



SUOMEN
ILMASTOPANEELI
The Finnish Climate
Change Panel

KATSAUS SUOMEN TEOLLISUUDEN SÄHKÖISTÄMISEN
TEKNOLOGISIIN RATKAISUIHIN

MIKKO JEGOROFF, ANTTI ARASTO & EEMELI TSUPARI

Suomen ilmastopaneeli
Raportti 4/2021

© Suomen ilmastopaneeli



Julkaistu [CC BY 4.0](#) -lisenssillä.

Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2021

Katsaus Suomen teollisuuden sähköistämisen teknologisiin ratkaisuihin

Osana Energiajärjestelmien sähköistymisen merkitys CO₂-päästöjen leikkaamisessa -hanketta

Tekijät:

Mikko Jegoroff, Antti Arasto & Eemeli Tsupari

ISSN: 2737-0666

ISBN: 978-952-7457-06-1

DOI: <https://doi.org/10.31885/9789527457061>


Viittausohje:

Jegoroff, M., Arasto, A. & Tsupari, E. 2021. Katsaus Suomen teollisuuden sähköistämisen teknologisiin ratkaisuihin. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2021.

Suomen ilmastopaneeli edistää tieteen ja politiikan välistä vuoropuhelua ilmastokysymyksissä. Se antaa suosituksia hallituksen ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja vahvistaa monitieteellistä otetta ilmastotieteissä. Ilmastopaneelin selvitykset ja kannanotot tehdään tieteellisin perustein.

info@ilmastopaneeli.fi

www.ilmastopaneeli.fi

 [@Ilmastopaneeli1](#)

SISÄLLYS

1. JOHDANTO JA TAVOITE	5
2. SÄHKÖISTÄMISEN PÄÄSTÖVÄHENNYSMAHDOLLISUUDET TEOLLISUUDESSA	6
2.1. Teollisuuden nykyinen energiankäyttö	8
3. TEOLLISUUDEN SÄHKÖISTÄMISEN HYÖDYT	9
4. TEOLLISUUDEN SÄHKÖISTÄMISTEKNOLOGIAT	10
4.1. Lämpöpumput.....	12
4.2. Suora sähkölämmitys.....	14
4.2.1. Sähkömagneettiset lämmitystekniikat	15
4.2.2. Sähkövastuslämmitys.....	18
4.2.3. Valokaarilämmitys	18
4.2.4. Suoran sähkölämmityksen potentiaali Suomen teollisuudessa	20
4.3. Epäsuora sähköistäminen - P2X	20
4.3.1. Vety.....	21
4.3.2. Elektrolyysitekniikat	22
4.3.3. Hiilivetyjen tuottaminen vedystä, hiilidioksidista ja synteetisikaasuista	23
4.3.4. Suomen valmiudet fossiilittomaan vedyn valmistukseen	23
5. SÄHKÖISTÄMINEN ERI TEOLLISUUDENALOILLA	27
5.1. Rauta- ja terästeollisuus	32
5.1.1. Rauta- ja terästuotannon sähköistäminen vetypelkistyksellä.....	32
5.1.2. Teräksen valmistus suorapelkistyksellä	34
5.1.3. Täysin sähköinen reitti primääriteräkseen.....	34
5.1.4. Menetelmien energian tarpeet ja päästöjen syntyminen.....	35
5.2. Sementti ja mineraalit.....	36
5.2.1. Sementti	36
5.2.2. Lasi	38
5.2.3. Kauttaaltaan sähköinen lasintuotanto	38
5.2.4. Kalkki	39
5.3. Tiilet.....	39
5.3.1. Tiilien polttaminen mikroaaltouunissa	40
5.4. Sellu- ja paperiteollisuus	40
5.4.1. Sellun valmistus.....	41
5.4.2. Meesauunit	42
5.4.3. Haihduttamoratkaistuotanto.....	43
5.4.4. Paperin valmistus	44
5.4.5. Paperin kuivaus	45
5.4.6. Paperin sähköinen kuivaus	46
5.4.7. Paperin infrapuna- ja lämpöpumppukuivaus	46
5.5. Kemianteollisuus	47
5.5.1. Päästöjen vähentäminen	49

5.6. Vedenpuhdistamot	50
5.7. Muovi.....	51
5.7.1. Sähköinen muoviteollisuus	52
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	53
6.1. Yhteenveto.....	53
6.2. Johtopäätökset	54
7. LÄHTEET.....	56

Tiivistelmä

Teollisuuden sähköistämisen oletetaan olevan merkittävä tekijä Suomen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä ja primäärienergian kulutuksen tehostamisessa. Noin 80 prosenttia Suomen teollisuuden hiilidioksidipäästöistä syntyy reilussa kymmenessä teollisuuslaitoksessa, minkä seurauksena jopa yksittäisillä investointipäätöksillä voi olla suuri vaikutus kansallisiin päästöihin. Tässä raportissa eritellään teollisuuden sähköistämisen teknologioita sekä luodaan katsaus sähköistämisen mahdollisuuksiin erityisesti Suomelle tyypillisillä teollisuuden aloilla.

Raportissa tarkastellaan sekä suoran sähköistämisen, eli esimerkiksi lämpöpumppujen ja sähköuunien, että epäsuoran sähköistämisen, eli vedyn tai vedystä johdettujen sähköpolttoaineiden, tarjoamia ratkaisuja teollisuudessa. Eri sähköistämismenetelmien mahdollisuuksia suhteessa nykyisiin tuotantomenetelmiin tarkastellaan sovellus- ja tutkimusesimerkkien kautta. Huomiota kiinnitetään erityisesti hiilidioksidipäästöiltään merkittävimpiin suomalaisiin teollisuuden aloihin. Raportissa tuodaan esiin sähköistämisen teknologisia ratkaisuja rauta- ja terästeollisuudessa, sementin, mineraalien ja tiilien valmistuksessa, sellu- ja paperiteollisuudessa, kemianteollisuudessa, vedenpuhdistuksessa sekä muoviteollisuudessa. Keskeinen havainto on, että soveltuvimman teknologian valinta perustuu moneen muuttujaan. Sääntely, kannustimet ja tukitoimet ovat tarpeellisia tekniikoiden jalkauttamiseksi.

Johtopäätöksenä todetaan, että lupaavimmat lähitulevaisuuden teollisuuden sähköistämisen ratkaisut ovat suoran sähköistämisen muodot, joilla korvataan teollisessa lämmöntuotannossa käytettävää fossiilienergiaa. Suorilla sähköistämiskäytöksillä voidaan tuottaa teollisuuden tarvitsemää lämpöä kaikilla lämpötila-alueilla, mikä tekee näistä tekniikoista soveltuvia monelle alalle. Suomen olosuhteissa perinteinen fossiilienergiaa hyödyntävä matalan lämpötilatason lämmön ja höyryntuotanto voitaisiin kohtuullisen helposti korvata elintarvike-, massa- ja paperiteollisuudessa sekä kemianteollisuudessa sähkökattiloilla ja teollisuuslämpöpumpuilla. Teollisuuden hukkalämpöä hyödyntävät lämpöpumput ovat energiahyötysuhteeltaan ylivoimaisia muihin sähköistämiskäytöksiin verrattuna.

Toinen keskeinen johtopäätös on, että pitkällä aikavälillä vety ja uusiutuvat hiilivedyt voivat olla uusiutuva ja hiilineutraali raaka-aine moniin raskaan teollisuuden prosesseihin. Vedystä johdettuja P2X (power-to-x)-tuotteita tai sähköpolttoaineita voidaan käyttää kuten niiden fossiilisia vastineita, jolloin niiden merkittävä hyöty on yhteensopivuus olemassa oleviin käyttökohteisiin ilman muutoksia. Nämä epäsuorat sähköistämiskäytökset tarjoavat mahdollisuuksia myös energian varastoina, joustona ja huoltovarmuustekijänä.

Prosessien sähköistämisen arvioidaan tuovan paljon muitakin hyötyjä kuin mahdollisen päästöjen vähenemisen. Sähkön käytöllä on usein hyvä hyötysuhde, ja monesti sähköistetty prosessi onkin energiatehokkaampi kuin polttoon perustuva. Paremmalla hyötysuhteella voidaan saavuttaa myös säästöjä tuotantokustannuksissa. Energiahyötyjen lisäksi sähköistämisen muilla eduilla, kuten lisääntyneellä tuotteiden laadulla, tuotantomäärällä, prosessiajalla, prosessin ohjattavuudella, prosessin joustavuudella ja turvallisuudella voi olla tärkeä rooli.

1. JOHDANTO JA TAVOITE

Teollisuuden energiankäytön sähköistämisen oletetaan olevan merkittävä tekijä Suomen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä ja primäärienergian kulutuksen tehostamisessa. Teollisuuden sähköistäminen on kuitenkin monimuotoinen joukko erilaisia ratkaisuja, jotka ovat osittain huonosti tunnettuja.

Raportissa kuvataan erilaisia sähköistämisen ratkaisuja ja mahdollisuuksia erityisesti suomalaisessa teollisuudessa sekä menetelmien kustannuskilpailukykyä. Tunnistettujen ratkaisujen perusteella tehdään tarkempaa analyysiä näiden soveltumisesta ja vaikutuksista valittuun teollisuuden alaan. Tarkastelu on kohdistettu erityisesti osaan hiilidioksidipäästöiltään merkittävimmistä teollisuuden aloista: rauta- ja terästeollisuuteen, sementin, mineraalien ja tiilien valmistukseen, sellu- ja paperiteollisuuteen, kemian-teollisuuteen, vedenpuhdistukseen ja muoviteollisuuteen.

Käytännössä soveltuvimman teknologian valinta voi perustua moniin tekijöihin, kuten määräyksiin, kustannuksiin, kannustimiin, sijaintiin, prosessin elinkaarenvaiheeseen, ympäristönäkökulmiin ja eettisiin valintoihin. Tämän selvityksen tavoitteena on luoda yleiskatsaus olosuhteisiin ja mahdollisuuksiin suomalaisen teollisuuden sähköistämisessä.

Raportti on valmisteltu osana Ilmastopaneelin hanketta ”Energiajärjestelmien sähköistymisen merkitys CO₂-päästöjen leikkaamisessa”. Hankkeen keskeisiä tuloksia esiteltiin Ilmastopaneelin 22.6.2021 julkaisemassa muistiossa (Lund ym. 2021). Lisäksi 4.10.2021 julkaistiin raportti sähköistyvän yhteiskunnan vaikutuksista sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen (Lipsanen ym. 2021). Hankkeessa tullaan vielä julkaisemaan raportti, jossa tarkastellaan tarkemmin sähköistämisen vaikutuksia suomalaiseen energiajärjestelmään.

2. SÄHKÖISTÄMISEN PÄÄSTÖVÄHENNYSMAHDOLLISUUDET TEOLLISUUDESSA

Teollisuuden hiilidioksidipäästöihin voidaan vaikuttaa laajamittaisesti esimerkiksi seuraavilla kolmella teknologiavaihtoehdolla tai näiden yhdistelmillä: fossiilisten polttoaineiden korvaaminen bioenergialla, prosessien sähköistäminen ja hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin toteuttaminen (Bühler ym. 2019, Åhman ym. 2012). Näiden lisäksi teollisuuden hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää parantamalla hyötysuhteita sekä ottamalla käyttöön vaihtoehtoisia prosesseja ja raaka-aineita. Tässä selvityksessä keskitytään sähköistämisen tuomiin päästövähennysmahdollisuuksiin.

Aurinko- ja tuulivoiman nopea kehittyminen, erityisesti kustannusten lasku, on nostanut polttoon perustuvan energiankäytön korvaamisen sähköllä merkittäväksi järjestelmätason päästövähennyskeinoksi. Sähköistämisen mahdollisuuksia on sekä teollisuudessa, liikenteessä että asumisessa, jopa ruoan tuotannossa. Näiden kaikkien sähköistäminen on tehokas keino vähentää päästöjä, mikäli tällöin kasvava sähkön kulutus ei johda päästöjen kasvuun sähkön tuotannossa. Tuotantomenetelmissä syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat olleet erityisen kiinnostuksen kohteena valittaessa tuotantoprosesseja sähköistämistarkasteluun. Taulukossa 1 on listattuna teollisuuden päästökaupan piirissä olevat toimialakohtaiset todennetut päästöt (tonnia CO₂) Suomessa vuonna 2020 sekä muutokset aikavälillä 2019–2020. Teollisuuden päästökaupan piirissä olevat toimijat tuottivat vuonna 2020 yhteensä noin 19,6 Mt CO₂-päästöjä. Polttolaitosten tuottamat hiilidioksidipäästöt muodostavat huomattavan osan päästökaupan piirissä olevista kokonaispäästöistä. Polttolaitoksiin sisältyy kuitenkin sekä lämmöntuotantoa että teollisuuden polttolaitoksia.

Taulukko 1. Toimialakohtaiset päästökaupan piirissä olevat todennetut hiilidioksidipäästöt (tonnia CO₂) Suomessa vuonna 2020. Lähde: Energiavirasto (2021).

Toimiala	2020 (tCO ₂)	Osuus (%)	Muutos 2019–2020 (tCO ₂)
Polttolaitokset	7 895 939	40,33	-2 996 674
Rauta- ja terästehtaat, mukaan lukien jatkuva valu	4 039 810	20,63	-10 860
Mineraaliöljyn jalostus	3 056 496	15,61	-244 929
Massan ja paperin valmistus	2 168 469	11,08	-327 296
Sementtiklinkkeriä tuottavat laitokset	850 921	4,35	-20 137
Suurissa erissä tuotettavien orgaanisen kemian kemikaalien tuotanto	559 227	2,86	-2 818
Kalkin tuotanto tai dolomiitin tai magnesiitin kalsinointi	424 655	2,17	1 522
Typpihapon tuotanto	153 473	0,78	12 860
Vetykaasun ja synteetikaasun tuotanto	132 252	0,68	-45 257
Muiden kuin rautametallien tuotanto tai jalostus polttoyksiköissä	84 926	0,43	511
Rautametallien, rautaseokset mukaan luettuina, valmistus ja jalostus polttoyksiköissä	74 619	0,38	4 036
Keraamisia tuotteita polttamalla valmistavat laitokset	47 982	0,25	1 986
Mineraalivillan valmistus lasista, kivistä tai kuonasta	33 429	0,17	-4 200
Muut direktiivin 2003/87/EY 24 artiklan mukaisesti hyväksytyt toiminnot (opt-in)	16 436	0,08	-8 496
Kipsin kuivaus tai kalsinointi tai kipsilevyjen ja muiden kipsituotteiden valmistus	15 557	0,08	311
Lasia ja lasikuituja valmistavat laitokset	14 060	0,07	-7 048
Metallimalmien pasutus ja sintraus ja pelleointi	9 378	0,05	646
Päästöt yhteensä	19 577 629	100	-3 645 843

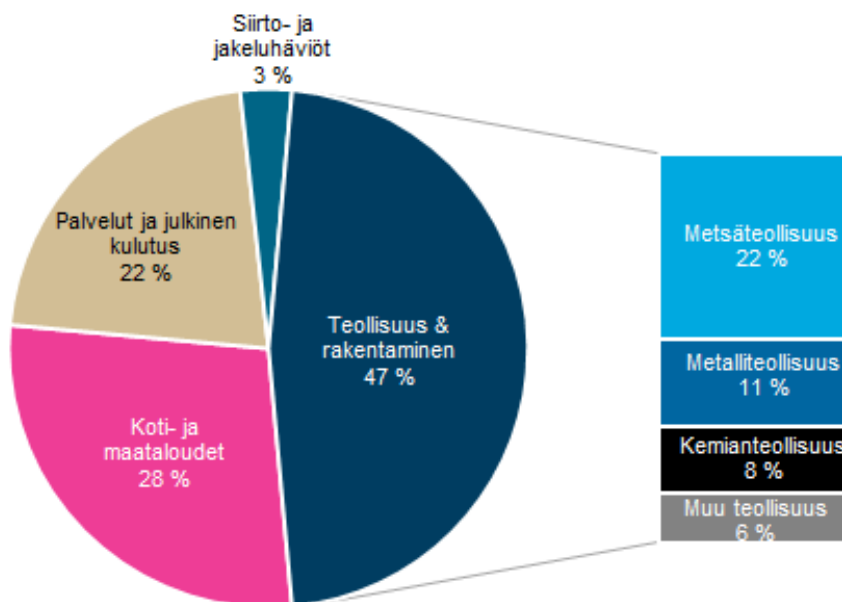
Teollisuuden suurimmat hiilidioksidipäästöt ja korkeimmat myydyn tuotannon arvot löytyvät pääosin samoilta toimialoilta. Päästöjä tuottavat toimialat ovat siis hyvin merkittäviä Suomen taloudelle. Taulukossa 2 on esitetty myydyn tuotannon arvo hyödykkeittäin Suomessa vuonna 2020.

Taulukko 2. Teollisuuden myydyn tuotannon arvo hyödykkeittäin vuonna 2020. Lähde: Suomen virallinen tilasto (SVT) (2020a).

Toimiala	Myydyn tuotannon arvo (milj. euroa)	Osuus tuotannosta (%)	Muutos edelliseen vuoteen (%)
Kaivostoiminnan ja louhinnan tuotteet	1 668	2,0	4,4
Teollisuustuotteet	82 012	97,6	-10,0
• Elintarvikkeet, juomat ja tupakka	9 206	11,0	0,3
• Tekstiilit, vaatteet, nahka ja nahkatuotteet	589	0,7	6,6
• Metsäteollisuuden tuotteet	14 429	17,2	-14,5
• Kemianteollisuuden tuotteet	15 589	18,5	-20,1
• Metalliteollisuuden tuotteet	38 140	45,4	-6,1
• Metallit ja metallituotteet	14 460	17,2	-2,2
– Koneet ja laitteet	18 410	21,9	-5,8
– Kulkuneuvot	5 270	6,3	-16,6
– Muut teollisuustuotteet	4 059	4,8	-7,2
Muut tuotteet	390	0,5	0,5
Yhteensä	84 070	100,0	-9,7

2.1. Teollisuuden nykyinen energiankäyttö

Teollisuuden käyttämästä energiasta sähkön osuus on maailmanlaajuisesti noin 27 prosenttia. Prosessit ja toimilaitteet käyttävät sähköä hyvin monenlaisiin tarpeisiin: pumpuista ja moottoreista lämmitys- ja jäähdytysyksiköihin. (Irena 2019.) Teollisuuden osuus energiankulutuksesta maailmanlaajuisesti on yli kolmannes. Teollisuuden sähköistäminen on haastavaa johtuen seuraavien tekijöiden yhdistelmästä: epätasainen käyttö, kustannusherkyys, korkea lämpötila ja jatkuvat prosessivaatimukset (Wei ym. 2019, De la Rue du Can ym. 2019). Tällä hetkellä sähkönkäytön osuus teollisuuden eri tuotantomenetelmissä vaihtelee suuresti. Alhaisin osuus, noin 14 prosenttia, on ei-metallisten mineraalien, enimmäkseen sementti-, lasi- ja keramiikka-tuotteiden tuotannossa. Suurinta osuutta, noin 65 prosenttia, käyttää ei-rautapitoisten metallien tuotanto, joka koostuu pääosin alumiinin primäärituotannosta, joka käyttää elektrolyysiä alumiinin pelkistämiseksi alumiinioksidista. (Wei ym. 2019). Suomen sähkönkulutuksen jakautuminen vuonna 2019 on esitetty sektoreittain kuvassa 1.



Kuva 1. Sähkönkulutuksen jakautuminen Suomessa 2019. Lähde: Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.

Kuten kuvasta 1 huomataan, Suomessa eniten sähköä kuluttava teollisuuden ala on metsäteollisuus. Metsäteollisuus kuitenkin tuottaa itse merkittävän osan sähköstään. Metsäteollisuuden tehdaspolttoaineista uusiutuvien osuus oli 87 prosenttia vuonna 2020. Arviolta 71 prosenttia energiantarpeesta tuotetaan metsäteollisuuden omista bioliemistä. (Metsäteollisuus ry 2021.)

Muuntamalla teollisuuden energiantarve täysin sähköiseksi tuottamalla sähkö fossiilivapaasti, on mahdollista vähentää merkittävästi hiilidioksidipäästöjä. Avain tähän muutokseen ovat muun muassa tekniikat, jotka mahdollistavat sähkön ekologisen tuotannon ja käytön prosesseissa. (Bühler ym. 2019.) Joidenkin teollisten prosessien sähköistäminen ja fossiilista polttoaineista vapautuminen vaatii suurempia uudelleen määrittelyjä, koska fossiilisia polttoaineita käytetään raaka-aineena tai ne ovat osa kemiallisia reaktioita, kuten vielä isolta osin teräksen, sementin, petrokemian ja lannoitteiden tuotannossa (Bühler ym. 2019, Åhman ym. 2012).

3. TEOLLISUUDEN SÄHKÖISTÄMISEN HYÖDYT

Teollisuuden prosessien sähköistämällä on monia hyviä puolia. Sähköistetyt prosessit ovat nopeasti ja tarkasti säädettäviä sekä sähköistämällä voidaan usein vähentää päästöjä käyttökohteessa. Sähkön käytöllä on usein hyvä hyötysuhde ja monesti sähköistetty prosessi onkin energiatehokkaampi kuin esimerkiksi polttoon perustuva prosessi. Sähköä on lähtökohtaisesti hyvin saatavilla monessa paikassa hyvien verkkoyhteyksien vuoksi. Pidemmällä aikavälillä havaittu sähkön laskeva hintatrendi on tehnyt sähköistämisestä erittäin kiinnostavaa.

Prosessin tai kokonaisen teollisuusalueen sähköistämisen taloudellinen toteutettavuus riippuu sähkön ja polttoaineiden hintojen suhteesta (Bühler ym. 2019). Teollisuuden sähköistämisen kokonaisyötyihin voi kuulua verkkotuen ja oheispalvelujen tarjoaminen, sähkökuormitustekijöiden parantaminen sekä mahdollisesti tuotantokustannusten laskeminen. Hyötyihin lukeutuvat myös joustavuus muuttuvien sähköresurssien integroinnissa ja synergiat esimerkiksi aurinkosähkön, sähköajoneuvojen ja varastoinnin kanssa. (Deason ym. 2018, Wei ym. 2019.)

Energiahyötyjen lisäksi voi sähköistämisen muilla eduilla, kuten lisääntyneellä tuotteiden laadulla, tuotantomäärällä, prosessiajalla, prosessin ohjattavuudella, prosessin joustavuudella ja turvallisuudella olla tärkeä rooli (Wei ym. 2019). Joissakin tapauksissa sähköistämisen tuomien uusien teknologioiden käyttö voi tuoda haasteita esimerkiksi valmistettavan tuotteen ominaisuuksien säilyttämiselle.

Teollisuuden sähköistämisen yhteydessä on hyvä optimoida prosessi kokonaisuutena, huomioimalla muun muassa energian säästämismahdollisuudet, mahdollisuus vähentää prosessin lopullista energiankulutusta sähköistämistekniikoiden avulla sekä arvioimalla samassa yhteydessä prosessivaihtoehtoja ja mahdollisuuksia muun muassa tuotannon lisäämiseen (Bühler ym. 2019). Tässä raportissa esitettävät sovellusesimerkit havainnollistavat sähköistämisen teknologioiden suhdetta vanhaan teknologiaan tuoden näkyväksi muun muassa teknologian mahdollistamat parannukset energianhyötysuhteeseen sekä kustannuksiin.

4. TEOLLISUUDEN SÄHKÖISTÄMISTEKNOLOGIAT

Tuotantoprosessin sähköistämisen tekniset vaihtoehdot voidaan jaotella eri tasoihin esimerkiksi sen suhteen, kuinka merkittäviä muutoksia ne vaativat tuotantoprosessiin. Taulukossa 3 on esitelty sähköistämisen jaottelua tuotantoprosesseihin kohdistuvien vaikutusten perusteella, niin että 1. vaihtoehto on vähiten tuotantoprosessiin muutoksia vaativa ja vaihtoehto 4. vaatii tuotantoprosessin vaihtamisen toiseen.

Taulukko 3. Sähköistämisen jaottelu tuotantoprosessiin kohdistuvien tarvittavien muutosten kokoluokan perusteella. Lähde: Bühler ym. 2019 mukailten.

1. Käyttöhyödykkeen eli esimerkiksi polttoaineen vaihto sähköpolttoaineeseen	Polttoaineen vaihto uusiutuvista lähteistä peräisin olevaan, esimerkiksi uusiutuvalla vedyllä tuotettuun sähköpolttoaineeseen.
2. Käyttöhyödykkeen tuotantoprosessin vaihto	Keskeisen fossiilisten polttoaineiden polttoon perustuvan käyttöhyödykkeen vaihto, esimerkiksi prosessihöyryä tuottavan kattilan vaihtaminen lämpöpumppuihin perustuvaan prosessihöyryn tuotantoon.
3. Tuotantoprosessin muuttaminen	Tuotantoprosessin muuttaminen siten, että prosessiin tuodaan lämpö sähköllä, vastuksella infrapunalla tms. muuttamatta itse prosessia.
4. Tuotantoprosessin vaihtaminen toiseen	Tuotantoprosessin vaihtaminen kokonaan sähkökäyttöiseen, esimerkiksi haihduttamisen vaihtaminen mekaaniseen erotukseen.

Keskeinen tekijä teollisuuden sähköistämisvaihtoehtoja punnittaessa on prosesseissa tarvittava lämpötila. Lämpöä käytetään teollisuudessa tuomaan energiaa prosessiin, jolla muokataan raaka-aineita tai tuotteita haluttuun muotoon. Teolliset prosessit tarvitsevat lämmitystä sekä matalissa (alle 100 °C), keskisuurissa (100–400 °C) että korkeissa lämpötiloissa (yli 400 °C) (Lechtenböhmer ym. 2016). Korkean lämpötilan alueelle kuuluu yli puolet teollisuuden lämmöntarpeesta Euroopan (EU28) teollisuuden aloilla. Keskisuurta lämpötila-alueetta käytetään muun muassa paperi- ja painoteollisuudessa, elintarviketuotannossa ja peruskemikaaleissa. Korkeat lämpötilat ovat ominaisia raudan ja teräksen tuotannolle sekä ei-metallisten mineraalien käsittelylle, kuten sementin ja kalkin tuotannolle sekä kemialliselle perustuotannolle (Naegler ym. 2015).

Yleisimpiä lämpöä käyttäviä prosesseja teollisuudessa ovat muun muassa:

- Kuivaus, jolla poistetaan vettä materiaalista. Kuivaus on hyvin energiaintensiivistä. On arvioitu, että jopa 25 prosenttia teollisuuden lämmönkulutuksesta on peräisin kuivaamisesta kuten paperin, puun, tekstiilikuidun tai ruokatuotteiden kuivaamisesta (Jangam & Mujumdar 2012).
- Ruokatuotteiden valmistus, jossa lämpöä käytetään kypsentämiseen, sterilointiin, pastörointiin ja kuivaukseen. Tarvittavat lämpötilat ovat usein matalia, alle 200 °C, ja prosessihöyryä voidaan siten käyttää laajalti lämmön tuomiseen prosessiin.
- Kemialliset reaktiot ovat monen teollisuusprosessin perusta. Tarvittava reaktiolämpö on usein kohtuullisen korkea, esimerkiksi ammoniakkin tuotanto vedystä ja typestä vaatii noin 450 °C ja rautamalmin pelkistäminen yli 800 °C lämpötilan. Kalsinointi on tyypillinen korkeita lämpötiloja vaativa mineraalien prosessointimenetelmä. Maailmanlaajuisesti sementin valmistus on merkittävä teollisuuden ala, johon osana liittyy kalkin poltto CaO:ksi. Yleisin teollinen kalsinointiprosessi onkin

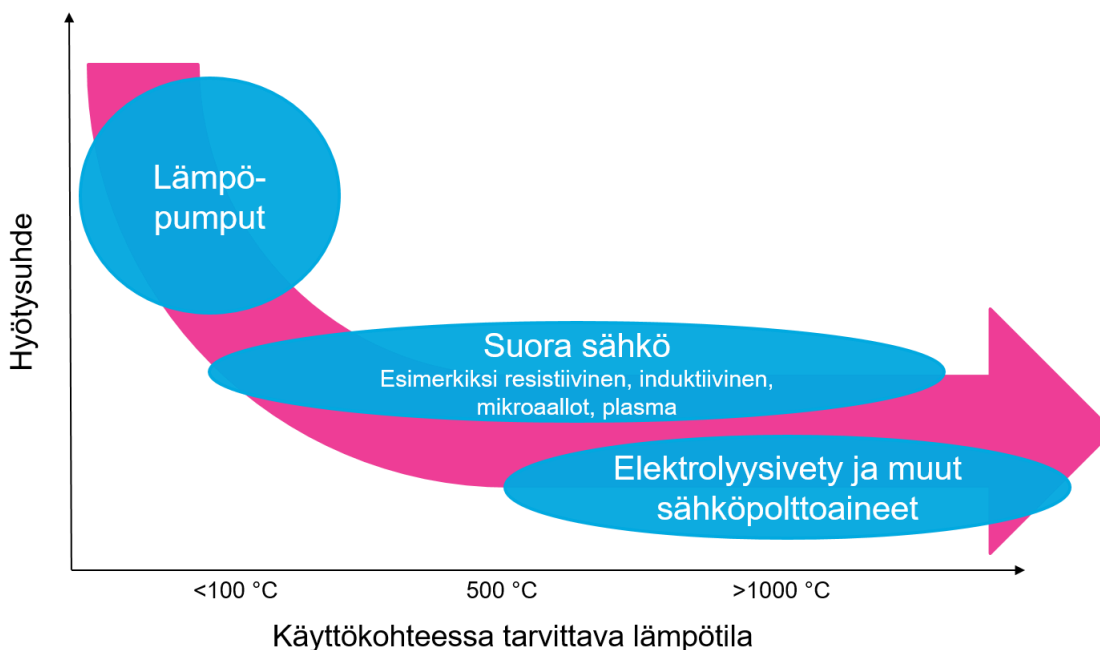
kalkin poltto, jossa kalkkikivestä tehdään poltettua kalkkia (CaO) erityisessä kalkinpolttouunissa, jossa lämpötilavaatimukset ovat 900–1 500 °C.

- Sulatus vaatii paljon lämpöenergiaa. Esimerkiksi lasia valmistetaan sulattamalla hiekkaa ja muita mineraaleja yli 1500 °C lämpötilassa. Myös metallien ja muovien kierrätysprosessit perustuvat suurelta osin sulattamiseen.

Yleisin tapa tuottaa lämpöä teollisuuden prosesseihin on polttaminen, joka voi lämmittää prosessia joko suoraan tai epäsuorasti esimerkiksi höyrystettävän väliaineen kautta. Erilaisia kattiloita, rumpu-uuneja ja sulattimia on laajalti saatavilla myös teollisuuden erityistarpeisiin. Hyvin usein näissä käytetään höyryä siirtämään lämpöenergia prosessiin, sillä höyry on kohtuullisen turvallinen ja tehokas energiankantaja erityisesti matalammilla lämpötilatasoilla. Usein prosessihöyry tuotetaan keskitetyssä kattilassa ja kuljetetaan putkilla käyttöpaikalle, mistä tosin aiheutuu usein kohtuullista lämpöhukkaa. Myös tarvittavien eri lämpötilatasojen tuottaminen reduktiolla huonontaa järjestelmän hyötysuhdetta. Sähköistämällä lämmön käyttöä, voidaan vastata näihin höyrykäyttöjen haittoihin pienentämällä hyötysuhdetappioita esimerkiksi tuomalla lämpö suoraan prosessiin tuottaen se suoraan prosessipaikalla sekä säätäen lämpötilataso juuri sopivaksi.

Lämpöpumput voivat tuottaa lämpöä keskilämpötiloihin saakka hyvällä hyötysuhteella hyödyntämällä lämpötilaltaan matalia lämmönlähteitä. Ne voivat tuottaa useita kertoja enemmän lämpöenergiaa kuin mitä ne käyttävät sähköenergiaa. (Bühler ym. 2019.) Sähköuuneilla lämpöä voidaan tuottaa kaikille lämpötila-alueilla, perustuen konvektiolämmitykseen. Kehittyneempiin sähkölämmitystekniikoihin kuuluvat sähkömagneettinen säteily, mikroaallot, infrapunasäteily, radioaallot, ultraviolettivalo, induktio, elektronisuihku, valokaari- ja plasmatekniikat. (Lechtenböhrer ym. 2016.)

Plasmatekniikka voi tuottaa selvästi yli 2000 °C:n lämpötiloja, ja sitä käytetään nykyään muun muassa jätteiden käsittelyssä ja terästeollisuudessa. Sähkökaaritekniikkaa on jo pitkään käytetty tuotettaessa kierrätysterästä. Kuvassa 2 alla on hahmoteltu lämmitysteknologioiden soveltuvuutta tarvittavan lämpötilan ja hyötysuhteen korrelaationa.



Kuva 2. Sähköisten lämmitysteknologioiden soveltuvuudet tarvittavan lämpötilan mukaan.

Sähkölämmitystekniikat mahdollistavat hallitun ja hyvin säädetävän lämmityksen. Tarvittaessa on mahdollista lämmittää vain tiettyä aluetta lämmittämättä ympäröivää materiaalia. Tällä hetkellä fossiiliset polttoaineet ovat yleensä ottaen halvempia kuin sähkö, joten sähkölämmitystekniikoita käytetään silloin, kun ne tarjoavat selkeitä etuja, esimerkiksi energian säästöä, suurempaa tuottoa tai parempaa laatua (Lechtenböhrer ym. 2016). Hybridikattiloiden käyttäminen voi paitsi hyödyntää sähkön hinnanvaihtelua myös tasapainottaa verkon tarjontaa ja kysyntää uusiutuvan energian tuotannon vaihdellessa (Irena 2019).

Sähköistäminen vähentää energian tuottamiseen liittyviä hiilidioksidipäästöjä, mutta voi myös mahdollistaa energiankäytön vähentämisen esimerkiksi lämpöpumpuilla (Bühler ym. 2019). On myös teknologioita, joita hyödyntäen voidaan vähentää tai peräti poistaa lämmön tarve ja samalla ilmansaasteiden syntyminen. Kalvoteknologioita kuten käänteisosmoosia käytetään veden erottamiseen, puhdistamiseen tai poistamiseen nesteestä. Ne ovat vähäenergisää, ei-termisiä vaihtoehtoja perinteisille lämpöön perustuville erotustekniikoille kuten haihduttamiselle. (Lord ym. 2018.) Tällaisilla ratkaisulla on sosiaalisia ja taloudellisia etuja, kuten ilmansaasteiden väheneminen, pienempi veden tarve, lisääntynyt tuottavuus, joustavuus ja prosessien hallinta (Bühler ym. 2019).

Teollisuuden sähköistämiseen ja käytettäviin teknologioihin vaikuttavat olosuhteet ja prosessin vaatimukset. Tehokkaiden lämpöpumppujen käyttöä voidaan lisätä matalan lämpötilan hukkalämpöjen hyödyntämiseksi. Joissakin olosuhteissa on taas järkevää ottaa käyttöön sähkö- tai hybridikattilat, jotka mahdollistavat mukautumisen muuttuviin olosuhteisiin, esimerkiksi polttoaineen saatavuuteen ja hintaan sekä sähkön hintavaihteluihin. Uusia teknologioita ja ratkaisuja mietittäessä mielenkiintoa herättää fossiilisten polttoaineiden ja raaka-aineiden korvaaminen vedyllä tai sen uusiutuvalla energialla tuotetuilla johdannaisilla. (Irena 2019.)

4.1. Lämpöpumput

Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen on potentiaalinen sähköistämisen ratkaisu. Periaatteessa hukkalämmön talteenottoon on kolme tekniikkaa; lämmönvaihtimet, säteilykerääjät ja lämpöpumput. Tässä luvussa tarkastellaan lämpöpumppujen mahdollisuuksia teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämisessä ja lämmöntuotannossa. Lämpöpumput tarjoavat ratkaisuja erityisesti matalien lämpötilojen prosesseissa. Muihin sähköistämisen ratkaisuihin verrattuna lämpöpumput ovat energiahyötysuhteeltaan ylivoimaisia.

Suomen teollisuuden ylijäämälämmön tekninen potentiaali oli arvioiden mukaan noin 16 TWh³ vuonna 2017. Selvityksen mukaan vuonna 2010 tekninen potentiaali teollisuuden kaikkien hukkalämpöjen hyödyntämiselle kaukolämpöverkoissa oli noin 4-5 TWh. Lämpöpumpulla hyödynnettävä osuus oli noin 2,8 TWh. Edellä mainittua arviota ei ole päivitetty, mutta kokonaisuudessaan teollisuuden hukkalämpöjen määrän on arvioitu pienentyneen hieman vuodesta 2010 vuoteen 2017 (19 TWh → 16 TWh). Teollisuuden hukkalämpöjen muodostumisen määrä saattaa olla syklistä tai vaihdella ajallisesti. Lämpöjen saatavuus ja sopimusehtojen kehittyminen voivat myös asettaa haasteita kannattavuudelle pidemmällä aikavälillä. Näiden syiden takia arvioidaan, että teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämispotentiaali on todellisuudessa huomattavasti yleisesti esitettyä maksimipotentiaalia pienempi. (ÅF-Consult 2019.)

Teollisuuden hukkalämpöjä syntyy muun muassa kuivausprosesseista sellu-, paperi-, tiili- ja elintarviketehtailla sekä sahoilla, jotka vapauttavat lämmintä kosteaa ilmaa. Kylmäjärjestelmien ja datakeskusten hukkalämmöt ovat myös potentiaalisia hyödynnettäviä. Näiden lisäksi useissa prosesseissa on lämmön talteenottopotentiaalia savukaasuissa ja lauhdevesissä, jotka ovat hyödynnettävissä lämpöpumppujen avulla. IRENA (Irena 2019) arvioi, että matalia lämpötiloja hyödyntävien lämpöpumppujen määrä voisi kasvaa nykyisestä yhdestä miljoonasta 80 miljoonaan vuoteen 2050 mennessä. Tällöin lämpöpumput tuottaisivat noin 7 prosenttia teollisuuslämmön maailmanlaajuisesta kysynnästä.

Monet teolliset prosessit tarvitsevat vain matalaa, alle 160 °C lämpöä (Lord ym. 2018). Perinteisillä lämpöpumpuilla kyetään tuottamaan noin 65 °C lämpöä, mikä ei usein riitä teollisuusprosesseille. Teollisessa ylijäämälämmön hyödyntämisessä kyseeseen tulevat mekaaniset lämpöpumput ja absorptiolaitteet. Mekaaniset lämpöpumput voivat tehokkaasti hyödyntää matalalämpöistä, alle 10–100 °C ylijäämälämpöä sekä omaavat suhteellisen nopeat ja hyvät käynnistys- ja osakuormaominaisuudet. Mekaaniset lämpöpumput vaativat riittävän suurta ylijäämälämpöä tuottavan lämmönlähteen, jonka tuotanto on tasaista sekä lämpöä käyttävän kuluttajan. Ylijäämälämmön ja sähkön hinta vaikuttaa pumppujen käytön kannattavuuteen merkittävästi. (Pöyry Finland Oy 2019.)

Lämpöpumppujen tehokkuus, joustavuus ja luotettavuus ovat parantuneet huomattavasti viime vuosien aikana. Saatavilla on lämpöpumppuja, jotka voivat tuottaa höyryä tai kuumaa vettä jopa 165 °C:seen tai kuumaa ilmaa 120 °C:seen saakka. Yhdessä muiden tekijöiden kanssa tämä parantaa lämpöpumppujen käytettävyyttä entisestään ja lisää niiden käyttömäärää merkittävästi tulevaisuudessa elintarvike-tuotantoon, teollisuuden pesuun ja kuivaustuotteisiin, kuten puutavaraan, tiileen ja paperiin. (Lord ym. 2018.)

Mekaaniseen höyryn uudelleen puristamiseen (Mechanical vapour recompression, MVR) perustuva lämpöpumppu puristaa käsiteltävän nesteen (yleensä veden) höyrymuotoa kylmäaineen sijaan. Höyryn puristaminen nostaa lämpötilaa. Kompressiojärjestelmät puristavat yleensä vesihöyryä 70–80 °C:ssa ja tuottavat höyryä 110–150 °C:n välillä, joissakin tapauksissa jopa 200 °C:seen. Tällaisen lämpöpumpun suorituskyky on hyvä COP:n (coefficient of performance) ollessa 10–30. (Lord ym. 2018.)

Absorptiolaitteet pystyvät hyödyntämään lämpötilaltaan 60–200 °C olevia hukkalämmön lähteitä. Laitteilla on alhainen sähkönkulutus ja laaja säädettävyyttä. Laitteet soveltuvat ja mahdollistavat myös ylijäämälämmön käyttämisen jäähdytystarkoituksiin. Toisaalta COP on alhainen matalissa lämpötiloissa ja investointikustannus on suuri hyötyihin nähden. (Pöyry Finland Oy 2019.) Muun muassa pastöroinnin prosessivaiheisiin liittyy nopea kuumennus ja sitten nesteen jäähdytys. Lämpöpumpun tarjotessa lämmitys- ja jäähdytys-ominaisuudet samanaikaisesti, pumpun hyötysuhde voi olla jopa 1 000 prosenttia (Lord ym. 2018).

Lämpöpumppujen soveltuvuutta ja käytettävyyttä lisää asennettavuus modulaarisella tavalla. Useimmiten riittää, kun vaihtaa vain kattilan tai jakelujärjestelmän tehottomimmat osat sen sijaan, että koko kattila- ja höyryjärjestelmä olisi vaihdettava. (Lord ym. 2018.)

Lämpöpumpun mahdollisuuksia hyötysuhteen ja sitä kautta kustannusten radikaalissa vähentämisessä voidaan tarkastella seuraavan esimerkin avulla. Monet teolliset prosessit vaativat kuumaa vettä. Sovellusesimerkissä 1 verrataan kaasukattilan ja lämpöpumpun toteuttaman veden 50 °C:n lämmittämisen kustannuksia.

Sovellusesimerkki 1.

Yhden vesitonin lämmittäminen 40 °C:sta 90 °C:seen vaatii 58,1 kilowattituntia energiaa (vastaa 209 megajoulea). Taulukossa 4 verrataan tämän tehtävän käyttöenergiakustannuksia kaasukattilan ja lämpöpumpun välillä. Esimerkissä kattilan hyötysuhde on 80 prosenttia, ja se käyttää kaasua, jonka hinta on 12 \$/GJ (4,3 c/kwh). Lämpöpumpun hyötysuhde on 400 prosenttia, ja se käyttää sähköä, joka maksaa 12 c/kwh. Näiden oletusten mukaan lämmitys maksaa 44 prosenttia vähemmän lämpöpumpulla kuin kaasukattilalla. (Lord ym. 2018.)

Taulukko 4. Yhden vesitonnin lämmittämisen käyttöenergiakustannuksia käyttäen kaasukattilaa ja lämpöpumpua. Lähde: Lord ym. 2018.

	Kaasukattila (hyötysuhde 80 %)	Lämpöpumppu (COP 4)
Hyötysuhde	80 %	400 %
Kaasun/sähkön hinta	12 \$/GJ (4,3 ¢/kWh)	12 ¢/kWh
Sähkön tarve (kWh)	72,6	14,5
Lämmityskustannus	3,14 \$	1,74 \$
Säästö lämpöpumpulla		44 %

4.2. Suora sähkölämmitys

Suoran sähkölämmityksen ratkaisuilla voidaan tuottaa teollisuuden tarvitsemaa lämpöä kaikilla lämpötila-alueilla, mikä tekeekin näistä tekniikoista monipuolisista.

Eryteisesti korkeiden lämpötilojen tuottamiseen teollisuudessa on olemassa useita teknologioita, jotka saattavat olla tuttuja ennen kaikkea kodeista. Sähkömagneettiset lämmitysteknologiat, kuten infrapuna-lämmitys ja mikroaallot, induktio sekä tietysti resistiivinen lämmitys, ovat monista kotitalouksista tuttuja. Valokaari- ja radioaalto-lämmitys ovat myös olemassa olevaa tekniikkaa. Uudemmat menetelmät kuten laser, elektronisuihku ja plasmakaari sen sijaan odottavat laajamittaista kaupallistumista.

Tällaiset sähkölämmitysteknologiat siirtävät energiaa kohdemateriaaliin, joka itsessään lämpenee, hyödyntäen sen sähkömagneettisia ominaisuuksia. Tällöin monet termodynamiikan hitaus- ja hyötysuhdetta huonontavat tekijät eivät muodosta yhtä suuria rajoitteita prosesseille, koska lämpö syntyy suoraan materiaalissa itsessään, eikä energiaa tarvitse siirtää siihen siirtämällä lämpöä. Tämä on yksi tekijä, miksi sähkömagneettinen lämmitys voi olla tehokkaampaa. Lisäksi lämpeneminen on lähtökohtaisesti hyvin nopeaa.

Sähkölämmitystekniikoita, kuten infrapuna- ja mikroaalto-lämmitystä, käytetään tällä hetkellä sovelluksiin, joissa on tarve tarkoille ja hallituille lämpötiloille ja lämpötilagradienteille, kuten elintarviketeollisuudessa kuivaamiseen ja autoteollisuudessa maalien kovettamiseen. Paperiradan kuivaus on myös sovellusalue, jolla infrapunakuivaimet voivat korvata perinteisiä kuivausmenetelmiä ja lisätä muun muassa tehokkuutta. (Lechtenbömer ym. 2016.)

Sähkömagneettiset induktiotekniikat, kuten induktiounit, käyttävät vaihtuvaa magneettikenttää sähköä johtavien materiaalien lämmittämiseen. Dielektriset lämmitystekniikat vuorostaan käyttävät korkeataajuisia sähkömagneettista säteilyä materiaalien lämmittämiseen. Resisttiiviset lämmitystekniikat tarjoavat lämpöä joko lämmityselementillä tai lämmitettävän materiaalin vastuksella, kuten tietynlaisessa lasintuotannossa.

Muita sähkölämmitysmenetelmiä ovat valokaari-, infrapunasäteily-, elektronisuihku- ja plasmalämmitys (Wei ym. 2019). Yleisesti ottaen tarvitaan vielä yksityiskohtaisempia arvioita lisämahdollisuuksista käyttää sähkömagneettisia teknologioita kemiallisessa, ei-metallisessa mineraali- ja metalliteollisuudessa (Bühler ym. 2019).

Osa sähkötekniikoista poistaa lämmöntarpeen kokonaan. Sähkötekniikoista esimerkiksi ultraviolettisäteily ei tarvitse ollenkaan lämpöä. Ultraviolettikäsittely on ei-lämpöprosessi, joka voi korvata lämpökovetusjärjestelmät käyttämällä tyypillisesti noin 75 prosenttia vähemmän energiaa. (Lord ym. 2018.)

4.2.1. SÄHKÖMAGNEETTISET LÄMMITYSTEKNIIKAT

Sähkömagneettiset lämmitystekniikat lämmittävät erittäin tehokkaasti, mikä vähentää energiantarvetta usein vähintään 50 prosenttia verrattuna esimerkiksi kaasukäyttöisiin lämmitysmenetelmiin. Tärkeimpiä esimerkkejä sähkömagneettisista menetelmistä ovat infrapuna-, induktio- ja dielektrinen tekniikka. Dielektrisiä tekniikoita ovat mikroaalto- radioaalto- ja ultraviolettitekniikat. (Lord ym. 2018.)

Infrapuna

Infrapunajärjestelmät lähettävät infrapunasäteilyä, joka lämmittää kohteen pintoja. Menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi kuivaamiseen ja paahtamiseen erilaisissa teollisuuden sovelluksissa, kuten esimerkiksi elintarvikkeiden, sellun, paperin ja puutavaran valmistamisessa sekä jalostamisessa.

Infrapunajärjestelmät suunnitellaan lämpötilavaatimusten ja kohdemateriaalin absorbointikyvyn mukaan. Yleensä lyhyemmät infrapuna-aallonpituustasot vastaavat suurempia tehokkuuksia ja voivat saavuttaa yli 2 000 °C:n lämpötilan. Infrapunajärjestelmien lämpötilaa ja voimakkuutta voidaan säätää eri tuotteille ja ne voivat jopa lämmittää esineen eri kohtia eri lämpötiloihin. (Lord ym. 2018.)

Infrapunalämmittimet muuttavat erittäin suuren osan sähköenergiasta säteilyenergiaksi. Säteilevä energia lämmittää materiaalin suoraan, mikä johtaa erittäin korkeaan hyötysuhteeseen.

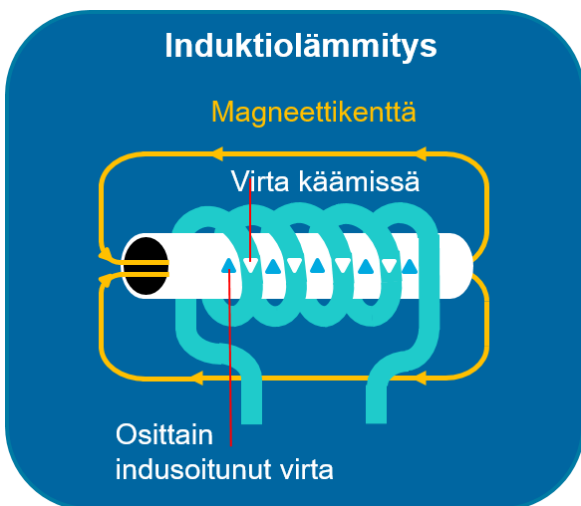
Sovellusesimerkki 2.

On tutkittu, että sopivassa lämmityskohteessa infrapunajärjestelmä käyttää 65 prosenttia vähemmän energiaa kuin vaihtoehtoisesti esimerkiksi kaasukäyttöinen järjestelmä. Infrapuna myös vaikuttaa nopeasti. Joidenkin yleisten materiaalien lämmitysaika infrapunalla on 7–40 kertaa nopeampi kuin kaasukonvektiouunissa. Tämä mahdollistaa nopeat käsittelyajat, toisen tärkeän infrapunalämmityksen edun. (Lord ym. 2018.)

Induktio

Induktiolämmitys on nopea ja tehokas menetelmä metallien ja muiden sähköä johtavien materiaalien lämmittämiseen ja sulattamiseen ilman suoraa kontaktia. Induktiolämmitys soveltuu muun muassa jalostettavien metallien ja koneiden valmistukseen. Induktiolämmitys soveltuu erityisen hyvin prosesseihin, joissa käytetään sähköä johtavia metalleja, kuten terästä, alumiinia, kuparia, sinkkiä, lyijyä ja messinkiä.

Käytännössä lämmitettävä kohde sijoitetaan metallikäämille, jossa on korkeataajuuksinen sähkövirta. Tämä indusoi materiaalin ympärille sähkömagneettisen kentän, jonka sisällä oleva sähkövirta tuottaa lämpöä. Monet induktion eduista tulevat sen kyvystä tuottaa sisäistä lämpöä, minimoida energiahäviöt ja parantaa hallittavuutta. Kuvassa 3 seuraavalla sivulla on esitetty havainnekuva induktiolämmityksen toiminta-periaatteesta.



Kuva 3. Induktiolämmityksen toimintaperiaate.

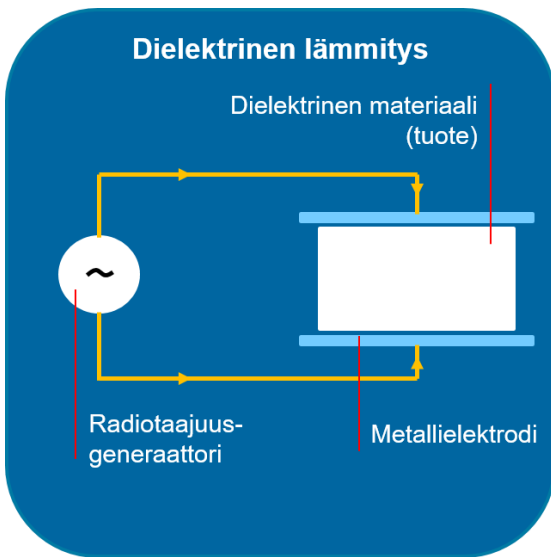
Induktiolla voidaan lämmittää lähes minkä muotoisia ja kokoisia esineitä tahansa. Pienempiä taajuuksia käytetään paksummilla materiaaleilla, jotka vaativat lämmön pääsyä syvälle lämmitettävään esineeseen, kun taas korkeampia taajuuksia (jopa noin 500 kHz) käytetään pienemmissä osissa sekä kevyessä tai ohuessa läpäisyssä. Induktiolämmitys on tehokkaampi metallin lämmityksessä kuin esimerkiksi kaasukäyttöiset uunit. Perinteiset uunit lämmittävät tiheitä materiaaleja hitaasti ja epätasaisesti, koska lämmön on kulkeuduttava materiaalin pinnan kautta sen sisälle johtumisen kautta. (Lord ym. 2018.) Induktiolämmityksellä on myös muita kuin energiahyötyjä, kuten suurempi tuotto ja nopeampi käynnistys. Induktiolämmitys ei myöskään tarvitse tilaa polttoaineen varastointiin ja käsittelyyn, lisäksi se tuottaa vähemmän hukkalämpöä, eikä lainkaan palamispäästöjä. (Wei ym. 2019.)

Sovellusesimerkki 3.

Rautatonnin sulattamiseen kaasukäyttöinen uuni vaatii vähintään 900 kWh, mukaan lukien apulaitteet. Sulatusastia-induktiouuni voi tehdä saman työn käyttämällä 490 kWh/tonni, joka on vain 25 prosenttia enemmän kuin teoreettinen minimi, 390 kWh/tonni. (Lord ym. 2018.)

Dielektrinen lämmitys

Dielektrisissä lämmitysjärjestelmissä materiaali sijoitetaan korkeataajuiseen sähkömagneettiseen kenttään, jolloin materiaalin molekyylit saadaan nopeaan liikkeeseen (Lord ym. 2018). Sovelluskohteita ovat muun muassa elintarvike-, juoma- ja muoviteollisuudessa sekä kumiteollisuudessa käytettävät mikroaaltolämmitys ja radiotaajuuslämmitys (Wei ym. 2019). Kuvassa 4 on esitetty havainnekuva dielektrisen lämmityksen toimintaperiaatteesta.



Kuva 4. Dielektrisen lämmityksen rakenne.

Dielektristen järjestelmien perusetuna on lämmön syntyminen materiaalin sisällä. Toisin kuin induktio, dielektrinen lämmitys toimii hyvin materiaaleissa, jotka eivät johda sähköä ja ovat huonoja lämmönjohtimia, kuten paperi, pahvi, tekstiilit ja puu. Näiden materiaalien kohdalla esimerkiksi kuuman ilman tai infrapunan käyttö lämmitykseen on tehotonta. Dielektrinen lämmitys on tehokas vaihtoehto hyvin tiheälle materiaalille, jolla on pieni pinta-tilavuussuhde, kuten tiili- tai puupino. Dielektrisellä lämmityksellä sähköä kulutetaan vain kuormituksen ollessa päällä ja suhteessa kuormitukseen, lämpöhäviöitä ei tule myöskään lämmitysilmasta tai lämmityslaitteesta. (Lord ym. 2018.)

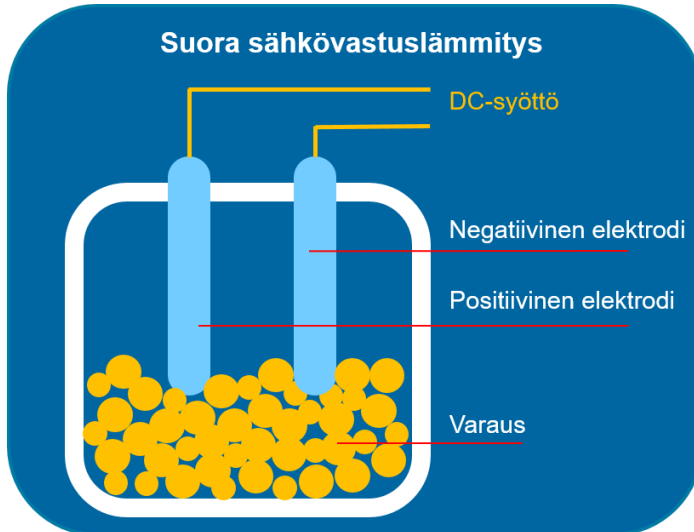
Mikro- ja radioaallot

Dielektristä lämmitystä saavat aikaan mikroaallot ja radioaallot. Nimensä mukaisesti näiden kahden menetelmän taajuudet ja siten aallonpituudet ovat erilaiset: mikroaaltotaajuudet ovat 900–3 000 MHz aallonpituuden ollessa 10–30 cm ja radiotaajuudet ovat 10–30 MHz aallonpituuden ollessa 10–30 metriä.

Erilaisten ominaisuuksien myötä myös soveltuvuudet lämmitykseen ovat erilaiset. Radiotaajuusjärjestelmät lämmittävät materiaalia tasaisesti ja suurella tunkeutumissyvyydellä ja toimivat parhaiten tavallisten, yksinkertaisen muotoisten esineiden kanssa. Vastaavasti mikroaaltojärjestelmät ovat kalliimpia, mutta soveltuvat paremmin epäsäännöllisen muotoisille materiaaleille. Mikroaaltolämmitys soveltuu muun muassa keramiikan ja erilaisten kemikaalien valmistukseen. (Lord ym. 2018.)

4.2.2. SÄHKÖVASTUSLÄMMITYS

Sähkövastuslämmityksessä sähkövirta kulkee resistiivisen lämmityselementin läpi synnyttäen lämpöä. Lämpötila-alue ylittää 1800 °C asti. Tehokkuus voi lähestyä jopa 100 prosenttia. Kuvassa 5 alla on esitetty havainnekuva sähkövastuslämmityksen toimintaperiaatteesta.



Kuva 5. Sähkövastuslämmityksen rakenne.

Lämmitysmuoto tarjoaa yksinkertaisen vaihtoehdon useimmille teollisille muun muassa kaasukäyttöisille lämmitysjärjestelmille. Samalla menetelmä synnyttää merkittävän vaihtoehdon fossiilisia polttoaineita käyttäville uuneille, muun muassa lasin sulatusuunit, valokaariuunit (teräksenvalmistus) ja plasmakaariuunit (sementinvalmistus).

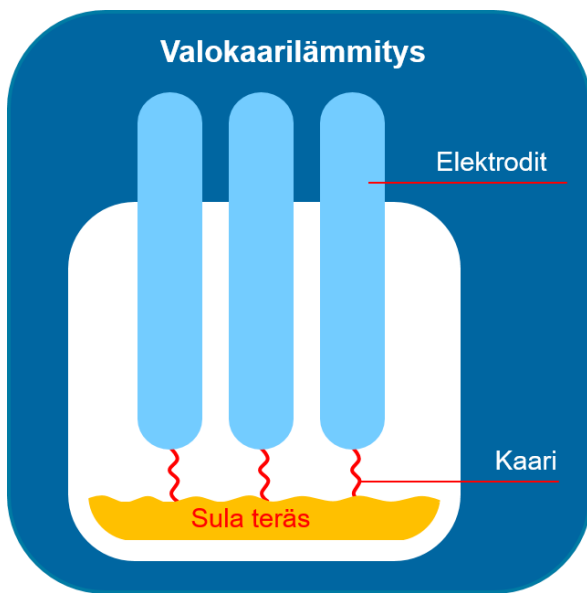
Vastuslämmitystä käytetään sekä matalissa että korkeissa lämpötiloissa eri teollisuuden aloilla, kuten elintarvike-, tekstiili-, paino-, kemikaali-, lasi- ja muoviteollisuudessa. (Lord ym. 2018.)

4.2.3. VALOKAARILÄMMITYS

Valokaariuunien käyttö metallin sulatuksessa on varmasti yleisin teollinen valokaarilämmitykseen perustuva prosessi. Lämpötila-alue ulottuu jopa 5000 °C:seen saakka. Valokaariuuneja käytetään jo teräksen kierrätykseen ja uunit tulevat olemaan tärkeä osa nollapäästöistä terästeollisuutta. Valokaariuunit tuottavat noin neljänneksen maailman terästuotannosta. (Lord ym. 2018.)

Teräksen kierrättäminen valokaariuunissa vaatii vain 10 prosenttia primääriteräksen tuottamiseen tarvittavasta energiasta. Valokaariuuneja käytetään myös suorapelkistetyn raudan jalostamiseen teräkseksi. (Hybrit 2021.)

Valokaariuunit sulattavat terästä muodostamalla sähkökaaren grafiittielektrodista metallikuormaan. Kuvassa 6 seuraavalla sivulla on esitetty havainnekuva valokaarilämmityksen toimintaperiaatteesta.



Kuva 6. Valokaarilämmityksen rakenne.

Valokaariuunit voidaan käynnistää ja pysäyttää nopeasti, jolloin tuotantoa voidaan muuttaa kysynnän mukaan. Muita valokaariuunien tyyppejä ovat epäsuora kaariuuni, joka on yleinen kupariseosten tuotannossa, ja upotettu kaariuuni, jota käytetään erilaisten metallien, kuten pii- ja rautaseosten tuottamiseen. (Lord ym. 2018.)

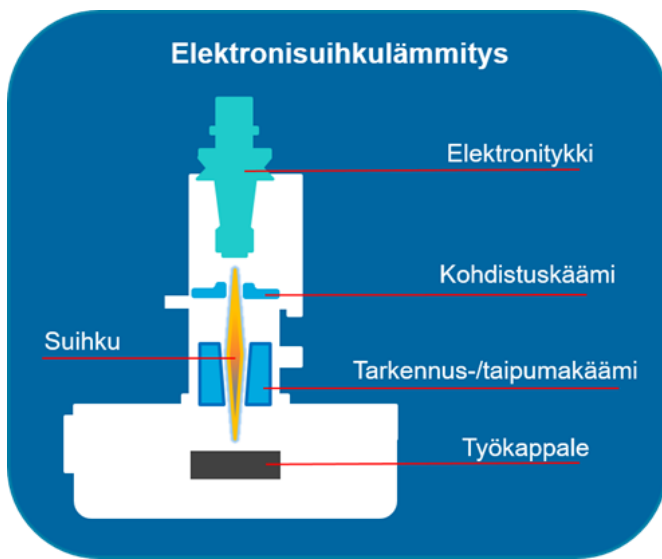
Plasmakaariuuni

Plasmakaariuuni on erikoismalli valokaarilämmittimestä, joka voi saavuttaa jopa 5000 °C:en lämpötilan. Lämpöä tuotetaan valokaaresta, joka syntyy, kun voimakas sähkövirta kulkee tiettyjen kaasujen, kuten argonin läpi. Korkeat lämpötilat syntyvät hyvin nopeasti ja niitä voidaan hallita tarkasti. Plasmakaarilla on parempi hyötysuhde (85 prosenttia) ja tehotiheys kuin polttolämmityksellä.

Plasmakaariuunit tarjoavat uusia mahdollisuuksia sähköistää korkean lämpötilan ja suuren tuotantomäärän prosesseja, joita on muuten vaikea sähköistää. Yksi tällainen merkittävä kohde on sementin valmistuksen sähköistäminen. Nykyään plasmakaariuunien pääasialliset sovellukset ovat vaarallisten jätteiden polttaminen ja metallien, kuten titaanin ja volframin, käsittely. Muita plasmakaariuunien potentiaalisia sovelluksia ovat: kalsinointiprosessit, mukaan lukien kalkkikivikalsinointi massa- ja paperiteollisuudelle; metalliteollisuuden jätteiden, kuten alumiinikuonan ja sinkkiuutteen sivutuotteen käsittely ja alumiinioksidituotanto bauksiitista. (Lord ym. 2018.)

Elektronisuihku-uuni

Tyhjiöuunissa käytetään suurienergistä elektronisuihkuu lämmön siirtämiseksi sulatettavaan materiaaliin. Elektronien tuottamiseen käytetään kuumaa katodia ja kiihdyttämiseen kohti sulatettavaa kohdetta käytetään suurjännitettä. Elektronisuihku-uuneja käytetään muun muassa puhtaiden metallien tuottamiseen ja jalostamiseen. Kuvassa 7 seuraavalla sivulla on esitetty havainnekuva elektronisuihkulämmityksen toimintaperiaatteesta.



Kuva 7. Elektronisuihkulämmityksen rakenne.

4.2.4. SUORAN SÄHKÖLÄMMITYKSEN POTENTIAALI SUOMEN TEOLLISUUDESSA

Suoralla sähkölämmityksellä on valtava teollinen potentiaali. Useimmat fossiilisia polttoaineita käyttävät uunit voitaisiin korvata sähköisellä vaihtoehdolla. Esimerkiksi sähkövastusuunit voivat tuottaa jopa 1 600 °C:n käyttölämpötilan, joka on tarpeeksi kuuma useimmille teollisille prosesseille. Muutamille prosesseille, jotka vaativat korkeampia lämpötiloja, plasmakaariuunit tarjoavat toimivan ratkaisun. (Lord ym. 2018.)

Suoraa sähkölämmitystä hyödyntävät sähköuunit, muun muassa sulatus- ja kuivatusuunit, voisivat syrjäyttää teollisuudessa runsaasti fossiilisilla polttoaineilla tuotettavaa energiaa välttämättömän määrän hiilidioksidipäästöjä. Arvioon on sisällytetty seuraavat tuotantoalat: rauta ja teräs, sellu, kemikaalit, sementti- ja ei-metalliset mineraalit, lasi ja ruoka.

Kemikaalien tuotannon lämmön tarpeesta osa voitaisiin tuottaa sähkövastuslämmityksellä. Monien ei-metallisten mineraalien, kuten kalkin, metakaoliinin ja magnesiumoksidin, tuotantoon liittyy alle 1 100 °C:n lämpöprosesseja. Nämä prosessit voidaan toteuttaa sähkövastuslämmityksellä. 1 450 °C:n lämpötilan vaativien sementtiuunien sähköistämistä plasmakaariuuneilla selvitetään. Sähköuunit soveltuvat myös lasinvalmistukseen. Elintarvikealalla on monia mahdollisuuksia käyttää sähkövastusta, kuten sähköuunit ja pastörinti. Myös sähkökattilat voisivat tuottaa kuumaa vettä tai höyryä, jos hukkalämpöä ei ole riittävästi lämpöpumpun perustelemiseksi. (Lord ym. 2018)

Muita merkittäviä teollisuudenaloja, joihin sähköiset uunit soveltuvat, ja joiden nykyinen lämmöntuotanto vaikuttaa päästöillään muun muassa ilmastoon, ovat teräs-, muovi- ja hiilikuituteollisuus. Muovinkierrätysteollisuus saisi energiansa sähköisestä sulatuksesta. Korkean teknologian hiilikuituteollisuus, joka tukee uusiutuvaa taloutta, on monilta osin sähköistettävissä. (Lord ym. 2018)

4.3. Epäsuora sähköistäminen - P2X

Sähköä voidaan käyttää teollisuuden lämmitystarpeisiin suorien sähkölämmitysprosessien lisäksi epäsuorasti käyttäen elektrolyysillä tuotettua vetyä tai siitä jalostettuja hiilivetyjä energian kantajana. Tällä tavoitellaan sekä energiana että raaka-aineena käytetyn fossiilisen polttoaineen korvaamista vedyllä ja sen johdannaisilla uusiutuvaa sähköä hyödyntäen (Lechtenbömer ym. 2016). Teollisuudessa voidaan esimerkiksi korvata maakaasupolttoaineita tai raaka-aineita vedyllä tai siitä uusiutuvalla energialla tuotetuilla hiilivedyillä. Vedyn käytölle raaka-aineena esimerkiksi ammoniakkin tuotannossa on hyvät taloudelliset

näkymät. (Irena 2019.) Edullinen, uusiutuva vety avaa mahdollisuuksia esimerkiksi teräksen valmistukseen ilman hiiltä (Lord ym. 2018).

P2X (Power-to-X, tai PtoX, jossa X= väli- tai lopputuote) tarkoitetaan uusiutuvan sähköenergian muuntamista muiksi energiankantajiksi tai tuotteiksi. Usein muuntaminen tapahtuu hajottamalla elektrolyysillä vettä hapeksi ja vedyksi. Tämä mahdollistaa päästöttömän sähkön hyödyntämisen epäsuoran sähköistämisen keinoin raaka-aineena prosesseissa tai sektoreilla, joissa suora sähkön käyttö on teknologisesti vaikeaa tai mahdotonta. Esimerkkejä P2X:stä ovat muun muassa P2F (power to fuel) kuten sähkön muuttaminen hiilidioksidin avulla ilmastoneutraaliksi hiilivedyksi esimerkiksi liikennesektorilla käytettäväksi, tai P2G (power to gas), jossa sähkön energia muutetaan synteettiseksi metaaniksi korvaamaan fossiilista metaania. Tällä tavalla tuotettuja polttoaineita kutsutaan myös **sähköpolttoaineiksi** (englanniksi e-fuel). Fossiilisten energialähteiden energia voidaan näin korvata loppukäytön kannalta suoraan hyödynnettävässä muodossa (drop-in).

4.3.1. VETY

Vety on tärkeä teollisuuden raaka-aine. Se on alkuaine, jota voidaan käyttää muun muassa energiankantajana, raaka-aineena ja energian varastona. Tällä hetkellä vetyä tuotetaan yleisimmin höyrymetaani-reformoinnilla (SMR, Steam Methane Reforming), joka synnyttää hiilidioksidipäästöjä. SMR-prosessissa voidaan tosin käyttää hiilidioksidin talteenottoa reaktiotuotteiden erotteluun tai hyödyntää muuten tuotannossa syntyvä hiilidioksidi. Vetyä voidaan kuitenkin tuottaa myös vesielektrolyysissä, jossa käytetään uusiutuvaa sähköä kuten aurinko- ja -tuulisähköä tai ydinvoimaa, tuottamatta kasvihuonekaasupäästöjä. (Wei ym. 2019.) Elektrolyysin avulla on tuotettu vetyä teollisessa mittakaavassa yli 100 vuoden ajan. Veden elektrolyysissä sähkövirta kulkee veden läpi, jolloin vesi jakautuu hapeksi ja vedyksi. Uusiutuva vety voidaan myös yhdistää hiileen nykyiseen jakelu- ja käyttöinfraan sopivien hiilivetyjen tuottamiseksi ja energian pitkäaikaisen varastoinnin helpottamiseksi. Uusiutuvalla vedyllä ja synteettisillä polttoaineilla on merkittävä rooli, kun irtaudutaan teollisuudessa hiilestä ja syrjäytetään fossiilisia polttoaineita. Uusiutuvaa vetyä voidaan käyttää lämpöprosessien polttoaineena tai korvaamaan fossiiliset polttoaineet muun muassa teräksen ja ammoniakkin valmistuksessa. (Lord ym. 2018.)

Vastaavasti vedyn polttaminen tai kemiallinen muuntaminen polttokennojärjestelmässä sähkön tuottamiseksi ei synnytä hiilidioksidia, sen tyyppien oksidien (NO_x) päästöt ovat hyvin alhaiset sekä rikin oksidien (SO_x) päästöt ovat vähäisiä (Wei ym. 2019). Uusiutuvaa vetyä käytetään tulevaisuuden skenaariossa muun muassa fossiilisen vedyn korvaamiseen ammoniakkiteollisuudessa sekä hiilivetyjen, kuten metaanin, metanolin ja Fischer-Tropsch-vahan tuottamiseen fossiilisten raaka-aineiden (pääasiassa naftan tai etaanin) korvaamiseksi petrokemian alalla (Lechtenböhmer ym. 2016).

Ammoniakki tarjoaa käytännöllisen keinon vedyn varastointiin ja kuljetukseen (Lord ym. 2018). Ammoniakki on korkean energiatihedyyden kantaja, se sisältää 1,7 kertaa enemmän vetyä kuutiometrissä kuin nesteytetty vety. Ammoniakkia on myös paljon halvempaa kuljettaa ja varastoida kuin vetyä. Ammoniakin tuottaminen ja muuntaminen takaisin vedyksi kuluttaa kuitenkin runsaasta energiaa, 14–33 prosenttia vedyn sisältämästä energiasta. (Wei ym. 2019.)

Käytännössä uusiutuvan vedyn käyttöä rajoittavat toistaiseksi vedyntuotannon korkeat kustannukset sekä vedyn tuottamiseen, pakkaamiseen, varastointiin ja jakeluun tarvittava infrastruktuuri. Esimerkiksi uusiutuvasta vedystä tuotetun maakaasun kustannukset ovat tällä hetkellä 4–20 kertaa kalliimpia kuin perinteisesti tuotetun maakaasun. (Wei ym. 2019, Götz ym. 2016.)

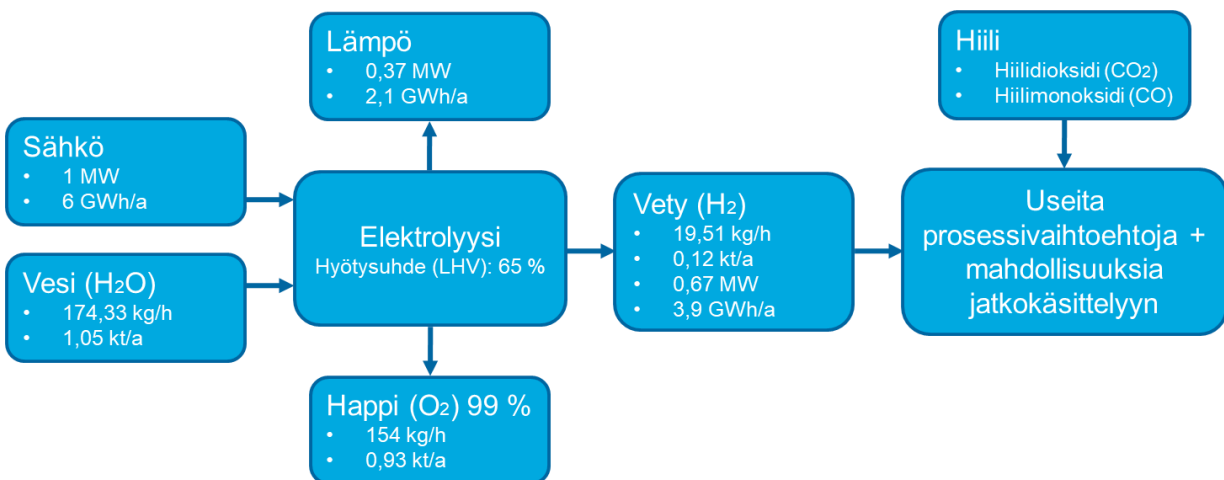
4.3.2. ELEKTROLYYSITEKNIIKAT

Vedyn tuottamisen kannalta keskeinen teknologia on elektrolyysi. Elektrolyysiä käytetään kemiallisten alkuaineiden erottamiseen sijoittamalla tasavirta sähkökemialliseen kennoon sijoitettuun materiaaliin. Elektrolyysiä käytetään tällä hetkellä muun muassa muunnettaessa alumiinioksidia alumiiniksi, suolaliuoksen (natriumkloridi ja vesi) erottamisessa klooriksi, natriumhydroksidiksi ja vedyksi sekä veden jakamisessa vedyksi (H₂) ja hapeksi (O₂). Tyypillisesti vetyä tuotetaan alkalisella elektrolyysillä, jakaen vettä vedyksi ja hapeksi. Sähköenergia varastoituu kemiallisena energiana, tässä tapauksessa vedyn muodossa. (Lechtenböhmer ym. 2016.)

Kaupallisten elektrolyysilaitteiden hyötysuhteet vaihtelevat välillä 56–73 prosenttia tai 70,1–53,4 kWh/kg H₂ (1 atm ja 25 °C) (Chen ym. 2019). Toisen lähteen mukaan kaupallisten emäksisten elektrolyysimenetelmien hyötysuhde vaihtelee 48–83 prosentin välillä (Lechtenböhmer ym. 2016). Elektrolyysissä tapahtuvassa kemiallisessa reaktiossa vapautuu runsaasti lämpöä. Hyötysuhteen kannalta on oleellista ratkaista hukkalämmön hyödyntäminen. Hyötysuhde voisi parantua, jos elektrolyysit sijoitetaan paikkoihin, jotka sijaitsevat lähellä uusiutuvan energian lähteitä esimerkiksi tuulivoimapuistojen lähetyville ja joissa voidaan hyödyntää syntyvää lämpöä. Hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi lämmitykseen tai prosessilämmöntuotantoon esimerkiksi lämpöpumpuilla. Sijoittelun ja hyötysuhteen optimointiin vaikuttaa myös parhaan energiavirtojen siirtomuodon selvittäminen.

Alkielektrolyysin ohella kaksi tulevaa elektrolyysikonseptia ovat polymeerimembraanielektrolyysi (PEM, Polymer Electrolyte Membrane) ja kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cell). SOEC:llä näyttää olevan tällä hetkellä korkein mahdollinen hyötysuhde, yli 73 prosenttia vetytehosta. Muita etuja arvioidaan olevan parantuneet investointikustannukset ja tuotantokapasiteetti, sekä potentiaalinen kyky ylläpitää tehokkuutta pienemmillä kuormilla. Näin ollen menetelmä voisi soveltua sähköstä kaasuun (P2G, power to gas) -konsepteihin vaihtelevalla sähkönsyötöllä. SOEC on korkean lämpötilan menetelmä ja tarvitsee siten höyryä. Tämä lämmöntarve voidaan integroida useimpiin prosesseihin käyttämällä ylimääräistä lämpöä esimerkiksi metanointivaiheeseen P2G-tuotannossa. (Lechtenböhmer ym. 2016.)

Jokainen vesielektrolyysissä tuotettu vetykilogramma vaatii 9–10 kiloa puhdasta vettä, mutta myös merivettä voidaan käyttää, jos se puhdistetaan (Lord ym. 2018). Kuvassa 8 on havainnollistettu vedyn tuotantoketju vesielektrolyysiä hyödyntäen. Kuvassa on esillä myös tuote- ja lämpövirrat huomioiva esimerkkitase, kun lähtöaineina on 1 MW sähköä ja sen vaatima vesimäärä elektrolyysin hyötysuhteen ollessa 65 prosenttia.



Kuva 8. Vesielektrolyysiin perustuva vedyn tuotantoketju esimerkkihyytysuhteella.

4.3.3. HIILIVETYJEN TUOTTAMINEN VEDYSTÄ, HIILIDIOKSIDISTA JA SYNTEESIKAASUISTA

Petrokemikaalien tuotannossa käytettävien fossiilisten raaka-aineiden korvaamiseksi tarvitaan uusiutuvaa vetyä ja uusiutuvaa (tai kierrätettyä) hiiltä. Uusiutuvien hiilivetyjen valmistuksessa käytetty hiili voi tulla joko teollisuuden savukaasuista, ilmasta, tulevaisuuden skenaarioissa jopa merestä talteenotetusta hiilidioksidista tai biomassasta. (Lechtenböhmer ym. 2016, Graves ym. 2011.) Sekä metaania että muita fossiilisia hiilivetyjä korvaavia synteettisiä hiilivetyjä voidaan tuottaa tunnetuilla prosesseilla myös synteetikaasuista (Lechtenböhmer ym. 2016).

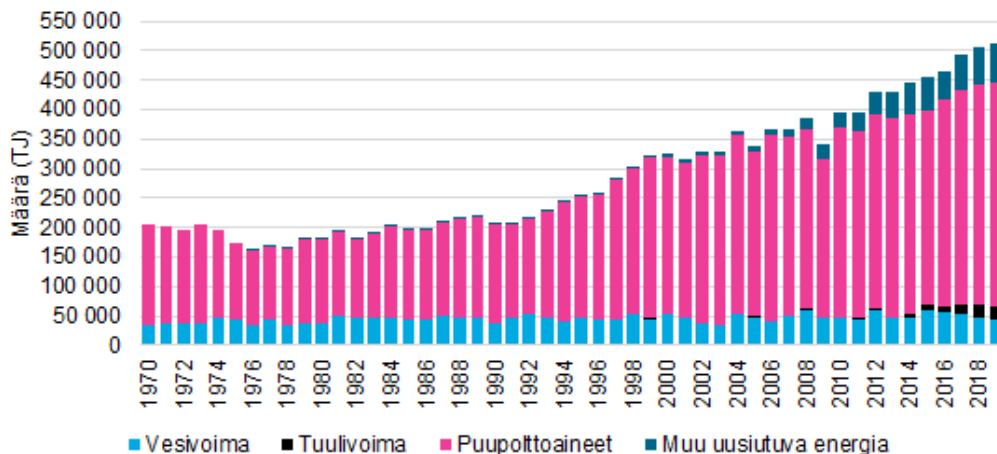
Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen vedyllä ja sen tuotannolla elektrolyysiin perustuen ja vedyn johdannaisilla, kuten polttoaineilla, tulee kasvattamaan sähköntarvetta. Joissakin tapauksissa hiilivetyjen tuotantomenetelmä voi olla hiilinegatiivinen, jos biopolttoaineen tuotannossa syntynyt hiilidioksidi otetaan talteen ja se varastoituu tuotteeseen pysyvästi. (Wei ym. 2019, Di Salvo & Wei 2019.)

Synteettistä maakaasun ja muiden synteettisten polttoaineiden etuna on mahdollisten olemassa olevien maakaasuverkon, tankkausverkoston sekä nykyisten loppukäyttölaitteiden hyödyntämismahdollisuus (Wei ym. 2019). Suomessa maakaasuverkko ei tosin ole kovinkaan kattava toisin kuin jossakin muualla Euroopassa. Keskeinen huolenaihe tavanomaisille maakaasun korvikkeille on, että metaanivuoja voi edelleen esiintyä tuotanto- ja jakeluvaiheissa, ja kustannukset ovat tällä hetkellä paljon maakaasua korkeammat. (Wei ym. 2019, Di Salvo & Wei 2019.)

4.3.4. SUOMEN VALMIUDET FOSSIILITTOMAAN VEDYN VALMISTUKSEEN

Fossiilittoman vedyn valmistus elektrolyysillä vaatii merkittävän määrän fossiilitonta energiaa. Suomessa lupaavimmat uusiutuvan sähkön lähteet ovat tuuli- ja vesivoima. Tuotantokapasiteetin kasvattamiseen erityisesti tuulivoimalla on paljon mahdollisuuksia. Vesivoiman tuotantoa sen sijaan ei Suomessa voi juurikaan lisätä, joten sen vahvin rooli sähköistämisen lisäämisessä onkin säätökvyssä. Aurinkosähkön tuotanto painottuu kesään, joten P2X parantaa erityisesti aurinkosähkön laajamittaisen hyödyntämisen mahdollisuuksia tarjoamalla keinon varastoida energiaa pitkäaikaisesti. Toistaiseksi aurinkosähkön kannattavuus Suomessa on esimerkiksi tuulisähkön verrattuna heikompaa. Tuotantomenetelmät kehittyvät kuitenkin nopeasti. Myös ydinvoimalla on Suomen energiajärjestelmässä merkittävä CO₂-vapaan tuotannon rooli.

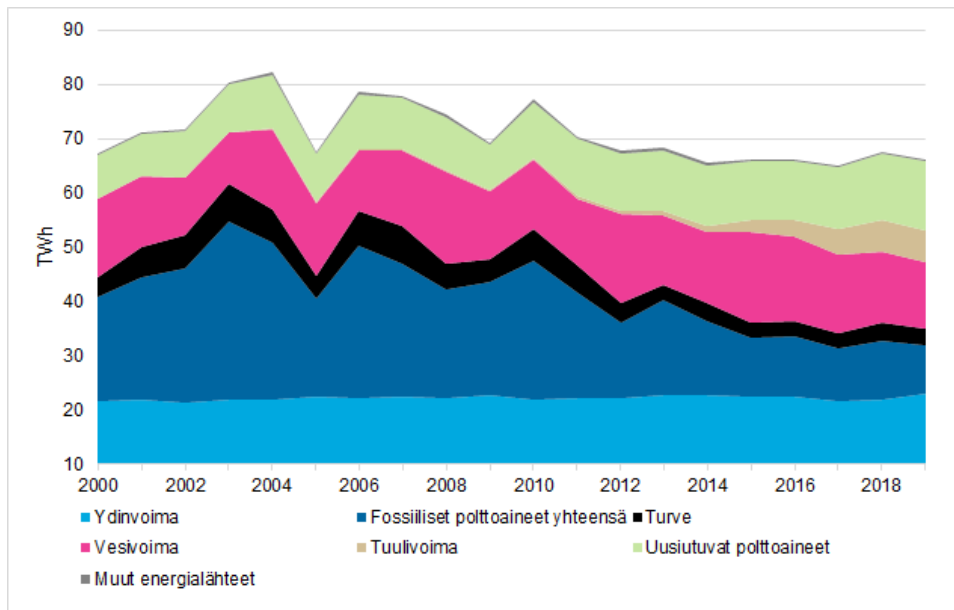
Tällä hetkellä tuulivoiman tuotanto Suomessa on noin 6 000 MWh, mikä tarkoittaa reilun 9 prosentin osuutta Suomen sähköntuotannosta ja noin 7 prosentin osuutta Suomen sähkönkulutuksesta (Motiva 2020). Kuvassa 9 on esitetty uusiutuvien energialähteiden käyttö Suomessa vuosina 1970–2019.



Kuva 9. Uusiutuvien energialähteiden käyttö Suomessa. Lähde: Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.

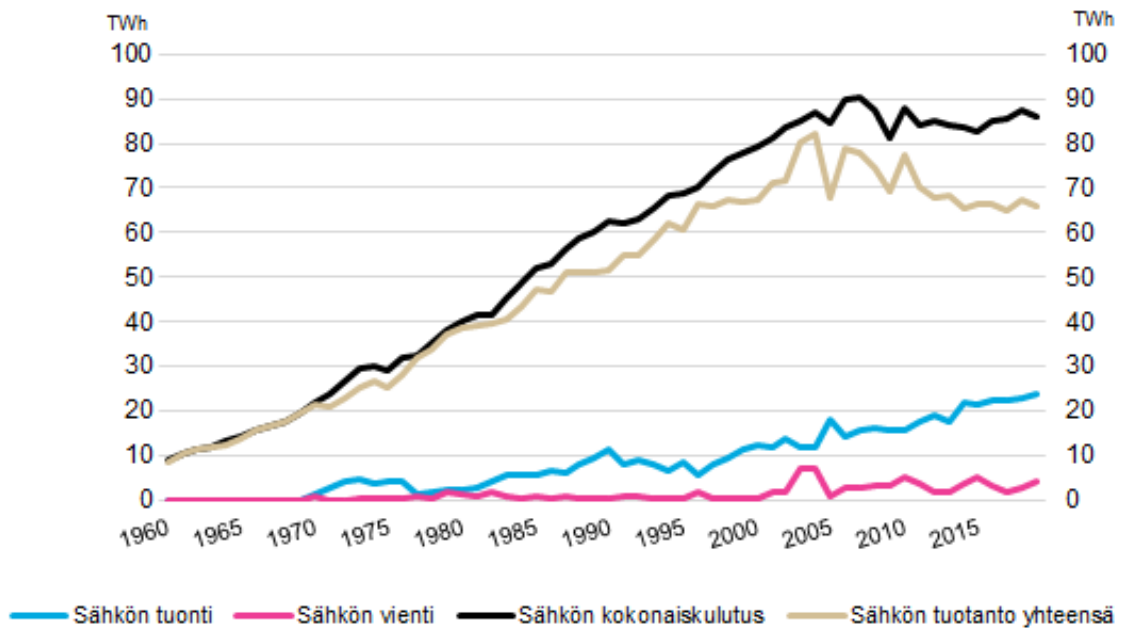
Uusiutuvilla energialähteillä katettiin noin 38 prosenttia energian kokonaiskulutuksesta ja 43 prosenttia loppukulutuksesta vuonna Suomessa 2019. Suomessa käytössä olevia uusiutuvia energianlähteitä ovat edellä mainittujen lisäksi maalämpö, biokaasu, biohajoava osuus kierrätys- ja jätepolttaineista, puuperäiset sekä muut kasvi- ja eläinperäiset polttoaineet. (Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.)

Kuva 10 esittää sähköntuotannossa käytetyt energianlähteet vuosina 2000–2019. Sähkönkulutuksen kasvaminen synnyttäisi tarpeen rakentaa uutta uusiutuvaa ja puhdasta energian tuotantokapasiteettia.



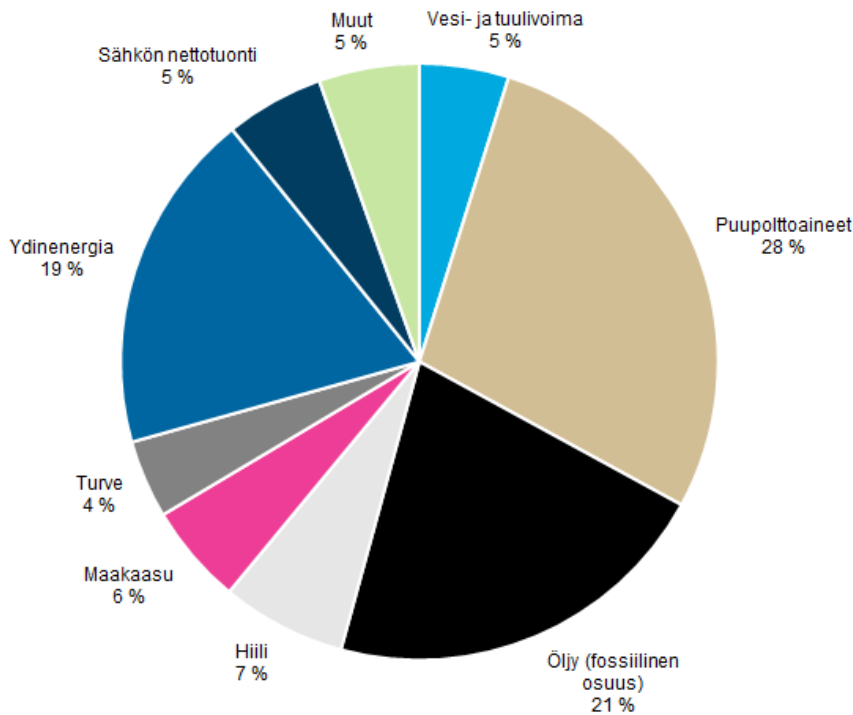
Kuva 10. Sähköntuotanto energialähteittäin vuosina 2000–2019. Lähde: Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.

Suomen sähköntuotanto oli 66,0 terawattituntia (TWh) eli miljardia kilowattituntia (kWh) vuonna 2019. Sähkön kokonaiskulutus oli vastaavasti lähes 90 TWh. Sähkön kokonaiskulutuksesta 77 prosenttia katettiin kotimaisella tuotannolla ja 23 prosenttia sähkön nettotuonnilla Pohjoismaista, Venäjältä ja Virosta. Sähkön nettotuonti säilyi edellisvuoden tasolla ollen noin 20 TWh. (Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.) Kuvassa 11 on esitetty Suomen sähkön hankinta ja kokonaiskulutus vuosina 1960–2019.



Kuva 11. Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus Suomessa vuosina 1960–2019. Lähde: Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.

Kuvassa 12 alla on nähtävissä Suomessa kulutetun kokonaisenergian (378 TWh vuonna 2019) lähteet ja prosentuaaliset osuudet.



Kuva 12. Suomessa vuonna 2019 kulutetun energian lähteet. Lähde: Suomen virallinen tilasto (SVT) 2020b.

Uusia järjestelmiä suunnitellessa on tarpeellista huomioida erilaiset systeemiset tekijät, esimerkiksi miten erilaiset prosessointivaiheet on järkevää sijoitella ja missä muodossa tuotteita, kuten sähköä ja vetyä on järkevintä ja edullisinta siirrellä. Kemiallisissa reaktioissa vapautuu runsaasti lämpöä ja siten niiden hyötysuhde on verrattain huono. Toisaalta paras hyötysuhde saavutetaan silloin, kun tuotettu sähkö pystytään loppukäyttämään sähköinä.

Suomen vetytalouteen siirtymistä edesauttavat jo valmiina olevat arvoketjut uusiutuvan vedyn käyttöön sekä merkittävät käyttömahdollisuudet. Tällä hetkellä fossiilista vetyä kuluu suomalaisessa öljynjalostuksessa ja biopolttoaineiden tuotannossa noin 150 000 tonnia. Näiden lisäksi on runsaasti mahdollisuuksia lisätä vedyn käyttöä. Olemassa olevat arvoketjut suosivat vedyn tuotantoa ja olosuhteet uusiutuvan sähkön tuotantomahdollisuuksia. (Laurikko ym. 2020.)

5. SÄHKÖISTÄMINEN ERI TEOLLISUUDENALOILLA

Tässä luvussa sähköistämismahdollisuuksia ja -ratkaisuja kuvataan Suomelle tärkeimmillä energia-intensiivisillä teollisuudenaloilla ja luodaan esimerkkien avulla katsaus eri menetelmien soveltamiseen. Moniin prosesseihin voitaisiin käyttää useita erilaisia sähköisiä lämmitystekniikoita ja soveltamistapoja. Sovellustarkastelua on tehty yleisellä tasolla huomioiden Suomen oloissa merkittävimmät teollisuuden päästäjät, mutta tuoden mukaan myös kiinnostavia esimerkkejä päästövaikutuksiltaan vähäisemmiltä aloilta. Käytännössä optimaalisimpaan ratkaisuun ja sovellukseen vaikuttavat monet tekijät, kuten muun muassa sijainti, ympäröivät olosuhteet, teollisuusprosessin elinkaaren vaihe ja aiemmat valinnat, tulevaisuuden näkymät, poliittiset vaikuttimet ja eettiset valinnat. Tarkastelun kohteena on teräs, sementti ja mineraalit, tiilet, sellu ja paperi, sekä kemianteollisuus ja muoviteollisuus.

Olemassa olevien prosessien ja niiden yksikkötoimintojen ymmärtäminen sekä kokonaisuuden hahmottaminen ovat välttämättömiä, jotta voidaan tunnistaa soveltuvia tekniikoita sähköistämisen lisäämiseksi ja tehdä viisaita ratkaisuja. Toimintaparametrien ja mitoituksen yksityiskohdat ovat tärkeitä, jotta voidaan ennakolta arvioida, millaiset tekniikat täyttävät prosessivaatimukset (Wiertzema ym. 2018). Sähköistämisen vaikutukset valmistettävien tuotteiden ominaisuuksiin ja laatuun on myös tarpeellista selvittää ja tunnistaa, sekä tehdä tarvittaessa prosessimuutoksia. Yleiskatsaus eri teollisten prosessien sähköistämisen tekniikoista ja niiden teknologisesta saatavuudesta ja mahdollisuudesta kasvattaa tuotantoa on esitelty taulukossa 5 (sivulla 28). Taulukkoon 6 (sivulla 29) taas on koottu arvio erilaisten sähköisten lämmitysmenetelmien soveltavuudesta 22 eri teollisuudenalalle.

Taulukko 5. Yleiskatsaus eri teollisten prosessien sähköistämistekniikoista, niiden teknologisesta saatavuudesta sekä mahdollisuudesta kasvattaa tuotantoa. Lähde: Bühler ym. 2019.

Prosessi	Teknologia	Saatavuus	Tuotannon kasvu
Prosessilämmitys (höyry, vesi)	Lämpöpumppu	Korkea	
	Korkean lämpötilan lämpöpumppu (HTHP)	Keskitaso	
	Sähkökattila	Korkea	
	Elektrodikattila	Korkea	
	Höyryn uudelleen paineistaminen (vapour recompression)	Korkea	
Kuivaus	Sähkömagneettinen	Keskitaso	+
	Impulssikuivaus	Matala	
	Suorapuhalluskuivaus (impingement)	Matala	
Sterilointi/pastörinti	Sähkömagneettinen	Keskitaso	+
	Korkeapaine sterilointi	Matala	
Tislaus/erottelu	Suodattaminen	Keskitaso	
	Sähkökenttä/sähköstaattinen	Matala	
	Mekaaniset tekniikat	Keskitaso	
Sulatus/valu	Induktiouuni	Korkea	+
	Sähkömagneettinen	Keskitaso	+
	Suora-/epäsuoravastus	Korkea	+
	Valokaariuuni	Korkea	
	Plasmalämmitys	Keskitaso	
	Elektronisuihkulämmitys	Keskitaso	+

Taulukko 6. Sähköisten lämmitysmenetelmien soveltuvuus eri teollisuuden aloille. Lähde: ESB 2021.

Teollisuudenala	Infrapuna-lämmitys	Vastus-lämmitys	Ultra-violetti-käsittely	Mikro-aalto-lämmitys	Radio-aalto-lämmitys	Induktio-lämmitys/karkaisu	Induktio-sulatus	Valo-kaari-uuni
Ruokatuotteet				X	X			
Juomat								
Tekstiilit	X	X	X	X	X	X		
Vaatteet	X			X	X			
Nahkatuotteet	X			X	X			
Puutuotteet	X		X	X	X			
Paperi/paperituotteet	X		X	X	X			
Painotuotteet				X	X			
Koksi ja öljyalosteet				X	X			
Kemikaalit	X		X	X	X			
Lääkkeet			X	X	X			
Kumit ja muovit	X	X	X	X	X	X		
Epämetalliset mineraalit	X	X	X	X	X	X		
Perusmetallit	X		X	X			X	X
Valmistetut metallituotteet	X	X	X	X	X	X		
Tietokoneet ja elektroniikka	X	X		X	X	X		
Sähköiset laitteet	X	X	X	X	X	X		
Koneet ja laitteet	X	X	X	X	X	X	X	
Moottoriajoneuvot	X	X	X	X	X	X		
Muut kuljetusvälineet	X	X	X	X	X	X		
Huonekalut	X		X	X	X			
Korjaus ja asennus	X	X	X			X		

Taulukkoon 7 on listattu esimerkkejä tuotteista, joiden valmistamiseen esitetyt lämmitysteknologiat soveltuvat. Sähköisiä lämmitysteknologioita hyödyntäen mainittujen tuotteiden ja materiaalien valmistamisen on mahdollista ilman fossiilisia polttoaineita, saavuttaen samalla merkittäviä energiansäästöjä.

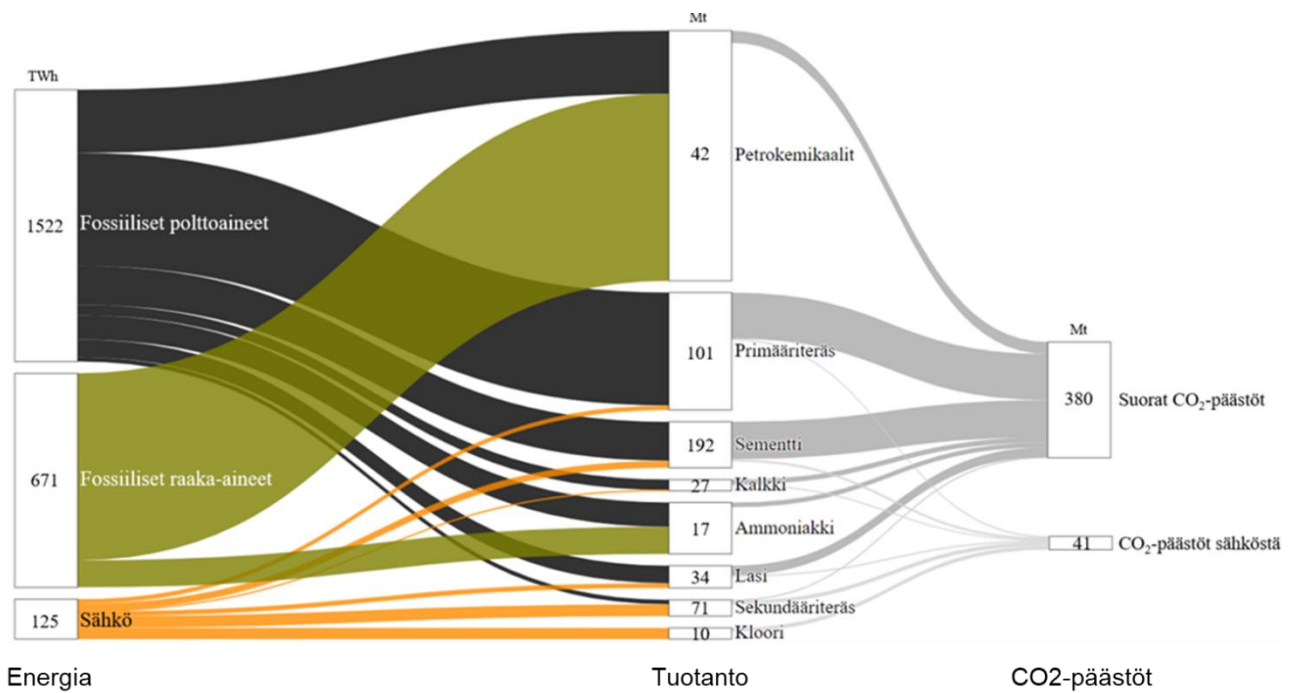
Taulukko 7. Tuotteita, joiden valmistukseen voidaan hyödyntää sähköisiä lämmitysteknologioita. Lähde: Lord ym. 2018.

Tuote	Sähköinen lämmitysteknologia	Energiansäästö
Ruoanvalmistus	Lämpöpumput ja infrapuna	49 %
Maitojauhe	Lämpöpumput	66 %
Paperi	Infrapuna	24 %
Alumiinivalu	Induktio	50 %
Tiili	Mikroaallot	50 %
Lasi	Sähkövastus	30 %
Muovi	Sähkövastus	95 %
Teräs	Uusiutuva vety ja valokaariuuni	18 %
Ammoniakki	Uusiutuva vety	4 %

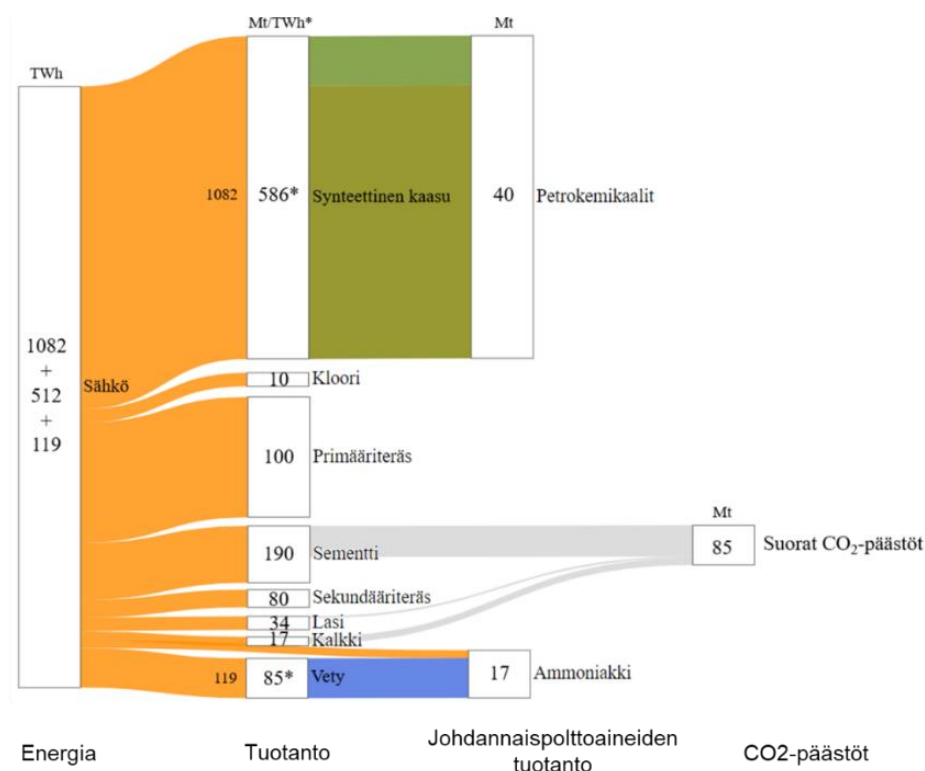
Perusmateriaalien, kuten sementin ja teräksen tuotanto, on merkittävä hiilidioksidipäästöjen lähde niin EU:n kuin Suomenkin tasolla. Sähköistämällä voidaan merkittävästi leikata juuri näiden perusmateriaalien tuotannon päästöjä. Kuvassa 13 seuraavalla sivulla esitetään seitsemän perusmateriaalin tuotanto, energiankäyttö ja tuotannon synnyttämät CO₂-päästöt Euroopassa (EU 27) vuonna 2010.

Kuvassa 14 (sivulla 31) esitetään seitsemän perusmateriaalin tuotannon ja kulutuksen skenaario Euroopassa (EU 28) vuodelle 2050. Skenaario muodostetaan perustuen seuraaviin vaiheisiin: arvioidaan ja määritetään tulevaisuuden (2050) tuotantotasot, sekä vuosien 2010 ja 2050 tekniikkatasot. Lopuksi lasketaan edellä mainittujen perusteella syntyvä energiantarve ja CO₂-päästöt primääri- ja johdannaistuotteiden tuottamiseksi. (Lechtenböhrer ym. 2016) Esitetyssä tulevaisuuden skenaariossa oletetaan, että muun muassa taloudelliset kannustimet ja polttoaineiden hinnat kannustavat CO₂-päästöjen leikkaamiseen enemmän kuin tällä hetkellä, mikä mahdollistaisi skenaarion toteutumisen.

Seuraavissa alaluvuissa esitellään sähköistämisen mahdollisuuksia tarkemmin eri teollisuudenaloilla.



Kuva 13. Perusmateriaalien energiapanos (TWh), tuotantotasot (Mt) ja hiilidioksidipäästöt (Mt) vuonna 2010 (EU 27). Lähde: Lechtenböhmer ym. 2016, Eurostat 2014. Kuvassa petrokemikaalit koostuvat seuraavista: eteeni, propyleeni, butadieeni ja bentseeni.



Kuva 14. Perusmateriaalien energiapanos (TWh), tuotantotasot (Mt) ja hiilidioksidipäästöt (Mt) skenaarion mukaan vuonna 2050 (EU 28), olettaen tuotantoprosessien täydellisen sähköistämisen tapahtuneen. Kuvassa petrokemikaalit koostuvat seuraavista: eteeni, propyleeni, butadieeni ja bentseeni. Lähde: Lechtenböhmer ym. 2016.

*Vuoteen 2050 mennessä käytettyjen polttoaineiden oletetaan olevan nollahiilisiä tai nollahiilisillä tuotettuja.

5.1. Rauta- ja terästeollisuus

Teräs on yksi tärkeimmistä raaka-ainemateriaaleista. Käyttökohteet ovat hyvin moninaiset, kuten koneet, ajoneuvot, laivat, rakennukset ja infrastruktuurit. Maailman terästuotanto on tällä hetkellä 1,6 miljardia tonnia ja sen odotetaan kasvavan 2 miljardiin tonniin vuoteen 2030 mennessä. Teräs on toiseksi eniten saastuttava teollisuusmateriaali sementin jälkeen, mikä johtuu suurelta osin kivihiilen osuudesta teräksen tuotannossa. Terästuotannon osuus on 7 prosenttia maailmanlaajuisista päästöistä. (Lord ym. 2018, Hybrit 2021.)

Maailman teräksestä 75 prosenttia valmistetaan integroidulla teräksenvalmistusmenetelmällä (Basic oxygen steelmaking, Linz-Donawitz steelmaking tai the oxygen converter process), johon kuuluvat masuuni ja konverteri. Tämän prosessin pääasiallinen energialähde on hiili. Integroitu teräksenvalmistus vaatii 1000 kg raakateräksen tuottamiseksi keskimäärin 1370 kg rautamalmia, 780 kg kivihiiltä, 270 kg kalkkikiveä ja 125 kg kierrätettyä terästä. (World Steel Association 2019.) Keskimääräinen energiankulutus ottaen huomioon raaka-aineiden valmistus on lähes 20 GJ/tonni nestemäistä terästä eli 5 489 kWh (Lord ym. 2018).

Rautamalmin vedyllä pelkistäminen on menetelmänä tunnettu yli 80 vuotta. Ensimmäiset patentit on tehty 1930-luvulla. Muun muassa suurten investointikustannusten sekä sähkön ja kivihiilen hintojen vuoksi menetelmää ei ole kuitenkaan laajasti kehitetty teolliseen mittakaavaan.

Sovellusesimerkki 4.

SSAB:n Raahen terästehdas tuotti vuonna 2018 peräti 7 prosenttia Suomen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä. Se on Suomen suurin yksittäinen CO₂-päästöjen tuottaja.

Päästövähennyksen suuruusluokka on merkittävä, jos Raahen tehtaan päästöt saadaan lähes nolnaan. Mittaluokkaa kuvavat arviot, joiden mukaan vähennys vastaa noin 60 prosenttia Suomen maatalouden tuottamista CO₂-päästöistä tai 35 prosenttia Suomen liikenteen tuottamista CO₂-päästöistä (Tekniikka&Talous 2020 b.)

Sähköistetyllä teräksenvalmistusprosessilla, joka on yhdistetty hiilivapaaseen energialähteeseen, voi selvästi vähentää kasvihuonekaasuja verrattuna valmistusprosessiin, joka on riippuvainen fossiilisista polttoaineista. Prosessin vaihtaminen fossiilivapaaksi voi tarjota monia ympäristö, tuote- ja tuotantoetuja, mutta käyttökustannukset ovat tällä hetkellä yleensä paljon korkeammat kuin fossiiliseen polttoaineeseen perustuvissa lämmityksissä. (Wei ym. 2019.) Nollahiiliteräksestä voi tulla merkittävä vientituote alalla, joka aiheuttaa tällä hetkellä 6–7 prosenttia maailman päästöistä (Lord ym. 2018).

5.1.1. RAUTA- JA TERÄSTUOTANNON SÄHKÖISTÄMINEN VETYPALKISTYKSELLÄ

Rauta- ja terästuotannon sähköistämiseen on useita mahdollisia reittejä. Yksi reitti kasvattaa tuotevirtojen taloudellisuutta on lisätä kierrätysastetta ja käyttää toisioterästä, joka on tuotettu valokaariuunissa. Teräksellä on äärimmäisen korkea kierrätysaste; vuonna 2014 se oli lähes 86 prosenttia (Steel Recycling Institute). Raakateräksen tuotannossa käytetyn teräsromun osuus oli kuitenkin maailmanlaajuisesti vain 35,5 prosenttia vuonna 2018, koska kysyntä ylitti romun saatavuuden. Primääriterästuotannon suora sähköistäminen on mahdollista rautamalmin elektrolyysillä. Useita metalleja tuotetaan elektrolyysin avulla, kuten alumiini, nikkeli, ja sinkki. (Wei ym. 2019.)

Sovellusesimerkki 5.

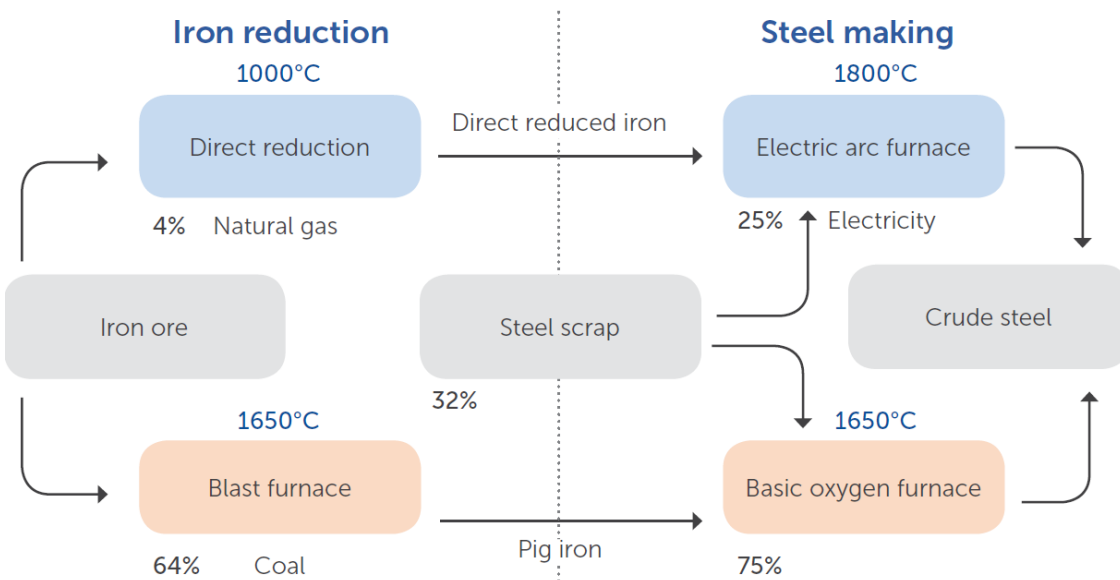
Tutkimus osoittaa, että vetyperusteista DRI:tä käyttävä teräksenvalmistus tarvitsee 3,48 MWh sähköä nestemäistä terästönä kohti (Vogl ym. 2018). Kulutus kohdistuu pääasiassa elektrolysaattorin vetytuotantoon. Menetelmä on kustannuskilpailukykyinen hiilen hinnan ollessa 34–68 €/tCO₂ ja sähkön hinnan ollessa 40 €/MWh. Bench-scale -testaus osoitti, että pelkistäminen vedyllä 1 300 °C:n lämpötilassa on mahdollista. (Wei ym. 2019.)

Terästuotannon epäsuora sähköistäminen tarkoittaa vedyn käyttöä pelkistysaineena ja energian kantajana rautamalmin suorassa pelkistyksessä maakaasun sijaan. Maakaasupohjaisessa suorassa raudan pelkistyksessä (DRI = direct reduced iron) maakaasu muutetaan vedyn ja hiilimonoksidin seokseksi, joita sitten käytetään pelkistysaineena raudan tuottamiseen.

Vetyperusteisen teräksen tuotanto on jo osoitettu kaupallisessa mittakaavassa (Circored-prosessi). Käyttämällä uusiutuvaa vetyä kemiallisena pelkistimenä ja maakaasua polttoaineena, voidaan vähentää teräksen valmistukseen liittyviä päästöjä 90 prosenttia ja energiankulutusta 18 prosenttia. Nollahiiliterästä voidaan valmistaa käyttämällä uusiutuvaa vetyä polttoaineena tai sähköistämällä Circoredin lämpöprosesseja. (Lord ym. 2018.)

Rautamalmi voidaan jalostaa teräkseksi kahdella tavalla. Yleisin tapa on integroitu menetelmä, jossa harkkorauta tuotetaan ensin masuunissa ja jalostetaan sitten raakateräkseksi emäksisessä happiunissa. Vaihtoehtoinen tapa kutsutaan suorapelkistykseksi. Suorapelkistetty rauta muutetaan raakateräkseksi valokaariunissa. (Lord ym. 2018)

Terästä voidaan kierrättää loputtomasti. Noin kolmasosa teräksestä valmistetaan kierrättämällä jäteteräs valokaariuunin kautta. Kuva 15 esittää näiden kolmen edellä mainitun tuotantomenetelmän prosessointitavat.



Kuva 15. Teräksen tuotantoon käytettävät prosessointitavat. Lähde: Lord ym. 2018.

Prosessit vaativat raudan sulattamisen. Varsinaisen teräksentuotannon jälkeen tulevat seuraavat prosessointivaiheet, kuten valaminen ja valssaus, jotka ovat kaikille tuotantotavoille yhteisiä riippumatta siitä,

tuleeko teräs masuunista vai valokaariuunista. Energia muodostaa noin kolmanneksen primääriteräksen valmistuskustannuksista. Tarve poistaa happea rautamalmin tekee siitä luonnostaan korkean energian ja korkean lämpötilan prosessin. (Lord ym. 2018.)

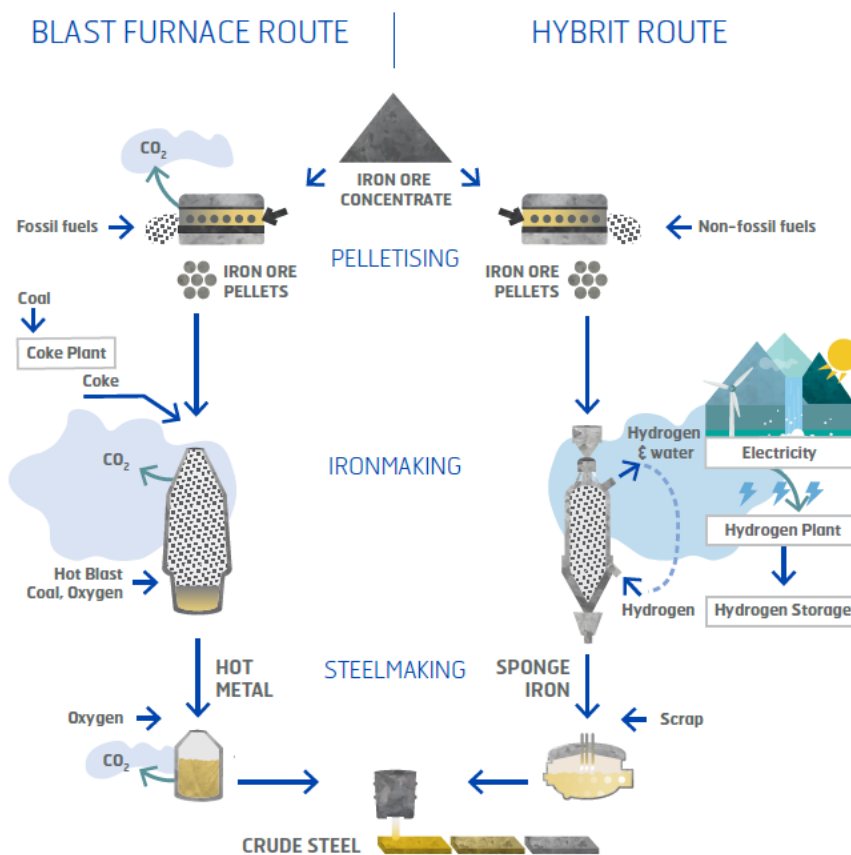
5.1.2. TERÄKSEN VALMISTUS SUORAPELKISTYKSELLÄ

Maailmanlaajuisesti tuotetaan lähes 60 miljoonaa tonnia suorapelkistettyä rautaa vuodessa. Primääriteräksen valmistuksessa yksi suorapelkistykseen kuuluu, että se ei vaadi raudan sulamista, joten pelkistys tapahtuu alhaisemmassa lämpötilassa (~ 900 °C) kuin masuunissa. Näin ollen prosessi tarvitsee vähemmän energiaa. Hiilipitoisuus jää myös alhaisemmaksi verrattuna masuunissa valmistettuun raakarautaan. (Lord ym. 2018.)

Suorapelkistetty rauta muunnetaan teräkseksi valokaariuunissa, jossa sähkövirta kulkee raudan ja kierrätysteräksen läpi, jolloin ne lämpenevät ja sulavat. Prosessi poistaa epäpuhtaudet suoraan pelkistyneestä raudasta ja tuottaa nestemäistä terästä. Menetelmä tuottaa myös noin 40 prosenttia vähemmän päästöjä. Menetelmä ei ole kuitenkaan enempää yleistynyt suuren sähkön kulutuksen ja siten suurten kustannusten vuoksi. (Lord ym. 2018.)

5.1.3. TÄYSIN SÄHKÖINEN REITTI PRIMÄÄRITERÄKSEEN

Suurin osa suorapelkistykseen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä syntyy maakaasun polttamisesta ja synteesikaasun hiilimonoksidin ja rautamalmin hapen välisestä reaktiosta. Päästöt voidaan eliminoida korvaamalla metaani puhtaalla vedyllä, käyttäen sitä polttoaineena ja pelkistimenä. Sivutuote vedyn käytöstä rautamalmin pelkistämiseksi on vesi. Kuvassa 16 seuraavalla sivulla esitetään havainnekuva suunnitelmasta valmistaa täysin fossiilittomasti ja sähköistetysti terästä.



Kuva 16. Havainnekuva suunnitelmasta valmistaa täysin fossiilittomasti ja sähköistetysti terästä. Kokonaisprosessi käsittää rautapellettien tuottamisen biopolttoaineilla ja rautamalmin pelkistämisen vedyllä. Lähde: Hybrit 2021.

Tutkimusesimerkki 1.

Teräsyhtiö SSAB, kaivosyhtiö LKAB ja energiayhtiö Vattenfall käynnistivät 2016 teräksentuotannon CO₂-päästöjen vähentämiseen tähtäävän Hybrit -hankkeen. Tavoitteena on aloittaa fossiiliton teräksentuotanto vuonna 2026. Se käsittää rautapellettien tuottamisen biopolttoaineilla ja rautamalmin pelkistämisen vedyllä teollisessa mittakaavassa. Pilottivaiheen ensimmäinen erä hiilivapaata terästä toimitettiin Volvo Groupille, joka valmisti siitä maailman ensimmäisen fossiilivapaasta teräksestä valmistetun ajoneuvon.

Hybrit -hankkeen aluksi (2016–2017) tehty esiselvitys osoitti, että silloisilla sähkön, hiilen ja CO₂-päästöjen hinnoilla fossiilivapaa teräs olisi noin 20–30 prosenttia kalliimpaa kuin perinteisesti tuotettu teräs. On arvioitu, että jos tulevaisuudessa EU:n päästökauppajärjestelmä nostaa CO₂-päästöoikeuksien hintaa ja alentaa fossiilittoman sähkön hintaa, fossiilittomasti tuotettu teräs tulee vähitellen kilpailukykyiseksi. (Hybrit 2021, SSAB 2018, SSAB 2021, Tekniikka&Talous 2020 a.)

Outotecin Circoredin kehittämishankkeessa keskeinen tavoite oli hienojen rautamalmyyviin (halkaisija < 2 mm) suotuisien ominaisuuksien hyödyntäminen. Rautamalmyhiutaleilla on taipumus tarttua kuumennettaessa yli 680 °C estäen hiutaleiden pelkistymisen. Tämän vuoksi ennen tavanomaista suorapelkistysprosessia rautamalmyhiukkasista muodostetaan pellettejä tai sintraa. Pelletointi ja sintraus ovat kalliita ja paljon energiaa kuluttavia menetelmiä, joten mahdollisuus hyödyntää suoraan hiukkasia mahdollistaa halvemman rautamalmyntuotannon. (Lord ym. 2018.)

Tutkimusesimerkki 2.

Circoredin avulla pelkistys vedyllä tapahtuu alhaisemmassa lämpötilassa (650 °C). Näissä olosuhteissa hienopartikkelit eivät tartu, ja kallis pelletointi- tai sintrausprosessi vältetään (Lord ym. 2018). Circored-tekniikka tuottaa suoraan pelkistettyä rautaa rautamalmyhienoaineista käyttäen puhdasta vetyä ainoana pelkistävänä aineena.

5.1.4. MENETELMIEN ENERGIAN TARPEET JA PÄÄSTÖJEN SYNTYMINEN

Tällä hetkellä yleisin teräksen valmistusmenetelmä perustuu suuriin hiilimääriin ja tuottaa 1,8 tonnia hiilidioksidia tuotetonna kohti (Lord ym. 2018). Tuotantoprosessien päästöjä laskettaessa on huomioitu sekä suorat että välilliset päästöt. Ruotsissa hiilidioksidipäästöt ovat nykyisellä tuotantomenetelmällä 1,6–1,7 tonnia hiilidioksidia raakaterästonnia kohti (t CO₂-e/t). Tyypilliselle integroidulle Länsi-Euroopan teräs-
tehtaalla vastaava luku on arviolta 2,0–2,1 tonnia hiilidioksidia (Hybrit 2021),

Terästeollisuudessa hyödykkeiden ja energian hinnat voivat vaihdella huomattavasti ajan myötä, ja useat tekijät osoittavat, että suhteellinen kustannustaso voi muuttua erilaisten menetelmien suunnittelu-
aikajänteellä. Nykyiset kustannustasot huomioon ottaen Hybrit-konseptiin perustuvan rauta- ja teräksenvalmistusketjun on arvioitu nostavan raakateräksen tuotantokustannuksia 20–30 prosenttia. Fossiilisten ja fossiilittomien arvoketjujen kustannusrakenteet ovat vahvasti riippuvaisia koksishiilen hinnoista, sähköstä ja päästöoikeuksista. Joidenkin odotusten ja ennusteiden mukaan muutos kustannuksissa ja markkinoiden vaatimuksissa tekee fossiilittomasta Hybrit-konseptista houkuttelevan vaihtoehdon. (Hybrit 2021.)

Erilaisten vetypohjaisten teräksen valmistusmenetelmien on todettu vähentävän energiantarvetta ja päästöjen syntymistä. Taulukossa 8 on vertailtu perinteistä teräksen masuunivalmistusta ja vetypelkistyksellä toteutettua menetelmää Hybrit-konseptin tietojen pohjalta. Laskennan luvut kuvaavat raakaterästonnin valmistustietoja.

Taulukko 8. Teräksen valmistuksen päästöjen ja energian tarpeen vertailua perinteisen masuunivalmistuksen ja vetypohjainen teräksen valmistamisen välillä. Lähde: Hybrit 2021.

	Energiankantajat	Energian tarve (kWh)	Päästöt (tCO ₂ /t)
Perinteinen teräksenvalmistus (masuuni)	Öljy	81	1,6
	Hiili	5 150	
	Sähkö	235	
Fossiiliton teräksenvalmistus vetypelkistyksellä	Bio	560	0,025
	Hiili	42	
	Sähkö	3 488	

Sovellusesimerkki 6.

SSAB Raahen terästehtaan tuotantokapasiteetti on 2,6 miljoonaa tonnia (SSAB 2019). Fossiiliton teräksenvalmistuksen myötä sähkön tarve nousee. Taulukon 8 mukaan sähkön tarve kasvaa 3 253 kWh terästonnia kohden. Vuoden 2019 tuotantokapasiteetilla se tarkoittaisi 8 458 milj. kWh:n lisäystä sähkön kulutukseen. Vetypelkistys voidaan toteuttaa myös lähempänä malmin lähdeä, mikäli siellä on edullista sähköä tarjolla. Siinäkin tapauksessa Raahen sähkönkulutus kasvaisi valokaariuunien myötä.

5.2. Sementti ja mineraalit

Mineraaliteollisuuden merkittävimmät kasvihuonekaasupäästöt syntyvät sementin, lasin, kalkin ja meesan tuotannossa. Näitä teollisuudenaloja yhdistää korkeat tuotantolämpötilat. Kun mineraaliraaka-aineita jalostetaan esimerkiksi klinkkeriksi, lasiksi tai kalkiksi lämpötilat nousevat yleensä yli 1 400 °C:een. Lasi- ja sementtituotteita voidaan myös kierrättää hyvin. Lasiteollisuudelle kierrättäminen on tasolasiin tuotantoa lukuun ottamatta hyvin yleistä. Sementtituotteita, kuten betonia voidaan käyttää uudelleen esimerkiksi rakennusmateriaalina tai tienäytteenä, mutta niitä jalostetaan harvoin uudelleen klinkkeriksi ja kalkiksi. (Lechtenbömer ym. 2016.) Kalkkiperäisten aineiden tuotannon CO₂-päästövähennykset voivat tapahtua prosessien sähköistämällä ja hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin toteuttamisella.

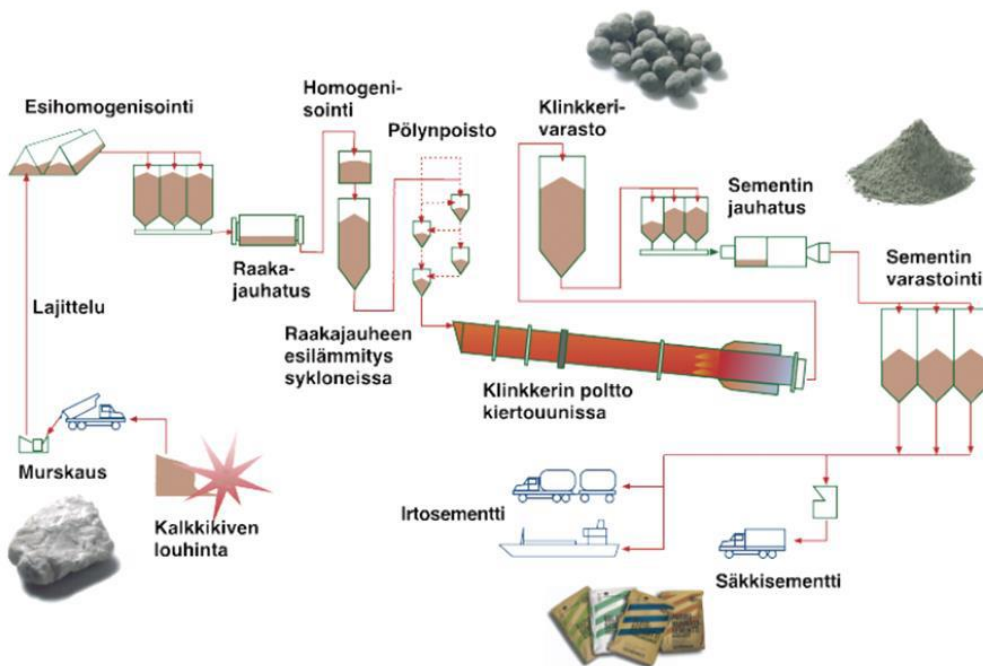
5.2.1. SEMENTTI

Sementtituotannon kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttaa kaksi suurempaa tekijää. Ensimmäinen usein lämmön tuottamiseen käytetään fossiilisia polttoaineita, joista on arvioitu muodostuvan noin 40 prosenttia kasvihuonepäästöistä. Toinen lähde on kalkkikiven kalsinointi kemiallisesti reaktiiviseksi kalsiumoksidiksi, josta muodostuu arviolta 60 prosenttia kasvihuonepäästöistä. Vaihtoehdot kalkkikiven osuuden vähentämiseksi raaka-aineena, ja siten prosessipäästöjen välttämiseksi, näyttävät lupaavilta, mutta eivät ole

vielä kaupallisia. Vaihtoehtoja ovat ainakin magnesium- ja savipohjainen tai jätevesilietteestä valmistettu sementti. (Juenger ym. 2011.)

Kuvassa 17 on esitetty sementin perinteisen valmistuksen prosessikaavio. Sementin valmistusprosessissa kalkkikivi jauhetaan ja homogenisoidaan piioksidin, rautaoksidin ja alumiinioksidin kanssa. Muodostunut sementin raaka-ainejauhe esilämmitetään, jolloin kalkkikivelle tapahtuu kalsinoituminen eli syntyy poltettua kalkkia.

Korkean lämpötilan lämmöntuotanto voidaan muuntaa fossiilisten hiilipolttoaineiden käytön sijaan sähkön käyttöön esimerkiksi plasmatekniologioiden mukauttamisella sementintuotantoon (Lechtenböhrer ym. 2016). Sähkölämmitys voisi perustua plasma- tai johonkin muuhun korkean lämpötilan sähkölämpöprosessiin (Lechtenböhrer ym. 2016, Juenger ym. 2011).



Kuva 17. Sementin valmistuksen prosessikaavio. Lähde: Väisänen 2005.

Tutkimusesimerkki 3.

CemZero-projektissa on tutkittu erilaisia sementtiprosessin lämmitystekniikoita, joissa energialähteenä käytetään fossiilitonta sähköä perinteisten polttoaineiden sijaan, tavoitellen sähköistettyä sementtituotantoa. Lämmityksen sähköistäminen näyttää olevan teknisesti mahdollista. Sen on muun muassa osoitettu tuottavan tietyn määrän sementtiklinkeriä, joka perustuu täysin plasmatekniikkaan. Tämä mahdollisuus on vielä varmistettava laajamittaisella testauksella. Simulaatiot ovat osoittaneet, että mahdollinen tehtaan sähköistäminen toimisi hyvin yhdessä tuulienergian kanssa osittain parantuneen energiataseen kautta. Täysimittaisesti sähköistetyn sementtituotannon myötä polttoaineen tarve poistuisi, samalla kun sähkön tarve kasvaisi huomattavasti.

Päästöjen merkittävän vähentämisen saavuttamiseksi sähköistetty ratkaisu on hyvin kilpailukykyinen. Tutkimuksen mukaan sementin tuotantokustannukset kaksinkertaistuvat, mutta viime kädessä siihen liittyy vain muutaman prosentin kustannusten nousu sitten, kun infrastruktuuri on valmis. Sähköistäminen helpottaa myös mahdollisuutta kerätä helpommin tuotannon yhteydessä syntyvät hiilidioksidipäästöt, mikä asettaa samalla vaatimuksia ratkaisulle hiilidioksidin varastointiin tai käyttöön, hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin (CCS) tai hiilen talteenottoon ja hyödyntämiseen (CCU). (Bioenergy International 2019.)

5.2.2. LASI

Lasinsulatuksen vaatiman lämmityksen polttoaineena käytetään pääasiassa maakaasua. Tämä voidaan korvata joko uusiutuvista lähteistä peräisin olevalla metaanilla tai sähköuunilla. Sähkösulattimet ovat jo käytössä tietyissä lasituotannoissa pienemmässä mittakaavassa, mutta tullakseen merkittävämmiin käytetyiksi, ne pitäisi skaalata suuremman kokoluokan tuotantoon sekä varmistua soveltuvuudesta kaikille lasilaaduille. Nykyinen polttoainepohjainen lämmitys on melko tehotonta verrattuna siihen, mitä sähkölämmityksellä voitaisiin mahdollisesti saavuttaa. (Lechtenbömer ym. 2016.) Siirtymällä tehokkaisiin sähköisiin tuotantolaitteisiin tuotannon jokaisessa vaiheessa, voisi olla mahdollista vähentää energiantarvetta merkittävästi.

5.2.3. KAUTTAALTAAN SÄHKÖINEN LASINTUOTANTO

Nykyään sähköisiä lasiuuneja käytetään enimmäkseen erikoislasien, kuten lasinäyttöjen, ruoka-astioiden ja lasivillan tuotannossa. Sähköisiä vaihtoehtoja on saatavilla kaikille astialasin valmistukseen liittyville vaiheille ja laitteille. Täyssähköisen sulattamisen tuloksena on mahdollista tuottaa korkealaatuista homogeenista lasia. Sähköisten lasinsulatinten suurin etu on niiden energiatehokkuus. (Lord ym. 2018.) Sähköuuneja käyttäen uskotaan lasintuotannon lopullisen energiatehokkuuden kasvavan kokonaisuudessaan jopa noin 68 prosenttia nykyisestä 2,1 MWh/tonnin energiakulutuksesta 0,85 MWh/tonniin (Lechtenbömer ym. 2016).

Tärkeä sähköisen lasinsulatuksen etu on myös syntyvät pienemmät myrkylliset päästöt. Haitallisten päästöjen, kuten typpioksideja ja rikkioksidit, määrä saadaan hyvin pieneksi, sekä haittuvien kemikaalien määrä vähenee. (Lord ym. 2018.) Sähköisessä lasinsulatuksessa tehokkuus ei liity suurempaan yksikkökokoon, mikä tekee pienemmistä modulaarisista asennuksista varteenotettavia.

Taulukossa 9 seuraavalla sivulla on esitelty sähkön tarvetta astiatuotannon eri tuotantomenetelmillä. Sähköistämällä astiatuotanto kauttaaltaan voidaan vähentää kokonaisenergiantarvetta 30 prosenttia (Lord ym. 2018).

Taulukko 9. Astiatuotantomenetelmien sähkön tarve prosessivaiheittain. Lähde: Lord ym. 2018.

Prosessivaihe	Lämpötila	Perinteinen kaasupoltto		Täysin sähköinen
		Kaasu (kWh)	Sähkö (kWh)	Sähkö (kWh)
Sekoitus	Huonelämpötila		161	161
Sulatus	1 550°C	1 150	204	860
Käsittely & muotoilu	1 100°C > 600°C	105	26	104
Hehkutus	600°C>huone- lämpötila	210	25	183
Kokonaisenergia			1 881	1 308

5.2.4. KALKKI

Kalkin kysynnän oletetaan vähenevän huomattavasti sen jälkeen, kun fossiilisista polttoaineista on asteittain luovuttu sähköisen tuotannon myötä. Samalla se tarkoittaa, että pitkällä aikavälillä rikinpoiston ja happamoituneiden järvien kalkitsemisen tarve vähenee (Lechtenböhrer ym. 2016).

Poltettua kalkkia tuotetaan kalkkitehtailla. Sitä syntyy myös osana joidenkin muiden teollisuuden alojen prosesseja. Kalkkikiven polttamisen osalta on odotettavissa kehitys, jossa tehokkuutta voidaan jonkin verran parantaa, mikä johtaa energian tarpeen vähenemiseen noin 20 prosenttia. Tällä hetkellä polttoaineita käytäviä prosesseja muutetaan tuotantoketjun alkupäässä korkean lämpötilan sähkölämpöprosesseiksi. (Lechtenböhrer ym. 2016.) Esimerkiksi kalkkiuunin sähköistäminen mahdollistaa päästöjen vähentämisen.

Poltettua kalkkia (CaO) hyödynnetään muun muassa rakennusmateriaalien raaka-aineena, maanhoidossa, rehuissa, vesistöjen hoidossa, savukaasujen puhdistamisessa sekä lukuisissa teollisuuden kohteissa, kuten selluntuotannossa osana kemikaalikiertoa keittokemikaalien regeneroimiseen ja paperinvalmistuksessa paperin päällystyspigmentteihin ja täyteaineisiin

5.3. Tiilet

Tiili on poltetusta savesta valmistettu rakennusmateriaali. Savitiili on kestävä tuote, joka eristää sekä kestää korroosiota ja tulta. Vaikka tiilirakenteet puretaan, yksittäisiä tiiliä voidaan käyttää uudelleen. Merkittävä mahdollisuus on käyttää tiiliä CO₂:n sitomiseen. Tiilien valmistukseen tarvitaan kuitenkin runsaasti energiaa. Tiilenvalmistus kuluttaa keskimäärin 721 kWh/tonni, josta yli 75 prosenttia on polttamiseen kuluvaa lämpöenergiaa. (Lord ym. 2018.)

Valtaosa tiilien tuotannon ympäristövaikutuksista syntyy polttoprosessissa. Bio- ja kierrätyspohjaisia polttoaineita käyttämällä on mahdollista päästä huomattavasti alhaisempiin hiilidioksidipäästöihin verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Suomalaisessa tiilituotannossa öljypolttoaineet ovat vielä yleisiä lämmöntuottajia. Jonkun verran on siirrytty maakaasun käyttöön, jonka CO₂-päästöt ovat selvästi alhaisemmat kuin käytettäessä lämmityksessä raskasta tai kevyttä polttoöljyä. Biokaasulla päästäisiin vielä pienempiin päästöihin, mutta toistaiseksi hidasteena muutoksille on vaadittavat investoinnit ja sitä kautta tuotehintojen nousu. Suomen tiilituotannon hiilidioksidipäästöt vuosittain ovat noin 14 000 tonnia. (Tiili-info 2020.)

5.3.1. TIILIEN POLTTAMINEN MIKROAALTOUUNISSA

Mikroaaltoavusteinen tiilenpoltto voi vähentää tiilenpolton energiankulutusta 50 prosenttia ja kaksinkertaistaa tuotantonopeuden. Lisäinvestoinnit mikroaaltouunilla toimivaan uuniin voidaan yleensä maksaa melko nopeasti alhaisempien käyttökustannusten ansiosta. Tiilien polttamiseen tarvittava aika ja energia voidaan puolittaa käyttämällä mikroaaltoja täydentämään tavanomaista uunipolttamista.

Mikroaaltouunissa tiilet kuumennetaan samanaikaisesti ulkopuolelta tavanomaisella lämmityksellä ja sisäpuolelta mikroaaltolämmityksellä. Tekniikka mahdollistaa tiilien nopean ja tasaisen lämmityksen ilman vahinkoja. Nopeampi polttaminen tarkoittaa pienempää lämmöntarvetta ja suurempaa energiatehokkuutta. (Lord ym. 2018.)

Tutkimusesimerkki 4.

Iso-Britanniassa C-Tech Innovation rakensi mikroaaltouunilla avustetun tunneliuunin tutkiakseen sen mahdollisuuksia tiilenvalmistuksessa. Uunissa yhdistettiin lämmön tuottamiseen tavanomainen kaasupoltin ja kaksi 60 kW:n mikroaaltolämmitintä. Mikroaaltouunilla toimivien uunien tehokkuus perustuu ulkoisen lämmönlähteen läsnäoloon täydentämässä sisäistä mikroaaltolämmitystä. Tiilien polttaminen mikroaaltoavusteisessa tunneliuunissa vähensi energiankulutusta 50 prosenttia. Vähennys saavutettiin, kun mikroaallot tuottivat vain 10 prosenttia kokonaispoltoenergiasta. Kun tunneliuunin aikaa lyhennettiin 46 tunnista 16,75 tuntiin tuotannon nopeus kasvoi 174 prosenttia. C-Tech Innovationin pilotti käytti kaasupolttua ulkoiseen lämmitykseen. (Lord ym. 2018, Ceramic Industry 2016.)

Mikroaaltotiilien laatu on identtinen perinteiseen tapaan valmistettujen tiilien kanssa. Mikroaaltojen etu on, että ne voidaan jälkiasentaa olemassa olevaan tiiliuuniin. Muita ratkaisuja ei-fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi lämmittäjinä ovat sähköinen tunneliuuni, jossa käytetään vastuslämmitystä tai mikroaaltolämmityksen käyttäminen puujätteellä lämmitetyssä uunissa. (Lord ym. 2018, Ceramic Industry 2016.)

Tutkimusesimerkki 5.

Energian osuus tiilien tuotantokustannuksista on 23-38 prosenttia. Mikroaaltolämmitys voi vähentää tiilien valmistuksen energiankulutusta 50 prosenttia. (Lord ym. 2018.) Tavanomaisessa uunissa käytetään 570 kWh maakaasua yhden tuotantotonnin polttamiseen, kun vastaavasti mikroaaltoavusteinen sähköuuni käyttää tuotantotonnin kohden 285 kWh sähköä.

Mikroaaltouuni tarjoaa erinomaisen esimerkin sähköistävästä tuotannosta, joka voi kaksinkertaistaa tuotannon ja puolittaa energiankulutuksen. (Lord ym. 2018.)

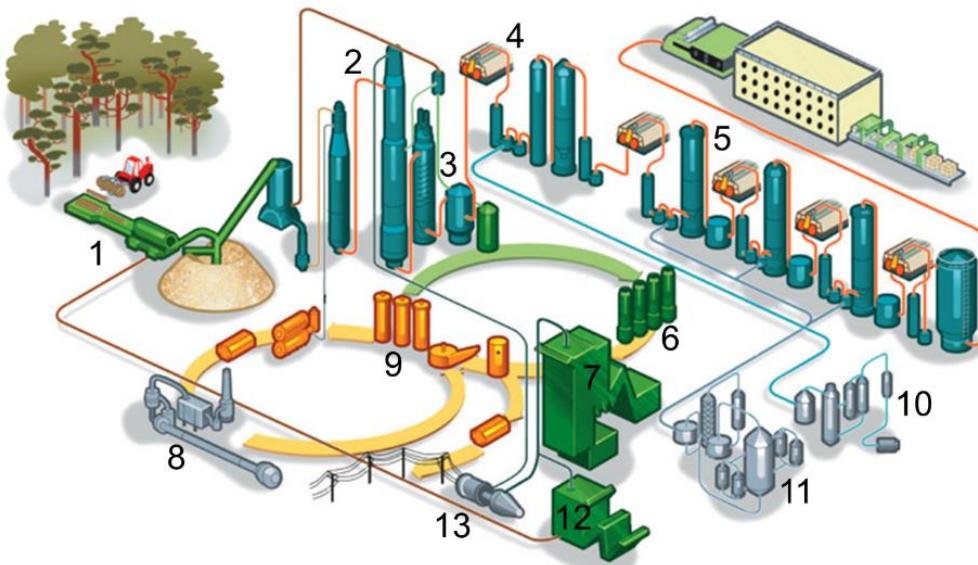
5.4. Sellu- ja paperiteollisuus

Paperin valmistuksen päävaiheet ovat sellun valmistaminen ja sellun muuttaminen paperiksi. Yleisin sellunvalmistusmenetelmä on sulfaattiselluprosessi, jossa hake hajoaa kuumaan kemialliseen liuokseen. Monet integroidut paperitehtaat ovat osittain omavaraisia energian suhteen, käyttäen puujätettä tai sellun sivutuotteita energian lähteinä. Tästä huolimatta globaalisti paperitehtaat ovat fossiilisten polttoaineiden suurkuluttajia. Sulfaattimenetelmällä valmistettu neitseellinen paperitonni vaatii noin 5 000–7 000 kWh energiaa. (Lord ym. 2018.)

Kuitumassaa paperin, kartongin ja pahvin valmistukseen voidaan tuottaa useammalla tavalla. Valmistettavasta tuotteesta ja siten tuotantomenetelmästä riippuen, massatehtaan tuotteina syntyy kemiallista sellua (esimerkiksi sulfaattisellu), puolisellua ja hioketta/hierrettä. Edellä mainituissa on vielä erilaisia alalajeja ja välimuotoja. Valittu tuotantotapa vaikuttaa puukemiaan, muun muassa ligniinin poistamisen asteeseen. Kemiallisessa tuotantotavassa puhtausaste ligniinin osalta on toisessa ääripäässä verrattuna mekaanisiin tuotantotapoihin. Tuotantotavan valintaan vaikuttaa olennaisesti, millaiset vaatimukset tuotettavalle paperille, kartongille tai pahville on asetettu. Lopputuotteessa voi olla yhdistettynä useita tuotantotapoja, kuten on esimerkiksi taivekartongissa. Näin ollen erilaisten massan tai paperin tuotantotapojen vertailu energiankulutuksen näkökulmasta ei ole suoraviivaista. Erilaisten tuotantotapojen sisällä voidaan hyvinkin miettiä sähköistettäviä osaprosesseja.

5.4.1. SELLUN VALMISTUS

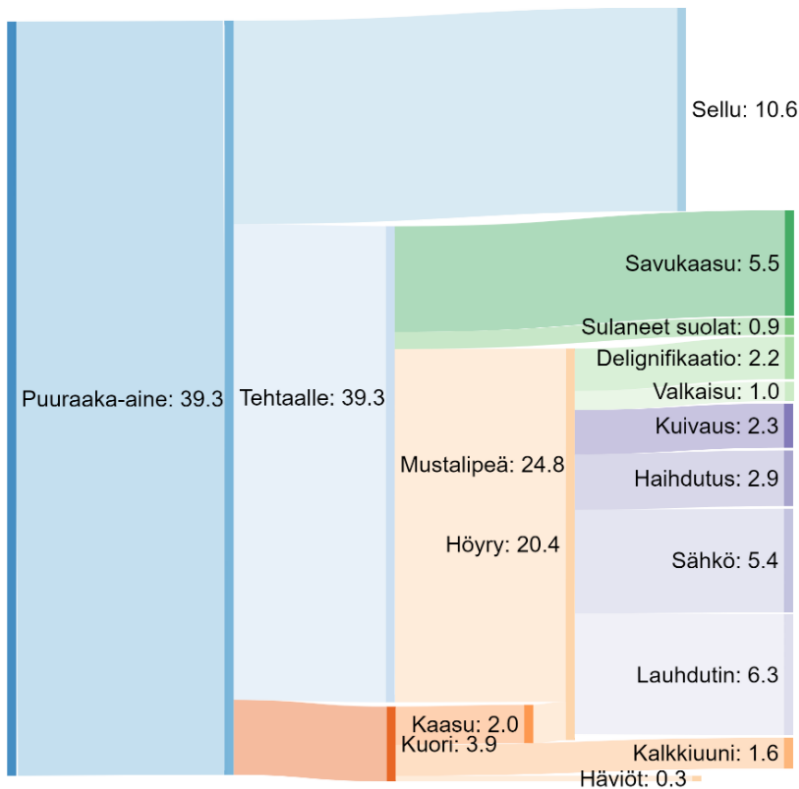
Tarkastellaan kemiallisen sellutehtaan sähköistämismahdollisuutta meesauunin ja haihduttamon osalta sekä ligniinin poistoa ja käyttöä. Kuvassa 18 alla on esitetty kemiallisen massanvalmistuksen pääprosessit.



Kuva 18. Kemiallinen massanvalmistusprosessi. Osaprosessit on nimetty seuraavasti: 1. puunkäsittely, 2. keitto, 3. pesu ja seulonta, 4. happidelignifiointi, 5. valkaisu, 6. haihdutus, 7. soodakattila, 8. kalkkiuuni, 9. kaustisointi, 10. happilaitos, 11. valkaisukemikaalin valmistus, 12. voimakattila ja 13. sähköntuotanto. Lähde: KnowPulp.

Havupuuta prosessoivan ECF (Elemental Chlorine Free) sellutehtaan suuntaa antavat energiataseet polttoaineesta höyryyn on esitetty kuvassa 19 seuraavalla sivulla. Sisään tulevan puun energia on 39,3 GJ/adt (air dry ton, adt). Esimerkin tehtaassa sähkön bruttotuotanto on 1 512 kWh ja vastaavasti sähkön kokonaiskulutus on 600 kWh/adt. Sähkön nettotuotanto on näin ollen 912 kWh/adt. (Kangas ym. 2013.)

Kun tarkastellaan edellä mainittua selluntuotantoa siten, että tuotetaan sähköä ja lämpöä (CHP), sähkön nettotuotanto on 710 kWh/Adt ja myytävän lämmön määrä on 1 975 kWh/Adt (7,1 GJ/Adt). Sähkön nettotuotanto on 202 kWh/Adt vähemmän, jos sähköä ja lämpöä tuotetaan yhdessä. Oletus sähkön ja lämmön yhteistuotannon täysimääräisestä käytöstä on voimassa vain talvella kylmissä maissa. Lisäksi tehtaan lähistölle tarvitaan melko suuri lämmön hyödyntäjä, esimerkiksi suuri kaupunki. (Kangas ym. 2013.)



Kuva 19. Havupuuta prosessoivan ECF (Elemental Chlorine Free) sellutehtaan energiatase (GJ/Adt). Lähde: Kangas ym. 2013.

5.4.2. MEESAUUNIT

Kaustistamon lipeäkierrossa viherlipeästä tehdään valkolipeää poltetun kalkin avulla. Lopputuloksena syntyy keittokemikaalien lisäksi meesaa, joka on pääasiassa kalsiumkarbonaattia. Meesauunissa, meesa kuivuu ja palaa takaisin poltetuksi kalkiksi (CaO). Meesauunit ovat tyypillisesti rumpu-uuneja. Kaustisoinnissa kohtaavat kemikaalikierto ja kalkikierto. (Tikka 2008.)

Kalkin hiilidioksidin vapautuminen aiheuttaa osan meesauunin päästöistä. Päästöjä tulee myös polttoaineista, joita tarvitaan reaktiolämpötilan saavuttamiseen. Kalkkierrossa tapahtuvassa kalkin poltossa vapautuu hiilidioksidia, joka on peräisin sellun keitosta kemikaalikierron kautta ollen siten bioperäistä. (*KnowPulp.*) Meesauunien lämmittämiseen käytettävät polttoaineet vaihtelevat biopolttoaineista fossiilisiin polttoaineisiin. Meesauunin sähköistämällä saavutetaan suurimmat päästövähennysvaikutukset silloin, kun se käyttää fossiilisia polttoaineita, joista päästään sähköistämisen myötä eroon. Biopolttoaineet ovat usein tehtaiden omia sivutuotteita.

Meesauunit olisi mahdollista muuttaa ainakin osittain sähkölämmitteisiksi hybridiuuneiksi, joita olisi mahdollista lämmittää perinteisesti polttoon perustuen tai sähköisesti. Samalla mahdollistuisi käytön joustavuus muun muassa sähkönhinta huomioiden, sekä osallistuminen sähköverkon taajuuden säätöön. Poltetun kalkin puskurivarastointi toisi lisäkapasiteettia lyhytaikaiseen säätöön. Hybridiratkaisu mahdollistaa edelleen myös meesauunin roolin esimerkiksi haitallisten hajukaasujen polttamisessa. Edellä mainittu ratkaisu vaatii vielä lisätutkimusta.

5.4.3. HAIHDUTTAMORATKAISU

MVR-tekniikan (Mechanical Vapour Recompression) avulla saavutettavat energiansäästöt ovat sopivassa sovelluskohteessa merkittäviä. Energiakustannusten kasvaessa mekaaniseen höyrynpuristukseen perustuvan menetelmän hyödyntämismahdollisuudet on huomattu ja soveltaminen on lisääntynyt.

Sovellusesimerkki 7.

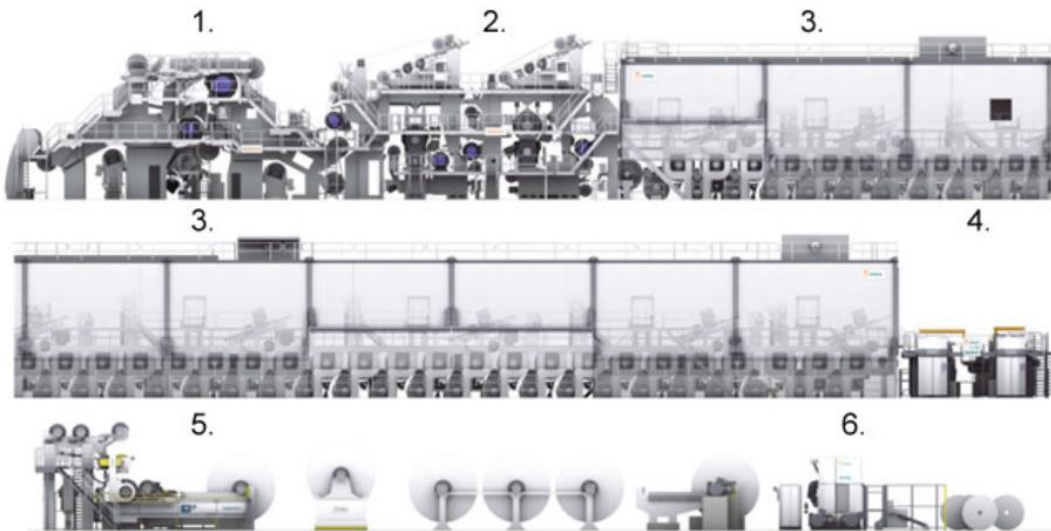
Andritz MVR -haihduttimet on suunniteltu toimimaan hyvin alhaisella ominaisenergiankulutuksella, tuottaen puhdasta lauhdetta ja minimoiden makean veden kulutuksen. MVR-haihduttimet poistavat vettä tehtaan lipeästä tai jätevesistä, pitäen samalla lauhteen laadun korkeana.

Haihduttimissa on lamellilämmityspinnat. Luonnostaan vaahtoamattomina nämä soveltuvat ihanteellisesti matalan kuiva-aineen MVR-sovelluksiin, joiden kapasiteetti on 10-200 t/h yksikköä kohden.

MVR-haihduttimet toimivat samalla periaatteella kuin lämpöpumput. Höyrystynyt vesi puristetaan uudelleen yksinkertaisella hitaalla nopeudella toimivalla keskipakopuhaltimella tai kompressorilla, joka nostaa höyryn kyllästymislämpötilaa. Puhaltimen jälkeen höyryä voidaan käyttää lämmityshöyrynä. Uudelleenpuristettu höyry kondensoituu ja vapauttaa piilevän lämpönsä lämmönsiirtopinnan läpi palautuen edesauttamaan lipeän tai jäteveden edelleen haihduttamista. (Andritz 2021.)

5.4.4. PAPERIN VALMISTUS

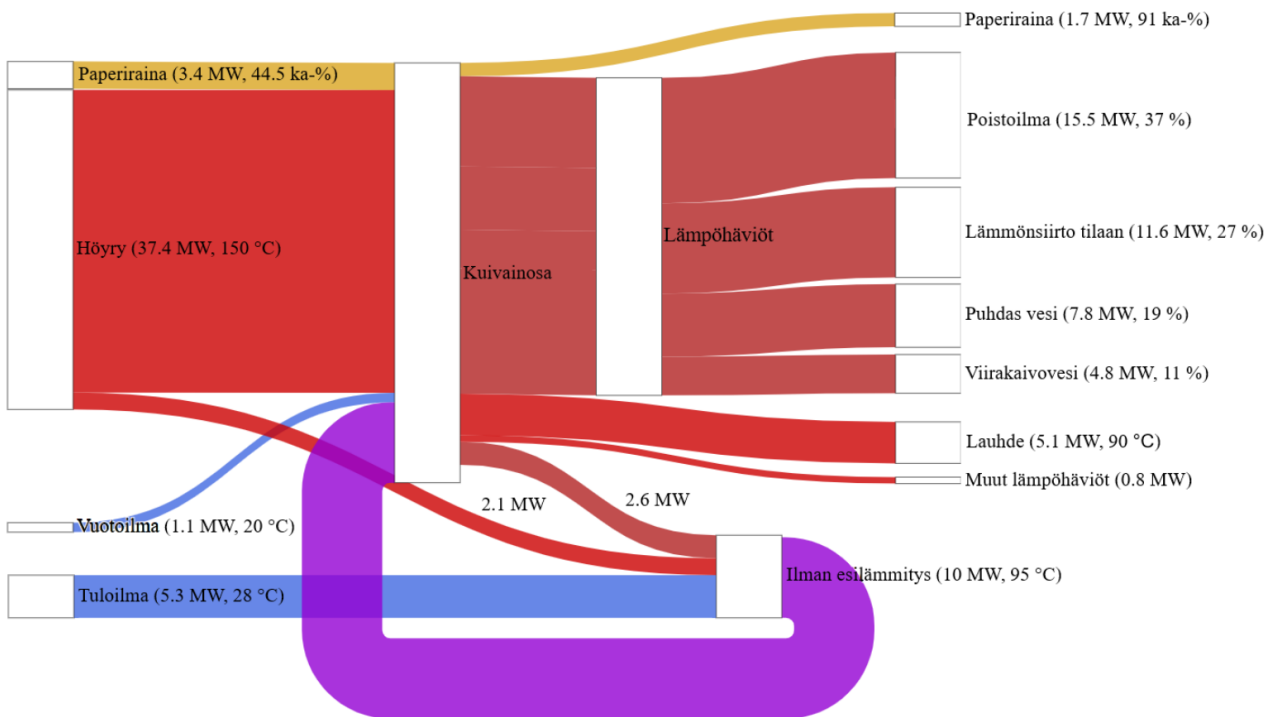
Lämmön talteenotto ja hukkalämmön hyödyntäminen on yleistä paperiteollisuudessa. Mahdollisuudet hyötykäyttää muun muassa kuiduttimien ja jauhinten sekä paperikoneen kuivaussylinterien ja jätevesien hukkalämpöjä on tunnistettu. Erityisesti matalan lämpötilan lämmön hyödyntämiseen löytyy edelleen lisäpotentiaalia, eikä myöskään höyryjärjestelmää ole useinkaan optimoitu riittävästi. (Fleiter ym. 2012). Kuvassa 20 on esitetty havainnekuva sanomalehtipaperikoneesta. Koneen tuotanto on 980 tonnia/päivä. Kone on varustettu ilma–ilma- ja ilma–vesi-lämmöntalteenottoyksiköillä. (BAT 2015.)



Kuva 20. Sanomalehtipaperikone. Lähde: KnowPap. Kuvassa on numeroituna seuraavat osaprosessit: 1. viiraosa, 2. puristinosa, 3. kuivatusosa, 4. kalanteri, 5. konerullain ja 6. pituusleikkaus.

Kuvassa 21 seuraavalla sivulla on esitetty sanomalehtipaperikoneen kuivausosan pääenergiavirrat. Sankey-diagrammin arvot voidaan muuntaa kW:sta kWh/t:ksi jakamalla kW-arvo tuotantokapasiteetilla, ilmaistauna tonnia/tunnissa, esimerkiksi tuorevedelle: $(7\,820\text{ kW} \times 24\text{ t/h}) / 980\text{ t/päivä} = 191,5\text{ kWh/t}$. (BAT 2015.)

Arvion mukaan sanomalehtipaperin tuotanto kierrätyspaperisellusta vaatii energiaa 2 262 kWh/tonni, joka on 63 prosenttia vähemmän kuin neitseellisen sanomalehtipaperin vaatima energiamäärä, joka on 6 138 kWh. Suurin osa tästä energiasta käytetään veden poistamiseen. Kun sanomalehtipaperi tulee viimeiseen kuivausvaiheeseen, se sisältää noin 50 prosenttia vettä, ja veden osuus on vähennettävä kuuteen prosenttiin. (Lord ym. 2018, Biermann 1996.) Perinteisessä prosessissa kuivausvaihe kuluttaa 1 824 kWh tuotetonna kohti eli 81 prosenttia kierrätetyn sanomalehtipaperin prosessiin tarvittavasta energiasta (Lord ym. 2018.)



Kuva 21. Sanomalehtipaperikoneen kuivausosan pääenergiavirtoja kuvaava Sankey-diagrammi. Lähde: BAT 2015.

5.4.5. PAPERIN KUIVAUS

Kuivaus on paperitehtaan suurin energiaa vaativa prosessi ja usein rajoittava tekijä tuotannon kasvattamiselle. Kuivausta tapahtuu sekä sellutehtailla, että paperitehtailla. Joissakin tapauksissa tehtaiden läheiset sijainnit mahdollistavat välikuivaustarpeen minimoinnin. On tutkittu erilaisia fysikaalisia menetelmiä kuivauksen tehostamiseksi. Esimerkkejä ovat höyryn tai ilman suorapuhalluskuivaus (impingement), kondenssihinnan kuivaus ja impulssikuivaus. (Fleiter ym. 2012.) Menetelmissä on omat vaikutuksensa myös kuivattavaan tuotteeseen. Kaikki menetelmät eivät sovi kaikkien tuotteiden kuivaukseen.

Sylinterikuivaus sopii kaikille paperilaaduille. Tällöin konfiguraatiot koostuvat yleisimmin seuraavista: sylinteri-sylinteri ja sylinteri-vakuimirulla. Yankee-kuivausta sovelletaan usein tissuepapereille. Tällöin kuivaus voi koostua sylinterikuivauksesta ja lisäksi kontaktialueella olevasta päällepuhalluskuivauksesta kuumalla ilmalla. Päällepuhalluskuivaus on tekniikka, joka tavallisen paperikoneen eri kuivausvaiheiden kohdalla puhalttaa kuumaa ilmaa joko suoraan paperirainan pintaan tai viiran läpi.

Höyrykuivaus on periaatteeltaan lähempänä päällepuhalluskuivausta, mutta kuumaa ilmaa sijaan käytetään tulistettua höyryä. Menetelmä vapauttaa energiaa, kun tulistus poistuu, ja "imee" samalla rainasta vettä. Nykyisin infrapunakuivausta käytetään yleisimmin paperin päällystysten yhteydessä. Päällystyspasta saadaan kuivattua paperin pintaan ilman kontaktia ja raina saadaan saatettua sellaiseen muotoon, että se voidaan viedä sylinterikuivaukseen. Hyötysuhteeltaan leijukuivaus on verrattain tehokas. Se vaatii hiljempaa kulkevan rainan, jolla on kova vetolujuus ja muun muassa siitä syystä sopii sellun kuivaukseen.

Sopivan kuivausmenetelmän löytäminen on monen tekijän summa ja useimmiten kompromissi erilaisten vaikuttimien välillä (Mujumdar 2006). Teollisten kuivatustekniikoiden mahdollisuuksia, soveltuvuutta ja reunaehtoja on tutkittu. Lisätietoa löytyy kuivausalan julkaisuista ja kirjallisuudesta.

5.4.6. PAPERIN SÄHKÖINEN KUIVAUS

Sähköistetyn kuivaamisen soveltamiseen on ainakin kaksi vaihtoehtoista lähestymistapaa. Sähköisen infrapunakuivaimen käyttö paperinkuivauksessa voisi korvata kaasukäyttöisiä kuivaimia, ja sähköinen impulssikuivaus voisi lisätä kokonaistehokkuutta (Lechtenböhrer ym. 2016). Infrapunalämmittimillä voidaan säästää energiaa ja lisätä tuotantonopeutta verrattuna perinteiseen höyrykuivausprosessiin (Lord ym. 2018, Mujumdar 2006). Toinen tapa kokonaistehostamiseen on käyttää hukkalämpöjä hyödyntäviä lämpöpumppuja höyryn tuottamiseen perinteiseen höyrykuivausjärjestelmään. Lämpöpumppu voi hyödyntää kosteaa ilmaa esimerkiksi 100 °C:ssa tuottaakseen höyryä 125 °C:ssa, jota lämmitetyt sylinterit vaativat. Mikäli lämpöpumppu voi suorittaa tämän tehtävän noin 4,5 prosentin lämpökertoimella, saavutetaan hyvä hyötysuhde.

5.4.7. PAPERIN INFRAPUNA- JA LÄMPÖPUMPPUKUIVAUS

Infrapuna on tehokas tapa ohuen materiaalin kuivaukseen, koska se kohdistaa lämmön kohteen pinnalle. Sähköistä infrapunaa käytetään jo laajalti pinnoitetun paperin kuivaamiseen ja kaasukäyttöistä infrapunaa tavallisen paperin kuivaamiseen, yleensä yhdessä perinteisten höyrykuivainten kanssa. (Lord ym. 2018.) Infrapuna on erityisen hyödyllinen kuivausosan loppua kohti, koska haihtumisen tehokkuus heikkenee merkittävästi paperin kuivumisen myötä. Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa havaittiin, että kuivattamalla sanomalehtipaperi täysin infrapunalämmityksellä voisi säästää energiaa, aikaa ja rahaa verrattuna perinteiseen höyrykuivaukseen (Abdelmessih ym. 2010).

Tutkimusesimerkki 6.

Tutkimuksessa arvioitiin teoreettista laitosta, joka tuottaa sanomalehtipaperia 26 tonnia tunnissa. Tuotantokapasiteetin saavuttamiseen perinteisellä höyrykuivauksella, tarvittaisiin 48 höyrylämmitettyä kuivatussylinteriä. Yhden paperitonnin kuivaamiseen höyr sylintereillä tarvitaan 947 kWh höyryä – mikä vastaa 1 263 kWh maakaasua (olettaen, että hyötysuhde on 75 prosenttia). Vaihtoehtoinen täysin sähköinen ratkaisu sisältäisi 47 000 yksittäistä infrapunasäteilijää, kukin 0,45 kW:n kapasiteetilla. Toteutuksessa märkä paperi kulkee metallisylinterien ympärillä ja altistuu muutaman metrin välein infrapunasäteilylle.

Taulukosta 10 käy ilmi, että tutkimusesimerkin infrapunajärjestelmä voisi vähentää paperin kuivaamiseen käytettävää energiaa noin 24 prosenttia. (Lord ym. 2018.)

Taulukko 10. Paperin kuivausmenetelmien energiankulutuksen vertailu prosessialueittain kuivattaessa yksi tonni paperia. Lähde: Lord ym. 2018.

Perinteinen höyrykuivaus		Prosessialue	Sähköinen infrapunakuivaus
Energia (kWh)			Sähkö (kWh)
Maakaasu & bioenergia	Sähkö		161
-	521	Mootorit ja pumput	539
-	40	Puhaltimet	40
1 263	-	Höyryn tuottaminen	-
-	-	Infrapunälämmitys	811
▼		▼	
1 824 kWh		Kokonaisenergia	1 390 kWh

Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa arvioitiin pääomakustannukset kunkin kuivausjärjestelmätyypin osalta. Tutkimuksen perusteella sähköinen infrapunakuivaus oli kustannuksiltaan noin 40 prosenttia edullisempi tavanomaiseen sylinterikuivaukseen verrattuna. Infrapuna- tai hybridi-infrapunajärjestelmien käyttöönotto paperin kuivausta varten vähentäisi myös merkittävästi riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Infrapunakuivauksen muita kuin energiahyötyjä ovat muun muassa lisääntynyt tuotantonopeus, alhaisemmat hankinta-, asennus- ja ylläpitokustannukset sekä laitteiden määrän ja koon pieneneminen. (Lord ym. 2018.)

Sovellusesimerkki 8.

Sähköinen infrapunakuivaus voi olla halvempi vaihtoehto sanomalehtipaperin kuivaamiseen, energian hinnoista riippuen. Jos esimerkiksi kaasu maksaa 13 dollaria gigajoulea kohti, sanomalehtipaperin kuivaaminen maksaisi 115 dollaria tuotettua tonnia kohden. Sähköinen infrapuna päihittää tämän hinnan, kun sähköä voi hankkia enintään hintaan 8,25 €/kWh. (Lord ym. 2018.)

5.5. Kemianteollisuus

Hyödykekemikaaliteollisuus on suuri energiankuluttaja ja maailmanlaajuisesti merkittävä kasvihuonekaasupäästöjen tuottaja (Schiffer & Manthiram 2017). Tällä hetkellä kemianteollisuuden käyttämän energian tuottaminen perustuu enimmäkseen fossiilisten polttoaineiden polttamiseen, mikä aiheuttaa merkittävän osan ihmisen toiminnan aikaansaamista kasvihuonekaasupäästöistä (Chen ym. 2019). Tuotannot vaativat energiaa lämpötilojen nostamiseen, paineiden hallintaan tai tuotteiden erotteluun. Lisäksi jotkin synteetisireitit, kuten ammoniakkin ja metanolin kohdalla, edellyttävät raaka-aineena vetykaasua. Vetykaasua tuotetaan yleensä metaanin höyryreformoinnilla, jossa vesi ja maakaasu muunnetaan vedyksi ja hiilimonoksidiksi. Vesikaasun muutosreaktion avulla hiilimonoksidi ja vesi muunnetaan vedyksi ja hiilidioksidiksi, mikä tuottaa kasvihuonekaasupäästöjä. (Schiffer & Manthiram 2017.)

Viisi tärkeää hyödykekemikaalia, joilla on sekä suuri tuotantomäärä että energiankulutus, ovat ammoniakki, eteeni, propeeni, metanoli ja bentseeni/tolueneeni/ksyleeni (BTX). Ammoniakki on tarpeen esimerkiksi akryylinitriiliin, hydratsiin, fenolin, typpihapon ja urean tuotannossa. Se liitetään lopulta lannoitteiden, puhdistusaineiden ja muovien valmistukseen. (Schiffer & Manthiram 2017.)

Nykyisessä kemianteollisuudessa voidaan toteuttaa monia sähköistämismenetelmiä. Yksinkertaisten menetelmät voidaan luokitella suoraan ja epäsuoraan sähköistykseen. Suora sähköistämismenetelmä tarkoittaa kemiallisen prosessin lämmitystä ja mekaanisen työn tuottamista sähköllä. Epäsuorassa sähköistämismenetelmässä toimitaan vaihtoehtoisten raaka-aineiden syntetisoimiseksi, joiden energiasäilytys on suurempi. (Chen ym. 2019.)

Toisinaan kemianteollisuudessa on ajateltu, että fossiilipohjaista raaka-ainetta on mahdotonta korvata sähköllä. Monet kemikaalit, kuten eteeni, propyleeni ja aromaattiset aineet, tuotetaan raakaöljystä tai muista monimutkaisista orgaanisista molekyyleistä. Toisaalta elektrolyysistä peräisin oleva vety on osoittanut mahdollisuuden energiamuutokselle. Hydrauksen kautta tapahtuvan kemiallisen tuotannon lisäksi kemikaalien synteessin kaltaiset reitit, kuten suorat elektro- ja fotokatalyyttiset reaktiot, edustavat myös sähköistettyjä prosesseja. Nämä vaativat vielä tutkimusta ja kehittämistä muun muassa skaalautuvuuden ja taloudellisen toteutettavuuden näkökulmista. (Chen ym. 2019.)

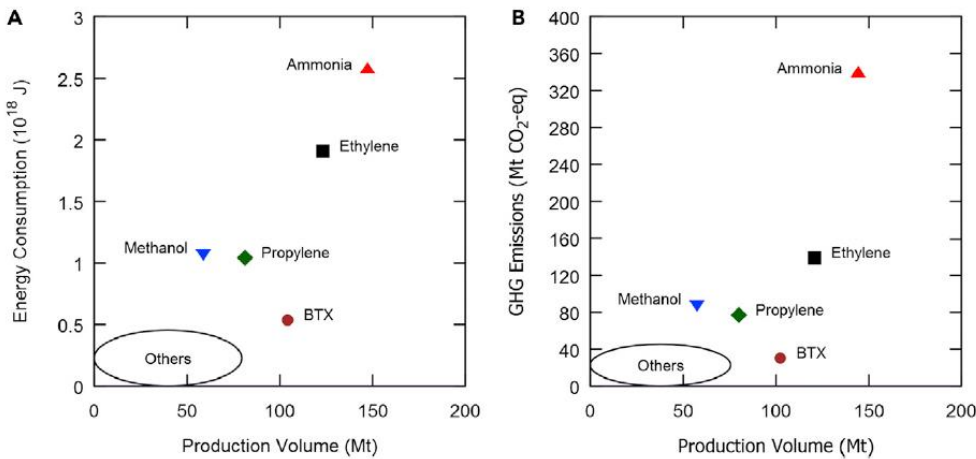
Prosessilämmityksen yksinkertainen toteuttaminen olemassa olevaan prosessiin suoraan sähköllä arvioidaan olevan tehotonta, ja siksi muun muassa lämpöpumppujen hyödyntäminen on potentiaalinen vaihtoehto prosessilämpöjen integrointiin. Pumppujen käyttöönotto vaatisi verrattain vähän muutoksia nykyisiin teollisiin prosesseihin, toisin kuin epäsuora sähköistäminen. Suoraa sähköistämistä lämpöpumpun avulla rajoittaa lämpötila, jonka lämpöpumppu voi toimittaa. (Chen ym. 2019.)

Peruskemikaalien sähköiset tuotantomahdollisuudet

Kloorin ja ammoniakin tuotannot ovat nykyään merkittäviä energian kuluttajia. Klooria tuotetaan NaCl-liuoksen elektrolyysillä. Keskimääräinen EU-alueella tapahtuva kloorituotanto käyttää sähköä 3,6 MWh klooritonnia kohti. Sähkönkulutus voidaan mahdollisesti pudottaa 3 MWh:in tuotantonnia kohden vuoteen 2050 mennessä, hyödyntämällä kehittyneitä kalvotekniikkaa ja osittain happea kuluttavia katodeja. Hyvän tavoitteena on toteuttaa tuotanto kokonaan uusiutuvalla sähköllä. (Lechtenböhmer ym. 2016.)

Ammoniakki on lannoitteiden valmistuksen perusraaka-aine. Ammoniakkaa muodostetaan Haber-Boschin prosessissa yhdistämällä typpiä ja vetyä. Nykyään vetyä tuotetaan maakaasua reformoimalla, mutta vety voitaisiin tuottaa myös veden elektrolyysissä. Arvioiden mukaan näin mahdollistuisi energiantarpeen vähentäminen 36 prosenttia ammoniakin tuotannossa. (Lechtenböhmer ym. 2016.)

Kemikaaleilla joiden energiankulutus on suuri, on usein myös suuret kasvihuonekaasupäästöt. Useimpien suurivolyymisten hyötykemikaalien tuotannon kaksi kasvihuonekaasupäästöjen (greenhouse gas, GHG) lähde ovat fossiilisten polttoaineiden polttaminen ja raaka-aineiden, kuten vedyn tuotanto. Kuvassa 22 on vertailtu viiden suurivolyymisimmän hyötykemikaalin tuotannon energiantarvetta ja syntyviä kasvihuonepäästöjä vuonna 2010. Tuotantoa ja siitä syntyvää energiantarvetta vastaavat kasvihuonepäästöt on ilmaistu B-kuvaajassa megatonneja hiilidioksidia (Mt CO₂-ekv.). Viisi merkittävintä kemikaalia on eritelty kuvissa, 'Others' käsittää arvion kolmentoista yleisimmän kemikaalin yhteisestä energiantarpeesta ja vastaavasta kasvihuonepäästöjen syntymisestä. (Schiffer & Manthiram 2017.)

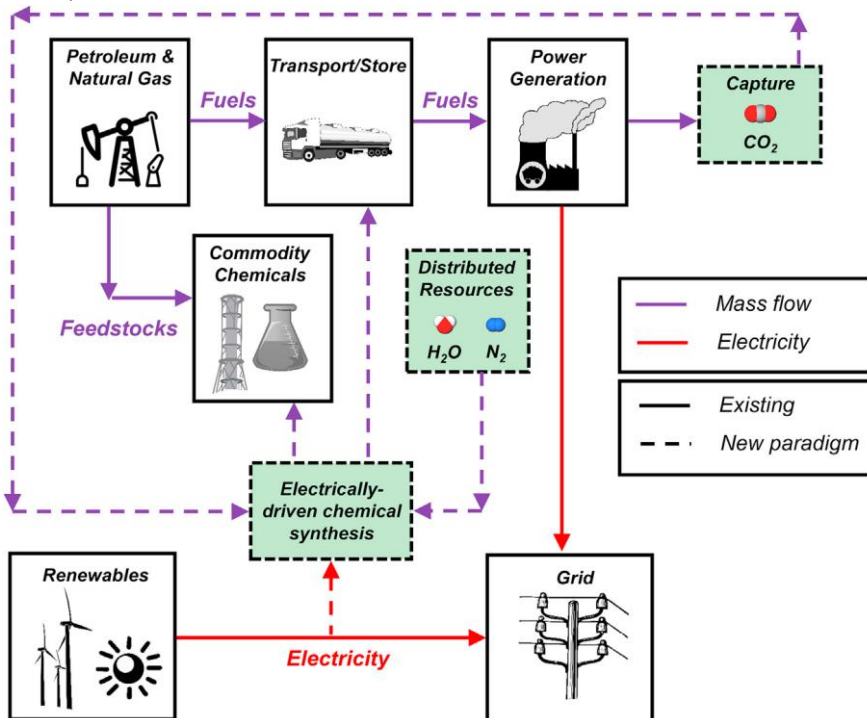


Kuva 22. Suurivolyymisten hyötykemikaalien valmistuksen energiankulutus (A-kuvaaja) ja hiilijalanjälki (B-kuvaaja). Lähde: Schiffer & Manthiram 2017, IEA 2013.

5.5.1. PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN

Kemian- ja energiateollisuus ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa polttoaineiden ja raaka-aineiden kautta. Tuotettaessa hiilineutraaleja polttoaineita sähköistämisen mahdollistamin menetelmin voidaan parantaa molempien toimialojen sujuvuutta ja yhteen liitettävyyttä. Kytkemällä yhteen kemian- ja energiateollisuus, voidaan tuottaa kemikaaleja, jotka toimivat sekä kemiantuotannon raaka-aineena että energiankantajina, mikä johtaa entistä suurempaan hiilidioksidipäästöjen vähentymiseen. (Schiffer & Manthiram 2017.)

Kuva 23 on hahmotelma, jossa modulaariset kemialliset synteesilaitteet ottavat typpeä, vettä, hiilidioksidia ja sähköä uusiutuvista energian lähteistä. Tämä suunnitelma tuottaa hyödykekemikaaleja, kuten metanolia ja ammoniakkia, tarjoten sekä energian varastointivälineen että halutut kemialliset tuotteet. (Schiffer, Manthiram 2017.)



Kuva 23. Skenaario yhdenlaisesta kemian- ja energiateollisuuden kytkennästä. Lähde: Schiffer & Manthiram 2017.

Kuvassa 23 esitetään nykyinen ja suunniteltu kytkentä. Violetit linjat osoittavat massavirtaa ja punaiset viivat sähköenergiaa. Viivat kuvaavat teollisuuden nykyisiä ratkaisuja ja katkoviivat esittävät, kuinka sähköistäminen ja hiilestä irtautuminen voitaisiin toteuttaa. Erityisesti sähkökäyttöinen kemiallinen synteesilaitte antaisi kemikaalien, kuten ammoniakkin tai metanolin toimia joko uusiutuvan sähkön energiankantajana tai välituotteina muiden kemikaalien ja tuotteiden tuotannossa. Kuvattu skenaario yhdistäisi energia- ja kemianteollisuutta entisestään ja auttaisi sulkemaan ja korvaamaan nykyisen hiilikierron. (Schiffer & Manthiram 2017.)

Esitettyjen reaktioiden kinetiikassa on vielä haasteita, jotka vaativat jatkotutkimuksia. Näin ollen uusien katalyyttien kehittäminen on välttämätöntä kemianteollisuuden sähköistämiseksi. Perusmekanismien ymmärrys liittyen katalyyttiseen hiilidioksidin vähentämiseen on kasvanut viime vuosina. Kemianteollisuuden sähköistäminen voi luoda mahdollisuuden täysin integroitua, hiilettömään paikalliseen tuotantoon, joka alkaa uusiutuvista luonnonvaroista ja päättyy haluttuihin kaupallisiin tuotteisiin. (Schiffer & Manthiram 2017.)

5.6. Vedenpuhdistamot

Veden puhdistaminen liittyy moneen teolliseen prosessiin ja on tärkeä osa myös yhteiskunnallista infrastruktuuria. Siten sen rooli on merkittävä tarkasteltaessa teollisuuden sähköistämistä, kuten myös haitallisten päästöjen vähentämistä.

Vedenpuhdistuksessa sähköistämistä voidaan hyödyntää eri tavoin. Sähköistetyt tai sähköistettävät teknologiat voivat käyttää sähköä esimerkiksi mekaaniseen työhön, kuten materiaalien erotteluun selektiivisesti läpäisevien kalvojen avulla. (Wei ym. 2019.) Joissakin tapauksissa sähköistäminen voi jopa välttää lämmön tarpeen kokonaan, hyödyntämällä esimerkiksi käänteisosmoosia veden erottamisessa. Puhdistustavoitteen saavuttaminen uudella lämpöön perustumattomalla tavalla, edesauttaa ympäristöystävällisten ja taloudellisten ratkaisujen saavuttamista. Näitä tekniikoita käytetään veden erottamiseen, puhdistamiseen tai poistamiseen nesteestä. Ne ovat vähän energiaa vaativia, ei-termisiä vaihtoehtoja perinteisille lämpöön perustuville puhdistustekniikoille, kuten haihduttamiselle.

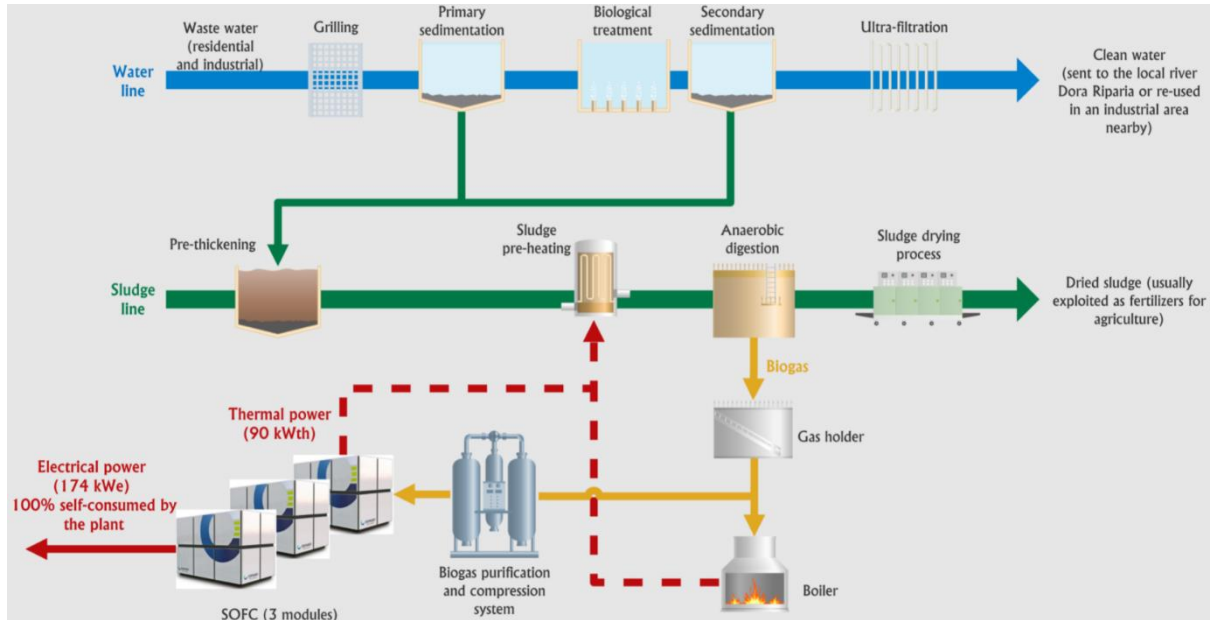
Käänteisosmoosille on useita sovelluskohteita muillakin teollisuuden aloilla, joissa tavoitteet voidaan saavuttaa vähentämällä tai peräti poistamalla lämpöä vaativien esilämmittimien ja höyrystimien tarve (Lord ym. 2018). Silloin kun puhdistus tai erottelu voidaan toteuttaa ilman lämmitystä, tai lämmitysmäärää pystytään pienentämään, voidaan mahdollisesti luopua fossiilisia päästöjä tuottavista lämmitysmenetelmistä, eikä tarvita investointeja uusiin ympäristöystävällisiin korvaaviin lämmitysmenetelmiin.

Sovellusesimerkki 9.

DEMOSOFC-projektissa on asennettu Collegnon kunnalliseen jätevedenpuhdistamoon noin 175 kW sähköä tuottava SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) -laitos. Sen arvioidaan tuottavan noin 30 prosenttia puhdistamon sähkönkulutuksesta ja lähes 100 prosenttia lämmön tarpeesta. Kohdelaitoksella tuotetaan biokaasua vedenkäsittelyprosessin sivutuotteena syntyvästä lietteestä. DEMOSOFC-laitos on ensimmäinen esimerkki korkean hyötysuhteen yhteistuotantolaitoksista, jossa keskikokoinen polttokenno käyttää syötteenään biokaasua. DEMOSOFC-tehdas koostuu biokaasun käsittelystä, SOFC-moduuleista ja lämmön talteenottojärjestelmästä. Kuvassa 24 on esitelty integraation prosessikaavio. (DEMOSOFC 2021.)

Orgaaniset jäteainevirrat kulkevat usein pieninä virtoina. Pieninä virtoina niillä on alhainen energiatiheys, joka tekee energian talteenoton muun muassa kustannuksiltaan haastavaksi. Suurin osa jätevesistä Euroopassa käsitellään pienissä laitoksissa, joissa biokaasun sähköntuotannon tekninen potentiaali on alle 500 kW. Tällä

hetkellä sähkön ja lämmön yhteistuotanto näissä laitoksissa on vähäistä. (Convion 2018.) DEMOSOFC-projektissa on tutkittu menetelmää, jossa sähköntuotanto integroidaan vedenkäsittelylaitoksen yhteyteen.



Kuva 24. Jätevedenkäsittelylaitoksen biokaasulla toimiva SOFC-järjestelmä. (DEMOSOFC 2018) Polttokennojen modulaarisuuden ja SOFC-tekniikan joustavuuden vuoksi menetelmä soveltuu eri kokosiin prosessiympäristöihin. Lähde: Convion 2018.

5.7. Muovi

Yli 90 prosenttia muoveista valmistetaan jalostamalla öljyä tai maakaasua. Muovintuotanto kuluttaa noin viisi prosenttia maailman vuotuisesta öljyntuotannosta, lähes yhtä paljon kuin ilmailuala. Muovin valmistus vaatii useita kertoja enemmän energiaa kuin teräksen valmistus. Noin 95 prosenttia muovipakkauksista käytetään lyhytaikaisesti ja heitetään pois. (MacArthur 2016.) Joka vuosi miljoonia tonneja muovia kulkeutuu jokiin ja valtameriin. Jos muovi on biohajoaa tai palaa, fossiilinen hiili pääsee ilmakehään (Beyond-Zero-Emissions 2019).

Haasteista huolimatta muovilla on myös etuja - erinomaisen lujuus-painosuhteen vuoksi se voi olla verrattain jopa vähähiilinen vaihtoehto. Esimerkiksi yhden litran muovijuomapullon muodostusenergia ja päästöt ovat pienemmät kuin lasista tai alumiinista valmistetun vastaavan. Jotta muovia voidaan käyttää kestäväällä tavalla, täytyy sen nykyisiin tuotanto- ja käyttötapoihin tehdä perusteellisia muutoksia. (Lord ym. 2018.)

Ratkaisuna muovin ympäristöongelmiin, ainakin osittaisena sellaisena, on muovin kierrätyksen lisääminen ja muovin tuotantotapojen muuttaminen. Muovin kierrätystä tehdään jo sähköuneja hyödyntäen. Tällöin energiankulutus on alle 5 prosenttia neitseellisen muovin valmistukseen tarvittavasta energiasta. (Beyond-Zero-Emissions 2019). Suurin osa muoveista voidaan kierrättää. Tämä edellyttää tehokkaan kierrätysjärjestelmän lisäksi muutoksia joidenkin muovien valmistukseen kierrätyksen helpottamiseksi. Muovien valmistus perustuu monomeerien ketjuttamiseen kemiallisissa prosessissa siten, että niistä tulee polymeerejä. Uusiutuvia muoveja voidaan valmistaa myös uusiutuvasta vedystä ja hiilidioksidipäästöistä. (Lord ym. 2018.)

5.7.1. SÄHKÖINEN MUOVITEOLLISUUS

Biopohjaisten muovien tuotannolla on potentiaalia olla täysin sähköistettyä (Bazzanella & Ausfelder 2017). Toisaalta muovien kierrätysprosesseja on jo onnistuneesti sähköistetty. Sähköunit mahdollistavat korkeamman lämpötilan säätämisen ja palamiskaasujen välttämisen. (Beyond-Zero-Emissions 2019.)

Sovellusesimerkki 10.

Cryogrindin murskaamisprosessi, johon sisältyy pellettien sekoittaminen ja puristaminen, kuluttaa energiaa 273 kWh/tonni pellettejä. Energiankulutus on vain kaksi prosenttia neitsyt-PVC:n energiasta. Newtecpolylla on lisenssi PolyWaste-tekniikkaan, joka on matalaenerginen menetelmä muovijätteen kierrättämiseen. Keskeinen innovaatio on kyky kierrättää sekoitetut muovijätteet, jotka muuten menisivät kaatopaikalle. Seos voi sisältää suuritiheyksistä polyetyleenä (HDPE), matalatiheyksistä polyeteeniä (LDPE), polypropeeniä (PP), nailonia, polyesteriä ja polyetyleenitereftalaattia (PET). Useimmat muut muovin kierrätysprosessit ovat herkkiä kontaminaatiolle ja vaativat siten suurta tarkkuutta ja arvokasta muovipolymeerien erottelua. PolyWaste-tekniikassa raaka-aine tarvitsee sulattaa vain kerran ennen muovituotteiden valmistamista. Newtecpoly vaatii energiaa noin 540 kWh tuotetonna kohden, perustuen suureen polyetyleenin osuuteen raaka-aineessa. Yksi tonni neitsyt-HDPE:tä (High-Density Polyethylene) vaatii energiaa 21 306 kWh ja 2,2 tonnia raakaöljyä. (Beyond-Zero-Emissions 2019.)

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1. Yhteenveto

Teollisuuden energiankäytön sähköistämistä pidetään keskeisenä tekijänä Suomen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä ja primäärienergian kulutuksen tehostamisessa. Itse sähköistäminen on monimuotoinen ja osin huonosti tunnettu joukko erilaisia ratkaisuja. Teollisuuden päästöjen vähentäminen ja primäärienergian kulutuksen tehostaminen sähköisten teknologioiden avulla oli tämän selvityksen keskiössä. Selvityksessä on käyty läpi tunnetuimmat sähköistämisteknologiat, tarkastellen niiden teknologista kypsyyttä sekä niiden soveltumista Suomen näkökulmasta olennaisimmille prosessiteollisuuden aloille: rauta- ja terästeollisuuteen, sementin, mineraalien ja tiilien valmistukseen, sellu- ja paperiteollisuuteen, kemianteollisuuteen, vedenpuhdistukseen ja muoviteollisuuteen.

Vuonna 2020 Suomen suurimmat päästökaupan alaiset päästösektorit olivat polttolaitokset (40,3 prosenttia), rauta- ja terästehtaat (20,6 prosenttia), mineraaliöljyn jalostus (15,6 prosenttia), massan ja paperin valmistus (11,1 prosenttia), sementtiklinkkeriä tuottavat laitokset (4,4 prosenttia) ja suurissa erissä tuotettavien orgaanisen kemian kemikaalien tuotanto (2,9 prosenttia). Sähköistämisen mahdollisuuksia päästöjen vähentäjänä onkin syytä tarkastella erityisesti näillä teollisuudenaloilla. Erittäin tärkeä havainto on, että noin 80 prosenttia Suomen teollisuuden hiilidioksidipäästöistä syntyy reilun kymmenen teollisuuslaitoksen päästöistä. Loput 20 prosenttia päästöistä hajautuvat useiden kymmenien pienempien päästäjien kesken. Täten suurten päästölähteiden prosessikehityksellä ja yksittäisillä investoinneilla voidaan saada merkittäviä muutoksia kokonaispäästöihin.

Suuri osa teollisuuden energian tarpeesta liittyy prosesseissa tarvittavan lämmön ja reaktiolämmön tuottamiseen. Fossiilisten polttoaineiden polttaminen on yleisin tapa tuottaa lämpöä teollisuuden prosesseihin, millä on merkittävä ilmastovaikutus, johon sähköistyksellä voidaan merkittävilta osin vastata. Prosessijärjestelmien ja niihin liittyvien yksikkötoimintojen ymmärtäminen ja kokonaisuusien hahmottaminen on välttämätöntä, jotta voidaan tunnistaa soveltuvia tekniikoita sähköistämisen lisäämiseksi ja prosessi-synergioiden tunnistamiseksi. Olemassa olevien prosessien ja infran hyödyntämismahdollisuus tuo useimmiten säästöjä. Investointien kannattavuuteen vaikuttavista tekijöistä korostuvat sähkön, päästö-oikeuden ja polttoaineiden hintojen keskinäinen suhde. Joka tapauksessa teollisuuden ylijäämälämmön tehokas hyödyntäminen esimerkiksi lämpöpumpputeknologialla on merkittävä mahdollisuus myös energia-tehokkuuden ja ympäristönäkökulmien kannalta.

Sähköistymisratkaisut voidaan karkeasti jakaa suoriin sähköistysratkaisuihin sekä epäsuoriin ratkaisuihin. Suoriin sähköistysratkaisuihin luetaan muun muassa suora sähkölämmitys, lämpöpumput, sähkömagneettinen lämmitys, sähkövastuslämmitys, valokaarilämmitys, sähköuunit ja reaktorit sekä erilaiset uudentyypiset lämmitysmenetelmät kuten induktio, mikroaallot ja infrapuna. Lisäksi käyttövoimaa voidaan vaihtaa sähköksi myös muuttamalla kokonaista yksikköprosessia, vaihtamalla esimerkiksi haihduttaminen kalvoerotukseen.

Suoran sähköistyksen ohella puhdasta sähköä voidaan hyödyntää vähähiilitavoitteiden saavuttamiseksi myös epäsuoralla sähköistyksellä. Tämä tarkoittaa vedyn tai hiilivetyenergiankantajien tekemistä puhtaalla sähköllä, jolloin energiankantajan käytön ilmastovaikutukset voivat olla radikaalisti pienempiä kuin käytettäessä fossiilisia raaka-aineita. Vedyn tuotanto sähköllä perustuu elektrolyysiteknologiaan. Näitä P2X-tuotteita tai sähköpolttoaineita voidaan käyttää kuten niiden fossiilisia vastineita, ja niiden merkittävä hyöty on yhteensopivuus nykyiseen infraan ja olemassa oleviin käyttökohteisiin ilman muutoksia. Näiden uusiutuvien hiilivetyjen valmistuksen vaatima hiili voi tulla joko teollisuuden savukaasuista, ilmasta tai pitemmän aikavälin skenaarioissa jopa merestä talteen otetusta hiilidioksidista tai biomassasta. Hyötysuhteen kannalta oleellista näiden kemiallisten energiankantajien valmistuksessa on pystyä hyödyntämään syntyvä hukkalämpö, joka vaikuttaa esimerkiksi elektrolyysin optimaaliseen sijoittamiseen sekä huomioi tuotevirtojen varastointiin ja siirtelyyn liittyvät seikat.

Polttolaitokset, joiden polttoaineena käytetään kivihiiltä, öljyä tai maakaasua, muodostavat suuren osan Suomen päästökaupan piirissä olevista hiilidioksidipäästöistä, lähes 40 prosenttia. Tähän lukeutuu kuitenkin sekä teollisuuden polttolaitoksia että lämmityslaitoksia. Teollisen lämmityksen sähköistäminen on yksi laajimmin soveltuvista ratkaisuperheistä energiantensiiviselle teollisuudelle. Teräs- ja kemianteollisuudessa perinteiset tuotantomenetelmät vaativat lämmityksen lisäksi fossiilisia raaka-aineita myös kemiallisiin reaktioihin. Näihin haasteisiin voidaan vastata joko käyttämällä hiilineutraaleja sähköpolttoaineita, jotka soveltuvat nykyisiin prosesseihin sellaisinaan, niin sanottuina drop-in-ratkaisuina, tai kehittämällä tuotanto-prosesseja niin, että ne soveltuvat käyttämään suoraa sähköä tai puhtaalla sähköllä tuotettua vetyä, kuten esimerkiksi fossiilittoman teräksen valmistus käyttämällä uusiutuvaa vetyä sekä polttoaineena että pelkistimenä. Suomen olosuhteissa perinteiset fossiilienergiaa hyödyntävät lämpökattilat voitaisiin korvata elintarvike-, massa- ja paperiteollisuudessa sekä kemianteollisuudessa sähkökattiloilla ja teollisuus-lämpöpumpuilla. Induktiolämmityksen, elektrolyyttisen lämmityksen, vastuslämmityksen ja valokaari-tekniikoiden nähdään olevan mahdollisia korvaavia teknologioita muun muassa lasin ja metallin valmistuksessa sekä ei-rautapitoisten metallien tuotannossa. Suuri osa näitä suurempia tuotanto-prosessimuutoksia edellyttävistä ratkaisuista vaatii vielä skaalaamisen kaupalliseen tuotantomittaluokkaan.

Prosessien sähköistämisen arvioidaan tuovan paljon muitakin hyötyjä kuin irtaantuminen fossiilisista raaka-aineista ja ilmastopäästöistä. Teollisuuden sähköistämisen kokonaishyötyihin voi kuulua esimerkiksi verkkotuen ja oheispalvelujen tarjoaminen, sähkökuormitustekijöiden parantuminen ja mahdollisesti tuotanto-kustannusten laskeminen. Hyötyihin lukeutuvat myös joustavuus muuttuvien sähköresurssien integroinnissa ja synergiat aurinkosähkön, sähköajoneuvojen ja energiavarastoinnin kanssa. Energiahyötyjen lisäksi voi sähköistämisen muilla eduilla, kuten parantuneella tuotteiden laadulla, tuotantomäärällä, prosessijalla, prosessin ohjattavuudella, prosessin joustavuudella ja turvallisuudella olla tärkeä rooli. Samalla kun pidetään esillä teollisuuden sähköistämisen mahdollisuuksia tuotannon tehokas ja päästöjen vähentäjänä, on hyvä muistaa myös joltain osin kääntöpuolet, esimerkiksi täysin sähköistetyn metanolin tuotannon on arvioitu kuluttavan 6–7 kertaa enemmän energiaa kuin perinteisen fossiilisiin raaka-aineisiin perustuvan prosessin. Joissakin tapauksissa sähköistäminen voi tuoda omat haasteensa valmistettavan tuotteen laadun säilyttämiseen.

6.2. Johtopäätökset

Teollisuuden sähköistämisen päästövähennyspotentiaali Suomessa on merkittävä ja jopa yksittäisillä investointipäätöksillä voi olla suuri vaikutus päästöihin. Monille nykyisin fossiilisia polttoaineita käyttäville prosesseille on jo olemassa sähköön perustuva vaihtoehto, ja lisää ratkaisuja on kehitysvaiheessa. Teollisuudessa keskipitkän aikavälin suurimmat sähköistämismahdollisuudet liittyvät erilaisten prosessi-lämmöntuotantojen sähköistämiseen esimerkiksi lämpöpumppu- ja muilla teknologioilla. Kokonaisten osaprosessien sähköistäminen ja epäsuora sähköistäminen vedyn avulla nähdään keskipitkän ja pitkän aikavälin ratkaisuin, riippuen kuitenkin merkittävästi näiden ratkaisujen kaupallistamiseen tähtäävien kehityspanosten vaikuttavuudesta.

Puhtaista energialähteistä peräisin olevalla primäärisähköllä näyttäisi nykytiedoin olevan vähiten resurssirajoituksia verrattuna muihin hiilidioksidin päästövähennysvaihtoehtoihin, kuten rajoitetusti saatavissa olevan kestävä biomassan käyttöön. Sähköistymistä rajoittavana tekijänä voidaan pitää kriittisten raaka-aineiden saatavuutta aina kuparista harvinaisempiin maametalleihin. Näiden raaka-aineiden tarve korostuu sähköistämiskäytöksissä, mistä sähköautojen akkutuotanto on hyvä esimerkki. Tähän pullonkulaan voidaan osaltaan vastata tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnalla sekä kehittämällä uusia, vähemmän kriittisiä raaka-aineita vaativia ratkaisuja.

Teollisuuden sähkönkäyttö on ympärivuotista, mikä helpottaa sähköistymistä, sillä se ei aiheuta vastaavaa vuodenaikaisista lämmönvaihteluista johtuvaa tehohaastetta kuin esimerkiksi lämmityssektorin sähköistys. Teollisuuden suurten kulutuskohteiden sähköistyminen voi lisätä koko energijärjestelmän kysyntäjoustoa.

Olemassa oleva järjestelmä tukee sähköpolttoaineiden, kuten vedyn ja synteettisen metaanin, käyttöä teollisuudessa, ja tätä kautta teollisuuden päästöjä voidaan edelleen leikata. Nämä epäsuorat sähköistymisratkaisut tarjoavat mahdollisuuksia myös pitkän aikavälin energian varastoina, joustona ja huoltovarmuustekijänä. Pitkällä aikavälillä vety ja uusiutuvat hiilivedyt voivat olla uusiutuva ja hiilineutraali raaka-aine moniin raskaan teollisuuden prosesseihin.

7. LÄHTEET

Andritz, 2021. Andritz -Mechanical Vapor Recompression (MVR) evaporator, (viitattu: 19.4.2021), Saatavissa: <https://www.andritz.com/products-en/pulp-and-paper/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/evaporation-plants/mvr-evaporators>.

Abdelmessih A.N., Beakley M.A., Campbell S.B., McKnight E.W., Roberts M.P., Woodward E.R., 2010. Infrared Electric Emitters for Drying Paper, 14th International Heat Transfer Conference (pp. 563-571). American Society of Mechanical Engineers.

Bazzanella A. & Ausfelder F., 2017. Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry, 2017, DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie eV, https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf.

Best Available Techniques (BAT), 2015. Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control).

Beyond-Zero-Emissions, 2019. Electrifying-Plastic-Brief, [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <https://bze.org.au/wp-content/uploads/2020/12/BZE-Electrifying-Plastic-Brief-2019-Beyond-Zero-Emissions-Australia.pdf>.

Biermann C.J., 1996. Handbook of pulping and papermaking, Academic press, San Diego.

Bioenergy International, 2019. Vattenfall and Cementa proceed towards climate neutral cement with CemZero. <https://bioenergyinternational.com/heat-power/vattenfall-and-cementa-take-the-next-step-towards-a-climate-neutral-cement>

Bühler F., Holm F.M., Elmegaard B., 2019. Potentials for the electrification of industrial processes in Denmark, Proceedings of ecos 2019 - The 32nd international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems June 23-28, 2019 Wroclaw, Poland.

Ceramic Industry, 2016. Product Profile: Tunnel Kiln Q&A, Saatavissa: <https://www.ceramicindustry.com/articles/96136-tunnel-kiln-qa>.

Chen C., Lu Y. and Banares-Alcantara R., 2019. Direct and indirect electrification of chemical industry using methanol, production as a case study, Applied Energy 243 (2019) pp. 71–90.

Convion Ltd., 2018. Capturing the energy of waste water, (viitattu 2.6.2021), [verkkojulkaisu]. Saatavissa: [Convion fuel cell systems can capture embedded energy of waste water](https://www.convion.com/en/convion-fuel-cell-systems-can-capture-embedded-energy-of-waste-water).

Deason J., Wei M., Leventis G., Smith S., Schwartz L., 2018. Electrification of buildings and industry in the United States. Drivers, barriers, prospects, and policy approaches.

De la Rue du Can S., Khandekar A., Abhyankar N., Phadke A., Khanna N.Z., Fridley D. ym., 2019. Modeling India's energy future using a bottom-up approach. Appl Energy 238 (2019) pp. 1108–1125.

DEMOSOFC, 2021, DEMOSOFC - FCH₂-JU Project, How it works, 2018, (viitattu 2.6.2021), Saatavissa: http://www.demosofc.eu/?page_id=374.

Di Salvo M. & Wei M., 2019. Synthesis of natural gas from thermochemical and power-to-gas pathways for industrial sector decarbonization in California. Energy 182 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.212>.

Energiavirasto, 2021. Toimialakohtaiset todennetut päästöt (t CO₂) vuosilta 2013-2020, 2021, <https://energiavirasto.fi/paastokaupan-julkaisut>.

ESB, 2021. Decarbonising Ireland's Industrial Sector - The Role Of Industrial Heat Pumps. Saatavissa: www.esb.ie/leadinglights <https://www.esb.ie/docs/default-source/Leading-Lights/industrial-heat-pumps-insights-paper>

Eurostat, 2014. Energy balances 2012, final 2014 edition. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>

Fleiter T., Fehrenbach D., Worrel E. and Eichhammer W., 2021. Energy efficiency in the German pulp and paper industry - A model-based assessment of saving potentials, Energy 40, pp. 84-99.

Graves C., Ebbesen S.D., Mogensen M., Lackner K.S., 2011. Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO₂ and H₂O with renewable or nuclear energy, Renew Sustain Energy 15 (2011) pp. 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.014>.

Götz M., Lefebvre J., Mörs F., McDaniel Koch A., Graf F., Bajohr S. ym., 2016. Renewable power-to-gas: a technological and economic review. Renewable Energy 85 (2016), pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>.

Hybrit, 2021. Hybrit, Fossil-Free Steel. Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017. A joint project between SSAB, LKAB and Vattenfall. Luettu 7.12.2021. Saatavissa: https://ssabwebsitescdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit_brochure.pdf?m=20180201085027.

IEA, 2013. Technology report — June 2013, Technology Roadmap - Energy and GHG Reductions in the Chemical Industry via Catalytic Processes (IEA, ICCA, and DECHEMA).

Irena, 2019. Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services, ISBN: 978-92-9260-108-9, Copyright © IRENA.

Jangam S.V., Mujumdar A.S., 2021. Heat Pump Assisted Drying Technology - Overview with Focus on Energy, Environment and Product Quality, in Modern drying technology, E. Tsotsas, Ed., Weinheim: Wiley-VCH, pp. 121–162.

Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H., 2011. Advances in alternative cementitious binders. Cem Concr Res 41 (2011) pp. 1232-1243.

Laurikko J., Ihonen J., Kiviaho J., Himanen O., Weiss R., Saarinen V., Kärki J. and Hurskainen M., 2020. National Hydrogen Roadmap for Finland, Business Finland, 2020, ISBN: 978-952-457-657-4.

Kangas P., Kaijaluoto S., Varhimo A., Asikainen S., Määttänen M., Robertsén L., 2013. Future Pulp Mills – Energy Mill Concept Evaluation.

KnowPap – Paperinvalmistuksen oppimisympäristö, (viitattu: 3.3.2021). Saatavissa: https://www.knowpap.com/www_demo_version/suomi/paper_technology/general/5_papermaking/frame.htm.

KnowPulp – Sellunvalmistuksen oppimisympäristö, (viitattu: 3.3.2021) https://www.knowpulp.com/www_demo_version/suomi/kps/ui/process/general/ui.htm.

Lechtenböhmer S., Nilsson L.J., Åhman M., Schneider C., 2016. Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification - Implications for future EU electricity demand, Energy 115 (2016) pp. 1623-1631.

Lord M. ym., 2018. Zero Carbon Industry Plan: Electrifying Industry, Beyond Zero Emissions Inc. Melbourne Australia.

Lipsanen, A., Kivimaa, P. & Leino, M. 2021. Sähköistyvän yhteiskunnan ja energiamurroksen vaikutukset sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen. Suomen ilmastopaneelin raportti 3/2021. Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/10/ilmastopaneelin-raportti-3-2021-sahkoistyvan-yhteiskunnan-vaikutukset-oikeudenmukaisuuteen.pdf>.

Lund, P., Kivimaa, P., Arasto, A., Lipsanen, A., Heliste, P., Tsupari, E. 2021. Sähköllä merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisessa, Suomen ilmastopaneelin julkaisuja, 3/2021. Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/06/ilmastopaneelin-julkaisuja-3-2021-sahkolla-merkittava-rooli-suomen-kasvihuonekaasupaastojen-leikkaamisessa.pdf>

MacArthur D.E., Waughray D., Stuchtey M.R., 2016. The New Plastics Economy, Rethinking the Future of Plastics, In World Economic Forum.

Metsäteollisuus ry., 2021. Metsäteollisuuden käyttämät tehdaspolttoaineet, [verkkojulkaisu], (viitattu: 8.4.2021), <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/metsateollisuuden-kayttamat-tehdaspolttoaineet>.

Motiva, 2020. Tuulivoima Suomessa. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 7.12.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa.

Mujumdar A.S., 2006. Handbook of industrial drying, (toim. Mujumdar), 3rd Edition, eBook ISBN: 9780429136092.

Naegler T., Simon S., Klein M. and Gils H.C., 2015. Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. Int J Energy Res. <https://doi.org/10.1002/er.3436>.

Pöyry Finland Oy, 2019. Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, Copyright Motiva Oy, Helsinki.

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020a. Teollisuustuotanto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-6389. 2020. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 29.11.2021], http://www.stat.fi/til/tti/2020/tti_2020_2021-07-01_tie_001_fi.html.

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020b. Energian hankinta ja kulutus (verkkojulkaisu). ISSN=1799-795X. 2019. Helsinki: Tilastokeskus (viitattu: 1.3.2021).

Schiffer Z.J. & Manthiram K., 2017. Future Energy: Electrification and Decarbonization of the Chemical Industry, Joule 1 (2017), pp. 10–14.

SSAB, 2021. Volvo Group esittelee SSAB:n fossiilivapaasta teräksestä valmistetun ajoneuvon. Lehdistötiedote. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/uutiset/2021/10/volvo-group-esittelee-ssabn-fossiilivapaasta-terksest-valmistetun-ajoneuvon>

SSAB, 2019. Liiketoimintakatsaus 2019, Kohti toimialan parasta kannattavuutta, Saatavissa: <https://mb.cision.com/Public/980/3057198/887ca3c0dc352aae.pdf>.

SSAB, 2018. SSAB, LKAB and Vattenfall to build a globally-unique pilot plant for fossil-free steel. Lehdistötiedote. Saatavissa: <https://www.ssab.com/news/2018/02/ssab-lkab-and-vattenfall-to-build-a-globallyunique-pilot-plant-for-fossilfree-steel>.

Steel Recycling Institute. [verkkojulkaisu]. Viitattu 7.12.2021. <https://www.steelsustainability.org/recycling>.

Tekniikka&Talous, 2020 a. 14.2.2020, s. 12-13.

Tekniikka&Talous, 2020 b. 14.2.2020, s. 12-13.

Tiili-info, 2020. Tiilien tuotannossa tehokkuus säästää ympäristöä, [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <https://www.tiili-info.fi/tiilien-tuotannossa-tehokkuus-saastaa-ymparistoa/>.

Tikka P., 2008. Papermaking Science and Technology, book 6, Chemical Pulping Part 2, Re-covery of Chemicals and Energy, ISBN : 978-952-5216-26-4.

Vogl V., Åhman M. and Nilsson L.J., 2018. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. Journal of Cleaner Production, 203 (2018) pp. 736-745.

Väisänen P., TTK Arkkitehtiosasto, Betoni -perustietoa arkkitehtipiskelijalle, 2005.

Wei M., McMillan C.A., De la Rue du Can S., 2019. Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook, Current Sustainable/Renewable Energy Reports 6 (2019), pp. 140–148.

Wiertzema H., Åhman M. and Harvey S., 2018. Bottom-up methodology for assessing electrification options for deep decarbonisation of industrial processes, In Eceee Industrial Summer Study Proceedings (Vol. 2018, pp. 389-397). European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).

World Steel Association, 2019. Fact Sheet: Steel and Raw Materials, Saatavissa: <https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html>.

ÅF-Consult, 2019. Uudet energiateknologiat - yhteenveto polttamisen vaihtoehtoista. [Verkkojulkaisu]. Selvityksen tilaaja: Energiateollisuus ry. [Julkaistu 8.11.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/uudet_energiateknologiat_-_yhteenveto_polttamisen_vaihtoehtoista_-_af-consult_oy_2019.html

Åhman M., Nikoleris A., and Nilsson L.J., 2012. Decarbonising industry in Sweden an assessment of possibilities and policy needs. Number 77. Lund University, Lund, Sweden, 2012. ISBN 9789186961039. URL <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhallet/miljoarbete-i-verige/klimat/fardplan-2050/decarbonising-industry-sweden-lunds-univ.pdf>.