

Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Energia- ja ympäristötekniikka

## **Kandidaatintyö**

Energiamurros teollisuudessa

29.11.2022

**Elina Leinonen**

---

**Tekijä** Elina Leinonen

---

**Työn nimi** Energiamurros teollisuudessa

---

**Koulutusohjelma** Insinööritieteiden kandidaattiohjelma

---

**Pääaine** Energia- ja ympäristötekniikka

---

**Pääaineen koodi** ENG3042.A

---

**Vastuupettaja** Kari Alanne

---

**Työn ohjaaja(t)** Henrik Holmberg, Jaakko Ketomäki

---

**Päivämäärä** 29.11.2022

---

**Sivumäärä** 20

---

**Kieli** suomi

---

## Tiivistelmä

Tämän työn tavoitteena on muodostaa yleiskuva teollisuuden kohtaamasta energiamurroksesta. Tarkempaan tarkasteluun on valittu teollisuuden sähköistyminen ja hukkalämpöjen hyödyntäminen. Työn loppupuolella tarkastellaan teollisuuden ja muun energiajärjestelmän yhtymäkohtia sekä esimerkiksi vientiin ja hiilikädenjälkeen liittyviä mahdollisuuksia. Aineistona on käytetty sähköistymiseen ja teollisuuden energiaratkaisuihin liittyvää kirjallisuutta.

Sähköistämiskehityksen rooli esimerkiksi metallienjalostuksessa ja kemianteollisuudessa on keskeinen. Erityisesti lämmitys- ja kuivausprosesseihin sekä teollisuuden työkoneiden sähköistämiseen liittyy runsaasti suoran ja epäsuoran sähköistämisen mahdollisuuksia. Lisäksi teollisuudessa on käytössä edelleen maakaasukäyttöisiä uuneja, joiden osalta sähköistäminen tarjoaa mahdollisuuden päästövähennyksiin.

Teollisuuden energiamurroksessa erityisen ajankohtaista on lämpöpumppujen teknologinen kehitys sekä politiikkatoimet, jotka vaikuttavat sähköistämiskäytöiden ja hukkalämpöjen hyödyntämisen kannattavuuteen. Yhä yleistynyt ratkaisu on hukkalämmön syöttäminen kaukolämpöverkoon silloin, kun sitä ei pystytä hyödyntämään teollisuuslaitoksessa tai sen ympäristössä. Teollisuuden sähkönkäyttö ja teollisuuslaitosten ja kaukolämpöverkostojen yhteenliittymät voivat toimia mahdollisuuksina lisätä kysyntäjoustoa koko energiajärjestelmään.

---

**Avainsanat** teollisuus, energiamurros, hukkalämmöt, sähköistyminen, kysyntäjousto, hiilikädenjälki, vetytalous

---

# Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
2 Teollisuuden energiankäyttö murroksessa.....	2
2.1 Muutoksen mittaluokka .....	2
2.2 Poliittikkatoimet teollisuuden tukena .....	3
2.3 Energiamurroksen keskeisiä suuntaviivoja .....	4
2.4 Polttoaineet ja työkoneet .....	5
3 Teollisuuden sähköistyminen .....	7
3.1 Sähköistymisen keinoja teollisuudessa.....	7
3.2 Teollisuuden alojen tunnuspiirteitä .....	8
3.3 Sähköistymisen mahdollisuuksia ja haasteita.....	9
3.4 Sähkön kasvava kysyntä.....	10
4 Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntäminen.....	12
4.1 Hukkalämpöjen tarjoamat mahdollisuudet.....	12
4.2 Hukkalämmön talteenoton vaatimuksia .....	13
4.3 Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa.....	14
4.4 Huomioon otettavia näkökulmia .....	15
5 Teollisuus muun energiajärjestelmän tukena .....	17
5.1 Kysyntäjoustopon mahdollisuudet .....	17
5.2 Vetytalouden ja teollisuuden yhtymäkohdat .....	17
5.3 Vienti ja hiilikädenjälki .....	19
6 Johtopäätökset .....	20
7 Lähteet .....	21

# 1 Johdanto

Maailman laajuinen ilmastokriisi muuttaa tällä hetkellä paitsi maapallon ekosysteemeitä, myös yhteiskuntien tapoja toimia. EU:n tavoite on vähentää kasvihuonepäästöjä 55 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Ilmastoneutraalius on tavoitteena saavuttaa vuoteen 2050 mennessä. Suomen osalta ilmastotavoitteet ovat vieläkin kunnianhimoisemmat, sillä Sannan Marinin hallitusohjelmassa (2019) on asetettu tavoite, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Kesäkuussa 2022 Valtioneuvosto lähetti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian selontekona eduskuntaan. Strategia edustaa keskipitkän aikavälin toimintaohjelmaa EU:n velvoitteiden ja Suomen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi.

Vaikka monia ilmastoneutraaleja ratkaisuja on olemassa, liittyy laajamittaiseen energiamurrokseen ja esimerkiksi teollisuussektorin päästöjen vähentämiseen monenlaisia haasteita. Tässä kandidaatintyössä perehdytään siihen, mitä näiden päästövähennysten saavuttaminen tarkoittaa teollisuudessa. Koska energiankäytöllä on erityisen keskeinen merkitys päästövaikutuksissa, tässä työssä keskitytään erityisesti teollisuuden energiankäyttöön ja siinä tapahtuviin muutoksiin. Tutkimuskysymyksiä ovat esimerkiksi: Millaisia ovat teollisuuden puhtaat energiaratkaisut? Miten teollisuus tukee muuta energiajärjestelmää?

Päästöjen vähentämisessä teollisuussektori erottuu paitsi päästöosuutensa, myös tähän mennessä vaatimattomien päästövähennystensä myötä. Suurimmat hiilidioksidipäästöt Suomen teollisuudessa syntyvät hiiliteräksen valmistuksesta ja fossiilisen öljyn jalostuksesta (Huttunen & kump, 2022). Valtioneuvoston vuonna 2021 tekemän selvityksen (Koljonen & kump, 2021) mukaan metallien ja mineraaliöljyn (mukaan lukien vedyn valmistus) sekä sementin valmistus muodostavat yhteensä 70 % teollisuuden päästöistä. Selvityksen mukaan metsäteollisuuden osuus päästöistä on alle 10 %. Lukua tarkasteltaessa on kuitenkin syytä huomioida metsäteollisuuden vaikutus maankäytön nettonieluihin. (Koljonen & kump, 2021)

Teollisuuden prosesseissa tapahtuvat muutokset ovat tyypillisesti hitaita, ja uusien teknologioiden kaupallistamiseen ja laajamittaiseen käyttöönottoon liittyy huomattavasti epävarmuutta (Huttunen & kump, 2022). Teollisuussektorilla on kuitenkin herätty muutostarpeeseen, ja uutta teknologiaa on kehitteillä. Esimerkiksi Oilon Oy:n valmistamat teollisuuslämpöpumput ovat vuodesta 2018 alkaen pystyneet tuottamaan 120-asteista vettä, kun vuonna 2006 yrityksen teollisuuslämpöpumput pystyivät tuottamaan vain 67-asteista vettä (Rämet, 2021). Kehitys mahdollistaa uusia sovelluskohteita teollisuuden prosesseissa ja kasvattaa niiden hyödynnyspotentiaalia. Jotta tulevaisuudessa voidaan säilyttää teollisuuden kilpailukyky ja tehostaa teollisuuden prosesseja, on yhä tärkeämpää pystyä hyödyntämään sekä hukkaenergia että -materiaalit. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Tässä kandidaatintyössä Suomen teollisuuteen ja sen energiankäyttöön liittyvä tarkastelu keskittyy nykyhetkeen ja tulevaisuuteen. Kyseessä on kirjallisuuskatsaus, jonka aineistona on käytetty sähköistymiseen ja teollisuuden energiaratkaisuihin liittyviä julkaisuja, artikkeleita ja opinnäytetöitä, sekä toimialakohtaisia ja kansallisia tiekarttoja ja suunnitelmia. Teollisuuden energiankäyttöä kuvataan Tilastokeskuksen tilastoihin perustuvien lukujen avulla. Teollisuuskentän moninaisuus ja lukuisat huomioon otettavat näkökulmat tarjoavat kirjallisuuskatsauksen laatijalle vyyhdin, jonka tunnuspiirteitä on kiinnostavaa lähteä selvittämään.

## 2 Teollisuuden energiankäyttö murroksessa

### 2.1 Muutoksen mittaluokka

Suomen ilmastopaneelin raportin (Lund & kump, 2021) mukaan teollisuus käyttää lähes puolet sekä primäärienergiasta että sähköstä. Teollisuuden energiankäytöllä ja prosessien sähköistämällä on täten keskeinen merkitys hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä ja energiansäästö tavoitteiden saavuttamisessa (Lund & kump, 2021). Hiilineutraaliustavoitteiden saavuttaminen edellyttää ennen kaikkea puhtaisiin energialähteisiin siirtymistä sekä uudenlaista energiankäytön ja kulutuksen hallintaa.

Teollisuuden energiankäyttö Suomessa vuonna 2020 oli Tilastokeskuksen mukaan 138 TWh (Tilastokeskus, 2022a). Kun huomioi, että energian loppukäyttö Suomessa vuonna 2020 oli 288 TWh (Tilastokeskus, 2022b), on helppo huomata, että teollisuudessa kuluu valtava määrä energiaa. Teollisuuden energiankäytöstä 68 % oli polttoaineita, 21 % sähköä ja 11 % lämpöä. Tässä yhteydessä lämpö tarkoittaa kaukolämmön ja teollisuusprosesseissa käytetyn lämmön tai höyryn netto-ostoja eli ulkopuolelta omaan käyttöön hankittua lämpöä. Teollisuudenaloittain tutkittuna metsäteollisuus käytti energiasta 59 %, kemianteollisuus 17 % ja metallien jalostus 13 %. (Tilastokeskus, 2022a). Kyseisillä teollisuuden aloilla on mahdollista saada aikaan suuria päästövähennyksiä, vaikka onkin hyvä muistaa, että esimerkiksi metsäteollisuudessa käytetään jo nykyisin paljon uusiutuvia energialähteitä.

Valtioneuvoston selvityksessä (Koljonen & kump, 2021) esitettyjen WEM-skenaarioiden (With Existing Measures) mukaisesti kaikilla teollisuussektoreilla tuotannon volyymin odotetaan kasvavan, mikä luonnollisesti kasvattaa myös ns. päästökulua. Lievää laskevaa trendiä tuotantomäärissä oli nähtävissä ainoastaan mineraaliöljyn jalostuksessa. Teollisuuden muutokset ovat tyypillisesti myös hitaita. Toivanen & kump. muistuttaa ekohyvintivaltion teollista murrosta koskevassa artikkelissaan, että yksikään teollisuudenala ei pyri tiekartassaan hiilineutraaliuteen muun Suomen tavoin vuoteen 2035 mennessä vaan vasta useita vuosia myöhemmin. Jotta hiilineutraaliustavoitteeseen on mahdollista päästä, tulee teollisuuden päästöjä kompensoida metsien hiilinieluilla ja vielä kehitteillä olevien hiilen talteenottoteknologioiden avulla. (Toivanen & kump, 2021)

Energiansäästö tavoitteet voivat olla osittain ristiriidassa hiilineutraaliuden mahdollistavien ratkaisuiden kanssa, sillä esimerkiksi monet sähköistämiskäytöt vaativat runsaasti sähköä. EU komissio antoi keväällä 2022 tiedonannon REPowerEU-suunnitelmasta, jossa komissio esittää, että energiatehokkuusdirektiivin vuoden 2030 EU-tason energiankulutuksen vähentämisen tavoite kiristettäisiin 55-valmiuspaketissa ehdotetusta -9 prosentista -13 prosenttiin. Energiankulutuksen tavoitteen kiristäminen tarkoittaisi, että energian loppukäyttö Suomessa vuonna 2030 olisi enintään 239 TWh. (Komission tiedonanto, REPowerEU-suunnitelma, 2022). Vuonna 2020 energian loppukäyttö Suomessa oli 288 TWh (Tilastokeskus, 2022b). Uudistuvasta energijärjestelmästä puhuttaessa usein esiin nousee myös termi sektori-integraatio, eli uudenlainen yhteistoiminta ja pyrkimys hyödyntää eri sektoreiden (sähkön- ja lämmöntuotanto, liikenne, teollisuus) ominaisuuksia ja tarpeita.

Tulevaisuudessa sähkön tarve yhteiskunnassa tulee kasvamaan, ja kehityksestä on olemassa erilaisia arvioita. Sitran raportissa arvioidaan, että sähkön tuotanto ja kysyntä

vuonna 2050 olisi noin 160-180 TWh (Roques & kump, 2021). Afryn vähähiiliskenaariossa puolestaan arvioidaan, että sähkön kulutus Suomessa kasvaa vuoteen 2050 mennessä 135 TWh:iin. Tämä tarkoittaisi lähes 50 TWh kasvua vertailuvuodesta 2017, jolloin sähkön kulutus oli 86 TWh. (Finnish Energy – Low carbon roadmap, 2020) Tästä kasvusta noin 80 % ennustetaan aiheutuvan teollisuuden energiankulutuksen muutoksista. Eniten hiilineutraalin sähkön tarve kasvaa teknologia- ja kemianteollisuudessa. Teollisuuden aloista eniten energiaa käyttävässä metsäteollisuudessa sähkön tarpeen ei sen sijaan ennusteta kasvavan. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Teollisuudessa tarvitaan jatkossa suuria investointeja muutosten mahdollistamiseksi. Ministeriön toimialojen vähähiilitiekarttoja koskevassa yhteenvedossa todetaan, että isojen ventialojen tiekartoissa investoinnit koskevat erityisesti uusien teknologioiden käyttöönottoa (esimerkiksi vähähiiliset tuotantoprosessit, power-to-x ja CCU/ CCS), energia- ja materiaalihokkuusparannuksia, TKI-panostuksia (tutkimus-, kehittämis- ja innovaatio), tuotevalinnan laajentamista sekä biopohjaisten raaka-aineiden tarjontaa. (Paloneva & Takamäki, 2020)

## 2.2 Poliittiset toimet teollisuuden tukena

Motivan selvityksessä (Turunen ja Jääskeläinen, 2021) listataan poliittisia toimia, joilla valtio pyrkii edistämään teollisuuden murrosta. Uudistukset yhdessä päästökaupan kanssa ovat johdonmukaisia toimia kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa ja kiertotaloutta. Suomen hallitusohjelmaan kirjattujen toimenpiteiden mukaisesti koko energiatukijärjestelmää kehitetään siten, että painopistettä siirretään tuotantotuista kohti uuden energiateknologian investointi- ja demonstraatiotukia (Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta, 2019).

Vuonna 2022 astui voimaan suotuista verouudistus koskien teollisuuden sähköveroa. Kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat lämpöpumput ja sähkökattilat sekä muut vähintään 0,5 MW lämpötehoiset lämpöpumput tai lämpöpumppujen muodostama toiminnallinen kokonaisuus ovat olleet heinäkuun 2022 alusta lähtien oikeutettuja alempaan veroluokan II sähköveroon. Vuoden 2022 alusta alkaen myös konesalit, joiden palvelinlaitteiden teho on vähintään 0,5 MW ja jotka täyttävät laissa säädetyt energian hyödyntämis- tai energiatehokkuuskriteerit, ovat oikeutettuja konesalien veroluokan II sähköveroon. (Sähkövero, 2022). Muutos on merkittävä, sillä veroluokassa I energiavero oli 2,24 snt/kWh, kun veroluokassa II se on enää 0,05 snt/kWh (Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot, 2022).

Energian varastoinnin kannalta keskeinen toimi on luopua kaksinkertaisesta verotuksesta sähkön varastoinnissa. Sähkökemiallisten varastojen osalta verollisesta varastoinnista luovuttiin vuoden 2019 verouudistuksen yhteydessä (Hallituksen esitys HE 191/2018 vp, 2018), mutta esimerkiksi pumppuvoimalaitosten ja power-to-gas laitosten osalta verotusjärjestelmä on vielä vanhanaikainen.

Vuonna 2022 otettiin käyttöön sähköistämistuki energiaintensiiviselle teollisuudelle. Tuen tavoitteena on paitsi ehkäistä hiilivuotoriskiä, myös turvata teollisuuden kustannuskilpailukykyä ja ohjata toiminnanharjoittajia kehittämään teollista tuotantoaan hiilineut-

raalimmaksi. Työ- ja elinkeinoministeriön tiedotteen mukaan sähköistämistukeen oikeutettuja yrityksiä arvioidaan olevan Suomessa hieman yli 30 ja laitoksia noin 70. (Energiaintensiivisen teollisuuden toimijat voivat hakea sähköistämistukea 2022–2026, 2022). Julkisen talouden suunnitelmassa vuosille 2023–2026 sähköistämistuelle on tarkoitus varata 150 miljoonaa euroa vuodessa (Lakiesitys energiaintensiivisen teollisuuden sähköistämistuesta eduskuntaan, 2022).

Energiaintensiivisen teollisuuden veronpalautusten poistaminen on yksi keino vähentää ilmastotavoitteiden kannalta ristiriitaisia tukia. Energiaveron palautusten myötä yritykset ovat saaneet veronpalautuksia 50 000 euron ylittävältä energiaverosuudelta, mikäli niiden määrä on ylittänyt 0,5 % yrityksen jalostusarvosta. (Energiaintensiivisen yrityksen valmisteverojen palautus, 2022). Verotus on suosinut isoja energialaitoksia ja vähentänyt tarvetta etsiä vähähiilisiä ratkaisuja. Teollisuuden energiaveron palautusjärjestelmää uudistetaan asteittain vuosien 2020 ja 2024 välillä. Vuoden 2025 valmisteveroista ei voida enää saada energiaintensiivisen yrityksen veronpalautusta.

Teollisuutta ohjaavat markkinavoimat ovat mahdollisuus isoille ja kestäville muutoksille. Teollisuuden murrosta ekohyvinvointivaltiossa käsittelevässä artikkelissa (Toivanen & kump, 2021) todetaan, että viime vuosina on saatu merkkejä siitä, miten teollisuus näkee, että sen etuna on olla mukana kestävyysmurroksen toteuttamisessa; esimerkiksi elinkeinoelämän kattojärjestö Elinkeinoelämän Keskusliitto on ilmastokannoissaan ja -tavoitteissaan kunnianhimoinen ja varsin perusteellinen. Ilmiö on tervetullut. Teollisuudessa tapahtuva muutos vaatii kuitenkin myös valtiotason toimia. Toivanen tiivistää artikkelissaan ajatuksen vihreästä teollisuuspolitiikasta: keskeistä on valtion ja teollisuuden yhteispeli, jossa valtioiden tehtävänä on tukea teollisuuden uudistumista ja vihreää kasvua esimerkiksi TKI-rahoituksella, mutta kuitenkin aina niin, että uuden taloudellisen toiminnan synnyttämisessä nojataan markkinakilpailuun (Toivanen & kump, 2021).

### **2.3 Energiamurroksen keskeisiä suuntaviivoja**

Teollisuudessa tulevien vuosien tavoitteena on löytää ja kehittää fossiilisista polttoaineista riippumattomia tuotantotapoja. Monissa selvityksissä erityisesti esiin nousevat monistettavat teollisuuden sähköistämisen ja hukkalämmön hyödyntämiseen perustuvat ratkaisut. Suurta kehityspotentiaalia liittyy ratkaisuihin, jotka koskevat sähkökattiloita ja prosessien lämmitysratkaisujen toteuttamista sähköä avulla, kuivausprosesseja, lämpökäsittelyyuuneja, prosessivesien ja kemikaalien lämmitystä, lämpöpumppuja, ORC-tekniikkaa, MVR-teknologioita sekä työkonien sähkömoottoreita. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Tähän asti teollisuudessa on käytetty hiiltä sekä polttoaineena että raaka-aineena. Valtioneuvoston päästövähennyksien vaikutusarvioita koskevassa selvityksessä todetaan, että hiilen osalta käyttö tulee supistumaan olemattomiin kaikilla muilla sektoreilla paitsi prosessiteollisuudessa. Turpeen ja kivihiilen käyttöä tullaan korvaamaan puupolttoaineilla. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen tulee kasvattamaan puupolttoaineiden kysyntää, mikä voi heijastella yhdyskuntien sähköä ja lämmön tuotantoon, metsäteollisuuteen ja biojalostamoihin. (Koljonen & kump, 2021)

Betoniteollisuudessa on reagoitu sementin tuotannon valtaviin päästöihin korvaamalla sementin seosaineena käytettävää kalkkikiveä metalliteollisuuden masuunikuonilla. Suomessa myös valtion teknologian tutkimuskeskus (VTT) on kehittänyt uusia teknologioita puhtaamman betonin tuottamiseksi. Uusia teknologioita tarvitaan, sillä tulevaisuudessa terästuotannon puhdistuessa voi masuunikuonan saatavuus laskea, kun terästuotannon masuunit suljetaan.

Muiden tahojen ohella Sitra on listannut lisää tehokkaita toimia teollisuuden päästöjen vähentämiseksi. Edellä mainittujen lisäksi näitä ovat korvaavien menetelmien kehittäminen typpihapon valmistuksen prosesseihin ja elektroniikkateollisuuden prosesseihin (Hokkanen & kump, 2015). Lannoitteiden valmistuksessa käytettävän typpihapon tuotantoprosesseja on muutettava niin, ettei niistä synny yhtä suuria määriä kasvihuonekaasupäästöjä, esimerkiksi dityppioksidin osalta. Sähkö- ja elektroniikkateollisuus puolestaan on merkittävä halogenoitujen hiilivetyjen, kuten rikkiheksafluoridin, HFC:n ja PFC:n lähde. Näiden kasvihuonekaasujen käyttöä tulee vähentää.

## 2.4 Polttoaineet ja työkoneet

Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2020 teollisuudessa käytettiin 94 TWh edestä polttoaineita, ja määrästä noin 37 % oli fossiilisia polttoaineita. Hiiltä käytettiin noin 10 TWh edestä. (Tilastokeskus, 2022a). Merkittävä osa hiilen kulutuksesta syntyy terästeollisuudessa. Terästeollisuuden tuotantoprosesseja voidaan kuitenkin kehittää vähähiilisempään suuntaan vetytelkistysratkaisuiden myötä. Turpeen osuus oli 1,8 TWh, öljyn 14 TWh ja maakaasun 9,2 TWh. (Tilastokeskus, 2022a). Motivan selvityksen mukaan turvetta korvataan puupohjaisilla polttoaineilla, ja öljyn ja maakaasun polttoaineosuutta synteettisillä polttoaineilla (Turunen ja Jääskeläinen, 2021).

Fossiilisia polttoaineita on mahdollista korvata puupohjaisten polttoaineiden ja sähköistämiskorvausten lisäksi esimerkiksi orgaanisesta aineksesta valmistetulla biokaasulla tai synteettisillä polttoaineilla. Synteettiset polttoaineet on valmistettu keinotekoisesti esimerkiksi vedystä ja hiilidioksidista. Tavoitteena niiden valmistuksessa on, että tarvittava hiilidioksidi otetaan talteen esimerkiksi jätteenpolttolaitoksen savukaasuvirroista, ja käytetty vety tuotetaan uusiutuviin energialähteisiin perustuvalla sähköllä.

Synteettisten polttoaineiden osalta on huomioitava, että niiden tuottaminen kuluttaa runsaasti sähköä. Uusiutuvaan energialähteisiin perustuvalla sähköllä on jo muutenkin kovasti kysyntää, joten sen saatavuus voi muodostua ongelmaksi. 2020-luvun alun Suomessa Motivan selvityksessä arvioitiin, että mikäli öljyn ja maakaasun käyttöä polttoaineena yritettäisiin täysin korvata synteettisillä polttoaineilla, kuluisi niiden valmistukseen vuosittain jopa 60 TWh sähköä (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Tämä vastaa suuruusluokaltaan noin kahta kolmasosaa Suomen tämänhetkisestä sähkön vuosikulutuksesta. Synteettisten polttoaineiden kokonaishyötysuhde on tyypillisesti suoraa sähkökäyttöä huonompi, jääden parhaimmillaankin alle 50 prosentin. Niinpä aina mahdollisuuksien mukaan synteettisten polttoaineiden sijaan on syytä tarkastella mahdollisuudet esimerkiksi sähkökattilan tai -uunin käytölle. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Huonosta hyötysuhteestaan huolimatta sähkön avulla tuotetuilla polttoaineilla on korvaamattomia käyttökohteita esimerkiksi teollisuuden korkean lämpötilan prosesseissa (Lund & kump, 2021).

Päästövähennystavoitteet koskevat myös teollisuudessa käytettäviä työkoneita. Motivan mukaan polttoainekäyttöisissä työkoneissa kehityssuunta on sähkökäyttöisiin laitteisiin, mikä on suuri mahdollisuus etenkin kaivosteollisuudessa. Työkoneiden sähköistäminen vähentää pienhiukkaspäästöjä, mistä seuraa terveyshyötyjä. Pienhiukkaspäästöjen vähentyminen on merkittävä hyöty etenkin maanalaisissa työolosuhteissa, ja tulee näkymään esimerkiksi vähentyvänä ilmanvaihdon tarpeena. Maanalaisten työkoneiden lisäksi muita mahdollisuuksia ovat valmistavassa teollisuudessa käytössä olevien työkoneiden (esim. trukit) sähköistäminen, sekä erilaiset sähköhissiratkaisut mahdollisuutena korvata ns. dumppereita. Sähkötrukkien avulla korvataan kaasukäyttöisiä trukkeja. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

## 3 Teollisuuden sähköistyminen

### 3.1 Sähköistymisen keinoja teollisuudessa

Suuresta vesivoiman määrästä ja energiantensiivisestä teollisuudesta johtuen sähkön merkitys on perinteisesti ollut tärkeä Pohjoismaissa (Lund & kump, 2021). Suomen teollisuus käyttää nykyisellään merkittävän määrän sähköä. Vuonna 2020 teollisuuden sähkön käyttö oli 37 TWh (Tilastokeskus, 2022c).

Teollisuudessa sähköä kuluu esimerkiksi koneiden pyörittämiseen, puhallukseen ja pumppaukseen sekä lämmitys- ja kuumennusprosesseihin. Työ- ja elinkeinoministeriön selonteon mukaisesti sähköistämisen tekniset ratkaisut voidaan jakaa suoraan tai epäsuoraan sähköistykseen. Suora sähköistäminen tarkoittaa sähkön hyödyntämistä esimerkiksi sähkövastuksien, sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen avulla, kun taas epäsuoralla sähköistämällä viitataan sähköllä valmistetun raaka- tai polttoaineen, kuten vedyn tai sähköpolttoaineiden, hyödyntämiseen. (Huttunen & kump, 2022)

Teollisuuden prosessien sähköistäminen sisältää laajan kirjon erilaisia ratkaisuja. Suomen ilmastopaneelin julkaisussa *Sähköllä merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisessa* esitellään niistä neljä. Yksi mahdollisuus on vaihtaa polttoaine uusiutuvista lähteistä peräisin olevaan, esimerkiksi vetyphjaiseen, sähköpolttoaineeseen. Toinen mahdollisuus on fossiililla polttoaineella prosessihöyryä tuottavan kattilan vaihtaminen lämpöpumppuihin perustuvaan prosessihöyryn tuotantoon. Kolmannen ratkaisun mukaan prosessiin tuodaan lämpö uusiutuvalla sähköllä (vastuksella, induktiolla, mikroaalloilla, infrapunalla tms.) muuttamatta itse prosessia. Neljäs ratkaisu on vaihtaa yksikköprosessi kokonaan sähkökäyttöiseen. Tämä voisi joissain tapauksissa onnistua esimerkiksi vaihtamalla haihduttaminen mekaaniseen erotukseen. (Lund & kump, 2021)

Laajasta teollisuuden prosessien kirjosta löytyy erilaisia polttoaineita käytäviä prosesseja, joihin suora sähköistäminen on mahdollista toteuttaa. Motivan (Turunen ja Jääskeläinen, 2021) toteuttamien haastattelujen perusteella näitä ovat mm.

- Prosessiveden ja -kemikaalien lämmitys
- Kuivaus- ja lämpökäsittelyprosessit, joissa on käytössä maakaasu tai polttoöljy
- Muut lämpöä käyttävät erotusprosessit
- Polttoainekäyttöiset työkoneet

Lämpökäsittelyprosesseja on käytössä laajasti esimerkiksi metalli- ja teknologiateollisuudessa, joissa osa prosesseista toteutetaan edelleen kaasun tai öljyn avulla. Myös lukuisat teollisuuden uunit lämpiävät edelleen kaasulla, ja olisivat sähköistettävissä. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021) Tullakseen skaalatuksi ison mittaluokan käyttöön, monet olemassa olevista sähkölämmitystekniikoista vaativat esimerkiksi runsaasti lisää uusiutuvan sähkön tuotantoa, elektrolyysi-infraa tai jakelumenetelmien ja -tapojen suunnittelua. Toisaalta moniin prosesseihin voitaisiin käyttää useita erilaisia sähköisiä lämmitystekniikoita ja soveltamistapoja. (Lund & kump, 2021)

Sähkökattilat tulevat todennäköisesti tulevaisuudessa näyttelemään isompaa roolia teollisuuden lämmön- ja höyryn tuotannossa. Yleistymisen voi tapahtua muiden tuotantomuotojen rinnalla. Sähkökattilat tarjoavat mahdollisuuksia halvan sähkön hyödyntämiseen, ja erityisen kannattavaa niiden käyttö on esimerkiksi silloin, kun tuulivoimasta on ylituotantoa. Sähkön hinnalla ja hinnan kehityksellä tulevaisuudessa on suuri vaikutus sähkökattiloiden kannattavuuteen. Sähkökattilan käyttöä puoltavat maltilliset investointikustannukset, minkä lisäksi sähkökattilan toiminta vastaa muiden kattiloiden toimintaa ilman savukaasuhäviöitä. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

### 3.2 Teollisuuden alojen tunnuspiirteitä

Ilmastopaneelin sähköistämistä käsittelevässä raportissa nimetään Suomen osalta potentiaalisimmat sähköistymistä soveltavat teollisuudenalat; rauta- ja terästeollisuus, sementin, mineraalien ja tiilien valmistus, sellu- ja paperiteollisuus, kemianteollisuus sekä muoviteollisuus (Lund & kump, 2021). Oheiseen taulukkoon on koottu toimialojen energiamurroksen tunnuspiirteitä perustuen Tilastokeskuksen tilastoihin (Tilastokeskus, 2022a) sekä Motivan tekemään selvitykseen (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Päästötön tuotanto on myös markkinaetu, mikä voi osaltaan kannustaa uusien teknologioiden käyttöönottoon.

Taulukko 1. Eri teollisuuden alojen tunnuspiirteitä.

Teollisuuden ala	Energiankäyttö (TWh)	Fossiilisten polttoainesten osuus (%)	Energiamurrokseen liittyvät mahdollisuudet	Energiamurrokseen liittyvät haasteet
Metsäteollisuus	81,1	10	- MVR-tekniikan hyödyntäminen sellutehtailla - Sähköllä toimivat kuivatusratkaisut paperi-, kartonki ja päällystyskoneiden jälkikäsitteilyosalla	- Sellunkeiton ja kartongin kuivauksen korkeat lämpötilat (yli 150 °C).
Kemianteollisuus	23,7	48	- Sähköistäminen tuttua esim. epäorgaanisen kemian murskaamista ja jauhamista koskevien prosessien osalta - Matalamman lämpötilan prosessien sekä yksittäisten tuotantoprosessien sähköistäminen esim. lämpöpumppuratkaisulla - Hukkalämpöjen kierrättäminen eri prosessien välillä vaihtelevien lämpötilavaatimusten myötä	- 400–1000 °C lämpötiloja vaativien prosessien sähköistäminen (teknisesti hankalaa, kalliit investoinnit)
Teknologiateollisuus (Kone- ja metallituoteteollisuus, elektroniikka- ja sähköteollisuus, metallien jalostus)	22,9	54	- Metallinjalostuksen prosessien kehitys esim. biohiileen ja vetyyn pohjautuvaksi - Sähköistämiskäytös esim. terästeollisuudessa ja kuivausilman lämmittämisessä - Matalamman lämmön hukkalämpö teollisuuskäyttöön poistoilmoista tai savukaasuista	- Liian korkeat lämpötilat lämpöpumpuille - Valtavat hukkalämmön määrät esim. terästeollisuudessa (ei välttämättä pystyttyä hyödyntämään)
Elintarviketeollisuus	4,6	18	- Prosessien esilämmitysvaiheen sähköistäminen - Maakaasu-uunien korvaaminen sähköuuneilla - Lämpöpumput kylmän tuotannossa - Hukkalämmön lähteitä esim. kypsyysprosesit, pöytärointi, pesuvesien lämmitys	- Uusien teknologioiden oltava varmatoimisia ja tuotantoprosesseja haittaamattomia

Yksi esimerkki metsäteollisuudessa tehdystä investoinnista löytyy Janakkalasta. Vuonna 2021 työ- ja elinkeinoministeriö myönsi Tervakoski Oy:n paperitehtaalle 5 159 000 euroa lämpöpumppuinvestointiin. Hankkeessa otetaan lämpöä talteen paperitehtaan eri prosesseista ja talteen otetusta lämmöstä tuotetaan uuden lämpöpumpputeknologian avulla paineistettua prosessihöyryä tehtaan käyttöön. Erityisen merkittävän hankkeesta tekee se, että ratkaisu on skaalattavissa ja sovellettavissa moniin höyryä käyttäviin laitoksiin Suomessa ja globaalisti. Käyttökohteita on esimerkiksi kemianteollisuudessa ja metsäteollisuudessa. (Liite TEM-tiedotteeseen 20.12.2021, 2021)

### 3.3 Sähköistymisen mahdollisuuksia ja haasteita

Sähköistäminen tuo mukanaan useita mahdollisuuksia ja hyötyjä verrattuna polttoon perustuviin menetelmiin. Niitä ovat Motivan (Turunen ja Jääskeläinen, 2021) ja Suomen ilmastopaneelin (Lund & kump, 2021) julkaisuiden mukaisesti esimerkiksi:

- Parempi hyötysuhde
- Mahdollisuus prosessien tarkempaan ohjaukseen ja joustavuuteen
- Alenevat laitteiston käyttö- ja huoltokustannukset
- Integroimismahdollisuudet teollisuuden ja energiajärjestelmien kanssa
- Verkkotuen ja oheispalvelujen tarjoaminen

Verrattuna polttoprosesseihin, merkittävä sähkömoottorien ja sähköön perustuvien lämmitysratkaisujen etu on tuotannon parempi hyötysuhde. Kun polttavia ratkaisuja korvataan sähköisillä, päästään eroon savukaasuhäviöistä, mikä osaltaan lisää energiatehokkuutta. Tämän lisäksi sähköisten prosessien ohjaaminen voi onnistua hyvinkin tarkasti verrattuna polttoprosesseihin. Toiseksi sähköisten järjestelmien myötä laitteiston käyttö- ja huoltokustannukset voivat laskea, kuten esimerkiksi korvattaessa kaasukäyttöisiä järjestelmiä sähkölämmitteisellä ilmakeivainteknologialla. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Sähköistämisen kolmas merkittävä hyöty koskee sen lukuisia integroimismahdollisuuksia teollisuuden tai energiajärjestelmien kanssa. Tämä lisää joustavuutta sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmään. Lisäksi teollisuuden sähköistämisen hyödyiksi luetaan myös verkkotuen ja oheispalvelujen tarjoaminen. Kokonaisuudessaan yhä enemmän kotimaiseen uusiutuvaan energiaan nojaava teollisuus parantaa huoltovarmuutta. (Lund & kump, 2021)

Sähköistyminen tuo mukanaan myös monia haasteita ja riskejä. Niitä ovat Motivan (Turunen ja Jääskeläinen, 2021) ja Suomen ilmastopaneelin (Lund & kump, 2021) julkaisuiden mukaisesti esimerkiksi:

- Sähköinfran kapasiteetti
- Vaadittavien investointien suuruus
- Kriittisten mineraalien, metallien sekä teknologisten komponenttien saatavuus
- Riippuvuus sähköverkkojen toiminnasta
- Laitekannan kasvu

Yhtenä sähköistymisen haasteena nähdään sähköinfran mahdolliset kapasiteettirajoitteet ja uuden infran vaatimat investoinnit. Sähköverkkoa koskevien investointien lisäksi tarvitaan laitosten investointeja esimerkiksi lämpöpumppuihin, lämpö/kylmävaraajiin ja

hyötylämpöverkkoihin (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Osaltaan uusi teknologia ja siirtoverkostot lisäävät kriittisten mineraalien ja metallien sekä teknologisten komponenttien tarvetta, jolloin niiden saatavuus ja kauppaketjut voivat muodostua ongelmaksi. Sähköön nojaava teollisuus on myös riippuvainen monikansallisten sähköverkkojen toiminnasta. (Lund & kump, 2021)

Laitosten sisäinen energiankäytön hallinta muuttuu uusien teknologioiden myötä. Sähköistyminen voi lisätä teollisuuslaitosten laitoskantaa, ja sähköiset järjestelmät voivat olla päällekkäisiä jo olemassa olevien järjestelmien kanssa. Prosessien mittaamisen ja seurannan rooli nousee yhä keskeisemmäksi, ja vaatii mahdollisesti ylätason säätöjen toteuttamista kohteeseen. Prosesseja joudutaan suunnittelemaan uudestaan ja ne voivat laajentua ja monimutkaistua, jolloin kokonaisuuden hallinta on aiempaa haastavampaa. Vaikka älykäs ohjaus mahdollistaa erilaisten kulutusjoustonratkaisujen käyttämisen, tämä ei aina vaikuta energiatehokkuuteen positiivisesti. Energiatehokkuus voi kärsiä esimerkiksi tilanteessa, jossa lämpö tai -kylmäakun lataaminen on energiakustannusmielessä kannattavaa, mutta heikentää kokonaisuuden energiatehokkuutta. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Sähkön hinta on yksi sähköistämiskäytöiden yleistymiseen vaikuttavista tekijöistä. Osaltaan sähkön verotuksen madaltamisella on mahdollista kannustaa sähköistämiskäytöiden käyttöön. Sähkön hinnan tulee olla teollisuuslaitosten näkökulmasta kilpailukykyinen muihin energialähteisiin verrattuna. Jos sähkömarkkinat eivät ole yhteiset, vaikuttaa kotimaisen sähkön hinta myös yritysten kilpailukykyyn kansainvälisillä markkinoilla, sillä energiakustannukset vaikuttavat tuotantokustannuksiin. Sähköistyminen edellyttää myös, että investointeja pystytään toteuttamaan. Motivan selvityksessä nostetaan yhdeksi mahdolliseksi kehitysalueeksi erilaisten ESCO-palvelumallien kehitys, joissa investointi maksetaan saavutetulla hyödyllä (Saarivirta, 2022).

### **3.4 Sähkön kasvava kysyntä**

Sähköistäminen ja muut teollisen tuotannon kehityssuunnat tulevat vaatimaan merkittävän määrän sähköä. Sitran selvityksessä arvioidaan, että sähkönkulutus tulee kaksinkertaistumaan nykyisestä 2050-luvulle mentäessä (Roques & kump, 2021). Kasvavaan hiili-neutraalin sähkönkulutukseen vastataan Suomessa ennen kaikkea moninkertaistamalla tuulivoimantuotanto. Siinä missä tuulivoiman osuus vuoden 2020 sähköntuotannosta oli noin kymmenen prosentin luokkaa, arvioidaan Sitran skenaarioissa maatuulivoiman osuuden olevan jopa yli 70 prosenttia vuoden 2050 sähkön tuotannosta Suomessa. Lisäksi P2G2P:n (power-to-gas-to-power) ja akkukapasiteetin arvioidaan nousevan useisiin gigawatteihin.

Sähkön tarpeessa tulee huomioida myös vetytalouden kehitys. Vety voi energian varastojana vähentää biomassan ja akkujen tarvetta, mutta sen tuotanto lisää entisestään sähkönkulutusta.

Teknolomiteollisuuden osalta on odotettavissa merkittävää kasvua alan sähkön tarpeessa. Kasvu selittyy metalliteollisuudessa tapahtuvilla muutoksilla ja ICT-sektorin kasvulla (Soimakallio, 2020). Pelkästään SSAB:n tehtaalla Suomessa kulutuksen arvioidaan nousevan tulevaisuudessa 10–12 TWh:iin (Sipola, 2019).

Tekniikka ja talous -lehden julkaisussa esitetään suunnitelma 28 GW:n tuulivoimakapasiteetista vuoteen 2040 mennessä (Laatikainen, 2022). Vuoden 2021 tuulivoiman kokonaiskapasiteetti Suomessa oli 3,3 GW (Tuulivoima Suomessa 2021, 2022), joten kasvu on merkittävä. Suomen tuulivoimalat tuottivat vuonna 2021 sähköä 8,1 TWh (Tilastokeskus, 2022d). Tuulivoimaloiden tyypillinen huipunkäyttöaika on 2500–3000 tuntia (Apilisto, 2021). Mikäli arvioidaan tuulivoiman tuottavan 2500–3000 tunnin edestä sähköä vuosittain, tarkoittaisi 28 GW:n kapasiteetti 70–84 TWh tuulivoimaan perustuvaa sähköntuotantoa vuositasolla. Vastaavat tuotantomäärät eivät ole liioittelua, sillä nimenomaan tuulivoiman on ajateltu kattavan suurin osa sähköntuotannosta 2040-luvulta eteenpäin (Roques & kump, 2021).

Motivan selvityksessä todetaan, että Suomi on kiinnostava kohde uusille sähköintensiivisen teollisuuden investoinneille, mikä lisää datakeskusten ja Power-to-X-teollisuuden sähkönkulutusta (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Power-to-X prosessien yleistyessä Suomessa niitä koskeva sähköntarpeen kasvu voi olla huomattavaa. Mikäli Suomessa ryhdytään tuottamaan sähköpolttoaineita myös vientiin, sähkön tarve voi kasvaa jopa satoja terawattitunteja. Lappeenrannan yliopiston, Wärtsilän & St1:n julkaisussa arvioidaan, että P2X:n käyttöönottoon tarvitaan runsaat 200 TWh tuulivoimaa (Laaksonen, 2020). Suurimmat arviot sähkön kulutuksen kasvusta liittyvät täten sähköpolttoaineiden tuotantoon.

Myös kemianteollisuudessa fossiilisten raaka-aineiden korvaamiseen liittyvät sähkönkulutukset kasvattavat sähkönkysyntää. Kemianteollisuuden tiekartan ilmastoskenaarioissa arvioidaan tämän kasvun olevan nopean sähköistämisen skenaarion mukaan noin 5–10 TWh luokkaa vuosien 2020 ja 2035 välillä (Vasara & kump, 2020). Vuonna 2020 kemianteollisuuden sähkön kulutus oli 6,5 TWh (Tilastokeskus, 2022c).

Tulevaisuuden sään mukaan vaihtelevaan tuotantoon perustuva sähköjärjestelmä tuo mukanaan uusia haasteita, ja tarvitsee tuekseen luotettavia siirtoyhteyksiä Suomessa ja sen ulkopuolella sekä energianvarastointiin liittyviä ratkaisuja. Mikäli tuulivoima ei riitä kattamaan sähkön tarvetta tulevaisuudessa, tulee puuttuvaa tarjontaa korvata lisäämällä joustoa akkujen, tuontisähkön ja ydinvoiman avulla. Sähkön kuluttajapuolelle on tärkeää saada mahdollisimman paljon joustoa, sillä muuten sähkövarastojen ja niihin liittyvien varastointihäviöiden merkitys kasvaa valtavaksi. (Roques & kump, 2021). Yksi mahdollisuus tulevaisuudessa on yhdistää pienet modulaariset ydinreaktorit teollisuuslaitosten yhteyteen. Monilla teollisuuden aloilla tarvitaan useiden satojen asteiden lämpötiloja, ja erikoistutkija Ville Tulkin mukaan näiden prosessilämpöjen tuottaminen voisi olla mahdollista pienreaktoreiden avulla. (Koistinen, 2017). Tulevaisuuden energijärjestelmän haasteena on säilyttää energian hinta kohtuullisena uuden järjestelmän vaatimista investointikuluista ja ylläpitokuluista huolimatta.

## 4 Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntäminen

### 4.1 Hukkalämpöjen tarjoamat mahdollisuudet

Hukkalämpöä on tyypillisesti mahdollista ottaa talteen esimerkiksi jätevedestä, savukaasuista ja jäähdytysvedestä. Hukkalämpöä tarjoavat esimerkiksi voima- ja lämpölaitosten savukaasupesurit ja -lauhduttimet. (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019) Prosesseja, joissa voidaan hyödyntää lämmöntalteenottoa, ovat esimerkiksi kuivaus, keittäminen, jäähdytys, lämmitys ja suuria vesimääriä kuluttavat teolliset pe-  
suprosessit (Romppanen, 2022).

Teollisuusprosesseissa on usein mahdollista kierrättää energiaa prosessien eri vaiheiden välillä. Ylijäämälämpöä kannattaakin ensisijaisesti hyödyntää tuotantolaitoksen omissa prosesseissa. Jos hukkalämpöjä onnistutaan hyödyntämään laitoksen omissa prosesseissa, saadaan hukkalämmöistä yleensä pisin hyödyntämisaika ja paras ajallinen vaste. Muita vaihtoehtoja ovat ylijäämälämmön myyminen saman teollisuusalueen toimijalle tai paikakunnan kaukolämpöverkkoon. (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019). Hukkalämpöä voidaan hyödyntää myös tuotantolaitoksen omien tilojen lämmittämiseen.

Teollisuuteen on kehittynyt useita tapoja, joilla ylijäämälämpöä voidaan hyödyntää teollisuuslaitoksessa. Motivan selvityksessä (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019) tavat jaotellaan seuraavasti:

- Lämpöpumput
- Käyttö suoraan lämmityksessä
- Absorptiolaitteet (jäähdytin ja lämpöpumppu)
- ORC-laitos
- Kuivatus/höyrytys/esilämmitys
- Höyrykattila/Jätelämpökattila
- Palamisilman lämmitys
- Stirling-moottori

Hukkalämmöt on mahdollista kytkeä osaksi tuotantoprosessia esimerkiksi kytkentämuutoksiin, lämmönvaihtimen, lämpöpumpun, termokompressorin tai komprimoinnin avulla. On hyvä muistaa, että hukkalämpöä voidaan käyttää myös esim. yrityksen tarvitseman raaka-aineen tai polttoaineen kuivattamiseen, mikä voi osaltaan tehostaa prosessin myöhempiä vaiheita. (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019)

Valtioneuvoston eduskunnalle antaman selvityksen (Huttunen & kump, 2022) mukaan Suomessa arvioidaan syntyvän 130 TWh hukkalämpöä vuosittain. Vielä hyödynnettävissä olevan hukkalämmön potentiaalin arvioidaan olevan Suomessa noin 35 TWh, mikä vastaa lähes koko Suomen vuosittaista kaukolämmön tarvetta. Motivan selvityksessä arvioitiin teollisuuden osalta vuoden 2017 tekniseksi hukkalämmön potentiaaliksi noin 16 TWh (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019).

Yksi lupaava hukkalämpöjen lähde on Porvoon Kilpilahden teollisuusalue, jonka osalta on selvitetty hukkalämpöjen hyödyntämistä pääkaupunkiseudulla. Selvityksen mukaan

kasvihuonekaasujen vähenemä olisi noin 3–5 prosenttia Suomen kokonaispäästöistä. Kilpilahden lisäksi Suomessa on tunnistettavissa muita merkittäviä teollisuusalueen ja kaupungin mahdollista yhdistelmiä, joissa kytkentä teollisuuden ja kaukolämmön kanssa voisi olla mahdollinen. (Huttunen & kump, 2022)

## 4.2 Hukkalämmön talteenoton vaatimuksia

Jotta hukkalämmön hyödyntäminen on mahdollista, tulee tuotannon sopia ajallisesti käyttökohteen tarpeisiin. Koska lämmön varastointi on erittäin vaikeaa ja häviöineen kustannuksia vaativaa toimintaa (Romppanen, 2022), on tärkeää, että tuotanto ja kulutus vastaa toisiaan. Ajallisen sopivuuden lisäksi lämmönlähteen on täytettävä monia vaatimuksia: volyymien tulee olla riittävät, siirtoetäisyydet eivät saa kasvaa liian suuriksi, ja jos lämpö halutaan syöttää kaukolämpöverkkoon, se täytyy pystyä siirtämään halutussa paineessa ja lämpötilassa (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019).

Hukkalämpö voidaan jakaa matalalämpöiseen (alle 100 °C), keskitasoiseen (100–400 °C) ja korkealämpöiseen hukkalämpöön (yli 400 °C) (Onkalo, 2022). Metallinjalostuksessa ja kemianteollisuudessa suurin energiapotentiaali koskee yli 200 °C:n lämpöä, mutta metsäteollisuudessa alle 200 °C:n lämpöä (Myllymaa, 2019). Erityisesti matalalämpöisen hukkalämmön osalta mekaaniset lämpöpumput ovat tehokkain tapa lämmön hyödyntämisessä (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019).

Hukkalämmöt on mahdollista hyödyntää myös tuottamalla niistä sähköä. Korkealämpöiset hukkalämmöt voidaan muuttaa sähköksi esimerkiksi lämpösähköinen generaattorin (thermoelectric generator=TEG) avulla (Onkalo, 2022). Matalalämpöisen hukkalämmön osalta lupaavimmat menetelmät sähköntuotannossa ovat ORC ja tulevaisuudessa mahdollisesti myös termosähkögeneraattorit. Näiden teknologioiden heikkoutena on kuitenkin matala sähköntuotannon hyötysuhde. Matalalämpöisestä hukkalämmöstä hyötysuhde on tyypillisesti alle 10 %. (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019). Ratkaisuiden osalta on myös syytä tarkastella, onko saatava sähköteho riittävä. Teollisuuden matalalämpöisen hukkalämmön tarjonta on suuri (Turunen ja Jääskeläinen, 2021), mikä osaltaan kannustaa lämpöpumppuratkaisuiden käyttöön.

Korkean lämpötilan lämpöpumpuille on näkyvissä kasvavat markkinat. Tulevaisuuden pyritään kohti parempia hyötysuhteita ja korkeampia lämpötiloja mm. öljyttömillä kompressoreilla ja lämpötilaresistenteilla komponenteilla. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021). Uusien lämpöpumppujen avulla voidaan tuottaa yli 100 °C lämpöistä lämpöenergiaa kohtuullisella hyötysuhteella (COP-arvolla) (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019). Suomessa jo useilla lämpöpumpputoimittajilla (esim. Oilon Oy, Finess Energy Oy ja Calefa Oy) on korkean lämpötilan lämpöpumppuja valikoimissaan. Man Energy Solutions-yritys valmistaa suuren kokoluokan lämpöpumppuja (6–50 MW), joiden avulla päästään 150–160 °C:n lämpötiloihin. Motivan kirjallisuusselvitysten mukaan lämpöpumpputekniikkaa on testattu sovelluksissa, joissa on saavutettu jopa yli 200 °C asteen lämpötilatasot. Kohtalaisen hyvillä hyötysuhteilla päästään jo 120–130 °C tuotto- lämpötiloihin, tosin laitteiden hinnat ovat vielä korkeita, joten takaisinmaksuaika on edelleen pitkä. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

### 4.3 Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa

Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa on yksi keino puhdistaa kaukolämmöntuotantoa. Vuonna 2019 kaukolämmön tuotanto Suomessa oli 38,1 TWh, ja hukkalämpöjen osuus kaukolämmön kokonaistuotannosta oli 10 % (Sähkön ja lämmön tuotanto 2019, 2020). Tästäkin vain osa on peräisin teollisuudesta. Teollisuuslaitosten hukkalämpöjen hyödyntämistä kaukolämpöverkossa voi rajoittaa kaukolämpöverkon kapasiteetti tai päinvastaisesti liian pieni lämmöntuotantovolyymi.

Lämpöpumppujen avulla hyödynnettävien ylijäämä- ja hukkalämpöjen ylijäämä- ja hukkalämpöjen lisäpotentiaali on merkittävä (Huttunen & Kump, 2022). Motivan selvityksessä esittämän laskelman mukaan, jos vuoteen 2030 hukkalämmön osuus kaikesta kaukolämmöstä kasvaisi nykykehityksen mukaisesti 20 prosenttiin, tarkoittaisi tämä, että hukkalämpöjä hyödynnettäisiin 7,6 TWh edestä vuonna 2030. Teollisuuden osuus olisi tästä kolmanneksen, eli 2,1 TWh. Tämä tarkoittaisi noin 1 TWh kasvua teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämisen osalta verrattuna vuoteen 2019. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Kaukolämpöverkkoon menevä kiertoine on syötettävä oikeassa lämpötilassa ja paineessa. Normaalisti kaukolämpöveden tulovedenkierron tavoitelämpötilat vaihtelevat 70–120°C:een välillä. Kierrosta palaavan ja jäähtyneen veden lämpötila on noin 25–45 °C. (Romppanen, 2022). Tulo- ja paluuveden lämpötilaerolla on vaikutusta myös lämmönsiirron tehokkuuteen. Lämmönsiirto on riippuvainen lämpötilaerosta lämmittävän ja lämmitettävän nesteen välillä (Mäkelä ja Tuunanen, 2015).

Hukkalämpöjen hyödyntämisen kannalta voi olla hyödyllistä laskea kaukolämpöverkoston lämpötilaa. Lämpötilojen lasku verkossa on ekologinen ratkaisu, mikä osaltaan mahdollistaa siirtymisen pois fossiilisista polttoaineista (Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen, 2020). Matalat verkon lämpötilat pienentävät lämpöhäviöitä, mikä vaikuttaa suoraan lämmönsiirron hyötysuhteeseen. Laskemalla verkon menolämpötilatasoa myös lämpötilamuutokset pienenevät, mikä vähentää lämpölaajenemisesta aiheutuvaa mekaanista rasitusta kaukolämpöputkistoissa. Kaukolämpöverkon lämpötilatason alentamista voivat kuitenkin rajoittaa asiakaslaitteet tai verkon siirtokapasiteetti. (Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen, 2020)

Kaukolämpöverkon uudet lämpötilataso-ohjeistukset tulivat voimaan vuoden 2022 alusta. Energiategollisuus ry:n rakennusten kaukolämmityksen ohjeita ja määräyksiä koskevan K1/2021-dokumentin mukaan kaukolämmön tuloverkon mitoituslämpötila laskee 115 asteesta 90 asteeseen. Uudistus mahdollistaa lämmönlähteiden monipuolisemman hyödyntämisen sekä parantaa kaukolämpöverkon energiatehokkuutta. (Julkaisu K1/2021 Rakennusten kaukolämmitys, 2021)

Hukkalämpöjä ostavan yhtiön näkökulmasta voidaan sanoa, että ne ostavat hukkalämpöä, mikäli sitä on saatavilla marginaalipolttoaineilla tuotettua lämpöä halvempaan hintaan. Esimerkiksi Helen on julkaissut ostotariffin, jonka mukaan se ostaa yritysten ja kiinteistöjen ylimääräisiä lämpöjä. Kaksisuuntainen lämpökauppa on tarkoitettu Helenin kaukolämpöä käyttäville kiinteistöille, yrityksille ja asuintaloille. Mikäli kiinteistössä syntyvän hukkalämmön lämpötila on liian matala, tulee lämpötilaa nostaa kiinteistökohtaisella lämmöntuotantokalustolla, kuten lämpöpumppuilla. (Galkin-Aalto, 2018)

## 4.4 Huomioon otettavia näkökulmia

Hukkalämpöjen hyödyntämistä rajoittavat teknisten rajaehtojen lisäksi huolet kannattavuudesta ja liiketoiminnan riskeistä. Sähköön perustuvien ratkaisuiden tapauksessa tehtaiden sähköliittymien ja sähköverkon kapasiteetit eivät välttämättä riitä lämmöntalteenoton tarpeisiin. Investointikustannus voi pahimmillaan kaksinkertaistua, mikäli lämpöpumppujärjestelmän kulujen lisäksi täytyy kasvattaa sähköliittymää sekä rakentaa uusi muuntaja ja kaapeloinnit lämpöpumpulle. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021) Lisäksi teollisuusprosessit ovat itsessään usein mutkikkaita ja on iso kynnyks lähteä muuttamaan niitä (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019).

Sähköön perustuva järjestelmä on aina altis sähkön, sähkönsiirron tai sähköverojen hinnan nousulle. Arvaamattomuus sähkön hinnan kehityksestä aiheuttaa epävarmuutta myös laitteiden takaisinmaksuaikaan, ja investointikustannuksia joudutaan pohtimaan tarkkaan. Teollisuuslaitoksessa on myös sisäistä kilpailua investointien kohdistamisesta, eikä energiatehokkuuden parantamista pidetä investointikohteista välttämättä tärkeimpänä. Tavallisesti halutaan, että investoinnit kohdistuvat teollisuusyrityksen ydinliiketoimintaan ja kasvuinvestointeihin. (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019). Hukkalämmön hyödyntämiseen kohdistuvat investoinnit ovat kuitenkin investointi laitoksen tehokkuuteen, joten investointeja voidaan pitää perusteltuina.

Mikäli teollisuuslaitoksen hukkalämpöjä syötetään kaukolämpöverkkoon, tulee kaukolämpöverkon hallitsijan ja teollisuuslaitoksen laatia yhteistyötä koskeva sopimus. Sopimusten tekeminen voi olla hankalaa, sillä vaikka teollisuuslaitoksen ja kaukolämpöverkon hallitsijan tarpeet kohtaisivat sopimuksen tekohetkellä, voi tilanne muuttua tulevaisuudessa. Kaukolämpöverkkoyhtiö saattaa löytää parempia energianlähteitä, mutta toisaalta myös teollisuuslaitos voi lopettaa toimintansa tai muuttaa toimintaansa, jolloin hukkalämpöjen osuus muuttuu.

Hukkalämpöjen hyödyntäminen tuo mukanaan monia positiivisia seurauksia ja ilmiöitä. Lämpöpumpun ajatellaan lähtökohtaisesti olevan ympäristöystävällinen valinta, sillä sen avulla saadaan tuotettua tehokkaasti sähköstä lämpöä. Lisäksi sähköntuotanto on Suomessa puhdasta, sillä vuonna 2021 enää noin 11 % sähköstä tuotettiin fossiilissa polttoaineilla (Tilastokeskus, 2022d).

Kun tulevaisuudessa teknologisen kehityksen myötä lämpöpumppujen COP-arvot paranevat, niistä saadaan enemmän hyötyä irti ja pumppujen kannattavuus paranee. Jos tuotantolaitos käyttää ylijäämälämpöä sähköntuotantoon, sen on mahdollista vähentää omaa riippuvuuttaan ostosähköstä ja jopa toimia sähkön tuottajana sähköverkolle.

Hukkalämmön hyödyntäminen voi piristää teollisuusyritysten taloutta, sillä kehittyneen prosessin myötä voidaan aikaansaada säästöjä energiakustannuksissa tai lisätuloja energian myynnistä. Mikäli kaukolämpöyritykset saavat lämpöä yhä monipuolisemmin ja edullisella hinnalla, on mahdollista, että kaukolämmön hinta laskee myös kuluttajille. Hukkalämpöjen hyödyntäminen voi avata myös kokonaan uusia liiketoimintamahdollisuuksia, esimerkkinä biopolttoaineiden kuivaus. (Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, 2019)

Energiansäästön lisäksi lämmöntalteenoton avulla voi olla mahdollista parantaa itse prosessia. Prosessin paranemisesta voi seurata jopa suurempi hyöty kuin energiatehokkuuden lisääntymisestä ja primäärienergian tarpeen pienenemisestä. (Prosessin lämmöntalteenotto, 2022)

Politiikkatoimet osaltaan paransivat hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuutta, kun lämpöpumput siirrettiin halvemman veron veroluokkaan. Kehitys voi synnyttää myös työpaikkoja. Hukkalämmön hyödyntämiskäytöt työllistävät teknologiatoimittajia ja työvoimavaikutus kohdistuu ensisijaisesti teknologian asennukseen, huoltoon ja kunnossapitoon ja välillisesti teknologian kehitykseen (Huttunen & Kump, 2022). Esimerkiksi Janakkalassa Tervakoski Oy:n tehtaassa lämpöpumppuinvestoinnin tapauksessa rakennusaikaisen työllisyysvaikutuksen arvioidaan olevan noin 27 htv (Liite TEM-tiedotteeseen 20.12.2021, 2021).

Nykyään mahdollisuudet hukkalämmön talteenottoon erityisesti savukaasuja tuottavissa laitoksissa ovat paremmat kuin aiemmin. Prosesseja lämmittävistä savukaasuista syntyy merkittäviä hukkalämpövirtoja. Aiemmin savukaasuvirrat olivat likaisia, ja laitteiston puhdistaminen tuli kalliiksi lämmöntalteenottoprosesseissa. Nykyisin savukaasupesurit vastaavat pitkälti tähän ongelmaan. (Romppanen, 2022). Biopohjaisiin polttoaineisiin siirtyminen myös mahdollistaa tehokkaan energian talteenoton. Tämä selittyy sillä, että biomassan osuuden kasvattaminen voimalaitoksessa lisää savukaasun sisältämää kosteutta. Kosteasta savukaasusta otetaan talteen energiaa lauhduttamalla. Savukaasulauhduttimien käyttö on yleistä biopolttoaineita käyttävissä lämpökeskuksissa ja voimalaitoksissa. (Savolainen, 2020)

## 5 Teollisuus muun energiajärjestelmän tukena

### 5.1 Kysyntäjoustop mahdollisuudet

Teollisuuden sähköistyminen sekä teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntäminen tarjoavat monia mahdollisuuksia lisätä energiajärjestelmän kysyntäjousto. Kysyntäjousto mahdollistuu uudella tavalla älykkäiden sähkölaitteiden lisääntyessä. Uusien järjestelmien suunnittelussa tulee kuitenkin huomioida monia näkökulmia, sillä digitalisaation roolin korostuminen asettaa vaatimuksia esimerkiksi kyberturvallisuudelle. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Tulevaisuudessa energiayhtiöt varautuvat korvaamaan yhä enemmän keskitettyä energiantuotantoaan erilaisilla lämpöpumppu- ja lämmönvarastointiratkaisuilla, mikä avaa myös teollisuudelle uusia mahdollisuuksia syöttää ylijäämälämpöjään kaukolämpöverkoihin. Suomen kattava kaukolämpöverkosto mahdollistaa sekä hukkalämmön hyödyntämisen että kaukolämpöverkon ja lämpöakkujen lataamisen sähköllä kysyntäjoustopilanteissa. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

Teollisuuden sähkönkäyttö on ympärivuotista, mikä helpottaa sähköistymistä, sillä se ei aiheuta vastaavaa vuodenaikaisista lämmönvaihteluista johtuvaa tehoaastetta kuin esimerkiksi lämmityssektorin sähköistys (Lund & kump, 2021). Sähkökattilaratkaisuiden uskotaan ainakin aluksi tulevan polttokattiloiden rinnalle, mikä mahdollistaa sähkön ja polttoaineen kustannusten mukaan operoinnin. Kehitystä edesauttaa sähkökattiloiden hyvä säädettävyys ja nopea käyttöönotto. Halpaa sähköä hyödynnetään jo nyt esimerkiksi elintarviketeollisuudessa varastoimalla kylmäenergiaa jäävesisiiloihin ja prosessiteollisuudessa lataamalla lämpövaraajia ennakoivasti. (Turunen ja Jääskeläinen, 2021)

UPM:n yhteiskuntasuhdejohtaja Stefan Sundmanin mukaan metsäyhtiö UPM:n tehtaat suunnittelevat omaa kulutustaan niin, että esimerkiksi yön aikana kulutetaan enemmän sähköä, kun se on edullista. Paperitehtaalla alhaisen sähkön hinnan aikaan mekaanista puumassaa kannattaa tehdä myös välivarastoon, jota voidaan purkaa paperikoneelle, kun sähkö on kallista. Sähköjärjestelmän häiriötilanteessa jopa itse paperintuotantoa voidaan leikata alas hyvin nopeasti. (Heima & Mäntylä, 2022)

Kysyntäjoustopratkaisuiden suunnittelussa tulee huomioida teollisuuslaitoksen taloudelliset intressit; kannuste joustoon syntyy vain, mikäli kulutusjousto on kokonaisuutena kannattavampaa kuin prosessin jatkuva käyttö (Huttunen & kump, 2022). Vaikka teollisuuden prosessit ovat usein teknisesti joustavia, ei niitä välttämättä ole suunniteltu optimaalista joustavuutta varten ja joustavuus voi aiheuttaa kustannuksia, riskejä ja toimintahäiriöitä. Tuotannon kustannuksiin vaikuttavat sähkön hinnan lisäksi esimerkiksi riskikustannukset ja koneiston uudelleenkäynnistyksen kustannukset. Sementtiteollisuudesta on kuitenkin löydettävissä esimerkkejä, joissa sementtitehtaita on ainakin joidenkin prosessien osalta mitoitettu tarkoituksella osittaista käyttöä varten. (Helin, 2017)

### 5.2 Vetytalouden ja teollisuuden yhtymäkohdat

Vetytalouden kasvua ja roolia Suomessa tulevaisuudessa on vaikeaa ennustaa. Kasvu on kuitenkin varmaa. Vedyntuotanto linkittyy läheisesti teollisuuteen esimerkiksi terästuotannon kautta. Vihreän vedyn tuotanto vaatii huomattavia määriä sähköä, minkä lisäksi tuotannosta syntyy merkittävästi lämpöä. Kun vetyä tuotetaan elektrolyysillä, hyötysuhde

on tällä hetkellä 60–70 prosenttia, eli noin kolmannes käytetystä sähköstä menee hukkaan lämpönä. Kun vety puolestaan hyödynnetään takaisin sähköksi kaasuturbiinin tai polttokennon avulla, hyötysuhde on 40–55 prosenttia. Esimerkiksi, jos ensin käytetään 55 kWh sähköä vedyn ja hapen erottamiseksi ja myöhemmin hyödynnetään ne polttokennossa, tuottaa polttokenno 15 kWh sähköä ja 15 kWh lämpöä. (Vartiainen, 2020) Vaikka sähkön tuottaminen vedyllä ei ole hyötysuhteen kannalta erityisen tehokasta, on vedylle tarvetta esimerkiksi akkumateriaalien korvaajana energianvarastoinnissa, raaka-aineena teollisuuden prosesseissa sekä suoraan tai synteettisten polttoaineiden kautta polttoaineena etenkin raskaassa liikenteessä. Lämmön talteenoton avulla on mahdollista parantaa vetyprosessien hyötysuhdetta. Vetytalouden, sähköistymisen ja hukkalämpöjen hyödyntämisen väliltä voidaan tulevaisuudessa löytää entistä enemmän yhtymäkohtia.

Suomessa ja Ruotsissa teräsyhtiö SSAB on kehittänyt hiilineutraalia tapaa tuottaa terästä. Prosessissa rautasienen pelkistäminen toteutetaan vedyn avulla hiilen ja koksen sijaan. Laitoksen masuunit korvataan valokaariuuneilla. Masuuneista toisen on oletettu korvautuvan vuoteen 2035 mennessä. Vuoteen 2045 mennessä laitoksen koko tuotanto, noin 2,9 miljoonaa tonnia terästä, on tarkoitus toteuttaa vetypelkistyksen avulla. (Koljonen & kump, 2021). Uusi teknologia lisää sähkön kulutuksen kymmenkertaiseksi, mikä tarkoittaa 10–12 TWh vuodessa (Sipola, 2019).

Business Finlandin vuonna 2020 julkaiseman tiekartan mukaan vedyn tuotannon arvioitiin vuonna 2020 olevan 140 000–150 000 tonnia vuodessa, mikä vastaa noin 4.7–5.0 TWh energiamäärää. Vuonna 2030 määrän arvioidaan nousevan noin 180 000 tonniin. 2030 vuodesta eteenpäin SSAB:n terästuotanto tulee nostamaan kysyntää niin, että vedyntuotannon Suomessa arvioidaan nousevan yli 300 000 tonnin (noin 10 TWh). (Laurikko & kump, 2020). Vedyntuotannon hukkalämpöpotentiaalin arvioimiseksi on hyvä muistaa, että elektrolyysissä noin kolmannes käytetystä sähköstä menee hukkaan lämpönä. Näin ollen tuotettaessa 10 TWh vetyä, syntyy hukkalämpöä noin 5 TWh. Tämän lisäksi vielä runsaasti lisää hukkalämpöä syntyy, mikäli vety muutetaan sähköksi polttokennon avulla.

Mikäli vedyntuotannon hukkalämpöjä ei pystytä hyödyntämään teollisuuslaitoksessa tai myymään muiden alueen teollisuuslaitosten käyttöön, voi olla mahdollista syöttää se kaukolämpöverkkoon. Suomelle ja Ruotsille tämä mahdollisuus voi tarjota jopa kilpailuetua verrattuna valtioihin, joissa ei ole yhtä kattavaa kaukolämpöverkkoa. Energiateollisuus ry:n energiamarkkinajohtaja Pekka Salomaan mukaan hukkalämpöjen hyödyntäminen kaupunkien kaukolämpöverkoissa parantaa vedyn valmistuksen kannattavuutta ja puhdistaa samalla kaukolämmöntuotantoa. Energiuutisten julkaisussa todetaan, että Perämeren rannikkoseuduista saattaa syntyä todellinen vetytalousalue. Suomessa Kokkolan, Raahen, Oulun, Kemin ja Tornion lisäksi Porvoon, Imatran ja Lappeenrannan katsotaan olevan vetytoiminnalle soveltuvia alueita. (Sallinen, 2021)

Termokatalyyttiset menetelmät voivat myös auttaa teollisuuslaitoksia muokkaamaan prosesseja ympäristöystävällisemmiksi sekä tuottamaan vetyä tuotannon sivuvirroista. Mikäli prosessien sivuvirtana syntyy esimerkiksi metaania, on metaanin hiili mahdollista erottaa termokatalyyttisesti lämmön ja katalyyttien avulla. Jäljelle jää kiinteää hiiltä sekä vetyä (ns. turkoosi vety). Näitä molempia tarvitaan teollisuuden raaka-aineina. Esimerkiksi kemianteollisuuden prosesseissa syntyy huomattaviakin määriä metaania. (Rahikka, 2022)

### 5.3 Vienti ja hiilikädenjälki

Suomalaisen teollisuuden vaikutukset ovat kansainväliset. Termi hiilikädenjälki kuvaa, mikä on tuotteen tai palvelun ilmastohyöty eli päästövähennyspotentialiaali käyttäjälle. Teknologiateollisuuden tiekartan mukaan nykyisten vientituotteiden kädenjäljen arvioidaan olevan vähintään 20 Mt CO<sub>2</sub>-ekv./a, ja uudet ratkaisut voivat kasvattaa kädenjälkeä lisää yli 50 Mt CO<sub>2</sub>-ekv./a (Soimakallio, 2020). Suomen kansalliset kasvihuonepäästöt vuonna 2020 olivat 48,1 Mt CO<sub>2</sub>-ekv (Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020, 2021).

Suomen vientiteollisuuden rungon muodostavat metallinjalostus sekä metsä- ja kemiateollisuus. Suomen teollisuus on EU-maiden energiavaltaisin, ja kuljetusetäisyydet ovat kilpailijamaihin verrattuna pitkät. Jos energian ja liikennepolttoaineiden hinnat nousevat tulevaisuudessa, vaikutukset näkyvät teollisuuden kilpailukyvyssä. (Teknologiateollisuus pääosin tyytyväinen hallituksen ilmasto- ja energiastategiaan – Yrityksillä oltava investoinneilleen vakaat näkymät, 2022).

Erikoistuminen voi tarjota suomalaisille yrityksille merkittävän markkinaraon kansainvälisillä markkinoilla. Ankariin jääolosuhteisiin sijoitettava merituulivoima sekä Suomeen syntyvä akkuteollisuus ovat tällaisia mahdollisuuksia. Suomessa on vahvaa metallien jalostukseen ja kiertotalouteen liittyvää osaamista, minkä lisäksi Suomen maaperässä on merkittäviä määriä keskeisiä litium-ioni-akuissa tarvittavia mineraaleja eli litiumia, nikkeliä ja kobolttia. (Huttunen & kump, 2022). Muita mahdollisuuksia ovat esimerkiksi laivojen energiatehokkuusratkaisut, meriliikenteen hiilineutraalit moottorit sekä erikoisrobotiikka ja esineiden internet (Soimakallio, 2020).

Ilmastopaneelin raportissa (Lund & kump, 2021) arvioidaan, että tulevaisuudessa Suomen kilpailuetuna tuskin voisi olla halpa sähkö, jos esimerkiksi sähköpolttoaineista muodostuisi merkittävä globaali markkina. Tätä selittävät osaltaan esimerkiksi maantieteelliset olosuhteet. Mahdollisuuksia tarjoavat teknologiaan ja osaamiseen pohjautuvat tuotteet ja palvelut, joiden kehittäminen edellyttäisi nykyistä pitkäjänteisempää tutkimus- ja innovaatiopolitiikkaa (Lund & kump, 2021).

Hiilidioksidin talteenotto voi tulevaisuudessa yleistyä teollisuuslaitoksissa. CCS-tekniologian (Carbon Capture and Storage) käyttöönotto voi olla kustannustehokas vaihtoehto teollisuudessa jo 2030-luvulla, esimerkiksi sementin valmistuksessa (Koljonen & kump, 2021). BECCS-tekniologian (Bio Energy Carbon Capture and Storage) myötä teollisuuslaitoksen voi olla mahdollista osallistua esimerkiksi synteettisten polttoaineiden tuotantoon, jos tehtaan savukaasujen hiilidioksidi otetaan talteen ja hyödynnetään polttoaineissa.

## 6 Johtopäätökset

Teollisuuden energiamurroksessa sähköistämiskehityksellä on erityisen keskeinen rooli. Kasvava sähköntarve ja EU:n asettamat rajoitteet sähkönkulutukselle tarjoavat tälle kehitykselle raamit, jotka voivat muokkautua vielä moneen kertaan. Sähkönkulutuksen ennustetaan jopa kaksinkertaistuvan 2050-luvulle mentäessä, ja lisääntyvän tarpeen arvioidaan aiheutuvan ennen kaikkea teollisuuden kasvavasta energiantarpeesta. Erityisen suurta sähkön tarpeen kasvu on teknologia- ja kemianteollisuudessa. Sähköä tarvitaan asumisen, sähkölaitteiden käytön ja teollisuuden ohella yhä lisääntyvissä määrin myös esimerkiksi liikenteessä ja vedyn valmistuksessa. Nähtäväksi jää, miten eri sektoreita tullaan tulevaisuudessa priorisoimaan, jollei sähkön tarjonta kata kysyntää.

Sähköistämiskehityksen tukena on vaikuttanut teknisiä ja poliittisia ratkaisuja. Alle 15 vuodessa esimerkiksi Oilon Oy:n valmistamilla teollisuuslämpöpumpuilla tuotettavan veden maksimilämpötila on lähes kaksinkertaistunut. Vuonna 2022 voimaan tullut teollisuuden sähköverouudistus siirsi lämpöpumput ja sähkökattilat matalamman energiaveron pariin. Vaikka korkean lämpötilan prosessien sähköistäminen on vielä teknisesti hankalaa, näyttävät esimerkiksi sähköuunit, sähkökattilat ja sähköiset kuivatusratkaisut tarjoavan monin tavoin puhtaan ja joustavan ratkaisun moniin teollisuuden prosesseihin.

Lämpöpumppujen teknologinen kehitys ja kaukolämmön tulooverkon mitoituslämpötilan laskeminen mahdollistavat hukkalämpöjen hyödyntämisen entistä monipuolisemmin niin teollisuuslaitoksen sisäisesti kuin ulkoisestikin. Esimerkiksi teräksen valmistuksen osalta puhtaampien energiaratkaisuiden sivuvirtoina syntyy huomattavia määriä lämpöä. Tulevaisuudessa hukkalämpöjen osuuden kaukolämmön tuotannosta on arvioitu kaksinkertaistuvan. Hukkalämpöjen hyödyntämistä voivat tulevaisuudessa rajoittaa liian matalat tai korkeat lämpötilat, laitteiden tai tuotannon kapasiteetti, taloudellinen kannattavuus sekä sopivan kohteen löytäminen hukkalämmöille.

Siirtyminen vähäpäästöisten teknologioiden käyttöön näkyy teollisuuslaitosten toiminnassa yhä vahvemmin. Poliitiikkatoimien ja markkinoiden voi nähdä ohjaavan teollisuuslaitosten toimintaa jo niin paljon, että teollisuuslaitosten päästöjä koskevien päätösten ei voida ajatella olevan yksin laitosten omistajien käsissä. Teollisuuden energiamurros tarvitsee tuekseen myös paljon TKI-toimintaa. Hyödyllisiä olisivat esimerkiksi ratkaisut, joiden avulla hukkalämpöjä saataisiin hyödynnettyä entistä tehokkaammin ja monipuolisemmin eri lämpöisistä prosesseista.

Suomalaisessa teollisuudessa tehtävän kehitystyön vaikutukset ovat globaalit. Suomalaisen teollisuuslaitosten hiilikädenjäljen on ennustettu kasvavan jopa valtion vuosittaisten kasvihuonepäästöjen suuruiseksi. Suomalaiselle osaamiselle on tarvetta myös valtiorajojen ulkopuolella.

Kuten Ilmastopaneelin julkaisussa (Lund & kump, 2021) todetaan, optimaaliseen energiaratkaisuun teollisuudessa vaikuttavat monet tekijät, kuten sijainti, ympäröivät olosuhteet, teollisuusprosessin elinkaaren vaihe ja aiemmat valinnat, tulevaisuuden näkymät, poliittiset vaikuttimet ja eettiset valinnat. Vaikka päätökset eivät ole yksinkertaisia tai helppoja, on tärkeää, että niitä pystytään tekemään. Tämän kirjallisuuskatsauksen pohjalta voikin odottaa energiamurroksen mukanaan tuomien mahdollisuuksien olevan haasteita suurempia.

## 7 Lähteet

Apilisto, J. (2021). Tuulivoimalan tehontuotto. Opinnäytetyö. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. S.26. Luettavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/754476/Apilisto\\_Janne.pdf?sequence=3](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/754476/Apilisto_Janne.pdf?sequence=3).

Energiaintensiivisen teollisuuden toimijat voivat hakea sähköistämistukea 2022–2026. (2022). Työ- ja elinkeinoministeriö. [Online] Valtioneuvosto.fi. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/energiaintensiivisen-teollisuuden-toimijat-voivat-hakea-sahkoistamistukea-2022-2026>.

Energiaintensiivisen yrityksen valmisteverojen palautus. (2022). [Online] vero.fi. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-mak-sut/valmisteverotus/palautukset/energiaintensiiviset-yritykset/>.

Esiselvitys, Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. (2019). Motiva Oy. Helsinki. S. 1, 5, 16, 20, 21, 28, 30. [Online] motiva.fi. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys\\_-\\_Ylijaamalammon\\_potentiaali\\_teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf).

Finnish Energy – Low carbon roadmap. (2020). Afry (ÅF Pöyry). [Online] energia.fi. S. 8. [Viitattu 20.11.2022]. Saatavissa: [https://energia.fi/files/5064/Taustaraportti\\_-\\_Finnish\\_Energy\\_Low\\_carbon\\_roadmap.pdf](https://energia.fi/files/5064/Taustaraportti_-_Finnish_Energy_Low_carbon_roadmap.pdf).

Galkin-Aalto, M. (2018). Kaukolämpö uudistuu: Helen haluaa ostaa asiakkailtaan ylijäämälämpöä. [Online] helen.fi. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2018/avoinkaukolampo>.

Hallituksen esitys HE 191/2018 vp. (2018). Helsinki. [Online] eduskunta.fi. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: [https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE\\_191+2018.aspx](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_191+2018.aspx).

Heima, T. P & Mäntylä, J. M. (2022). Tuulivoima rikkoo nyt ennätyksiä, mutta aikanaan tyyntyy – miten sähköjärjestelmä selviää yhä kasvavasta, valtavasta vaihtelusta?. Yle. [Online] yle.fi. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-12651687>.

Helin, K. (2019). Energy transition impacts and opportunities in the Nordic electricity and district heating markets. Väitöskirja. Insinööritieteiden korkeakoulu. Konetekniikan laitos. Aalto-yliopisto. S.28. ISBN:978-952-60-8556-2. Saatavissa: <https://aalto-doc.aalto.fi/handle/123456789/38014>.

Huttunen, R., Kuuva, P., Kinnunen, M., Lemström, B & Hirvonen, P. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. (2022). Työ- ja elinkeinoministeriö. Helsinki. S. 15, 58, 59, 70, 174, 180, 182, 195 & 196. ISBN pdf: 978-952-327-811-0. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>.

Julkaisu K1/2021 Rakennusten kaukolämmitys. (2021). Energiateollisuus ry. Helsinki. Saatavissa: [https://energia.fi/files/6412/Julkaisu\\_K1\\_2021\\_Rakennusten\\_kaukolammitus\\_Maaraykset\\_ja\\_ohjeet\\_%28pdf%29.pdf](https://energia.fi/files/6412/Julkaisu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitus_Maaraykset_ja_ohjeet_%28pdf%29.pdf).

Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen. (2020). Afry Finland Oy. Vantaa. S. 36, 37, 39, 40. Saatavissa: [https://energia.fi/files/5289/Kaukolampoasiakkaiden\\_mitoituslampotilan\\_laskeminen\\_101013094-Loppuraportti\\_AFRY.pdf](https://energia.fi/files/5289/Kaukolampoasiakkaiden_mitoituslampotilan_laskeminen_101013094-Loppuraportti_AFRY.pdf).

Koistinen, A. (2017). Ydinvoimalan voi pian koota rekkaan mahtuvista moduuleista – Pienreaktorit mullistavat ydinvoimabisnestä. Yle. [Online] yle.fi. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-9854428/>.

Koljonen, T., Lehtilä, A & Honkatukia, J. (2021). Ilmastolain päästövähennystavoitevaihtoehtojen laskennalliset vaikutusarviot. Valtioneuvoston selvitys 2021:3. S. 13, 16, 18, 19, 24 & 43. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163394/VN\\_Selvitys\\_2021\\_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163394/VN_Selvitys_2021_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Komission tiedonanto: REPowerEU-suunnitelma (COM(2022)230). 2022. [Online] E-kirje. TEM2022-00299. Saatavissa: <https://vnk.fi/documents/10600/121652511/RePower+EU+%E2%80%93+komission+tiedonanto;+E-kirje.pdf/eaf306ca-b064-b17d-ece8-5644d49caa17/RePower+EU+%E2%80%93+komission+tiedonanto;+E-kirje.pdf?version=1.1&t=1653402309930&download=true>.

Laaksonen, P., Kortela, V., Aho, M & Silvennoinen, R. (2020). Hiilineutraali Suomi, Suomen strateginen mahdollisuus – P2X polttoaineet. LUT-yliopisto, Wärtsilä & St1. S.9. [Online] tem.fi. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/50969190/Laaksonen-Hiilineutraali-Suomi.pdf/63b9145d-d6c1-ab0eced7-24067d519fe8/Laaksonen-Hiilineutraali-Suomi.pdf?t=1608210091121>.

Laatikainen, T. (2022). Tällaista 3,5 miljardin ja 1000 km:n vetyputkistoa kaavaillaan Pohjois-Suomeen ja Ruotsiin – Supergraafi esittelee Pohjolan vetyunelman. [Online] tekniikkatalous.fi. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tallaista-3-5-miljardin-ja-1000-kmn-vetyputkistoa-kaavaillaan-pohjois-suomeen-ja-ruotsiin-supergraafi-esittelee-pohjolan-vetyunelman/3d1737a0-71b0-44a9-8611-c5bdadd4c94e>.

Lakiesitys energiaintensiivisen teollisuuden sähköistämistuesta eduskuntaan. (2022). Työ- ja elinkeinoministeriö. [Online] tietosuoja.fi. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: <https://tietosuoja.fi/-/1410877/lakiesitys-energiaintensiivisen-teollisuuden-sahkoistamistuesta-eduskuntaan>.

Hokkanen, J., Virtanen, Y., Savikko, H., Känkänen, R., Katajajuuri, J. M., Sirkiä, A & Sinkko, T. (2015). Alueelliset resurssivirrat Jyväskylän seudulla. Sitran selvityksiä 91. S.46. ISSN 1796-7112 (PDF). Saatavissa: <https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/02/Selvityksia91-2.pdf>.

Laurikko, J., Itonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J & Hurskainen, M. (2020). National hydrogen roadmap for Finland. Business Finland. S.29. ISSN 1797-7339. [Online] businessfinland.fi. Saatavissa: [https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf\\_national\\_hydrogen\\_roadmap\\_2020.pdf](https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf).

Liite TEM-tiedotteeseen 20.12.2021. (2021). Uusiutuvan energian suuret demonstraatiohankkeet. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Online] tem.fi. Ladattavissa: [https://tem.fi/documents/1410877/53440649/20211220\\_LIITE\\_uusiutuvan\\_energian\\_investointituet\\_4\\_isoa\\_demoaa.pdf/36394efc-4a8c-04a0-94ee-4066f3ede214/20211220\\_LIITE\\_uusiutuvan\\_energian\\_investointituet\\_4\\_isoa\\_demoaa.pdf?t=1640070760340](https://tem.fi/documents/1410877/53440649/20211220_LIITE_uusiutuvan_energian_investointituet_4_isoa_demoaa.pdf/36394efc-4a8c-04a0-94ee-4066f3ede214/20211220_LIITE_uusiutuvan_energian_investointituet_4_isoa_demoaa.pdf?t=1640070760340).

Lund, P., Kivimaa, P., Arasto, A., Lipsanen, A., Heliste, P & Tsupari, E. (2021). Sähköllä merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisessa. Suomen ilmastopaneelin julkaisuja 3/2021. S. 2, 5, 8–11. [Online] ilmastopaneeli.fi. Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/06/ilmastopaneelin-julkaisuja-3-2021-sahkolla-merkittava-rooli-suomen-kasvihuonekaasupaastojen-leikkaamisessa.pdf>.

Myllymaa, T. (2019). Upgrading of waste streams into fuel by means of drying with low temperature excess heat: a techno-economic evaluation. Väitöskirja. Insinöritieteiden korkeakoulu. Konetekniikan laitos, Aalto-yliopisto. Helsinki. S. 22. ISBN: 978-952-60-8834-1. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/41362>.

Mäkelä, V. M & Tuunanen, J. (2015). Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli. Mikkelin ammattikorkeakoulu. S.73. ISBN: 978-951-588-507-4 (PDF). Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URN-NISBN9789515885074.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URN:NISBN9789515885074.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Onkalo, M. (2022). Työkalun kehittäminen teollisuuden hukkalämmön talteenotossa käytettävän teknologian määrittämiseen. Energiatekniikan diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. S. 26, 41. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164429/TY%20KALUN%20KEHITT%20MINEN%20TEOLLISUUDEN%20HUKKAL%20MM%20N%20TALTEEN-OTOSSA%20K%20YTETT%20V%20N%20TEKNOLOGIAN%20M%20RITT%20MISEEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. (2019). Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019. Helsinki. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31. S.36. ISBN PDF 978-952-287-808-3. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161931/VN\\_2019\\_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161931/VN_2019_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Paloneva, Mikko & Takamäki, Saana. (2020). Yhteenveto toimialojen vähähiilitekar-toista. Työ- ja elinkeinoministeriö. Helsinki. S. 33. ISBN PDF: 978-952-327-525-6. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-525-6>.

Prosessin lämmöntalteenotto. Finess Energy Oy. [Online] finess.fi. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: <https://finess.fi/toimialat/teollisuus/prosessin-lammontalteenotto/>.

Rahikka, L. (2022). Maailma tarvitsee monin tavoin tuotettua vähähiilistä vetyä. [Online] linkedin.com. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/maailma-tarvitsee-monin-tavoin-tuotettua-vahahiilista-laura-rahikka/>.

Romppanen, T. (2022). Hukkalämpö ja sen hyödyntäminen, Pelletin raaka-ainekuivureiden hönköhöyryn lämpötehon vaikutukset laitospöytäsuunnan energiataseeseen. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu. Joensuu. S. 8, 12, 15. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/753570/Romppanen\\_Taneli\\_2022\\_06\\_06.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/753570/Romppanen_Taneli_2022_06_06.pdf?sequence=2).

Roques, F., Thieis, Y. L., Aue, G., Spodniak, P., Guillaume, P., Cail, S., Peffen, A., Honkapuro, S & Sihvonen, V. (2021). Enabling cost-efficient electrification in Finland. S. 16, 36. ISSN 1796-7112 (PDF). Saatavissa: <https://www.sitra.fi/app/uploads/2021/09/sitra-enabling-cost-efficient-electrification-in-finland.pdf>.

Rämet, A. Teollisuuslämpöpumput energiantuotannossa. Insinööri. Energia- ja ympäristötekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu. S. 14. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/373685/Ramet\\_Anna.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/373685/Ramet_Anna.pdf?sequence=2).

Saarivirta, E. (2022). Energiatarkkailu- ja ESCO-palvelut. [Online] motiva.fi. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatarkkailu-ja\\_esco-palvelut](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatarkkailu-ja_esco-palvelut).

Sallinen, P. (2021). Valmiiksi vetyä varten. Energia uutiset. [Online] energiauutiset.fi. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://www.energiuutiset.fi/kategoriat/markkinat/valmiiksi-vetya-varten.html>.

Savolainen, P. (2020). Savukaasujen hukkalämpö talteen. Turku Energia. [Online] turkuenergia.fi. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/vas-tuullisuus/savukaasujen-hukkalampo-talteen/>.

Sipola, T. (2019). Ruotsissa testataan ratkaisua, joka mullistaisi yhteiskunnan ja romauttaisi päästöt – ja idea voi tulla käyttöön ensimmäisenä Suomessa. [Online] yle.fi. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-10942131>.

Soimakallio, H. (2020). Teknologiateollisuuden vähähiilitiekartta 2035 Tulokset. S.8, 14 & 18. [Online] teknologiateollisuus.fi. Saatavissa: [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknologiateollisuuden-vahahiilitiekartta-tiivistelmä\\_2020-06-08\\_FINAL\\_0.pdf](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknologiateollisuuden-vahahiilitiekartta-tiivistelmä_2020-06-08_FINAL_0.pdf).

Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. (2021). Tilastokeskus. [Online] stat.fi. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-12-16\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-12-16_kat_001_fi.html).

Sähkön ja lämmön tuotanto 2019. (2020). Tilastokeskus. Helsinki. S. 1–2. ISSN 1796-0479. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo\\_2019\\_2020-11-03\\_fi.pdf](https://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_fi.pdf).

Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot. (2022). Vero.fi. HE152/2022. Verotaulukko 2. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>.

Sähkövero. (2022.) [Online] vero.fi. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero>.

Teknologiategollisuus pääosin tyytyväinen hallituksen ilmasto- ja energiastategiaan – Yrityksillä oltava investoinneilleen vakaat näkymät. (2022). [Online] teknologiategollisuus.fi. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://teknologiategollisuus.fi/fi/ajankoh-taista/uutinen/teknologiategollisuus-paaosin-tyytyvainen-hallituksen-ilmasto-ja>.

Tilastokeskus. (2022a). Teollisuuden energiankäyttö / 11 wy – Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain (TOL 2008), 2007–2021. [pxdata.stat.fi](https://pxdata.stat.fi). [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_tene/statfin\\_tene\\_pxt\\_11wy.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__tene/statfin_tene_pxt_11wy.px/).

Tilastokeskus. (2022b). Energian hankinta ja kulutus / 12 vk – Energian loppukulutus sektoreittain, 1970–2021\*. [pxdata.stat.fi](https://pxdata.stat.fi). [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_12vk.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12vk.px/).

Tilastokeskus. (2022c). Teollisuuden energiankäyttö / 12 bu – Teollisuuden sähkön kokonaiskäyttö maakunnittain ja toimialaryhmittäin (TOL 2008), 2007–2021. [pxdata.stat.fi](https://pxdata.stat.fi). [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_tene/statfin\\_tene\\_pxt\\_12bu.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__tene/statfin_tene_pxt_12bu.px/).

Tilastokeskus. (2022d). Sähkön ja lämmön tuotanto / 12 b4 – Sähkön tuotanto energialähteittäin ja kokonaiskulutus, 2000–2021. [pxdata.stat.fi](https://pxdata.stat.fi). [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_salatuo/statfin\\_salatuo\\_pxt\\_12b4.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__salatuo/statfin_salatuo_pxt_12b4.px/).

Toivanen, T., Vadén, T., Majava, A., Järvensivu, P., Lähde, V., & Eronen, J. T. (2021). Teollinen murros ekohyvinvointivaltiossa: Mitä teollisuuden vähähiilitiekartat kertovat suomalaisen kestävyysmurroksen edellytyksistä?. *Alue Ja Ympäristö*, 50(2), S. 8–27. Saatavissa: <https://doi.org/10.30663/ay.109701>.

Turunen, T & Jääskeläinen, J. (2021). Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutus energiategohokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen. *Motiva Oy*. S. 6, 11, 14, 15, 22–25, 27, 31, 34–43, 45, 51, 57, 60, 62 & 65. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen\\_teollisuuden\\_sahkoistyminen\\_ja\\_sen\\_vaikutus\\_energiategohokkuuteen\\_ja\\_hukkalampojen\\_hyodyntamiseen\\_-\\_raportti\\_2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistyminen_ja_sen_vaikutus_energiategohokkuuteen_ja_hukkalampojen_hyodyntamiseen_-_raportti_2021.pdf).

Tuulivoima Suomessa 2021. (2022). Suomen Tuulivoimayhdistys. S. 2. Ladattavissa: [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot\\_2021-2.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2021-2.pdf).

Vartiainen, E. (2020). Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. *Fortum*. [Online] [fortum.fi](https://www.fortum.fi). [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoameista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>.

Vasara, Nyman, Lehtinen, Aktüre, Laukkanen. (2020). Roadmap to reach carbon neutral chemistry in Finland 2045 final report. *Pöyry*. S.52. [Online] [kemianteollisuus.studio.crasman.fi](https://kemianteollisuus.studio.crasman.fi). [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: [https://kemianteollisuus.studio.crasman.fi/file/dl/i/0GtI\\_g/kBevzvIQojOC9zfO-Ztyug/Kemianteollisuusroadmap.pdf](https://kemianteollisuus.studio.crasman.fi/file/dl/i/0GtI_g/kBevzvIQojOC9zfO-Ztyug/Kemianteollisuusroadmap.pdf).