



Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa

Kirjallisuusselvitys

02/2024

Esipuhe

Teollisuus on vastuussa suuresta osasta energiankulutuksesta ja ilmastopäästöistä sekä maailmanlaajuisesti että Suomessa. Sähköistämällä voidaan parantaa teollisuuden energiatehokkuutta, vähentää päästöjä ja samalla myös luoda uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Tämä työ pohjautuu Motivan tarpeeseen kartoittaa olemassa olevia teollisuuden sähköistymisen teknologioita ja älyratkaisuja, niiden kehitystasetta sekä sovellusmahdollisuuksia ja energia-tehokkuusvaikutuksia teollisuuden eri toimialoilla. Kartoituksen tarkoitus on tukea Motivaa Elinkeinoelämän energiatehokkuussopimuksien toimeenpanossa ja yhteishankkeessa.

Työn tarkoituksena on myös toimia tukena suomalaisille teollisuustoimijoille konkreettisten energiatehokkuustoimien tueksi. Tavoitteena on antaa näkemystä eri sähköistymisen vaihtoehdoista ja niiden potentiaalista energiatehokkuuden saavuttamiseksi. Suomalaisen teollisuussektorin erityispiirteet on pyritty huomioimaan työtä tehdessä. Lisäksi eri teknologioiden valmiusastetta on arvioitu.

Työn tilaajana toimi Motiva Oy ja toteuttajana Gaia Consulting. Työn taustoittamiseen, ohjaamiseen ja kommentointiin osallistuivat Motivan Sophia Rovio, Erja Saarivirta ja Tomi Kiuru. Gaian Consultingin puolelta työhön osallistuivat Tuukka Rautiainen, Mikko Leppälä, Atte Ahti ja Silla Reiman.

Kiitämme Motivaa mielenkiitoisesta toimeksiannosta ja rakentavasta yhteistyöstä työtä tehdessä. Lisäksi haluamme kiittää työtä varten haastateltuja teollisuusliittojen ja teollisuuden edustajia. Haastateltavina ovat olleet seuraavat henkilöt: Teknologiateollisuus ry; Patrick Frostell, Metsäteollisuus ry; Heikki Vierimaa ja Kemianteollisuus ry; Tuomas Tikka.

Tuukka Rautiainen
Gaia Consulting Oy

Helsingissä 15.12.2023

Ei julkaista painotuotteena
Julkaisija Motiva Oy
Copyright Motiva Oy, Helsinki, joulukuu 2023

Sisällysluettelo

Esipuhe	3
Sisällysluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Sähköistyminen ja energiatehokkuus teollisuudessa	6
2.1 Eri sähköistymisen teknologioita	7
3 Tarkasteltavat teknologiat	11
3.1 Lämpöpumput	11
3.1.1 Korkean lämpötilan lämpöpumput	14
3.1.2 MVR-lämmittimet	16
3.2 Suoran sähköistymisen ratkaisut	17
3.2.1 Sähkökattilat	17
3.2.2 Sähköiset prosessiuunit	19
3.2.3 RotoDynamic Heater (RDH) ja RotoDynamic Reactor (RDR)	20
3.3 Lämmön varastointi	22
3.3.1 Tuntuvan lämpöenergian varastointi	23
3.3.2 Latenttivarastot ja termokemialliset varastot	25
3.4 Energiatehokkuus ja älyratkaisut	25
4 Esimerkkiratkaisujen skaalautuvuus	29
4.1 Kemianteollisuus	33
4.2 Metsäteollisuus	34
4.3 Metalliteollisuus	35
4.4 Elintarviketeollisuus	36
4.5 Teknologiateollisuus	36
4.6 Energiateollisuus	37
5 Yhteenveto ja johtopäätökset	39
Lähteet	41

Pääministeri Rinteen ja pääministeri Marinin hallitusohjelmissa linjattiin Suomen tavoitteeksi olla hiilineutraali vuonna 2035 ja hiilinegatiivinen nopeasti sen jälkeen. Mahdollistaakseen siirtymän vähähiiliseen yhteiskuntaan eri toimialat valmistelivat vähähiilisyystiekarttoja, joilla selvitettiin skenaarioiden avulla tarvittavia toimenpiteitä sekä niiden mittakaavaa ja edellytyksiä. Teollisuusaloista energiateollisuus, kemianteollisuus, metsäteollisuus, teknologiateollisuus sekä elintarviketeollisuus laativat oman vähähiilisyystiekarttansa.

Teollisuusalat ovat päästöjen vähentämisessä avainasemassa, sillä ne muodostavat suuren osan, noin 45 prosenttia, Suomen vuotuisesta energiankulutuksesta. Teollisuuden sähköistyminen on avainasemassa fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen ja energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta.

Teollisuuden sähköistyminen tarjoaa jo nyt teollisuudelle mahdollisuuden siirtyä päästöttömiin prosesseihin laajasti erilaisissa lämpöä vaativissa prosesseissa, lukuun ottamatta kaikkein korkeimpia, yli 1000 celsiusasteen lämpötiloja vaativia prosesseja. Nykyisen potentiaalin piirissä ovat laajasti erilaiset höyryä käyttävät prosessit, esimerkiksi tislaukseen ja kuivaukseen liittyvät prosessit, sekä energiatehokkuuden kasvattaminen esimerkiksi hukkalämmön hyödyntämisellä lämpöpumpun avulla. Energiatehokkuuden lisäksi eri teknologioiden käyttöönottoon ja esimerkiksi investointipäätöksiin vaikuttavat ympäristövaatimusten täyttäminen ja kustannustehokkuus.

Motiva on kestävän kehityksen valtionyhtiö, joka tarjoaa julkishallinnolle, yrityksille, kunnille ja kuluttajille tietoa, ratkaisuja ja palveluja tavoitteenaan tehostaa energian ja materiaalien kestävää ja tehokasta käyttöä. ”Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa” on Motivan yhteishanke, jossa pyritään ratkaisemaan teollisuuden sähköistymisen ja energiatehokkuuden kehittämisen haasteita. Hankkeen tavoitteena on tarjota yksittäiselle yritykselle mahdollisuuksia tuoda yrityksen energiatehokkuuden haasteet yhteiseen käsittelyyn ja etsiä näihin sopivat ratkaisutavat. Hankkeen tavoitteena on myös kasvattaa yritysten osaamista eri sähköistymisen ratkaisuista.

Tämän kirjallisuusselvityksen tarkoitus on tukea Motivaa ”Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa” -yhteishankkeen toteutuksessa ja elinkeinoelämän energiatehokkuussopimuksen toimeenpanossa. Työssä kartoitettiin markkinoilla ja kehitteillä olevia sähköistyvän teollisuuden teknologioita mukaan lukien niiden kehitys- ja valmiusaste sekä saatavuus. Aihealueita ovat esimerkiksi korkean lämpötilan lämpöpumput, sähkökattilat, korkeiden lämpötilojen tuottaminen sähköllä, lämmön varastointi ja teollisuuden energiatehokkuuden optimointi älyratkaisuilla. Työssä on huomioitu eri teknologioiden skaalautuvuus sekä suomalaisen teollisuuden ominaispiirteet ja vaatimukset. Työssä on tarkasteltu niitä teknologioita ja ratkaisuja, jotka on käyttöön otettavissa tällä hetkellä tai saatavilla aivan lähitulevaisuudessa. Siksi on keskitytty teknologioihin ja ratkaisuihin, joiden valmiusaste eli Technological Readiness Level (TRL) -mittari on vähintään seitsemän, toisin sanoen kyseinen teknologia on jo kaupallistunut tai hyvin lähellä sitä. Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksen ja haastatteluiden avulla.

Teollisuus on Suomen suurin sähkönkäyttäjä. Vuonna 2021 teollisuuden energiankäyttö Suomessa oli 139 TWh, eli noin 45 prosenttia Suomen energian loppukäytöstä (Motiva, 2023c). Sektorin sähkönkulutus oli samana vuonna 39 TWh eli noin 45 prosenttia koko Suomen sähkön kulutuksesta. Sektorin sähköistymisen keskeisenä ajurina ovat EU-tason sekä kansalliset päästövähennystavoitteet. Suomessa suuri uusiutuvan ja puhtaan sähkön määrä tekee tuotannon sähköistämisestä potentiaalisen tavan vähentää oman toiminnan päästöjä. Muita ajureita ovat esim. teknologian kehitys, joka avaa jatkuvasti uusia mahdollisuuksia sähköistämiselle sekä Ukrainan sodan myötä muuttunut energiapolitiittinen tilanne, joka on saanut useat yritykset pyrkimään eroon fossiilisten polttoaineiden käytöstä.

Päästökauppa on yksi keskeisistä työkaluista EU:n päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa ja siten keskeinen ajuri teollisuuden sähköistymisessä. Päästökaupan tarkoituksena on varmistaa, että teollisuus- ja energiantuotantolaitosten päästöt pysyvät koko EU:n päästökauppasektorille asetetun päästökaton rajoissa. Päästökauppajärjestelmän piiriin kuuluvat suuret teollisuuslaitokset sekä kokonaislämpöteholtaan yli 20 MW:n laitokset, ja lisäksi Suomessa piiriin kuuluvat myös 20 MW tai sitä pienemmät kaukolämpöä tuottavat laitokset. Suomessa hieman alle puolet kasvihuonekaasupäästöistä on tällä hetkellä päästökauppajärjestelmän piirissä. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023c)

Teollisuussektorin sähköistymisestä on tehty useita skenaarioita. Teollisuussektorin sähkön kysynnän odotetaan kasvavan tulevaisuudessa hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi: esimerkiksi Energiateollisuuden vähähiilisyystiekartan mukainen teollisuussektorin sähkönkulutus vuonna 2050 olisi noin 80 TWh. Suurinta kysynnän kasvua odotetaan etenkin metalli- ja kemianteollisuuden aloilla, joissa tuotannon yleinen sähköistäminen ja prosessilämmön tuottaminen sähköllä lisäävät kysyntää. Lisäksi energiateollisuudessa hukkalämmön kattavampi hyödyntäminen lisää sähkön käyttöä (VNTEAS, 2021). AFRYn vuoden 2020 selvityksen mukaan energiantensiivisten teollisuusalojen vähähiilisyystiekarttojen skenaariot johtavat sähkön kysynnän merkittävään kasvuun erityisesti prosessilämmön ja vedyn tuotannon sähköistymisen myötä. Kysynnän oletetaan saavuttavan 45–57 TWh:n tason vuoteen 2035 mennessä ja 49–70 TWh:n tason vuoteen 2050 mennessä (AFRY, 2020).

Yleisesti sähköistymisellä tarkoitetaan sähkön käytön absoluuttista lisäämistä ja sähkön käyttösovellusten laajentamista eri toiminnan alueilla. Teollisuudessa sähköistyminen voidaan jakaa suoraan sähköistymiseen, lämpöpumppuja hyödyntäviin sähköistymisratkaisuihin sekä epäsuoraan sähköistymiseen, jossa sähköllä valmistetaan esimerkiksi vetyä tai synteettisiä polttoaineita. (Motiva, 2023a)

Suorassa sähköistymisessä jokin fossiilista polttoainetta käyttävä toiminta muutetaan hyödyntämään sähköenergiaa. Tästä esimerkkinä on sähkökattilan hyödyntäminen prosessihöyryn tuotannossa. Lämpöpumppuja hyödyntäessä taas on mahdollisuudet mittavampiin energiansäästöihin. (Motiva, 2023a)

Tässä työssä tarkasteltiin erilaisia teollisuuden suoran sähköistämisen ratkaisuja sekä lämpöpumppuratkaisuja teollisuudenaloittain. Tarkasteltavat teollisuudenalat olivat metsäteollisuus, kemianteollisuus, metalliteollisuus, teknologiateollisuus, elintarviketeollisuus sekä energiateollisuus.

Ratkaisuja vertailtiin niiden TRL-tason, skaalautuvuuden ja energiatehokkuuden perusteella laadullisesti. Asteikko on yhdestä yhdeksään, ja noin tasolla 7 teknologia alkaa olla kaupallistunut tai lähellä sitä. Skaalautuvuutta ja energiatehokkuutta arvioitiin asteikolla 1–4, missä 1 tarkoittaa skaalautuvuuden osalta heikosti skaalautuvaa ja 4 erittäin hyvin skaalautuvaa. Skaalautuvuuden ja energiatehokkuuden arviointi perustuu Gaia Consulting asiantuntemukseen ja näkemukseen. Tarkastelun ja arvioiden perusteella valittiin muutama teknologia jatkotarkasteluun, joka on esitelty luvussa kolme. Taulukossa 1 on esitetty tarkemmin TRL-tasot.

Taulukko 1. TRL-tasojen selitykset.

TRL-taso	Selite
1	Perusperiaatteet on havaittu
2	Teknologiakonsepti on muotoiltu
3	Teknologiakonsepti on kokeellisesti todennettu
4	Teknologian toimivuus on todennettu laboratorio-olosuhteissa
5	Teknologian toimivuus on todennettu todellisessa ympäristössä
6	Teknologian toimivuus on demonstroitu todellisessa ympäristössä
7	Järjestelmän prototyyppi on demonstroitu toimintaympäristössä
8	Järjestelmä on valmis ja toimiva
9	Järjestelmän lopullinen toimivuus on todennettu sen toimintaympäristössä

Kaikilta teollisuusaloilta löytyi hyödyntämismahdollisuuksia lämpöpumpuille. Hukkalämpöjen hyödyntämisen lisäksi niillä katsottiin olevan potentiaalia myös höyryn tuotannossa, erilaisissa kuivausprosesseissa, esilämmityksissä sekä kaukolämmön tuotannossa. Lämpöpumpputeknologioihin lukeutuvat MVR-lämmittimet tunnistettiin potentiaalisiksi teknologiaksi, jolla oli sovelluskohteita kolmen suurimman teollisuussektorin eli metsä-, metalli- ja kemianteollisuuden lisäksi myös elintarviketeollisuudessa. Sekä lämpöpumppujen että MVR-lämmittimien TRL-taso oli korkea, ne katsottiin hyvin skaalautuviksi sekä niiden hyödyntämisen nähtiin tuovan parannuksia energiatehokkuuteen.

Korkeampien lämpötilojen tuotannossa erilaiset sähköuunit olivat paikoin potentiaalisia, mutta niiden teknologinen valmiusaste ei ollut kaikissa tapauksissa yhtä korkea. Kuitenkin esimerkiksi induktiokuumennuksella oli korkean TRL-tason sovelluskohteita kemian- ja teknologiateollisuudessa. Niiden skaalautuvuus ja parannukset energiatehokkuuteen eivät kuitenkaan olleet samalla tasolla esimerkiksi lämpöpumppujen kanssa.

Myös sähkökattiloilla nähtiin potentiaalia useilla teollisuudenaloilla ja niillä oli korkea TRL-taso. Lisäksi kemian- ja metalliteollisuuden osalta tunnistettiin erilaiset RDH- ja RDR-teknologiat korkeiden lämpötilojen tuotannossa. RDH- ja RDR-teknologiat ovat lähes kaupallistuneita, ne ovat

skaalautuvia ja ne tuovat myös parannuksia energiatehokkuuteen. Eri teollisuusalojen sähköistämiskäytäntö, TRL-tasot, skaalautuvuus sekä energiatehokkuus on esitetty alla olevassa Taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri teollisuusalojen sähköistymisen teknologiat.

Metsäteollisuus		TRL (1–9)	Skaalautuvuus (1–4)	Energiatehokkuus (1–4)
Lämpöpumput	Lämmön talteenotto ja hyötykäyttö materiaalin kuivauksessa	9	3	4
	Lämpöpumppujen käyttö tuotantoprosessissa	6	2	4
	MVR-lämmittimien käyttö mustalipeän haihdutuksessa	9	2	4
Sähkökattilat	Lämmön- ja höyryntuotanto sähkökattilalla prosessien tarpeisiin	9	3	1
Sähköuunit	Sähköinen meesauuni	4–5		
	Radiotaajuinen lämmitys	6		
	Sähköiset infrapunalämmittimet	9		
Kemianteollisuus				
Lämpöpumput	Lämmön talteenotto ja hyötykäyttö sideaineiden ja liimojen valmistuksessa	9	4	4
	Höyryn tuotanto lämpöpumpuilla	8–9	2	4
	Kuivaus- ja tislausprosessi	7	3	4
	Höyryn kulutuksen vähentäminen kemian- ja lääketeollisuuden prosesseissa MVR-lämmittimien avulla	9	1	3
Sähkökattilat	Lämmön- ja höyryntuotanto sähkökattilalla prosessien tarpeisiin	9	4	1
Sähköuunit	Prosessiuunien korvaaminen öljynjalostuksen tislauksessa	3		
	Induktiokuumennuksen sovellukset lääketeollisuuteen	9	2	3
	Liiman kuivaus sähköisillä infrapunalämmittimillä	7	4	2
RotoDynamic Heater & Reactor	Höyrykrakkauslaitosten korvaaminen petrokemianteollisuuden olefiinin tuotannossa	7	2	3
Metalliteollisuus				
Lämpöpumput	Metalliromun esilämmitys	8	3	4
	Hukkalämmön talteenotto	9	1	4
	MVR-lämmittimien käyttö metallinjalostuksessa	7	2	3
Sähkökattilat	Bayer-prosessin sähköistäminen alumiinin tuotannossa	7	1	1
Sähköuunit	Suorapelkistys vedyllä ja valokaariuuni (EAF)	7–8		
	Hehkutus ja jälkikäsittely induktiolla	5		
	Metallin sulatus	9	3	2

Ei julkaista painotuotteena

Julkaisija Motiva Oy

Copyright Motiva Oy, Helsinki, joulukuu 2023

RotoDynamic Heater & Reactor	Sähköinen prosessilämmitys	7	2	3
Teknologiaateollisuus				
Lämpöpumput	Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotantoon	9	4	4
	Hukkalämmön hyödyntäminen eristeen tuotantoprosessissa	9	1	4
Sähkökattilat	Lämpöpumppujen tukena hukkalämmön hyödyntämisessä	9	3	1
Sähköuunit	Induktiokuumennus teollisuus- ja konepajakäytössä, sekä lääketieteellisten ja hammaslääketieteellisten laitteiden valmistukseen	9	2	2
Elintarviketeollisuus				
Lämpöpumput	Hukkalämmön hyödyntäminen	9	3	4
	Täikkelyksen kuivaus	8	3	4
	MVR-lämmittimien hyödyntäminen tuotantoprosessissa	9	1	3
Sähkökattilat	Höyryn tuottaminen prosesseihin	9	3	1
Sähköuunit	Ruoan prosessointi induktiokuumennuksen avulla	7	3	3
	Elintarvikkeiden kuivaus radiotaajuisella lämmityksellä	8	2	3
	Sähköisten infrapunalämmittimien elintarvikkeiden valmistusprosessin käyttökohteet	9	3	2
Energiateollisuus				
Lämpöpumput	Rakennusten lämmitys ja jäähdytys	9	4	4
	Kiinteistöjen lämmitys hukkalämmöllä	9	3	4
	Kaukolämmön tuotanto	9	2	4
Sähkökattilat	Kaukolämmön tuotanto	8–9	4	1

Luvussa 2.2 esitellyn perusteella valittiin jatkotarkasteluun ne teknologiat, jolla nähtiin erityistä potentiaalia. Teknologioiden potentiaalia arvioitiin valmiusasteen perusteella. Jatkotarkastelussa keskityttiin niihin Taulukon 2 teknologioihin, joiden TRL-taso on korkea eli ne ovat joko kaupallistuneita tai hyvin lähellä sitä. Lämpöpumppujen lisäksi tärkeitä sähköistymisen tapoja ovat erilaiset suoran sähköistymisen teknologiat, joten jatkotarkasteluun otettiin myös sähkökattilat, erilaiset sähköuunit ja RDH- ja RDR-teknologiat.

Tarkasteltavien teknologioiden tueksi luvussa on lisäksi käsitelty erikseen sekä lämmön varastointia että energiatehokkuutta lisäävien älyratkaisujen hyödyntämistä. Lämmön varastoinnilla voidaan häviöistä huolimatta lisätä energiatehokkuutta, jos sen avulla voidaan hyödyntää lämpöä, joka muuten olisi mennyt hukkaan. Älyratkaisut ja niiden tuoma ohjattavuus ovat usein niitä teknologioita, jotka mahdollistavat energiatehokkuuden parantamiseen tähtääviä toimia. Älyratkaisujen käyttöaste on tällä hetkellä suomalaisilla pk-teollisuusyrityksillä maltillinen, joten niiden yleistymisellä on potentiaalia.

3.1 Lämpöpumput

Lämpöpumput siirtävät lämpöä matalamman lämpötilan lähteestä korkeamman lämpötilan kohteeseen. Ne soveltuvat teollisuudessa moneen eri tarkoitukseen kuivausprosesseista lämmittämiseen sekä lämmön hyödyntämiseen. Taulukossa 3 on esitetty lämpöpumppujen sovel-luskohteita teollisuudenaloittain. Lämpöpumput voivat myös tuottaa sekä jäähdytystä että läm-mitystä samanaikaisesti tai erikseen, mikä lisää niiden joustavuutta ja käyttöastetta.

Lämpöpumput parantavat teollisuuden energiatehokkuutta. Lämpöpumppujen lämpökerroin COP (coefficient of performance) on suure, joka kuvaa lämpöpumpun energiatehokkuutta. COP kertoo, kuinka paljon lämpötehoa (esim. kilowattia) lämpöpumppu tuottaa kulutettua sähköte-hoa kohden. Mitä suurempi COP on, sitä parempi on lämpöpumpun energiatehokkuus. Lämpö-pumpun lämpökerroin riippuu monista tekijöistä, kuten lämpöpumpun tyypistä, lämmönlä-hteestä sekä lämpötilaeroista. Lämpöpumput vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä, jos niillä kor-vataan fossiilisia polttoaineita ja päästöt pienenevät edelleen, mikäli lämpöpumppu käyttää uu-siutuvilla energialähteillä tuotettua sähköä.

Taulukko 3. Lämpöpumppujen sovelluskohteita teollisuudenaloittain (IRENA, 2023, mukailtu).

Teollisuudenala	Prosessi	Vaadittu lämpötila	TRL-taso
Metsäteollisuus	Kuivatus	90–240	3–7
	Keitto	110–180	3–6
	Valkaisu	40–150	3–9
	Väripoisto	50–70	9
Elintarviketeollisuus	Kuivatus	40–250	3–9
	Haihdutus	40–170	3–9
	Pastörointi	60–150	3–9
	Sterilisointi	100–140	6
	Keitto	70–120	6–9
	Tislaus	40–100	7–9
	Konsentrointi	60–80	9
	Lämpökäsittely	40–80	9
	Savustus	20–80	9
Kemianteollisuus	Tislaus	100–300	3–6
	Kompressio	110–170	3–6
	Lämpömuotoilu	130–160	3–4
	Konsentrointi	120–140	4–6
	Keitto	80–110	4–7
	Bioreaktiot	20–60	9
Autoteollisuus	Hartsivalu	20–60	6–9
Metalliteollisuus	Kuivatus	60–200	3–9
	Peittäus	20–100	7–9
	Rasvanpoisto	20–100	7–9
	Galvanointi	30–90	9
	Fosfatoi	30–90	9
	Kromatoi	20–80	9
	Puhdistus	40–70	9
Muovit	Ruiskuvalu	90–300	3–7
	Kuivatus	40–150	3–9
	Esilämmitys	50–70	9
Konetekniikka	Pintakäsittely	20–120	6–9
	Puhdistus	40–90	7–9
Tekstiilit	Värjäys	40–160	3–9
	Kuivatus	60–130	7–9
	Pesu	40–110	7–9
	Valkaisu	40–100	8–9
Puun käsittely	Liimaus	120–180	3–6
	Prässäys	120–170	3–6
	Kuivatus	40–150	3–9
	Höyrytys	70–100	7–9
	Lakkaus	50–80	9
Useita sektoreita	Veden lämmittäminen	20–110	9
	Esilämmitys	20–100	9
	Pesu	30–90	9
	Rakennusten lämmittäminen	20–80	9

Lämpöpumppujen käyttö teollisuudessa Suomessa vaihtelee eri alojen välillä. Joillakin aloilla, kuten metsäteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa ja kemianteollisuudessa, lämpöpumput ovat jo melko yleisiä, kun taas toisilla aloilla, kuten terästeollisuudessa, lämpöpumput ovat vielä harvinaisia tai kokeiluvaiheessa.

Teollisuuslämpöpumput tuottavat nykyisin maksimissaan 90–165 °C lämpöä, mikä rajoittaa niiden soveltuvuutta prosesseihin, joissa lämpötilavaatimukset ovat tätä suurempia. Lämpöpump-puratkaisut mitoitetaan ja räätälöidään kohteen mukaan.

Esimerkkejä lämpöpumppujen käytöstä eri teollisuudenaloilla Suomessa



- Paperi- ja selluteollisuus: Lämpöpumput voivat hyödyntää sellun kuivausprosessissa syntyvää hukkalämpöä ja tuottaa höyryä, jota voidaan käyttää esimerkiksi sellun valkaisuun tai lämmityksessä.
- Elintarviketeollisuus: Lämpöpumput voivat tuottaa sekä kylmää että kuumaa vettä, joita tarvitaan esimerkiksi maidon pastöroinnissa, juuston valmistuksessa, lihan käsittelyssä ja pakastamisessa.
- Terästeollisuus: Lämpöpumput voivat hyödyntää teräksen valmistusprosessissa syntyvää hukkalämpöä, jota voidaan käyttää esimerkiksi teräksen sulatuksessa, valssauksessa tai lämmityksessä.
- Korkean hyötysuhteen ansiosta lämpöpumpuilla voidaan saavuttaa teollisuudenalasta riippumatta mittavia säästöjä sekä energiankäytössä että hiilidioksidipäästöissä. Säästöjen suuruus riippuu lämpöpumpun käyttökohteesta ja sen erityispiirteistä.

Valio

Yksi esimerkki lämpöpumppujen hyödyntämisestä elintarviketeollisuudessa on Valio Oy:n Jyväskylän meijeri, jossa lämpöpumppu hyödyntää meijerin jätevettä ja tuottaa 85 °C lämpöä prosessiin ja lämmitykseen. Lämpöpumpun avulla meijeri säästää noin 3 000 MWh energiaa vuodessa, mikä vastaa noin 300 omakotitalon vuotuista lämmitysenergian kulutusta.

Keskeiset havainnot: korkean lämpötilan lämpöpumput

TRL-taso: 7–9 (riippuen sovelluskohteesta joko teknologian prototyyppi tai lopullinen toteutus testattu todellisessa toimintaympäristössä).

Keskeiset sovelluskohteet: laajat hyödyntämismahdollisuudet kaikilla teollisuussektoreilla.

Skaalautuvuus: hyvä, perustuen laajoihin hyödyntämismahdollisuuksiin eri teollisuudenaloilla.

Vaikutukset energiatehokkuuteen: mittavat perustuen pumppujen korkeisiin COP-arvoihin. COP vaihtelee arviolta välillä 1,6–7,0.

Korkean lämpötilan lämpöpumput ovat lämpöpumppuja, jotka pystyvät tuottamaan lämpöä yli 90 °C:n lämpötiloissa. Kuten muutkin lämpöpumput, ne hyödyntävät teollisuuden hukkalämpöä, jota syntyy esimerkiksi tislauks-, kuivaus- ja haihdutusprosesseissa, ja muuntavat sen hyötylämmöksi, jota voidaan käyttää uudelleen prosesseissa tai siirtää kaukolämpöverkkoon. Näin myös korkean lämpötilan lämpöpumput parantavat teollisuuden energiatehokkuutta ja vähentävät päästöjä.

Korkean lämpötilan lämpöpumppujen kehitys on ollut nopeaa viime vuosina, sillä niiden kysyntä on kasvanut energian hinnan nousun, ilmastonmuutoksen torjunnan ja uusien sääntelyjen myötä. Kehitystä on edistänyt myös uusien kylmäaineiden, komponenttien ja säätötekniikoiden kehittyminen ja markkinat ovat kasvaneet erityisesti Euroopassa. Korkean lämpötilan lämpöpumppujen käyttö teollisuudessa Suomessa on vielä melko vähäistä, mutta niillä on suuri potentiaali erityisesti metsäteollisuudessa, joka on Suomen suurin lämpöenergian kuluttaja. Metsäteollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan soveltaa esimerkiksi paperin ja sellun kuivaukseen, mustalipeän haihdutukseen ja sellun valkaisuun.

Muurlan tehdas / Jackon Finland Oy

Tehtaalla on monia korkeita lämpövirtoja. Esimerkiksi muottien jäähdytysvesi johdetaan 20 m³:n koontisäiliöön, jonka lämpötila on 50–60 °C luokkaa. Lämpöpumppu hyödyntää tätä jäähdytyskiertoa lämmönlähteenä jäähdyttäen veden 40 °C:een ja vähentää samalla tarvetta käyttää jäähdytystorneja. Lämpöpumppu tuottaa noin 95 °C vettä, jota hyödynnetään jälkikäsittelyuunien ja tilojen lämmittämiseen. Tällä tavoin korvataan höyryn ja sähkön käyttöä. Lämpöpumpulla höyrykattilan syöttövettä lämmitetään edelleen aina noin 80 °C:een saakka. Korkeita lähes 100 °C lämpötiloja tarvitaan myös raaka-aineen esikäsittelyssä ja energiaa on käytettävissä enemmän kuin tarpeellista kiinteistön lämmittämiseen. (Oilon, 2019)

- Toteutus 2019
- Oilon ChillHeat P150 -lämpöpumppu, mitoitus-teho 372 kW
- COP-arvo 3,2, vaikka tuotetaan lähes sata-asteista vettä
- Lämpöpumpun kylmäaine (tai lämmönsiirtoaine) R1234ze

Taulukossa 4 on esitetty tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevia korkean lämpötilan lämpöpumppuja. Niiden maksimilämpötilat vaihtelevat 90 asteesta 165 asteeseen ja lämmityskapasiteetit 30 kilowattista jopa 20 000 kilowattiin, ja niiden hyötysuhde vaihtelee 1,6 ja 7 välillä. COP-arvoja vertaillessa on huomattava, että pumppujen hyödyntämismahdollisuudet ja muut tunnusluvut vaihtelevat, jolloin myös COP-arvoja ei voi suoraan vertailla keskenään. Taulukossa 4 esitettyjen lisäksi myös muun muassa Siemensillä on kaupallisesti saatavilla korkean lämpötilan lämpöpumppuja, joista löytyy lisätietoja: [Heat pumps](#).

Taulukko 4. Teollisia korkean lämpötilan lämpöpumppuja (Partanen, 2022)

Valmistaja	Tuote	Maksimilämpötila [°C]	Lämmityskapasiteetti [kW]	COP
Kobe Steel	SGH 165	165	70–660	1,6–3,5
	SGH 120	120	70–370	1,6–3,5
	HEM-HR90,-90A	90	70–230	1,7–3,0
Vicking Heating Engines AS	HeatBooster S4	150	28–188	2,1–4,7
Ochsner	IWWDS R2R3b	130	170–750	4
	IWWDS ER3b	130	170–750	2,7
	IWWHS ER3b	95	60–850	2,7–5,8
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	120	250–2 500	2,4–4,5
Mayekawa	Eco Sirocco	120	65–90	2,6–3,6
	Eco Cute Unimo	90	45–110	-
Combitherm	HWW 245fa	120	62–252	3,4
	HWW R1234ze	95	85–1 301	-
Durr thermea	thermeco2	110	51–2 200	3,9
Friotherm	Unitop 22	95	600–3 600	2,7–3,7
	Unitop 50	90	900–20 000	-
Star Refrigeration	Neatpump	90	350–15 000	3–5
GEA Refrigeration	GEA Grasso	90	2 000–4 500	5
Johnson Controls	HeatPAC HPX	90	326–1 324	4
	HeatPAC Screw	90	230–1 315	-
	Titan OM	90	500–20 000	-
Mitsubishi	ETW-L	90	340–600	4,1
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	90	148–390	3,4
Oilon	ChillHeat P 30-P	120	30–450	4–6
Calefa	Hot-Level	130	100–1000	3–7
Finess	-	120	100–5 000	3–6



Keskeiset havainnot: MVR-lämmittimet

TRL-taso: 7–9 (riippuen sovelluskohteesta)

Keskeiset sovelluskohteet: hyödyntämismahdollisuuksia mm. höyryn käytön vähentämisessä kemianteollisuudessa, mustalipeän haihdutuksessa metsäteollisuudessa, sekä metallinjalostuksessa.

Skaalautuvuus: hyvä, perustuen yllä mainittuihin sovelluskohteisiin.

Vaikutukset energiatehokkuuteen: todella suuret perustuen korkeisiin COP-arvoihin, COP jopa yli 10.

MVR-lämmittimet ovat yksi tapa sähköistää teollisuuden lämmitysprosesseja ja parantaa energiatehokkuutta. MVR tarkoittaa mekaanista komprimointia (mechanical vapour recompression), joka on menetelmä, jossa höyryä kompressoidaan ja nostetaan sen painetta ja lämpötilaa. Toimintaperiaate on siis sama kuin lämpöpumpuissa. MVR-lämmittimet voivat hyödyntää prosessista syntyvää matalapaineista höyryä ja muuttaa sen korkeapaineiseksi höyryksi, jota voidaan käyttää uudelleen lämmitykseen.

MVR-lämmittimillä voidaan päästä hyvin suuriin energiatehokkuusparannuksiin ja hyötysuhteisiin. Niitä voidaan hyödyntää etenkin haihdutusprosesseissa, jotka ovat keskeinen prosessivaihe mm. elintarviketeollisuudessa, sellu- ja paperiteollisuudessa sekä kemianteollisuudessa (Adven, 2023).

Kuten muutkin lämpöpumput, MVR-lämmittimet vähentävät primäärienergian kulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjä korvaten fossiilisia polttoaineita. Ne vähentävät lämpöhäviöitä ja parantavat lämmön talteenottoa, sillä ne kierrättävät höyryä suljetussa järjestelmässä. Lisäksi ne vähentävät jäähdytysveden tarvetta ja jäteveden määrää, sillä ne alentavat höyryn kondensoitumispainetta. MVR-lämmittimillä on kuitenkin korkeat investointi- ja ylläpitokustannukset, sillä ne edellyttävät tehokkaita ja kestäviä kompressoreita ja lämmönvaihtimia. Ne ovat myös herkkiä prosessin parametrien vaihteluille.



Finnfeeds Finland

Advenin toteuttama MVR-järjestelmä on ollut käytössä vuodesta 2018 Finnfeeds Finlandin Naantalissa, jossa tuotannon kasvu johti suuremman haihdutuskapasiteetin tarpeeseen. Uusi MVR-haihduutamo vähensi höyryn käyttöä 40 % ja johti 30 % laskuun kokonaisenergiankulutuksessa. Myös tehtaan hiilidioksidipäästöt laskivat 16 000 tonnia vuositasona. (Adven, 2018)

Keskeiset havainnot: sähkökattilat



TRL-taso: 9

Keskeiset sovelluskohteet: lämmön tuotanto energiateollisuudessa.

Skaalautuvuus: potentiaalia energiateollisuuden lisäksi useilla eri teollisuudenaloilla.

Vaikutukset energiatehokkuuteen: hyvät, perustuen jopa 99 prosentin hyötysuhteeseen.

Sähkökattilat tuottavat höyryä tai kuumaa vettä sähköllä. Ne voivat hyödyntää lämmöntuotantoon uusiutuvaa sähköä, kuten tuuli- tai aurinkovoimaa, ja ne ovat yleensä helposti säädettäviä ja huoltovapaita. Sähkökattiloiden käyttö voi myös vähentää polttoaineiden kuljetus- ja varastointikustannuksia sekä polttoaineen hintavaihtelun riskiä.

Sähkökattiloiden energiatehokkuus riippuu kuitenkin sähkön tuotantotavasta ja siirtohäviöistä. Jos sähkö tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, sähkökattiloiden käyttö lisää kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäksi sähkökattiloiden investointikustannukset ovat yleensä korkeammat kuin perinteisten polttoainekattiloiden, mutta kuitenkin alhaisemmat kuin esim. lämpöpumppujen.

Sähkökattiloita käytetään nykyään erityisesti energiateollisuudessa korvaamassa öljyllä ja kaasulla toimivia varavoimaloita sekä tuottamaan kaukolämpöä silloin, kun käytetyn sähkön hinta on edullista, esim. tuulivoimatuotannon runsaan kapasiteetin aikana.

Toisaalta sähkökattilat tai niihin rinnastettavat laitteistot eivät ole vielä kovin tyypillinen ratkaisu muiden teollisuussektoreiden lämmöntuotannossa. Elintarviketeollisuudessa on jonkin verran sähkökäyttöisiä höyrynkehittämiä puhdashöyryn pienimuotoiseen tarpeeseen. Samoin elintarviketeollisuudessa sähkökattiloita voidaan käyttää esimerkiksi pastörointiin ja sterilointiin. Laajemmin ei ole nähty kannattavana tuottaa höyryä sähköllä. Esimerkiksi metalliteollisuudessa sähkökattiloita käytetään metallien sulattamiseen ja lämmittämiseen. Kemiateollisuudessa sähkökattiloita voidaan käyttää prosessilämmön tuottamiseen kemiallisissa reaktioissa. Teknologiateollisuudessa sähkökattiloita voidaan käyttää esimerkiksi komponenttien lämmitykseen ja kuivaamiseen. (Motiva, 2021)

Sähkökattilat ovat yleistyneet viime vuosina ja kehityksen uskotaan jatkuvan tulevaisuudessakin sähkön hinnan vaihteluiden vuoksi. Lämmön- ja höyryntuotanto sähkökattilalla voi olla hetkellisesti kannattavaa silloin, kun tuulivoiman ylituotanto laskee sähkön hintaa, sillä sähkökattilan hyötysuhde on tyypillisesti hyvin korkea (> 99 %). Jatkossa, kun sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt ovat matalat, joillain toimialoilla sähkökattila voi olla helpoin ja kustannustehokkain ratkaisu tuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Sähkökattilan investointikustannukset ovat maltilliset ja sähkökattilan toiminta vastaa muiden kattiloiden toimintaa ilman savukaasuhäviöitä. (Motiva, 2021)

Sähkökattiloiden kannattavuuden esteenä voi olla sähköliittymän koko tai tehtaan sähköverkon rajoitukset, kuten lämpöpumpuillakin. Sähkökattiloilla rajoitukset tulevat vielä lämpöpumppuakin helpommin vastaan, sillä koko lämpöteho tuotetaan sähköllä. (Motiva, 2021)

Lielahden sähkökattila / Tampereen Energia

Lielahden sähkökattila toimii kuten jättimäinen vedenkeitin, mutta siinä vesi kiertää kahdessa tasossa. Kattilan yläosassa vesi lämmitetään 125-asteiseksi. Kiehuva vesi johdetaan kattilan alaosaan, josta lämpö luovutetaan kaukolämpövedeen putkiston ja lämmönvaihtimen välityksellä. Kun lämpö on luovutettu, vesi johdetaan takaisin kattilan yläosaan, jossa se lämmitetään uudelleen. Sähkökattilaa tullaan hyödyntämään läpi vuoden. Käyttö kuitenkin painottuu hetkiin, jolloin tuulivoimalla tuotettua sähköä on paljon saatavilla. Sähköpöytätilanteessa kattilaa ei käytetä, vaan silloin lämpöä tuotetaan muilla menetelmillä. Sähkökattila on myös merkittävä huoltovarmuusinvestointi pitkälle tulevaan, sillä se tulee olemaan käytössä jopa seuraavat 20 vuotta. Sähkökattila voidaan ottaa käyttöön tarvittaessa nopeastikin, sillä täyden tehon saavuttamiseen menee vain 15 minuuttia. (Tampereen Energia, 2022)

- Valmistaja Parat Halvorsen AS, Norja
- Rakentamisen kustannukset noin kolme miljoonaa euroa
- Teho 45 MW
- Korkeus 6,7 m, leveys 3,1 m, tilavuus: 25,7 m³
- Paino: Kuivapaino: 15 t; Paino käyttötilassa: 24,5 t; Täydessä vesilastissa: 40,7
- Käynnistysaika 0...100 %: 5...15 min



Keskeiset havainnot: sähköiset prosessiuunit

TRL-taso: 4–9 (riippuen teknologiasta)

Keskeiset sovelluskohteet: laajalti eri teollisuudenaloilla, kuten metalli-, metsä- ja kemi-
anteollisuudessa.

Skaalautuvuus: hyvä, perustuen yllä mainittuihin sovelluskohteisiin.

Vaikutukset energiatehokkuuteen: tapauskohtaiset: hyötysuhde vaihtelee 50 ja 90 pro-
sentin välillä.

Erilaisia prosessiuuneja käytetään laajalti eri teollisuudenaloilla, ja niihin on saatavilla erilaisia sähköistymisratkaisuja, joiden teknologinen valmiusaste vaihtelee. Sähkövastusuunien ohella kaikkein kehittyneimpiä teknologioita ovat infrapuna-, mikroaalto- ja radiotaajuusteknologiat, joilla päästään alle 1 000 celsiusasteen lämpötiloihin. (Partanen, 2022)

Korkeimmat lämpötilat saavutetaan induktio-, sähkökaari- ja plasmauuneilla. Nämä teknologiat tarvitsevat vielä kehitystyötä, jotta ne voivat yleistyä teollisuudessa. Prosessiuunien sähköistämisellä saavutetaan myös energiatehokkuushyötyjä, sillä niiden lämmönsiirto on tehokkaampaa kuin perinteisten prosessiuunien. Sähköisten prosessiuunien käyttölämpötiloja ja hyötysuhteita on esitetty alla olevassa Taulukossa 5. (Partanen, 2022)

Taulukko 5. Sähköisten prosessiuunien käyttölämpötilat ja hyötysuhteet (Partanen, 2022)

Lämmitysmuoto	Käyttölämpötila [°C]	Hyötysuhde [%]
Infrapuna	500	60–90
Mikroaalto ja radiotaajuus	alle 1 000	50–85
Induktio	1 450	50–90
Vastus	677	50–95
Sähkökaari	1 600	60–90
Plasma	1 600–2 000	50–90



Imatran terästehdas / Ovako Imatra Oy

Ovakon terästehtaalla Imatralla on tehty merkittävä energiatehokkuushanke prosessiuuniin liittyen. Hanke toteutettiin tuotantolaitoksen lämpökäsittelyprosessissa, jossa terästuotteisiin saadaan asiakkaiden haluamat ominaisuudet esimerkiksi lujuudessa ja sitkeydessä. Vanhassa järjestelmässä uunin lämpö tuotettiin poltintekniikalla, jossa polttoaineena käytettiin maakaasua. Energiaa kului runsaasti myös ilmassa olevan typen kuumentamiseen. Hankkeessa vanha kuumennusjärjestelmä vaihdettiin säteilysin perustuviin sähköelementteihin, joiden hyötysuhde on huomattavasti parempi.

Hankkeen avulla Ovako Imatran terästehdas on pystynyt kaksinkertaistamaan tuotantokapasiteetin käytännössä samalla energiamäärällä.
(Energiatehokkuussopimukset, 2020)



Keskeiset havainnot: RDH ja RDR

TRL-taso: 7

Keskeiset sovelluskohteet: korkeiden lämpötilojen tuottaminen eri prosessien tarpeisiin (RDH) ja höyrykrakkauslaitosten korvaaminen petrokemianteollisuuden olefiinin tuotannossa (RDR)

Skaalautuvuus: maailmanlaajuisesti hyvät, potentiaalia erityisesti kemianteollisuudessa

Vaikutukset energiatehokkuuteen: 30 % parannus perinteisiin menetelmiin verrattuna

Coolbrookin RotoDynamic Heater (RDH) on sähköinen prosessilämmitysteknologia, joka pystyy saavuttamaan 1700 °C:n lämpötilan ilman fossiilisten polttoaineiden polttamista. RDH:ssa ilma, typpi ja prosessikaasut kuumennetaan korkeisiin lämpötiloihin, ja lämmitetty kaasu käytetään lämmittimen ulkopuolella korvaamaan fossiilisten polttoaineiden polttaminen prosessilämmityksessä. RDH:n avulla voidaan korvata fossiiliset polttoaineet puhtaalla sähköistämällä teräksen, raudan, sementin ja kemikaalien raskaassa teollisuustuotannossa. Se on tällä hetkellä ainoa sähköistämisen teknologia, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita käyttävät uunit teollisuusprosesseissa. (Coolbrook, 2023b)

RotoDynamic Reactor (RDR) on teknologiaa, jolla on mahdollista korvata fossiilisia polttoaineita käyttävät höyrykrakkauslaitokset ja saavuttaa 100-prosenttisesti hiilidioksidipäästötön olefiinituotanto petrokemianteollisuudessa. Perinteisessä höyrykrakkauksessa syöttöaineseos lämmitetään reaktiovyöhykkeen ulkopuolelta. RotoDynamic Reactorissa (RDR) puolestaan roottorin nopeasti pyörivät lavat tuottavat lämpöenergiaa seoksen lämmittämiseksi reaktiovyöhykkeen sisällä nopeasti ja hyvin tehokkaasti. Käyttämällä uusiutuvaa sähköenergiaa, RDR on tekniikka, jolla pystytään vähentämään 100 prosenttia prosessin suorista päästöistä. (Coolbrook, 2023b)

Coolbrookin lisäksi myös BASF pilotoi sähköistä höyrykrakkauslaitosta. BASF, Sabic ja Linde ovat kehittäneet yhteistyössä pilottilaitoksen Saksaan, ja laitos pyritään ottamaan käyttöön vuoden 2023 loppuun mennessä. Teknologian energiatehokkuudesta ei olla julkistettu tietoja, mutta se vähentää prosessin päästöjä 90 prosenttia. (BASF, 2022)

Coolbrookin RDH-teknologian TRL-luokitus on tällä hetkellä arviolta 7. Vuonna 2023 Coolbrook saattoi onnistuneesti päätökseen teknologian laajamittaisen pilottitestauksen ensimmäisen vaiheen Brightlands Chemelotin kampuksella Alankomaissa. Päättynyt testivaihe osoitti RDH-teknologian valmiudet teolliseen käyttöön korkean lämpötilan prosessilämmityksessä, minkä ansiosta teknologia voi edetä teollisen mittakaavan hankkeisiin asiakaskohteissa. Pilottitesteissä on päästy 1000 °C:n lämpötilaan, mikä ylittää jo useilla sadoilla asteilla perinteisten resistiivisten lämmittimien lämpötila-alueen. Testit ovat myös vahvistaneet Coolbrookin teknisen polun aina 1700 °C:een asti, mikä kattaa yli 95 prosenttia lämpötila-alueesta, jota tarvitaan teollisuuslämmitysmarkkinoilla. Seuraavassa testivaiheessa Coolbrook pyrkii demonstroimaan RotoDynamic Reactor (RDR) -teknologiaa, jonka tarkoituksena on hiilidioksidipäästöjen vähentäminen petrokemian teollisuudessa. Teknologia voidaan jälkiasentaa olemassa oleviin tuotantolaitoksiin, ja teknologian odotetaan olevan valmis kaupalliseen käyttöön vuonna 2025. (Coolbrook, 2023c)

Coolbrookin RotoDynamic-teknologian yhteenlaskettu maailmanlaajuinen CO₂-päästöjen vähentämispotentialiaali on yli 2,4 miljardia tonnia vuodessa, mikä vastaa 30 prosenttia maailmanlaajuisista teollisuuden CO₂-päästöistä ja 7 prosenttia kaikista maailmanlaajuisista CO₂-päästöistä. (Coolbrook, 2023c).

**Valmistusyksikkö, Intia / UltraTech Cement Limited,
Intian suurin sementin ja valmisbetonin valmistaja & Coolbrook**



UltraTech Cement Limited ja Coolbrook sopivat kehittävänsä yhdessä hanketta Coolbrookin RotoDynamic Heater™ (RDH) -teknologian käyttöönottamiseksi yhdessä UltraTechin sementinvalmistusyksikössä. RDH-teknologia käyttää uusiutuvista lähteistä peräisin olevaa sähköä sementinvalmistuksen lämmitysprosesseissa ja poistaa tarpeen käyttää fossiilisia polttoaineita. Tämä hanke on osa UltraTechin pyrkimyksiä hyödyntää huipputeknisiä teknologiaratkaisuja nopeuttaakseen toimintojensa hiilidioksidipäästöjen vähentämistä vuoden 2050 Net Zero -sitoumuksensa mukaisesti. RDH-teknologian onnistuneen käyttöönoton odotetaan vähentävän hiilipohjaisen lämpöenergian käyttöä sementin tuotantoprosesseissa. Hankkeessa Coolbrookin RDH-teknologiaa on tarkoitus käyttää aluksi korvaamaan fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan energian käyttöä vaihtoehtoisten polttoaineiden kuivauksessa, ja hankkeesta saatuja kokemuksia käytetään sen laajentamiseen sementin tuotantoprosesseissa. (Coolbrook, 2023d)

**Keskeiset havainnot: lämmön varastointi****TRL-taso:** 4–9**Keskeiset sovelluskohteet:** soveltuu kaikille teollisuudenaloille**Skaalautuvuus:** hyvä, perustuen laajoihin hyödyntämismahdollisuuksiin.**Vaikutukset energiatehokkuuteen:** varastojen hyötysuhde vaihtelee 90 ja 95 % välillä, mutta ne voivat parantaa välillisesti energiatehokkuutta, kun esim. hukkalämmöt saadaan paremmin käyttöön.

Lämmön varastointiratkaisujen hyödyntäminen voi parantaa energiatehokkuutta teollisuudessa, vähentää sektorin päästöjä ja kasvattaa kustannustehokkuutta.

Suurin osa teollisuuden energiankäytöstä kuluu lämmöntuotantoon eri prosesseja varten. Lämmön varastointi mahdollistaa uusiutuvien energianlähteiden käyttöä teollisuudessa muiden sähköistymisratkaisujen ohella: kun varastoja käytetään tasaamaan uusiutuvien energianlähteiden vaihtelevaa sähköntuotantoa, voidaan lämpöä käyttää eri aikaan, kun sitä tuotetaan. Tämä jousto auttaa vaihtelevaa tuotantoa vastaamaan usein tasaiseen teollisuuden kysyntään. Lämpövarastot voivat olla joko lyhytaikaisia tai pitkäaikaisia kausivarastoja.

Teollisuusprosesseissa syntyy usein hukkalämpöä, jota ei voida hyödyntää heti tai joka muuten menisi hukkaan. Jos hukkalämpö varastoidaan, sitä voidaan käyttää uudelleen lämmityksessä, jäähdytyksessä, sähköntuotannossa tai muissa prosesseissa. Näin lämpövarastot auttavat osaltaan parantamaan teollisuuden energiatehokkuutta, vaikka itse varastojen hyötysuhde vaihtelee teknologian mukaan 50 ja 95 prosentin välillä.

Eri varastointiratkaisut luokitellaan tyypillisesti niiden lämpötilan tai varastointiteknologian perusteella. Matalan lämpötilan lämpövarastot 0–100 °C:n lämpötila-alueella keräävät lämpöä (tai jäähdytystä) tunneista kuukausiin ja vapauttavat varastoidun lämmön tai jäähdytyksen myöhemmin. Korkean lämpötilan lämpövarastot 100–1000 °C:n lämpötila-alueella soveltuvat eri teollisuusprosesseihin niiden vaaditusta lämpötilasta riippuen.

Varastointiteknologiat luokitellaan kolmeen pääryhmään. Tuntuvan lämmön varastointiin käytetään suuren lämpökapasiteetin materiaalia, esimerkiksi vettä (vain matala lämpö), kiveä tai keramiikkaa. Latentin lämpöenergian varastossa (faasimuutosvaraajassa) aine sitoo tai luovuttaa energiaa olomuodon muutoksen (faasimuutoksen) yhteydessä. Termokemiallisessa lämpövarastossa varastoidaan energiaa joko palautuvan kemiallisen reaktion lämpönä tai absorptioprosessina. Kaikilla varastointiteknologioilla on sovelluskohteita sekä matalissa että korkeissa lämpötiloissa, mutta niiden TRL-aste vaihtelee. Lämmön varastointiteknologiat on esitetty Taulukossa 6.

Taulukko 6. Lämmön varastointiteknologioita (mukailtu lähteestä IRENA, 2023).

Pääryhmä	Lämpötila [°C]	Teknologia	Tehokkuus [%]	Varastoinnin kesto	TRL
Tuntuvan lämpöenergian varastointi	< 0–100	Vesivaraajat, maalämpövarastot	50–90	tunneista kuukausiin	6–9
	< 0–1000	Kiinteän aineen varastot, esim. kivi, sementti	50–90	tunneista kuukausiin	6–9
Latentin lämpöenergian varastointi	< 0–>100	jäävarastot, faasimuutosmateriaalit	75–90	tunteja	6–9
	50–850	faasimuutosmateriaalit	75–90	tunneista päiviin	3–6
Termokemiallinen varastointi	0–100	absorptioprosessit	50–65	tunneista noin kuukauteen	3–6
	500–900	absorptioprosessit	75–100	tunneista kausittaiseen	1–4

3.3.1 Tuntuvan lämpöenergian varastointi

Tällä hetkellä käytetyin tapa varastoida lämpöä on varastoida sitä materiaaliin sen lämpötilaa muuttamalla. Yksi yleinen tapa varastoida lämpöä teollisuudessa on käyttää vesivaraajia. Vesivaraajia voidaan käyttää esimerkiksi aurinkolämpöjärjestelmissä, joissa aurinkokeräimet keräävät lämpöenergiaa auringosta ja siirtävät sen veteen. Vesivaraajat ovat kaupallistunutta ja verrattain halpaa teknologiaa, mutta niiden tehokkuus vaihtelee. Vettä hyödynnetään myös maalämpövarastoissa, joiden etuna ovat muun muassa pitkät varastointiajat, alhaiset häviöt ja maalämmön ympärivuotinen saatavuus. Maalämpövaraajien haittoja ovat muun muassa maalämpöpumppujärjestelmän suuret investointikustannukset, maaperän tai kallioperän ominaisuuksien vaihtelu ja ympäristövaikutukset.

Teollisuudessa vesivaraaja on usein osa lämpöpumppujärjestelmää, joka ottaa talteen teollisuusprosessien hukkalämpöä tai lämpöä esim. rakennusten poistoilmasta. Muita lämmön varastointiratkaisuja ei tällä hetkellä tunnistettu käytettävän Suomen teollisuudessa.

Korkeampiin lämpötiloihin päästään kiinteiden aineiden väliainevarastoilla. Esimerkiksi kiviainesta tai hiekkaa voidaan käyttää lämmön varastointiin.



Helen Oy

Helen on rakentanut Mustikkamaan alle vesivaraston osaksi Helsingin kaukolämpöjärjestelmää. Varastoa käytetään tasaamaan verkon kulutushuippuja. Lämpö varastoidaan veden säiliössä, jonka tilavuus on 260 000 kuutiometriä. Kausilämpövarasto vähentää Helenin hiilidioksidipäästöjä noin 21 000 tonnia vuodessa. (Helen, 2021)

Valio

Valio asensi vuonna 2022 Lapinlahden tehtaalleen lämpöpumppujärjestelmän ja savukaasulauhduttimen, jonka avulla se vähensi lämmönkulutustaan 25 000 MWh vuodessa, yli 10 prosenttia. Myös päästöt vähenivät noin 10 000 CO₂-tonnia vuodessa. Savukaasulauhdutin ottaa lämpöä talteen tehtaan piipusta. Lämpöpumppujen avulla saadaan 80-asteista kuumaa vettä, jota hyödynnetään sekä tehtaan prosesseissa että talotekniikasta. Yli jäävä kuuma vesi tallennetaan lämpöakkuihin. (Valio, 2022)



Sähköenergian varastointi lämpönä hiekkaan / lar Night Energy Oy ja Vatajankoski

Vatajankoski ja Polar Night Energy ovat rakentaneet hiekkaan perustuvan lämpövaraston, joka on tällä tekniikalla toteutettuna maailman ensimmäinen kaupallinen ratkaisu sähköenergian varastoimiseksi lämpönä. Varasto, jonka lämmitysteho on 100 kW ja varastointiskyky 8 MWh, tarjoaa lämpöä Kankaanpään kaukolämpöverkkoon. Lämpövarasto sijaitsee Vatajankosken voimalaitosalueella ja Vatajankoski käyttää varastoitua lämpöä omistamiensa suurteholaskentakapasiteetin vuokraamiseen tarkoitettujen dataservereiden tuottaman hukkalämmön lämpötilan nostamiseen. Servereistä saadun 60-asteisen hukkalämmön lämpötilaa täytyy nostaa vuodenajasta riippuen 75–100 asteeseen ennen sen syöttämistä kaukolämpöverkkoon.

Varsinainen lämpövarasto on noin neljä metriä leveä ja seitsemän metriä korkea terässäiliö, jonka sisälle on asennettu Polar Night Energyn patentoitu automaattinen lämmönsiirtojärjestelmä. Terässäiliö on täytetty hiekalla ja lämpövarasto on yhdistetty sähkö- ja kaukolämpöverkkoihin. (Vatajankoski, 2021)

3.3.2 Latenttivarastot ja termokemialliset varastot

Latentit varastot eli faasimuutosvaraajat perustuvat aineen olomuodon muutokseen ja siitä vapautuvaan energiaan. Faasimuutosvaraajien etuja ovat muun muassa suuri energiatiheys, pieni tilantarve ja vakaa varastointilämpötila. Ne ovat kuitenkin väliainevarastoja kalliimpia, ja varsinkin korkeilla lämpötiloilla niiden TRL on alhaisempi.

VTT on kehittänyt faasimuutosmateriaaleja, jotka voivat varastoida lämpöä jopa 200 °C:n lämpötiloissa. Näitä materiaaleja voidaan hyödyntää esimerkiksi metallurgian, kemianteollisuuden tai sementtiteollisuuden hukkalämmön varastoinnissa ja hyödyntämisessä.

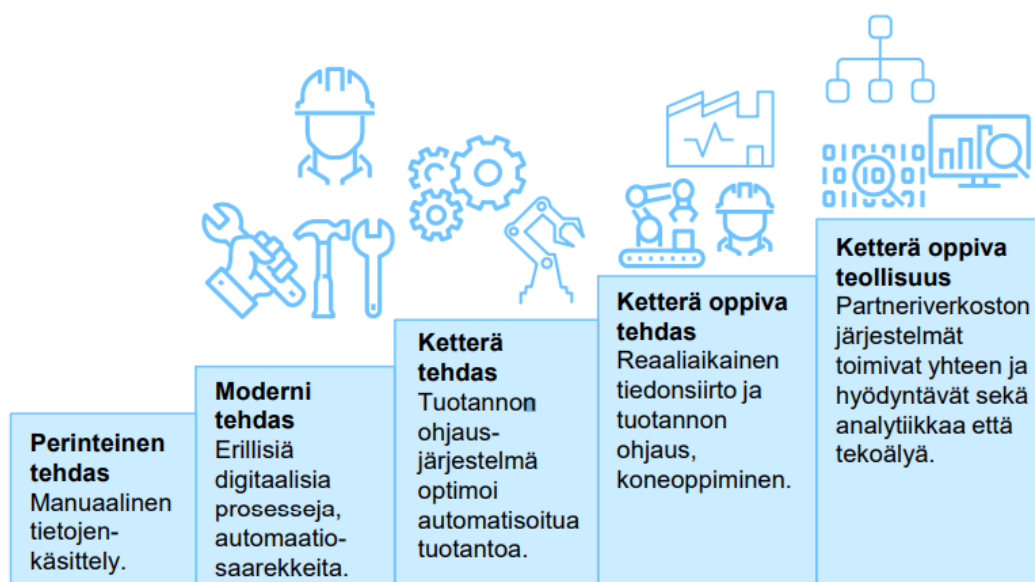
Termokemiallisilla varastoilla saavutetaan tuntuva lämmön tai latentin lämmön varastoja korkeampi energiatiheys. Ne ovat myös hyvin tehokkaita, ja mahdollistavat korkeita lämpötiloja. Termokemialliset lämpövarastot perustuvat joko palautuviin kemiallisiin reaktioihin tai absorptioprosessiin. Termokemialliset varastot eivät ole valmiusasteeltaan samalla tasolla väliaine- tai latenttivarastojen kanssa.

3.4 Energiatehokkuus ja älyratkaisut

Älyratkaisuilla tarkoitetaan digitaalisia teknologioita ja automaatiota, jotka voivat parantaa prosessien ja sähkönkäytön tehokkuutta, laatua ja joustavuutta kaikilla teollisuussektoreilla. Ratkaisut vaihtelevat toimialan mukaan, mutta yleisesti niitä voidaan jaotella esimerkiksi seuraaviin alalajeihin:

- Älykkäät mittarit ja sensorit, jotka keräävät ja välittävät tietoa sähkönkulutuksesta ja -tuotannosta reaaliaikaisesti.
- Älykkäät ohjausjärjestelmät, jotka analysoivat ja optimoivat prosesseja, energiatehokkuutta, taloudellisuutta, materiaalin kulutusta, laatua tai muuta haluttua suuretta tai kokonaisuutta algoritmien ja tekoälyn avulla.
- Älykkäät verkot, jotka yhdistävät eri tietolähteet, järjestelmät, sidosryhmät, toimittajat, kuluttajat ja mahdollistavat optimaalisen ja joustavan toiminnan jonkin tietyn kokonaisuuden kannalta.
- Älykkäät varastointijärjestelmät, jotka tasaavat esim. energian kysynnän ja tarjonnan vaihteluita ja parantavat toimitusvarmuutta.

Älyratkaisut ovat osa laajempaa digitaalista murrosta, joka näkyy teollisuussektorilla kehityksenä yksittäisten yritysten manuaalisesta tietojen hallinnasta kumppaniverkoston älykkääseen tietojenkäsittelyyn ja analytiikkaan. Digitalisaatiota voidaan kuvata portaittaisena prosessina, jolla edetessä erilaiset älyratkaisut otetaan käyttöön ensin erillisissä prosesseissa ja lopuksi yritysverkostojen tasolla. Portaittainen prosessi on esitetty Kuvassa 1. (VTT, 2021)



Kuva 1. Teollisuuden digitalisaatioportaat (VTT, 2020).

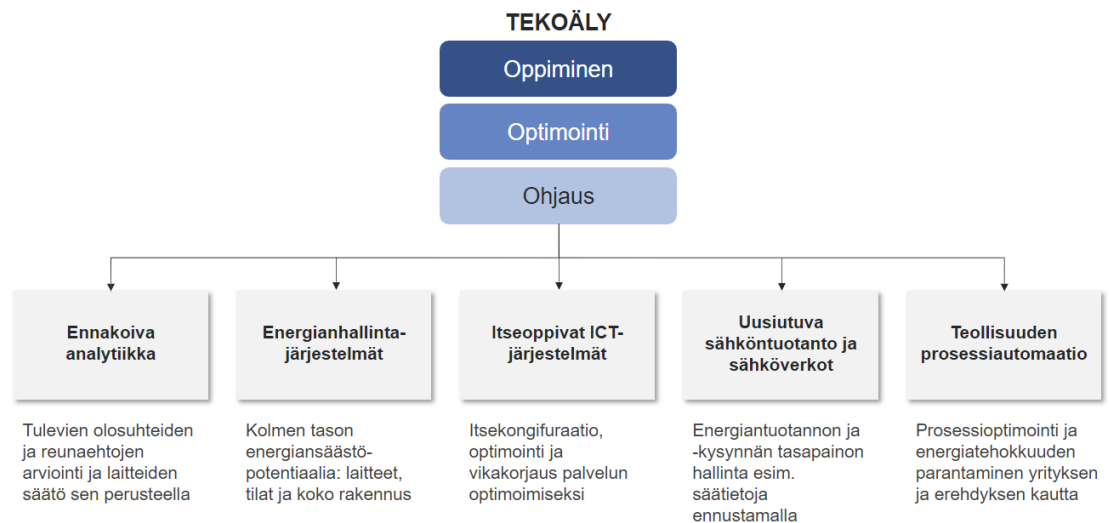
VTT on analysoinut suomalaisen valmistavan pk-teollisuuden digitalisaatiotasoa vuonna 2021 tehdyssä raportissa. Vaikka digitalisaatioon tehdyillä investoinneilla havaittiin positiivinen korrelaatio liiketuloksen kanssa niillä yrityksillä, jotka olivat investointeja tehneet, yleisesti yritysten digitalisaatio oli vielä alhaisella tasolla. Tyypilliset haasteet ratkaisujen käyttöönotossa liittyivät riittämättömään ymmärrykseen ratkaisujen hyödyistä, riittämättömiin resursseihin sekä kustannustehokkaan toteutuksen haasteisiin. (VTT, 2021) Teollisuuden valmistaviin prosesseihin liittyviä ratkaisuja on esitelty alla olevassa Taulukossa 7.

Taulukko 7. Valmistavan teollisuuden älyratkaisuja (VTT, 2021, mukailtu).

Valmistamisen osa-alue	Teknologia
Tuotantoympäristö	Asemoinnin (lay-out) kehittäminen ja tuotantosolujen muodostaminen
	Materiaalivirtojen ja valmistuksen optimointi
Automaatio	Uusien automaatiota hyödyntävien valmistustekniikoiden valinta
	Tuotannon automaation käyttöönotto valmistusprosesseissa
	Valmistussolujen online-seurannan kehittäminen
	IoT-havaintojen hyödyntäminen valvomattoman automaation tukemiseksi
	Valvomaton automaattinen käyttö
Robottiikka	Robottiikan lisääminen konepalvelussa ja hitsauksessa
	Ihmisen ja robotin välisen vuorovaikutuksen kehittäminen
Tuotannon valvonta	ERP:n ja MES:n yhteistoiminta, eli tuotannonohjauksen yhdistäminen suoraan koneiden ohjaukseen
	Paperittomuus tuotannon valvonnassa
Laatu ja jäljitettävyyys	Tuotteiden ja osien digitaalinen tunnistaminen, laadunvarmistus ja jäljitettävyyys
	Tuotteiden merkitseminen viiva-, RFID- tai QR-koodilla tuotannossa

Tekoälyä voidaan hyödyntää teollisuudessa energiantuotannosta sen loppukulutukseen asti luoden energiatehokkaita ratkaisuja matkalla. Tekoälyn sovellusmahdollisuuksia on esitetty Ku-
vassa 2. Tekoälyn hyödyntäminen teollisuudessa ja sen eri prosesseissa on vielä hyvin rajallista, vaikka sen tuoma potentiaali on suuri. Tekoälyä voidaan hyödyntää energiatehokkuuden paran-
tamisessa laajalti eri järjestelmissä:

1. Ennakoiva analytiikka
2. Energianhallintajärjestelmät
3. Itseoppivat ICT-järjestelmät
4. Uusiutuva sähköntuotanto ja sähköverkot
5. Teollisuuden prosessiautomaatio.



Kuva 2. Tekoälyn sovellusmahdollisuuksia teollisuuden energiatehokkuudessa (mukailtu lähteestä Lee, 2022).

Suomalaisesta teollisuudesta on saatavilla niukasti käytännön esimerkkejä älyteknologioiden hyödyntämisestä. Tekoäly kehittyy jatkuvasti ja kehitys tulee avaamaan tulevaisuudessa uusia polkuja energiatehokkuuden parantamiseen. (Rissanen, 2023). Taloteknisten järjestelmien, tietojärjestelmien ja energiavarastojen lisäksi tekoäly voi olla hyödyllinen myös infrastruktuurin ja prosessien optimoinnissa ja kunnossapidossa. Tekoäly kykenee esimerkiksi tunnistamaan alueet, joissa tapahtuu energiavuotoja, sekä tarkastamaan prosessien ja laitteiden kunnon. Tekoäly kykenee myös oppimaan laitteiden kulumisesta ja se pystyy varoittamaan ennakkoon huoltotarpeesta. Nämä edesauttavat prosessien ja yksittäisten laitteiden käytettävyyttä ja edistävät energiatehokkuutta. (Milone, 2022).

Tekoälyn hyödyntämisellä on mahdollisuuksia myös energiateollisuudessa. Uusiutuvan energian yksi suurimmista haasteista on tuotannon ajallinen vaihtelu ja tuotannon ennustamisen epävarmuus. Tekoäly kykenee keräämään säämalleja, säädätä sekä reaaliaikaisia paikallisia säätietoja, joiden avulla se pystyy ennustamaan tuotettavan energian. Näin tuottajat voivat tehdä tarvittavia muutoksia sähkön tuottamiseen sekä myyntiin saamansa säädätan avulla. Saatu säädätä kyetään tekoälyn avulla lähettämään myös kuluttajille, jolloin heidän on helppo optimoida omaa energiankulutustaan ja -tuotantoaan sekä sähköverkoille, jolloin ne voivat optimoida energian varastoinnin suuren kysynnän varalle. (Milone, 2022).



SSAB Hämeenlinnan tehdas / SSAB & Caverion

SSAB:n Hämeenlinnan tehdas halusi minimoida tuotannon häiriöiden määrän ja niiden keston sekä varmistaa tuotteiden laadun optimoimalla tuotantoprosessinsa. Samalla tavoitteena oli parantaa prosessien turvallisuutta, energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Tässä apuna toimii Caverion Intelligence Anomaly Detection -palvelu, joka käyttää olemassa olevaa prosessidataa ja koneoppimista poikkeavuuksien varhaiseen tunnistamiseen koko tuotantoprosessin aikana. Caverion Intelligence on koneoppimispalvelu, joka analysoi laitoksen prosessidataa ja tunnistaa prosessissa ilmeneviä poikkeavuuksia. Syväoppiminen kykenee prosessoimaan tarkkaa dataa ja tuhansia mittaustuloksia reaaliaikaisesti. Se tunnistaa virheet yhdistämällä eri datapisteet ja ymmärtämällä prosessin ominaisuuksia, kuten linjaston nopeutta ja tuotetta. Järjestelmä oppii automaattisesti datan ja käyttäjäpalautteen avulla, mikä varmistaa jatkuvan sopeutumisen prosessin muutoksiin. Kun laitevikojen ja poikkeavien prosessiparametrien kaltaiset ongelmat voidaan tunnistaa automaattisesti jo aikaisessa vaiheessa, pystyy huolto toimimaan proaktiivisesti. Näin voidaan ehkäistä myös kapasiteetin laskuja, hävikkiä ja laatuongelmia. (Caverion, 2019)

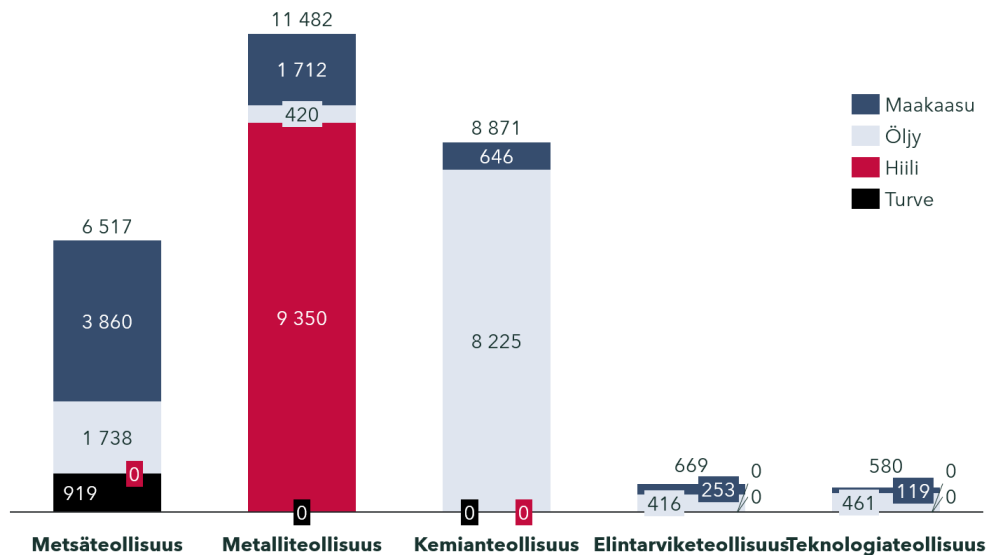
Stockholm Exergi & Caverion

Stockholm Exergi tuottaa kaukolämpöä Tukholman alueelle, ja hyödyntää Caverionin kehittämää tekoälyteknologiaa energiantuotannon valvontaan ja poikkeamien tunnistamiseen. Ratkaisu on parantanut Stockholm Exergin tuottavuutta ja kustannustehokkuutta. (Caverion, 2023)

Tässä osiossa tarkastellaan aikaisempien kappaleiden mukaisesti arvioita sähköistymisen esimerkkiratkaisujen skaalautuvuudesta. Tämän osion arviot perustuvat osin karkeisiin arvioihin ja pohjautuvat oletuksiin. Osiossa on keskitytty korkean lämpötilan lämpöpumppeihin ja suoran sähköistymisen tapoihin tuottaa erittäin korkeita lämpötiloja eri prosesseja varten sekä niiden skaalautuvuuteen Suomessa. Nämä ratkaisut korvaavat fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja vähentävät päästöjä, kun tarvittava lämpö tuotetaan uusiutuvalla sähköllä fossiilisten polttoaineiden polttamisen sijasta. Varsinkin korkean lämpötilan lämpöpumput tuovat energiatehokkuushyötyjä, sillä niillä on parempi hyötysuhde perinteiseen polttoon verrattuna.

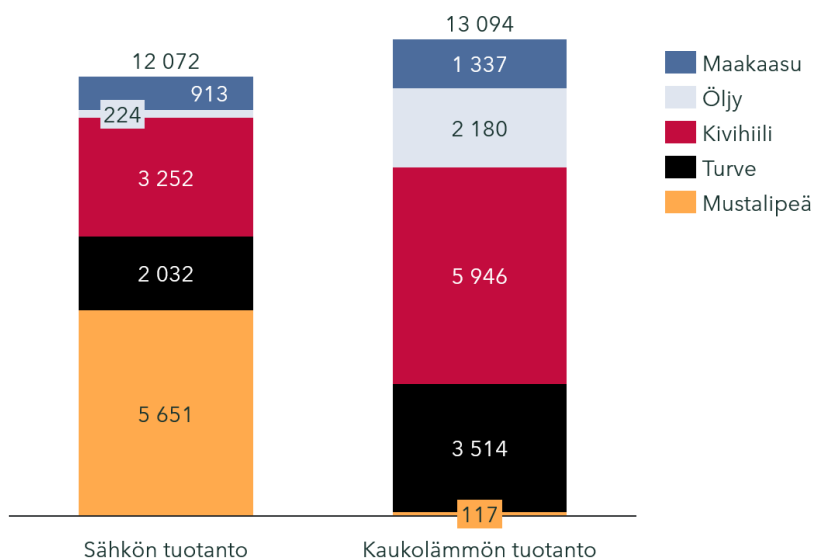
Toinen tapa tarkastella korkean lämpötilan lämpöpumppeiden potentiaalia olisi tutkia saatavilla olevan hukkalämmön määrää teollisuussektoreilla, sillä ne muodostavat suuren potentiaalisen lämmönlähteen pumppujen hyödyntämisessä. Lisäksi niiden hyödyntäminen parantaa merkittävästi kohteen energiatehokkuutta. Hukkalämpöjen määrää Suomen teollisuudessa on tutkittu aiemmin, ja Motivan selvityksessä vuodelta 2019 (Motiva, 2019) Suomen teollisuussektorin vuoden 2017 hukkalämpöjen teknisen potentiaalin arvioitiin olevan noin 16 TWh, josta noin 7 TWh tulee metsäteollisuudesta, 4 TWh kemianteollisuudesta, 2,5 TWh metallinjalostuksesta ja 2,5 TWh elintarviketeollisuudesta. Suuruusluokka-arvioita tarkempi selvitys vaatisi raportin mukaan kohdekohtaista tarkastelua. Hukkalämpöjen hyödyntäminen teollisuudessa on tunnistettu tärkeäksi toimeksi teollisuussektorin energiatehokkuuden parantamisessa työ- ja elinkeinoministeriön Energiatehokkuustyöryhmän loppuraportissa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019b). Raportissa arvioidaan, että hukkalämmön käyttöönnotolla voidaan vuoteen 2030 mennessä saavuttaa 1,6 TWh:n vuosittaiset säästöt.

Suomessa käytetään vielä suhteellisen merkittävästi fossiilisia polttoaineita teollisuudessa (Kuva 3), joten ainakin teoreettista potentiaalia löytyy sekä päästöjen vähentämiselle että energiatehokkuuden lisäämiselle sähköistymisratkaisuilla. Muut tavat tuottaa korkeita lämpötiloja prosesseihin ovat tapauskohtaisempia sekä energiatehokkuuden lisäämisessä että siinä, mitä ne korvaavat. Kuvasta 3 nähdään, että Suomen teollisuussektori käyttää vielä kosolti polttoaineita energiantuotantoon: kolme suurinta kuluttajaa ovat metsäteollisuus, metalliteollisuus sekä kemianteollisuus, joista etenkin metalliteollisuus käyttää paljon hiiltä ja kemianteollisuus öljyä. Näillä kolmella teollisuusalalla on siis suurin potentiaali sähköistymisen ratkaisujen käyttöön-
otolle, kun niillä korvataan fossiilisia polttoaineita.



Kuva 3. Eri teollisuudenalojen polttoaineiden käyttö energiantuotannossa vuonna 2022 [GWh] (Tilastokeskus, 2023)

Energiateollisuuden osalta tässä analyysissä korkean lämpötilan lämpöpumppujen on arvioitu korvaavan muitakin fossiilisia polttoaineita kuin öljyä ja maakaasua, sillä lämpöpumput voivat syrjäyttää myös muita fossiilisia polttoaineita käyttäviä tuotantolaitoksia. Kuvasta 4 ilmenee, että sekä sähkön että kaukolämmön tuotannossa käytetään vielä noin 25 000 GWh fossiilisia polttoaineita vuosittain.



Kuva 4. Sähkön ja kaukolämmön tuotannossa käytetyt fossiiliset polttoaineet vuonna 2022 [GWh], sisältäen yhteistuotannon (SVT, 2023)

Korkeiden lämpötilan lämpöpumppujen skaalautuvuuden arvioiminen eri teollisuudenaloille ja prosesseihin on haastavaa, sillä niiden käyttö on aina tapauskohtaista ja pumpun hyötysuhde riippuu merkittävästi siitä, miten niitä hyödynnetään. Vaikutusten laajuutta voidaan kuitenkin arvioida teollisuusaloittain niiden fossiilienergian kulutuksen sekä esimerkkien avulla: useimmilla teollisuudenaloilla korkean lämpötilan lämpöpumppuja on hyödynnetty höyryntuotannossa, johon on perinteisesti käytetty etenkin maakaasua ja öljyä. Maakaasun käytön korvaaminen lämpöpumpuilla parantaa laitosten energiatehokkuutta ja pienentää päästöjä, mikäli

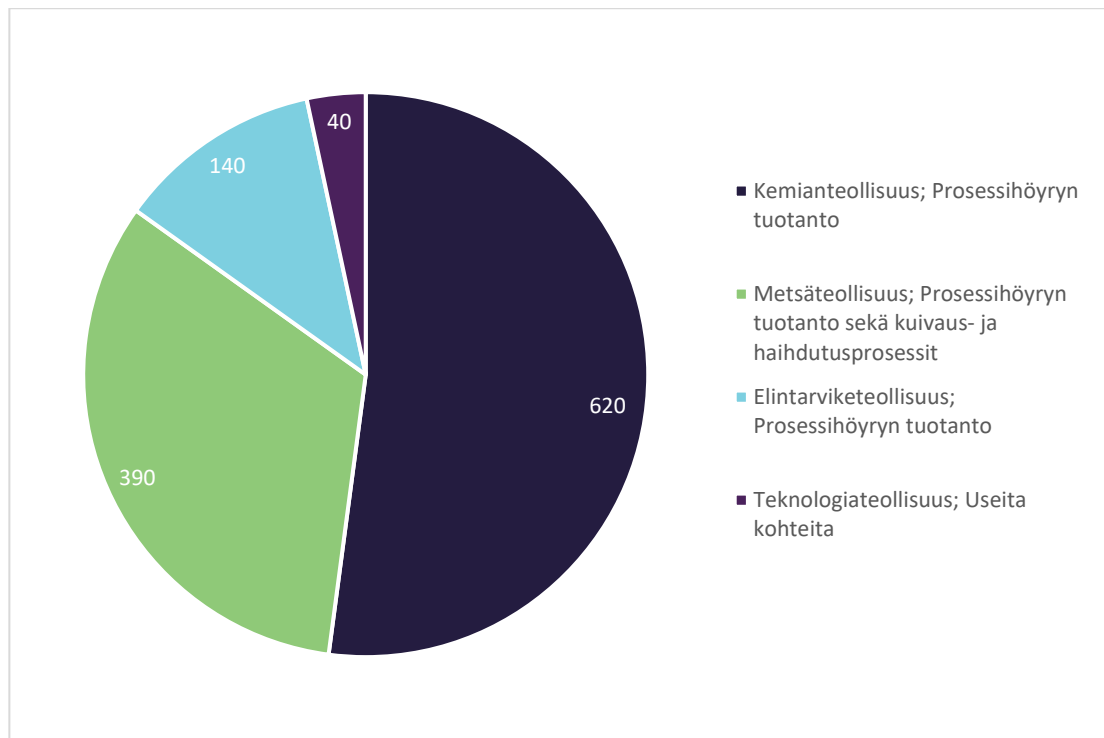
lämpöpumppujen käyttämä sähkö on tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä. Maakaasua käytetään vielä runsaasti kaikilla tarkastelluilla teollisuudenaloilla, erityisesti metsä- ja metalliteollisuudessa.

Korkean lämpötilan lämpöpumppujen skaalautuvuutta ja potentiaalia eri teollisuudenaloille on tarkasteltu taulukossa 8 ja Kuvassa 5. Tarkastelussa maakaasun sekä öljyn polton hyötysuhteeksi on oletettu 90 %. Korkean lämpötilan lämpöpumppujen hyötysuhteeksi on oletettu 3. Kaikilla tarkastelluilla teollisuudenaloilla on sovelluskohteita, mutta suurin potentiaali on energiateollisuudessa, jossa niillä voidaan korvata laajasti fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Laskelmien perusteella arvioitiin, että arvioitu osuus vuosittaisesta fossiilienergiankäytöstä olisi 4700 GWh. Arvioitu osuus energiateollisuuden vuosittaisesta fossiilienergian käytöstä sisältää sähkön ja lämmön tuotannossa käytetyn maakaasun ja öljyn määrän vuodelta 2022. Tässä on siis arvioitu, että korkean lämpötilan lämpöpumput korvaisivat maakaasulla ja öljyllä toimivia tuotantoyksiköitä. Fossiiliset polttoaineet sähkön ja kaukolämmön tuotannossa on kuvattu kokonaisuudessaan raportissa kuvassa 4. Fossiilienergian käytön perusteella arvioitiin, että energiateollisuuden energiansäästöpotentiaali on hyvin suuri.

Mittavaa potentiaalia löytyy myös kemianteollisuudesta etenkin prosessihöyryn tuotannossa sekä metsäteollisuudesta, jossa potentiaalisia käyttökohteita ovat myös erilaiset kuivaus- sekä haihdutusprosessit. Muilla teollisuudenaloilla potentiaali oli pienempi, ja varsinkin metalliteollisuudessa mahdollisten käyttökohteiden potentiaali oli varsin pieni verrattuna koko sektorin energiankulutukseen, jonka vuoksi tarkempaa tarkastelua ei ole tässä selvityksessä esitetty. Energiansäästöpotentiaalın jakautuminen teollisuudenaloittain esitetty Kuvassa 5, jonka arvio perustuu Taulukossa 8 esitettyihin tietoihin. Arvion mukaan vuosittainen lämpöenergian säästöpotentiaali on yhteensä tuhansia gigawattitunteja.

Taulukko 8. Arvioitu osuus vuosittaisesta fossiilienergiankäytöstä teollisuudenaloittain sovelluskohteissa, joihin korkean lämpötilan lämpöpumput soveltuisivat.

Teollisuudenala	Sovelluskohteet	Arvioitu osuus vuosittaisesta fossiilienergian käytöstä [GWh]
Kemianteollisuus	Prosessihöyryn tuotanto	890
Metsäteollisuus	Prosessihöyryn tuotanto sekä kuivaus- ja haihdutusprosessit	560
Elintarviketeollisuus	Prosessihöyryn tuotanto	200
Teknologiateollisuus	Useita kohteita	60

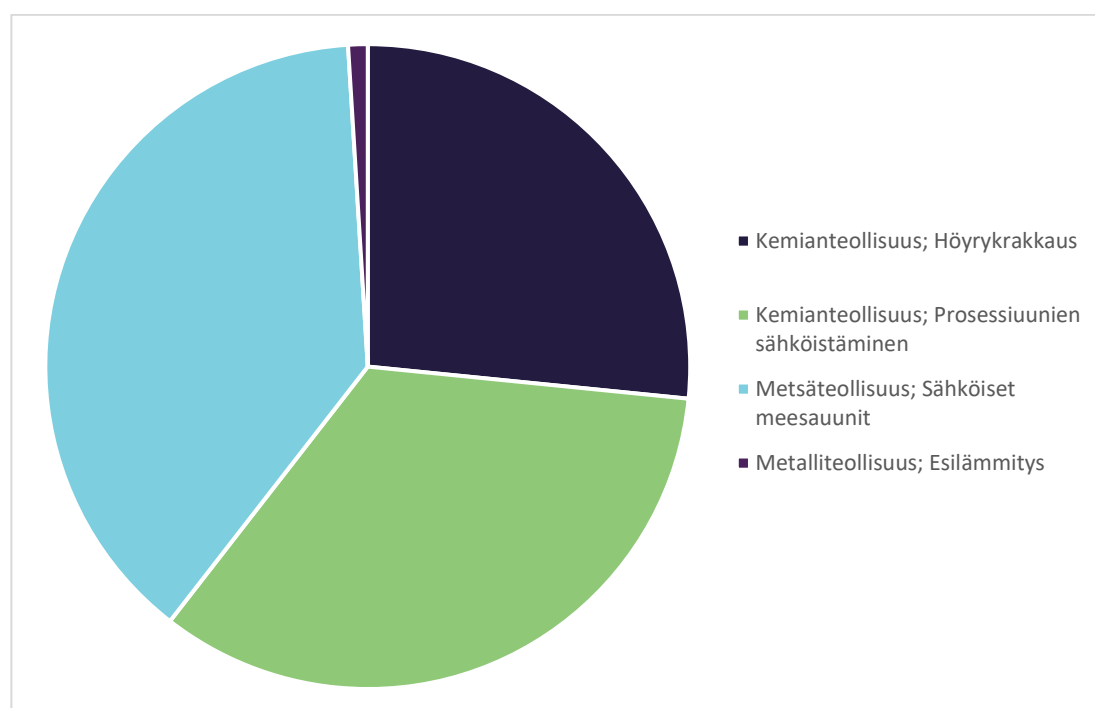


Kuva 5. Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla tuotetun lämpöenergian säästöpotentiaalin jakautuminen teollisuusaloittain.

Korkean lämpötilan lämpöpumppujen lisäksi korkeita lämpötiloja voidaan tuottaa myös muilla sähköisillä tavoilla, joiden avulla voidaan päästä lämpöpumppuja korkeampiin lämpötiloihin. Ratkaisut vaihtelevat huomattavasti teollisuudenalan ja kyseessä olevan prosessin mukaan, ja niitä on käsitelty seuraavissa alaluvuissa. Yhteenveto erilaisista sovelluskohteista on esitetty Taulukossa 9. Potentiaalia löytyy erityisesti kemianteollisuudesta, jossa höyrykrakkauksen sekä prosessiuunien sähköistäminen tuovat energiatehokkuusparannuksia. Metsäteollisuudessa sähköiset meesauunit ovat potentiaalinen sähköistämisen teknologia. Teknologiaeteollisuudessa on hyvin useita potentiaalisia sovelluskohteita, jonka vuoksi erillistä arvioitua osuutta vuosittaisesta fossiilienergian käytöstä tai energiansäästöpotentiaalista ei ole määritelty Taulukossa 9 ja Kuvassa 6. Tässä selvityksessä ei tunnistettu muille teollisuudenaloille soveltuvia tapoja sähköistää korkeiden lämpötilojen tuotantoa. Energiansäästöpotentiaalin jakautuminen teollisuusaloittain on esitetty Kuvassa 6, jonka arvio perustuu Taulukossa 9 esitettyihin tietoihin. Arvion mukaan vuosittainen lämpöenergian säästöpotentiaali on yhteensä tuhansia gigawattitunteja.

Taulukko 9. Arvioitu osuus vuosittaisesta fossiilienergiankäytöstä teollisuudenaloittain sovelluskohteissa, joihin voidaan muilla tavoilla tuottaa korkeita lämpötiloja.

Teollisuudenala	Sovelluskohteet	Arvioitu osuus vuosittaisesta fossiilienergian käytöstä [GWh]
Kemianteollisuus	Höyrykrakkaus	2900
	Prosessiuunien sähköistäminen	3700
Metsäteollisuus	Sähköiset meesauunit	4200
Metalliteollisuus	Esilämmitys	100



Kuva 6. Muilla kuin korkean lämpötilan lämpöpumpuilla tuotetun energiansäästöpotentialin jakautuminen teollisuusaloittain.

4.1 Kemianteollisuus

Kemianteollisuus käytti vuonna 2022 yhteensä 8 871 GWh fossiilisia polttoaineita energiantuotantoon: 8 225 GWh öljyä ja 646 GWh maakaasua (SVT, 2023). Erityispiirteenä polttoaineen kulutus muodostaa noin kaksi kolmasosaa koko kemianteollisuuden energiankäytöstä (Motiva, 2021).

Kemianteollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan hyödyntää esimerkiksi prosessihöyryn tuotannossa tislusprosessiin. Eräissä diplomityössä tarkasteltiin hukkalämmön hyödyntämistä tislusprosessissa korkean lämpötilan lämpöpumpun avulla. Lämpöpumpun COP-arvot vaihtelivat noin kolmen ja neljän välillä mm. käytetyn kylmäaineen mukaan. (Lehtonen, 2022)

Teoriassa koko kemianteollisuuden höyryntuotanto voidaan toteuttaa korkean lämpötilan lämpöpumpuilla, jolloin on saatavissa merkittäviä energiatehokkuushyötyjä. Tällöin kaikki energiantuotantoon käytetty maakaasu voitaisiin korvata. Päästövähennysten lisäksi tämä lisäisi myös energiatehokkuutta riippuen siitä, mihin hyötysuhteisiin pumpuilla päästään. Kaikkea maakaasun käyttöä korkean lämpötilan lämpöpumpuilla ei voida kuitenkaan korvata, sillä maakaasua tarvitaan tällä hetkellä kemianteollisuudessa myös raaka-aineena esimerkiksi vedyntuotantoon.

Vuonna 2023 toteutetun selvityksen mukaan (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b) kemianteollisuudessa prosessihöyryn tuotanto aiheuttaa noin 10 % teollisuusalan päästöistä. Jos oletetaan, että päästöt ovat suorassa suhteessa energiankulutukseen, noin 10 prosenttia tämänhetkisestä fossiilienergian kulutuksesta eli 890 GWh kuluisi tällä hetkellä energiantuotantoon. Jos kaikki tämä korvattaisiin lämpöpumpuilla, energiankulutus vähenisi yli 620 GWh:lla vuosittain.

Kemianteollisuudessa korkeita lämpötiloja tarvitaan mm. prosessiuuneissa ja höyrykrakkauk-

Turun tehdas, Orion Oyj / Calefa Oy



Orion otti Turussa käyttöön lämpöpumppulaitoksen, joka hyödyntää hukkalämmön suuren tuotantolaitoksen lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Laitos tuottaa jäähdytystä tuotantoprosessiin, josta palautuu hukkalämpöä lämpöpumpuille. Ne jalostavat matalan lämpötilan hukkalämmön 70–80 asteiseksi lämmöksi, joka johdetaan tehdasalueen kiinteistöt kattavaan aluelämpöverkkoon. (Energiatehokkuussopimukset, 2021)

- Calefa toimitti Orionille tehdasvalmistetun lämpöpumppulaitoksen valmiina kokonaisratkaisuna.
- Laitoksen jäähdytysteho on yhden megawatin luokkaa ja lämmitysteho noin 1,5 megawattia.
- Ostoennergian tarve vähenee 70 prosenttia.

sessä. Höyrykrakkaus on yksi erittäin energiantensiivinen kemianteollisuuden prosessi, mihin tarvitaan korkeita lämpötiloja. Coolbrookin Rotodynamic Reactor (RDR) -teknologia on sähköinen vaihtoehto höyrykrakkauksessa nykyisin käytetyille fossiilisille polttoaineille, ja sen luvataan parantavan energiatehokkuutta jopa 30 % perinteisiin menetelmiin verrattuna (Coolbrook, 2023a).

4.2 Metsäteollisuus

Metsäteollisuus käytti vuonna 2022 3 860 GWh:ta maakaasua, 1 738 GWh öljyä ja 919 GWh turvetta energiantuotantoon (SVT, 2023). Suuri osa käytetystä maakaasusta kuluu tällä teollisuudenalalla prosesseihin, joissa tarvittavat lämpötilat ovat niin suuria, että korkean lämpötilan lämpöpumppujen hyödyntäminen ei nykyteknologioilla ole mahdollista. Kuitenkin niitä voidaan

hyödyntää esimerkiksi kuivausprosesseihin ja höyryntuotantoon. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b)

Nämä korkean lämpötilan prosessit ovat käytössä metsäteollisuudessa niissä laitoksissa, joissa tuotetaan markkinasellua tai nk. integroiduissa laitoksissa, jotka perustuvat sulfaattisellun valmistukseen. Paperi- ja kartonkitehtaissa suurin osa energiasta taas kuluu höyryntuotantoon ja kuivausprosesseihin, joten näissä laitoksissa korkean lämpötilan lämpöpumpuilla voidaan saavuttaa merkittäviä parannuksia energiatehokkuuteen. Kuivausprosesseissa hyödynnettävillä korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on mahdollista saavuttaa 3–4 COP-arvoja. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b)

Potentiaalisia korkean lämpötilan lämpöpumppujen sovelluskohteita metsäteollisuudessa on tutkittu diplomityössä vuodelta 2019 (Lähteenaro, 2019). Diplomityössä arvioitiin hakkeen, maakaasun ja kevyen polttoöljyn korvaamista kuivaus- ja haihdutusprosesseissa sekä höyryntuotannossa. Jos lämpöpumpulla korvattiin fossiilisia polttoaineita, sen käyttö oli kannattavaa.

Nämä korkean lämpötilan lämpöpumpuilla korvattavat prosessit muodostavat kuitenkin vain pienen osuuden fossiilienergian käytöstä. Jos oletetaan, että ne käyttävät yhteensä 10 % alan maakaasun ja öljyn käytöstä 90 prosentin hyötysuhteella ja korvattavien lämpöpumppujen hyötysuhde on kolme, teollisuusalalla on noin 390 GWh:n vuosittainen energiansäästöpotentiaali.

Metsäteollisuudessa korkeita lämpötiloja tarvitaan mm. meesauunissa, mikä on sulfaattisellun valmistusprosessin energiantensiivinen ydinvaihe. Sähköisten meesauunien TRL on kuitenkin toistaiseksi matala, 4–5, eikä niitä olla vielä hyödynnetty ainakaan Suomessa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b)

UPM



UPM:n Rauman paperitehtaalla Finess Energy korkean lämpötilan lämpöpumppu hyödyntää prosessin jäähdytysvettä ja tuottaa 120 °C lämpöä höyrykattilalle. Lämpöpumpun avulla tehdas säästää noin 10 000 MWh vuodessa, mikä vastaa noin 1 000 omakotitalon vuotuista lämmitysenergian kulutusta.

4.3 Metalliteollisuus

Metalliteollisuus on Suomen teollisuusaloista fossiilienergiaintensiivisin: se käytti vuonna 2022 maakaasua 1 712 GWh, hiiltä 9 350 GWh ja öljyä 420 GWh energiantuotantoon. (SVT, 2023)

Metalliteollisuudessa fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan vähentää korkean lämpötilan lämpöpumpuilla rajallisesti, mutta niitä voidaan hyödyntää hukkalämmön talteenotossa ja esimerkiksi esilämmitysprosesseissa. Kyseessä on kuitenkin todella pieni osuus laitosten kokonaisenergiankäytöstä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b).

Metalliteollisuudessa on käytössä muutamia korkean lämpötilan prosesseja, jotka on mahdollista sähköistää. Esimerkiksi hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen valmistuksessa voidaan

siirtyä käyttämään induktioratkaisuja. Induktioratkaisujen TRL-tasot ovat toistaiseksi matalia (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b), ja niiden odotetaan saavan kaupalliset prototyypit 2030 mennessä (SSAB, 2022).

Erilaisia esilämmitysprosesseja voidaan korkean lämpötilan lämpöpumppujen lisäksi sähköistää myös Coolbrookin RDH-teknologialla, jonka energiatehokkuus on noin 90 % verrattuna fossiilisten vaihtoehtojen korkeintaan 80 % hyötysuhteeseen (Coolbrook, 2023b).

4.4 Elintarviketeollisuus

Elintarviketeollisuus käytti vuonna 2022 253 GWh maakaasua ja 416 GWh öljyä (SVT, 2023). Kuten muillakin teollisuudenaloilla, elintarviketeollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan käyttää hukkalämmön hyödyntämiseen ja prosessihöyryn tuotantoon. Elintarviketeollisuudessa useimmat prosessit eivät vaadi niin korkeaa lämpötilaa kuin esimerkiksi metalliteollisuuden prosessit, jolloin pumppujen skaalautuvuus voi olla parempi.

Jos oletetaan, että 30 prosenttia nykyisestä fossiilienergian kulutuksesta voidaan jatkossa tuottaa korkean lämpötilan lämpöpumpuilla, joiden hyötysuhde on 3, niin energian kulutus vähenisi teollisuusalalla noin 140 GWh vuodessa.

Pietarsaaren Kuusisaaren tehdas / Snellmanin Lihanjalostus Oy



Nykyisin Oilonin toimittamat teollisuuslämpöpumput tuottavat merkittävän osan Snellmanin lämpöenergiasta. Lihanjalostustehtaalla käytetään paljon vettä – noin tuhat kuutiometriä ja suurin osa lämmintä vettä joka päivä. Lämpöpumppu suunniteltiin lämpimän veden tarpeen mukaisesti. Lisäksi vuonna 2019 otettiin käyttöön kaksi kappaletta Oilon ChillHeat teollisuuslämpöpumppuja, jotka tuottavat +95°C lämpötilan. Se on tarpeen esimerkiksi veitsien ja muiden työkalujen steriloinnissa, jossa lämpötilan pitää olla vähintään 82°C. Lämpöä käytetään myös huonetilojen kuivaamiseen pesun jälkeen. (Energia-talous, 2019)

- Säästää noin 450 000 kg lämmitysöljyä vuodessa – rekkakuorman joka kuukausi.
- Kylmäaineena lämpöpumpuissa on lähes 0 GWP arvon R1234ze.

4.5 Teknolomiteollisuus

Teknolomiteollisuus käytti vuonna 2022 119 GWh maakaasua sekä 461 GWh öljyä (SVT, 2023). Korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan teollisuussektorilla hyödyntää hukkalämmön hyödyntämiseen.

Varsinkin teknologiateollisuuden alle kuuluu hyvin heterogeeninen joukko toimijoita, mikä vaikeuttaa koko teollisuusalan kattavaa arviointia. Teollisuusalan vähähiilitiekartassa (Pöyry, 2020) hukkalämmön hyödyntämisen ja muun korkean lämpötilan lämpöpumpuille soveltuvan toiminnan päästövähennyspotentiaali oli kymmenien prosenttien tasolla. Jos oletetaan, että 20 prosenttia päästöistä voidaan vähentää korkean lämpötilan lämpöpumpuilla (COP = 3) ja että päästöt korreloivat suoraan prosessien energiankulutukseen, kyseessä on noin 40 GWh:n vuosittainen energiatehokkuusparannus.



ABB Helsingin Pitäjänmäen tehdas

ABB:n taajuusmuuttajia valmistavalla tehtaalla otettiin käyttöön yksinkertainen mutta erittäin toimiva ratkaisu hukkalämmön hyödyntämisessä. Se tuo yli 90 prosentin säästön kaukolämmön kulutukseen. Laitteiden testauksen ja tuotekehityksen yhteydessä syntyy runsaasti hukkalämpöä, joka johdettiin aiemmin ulkoilmaan harakoille. Nyt hukkalämpöä hyödynnetään suuren kiinteistön ja käyttöveden lämmitykseen. Nestekiertoinen jäähdytysverkko kerää hukkalämpöä talteen tuotannon testauspaikoista ja tuotekehityksen tiloista. (Energiatehokkuussopimukset, 2023b)

- 2020 asennettiin 2 kpl 100 kilowatin lämpöpumppua, järjestelmää laajennettu tämän jälkeen.
- Hukkalämpö kerätään verkkoon ilma-vesi-lämmönvaihtimilla.
- Nestejäähdytteisissä laitteistoissa käytetään vesi-vesi-lämmönvaihtimia.
- Lämmitettävää tilaa on yhteensä noin 300 000 kuutiometriä. Se koostuu muun muassa 16 metriä korkeasta tehdashallista.

4.6 Energiateollisuus

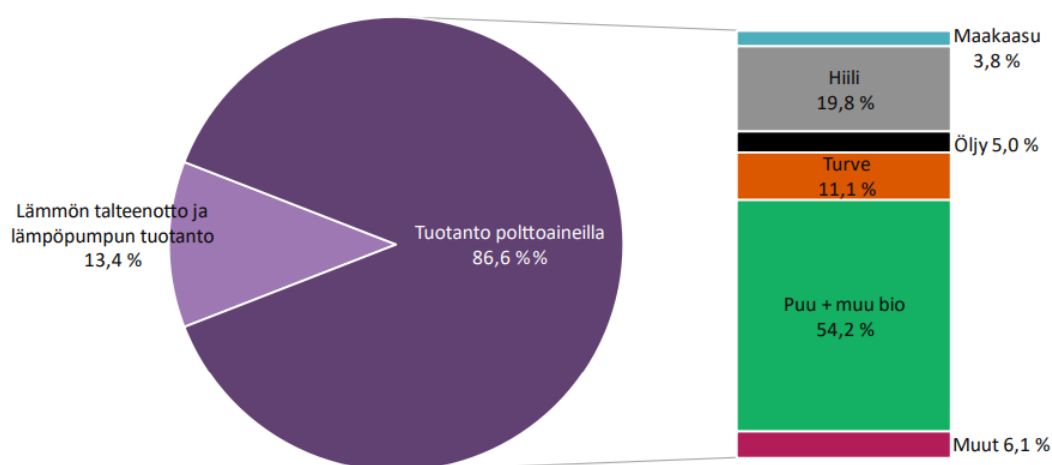
Energiateollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan käyttää esimerkiksi korvaamaan fossiilisia polttoaineita kaukolämmön tuotannossa. Vuonna 2022 13,4 prosenttia kaukolämmöstä ja sen tuotantoon liittyvästä sähköstä (niin kutsutuilla yhteistuotantolaitoksilla) käytettiin lämpöpumppuja (Energiateollisuus, 2023). Energiajärjestelmässä on kuitenkin potentiaalia lämpöpumppujen yleistymiselle, sillä lämmön tuotantoon käytetään vielä runsaasti fossiilisia polttoaineita.

Kaukolämmön ja sähkön tuotantoon käytettiin vuonna 2022 yhteensä 4 654 GWh maakaasua ja öljyä (Energiateollisuus, 2023). Jos tämä kaikki korvattaisiin korkean lämpötilan lämpöpumpuilla, vuotuinen säästö energiatehokkuudessa olisi noin 2 800 GWh. Kuvassa 7 on esitetty kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytettyjen polttoaineiden osuuksia.



Katri Valan lämpöpumppulaitos, Helen Oy

Hukkalämmöstä kaukolämpöä ja -jäähdytystä tuottava Katri Valan on nostanut Helenin energiatehokkuuden uudelle tasolle. Virstanpylväs oli maailman suurimman jäähdytystä ja lämpöä tuottavan lämpöpumppulaitoksen käyttöönotto vuonna 2006. Se sijaitsee kal-
lion sisällä Katri Valan puiston alla. Laitos tuotti vuonna 2016 kaukolämpöä 422 000 me-
gawattituntia, mikä vastaa seitsemää prosenttia Helsingin alueen koko kaukolämmöstä.
Jäähdytystä laitos tuotti 90 000 megawattituntia.
(Energiatehokkuussopimukset, 2017b)



Kuva 1. Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytettyjen polttoaineiden suhteelli-
set osuudet vuonna 2022. (Energiateollisuus, 2023)

Teollisuuden sähköistyminen on avainasemassa, kun sektori etsii tapoja vähentää päästöjään. Sähköiset prosessit ovat usein myös parempia hyötysuhteeltaan, kun niitä verrataan perinteisiin polttoa hyödyntäviin teknologioihin. Sähköistymisen yhtenä keskeisenä ajurina on energiatehokkuuslainsäädäntö, jota pannaan Suomessa täytäntöön päästökaupan avulla. Sähköistämisen teknologiat voidaan jakaa lämpöpumppuihin, suoriin sähköistämiskäyttöihin ja epäsuoriin sähköistämiskäyttöihin, joista tarkasteltiin suoria sähköistämiskäyttöjä sekä lämpöpumppuja.

Työssä kartoitettiin eri sähköistymisen teknologioita teollisuudessa sekä arvioitiin niiden TRL-tasoa eli teknologista valmiusastetta, skaalautuvuutta sekä energiatehokkuuden lisäämisen potentiaalia. Kaikilta teollisuusaloilta löytyi hyödyntämismahdollisuuksia lämpöpumpuille. Lisäksi lämpöpumpputeknologioihin lukeutuvat MVR-lämmittimet tunnistettiin potentiaaliseksi teknologiaksi, jolla oli sovelluskohteita kolmen suurimman teollisuussektorin eli metsä-, metalli- ja kemianteollisuuden lisäksi myös elintarviketeollisuudessa. Sekä lämpöpumppujen että MVR-lämmittimien TRL-taso oli korkea, ne katsottiin hyvin skaalautuviksi sekä niiden hyödyntämisen nähtiin tuovan parannuksia energiatehokkuuteen.

Korkeampien lämpötilojen tuotannossa erilaiset sähköuunit olivat potentiaalisia, mutta niiden teknologinen valmiusaste ei ollut kaikissa tapauksissa yhtä korkea. Sähköuunien skaalautuvuus ja parannukset energiatehokkuuteen eivät olleet samalla tasolla esimerkiksi lämpöpumppujen kanssa. Myös sähkökattiloilla sekä RDH- ja RDT- teknologioilla nähtiin potentiaalia.

Kartoittamisen jälkeen valittiin lähempään tarkasteluun lämpöpumput ja erilaisia suoran sähköistämisen ratkaisuja. Lämpöpumpuista keskityttiin erityisesti korkean lämpötilan lämpöpumppuihin, joilla päästään yli 90 celsiusasteen lämpötiloihin. Tällöin niitä voidaan hyödyntää laajemmin eri prosesseissa. Lämpöpumput parantavat myös energiatehokkuutta, sillä niiden COP-arvot ovat 3–4 luokkaa, kun taas perinteisen polton hyötysuhteen arvioitiin olevan noin 0,9 (90 %).

Suorissa sähköistämiskäytöissä tarkasteltiin prosessiuuneja ja sähkökattiloita. Prosessiuuneilla on laajalti potentiaalia eri teollisuudenaloilla, mutta niitä ei vielä hyödynnetä Suomessa paljoa. Lisäksi osa uuniteknologiasta ei ole vielä kaupallisella tasolla. Sähkökattilat sen sijaan ovat jo laajalti käytössä oleva teknologia, joiden keskeinen sovelluskohde on kaukolämmön tuotanto, vaikka potentiaalia on laajemmin eri teollisuudenaloilla. Niiden hyötysuhde voi olla jopa 99 %.

Yllä olevien ratkaisujen lisäksi tarkasteltiin lämmön varastointimenetelmiä sekä älyratkaisuja. Varastointiratkaisut jaettiin tuntevan lämpöenergian varastoihin, latenttivarastoihin ja termokemiallisiin varastoihin. Tuntevan lämpöenergian varastot ovat kypsä teknologia, ja niitä hyödynnetään jo teollisuudessa. Teollisuuden sähköistämisessä älyratkaisut ovat usein tärkeässä roolissa mahdollistamassa erilaisten ratkaisuiden käyttöönottoa. Prosessien mittaus mahdollistaa optimointia, joka tuo parannuksia energiatehokkuuteen.

Eri sähköistämiskäyttöjen skaalautuvuutta arvioitiin työn neljännessä luvussa. Erityisesti keskityttiin korkean lämpötilan lämpöpumppuihin ja muihin tapoihin tuottaa korkeita lämpötiloja. Potentiaalia tutkittiin fossiilisen energiankäytön kautta olettaen, että sähköistämiskäytöt

korvaisivat niiden käyttöä. Tällöin saavutettaisiin päästövähennyksiä sekä energiatehokkuushyötyjä.

Tarkastelluilla teollisuudenaloilla oli mittavaa potentiaalia energiatehokkuusparannuksiin korkean lämpötilan lämpöpumppuja hyödyntämällä. Korkean lämpötilan lämpöpumppujen osalta suurin potentiaali on energiateollisuudessa, jossa niillä voidaan korvata laajasti fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Mittavaa potentiaalia löytyy myös kemiateollisuudesta sekä metsäteollisuudesta. Muilla teollisuudenaloilla potentiaali oli pienempi, ja varsinkin metalliteollisuudessa mahdollisten käyttökohteiden potentiaali oli varsin pieni verrattuna koko sektorin energiankulutukseen. Muut lämmöntuotannon sähköistämisen ratkaisut vaihtelevat huomattavasti teollisuudenalan ja kyseessä olevan prosessin mukaan. Potentiaalia löytyy erityisesti kemiateollisuudesta ja metsäteollisuudesta. Muille teollisuudenaloille soveltuvia tapoja sähköistää korkeiden lämpötilojen tuotanto ei tunnistettu.

Raportin tuloksiin sisältyy epävarmuuksia, ja siinä on esitetty vain yksi tapa arvioida sähköistämisen ratkaisujen potentiaalia. Ratkaisujen käyttöönotolla on muitakin kohteita kuin fossiilisten energianlähteiden korvaaminen, ja eri prosessien osuudet teollisuussektoreiden energiankäytöstä ovat karkeita arvioita. Lisäksi sähköistämisen ratkaisut ovat aina tapauskohtaisia ja niihin vaikuttaa suuri joukko muuttujia, jotka on otettava huomioon investointia tehtäessä. Raportin tuloksia tulisikin pitää suuntaa antavina.

Lähteet

Adven, 2018. Finnfeeds Finland Oy:n haihdutusmenetelmä. Saatavilla: <https://adven.com/fi/yhteistyotarinat/finnfeeds-finland-oy-n-haihdutusmenetelma/>. Viitattu 5.12.2023.

Adven, 2023. Tehokkaat teollisuusprosessit MVR-haihdutuksella. Saatavilla: <https://adven.com/fi/teollisuus/energiatehokkuus/mvr-haihdutus>. Viitattu 22.11.2023.

AFRY, 2020. Finnish Energy – Low carbon roadmap. Saatavilla: <https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Taustaraaportti - Finnish Energy Low carbon roadmap.pdf>. Viitattu 5.12.2023.

BASF, 2022. BASF, SABIC and Linde start construction of the world's first demonstration plant for large-scale electrically heated steam cracker furnaces. Saatavilla: <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html> Viitattu 28.12.2023.

Caverion, 2019. Caverion Intelligence: tekoäly sinkityslinjalla Hämeenlinnassa. Saatavilla: <https://www.caverion.fi/katalogi/referenssit/tekoaly-sinkityslinjalla/>. Viitattu 11.12.2023.

Caverion, 2023. Datavetoista tuotantoa Caverion Intelligencen avulla. Saatavilla: <https://www.caverion.fi/katalogi/referenssit/stockholm-exergi/>. Viitattu 7.12.2023.

Coolbrook, 2023a. RotoDynamic Technology to decarbonize industrial processes. Saatavilla: <https://coolbrook.com/technology/>. Viitattu 7.12.2023.

Coolbrook, 2023b. RotoDynamic heater to replace fossil fuels in industrial process heating. Saatavilla: <https://coolbrook.com/technology/rdh/>. Viitattu 7.12.2023.

Coolbrook, 2023c. Coolbrook successfully completes first phase of pilot tests to demonstrate its RotoDynamic Technology and its potential to reduce global industrial CO2 emissions by 30 %. Saatavilla: <https://coolbrook.com/news/coolbrook-successfully-completes-first-phase-of-pilot-tests-to-demonstrate-its-rotodynamic-technology-and-its-potential-to-reduce-global-industrial-co2-emissions-by-30/>. Viitattu 11.12.2023.

Coolbrook, 2023d. UltraTech Cement to implement Coolbrook's innovative technology for industrial electrification. Saatavilla: <https://coolbrook.com/news/ultratech-cement-to-implement-coolbrooks-innovative-technology-for-industrial-electrification/>. Viitattu 11.12.2023.

Energiatehokkuus, 2019. Herra Snellman on lämpöpumppujen pioneerikäyttäjä. Saatavilla: <https://www.energiatalous.fi/?p=2492> Viitattu 8.1.2023

Energiatehokkuussopimukset, 2017a. Esittelymateriaalit. Saatavilla: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/aineistot-ja-ohjeet/aineistot-ja-ohjeet-energiatehokkuussopimusten-esittelymateriaalit/>. Viitattu 5.12.2023.

Energiatehokkuussopimukset, 2017b. Helen Oy: Lämpöpumput nostivat tehokkuuden uudelle tasolle. Saatavilla: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/helen-oy-lampopumput-nostivat-tehokkuuden-uudelle-tasolle/> Viitattu 8.12.2023.

Energiatehokkuussopimukset, 2020. Ovako Imatra Oy: Teräksen tyhjiökäsittelyn uudistus toi 80 prosentin energiansäästön. Saatavilla: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/ovako-imatra-oy-teraksen-tyhjiokasittelyn-uudistus-toi-80-prosentin-energiansaaston/>. Viitattu 7.12.2023.

Energiatehokkuussopimukset, 2021. Orion: Lämpöpumppulaitoksesta vauhtia ilmastotekoihin. Saatavilla: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/orion-lampopumppulaitoksesta-vauhtia-ilmastotekoihin/> Viitattu 8.12.2023.

Energiatehokkuussopimukset, 2023a. Boliden Kevitsa Mining Oy: Mittarointi lisää tietoisuutta energiatehokkuudesta. Saatavilla: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/boliden-kevitsa-mining-oy-energiatehokkuus-on-osa-vastuullista-kaivostoimintaa/>. Viitattu 5.12.2023.

Energiatehokkuussopimukset, 2023b. ABB Oy: Yli 90 prosentin säästö tehtaan kaukolämmön kulutukseen. Saatavilla: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/abb-oy-yli-90-prosentin-saasto-tehtaan-kaukolammon-kulutukseen/> Viitattu 8.12.2023.

Energiateollisuus, 2023. Kaukolämpövuosi 2022. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/11/Kaukolampo_2022.pdf. Viitattu 7.12.2023.

Helen, 2021. Mustikkamaan jättimäiset lämpöluolat ovat nyt täynnä vettä. Saatavilla: <https://www.helen.fi/uutiset/2021/ilmastoteko-jalkojemme-alla-mustikkamaan-j%C3%A4ttim%C3%A4iset-l%C3%A4mp%C3%B6luolat-ovat-nyt-t%C3%A4ynn%C3%A4-vett%C3%A4>. Viitattu 5.12.2023.

IEA, 2014. Technology Roadmap – Energy storage. Saatavilla: <https://iea.org/reports/technology-roadmap-energy-storage>. Viitattu 13.12.2023.

IRENA, 2023. Innovation landscape for smart electrification. Saatavilla: <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification/Power-to-heat-and-cooling/3-High-temperature-heat-pumps>. Viitattu 12.12.2023.

Kemianteollisuus, 2023. Haastattelu 5.12.2023.

Lee, D, Y.-T. Chen and S.-L. Chao, 2021. Universal workflow of artificial intelligence for energy saving. Saatavilla: <https://pdf.sciencedirectassets.com/311225/1-s2.0-S2352484721X0011X/1-s2.0-S2352484721015055/main.pdf>. Viitattu 11.12.2023

Lehtonen, J. 2022. Korkean lämpötilan lämpöpumput tislausprosessin hukkalämmön hyödyntämisessä. Diplomityö.

Lähteenaro, P. 2019. Kuumalämpöpumppujen sovelluskohteet ja potentiaali metsäteollisuudessa. Diplomityö. Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159906/Kuumal%C3%A4mp%C3%B6pumppun%20sovelluskohteet%20mets%C3%A4teollisuudessa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Viitattu 7.12.2023

Metsäteollisuus, 2023. Haastattelu 11.12.2023.

Milone, C 2023. Is Artificial Intelligence the future of Renewable Energy? Saatavilla: <https://www.quanta-cs.com/blogs/2022-9/is-artificial-intelligence-the-future-of-renewable-energy>. Viitattu 11.12.2023

Motiva, 2012. Energiatehokas teollisuuskiinteistö. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/5847/Energiatehokas_teollisuuskiinteisto.pdf

Motiva, 2014a. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf. Viitattu 22.11.2023

Motiva, 2014b. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen: Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu_ja_ORC-sovellukset.pdf#page=1. Viitattu 5.12.2023.

Motiva, 2015. Teollisuusunien energiatehokkuus. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusunien_energiatehokkuus.pdf. Viitattu 7.12.2023.

Motiva, 2019. Esiselvitys: ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf. Viitattu 7.12.2023.

Motiva, 2021. Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutus energiatehokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistuminen_ja_sen_vaiutus_energiatehokkuuteen_ja_hukkalampojen_hyodyntamiseen_-_raportti_2021.pdf. Viitattu 5.12.2023.

Motiva, 2023a. Selvitysraportti: Sähköistyminen, hukkalämmöt ja lämpöpumput teollisuudessa. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/21007/Selvitysraportti_-_Sahkoistuminen_hukkalamot_ja_lampopumput_teollisuudessa.pdf, viitattu 5.12.2023

Motiva., 2023b. Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuuteen: uusi yhteishanke käynnistyy 2024. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/uutiset/uutiset_2023/sahkoistamalla_energiatehokkuutta_teollisuuteen_uusi_yhteishanke_kaynnistyy_2024.20634.news. Viitattu 22.11.2023.

Motiva, 2023c. Energiatehokkuusdirektiivi (EED). Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/energiatehokkuusdirektiivi_%28eed%29. Viitattu 5.12.2023.

Motiva, 2023d. Teollisuus. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto/teollisuus#:~:text=Vuonna%202021%20teollisuuden%20energi-ank%C3%A4ytt%C3%B6%20Suomessa,Teollisuuden%20s%C3%A4hk%C3%B6nkulut%20oli%2039%20TWh. Viitattu 12.12.2023.

Oilon, 2019. Referenssit. Saatavilla: <https://oilon.com/fi/references/jackon-tehdas-muurla/>. Viitattu 8.12.2023.

Partanen, O. 2022. Teollisuusprosessien hiilidioksidipäästöjen vähentäminen lämmityksen sähköistämällä. Kandidaatintyö. Saatavilla: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164046/Kandidaatinty%C3%B6_Opri_Partanen.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu: 7.12.2023.

Pöyry, 2020. Teknolohiateollisuuden vähähiilitiekartta raportti – vaihe 1. Saatavilla: https://teknolohiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknolohiateollisuuden%20tiekartta1_Teknologiaselvitys%20v%C3%A4h%C3%A4hiiliratkaisuista_P%C3%B6yry.pdf. Viitattu 7.12.2023.

Rissanen Otto, 2023. RAKENNUSTEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN TEKOÄLYN

AVULLA, Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT, Energiatekniikan kandidaatintyö 2023. Saatavilla: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166114/Kandidaatin-tyo_Otto_Rissanen.pdf?sequence=1. Viitattu 11.12.2023.

SSAB, 2022. SSAB suunnittelee uutta tuotantojärjestelmää pohjoismaisille toiminnoilleen ja aikaistaa vihreää siirtymäänsä. Saatavilla: <https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2022/01/ssab-suunnittelee-uutta-tuotantojarjestelm-pohjoismaisille-toiminnoilleen-ja-aikaistaa-vihre-siirtymn>. Viitattu 7.12.2023.

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2023. Teollisuuden energiankäyttö. Saatavilla: <https://www.stat.fi/tilasto/tene>. Viitattu 7.12.2023.

Tampereen Energia, 2022. Yksi Suomen ensimmäisistä sähkökäyttöisistä lämpökattiloista on saapunut Tampereelle. Saatavilla: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/69960052/yksi-suomen-ensimmaisista-sahkokayttoisista-lampo-kattiloista-on-saapunut-tampereelle?publisherId=69819135>. Viitattu 13.12.2023.

Teknologiateollisuus, 2016. Teollisuuden vapaaehtoinen energiansäästö tuo tuloksia. Saatavilla: <https://teknologiateollisuus.fi/fi/ajankohtaista/teollisuuden-vapaaehtoinen-energiansaasto-tuo-tuloksia>.

Teknologiateollisuus, 2023. Haastattelu 4.12.2023.

Tilastokeskus, 2021. Teollisuuden energiankäyttö väheni 6 prosenttia vuonna 2020. Saatavilla: https://tilastokeskus.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_tie_001_fi.html.

Tilastokeskus, 2023. Sähkön tuotanto tuulivoimalla ja ydinvoimalla nousivat vuonna 2022. Saatavilla: <https://stat.fi/julkaisu/cl8mo29omxf8t0duky5aa8i1>. Viitattu 7.12.2023.

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019a. Energiatehokkuustyöryhmän väliraportti. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-422-8>. Viitattu 5.12.2023.

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019b. Energiatehokkuustyöryhmän raportti. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-456-3>. Viitattu 13.12.2023.

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020. Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162494/TEM_2020_52.pdf?sequence=1&isAllowed=y, viitattu 5.12.2023

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023a. Energiatehokkuusdirektiivin uudistaminen. Saatavilla: <https://tem.fi/energiatehokkuusdirektiivin-uudistaminen>. Viitattu 5.12.2023.

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023b. Energiaintensiivisen teollisuuden vihreän siirtymän investointitarpeet ja niiden toteutumisedellytykset. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-962-9>. Viitattu 7.12.2023.

Työ, ja elinkeinoministeriö, 2023c. Päästökauppa. Saatavilla: <https://tem.fi/paastokauppa>. Viitattu 12.12.2023.

Valio, 2021. Valion historian suurin energiatehokkuusinvestointi Lapinlahdelle: tehtaan piipusta lämpö talteen. Saatavilla: <https://www.valio.fi/uutiset/valion-historian-suurin-energiatehokkuusinvestointi-lapinlahdelle-tehtaan-piipusta-lampo-talteen/>. Viitattu 5.12.2023

Vatjankoski, 2021. Päästöt vähenevät lämpöä varastoivien hiekka-akkujen ansiosta – iso askel kohti hiilineutraalia kaukolämpöä. Saatavilla: <https://www.vatajankoski.fi/paastot-vahenevat-lampoa-varastoivien-hiekka-akkujen-ansiosta-iso-askel-kohti-hiilineutraalia-kaukolampoa/>. Viitattu 8.12.2023

VNTEAS, 2021. Hiilineutraalisuustavoitteen vaikutukset sähköjärjestelmään. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162705>. Viitattu 5.12.2023.

VTT, 2020. A review of digitalization in the Finnish manufacturing SME companies. Saatavilla: [https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/42494175/Digitalisation in Finnish manufacturing SMEs final.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/42494175/Digitalisation_in_Finnish_manufacturing_SMEs_final.pdf). Viitattu 13.12.2023.

VTT, 2021. Digitalisaatio parantaa yrityksen kannattavuutta. Saatavilla: [https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/52969385/DigiSiirto tulokset 210928.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/52969385/DigiSiirto_tulokset_210928.pdf). Viitattu 13.12.2023.