (hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi)
DRI	Direct Reduced Iron (suorapelkistetty rauta)
EAF	Electric Arc Furnace (valokaariuuni)
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
LD	Linz-Donawitz -puhallusmenetelmä
OBM	Oxygen Bottom-blowing Furnace (hapen pohjapuhallusmenetelmä)
PEM	Proton Exchange Membrane (protonielektrolyysi)
SOEL	Solid Oxide electrolysis (höryelektrolyysi)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Teräksen valmistus	7
2.1	Masuuni.....	8
2.2	Happipuhalluskonverterti	10
2.3	Valokaariuuni	11
2.4	Raudan suorapelkistys.....	11
2.5	Valmistuksessa aiheutuvat päästöt.....	12
3	Keinot päästöjen vähennykseen	14
3.1	Vety.....	15
3.2	Rautaromun käyttö	18
3.3	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi	19
4	Johtopäätökset	21
	Lähteet	22

Kuvaluettelo

Kuva 1: Teräksen valmistus masuunilla ja valokaariuunilla.

1 Johdanto

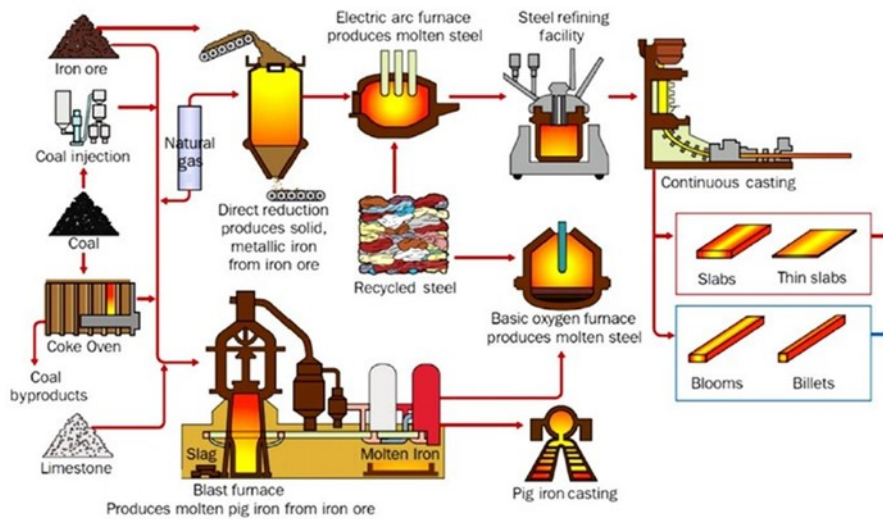
Terästä käytetään monissa paikoissa, sillä se on monikäyttöistä ja kestävä. Teräs on välttämättömän materiaali rakentamisessa, liikenteessä ja energiantuotannossa. Suuren lujuutensa puolesta teräs erottuu edukseen muun muassa tiilestä, betonista ja puusta. Tämän lisäksi teräksen mekaanisia ominaisuuksia on mahdollista muokata sopivammaksi käyttökohteeseen valmistusprosessin avulla.

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä maapallon keskilämpötilan nousun hillitsemiseksi. Teräksen kysyntä on kasvussa ja viime vuosikymmenien aikana sen kysyntä ja valmistus on kasvanut. Vuonna 2000 raakaterästä valmistettiin 850 miljoonaa tonnia, vuonna 2010 raakaterästä valmistettiin 1435 miljoonaa tonnia ja vuonna 2020 raakaterästä valmistettiin 1882 miljoonaa tonnia. Tuotantomäärien keskimääräinen nousu on ollut 2–6 % viiden vuoden aikana. Nykyisillä menetelmillä se synnyttää suuria määriä kasvihuonekaasupäästöjä kiihdyttäen ilmastonmuutosta. Tämän takia täytyy keksiä tapoja päästöjen vähentämiseen tuotannon vähentämisen sijaan. Rauta- ja terästeollisuuden kasvihuonekaasupäästöt ovat noin seitsemän prosenttia maailman vuotuisista kasvihuonekaasupäästöistä.

Tämän työn tavoitteena on selvittää vaihtoehtoja terästeollisuuden päästöjen vähennykseen. Tässä työssä käydään läpi teräksen yleisimmät valmistusprosessit ja selvitetään mistä terästeollisuuden suuret päästöt johtuvat.

2 Teräksen valmistus

Teräksen valmistukseen on monta tapaa, mutta teollisesti tällä hetkellä kaksi tapaa ovat toisia selvästi suosituimpia. Tässä esitellään teräksen yleisimmät valmistustavat. Käydään läpi teräksen valmistusprosessin vaiheet ja vertaillaan eri valmistustapojen hiilidioksidipäästöjä. Kuvassa 1 näkyy näiden yleisimpien valmistustapojen vaiheet ja raaka-aineet. Kuvaa luetaan vasemmalta oikealle. Kuvassa ylhäällä on suorapelkistys valokaariuunilla ja alaosassa on masuunireitti.



Kuva 1. Teräksen valmistus masuunilla ja valokaariuunilla (Jamison, Kramer et al. 2015).

Kuvasta 1 löytyy eroja valmistustapojen välillä. Esimerkiksi suorapelkistyksessä rauta on kiinteää ja masuuni tuottaa sulaa rautaa. Kuvasta 1 näkyy myös, että prosessit vaativat eri raaka-aineita. Teräksen olleessa valmista prosessi on sama jatkokäsittelyn osalta.

Rauta on yksi alkuaineista ja sen kemiallinen merkki on Fe. Rautaa ei esiinny puhtaana luonnossa, vaan se on tyypillisimmin oksideina, kuten hematiittina (Fe_2O_3) ja magnetiittina (Fe_3O_4). Rautamalmilla tarkoitetaan kiveä, joka koostuu rautaoksidista. Rauta erotetaan rautamalmista pelkistämällä, eli happi poistetaan ja rauta jää jäljelle. (Britannica 2023.)

Raudalle on eri nimityksiä hiilipitoisuuden ja muokattavuuden perusteella (Väisänen 2007, 4). Hiilellä ja muilla seosaineilla, kuten kromilla, nikkelillä, mangaanilla, volframilla ja vanadiinilla, vaikutetaan raudan ja teräksen ominaisuuksiin (WII 2006). Esimerkiksi teräksen maksimilujuus saadaan noin 0,6 prosentin hiilipitoisuudella. Matalalla hiilipitoisuudella teräs on sitkeämpää. (Hiilitieto 2023.) Valuraudan hiilipitoisuus on yli 1,7 %, kun taas teräksen hiilipitoisuus on alle 1,7 %. Valuraudaksi kutsutaan masuunista valutettua pelkistettyä rautaa, jonka hiilipitoisuus on yli 4,5 %. Esimerkkinä muokattavuudesta, takorauta on sitkeää ja muokattavaa terästä, jolla on alhainen hiilipitoisuus. (Väisänen 2007, 4.)

Myös samaa rautalajia voidaan luokitella lisää sen ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi valurauta luokitellaan vielä erikseen murtopinnan värin mukaan. Murtopinnan ollessa valkoinen, on kyseessä valurauta, joka on erittäin kovaa, kun taas murtopinnan ollessa harmaa, on valurauta edelliseen verrattuna sitkeämpää ja pehmeämpää. Valurauta on esimerkiksi hyvä valettava, mutta se ei saa ehtiä jähmettyä, sillä jähmetyttyään siitä tulee haurasta ja kovaa. (Väisänen 2007, 25.)

Terässektorin käyttämästä energiasta 75 % on tuotettu hiilellä. Hiilestä saadaan tuotettua teräksenvalmistusprosessissa tarvittavaa lämpöenergiaa ja koksia, joka on tällä hetkellä tyyppillinen osa masuuniprosessia. (International Energy Agency 2020, s. 11). Fossiilisilla polttoaineilla tuotetaan noin 81 prosenttia terässektorin käyttämästä energiasta ja uusiutuvalla energialla noin 14 prosenttia ja ydinvoimalla noin 5 prosenttia energiasta. Vuonna 2018 raakateräksestä 72 prosenttia valmistettiin masuunin (BF) avulla ja valokaariuunilla (EAF) 27,6 prosenttia. (Holappa 2020.) Suurimmat teräksenvalmistajat vuonna 2021 olivat Kiina (54 %), Intia (6 %), Japani (5 %) ja Yhdysvallat (4,5 %) (Eurofer 2022).

Teräksenvalmistusprosessissa syntyy erilaisia sivutuotteita, joista osaa voidaan käyttää prosessissa vielä uudelleen. Sivutuotteet, joille ei ole käyttöä voidaan myydä toiselle teollisuuden haaralle, jossa niille on käyttöä, kuten esimerkiksi jätelämpöä voidaan hyödyntää kaukolämmön tuotannossa. (Väisänen 2007.)

2.1 Masuuni

Kun viitataan perinteiseen teräksen tuotantotapaan, tarkoitetaan masuunireittiä, jossa rautamalmi pelkistetään ja sulatetaan käyttäen koksia prosessissa apuna (Pinola 2022).

Tämänhetkinen masuuniprosessi teräksenvalmistuksessa nojaa vahvasti koksien käyttöön (HYBRIT 2020).

BF on keskimäärin noin 30 metriä korkea uuni, joka on rakennettu tulenkestävästä tiilestä ja teräslevystä. Panostuslaitteisto sijaitsee masuunin yläosassa, sieltä lisätään raudan raaka-aineet. Uunin alapuolella on pesä, josta sulanut rauta lasketaan ulos masuunista. (Metallinjalostajat ry 2014, 23.)

Maailman rautamalmista suurin osa valmistetaan masuuneissa. Rautaraaka-aineet panostetaan masuuneihin masuunin yläosasta. Nämä raaka-aineet ovat pelletteinä, sintterinä tai palamalmina. Myös koksi, joka toimii pelkistäjänä, lisätään ylhäältä. Masuunin alaosan hormeista puhalletaan kuumaa hapella rikastettua ilmaa. Raudanpelkistyksessä ruiskutetaan myös hiilipölyä ja öljyä kuuman ilman joukossa. Yhdessä hiilipöly, öljy ja koksi muodostavat hiilimonoksidia ja vetyä. Valmistuksen yhteydessä rautaoksideista täytyy poistaa happi, jotta tämä onnistuu, tarvitaan ainetta, joka erottaa hapen rautaoksidista. Hiili, vety ja hiilimonoksidi toimivat pelkistiminä, ne sitovat rautaoksidien hapen ja kuljettuvat kaasumuodossa (H_2O , CO , CO_2) pois masuunista. (Metallinjalostajat ry 2014, 20.)

Masuunin puhallusilma kuumennetaan ennen kuin se puhalletaan masuuniin. Riittävä lämpötila on 1000–1300 °C. Tämän kuumennetun ilman happi polttaa koksien hiilen hiilimonoksidiksi, eli koksi hapettuu ja samalla tuottaa paljon lämpöenergiaa nostaen masuunin lämpötilaa hiilimonoksidin edelleen reagoidessa hapen kanssa ja pelkistäen rautamalmia. Masuunin sisällä palamiskaasut liikkuvat ylöspäin, ne kuumentavat alaspäin vajoavan panoksen ja samalla sulattavat pelkistyneen raudan ja kuonan. Palamiskaasut luovuttavat suuren osan lämpöenergiastaan ja poistuvat 100–200 °C lämpötilassa. Palamiskaasut otetaan talteen ja ne polttamalla kuumennetaan seuraavan panoksen puhallusilmaa. (Metallinjalostajat ry 2014, 20–21.)

Kun lämpötila on noussut 1450 °C:een alkaa rauta sulamaan ja valumaan kohti masuunin pohjaa, eli pesää. Valuessaan koksikerroksen läpi, rauta hiilettyä ja osa rikistä liukenee rautaan. Rauta lasketaan masuunista sulana ulos noin 1450 °C:na. Pienemmillä masuuneilla 6–12 kertaa päivässä tapahtuu sulan raakauraudan lasku, mutta suurilla masuuneilla voi olla koko ajan lasku käynnissä. Pesän ollessa tyhjä, reikä tukitaan tulenkestävällä massalla. Yleisintä on käyttää raakaurautaa sulana teräksen valmistukseen. (Metallinjalostajat ry 2014, 22.)

2.2 Happipuhalluskonvertteri

Happipuhalluksen reaktioastiaa kutsutaan konvertteriksi, eli kyseessä on happipuhalluskonvertteri (BOF). Se on sylinterinmuotoinen ylhäältä auki oleva astia. Sisällä on tulenkestävä vuoraus ja se on muuten tehty teräksestä. Reaktio, joka konverttereissa tapahtuu, on nimeltään mellotus, jossa raudassa oleva hiili reagoi puhallettavan hapen kanssa ja muodostaa hiilimonoksidikaasua. Hiilimonoksidikaasu poistuu konvertterista. (Metallinjalostajat ry 2014, 35.)

Tällä hetkellä happipuhalluksessa vallitsevia menetelmiä on kolme, Linz-Donawitz -menetelmä, pohjapuhallusmenetelmä ja näiden kahden yhdistelmäpuhallus. Linz-Donawitz -menetelmässä (LD) happi puhalletaan konvertterin yläpuolelta laskettavan putken, lanssin, kautta, missä on 3–6 reikää, joista happisuihku suuntautuu sulaa rautaa kohden. Pohjapuhallusmenetelmässä (OBM) happi puhalletaan nimensä mukaisesti konvertterin pohjassa olevista suuttimista. Suuttimissa on kaksi sisäkkäistä putkea, joista sisempi puhaltaa happea ja ulompi hiilivetyä, joka suojaa suuttimen ympäristöä. (Metallinjalostajat ry 2014, 35.)

Nykyaikaiset konvertterit ovat LD- ja OBM-menetelmien yhdistelmiä. Molemmissa menetelmissä on etuja ja haittoja, nykyistä yhdistelmäpuhallusmenetelmää on kehitetty etujen maksimoimiseksi ja haittojen vähentämiseksi. LD-konverttereihin on lisätty pohjasuuttimia ja OBM-konverttereihin on lisätty lansseja. Konvertteriin panostetaan sula raakarauta ja kierrätysteräs sekä lisätään poltettu kalkki ja fluksiaineet. Prosessin kulkua ohjataan happea puhaltavien lanssien korkeutta säätämällä ja pohjasta puhallettavien kaasujen suhdetta muuntelemalla. (Metallinjalostajat ry 2014, 36.)

Prosessissa lämpötila nousee nopeasti ja ensimmäisenä hapettuu pii. Kalkkia lisätään niin paljon, että kuonasta saadaan emäksinen, mikä edistää haitallisten epäpuhtauksien, esimerkiksi fosforin ja rikin, siirtymistä kuonaan. Piin hapetuttua hiilen voimakas palaminen alkaa. Kun haluttu hiilipitoisuus on saavutettu, pysäytetään puhallus. Kun puhallus on päättynyt, sula teräs kaadetaan valusenkkään kyljessä olevasta aukosta kallistamalla konvertteria. (Metallinjalostajat ry 2014, 36.)

Puhallusaika vaihtelee 15–20 minuutin välillä ja aika kaadosta seuraavaan kaatoon 30–50 minuuttia. Suurimmat konvertterit valmistavat kerralla 400 tonnia terästä. Terässulatoilla on tyypillisesti kaksi tai kolme konvertteria, joista yksi on uudelleen muurattavana ja loput

käytössä. Kahden konvertterin sulatolla käsitellään vuodessa 10–15 tuhatta panosta. Esimerkkinä Raahen tehdas, jossa on kolme 120 tonnin konvertteria. (Metallinjalostajat ry 2014, 36.)

2.3 Valokaariuuni

Valokaariuuniprosessissa kierrätysteräs sulatetaan sähköllä tuotetulla lämmöllä (Metallinjalostajat ry 2014, 37). Tänä päivänä EAF:n käyttö on tyypillistä sulatettaessa ja mellottaessa kierrätysteräksestä uutta terästä, mutta sillä voidaan myös jalostaa valurautaa teräkseksi (Steel Times International 2013).

Valokaariuuni on lieriömäinen ja matala ja sitä voidaan kallistaa kahteen suuntaan, jotta saadaan teräs laskettua toiselta puolelta ja kuona vedettyä ja laskettua toiselta. Katon, eli holvin, läpi on kolme elektrodia. Uunin panostuksessa elektrodit käännetään sivuun. Kierrätysteräs nostetaan uunin romukoreihin. Elektrodit ovat grafiittisauvoja. Elektrodien ja panoksen välille syntyy valokaaria, joissa sähköenergia muuntuu lämpöenergiaksi. Valokaari pidetään mahdollisimman tehokkaana automaattisten elektrodisäätimien avulla, mitkä säätävät elektrodien kärjen ja panoksen välistä etäisyyttä. (Metallinjalostajat ry 2014, 37.).

Kierrätysteräs pitää aina sisällään haitallisia epäpuhtauksia. Mellotuksessa EAF:lla ei saada poistettua kuparia, tinaa eikä arsenikkia, mutta niiden pitoisuuksiin voidaan vaikuttaa lajittelemalla raaka-aineet. Uuniaika nykyaikaisilla EAF:lla on noin 30 minuuttia ja panoskoot vaihtelevat 10–150 tonnin välillä. (Metallinjalostajat ry 2014, 37.).

Tällä hetkellä valokaariuunilla tuotettu teräs on tyypillistä ympäri maailmaa, mutta Kiina on poikkeus, siellä vain noin 10 % teräksestä tuotetaan EAF-reitillä (Holappa 2020). Kiinassa tuotetaan 90 % teräksestä BF-BOF-reitillä (Song, Du et al. 2023). Uskotaan, että romun määrän kasvaessa Kiinassa EAF-valmistustavan käyttö yleistyy enemmän (Holappa 2020).

2.4 Raudan suorapelkistys

Suorapelkistyksellä voi myös valmistaa terästä, kuten masuunillakin. Suorapelkistyksessä rautaa käsitellään matalammassa lämpötilassa (700–1050 °C), tämä johtaa siihen, että rauta ei sula ja sen hiilipitoisuus jää matalammaksi kuin masuunissa valmistetussa raakaraudassa.

Suorapelkistysrauta (DRI) on lähes metallisista epäpuhtauksista vapaa ja sopii tästä syystä erikoisterästen valmistukseen. Pelkistyksen jälkeen rauta on pulverina tai huokoisena rautana. (Väisänen 2007, 11.)

Suorapelkistysmenetelmiä on erilaisia ja ne eroavat toisistaan polttoaineen ja uunin tyypin perusteella (Väisänen 2007, 11). Yleisintä on käyttää suorapelkistettyä rautaa valokaariuuneissa, mutta suorapelkistetty rauta käy myös masuuneihin ja konverttereihin. Suurin osa DRI-tuotannosta tapahtuu alueilla, joissa on halpaa maakaasua pelkistykseen ja energianlähteeksi, mutta esimerkiksi Intiassa on tyypillistä käyttää rumpu-uuneja, joissa käytetään polttoaineena kivihiiltä. (Metallinjalostajat ry 2014, 31.)

Suorapelkistysmenetelmistä yleisin on nimeltään Midrex, siinä käytetään kuilu-uunia, joka muistuttaa rakenteeltaan masuunia. Raaka-aineena käytetään mahdollisimman puhdasta palamalmia ja rikastepellettejä, jotka niin ikään kuin masuunissakin lisätään kuilun yläpäästä. Pelkistyskaasu, joka muodostuu hiilimonoksidista ja vedystä, pelkistää lisätyn panoksen laskeutumisen aikana kaasun virratessa alhaalta ylöspäin. Panostetusta raaka-aineesta muodostuu sienirauta, joka jäädytetään kuilun alaosassa ja poistetaan pohjassa olevasta aukosta. (Metallinjalostajat ry 2014, 32.)

2.5 Valmistuksessa aiheutuvat päästöt

Kaikki edellä käsitellyt teräksen tuotantovaiheet aiheuttavat päästöjä. Päästöjä on erilaisia, kuten jätevedet, savukaasut ja pöly. (Roudier, Luis et al. 2013). Kasvihuonekaasuprotokollan mukaan päästöt jaotellaan kolmeen eri luokkaan eli scopeen. Scope 1 luokassa ovat päästöt, jotka syntyvät yrityksen oman toiminnan seurauksena. Scope 2 luokassa ovat tuotannon epäsuorat päästöt, esimerkiksi sähkön tuotannosta aiheutuneet päästöt. Scope 3 luokassa ovat muilta ostetut palvelut ja oman myydyn tuotteen loppukäytöstä aiheutuvat päästöt. (Holtinen 2023.) Scope 3 päästöjä harvemmin kerrotaan (Song, Du et al. 2023).

BF-BOF -menetelmän CO₂-päästöistä noin 13 prosenttia syntyy rautamalmin sintrauksesta, noin kaksi prosenttia pelletoinnista ja noin viisi prosenttia koksen valmistuksesta. Eli yhteensä noin viidennes BF-menetelmän päästöistä syntyy ennen raakaraudan valmistusta. Masuuni puolestaan vastaa 70 prosentista BF-BOF -menetelmän hiilidioksidipäästöistä ja 10 prosenttia päästöistä aiheutuu teräksenvalmistuksesta. (Hong Yong Sohn 2020.)

BF-BOF -menetelmällä valmistettu teräs, jossa on lisätty hiiltä ruiskuttamalla panokseen, tuottaa suoria, Scope 1, päästöjä 1,2 t CO₂ / t terästä. Lisäksi käytetty sähkö ja tuotu lämpö lisäävät Scope 2 päästöjä 1,0 t CO₂ / t terästä. BF-BOF -menetelmässä noin 90 prosentissa tuotantoa käytetään hiiliruiskutusta, joten luvut kattavat suuren osan tuotannosta. Jäljelle jäävässä noin kymmenessä prosentissa tuotantoa käytetään hiilen tilalla esimerkiksi puuhiiltä ja bensiiniä, mitkä johtavat hieman pienempään Scope 1 päästölukemaan. Suuri Scope 2 luku johtuu palamiskaasujen polttamisesta. Palamiskaasut ovat energiapitoisuudeltaan pieniä ja ne pitävät sisällään palamatonta hiilidioksidia noin neljänneksen. Tämän takia palamiskaasut palamisenkin jälkeen pitävät sisällään reilusti hiilidioksidia. (International Energy Agency 2020, 38.) SSAB:n ympäristöjohtaja Harri Leppänen kertoo Kauppalehden julkaisemassa artikkelissa Raahen tehtaamassuuniprosessin avulla tuotettavan terästonnin hiilidioksidipäästöjen olevan noin 1,6 tonnia. (Räisänen 2022).

Toinen päävalmistustapa DRI-EAF -menetelmä saavuttaa matalammat päästötasot kuin BF-BOF -menetelmä. Tämä johtuu ainakin osittain siitä, että noin 70 % DRI-EAF -menetelmällä valmistetusta teräksestä käyttää maakaasua hiilen sijasta. Scope 1 päästöjä DRI-EAF -menetelmä maakaasulla tuottaa 1,0 t CO₂ / t terästä ja Scope 2 päästöjä se tuottaa 0,4 t CO₂ / t terästä. DRI-EAF -menetelmä hiilellä tuottaa Scope 1 päästöjä noin kolminkertaisen määrän ja saman verran Scope 2 päästöjä kuin maakaasulla tuotettu. (International Energy Agency 2020, 38.)

3 Keinot päästöjen vähennykseen

Verratessa energiankäyttöä ja hiilidioksidipäästöjä vuoden 1960 lukuihin, ovat tämänhetkiset luvut puolittuneet. Tällä hetkellä terässektorin tavoitteena on vähentää päästöjä 80–95 prosenttia vuoden 1990 luvuista vuoteen 2050 mennessä. Vuonna 2022 terässektorin päästöt olivat edelleen suuret ja maailmanlaajuisesti vastasivat noin seitsemää prosenttia koko maailman päästöistä. Tätä osuutta on mahdollista pienentää huomattavasti. Jotta Euroopan unionin ilmastotavoitteita pystyttäisiin noudattamaan, täytyy seuraavien 5–10 vuoden aikana kehittää menetelmiä, jotka vähentävät päästöjä merkittävästi. (Joint Research Centre 2022.)

Terästuotannon oletetaan kasvavan 25–30 % vuoteen 2050 mennessä, määrään 2500 Mt vuodessa. Tuotannon kasvun takia päästöjä pitäisi pienentää, jotta vuoden 2018 IPCC raportissa määritetyt ilmastotavoitteet ovat mahdollista toteuttaa. Teräksen päästöt tuhatta kilogrammaa terästä kohden tällä hetkellä ovat keskimäärin 1,8 t CO₂ / t terästä. Tätä lukua pitäisi selvästi laskea. Pariisin ilmastosopimuksessa tavoite maapallon keskilämpötilan nousulle pyritään pitämään alle kahdessa celsiusasteessa ja yritetään vähentää lämpenemistä 1,5 celsiusasteeseen. Tuotantomäärien kasvaessa nykyiset päästöt tonnille terästä ovat liian korkeat. Jotta maapallon keskilämpötilan nousu saataisiin rajoitettua kahteen celsiusasteeseen, päästöt täytyisi puolittaa per terästonni ja jotta 1,5 celsiusasteen rajoitus olisi mahdollinen täytyisi terästonnin päästöjä leikata noin 80 prosenttia. Lopulliseksi luvuksi tulisi siis 0,3–0,6 t CO₂ / t terästä. Vuoteen 2050 mennessä osa toimijoista varmasti saavuttaa tavoitellut päästötasot, mutta tuskin kaikki pystyvät siihen. (Holappa 2020.).

Kiinan teräksentuotannon hiilidioksidipäästöt ovat selvästi maailmanteräksen keskiarvoa korkeammat. Vuoden 2019 datan mukaan Kiinassa tuotettu terästonni on tuottanut keskimäärin noin 2,33 tonnia CO₂-päästöjä. Tuosta summasta lähes 90 % on lähtöisin teräksen valmistuksesta. Vuoden 2019 raudan- ja teräksenvalmistuksen maailmanlaajuisista päästöistä yli 60 prosenttia oli Kiinan tuotannon aiheuttamaa. Kiinan tuottaessa yli puolet maailman teräksestä näillä päästöillä, siellä tehdyt muutokset voivat näkyä nopeasti maailmanteräksen keskiarvopäästöissä. (Song, Du et al. 2023.)

Siirtyminen ympäristöystävällisempään teräksentuotantoon ei tapahdu itsekseen. Valtioilla on tärkeä rooli siirtymisen edistämässä erilaisten säädösten ja päätösten avulla. Valtiot

voivat esimerkiksi tukea CO₂-päästöjä vähentäviä valintoja ja ohjata päätöksiä ympäristöystävällisempään suuntaan. Ne toimijat, jotka haluavat nopeuttaa siirtymää voivat luoda markkinat lähes päästöttömälle teräkselle ja tukea lähes päästöttömien tekniikoiden demonstrointia ja jatkokehitystä. (International Energy Agency 2020, 15.)

Energia- ja materiaalitehokkuuden parantamiseksi täytyisi pyrkiä käyttämään parasta mahdollista saatavilla olevaa teknologiaa ja tuotantotapaa (International Energy Agency 2020, 15). Vanhempia laitoksia uudistamalla ja ottamalla käyttöön prosessin jokaisessa vaiheessa uusinta teknologiaa voidaan mahdollisesti laskea terästönkin päästöjä jopa 15–20 % (Holappa 2020). Monet nykyaikaiset tehtaot ovat todella energiatehokkaita ja operoivat lähes parhaalla mahdollisella energiatehokkuudella (IEA 2020). Nykyisten laitosten suunnitelmat tulevaisuudelle täytyy olla ajan tasalla ja tulevaisuissa investoinneissa päämääränä päästötön teräs (International Energy Agency 2020, 15).

Tämänhetkiset suuret haasteet terässektorilla hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen liittyvät fossiilisten polttoaineiden käytön suureen määrään ja tehdasten pitkään ikään. Raakateräksentuotannon nojatussa vahvasti hiilen ja osittain maakaasun käyttöön, pitäisi niille löytää järkevä korvaaja. Terästuotannossa käytettävällä välineistöllä on pitkä elinkaari, esimerkiksi BF:n elinkaari on ainakin 25 vuotta ja joissain tapauksissa voi yltyä jopa 40 vuoteen. Tämän takia laitteiden uusinta ei välttämättä tapahdu muutamissa vuosissa, vaan sen täytyy olla oikea-aikaista, jotta se olisi taloudellisesti kannattavaa. Arvioiden mukaan vuonna 2030 nykyisestä BF-BOF -menetelmän kapasiteetistä olisi vielä noin 90 % käytössä ja vuoteen 2050 mennessä olisi vielä noin 35 prosenttia käytössä. Vielä pitkäikäisiin laitoksiin voidaan tehdä investointeja ja parannella niiden päästötasoja. (IEA 2020.)

3.1 Vety

Tavoitellessamme täysin hiilivapaata tuotantoa, on vety hyvä vaihtoehto. Teollisuudessa masuuneissa vetyä on jo käytetty maakaasun tilalla. Vedyn käytön ongelmana on vedyn tuottaminen, sillä sitä ei esiinny luonnossa. Vedestä voidaan tuottaa vetykaasua suurissakin määrissä elektrolyysin avulla, hajottamalla vesi vedyksi ja hapeksi. (Holappa 2021.)

Teräksen tuotanto vedyn avulla voidaan jakaa karkeasti kolmeen vaiheeseen, joita ovat vedyn tuottaminen elektrolyysillä käyttäen mieluiten päästötöntä sähköä, toinen vaihe on

rautamalmin suorapelkistys käyttäen tuotettua vetyä ja kolmannessa vaiheessa suorapelkistetyn raudan sulatus valokaariuunissa, jotta raudasta voidaan valmistaa terästä. (Patisson, Mirgaux 2020.)

Elektrolyysissä tarkoituksena on hajottaa vesimolekyylit hapeksi ja vedyksi sähkön avulla. Vesimolekyylin hajotuksessa käytetään katodia, joka on negatiivisesti varautunut, ja anodia, joka on positiivisesti varautunut. Kun sähkövirta kytketään päälle, positiivisesti varautunut vety hakeutuu katodiin ja negatiivisesti varautunut happi siirtyy anodiin. Elektrolyysityyppejä on olemassa kolme erilaista, mitä ovat alkalelektrolyysi (AEL), protonielektrolyysi (PEM) ja höyryelektrolyysi (SOEL). (Hussy, Fuchs 2021.)

AEL on tutkituin menetelmä näistä kolmesta. AEL menetelmässä käytetään nestemäistä elektrolyyttiä, joka on kalium- tai natriumhydroksidia. Tämän nestemäisen elektrolyytin avulla luodaan kaasun erotus negatiivisesti ja positiivisesti varautuneiden puolien välille. Tällä hetkellä AEL on halvin menetelmä elektrolyysille, noin 1000 € / kW. Suurimpana etuna pidetään tekniikan kehittyneisyyttä ja sen laajaa toiminnan tuntemusta, mutta haittapuolena se reagoi hitaasti tehon muutoksiin, minkä takia se ei sovi hyvin yhteen uusiutuvan energian kanssa. (Portillo 2023.)

PEM-elektrolyysissä elektrolysaattorin sisusta on hapan. Tästä syystä platinaa tai iridiumia käytetään suojelemaan elektrodeja korroosiolta. Muovinen kaasunläpäisemätön elektrolyytikalvo on käytössä, mikä johtaa puhtaampaan lopputulokseen. PEM-menetelmä sopii parhaiten uusiutuvien energialähteiden kanssa, sillä se reagoi nopeasti tehon muutoksiin. Hintaa PEM-elektrolyysille tulee noin 2000 € / kW. (Hussy, Fuchs 2021.) Haittapuolena on prosessin vaatimat jalometallit (Portillo 2023).

SOEL-elektrolysaattorissa kaksi elektrodia on erotettu happi-ioneja johtavalla oksidilla. Käyttölämpötila on korkea, noin 1000 °C. Ulkopuolisen lämmönlähteen valinnalla vaikutetaan hyötysuhteeseen, joka tällä menetelmällä voi olla näistä menetelmistä korkein. Itse reaktio korkeissa lämpötiloissa ei vaadi niin paljoa ulkoista energiaa, mutta lämpötilan nosto sopivaksi vaatii enemmän energiaa. Samoilla laitteilla voidaan valmistaa synteetikaasua, joka sisältää vetyä ja hiilimonoksidia. Muodostaakseen synteetikaasua prosessi vaatii vettä ja hiilidioksidia alkupanokseen. SOEL-elektrolyysin hinta on noin 2500 € / kW. (Hussy, Fuchs 2021.)

Kaikilla näillä menetelmillä on hyvät ja huonot puolet. Käytettävä menetelmä täytyy valita käyttötarkoituksen mukaan. AEL ja PEM toimivat matalassa lämpötilassa ja SOEL toimii korkealla lämpötilalla. Lisäksi AEL ja PEM ovat kaupallisessa käytössä, mutta SOEL on pilottivaiheessa. Ehkä osittain myös SOEL:n valmiuden takia se on menetelmistä kallein. (Hussy, Fuchs 2021.)

Siirtyminen BF-BOF-valmistustavasta ei tapahdu heti ja vaatii aikaa, mutta se voisi olla mahdollista 2040-luvulla laajemminkin mittakaavassa. Vety vaatii paljon sähköä elektrolyysillä erottamiseen ja jotta valmistus olisi päästötöntä, täytyisi myös käytetyn sähkön olla uusiutuvaa energiaa. (Holappa 2021.) Esimerkiksi Kiinassa EAF-teräksen valmistuksessa vuonna 2019 ei käytetty uusiutuvaa sähköä teräksen tuotannossa, vaan sähkö oli yksi hiilidioksidipäästöjen lähteistä (Song, Du et al. 2023). Käytännössä teräksenvalmistuksessa käytetty koksi voidaan korvata vedyllä ja fossiilittomalla sähköllä (Koponen 2023).

Suunnitelmien toteutuessa vuonna 2030 noin 30 prosenttia Euroopan raakateräksestä valmistettaisiin käyttämällä uusiutuvaa vetyä (Joint Research Centre 2022). Jotta vetyä voidaan käyttää vähäpäästöisenä kivihiilen tilalla, tarvitaan uusiutuvaa sähköä riittävästi ja vedyn vaatima infrastruktuuri. Vedyn suurimmat haasteet ovat varastointi ja siirto. Pienien määrien varastointiin sopii paineistetut säiliöt. Suuria määriä voidaan säilyttää kallioluolissa tai luopaavimpana pidetyissä maanalaisissa suolaesiintymissä. Vetyä voidaan varastoida kaasuna, nestemäisessä olomuodossa tai nestemäisinä orgaanisina yhdisteinä. Kaasuputki on paras tapa suuren vetymäärän kuljetukseen. Laivoilla ja rekoilla kuljettaminen on kalliimpaa. (Vartiainen 2020.)

Vedyn elektrolyysi vaatii niin paljon sähköä, että se voisi mullistaa nykyiset sähkömarkkinat (Pinola 2022). SSAB:n ympäristö- ja turvallisuusjohtaja Harri Leppäsen mukaan Raahen terästehdas kuluttaa vuodessa noin 2–3 terawattituntia vuodessa, ja rautasiemen tuotantolaitos kuluttaisi noin neljä terawattituntia lisää vuodessa (Räisänen 2023).

Vetyhankkeesta esimerkkinä tarkastellaan Blastr Green Steelin investointia, joka on vasta rahoituksen keräämis- ja asiakkaiden etsimisvaiheessa. Suunnitelmana on rakentaa Inkoossa sijaitsevan Fortumin hiilivoimalan paikalle terästehdas. Inkoossa paikassa houkuttelee hyvät sähköverkkoyhteydet ja syväsatama, joka olisi hyvä teräksen kuljetukseen. Rautapelletit Blastrin hankkeessa on tarkoitus tuoda Norjasta. Vedyntuotantolaitos on suunnitteilla

kuitenkin terästehtaan läheisyyteen, koska ei haluta ottaa riskejä toimitusongelmien suhteen ja lisäksi vedyn kuljetus ja varastointi on kallista. (Pekkonen 2023.)

3.2 Rautaromun käyttö

Rautaromun käyttö on mahdollista kahdella eri tavalla, sitä voi lisätä primäärituotannon sekaan tai valmistaa teräs lähes kokonaan rautaromusta. Pienemmät terästehtaat ympäri maailmaa ovat alkaneet käyttämään jälkimmäistä vaihtoehtoa, jossa teräs on tuotettu kokonaan kierrätysraudasta. Suuret tehtaat voivat käyttää primäärituotannon ohessa kierrätysrautaa noin 15–25 prosenttia teräsmäärästä, yleisimmin viilentämään uunin sisällä olevaa panosta (Holappa 2020). Vuonna 2017 hyödynnettiin noin 700 Mt kierrätysrautaa, mikä verrattaessa teräksen vuosituotantoon on hieman alle 40 % prosenttia teräksen vuosituotannon ollessa noin 1869 Mt. (International Energy Agency 2020, 28.)

Rautaromu muodostuu tehtaan vahingoittuneista tuotteista, tuotevaihdon yhteydessä tulevasta tuotteesta, vanhoista auton koreista, purettujen rakennusten rakenteista ja kotitalouksissa kierrätetystä metallista (Levy 2012, 266). Kyseinen rautaromu ei välttämättä ole valmista käytettäväksi sellaisenaan. Romu pitää erotella muista materiaaleista ja kerätä samat materiaalit yhteen. Raudan erotteluun muista roskista käytetään yleensä magneetteja. Kupari muun muassa pitää poistaa rautojen joukosta, sillä se reagoi teräksen kanssa muuttaen sen kemiallisia ominaisuuksia. Paremmat lajittelutekniikat voivat vähentää sinne kuulumattomien materiaalien päätymistä romumetallin joukkoon ja täten parantaa, mutta myös vakiinnuttaa teräksen laatua. Tämä mahdollisesti lisää prosessin lajittelukustannuksia. (International Energy Agency 2020, 28.)

EAF on yleisin rautaromun sulatuksessa, mutta Intiassa ja Kiinassa käytetään myös induktiouuneja samaan tarkoitukseen. Menetelmässä, jossa käytetään valokaariuunia, romu sulatetaan sähkön avulla ja usein sekaan lisätään maakaasua tai hiiltä, jotta epäpuhtaudet saadaan eroteltua ja poistettua. (International Energy Agency 2020, 28.)

Yhden romurautaterästönin valmistuksessa kuluu noin 2 GJ energiaa ja hiilidioksidipäästöjä aiheutuu noin 0,34 tonnia terästönä kohti. EAF:ssa käytettävä romurauta ei aiheuta paljoa Scope 1 päästöjä, niiden ollessa vain 0,04 t CO₂ / t terästä. Scope 1 päästöjen pieni määrä johtuu pienestä määrästä hiiltä valmistuksessa. Scope 2 päästöt muodostavat

suurimman osan päästöistä niiden ollessa 0,3 t CO₂ / t terästä, ne muodostuvat käytetystä sähköstä. (International Energy Agency 2020, 39–43.)

Rautaromun käytön uskotaan kasvavan noin 50 prosentin tasolle nykyisestä alle 40 prosentista. Myös rautaromun määrän uskotaan kasvavan, määrä voisi vuoteen 2050 mennessä nousta 1300–1400 Mt:iin. (Holappa 2020.)

3.3 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Hiilidioksidin talteenotossa teollisuuden prosesseissa syntyvistä hiilidioksidipäästöistä erotellaan hiilidioksidi ja otetaan se talteen poistokaasujen ilmakehään vapauttamisen sijasta. Eroteltu hiilidioksidi voidaan varastoida tai jalostaa uudelleenkäytettäväksi. (FinDHC 2020.)

Hiilidioksidin talteenotolle ja varastoinnille (CCS) on tullut yleinen käyttökohde öljyn- ja kaasuntuotannon tehostamisessa, jossa sitä käytetään tuottamaan kovempi paine maanalaisiin esiintymiin. Kaupallisen mittakaavan CCS-laitokset käyttävät amiinitekniikkaa, jossa hiilidioksidi absorboituu amiiniyhdisteisiin. Talteenotetun hiilidioksidin hyödyntäminen (CCU) on vähäisempää kuin CCS. Yleisin CCU-menetelmä perustuu hiilen sitomiseen synteettisiin polttoaineisiin. CCU-menetelmällä voidaan valmistaa esimerkiksi metaania tai metanolia. (Virtanen 2022, 15.)

Molemmat näistä tekniikoista tulevat olemaan tärkeitä niin kauan kuin fossiilisia polttoaineita vielä käytetään teollisuudessa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö ei lopu muutamassa vuodessa vaan on kyse luultavasti vuosikymmenestä tai parista. Hiilidioksidi usein loppusijoitetaan paineistettuna nesteenä, jotta se on pienemmässä muodossa. Tyypillinen loppusijoituspaikka on tyhjä öljylähde. (Virtanen 2022, 14–15.)

IEA:n World Energy Outlook 2019 sisältää arvion, jonka mukaan CCUS vastaisi 9 prosentin päästövähennyksestä vuosien 2019–2050 välillä. Päästömäärä olisi 2,8 Gt CO₂ vuodessa. IPCC on arvioinut CCUS päästövähennykset paljon suuremmiksi samalle välille, noin viidestä kymmeneen Gt vuodessa. Terästeollisuudessa hiilidioksidin talteenottoa on tutkittu ja kokeiltu, mutta ei ole suuremmin koettu kannattavaksi. Nämä menetelmät vaativat paljon energiaa. (Holappa 2020.) Talteenotossa paineistus ja kuljetus vievät paljon energiaa (Virtanen 2022, 15).

CCS-menetelmä sopii maakaasulla tuotetun vedyn tuotantolaitokseen (Salt 2022). Maakaasun höyryreformoinnilla rikotaan vedyn ja hiilen kemialliset sidokset, hiili hapetetaan hiilidioksidiksi ja lopputuloksena on vetyä ja hiilidioksidia (Motiva 2023). Tällöin lopputuotteena on vähäpäästöistä vetyä, kun hiilidioksidipäästöt kerätään talteen ja varastoidaan (Salt 2022).

CaLby2030-projektissa kehitetään kalsiumkiertoon pohjautuvaa hiilidioksidin talteenotto-tekniikkaa eri teollisuudenaloille, kuten sementti, rauta ja teräs, sekä jätteen ja biomassan poltto. Hankkeen tavoitteena on saada sidottua yli 99 % hiilidioksidipäästöistä aloilla, joilla päästöt ovat välttämättömiä ilman hiilidioksidin talteenottoa. (Cordis 2022.)

Ruotsiin SSAB:n Luulajan terästehtaalle rakennetaan pilotti, jolla demonstroidaan tekniikkaa EAF- ja hiilenpoisto argon-happipuhallusprosessien hiilidioksidin talteenottoon savukaasuista. LUT kehittää CaL-reaktoreille 1D ja 3D reaktorimallit, joilla voidaan simuloida pilottitestien tuloksia ja tukea demonstraationskaalan yksiköiden suunnittelua. (CaLby2030 2023.)

4 Johtopäätökset

Tässä työssä perehdyttiin teräksen valmistuksesta aiheutuviin hiilidioksidipäästöihin ja tapoihin vähentää niitä. Työssä pyrittiin etsimään teräksenvalmistuksen suurimpien päästöjen lähteet ja etsiä niille korvaavia vaihtoehtoja. Työssä löydettiin suuria eroja valmistustapojen välillä ja myös niiden päästömäärissä. Työssä löydettiin monia tapoja vähentää terästeollisuuden suurimpia hiilidioksidipäästöjä.

Teräs on nyky-yhteiskunnissa todella tärkeä materiaali sen monikäyttöisyyden vuoksi, mutta teräksen tämänhetkinen keskimääräinen päästömäärä on liian korkea. Päästöjen laske-
miseksi on olemassa toimivia keinoja ja Pariisin ilmastopimusta on mahdollista noudattaa päästöjä vähentämällä. Päästöjä pitää vähentää paljon, jotta saavutetaan halutut päästötasot. Päästöt saisivat vuoteen 2050 mennessä olla noin 80 prosenttia pienemmät nykyisen 1,8 t CO₂ / t terästä sijasta. Kaikkien terästoimijoiden on pyrittävä tekemään parhaansa vähentääkseen teräksenvalmistuksessa aiheutuvia päästöjä. Jotta terästeollisuus saa vähennettyä päästöjä, tarvitsee se myös energiateollisuuden apua, jotta energia olisi päästötöntä. Osa toimijoista varmasti pääsee vaaditulle päästötasolle vuoteen 2050 mennessä.

Muutos ei tapahdu hetkessä taloudellisista ja tutkimuksellisista syistä. Tällä hetkellä monet päästöjä vähennysmenetelmät eivät ole vielä kaupallisessa käytössä suuressa mittakaavassa. Kun uudet hankkeet etenevät, saadaan tietoa uusista menetelmistä käytössä ja niiden hyvistä ja huonoista puolista, kuten esimerkiksi vedyn suhteen.

Vety vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta pitkälle tulevaisuuteen. Vesielektrolyysin avulla vedyllä päästäisiin todella pieniin päästömääriin päästötöntä sähköä käytettäessä verrattuna maailmanteräksen keskiarvoon, 1,8 t CO₂ / t terästä. Vielä ei ole tiedossa, miten vedyn korkea sähköntarve vaikuttaisi esimerkiksi sähkömarkkinoihin. CCUS-tekniikalla voidaan tehdä nykyisistä teräsentuotantolaitoksista, joissa käytetään fossiilisia polttoaineita, vähäpäästöisempiä. CCUS ei ole pitkäaikainen ratkaisu ilmastomuutoksen hillintään yksinään, mutta sitä voidaan käyttää tukemaan päästömäärien vähentämistä. Kierrätysraudan käytön lisääminen ei yksinään ratkaise päästöongelmaa, koska se tarvitsee toimiakseen primäärituotantoa, jotta kierrätysrauta ei lopu kesken. Se on ympäristöystävällinen tapa tuottaa terästä jo elämänkaarensa lopussa olevasta teräksestä tai raudasta.

Lähteet

Britannica, 2023, iron [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.9.2023]. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/iron-chemical-element/Compounds>.

CaLby2030, 2023, Demonstration sites [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.8.2023]. Saatavissa: <https://www.calby2030.eu/project/demonstration-sites.html>.

Cordis, 2022, Calcium looping to capture CO2 from industrial processes by 2030 [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.8.2023]. Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/id/101075416>.

Eurofer, 2022. European Steel in Figures 2022. 14. painos. Eurofer. [Raportti]. Saatavissa myös PDF-muodossa: <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2022/European-Steel-in-Figures-2022-v2.pdf>.

FinDHC, 2020, Miten hiilidioksidin talteenotto saadaan osaksi kiertotaloutta? [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.9.2023]. Saatavissa: <https://findhc.fi/miten-hiilidioksidin-talteenotto-saadaan-osaksi-kiertotaloutta/>.

Hiilitieto, 2023, Hiili terästeollisuudessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.9.2023]. Saatavissa: <https://hiilitieto.fi/hiilitietoa/perustietoa-hiilesta/hiili-terasteollisuudessa/>.

Holappa, L., 2021. Challenges and Prospects of Steelmaking towards the Year 2050. Metals, 11(12), 1978. [Sähköinen kausijulkaisu]. Saatavissa: https://lut.primo.exlibris-group.com/permalink/358FIN_LUT/vvk1gv/cdi_doaj_primary_oai_doaj_org_article_4f3eabdf63d64f409be1260f9a04e237.

Holappa, L., 2020. A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry. Metals, 10(9), 1117. [Sähköinen kausijulkaisu]. Saatavissa: https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN_LUT/vvk1gv/cdi_doaj_primary_oai_doaj_org_article_4f3eabdf63d64f409be1260f9a04e237.

Holtinen, T., 2023. Jättimäinen vihreä teräshanke. FINGRIDlehti [Sähköinen julkaisu]. [Viitattu 29.8.2023]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/jattimainen-vihrea-terashanke/>.

Hussy, C. and Fuchs, N., 2021, Water electrolysis explained – the basis for most Power-to-X processes. [Sähköinen julkaisu]. [Viitattu 30.8.2023]. Saatavissa: <https://ptx-hub.org/water-electrolysis-explained/>.

Hybrit, 2020, Steel making today and tomorrow. [Verkkoaineisto] [Viitattu 13.8.2023]. Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20201220220736/http://www.hybritdevelopment.com/steel-making-today-and-tomorrow>.

IEA, 2020. Energy Technology Perspectives 2020. Pariisi: IEA. [Raportti]. [Viitattu 21.9.2023]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020?mode=overview>.

International Energy Agency, 2020. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking, Part of the Energy Technology Perspectives series. IEA Publications. [PDF-tiedosto]. [Viitattu 10.3.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.

Jamison, K., Kramer, C., Brueske, S., Fisher, A. 2015. Bandwidth study on energy use and potential energy saving opportunities in U.S. iron and steel manufacturing. U.S. Department of Energy. U. S. Department of Energy.

Joint Research Centre, 2022. EU climate targets: how to decarbonise the steel industry. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.6.2023]. Saatavissa: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en.

Koponen, H., 2023. SSAB:n lupaus on vuosien päässä, ja kilpailijat väijyvät samoilla apajilla. Kauppalehti. 114, 17.

Levy, S. M., 2012. Construction calculations manual. Waltham, Mass: Butterworth-Heinemann.

Metallinjalostajat ry, 2014. Teräskirja. 6. painos. Helsinki: Metallinjalostajat ry.

Motiva, 2023, Vety. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.9.2023]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialah-teet/vety.

Patisson, F. and Mirgaux, O. 2020. Hydrogen Ironmaking: How It Works. *Metals*, 10(7), 922. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.3.2023]. Saatavissa: https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN_LUT/vvk1gv/cdi_doaj_primary_oai_doaj_org_article_67f3d2dcc53f48319cbe1386707fa89d.

Pekkonen, S., 2023. Inkoon ihmetehdas. *Talouselämä*. 12, 27–29.

Pinola, M., 2022. Teräksen tulevaisuus. *Tekniikka&Talous*. 4, 12–14.

Portillo, G., 2023. Electrolyzer: everything you need to know. *Renovables Verdes*. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.9.2023]. Saatavissa: <https://www.renovablesverdes.com/en/electrolyser-everything-you-need-to-know/>.

Räisänen, P., 2023. SSAB ja Fortum selvittävät vetylaitosta. *Tekniikka&Talous*. 22, 5.

Räisänen, P., 2022. Raahan terästehtaalla alkaa muutoksen vuosikymmen. *Kauppalehti*. 221, 14–16.

Roudier, S., Luis, D.S., Remus, R. and Aguado-Monsonet, M., 2013. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control. St. Louis: Federal Reserve Bank of St Louis.

Salt, M., 2022. Carbon Capture Landscape 2022. IEEFA. [Raportti]. Saatavilla PDF-muodossa: <https://ieefa.org/media/2659/download?attachment>.

Sohn, H. Y., 2020. Energy Consumption and CO2 Emissions in Ironmaking and Development of a Novel Flash Technology. *Metals*, 10(1), 54. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.9.2023]. Saatavissa: https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN_LUT/vvk1gv/cdi_doaj_primary_oai_doaj_org_article_30fe398887334a0b8d5d6661fc0e8128.

Song, X., Du, S., Deng, C., Shen, P., Xie, M., Zhao, C., Chen, C. and Liu, X., 2023. Carbon emissions in China's steel industry from a life cycle perspective: Carbon footprint insights. *Journal of Environmental Sciences*. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 21.9.2023] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074223001936>.

Steel Times International, 2013. *The Making, Shaping and Treating of Steel*. 11. painos, Volume Flat Products. Redhill: Quartz Business Media Ltd.

Väisänen, P., 2007. Teräs - Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. Vammala: Vammalan kirjapaino Oy.

Vartiainen, E., 2020, Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. Fortum. [Blogi]. [Viitattu 16.9.2023] Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>.

Virtanen, S., 2022. Ilmasta maan poveen. Tekniikka&Talous. 7, 14–17.

WII, 2006, IRON ORE, Hematite, Magnetite & Taconite. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2023]. Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20060417160321/http://www.mii.org/Minerals/photoiron.html>.