

Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu
Elektroniikka ja sähkötekniikka

Salla Lyytikäinen

**Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumppujen avulla Suomen
teollisuuden energiamurroksessa**

Kandidaatintyö

11.12.2022

Työn ohjaaja:

Professori, Jaakko Ketomäki



Tekijä Salla Lyytikäinen

Työn nimi Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumppujen avulla Suomen teollisuuden energiamurroksessa

Koulutusohjelma Sähkötekniikan kandidaattiohjelma

Pääaine Elektroniikka ja sähkötekniikka **Pääaineen koodi** ELEC3013

Vastuupettaja Markus Turunen

Työn ohjaaja Jaakko Ketomäki

Päivämäärä 11.12.2022

Sivumäärä 26

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tulevaisuuden energiajärjestelmän on toimittava energiatehokkaasti ja hiilineutraalisti. Tämä kunnianhimoinen tavoite näkyy energiamurroksena eli uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntymisenä ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentymisenä. Tavoitteen toteutumisessa korostuu hukkalämmön hyödyntäminen tehokkaasti, mikä on energiajärjestelmän kiertotaloutta parhaimmillaan.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään potentiaalisia teollisuuden hukkalämmönlähteitä ja niiden hyödyntämistä lämpöpumppujen avulla. Lisäksi työssä käydään läpi hukkalämpöön liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia. Niiden avulla tarkastellaan hukkalämmönlähteiden ja lämpöpumppujen vaikutusta Suomen teollisuuteen ja vallitsevaan energiamurrokseen. Työ pohjautuu hukkalämpöä ja lämpöpumppuja käsitteleviin raportteihin ja tieteellisiin artikkeleihin.

Työn perusteella voidaan todeta, että lämpöpumppujen hyödyntämistä ja vaikutusta Suomen teollisuuteen on vaikea arvioida, sillä siihen vaikuttaa monet tekijät muun muassa tuotantolaitoksen prosessit ja niiden lämpötilatasot, sijainti, sähkö- ja lämpöverkon rakenne sekä verotus. Työssä kuitenkin ilmeni, että lämpöpumput ovat tärkeä osa teollisuuden sähköistymiseen. Varsinkin lämpövarastojen kanssa yhteistyössä toimivat lämpöpumput tuovat sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmään tarvittavaa joustoa, mikä lisää lämpöpumppujen kannattavuutta.

Avainsanat energiamurros, hukkalämpö, lämpöpumppu, teollisuuden sähköistäminen

Sisällys

1 Johdanto.....	1
2 Energiamurros	2
2.1 Vaikutus teollisuuteen.....	3
2.2 Tilanne nykypäivänä	6
3 Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen	7
3.1 Hukkalämmönlähteet teollisuudessa.....	7
3.2 Lämpöpumput	9
3.2.1 Toiminta ja käytettävyys	9
3.2.3 Lämpöpumpun haasteet ja mahdollisuudet.....	13
3.3 Hukkalämmön käyttökohteet	14
4 Lämpöpumpun vaikutus teollisuuden energiamurrokseen	15
4.1 Hiilidioksidipäästöt	15
4.2 Energiatehokkuus.....	16
5 Johtopäätökset.....	19
Lähteet	22

1 Johdanto

Fossiilisten polttoaineiden käyttäminen aiheuttaa suurimman osan maailman kasvihuonekaasupäästöistä. [1] Nämä ilmakehään vapautuvat hiilidioksidipäästöt vaikuttavat suoraan kasvihuoneilmaston voimistumiseen ja ilmaston lämpenemiseen. Tilastokeskuksen selvityksen mukaan [2] Suomen energian käyttö teollisuudessa vuonna 2020 koostui puupolttoaineista, sähkön nettohankinnasta, hankitusta lämmöstä, öljystä, hiilestä, maakaasusta, turpeesta ja muista energialähteistä. Näistä öljyn, maakaasun, turpeen ja kivihiilen käyttö lisää hiilidioksidipäästöjä ilmakehään, jolloin ne estävät auringon lämpösäteilyn pääsemistä pois avaruuteen ja näin edesauttavat ilmaston lämpenemistä.

Fossiilisista polttoaineista eli öljystä, maakaasusta, turpeesta ja kivihielestä luopumiseen tarvitaan toimivia ratkaisuja. Yksi näistä keinoista on teollisuuden sähköistäminen, jolloin polttamista voitaisiin korvata ja päästä jopa kokonaan eroon tulevaisuudessa. Siispä energiatehokkuuden parantaminen ja fossiilisten polttoaineiden vähentäminen sähköistämällä ovat tulleet tärkeäksi avainkohdaksi teollisuudessa.

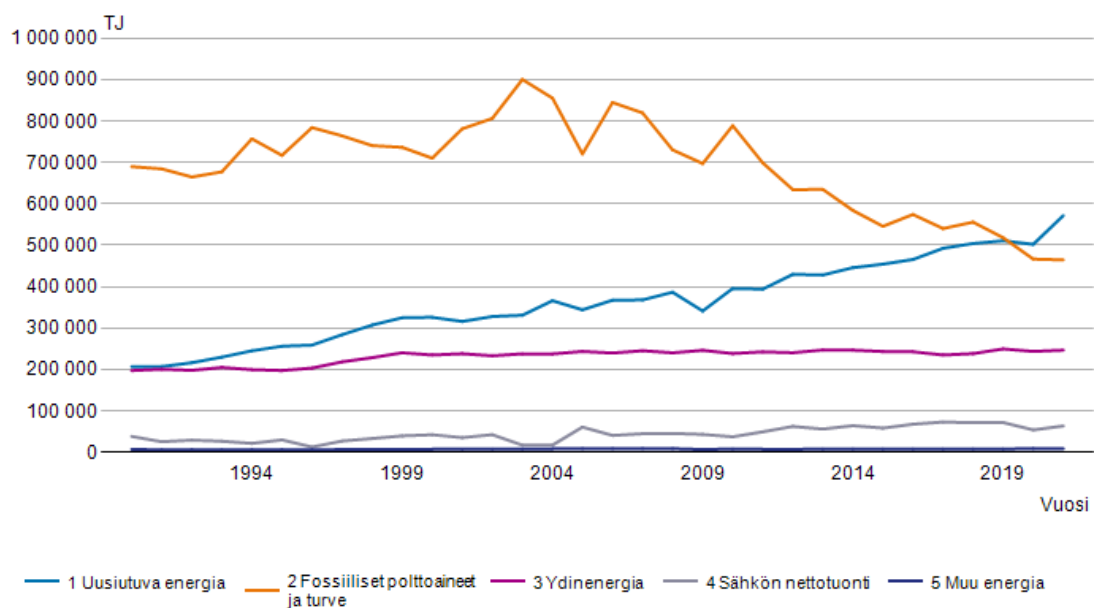
Työn tavoitteena on kartoittaa lämpöpumppujen vaikutusta Suomen teollisuudessa. Taustoitetaan Suomen teollisuuden energiamurrosta, jonka jälkeen selvitetään, miten hukkalämpöä hyödynnetään lämpöpumppujen avulla ja mitä haasteita siihen liittyy. Lopulta saadaan näkemys, miten lämpöpumppujen käyttäminen vaikuttaa Suomen teollisuuden energiamurrokseen hiilidioksidipäästöjen ja energiatehokkuuden näkökulmasta.

Kandidaatintyö jakaantuu viiteen lukuun. Johdannon jälkeen esitellään tällä hetkellä vallitsevaa energiamurrosta ja sen vaikutusta teollisuuteen. Kolmas luku koostuu kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa käsitellään hukkalämmön hyödyntämistä ja siihen liittyviä haasteita. Toinen osa on teoriapainotteinen, jossa keskitytään lämpöpumpun toimintaan ja käytettävyyteen. Neljännessä luvussa perehdytään, miten lämpöpumppu vaikuttaa teollisuuden energiamurrokseen hiilidioksidipäästöjen ja energiatehokkuuden näkökulmasta. Viides luku koostuu työn pohjalta tehdyistä johtopäätöksistä.

2 Energiamurros

Energiasektori on jo pitkään käyttänyt fossiilisia polttoaineita energiantuotannossa, joka on vaikuttanut nousujohteisesti maailman päästöihin ja ilmastonmuutoksen etenemiseen. [1] Tätä onkin yritetty torjua käyttämällä puhtaampaan energiantuotantoa, jota energiamurros pohjimmiltaan on. Energiamurros siis tarkoittaa energiajärjestelmän siirtymistä kohti uusiutuvaa, hiilineutraalia ja kestäväää energiantuotantoa. [3] Siirtymävaihetta pystyy hyvin havainnollistamaan Tilastokeskuksen viivakaavion avulla. Kuvasta 1 nähdään, miten energian kokonaiskulutus energialähteittäin on muuttunut vuodesta 1990 vuoteen 2021. Viime vuosina fossiilisten polttoaineiden käyttö on ollut laskussa, kun taas uusiutuvien energiamuotojen käyttö on lisääntynyt. [4]

Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 1990-2021



Kuva 1. Suomen energian kokonaiskulutus energialähteittäin vuosilta 1990–2021. [4]

Euroopassa energiajärjestelmän siirtymäkautta kohti puhtaampaa energiantuotantoa on edesauttanut paljon Euroopan Unioni. EU:n päästötavoitteet ovat tiukentuneet vuodesta 2007 lähtien. Silloin EU hyväksyi vähentämään päästöjä 20 prosenttia vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoden 1990 päästöihin. Samalla päätettiin nostaa 20 prosenttia uusiutuvan energian tuotantoa ja energiatehokkuutta. [5] Päästöjen vähentämisen, uusiutuvan energiantuotannon lisäämisen ja energiatehokkuuden

parantamisen tavoitteita on päivitetty EU:ssa uudestaan vuosina 2014, 2015 ja 2018. Tämän lisäksi EU on lisännyt ilmastoneutraaliustavoitteen vuoteen 2050 mennessä. [6]

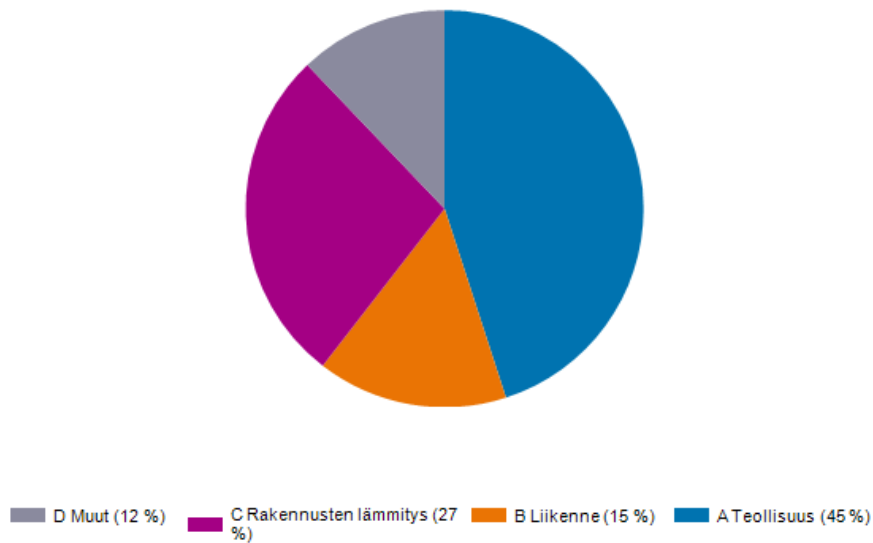
Viime vuonna 2021 Suomen kasvihuonekaasupäästöistä 71 prosenttia tuli energian kuluttamisesta ja tuottamisesta. [7] Kuitenkin vuoteen 2020 verrattuna energiasektorin päästöt laskivat 0,7 prosenttia, joka johtuu suurimmaksi osaksi uusiutuvien energialähteiden käytön kasvusta ja fossiilisten polttoaineiden käytön laskusta. [8] Energialähteiden siirtyminen kohti puhtaampaan energiaa tukee Suomen hiilineutraaliustavoitetta, jonka Suomen hallitus vuonna 2019 asetti. [6] Seuraavassa kappaleessa perehdytään enemmän energiamurroksen vaikutuksesta Suomen teollisuuden sähköistymiseen.

2.1 Vaikutus teollisuuteen

EU:n komissio esitteli 55-valmiuspaketin viime vuoden heinäkuussa, jonka avulla pyritään vähentämään EU-maiden kasvihuonekaasujen nettopäästöjä vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030. Valmiuspakettiin kuuluu muun muassa uusiutuvan energian ja energiatehokkuuden edistäminen, hiilirajamekanismi, energiaverotus ja taakanjakoasetus. [9]

Uusiutuvan energian ja energiatehokkuuden edistäminen kiertotalouden näkökulmasta sekä energiaverotuksen siirtyminen määräperusteisesta verotuksesta energiasisältöön perustuvaan verotukseen lisää päästöttömän energian käyttöä teollisuudessa. EU:n 55-valmiuspaketti vaikuttaa suuresti teollisuuden toimijoihin, sillä Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2021 Suomessa kulutetusta energiasta 45 prosenttia käytettiin teollisuudessa, mikä käy ilmi kuvasta 2. [9, 10]

Energian loppukulutus sektoreittain 2021

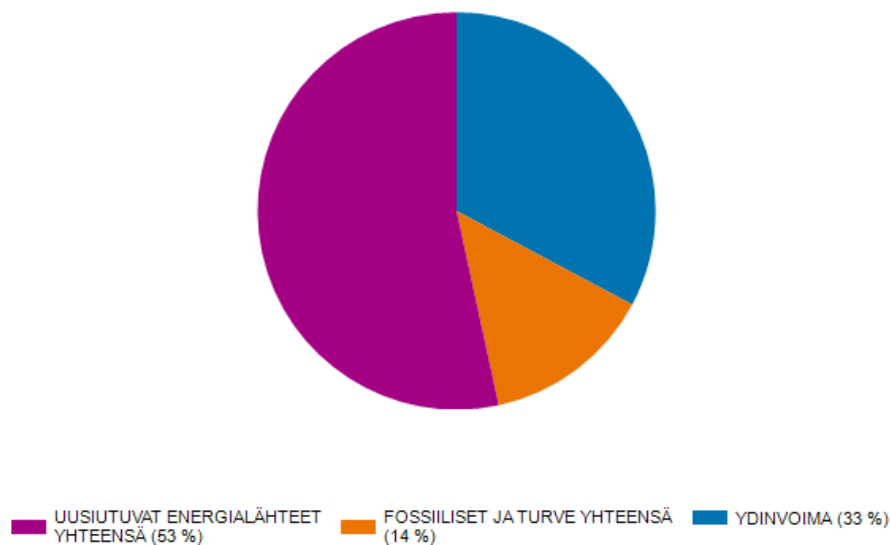


Kuva 2. Suomen energian loppukulutus sektoreittain vuonna 2021. [10]

Hiilineutraali Suomi 2035 -tavoite on näkynyt viime vuosina paljon politiikassa ja hintaohjailussa, mikä vaikuttaa teollisuuden energian tuotantoon ja kulutukseen. Puhtaan energian tuotannossa tärkeäksi avainkohdaksi onkin noussut teollisuuden sähköistäminen, sillä suurin osa sähköstä tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä. [6, 11]

Vuonna 2021 Suomessa tuotetusta sähköstä 86 prosenttia tuotettiin uusiutuvilla energialähteillä ja ydinenergialla, kuten kuvasta 3 nähdään. [11] Sähköistämällä saadaan hyvin nostettua tehtaiden energiatehokkuutta tuottamalla kestävämpää energiaa puhtaasti ilman fossiilisia polttoaineita. [6] Teollisuuden sähköistymisellä on siis merkittävä vaikutus hiilineutraaliin teollisuuteen.

Sähkön tuotanto energialähteittäin 2021



Kuva 3. Suomen sähkön tuotanto energialähteittäin vuonna 2021. [11]

Sähköistyminen voidaan jakaa kolmeen eri muotoon: suoraan ja epäsuoraan sähköistymiseen sekä erilaisiin lämpöpumppuratkaisuihin. Suoralla sähköistämällä tarkoitetaan esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden korvaamista sähkölämmityksellä, jolloin hiilidioksidipäästöjä ei synny. Epäsuoraan sähköistämiseen kuuluu esimerkiksi vetytalous, jossa sähkön avulla tuotetaan vetyä, jonka jälkeen se jalostetaan synteettiseksi polttoaineeksi. Tässäkään ei synny hiilidioksidipäästöjä. Lämpöpumppuratkaisuilla tarkoitetaan sähkökäyttöisiä lämpöpumppuja, jotka nostavat lämmönlähteen lämpötilaa hyödynnettävälle tasolle hiilipäästöttömästi. [12] Tässä kandidaatintyössä keskitytään suoraan sähköistämiseen sekä lämpöpumppuratkaisuihin.

Suomen teollisuudessa syntyvää hukkalämpöä pystytään hyödyntämään lämpöpumppuratkaisuilla kannattavasti tehtaiden sisäisissä prosesseissa tai joissakin tilanteissa jopa kaukolämpöverkkoon asti. [12] Lämpöpumpputeknologian käyttö vähentää primäärienergian eli fossiilisten polttoaineiden tarvetta, kun tarvittava lämpöenergia saadaan hukkalämmöstä. [13] Hukkalämmön hyödyntäminen mahdollistaa kaukolämpöverkon kattavaa käyttöä energianjakelijoiden, energiantuottajien ja teollisuuden välillä. [6]

Lämpöpumput pystyvät hyödyntämään alhaisia sähkön hintoja ja tuomaan joustavuutta sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmään. Voidaan siis todeta, että näiden teollisuuden prosessien ja kaukolämpöverkon sähköistyminen vaikuttaisi positiivisesti Suomen hiilineutraaliustavoitteeseen. [6] Teollisuuden sähköistämistä on kuitenkin rajoittanut monia vuosia investointien, huoltokustannusten ja sähkön hinnan sekä verotuksen suuruus. Näitä pitäisi saada pienennettyä, jotta teollisen toiminnan sähköistyminen olisi kannattavaa. [14] Sähköistymisen haasteista kerrotaan lisää seuraavassa kappaleessa.

2.2 Tilanne nykypäivänä

Vuonna 2015 solmittiin Pariisin ilmastopöytäkirja, jonka tavoitteena oli kääntää laskuun maailman kasvihuonekaasupäästöt. Samalla sovittiin, että maapallon ilmaston lämpiäminen pyritään pitämään 1,5 celsiusasteessa. [15] Kuitenkin WMO:n (World Meteorological Organization) vuonna 2022 julkaiseman tiedotteen mukaan ilmasto saattaa lämmetä yli 1,5 asteen rajan jo seuraavan viiden vuoden aikana. [16]

Teollisuuden sähköistyminen on pitkä prosessi, sillä siihen liittyy suuria haasteita. Yksi haasteista on sähköinfran kapasiteetin rajallisuus. Sähköistäminen lisää sähköverkon kulutusta, jolloin verkko voi kuormittua liikaa. Sähköverkkoa täytyy siis vahvistaa, jotta se kestänee kulutusta. Sähköverkon vahvistaminen sekä tehtaiden sähköistyminen on kuitenkin kallista ja hidasta. [13, 17] Vanhan teknologian uusiminen uudella teknologialla on vaikeaa, sillä lämpöpumppuratkaisut suunnitellaan kokonaisina yksikköinä vanhan tilalle. Sähköistämisen investoinneista täytyykin saada taloudellisesti kannattavia, jotta ne toteutuisivat. [12]

Energiateollisuus on Suomen teollisuusaloista suurin kasvihuonekaasupäästöjen muodostaja. [18] Sähkön- ja lämmöntuotannon sähköistyminen vaikuttaa myös muiden energiaintensiivisten teollisuusalojen päästöihin, joista kolme suurinta ovat kemian-, metalli- ja metsäteollisuus. [6, 19] Toimialojen vähähiilitiekartoissa todetaan, että metsäteollisuuden tehdaspäästöt olivat noin 3 miljoonaa hiilidioksiditonnia vuonna 2019. Suurin osa metsäteollisuuden päästöistä tulee fossiilisten polttoaineiden käytöstä. [6] Esimerkiksi metsäteollisuuden kuivatuskäsittelyissä käytetään kuivaimia, jotka toimivat vieläkin maa- tai nestekaasulla. [12]

Vuonna 2020 metalliteollisuuden päästöt olivat noin 1,7 miljoonaa hiilidioksiditonnia. [20] Metalliteollisuus kuluttaa merkittävän paljon hiiltä, mikä lisää sen kasvihuonekaasupäästöjä. [19] Kemianteollisuudessa päästöt olivat noin 1,3 miljoonaa hiilidioksiditonnia. [20] Merkittävä osa kemianteollisuuden energiankulutuksesta tulee öljyn käytöstä. [19]

3 Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen

Hukkalämpöä saadaan suurimmaksi osaksi jätevedestä, datakeskuksista sekä teollisuudesta. [13, 19] Tässä luvussa keskitytään teollisuuden hukkalämmönlähteisiin.

3.1 Hukkalämmönlähteet teollisuudessa

Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämistä selvitetään monelta eri taholta, sillä jokainen tuotantolaitos on hyvin erilainen. Siispä niillä on erilaiset hukkalämmön hyödyntämispotentiaalit ja näin ollen hyödyntämismäärät vaihtelevat. [13] Voidaan kuitenkin yleistää, että teollisuuden energiaintensiivisimmistä prosesseista syntyy eniten potentiaalista hukkalämpöä. Esimerkiksi sellutehtaassa energiaa kuluu eniten sellun keittämiseen ja kuivaamiseen sekä mustalipeän haihduttamiseen. Näissä korkean lämpötilatason prosesseissa syntyy poistokaasuja ja lämpövirtoja jätevesiin, jotka ovat potentiaalisia hukkalämmönlähteitä. [19]

Metalliteollisuudessa on myös paljon korkean lämpötilatason prosesseja esimerkiksi sulatus, lämpökäsittely ja hehkutus, joista saadaan korkean lämpötilan hukkalämpöä. Näiden prosessien lämpötilat ovat yli 500 celsiusastetta. Teräksen jalostuksessa taas maalausprosesseissa ja prosessien esilämmityksessä syntyy potentiaalista hukkalämpöä. [12]

Metsä- ja metalliteollisuuden lisäksi eri teollisuudenaloilta löytyy jo hukkalämpövirtoja, joiden lämpötilat ovat lämpöpumpuille hyödynnettävällä tasolla eli noin 20–50 astetta. Näitä ovat muun muassa:

- lämpöuunien ja kuivureiden kuumat poisto- ja savukaasut
- prosessien jäähdytysvedet ja poistoilmavirrat

- paineilmakompressoreiden jäähdytys
- koneellisen jäähdytyksen lauhdelämpö [22]

Hukkalämmön käyttämisellä on mahdollisuuksien lisäksi haasteita. Suurimmat haasteet liittyvät toimitusvarmuuteen ja investointien kannattavuuteen. Ylijäämälämmön hyödyntämiselle tehdään tehdaskohtaiset investointi- ja kannattavuuslaskelmat sekä suunnitelmat, joiden perusteella investointipäätös tehdään. [14]

Hukkalämmön haasteita:

- kaukana kaukolämpöverkosta

Suurin osa tehtaista sijaitsee kaukana taajama- ja keskusta-alueista, joissa kaukolämpöverkko sijaitsee. Pidemmät välimatkat luovat lämpöhäviöitä. Esimerkiksi Porvoon Kilpilahden teollisuusalueen hukkalämpöjen hyödyntäminen Helsingin kaukolämmön tuotannossa vaatii noin 23–27 km pitkän lämmönsiirtolinjan. [24]

- saatavuuden ajallinen vaihtelu

Ylijäämälämpöä tuotetaan vain, kun tehtaan toiminta on käynnissä. Ylijäämälämmöstä tuotettua kaukolämpöä ei siis saada jatkuvasti vaan se vaihtelee. Tämä tuo haasteita kaukolämpöryityksillä, jotka joutuvat varastoimaan lämpöä turvatesaan tasaisen lämmön saamisen. [14] Kaukolämmön tuotanto ei saa myöskään vaarantaa teollisuuden prosesseja. [19]

- hukkalämmön varastointi ja sen jälkeinen hyödyntäminen

Lämpimän veden ja kaukolämmön varastointia on jo kehitetty esimerkiksi vanhoihin maanalaisiin öljyluoliin. [25] Kuitenkin tarvitaan vielä paljon tutkimustyötä termokemiallisten varastointimenetelmien mahdollisuuksista, jotta hukkalämpöä pystyisi hyödyntämään entistä paremmin teollisuudessa. [26]

- teollisuuden hukkalämmön rajallisuus

Hukkalämpöä saadaan vain tietyistä aikaisemmin mainituista prosesseista. Enempää hukkalämpöä ei voida saada, joka vähentää halukkuutta teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämiseen. [19] Myös prosessien tekninen hukkalämpöpotentiaali voi olla hukkalämpömäärää pienempi. Esimerkiksi metalliteollisuuden poistokaasujen massavirta saattaa olla hyvin pieni, jolloin lämmöntalteenottopotentiaali vähenee merkittävästi. [12]

3.2 Lämpöpumput

Lämpöpumpun avulla pystytään hyödyntämään matalalämpöistä ja ylijäänyttä lämpöenergiaa nostamalla lämpötilatasoa korkeammalle. [27] Tässä luvussa pohjustetaan lämpöpumppujen teorianmalli, jota käytetään hyödyksi, kun analysoidaan lämpöpumpputeknologian vaikutusta teollisuuden energiamurroksessa. Teoriaosuudessa tarkastellaan lämpöpumppujen toimintaa teollisuuden näkökulmasta.

3.2.1 Toiminta ja käytettävyys

Lämpöpumpun toiminta perustuu lämpöenergian siirtämiseen matalammasta lämpötilasta korkeampaan, jolloin sitä voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa tai teollisuuden eri prosesseissa. [13] Tämän saavuttamiseksi pumppu tarvitsee ulkoista energiaa eli sähköä tai lämpöenergiaa sekä höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloiltaan sopivia kylmäaineita toimiakseen. [17] Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, joihin vaikuttaa vallitseva lämpötila ja paine. Kylmäaineilla voidaan siirtää merkittävä määrä lämpöenergiaa verrattuna kylmäaineen massavirtaan, joka vaikuttaa lämpöpumpun COP-lukuun. [28]

COP-luku on lämpökerroin, joka määrittelee lämpöpumpun tehokkuuden. Se kuvaa saatavan lämpöenergian ja siihen käytetyn työn suhdetta. Kerroin voi vaihdella 0,4–30 riippuen lämpöpumpusta sekä lämmönlähteen ja tuotettavan lämmön lämpötilaerosta. [22] Kaavan (1) mukaisesti voidaan nähdä, että mitä suurempi COP-luku on, niin sitä moninkertaisempi lämpöpumpusta saatava lämpöenergia on.

$$COP = Q_{out} / W_{in} \quad (1)$$

COP = lämpökerroin

Q_{out} = lämpöpumpulla saatu energian määrä

W_{in} = lämpöpumpulla käytetty työn määrä

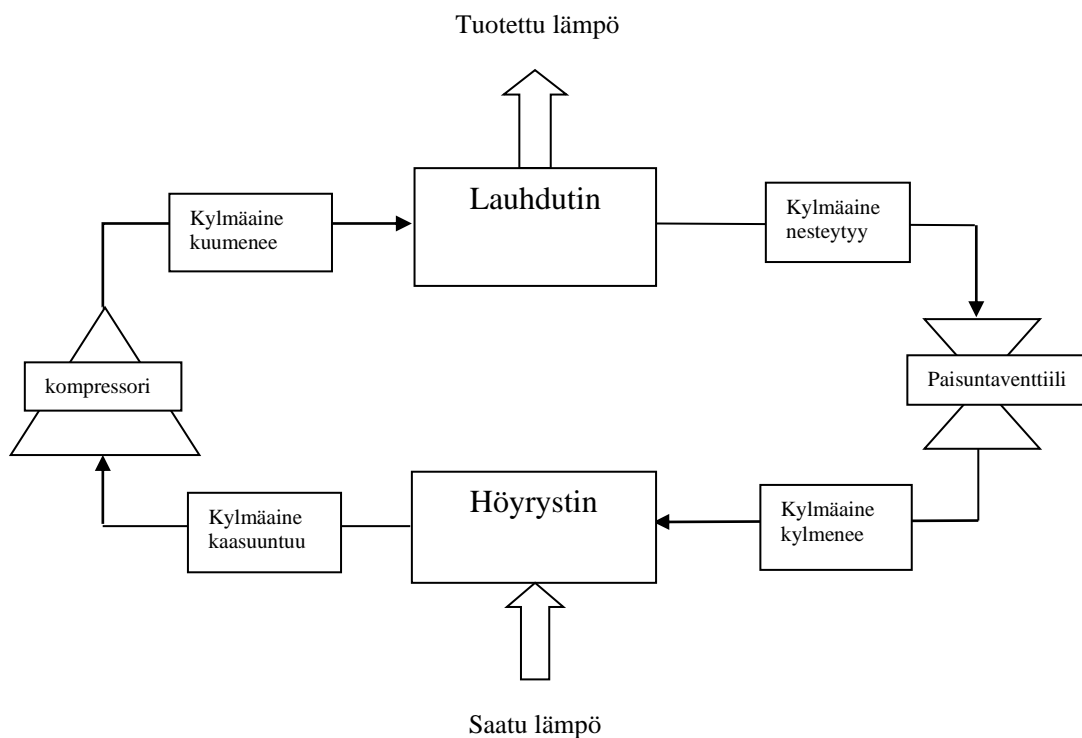
Kylmäaineet jaetaan synteettisiin ja luonnollisiin. Synteettiset kylmäaineet ovat suurimmaksi osaksi hiilivetyjä, jonka vetyatomeja on korvattu halogeenimolekyyleillä. Monien synteettisten kylmäaineiden, esimerkiksi CFC-kylmäaineiden, käyttö on kuitenkin kielletty, sillä ne ovat haitallisia otsonikerrokselle. Nykyään lämpöpumpuissa käytetään HFC-kylmäaineita esimerkiksi R134a, R404A, R407C, R410A ja R507A. Myös niiden käyttöä ollaan kokonaan kieltämässä, sillä ne vaikuttavat ilmaston lämpenemiseen. Markkinoille on kuitenkin tuotu osittain halogenoituja hiilivetyjä eli HFO-kylmäaineita, joiden käytöllä ei ole mitään rajoituksia. [29]

Luonnollisia kylmäaineita ovat muun muassa ammoniakki, puhtaat hiilivedyt ja hiilidioksidi. Näiden käytölle ei ole asetettu rajoituksia tai kieltoja F-kaasuasetuksessa toisin kuin edellä mainituilla synteettisillä kylmäaineilla. Puhtaiden hiilivetyjen herkin palamisen ja ammoniakin myrkyllisyyden takia, luonnollisten kylmäaineiden käyttö on markkinoilla vähäisempää. Näiden käyttöä säädellään painelaitelainsäädännöllä sekä tuoteryhmittäin eri standardeissa. [29]

Markkinoilla olevia lämpöpumpputyyppejä on erilaisia riippuen pumpun käyttökohteesta ja toimintamallista. Yksi tapa on jakaa lämpöpumput avoimen kierron ja suljetun kierron pumppuihin. Kemianteollisuudessa avoimen kierron lämpöpumput ovat suurimmaksi osaksi mekaanisen höyryn komprimointilaitteita, joissa sähköä avulla nostetaan höyryn lämpötilaa ja painetta, jolloin saadaan höyrystettyä samaa matalapaineisempaa ainetta. Höyryn mekaanisessa komprimoinnissa COP-luku voi nousta kolmesta jopa kolmeenkymmeneen. [30] Toinen avoimen kierron lämpöpumppu on termokompressori, jossa matalapaineiseen höyryyn sekoitetaan korkeapaineista käyttöhöyryä. Tätä käytetään paljon esimerkiksi metsäteollisuudessa,

jossa syntyy paljon matalapaineista höyryä. [22] Termokompressorissa COP-luku jää välille 1,5–5. [30]

Suljetun kierron lämpöpumppuja ovat kuuman lämpöenergian hyödyntävä absorptiolämpöpumppu sekä mekaaninen kompressorilämpöpumppu, joihin tämä työ pitkälti keskittyy, sillä ne ovat yleisimmät lämpöpumppumallit. Kompressorilämpöpumppujen käyttöenergiana toimii sähkö, jonka avulla saadaan nostettua kiertoaineen lämpötilaa ja painetta. Kompressorilämpöpumppujen COP-luku vaihtelee välillä 2,5–7,5. [22] Seuraavassa kappaleessa käydään läpi kompressorilämpöpumpun toimintaperiaate ja kierto, jota havainnollistetaan myös kuvassa 4.



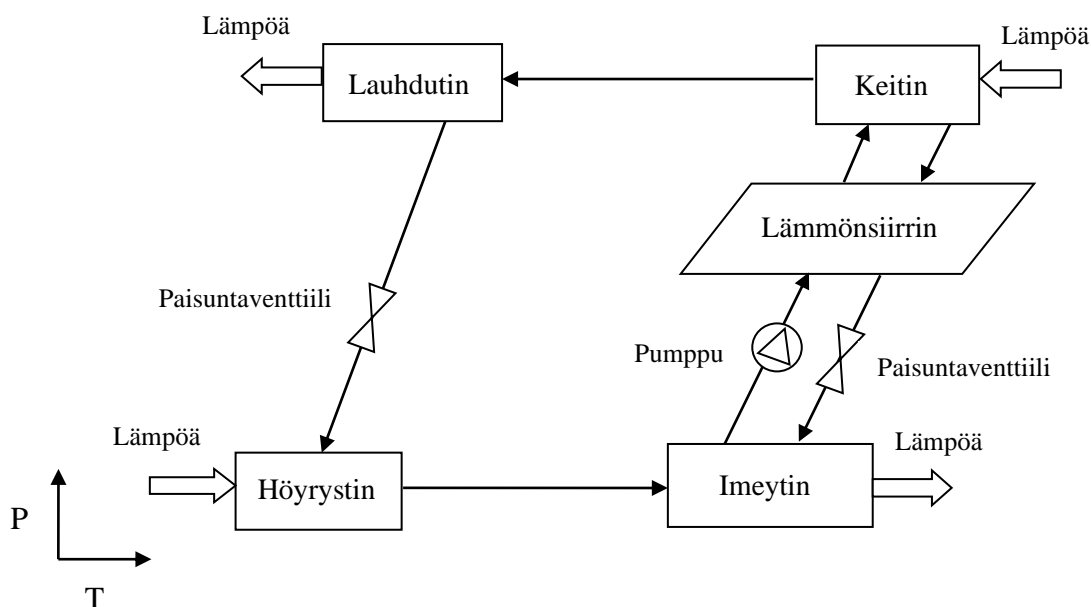
Kuva 4. Kompressorilämpöpumpun toimintamalli, jossa lämpöä käytetään lämmönlähteenä. Kiertoaineena toimii kylmäaine.

Lämmönlähteestä saatu lämpö siirtyy ensin lämpöpumpun höyrystimeen, jolloin pumpun sisällä olevaan kylmäaineeseen sitoutuu lämpöä. Näin kylmäaine höyrystyy ja siirtyy kompressoriin. Puristamalla saadaan nostettua painetta, jolloin

kylmäainehöyryn lämpötila nousee. Tämän jälkeen höyry siirtyy lauhduttimeen, jossa se jäähtyy nesteeksi esimerkiksi lämmitysverkoston veden avulla ja samalla saadaan vapautettua korkealämpöistä lämpöenergiaa esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. Ennen kuin kylmäaineneste palaa takaisin höyrystimeen, se menee paisuntaventtiilin läpi, jossa alennetaan painetta ja lämpötilaa. [31]

Absorptiolämpöpumput koostuvat lämpöpumpun lisäksi ulkoisesta lämmönlähteestä, jota on yleensä helposti ja edullisesti saatavilla. Näitä käytetään paljon teollisuudessa, jossa syntyy edullista hukkalämpöä eli kuumaa höyryä tai vettä. Kuumalla lämpöenergialla voidaan nostaa lämpötilaa jopa yli 80 celsiusastetta. [22]

Absorptiolämpöpumput eroavat mekaanisista lämpöpumpuista, sillä niissä kiertää kylmäaineen lisäksi liuotin. Kylmäaineen ja liuottimen valinta vaikuttaa pumpun ominaisuuksiin, esimerkiksi COP-lukuun, joka on tyypillisesti noin 1,5–1,7. [22, 32] Seuraavassa kappaleessa käydään läpi absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate. Kuvassa 5 esitetään absorptiolämpöpumpun kierto, jossa ylöspäin mentäessä paine kasvaa ja oikealle mentäessä lämpötila kasvaa.



Kuva 5. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate ja kierto. Ylöspäin mentäessä paine kasvaa ja oikealle mentäessä lämpötila kasvaa. Muokattu. [32]

Absorptiolämpöpumppuun kuuluu lauhdutin, keitin, höyrystin ja imeytin. Keitin sisältää liuosta, josta ulkoisella lämpöenergialla saadaan höyrystettyä ja erotettua liuennut kylmäaine, joka siirtyy lauhduttimeen. Lauhduttimessa kylmäainehöyrin lämpötila laskee, jolloin vapautuu lämpöä. Tämän jälkeen kylmäaine siirretään höyrystimeen paisuntaventtiilin läpi. Kylmäaine höyrystyy uudelleen joko paisuntaventtiilissä tai ulkoisen lämpöenergian avulla imeyttimeessä. Siellä kylmäaine imeytetään liuottimeen, jolloin vapautuu lämpöä. Jotta kylmäaineliuos saadaan siirrettyä takaisin keittimeen, täytyy liuos siirtää pumpun ja lämmönsiirtimen avulla. Keittimessä liuksesta erotettu höyrystynyt kylmäaine siirtyy lauhduttimeen ja jäljelle jäänyt liuottimen sisältämä liuos siirretään takaisin imeyttimeen lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiilin avulla. [32]

3.2.3 Lämpöpumpun haasteet ja mahdollisuudet

Lämpöpumpun haasteita ovat muun muassa ilmastoneutraalien kylmäaineiden kehittäminen, lauhdutuslämpötilan nostaminen sekä entistä kylmempien lämmönlähteiden hyödyntäminen. Suurin osa synteettisistä kylmäaineista on käyttörajoitettuja, sillä ne ovat kasvihuonehaitallisia, joka on ristiriidassa lämpöpumppujen tavoitteeseen vähentää kasvihuoneilmiön ja ilmaston lämpenemisen voimistumista. Teollisuudessa käytetään myös luonnollisia kylmäaineita, joista ilmastoneutraaleja kylmäaineita ovat puhtaat hiilivedyt ja ammoniakki. Herkän palamisen ja ammoniakkin myrkyllisyyden vuoksi näidenkin käytössä on kuitenkin rajoituksia. [29]

Yksi lämpöpumppujen suurimmista tavoitteista on vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Varsinkin kaukolämmön tuottamisessa lämpöpumpun käyttämisestä on merkittävä hyöty, jos lämmönlähteen lämpötila on riittävä. Jos lämpötila laskee radikaalisti, se vaikuttaa suuresti lämpöpumpun käyttämiseen. Liian alhaisessa lämpötilassa, esimerkiksi talvella kovassa pakkasessa, pumppu ei välttämättä toimi kunnolla. [17] Esimerkiksi Vuosaaren voimalaitoksen yhteyteen rakennetaan meriveden lämpöä hyödyntävä lämpöpumppu. Kesäaikana lämpöpumppu hyödyntää meriveden lämpöenergiaa, mutta talvisin merivesi on liian kylmää hyödynnettäväksi. Lämpöpumppu hyödyntääkin talvisin voimalaitoksen prosessikierrossa syntynyttä hukkalämpöä. [33]

Teollisuuteen on kehitetty kuumalämpöpumppuja, jotka mahdollistavat entistäkin korkeamman lämpötilan tuottamisen vieläkin matalalämpöisemmästä lähteestä. Näiden kehityksessä pitää kuitenkin ottaa huomioon, että sähköverkko on tarpeeksi vahva ja tarpeen tullen vahvistaa verkkoa. [17] Calefa Oy on edelläkävijä teollisuuden kuumalämpöpumppujen kehityksessä, sillä se lanseerasi jo vuonna 2018 kaupalliseen käyttöön HotLevel® -kuumalämpöpumpun. Näitä kuumalämpöpumppuja on käytössä useissa teollisuusyrityksissä esimerkiksi Mäntsälän datakeskuksessa ja UPM Korkeakosken sahalta. [34, 35]

Lämpöpumppujen kannattavuuteen vaikuttaa pumpun COP-luku. Tehokkuuden mittarina voidaan myös käyttää SCOP-lukua, joka ottaa huomioon lämpötilan vaihtelun koko vuoden aikana. Molempien lukujen kasvattamiseen voidaan vaikuttaa optimoimalla moniportaisia kytkentöjä sekä valitsemalla oikeanlaisia ja tehokkaita kylmäaineita. [22]

3.3 Hukkalämmön käyttökohteet

Teollisuuden prosesseissa ylijäänyttä sekundäärilämpöä eli hukkalämpöä hyödynnetään ilman tai lämpimän veden muodossa nostamalla hukkalämmön lämpötilaa, jolloin se on käyttökelpoista kaukolämpöverkkoon tai tuotantolaitoksen sisällä toiseen prosessiin. Hukkalämmön käyttäminen on kannattavinta silloin, kun lämpöenergian tuottaminen ja käyttäminen sijaitsevat mahdollisimman lähellä toisiaan ja samanaikaisesti. [22] Tällä tavalla häviöt ja kustannukset minimoidaan eli saadaan maksimaalinen hyöty. Hukkalämpöä on siis kannattavinta hyödyntää tuotantolaitoksen sisäisiin prosesseihin.

Metsäteollisuudessa hukkalämmön potentiaalisia käyttökohteita ovat kuivatus- ja lämpökäsittelyt. Osa metsäteollisuuden prosesseista esimerkiksi sellunkeitto ja viilun kuivaus vaativat yli 150 celsiusasteen, mikä on hankala saada hukkalämmöllä. [12] Kemianteollisuudessa hukkalämpöä voidaan käyttää haihdutus-, tislaus- ja kuivatusprosesseissa. [30] Metalliteollisuuden prosessien esilämmityksissä, maalauksissa ja peittauksessa voidaan hyödyntää hukkalämpöenergiaa. Elintarviketeollisuudessa hukkalämpöä voidaan käyttää pesuvesien lämmityksessä, pastöroinnissa ja kypsytysprosesseissa. [12] Teollisuudesta saatavaa hukkalämpöä voi

myös kannattavasti hyödyntää kaukolämpöverkkoon, jos hukkalämpö on kaukolämmön menoveden vaatimassa 90–120 celsiusasteen lämpötilassa. [13]

4 Lämpöpumpun vaikutus teollisuuden energiamurrokseen

Suurten lämpöpumppukokonaisuuksien hyödyntämispotentiaalin arviointia ja sitä kautta vaikutusta Suomen teollisuuden energiamurrokseen on monimutkaista. Lämpöpumppujen potentiaali ja vaikutus riippuu aina teollisuusalasta tehdaskohtaisesti, sen ominaisuuksista sekä hyödyntämisen kohteesta.

Arvioinnissa pitää huomioida aikaisemmin tässä työssä mainittuja tekijöitä kuten hyödynnettävän lämmönlähteen lämpötila ja määrä, lämpöenergian sijainti ja hinta, sähköverkon kestävyys, lämpöverkon rakenne sekä verotus. Nämä kaikki vaikuttavat lämpöpumppujen kannattavuuteen ja investoimiseen teollisuudessa ja näin ollen tarkastelut tehdään järjestelmäkohtaisesti. Tässä luvussa käydään läpi Suomen eri teollisuusalojen lämpöpumppuinvestointeja hiilidioksidipäästöjen näkökulmasta sekä eri tapoja tuottaa lämpöä lämpöpumppujen avulla energiatehokkuuden näkökulmasta.

4.1 Hiilidioksidipäästöt

Hiilidioksidipäästöjä syntyy suurimmaksi osaksi sähkön ja lämmön tuotannossa. Teollisuuden päästöihin vaikuttavat EU:n laatimat päästövähennystavoitteet ja energiatehokkuus- ja uusiutuvan energian direktiivit sekä Suomen verotus. [36] Vuoden 2021 alussa teollisuuden sähköveroa laskettiin EU-minimiin ja vuoden 2022 alussa kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat lämpöpumput, konesalit ja sähkökattilat siirtyivät alempaan sähköveroluokkaan 2. [37] Tämä veromuutos laskee hukkalämmöllä ja lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmön hintaa merkittävästi. Lisäksi polttoöljyn, kivihiilen, neste- ja maakaasun käytöstä verotetaan energiasisältö- ja hiilidioksidiveroa. [38] Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen hukkalämmöllä on siis entistä kannattavampaa ja vaikuttaa positiivisesti teollisuuden lämpöpumppuinvestointeihin ja prosessien sähköistymiseen.

Hiilidioksidipäästöjä voi leikata teollisuustoimijan ja energiayhtiön yhteisellä energiasysteemillä, joka on jo käytössä esimerkiksi Lempäälässä. [39] Tämä on yksi

energiantuotantotavoista, joka tulee lisääntymään entisestään tulevaisuudessa. Jakamistalous edesauttaa tulevaisuuden energiantuotantoa, sillä energiajärjestelmä muuttuu kohti hajautettua pientuotantoa. [40]

Kemianteollisuuden tuotantolaitoksen Kiilto Oy:n liimanvalmistusprosessissa syntyy kesällä hukkalämpöä yli tehtaan tarpeiden. Lempäälän Lämpö Oy:n ja Kiilto Oy:n yhteistyön tuloksena ylijäämäenergia otetaan talteen teollisuuden lämpöpumppuihin erikoistuneen Calefa Oy:n AmbiHeat-lämpöpumppulaitoksella. Laitoksessa muodostuu Lempäälän Lämmölle kaukolämpöä Kiillon tuotantolaitoksen hukkalämmöstä ja ulkoilmasta. Näin Lempäälän Lämpö korvaa maakaasun käytön kesällä. Talvella kaukolämpöä tuotetaan puupohjaisista uusiutuvista energianlähteistä, jota Kiillon tehdas pystyy hyödyntämään. [43] Tämän avulla Kiillon tuotantolaitoksen energiankulutus pieneni 1800 MWh vuodessa. Lempäälän Lämmön uusiutuvalla energialla tuotettu kaukolämpö Kiillon tehtaalle vähentää tehtaan hiilidioksidipäästöjä noin 310 tonnia vuodessa. [41]

Rakennuselementtejä valmistava Paroc Panel Systemin tuotannossa syntyvät hukkalämmöt kierrätetään myös AmbiHeat-lämpöpumppulaitoksen kautta, jonka avulla saatiin syrjäytettyä öljyn käyttö kokonaan kiinteistön lämmityksessä. Kun tuotanto ei ole käynnissä, lämpöä saadaan energiavarastoihin tuotetusta ylijäämälämmöstä. Tehdas tuottaa hukkalämmöstä lämpöenergiaa vuodessa 1120 MWh ja samalla hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet 300 000 kg. [42]

4.2 Energiatehokkuus

Teollisuudessa lämpöpumppujen käyttäminen on eniten vaikuttanut ylijäämälämpöenergian hyödyntämisen tuotantolaitoksen sisäisiin prosesseihin sekä kaukolämpöverkkoon. [13, 21] Suomessa kaukolämmön tuotannossa käytetään vielä noin 24 prosenttia fossiilisia polttoaineita. [43] Onneksi teollisuudessa ja varsinkin energia-alalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä on saatu vähennettyä hintaohjailulla. Teollisuuden toimijat ovatkin pyrkineet etsimään uusia innovaatioita puhtaan energian ja hukkalämmön käyttämiseen tuotantolaitoksissaan. [21] Tämä näkyy myös teollisuuden tuottaman hukkalämmön lisääntymisenä kaukolämpöverkossa. [43]

Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2021 Suomen kaukolämmöstä 13,8 prosenttia tuotettiin hukkalämmöllä. Hukka- ja ympäristölämpöjen talteenotolla tuotettiin 5410

GWh kaukolämpöä, josta 1 630 GWh tuotettiin lämpöpumpuilla vuonna 2021. Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen käyttö laski 3,1 prosenttia vuodesta 2020, kun taas uusiutuvien energialähteiden käyttö kasvoi 13 prosenttia. [8, 43]

Sähkön ja lämmön yhteistuotannon sekä ylijäämäenergian hyödyntämistä edistää myös vuonna 2014 säädetty energiatehokkuuslaki, joka velvoittaa suuret yritykset tekemään toiminnastaan energiakatselmuksen neljän vuoden välein. Katselmukseen kuuluu muun muassa hukkalämmön kustannus-hyötyanalyysit ja suunnitelma energian kierrättämiseen mahdollisimman tehokkaasti. [44]

Uusiutuvalla energialla, lämpövarastolla ja lämpöpumpputeknologialla voidaan varastoida lämpöenergiaa tehokkaasti ja edullisesti. Päivinä kun on tarjolla paljon uusiutuvaa energiaa esimerkiksi tuulivoimaa, voidaan lämpöpumppukapasiteettia ja lämmönlähteen lämpötilaa nostaa merkittävästi. Tämän jälkeen voidaan varastoida korkealämpöinen lämpöenergia lämpövarastoon tai kaukolämpöverkkoon. Kun lämpöenergiaa tarvitaan käyttöön teollisuudessa tai kaukolämpöverkossa, voidaan sitä vapauttaa lämpövarastoista. [45] Lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäyttö siis mahdollistaa lämmön tuotannon alhaisen sähkön hinnan aikoina, jolloin se on energiatehokasta. Samalla saadaan tasainen ja jatkuva lämmönlähde, joka on lämpötilaltaan tarpeeksi korkeaa/kuumaa käytettäväksi.

Lämpöenergian ja sähkön energiatehokkuuteen vaikuttaa suuresti tuotetun lämmön ja sähkön kysynnän vaihtelu. Kaukolämpö- ja sähköjärjestelmien kulutuspiikkien laskemiseen tasaiselle tasolle tarvitaan joustoa, jota saadaan lämpövarastoilla. Helen Oy:llä onkin meneillään kaksi lämpöenergian kausivarastointihanketta Mustikkamaan ja Kruunuvuorenrannan vanhoihin maanalaisiin öljyluoliin. Kausivarastoimisella saadaan tehostettua ja optimoitua tuotetun lämpöenergian hyödyntämistä sekä lisättyä uusiutuvien energialähteiden osuutta koko energiatarpeen kattamisessa. Mustikkamaan vuosituotanto on noin 140 GWh ja Kruunuvuorenrannan noin 6–7 GWh. [25]

Lämpöpumppulaitoksen rakentaminen peruslämpöä tuottavien voimalaitosten läheisyyteen mahdollistaa nollahintaisen tai jopa hinnaltaan negatiivisen lämmön saannin. Tällä tavalla lämmönlähteen lämpöenergiasta ei tarvitse maksaa, jolloin se vaikuttaa positiivisesti laitoksen energiatehokkuuteen. [45]

Riihimäellä sijaitsevalla Ekokemin voimalaitoksella saatiin nostettua tuotantotehoa hyödyntämällä kuuman savukaasun hukkalämpöä. Laitokselle asennettiin kaksi lämpöpumppua, joilla saatiin savukaasujen lämpöenergia otettua talteen. Lämpöpumput ovat absorptiolämpöpumppuja, jotka käyttävät savukaasusta talteen otettua lämpöenergiaa. Pumput lämmittävät kaukolämpöverkosta palaavan kylmän veden kaukolämmön menoveden vaatimaan 90–120 celsiusasteen lämpötilaan, jonka jälkeen se syötetään kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumppuinvestoinnilla kaukolämmön vuosituotanto nousi 27 GWh. [45]

Lämpöpumppujen kehittyminen on vaikuttanut ylijäämäenergian entistä tehokkaampaan hyödyntämiseen ja sitä kautta teollisuuden uusiutuvan energian investointeihin. Teollisuuden lämpöpumppuihin erikoistunut Calefa Oy kehitti vuonna 2018 HotLevel® -kuumalämpöpumpun, jolla voidaan nostaa hukkalämmön lämpötilaa jopa 130 celsiusasteeseen. Mäntsälän datakeskukseen asennettu Calefan kuumalämpöpumppu hyödyntää lämmönlähteenään 17 celsiusasteista hukkalämpöä, josta se tuottaa 105 celsiusasteista lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon. Tämän pumpun COP-luku eli hyötysuhde on 2,75 eli yhdellä kW:lla saadaan tuotettua 2,75 kW lämpöenergiaa. Yli sadan celsiusasteen lämpöenergia sopii käytettäväksi kaukolämpöverkon lisäksi myös teollisuuden korkean lämpötilan prosesseihin esimerkiksi kuivaukseen ja lämpökäsittelyihin. [34]

5 Johtopäätökset

Tämä työn tavoitteena oli kartoittaa lämpöpumppujen vaikutusta Suomen teollisuuden energiamurroksessa hiilidioksidipäästöjen ja energiatehokkuuden näkökulmasta. Työssä tarkasteltiin hukkalämpöjen hyödyntämistä lämpöpumppujen avulla sekä eri teollisuusalojen potentiaalisia hukkalämpöjä. Lisäksi työssä käytiin läpi näihin hukkalämmönlähteisiin liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia.

Ilmastonmuutoksen torjuminen on näkynyt energiajärjestelmän siirtymisenä kohti puhtaampaa energiantuotantoa. Suomessa tämän edistymisessä ollaan edelläkävijöitä, sillä vuonna 2019 Suomen hallitus esitti tavoitteen hiilineutraaliudesta vuonna 2035. Tämä tavoite on kunnianhimoinen ja vaatii paljon muutoksia nykyiseen energiatuotantoon ja sen järjestelmään, sillä energian loppukulutuksesta 45 prosenttia tulee teollisuudesta. [19] Myös suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä tulee teollisuudesta, koska nykyinen yhteiskunta on rakennettu fossiililla polttoaineilla toimivan teollisuuden varaan. Puhtaan energian tuotannossa tärkeäksi avainkohdaksi onkin noussut teollisuuden sähköistäminen, sillä suurin osa sähköstä tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä. [11]

Suomen teollisuudessa syntyy huomattavia määriä potentiaalista hukkalämpöä, jota nykylämpöpumpputeknologialla pystytään hyödyntämään. Sähkökäyttöiset teollisuuden suuret lämpöpumppukokonaisuudet ovat kehittyneet lähivuosina taloudellisesti kannattaviksi investoinneiksi. Niillä pystytään hyödyntämään hukkalämpöä tehokkaasti tehtaan sisäisiin prosesseihin ja tehtaan kiinteistöjen lämmitykseen sekä kaukolämpöverkkoon. Teollisuuden toimijoista voi tulla energian kuluttamisen lisäksi ylijäämäenergian myyjiä kaukolämpöyrityksille. Kaukolämpöverkkoon vaadittava 90–120 celsiusasteen lämpötila on mahdollinen kuumalämpöpumppujen avulla, jolloin lisälämmitystä ei tarvita. [34] Tämä vähentää teollisuusyritysten ostoenergian ja polttamisen tarvetta.

Vaikka potentiaalista hukkalämpöenergiaa on paljon tarjolla, sen sijainti on yleensä kaukana sieltä missä lämpöenergiaa tarvitaan eniten. Esimerkiksi Porvoon Kilpilahden teollisuusalueella hukkalämpöä syntyy noin 1000 MW verran, jolla saataisiin katettua neljäsosa pääkaupunkiseudun kaukolämmöstä. [46]

Lämmönsiirtolinjan pituus olisi kuitenkin noin 23–27 km, joka kasvattaa suuresti energiahäviöitä. [24]

Sijainnin lisäksi hukkalämmön hyödyntämisen haasteena on lämpöenergian saatavuuden ajallinen vaihtelu. Lämpömarkkinat vaativat joustoa, jota hukkalämmöllä on vaikea saada. Yksi ratkaisu tähän on lämpimän veden ja kaukolämmön varastointi, jota on jo kehitetty esimerkiksi täyttämällä maanalaisia öljyluolia lämpimällä vedellä. Kuitenkin tarvitaan vielä paljon tutkimustyötä termokemiallisten varastointimenetelmien mahdollisuuksista, jotta hukkalämpöä pystyisi hyödyntämään entistä paremmin teollisuudessa. [26]

Teollisuuden hukkalämpöenergiaa hyödynnetään eniten tehtaan sisäisissä prosesseissa tai kiinteistön lämmityksessä, jolloin kustannukset ja häviöt ovat minimissä. Lämmönlähteitä on teollisuudessa rajattu määrä, joten hukkalämpö ei riitä koko energiantuotannon kattamiseen. Ylijäämäenergian hyödyntäminen kuitenkin kasvattaa energiaomavaraisuutta ja tämän seurauksena onkin siirrytty enemmän kohti hajautettua energiantuotantoa, jossa lämpöenergiaa saadaan useista eri lähteistä. [47]

Vuonna 2021 Suomen kaukolämmöstä 13,8 prosenttia tuotettiin hukkalämmöllä. [43] Tulevaisuudessa teollisuuden lämpöpumppujärjestelmät yhdistettynä kaukolämpöverkkoon tulevat yleistymään entistä enemmän, sillä vuoden 2022 alussa kaukolämpöverkkoon lämpöenergiaa tuottavat lämpöpumput, konesalit ja sähkökattilat siirtyivät alempaan sähköveroluokkaan 2. [37] Tämä veromuutos laskee hukkalämmöllä ja lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmön hintaa merkittävästi.

Työ osoitti, että lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaalin arviointia ja sitä kautta vaikutusta Suomen teollisuuden energiamurrokseen on monimutkaista. Lämpöpumppujen potentiaali ja vaikutus riippuu aina teollisuuden alasta, sen ominaisuuksista sekä hyödyntämisen kohteesta. Potentiaalin arvioinnissa pitää ottaa huomioon aikaisemmin mainittuja tekijöitä kuten hyödynnettävän lämmönlähteen lämpötila ja määrä, lämpöenergian sijainti ja hinta, sähköverkon kestävyys, lämpöverkon rakenne sekä verotus. Nämä kaikki vaikuttavat lämpöpumppujen kannattavuuteen ja investoimiseen teollisuudessa ja näin ollen tarkastelut tehdään järjestelmäkohtaisesti.

Työn perusteella voidaan todeta, että teollisuuden lämpöpumput ovat tärkeä osa uusiutuvan energiatuotannon lisääntymiseen ja mahdollistaja sähköistyvään tulevaisuuteen. Joustavan sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmän kehittämisessä myös lämpöpumppujen käyttötavan tulee kehittyä. Energiatehokkuutta ja sitä kautta kannattavuutta lisää kuitenkin lämpöpumppujen yhteistoiminta lämpövarastojen kanssa sekä edellä mainittu lämpöpumppujen sähköveron siirtyminen luokkaan 2. Työtä voisi jatkaa tarkastelemalla termokemiallisia varastointimenetelmiä ja niiden hyödyntämistä teollisuuden hukkalämpöihin ja kaukolämpöverkkoon.

Lähteet

- 1 International Energy Agency. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, Global emissions rebound sharply to highest ever level. [Verkkajulkaisu]. 2021. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>
- 2 Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö 2020. [Verkkajulkaisu]. 2021. [Viitattu: 28.9.2022]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_tie_001_fi.html
- 3 Fortum Oy. Mikä ihmeen energiamurros? [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 24.11.2022] Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutishuone/tietopaketit-medialle/mika-ihmeen-energiaturros>
- 4 Suomen virallinen tilasto (SVT). Tilastokeskus, Energian hankinta ja kulutus. [Tilastotietokanta]. 2022. [Viitattu 1.12.2022]. Saatavissa: <https://pxdata.stat.fi:443/PxWeb/sq/1dcb50ad-6bc0-4d08-8737-176770cadf45>
- 5 Nicolas, E. S. EU observer. Why is EU off track for 2020 energy efficiency target? [Verkkajulkaisu]. 2020. [Viitattu: 25.11.2022]. <https://euobserver.com/news/147407>
- 6 Työ- ja elinkeinoministeriö. Yhteenvedo toimialojen vähähiilitiekartoista. [Verkkodokumentti]. 2020. [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162494/TEM_2020_52.pdf?sequen
- 7 Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut. [Verkkajulkaisu]. 2022. [Viitattu: 25.11.2022]. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cktlew2c03aln0a515eyjyx8>
- 8 Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian kokonaiskulutus kasvoi 6 % vuonna 2021, mutta fossiilisen energian kulutus laski. [Verkkajulkaisu]. 2022. [Viitattu: 25.11.2022]. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cl1p3puxx03j90cum3pwy2k5>
- 9 EU neuvosto & Eurooppa-neuvosto. 55-valmiuspaketti. [Verkkosivu]. [Viitattu 8.12.2022]. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- 10 Suomen virallinen tilasto (SVT). Tilastokeskus, Energian hankinta ja kulutus. [Tilastotietokanta]. 2022. [Viitattu 2.12.2022]. Saatavissa: <https://pxdata.stat.fi:443/PxWeb/sq/34930047-3059-4226-8896-4e288d970a78>
- 11 Suomen virallinen tilasto (SVT). Tilastokeskus, Energian hankinta ja kulutus. [Tilastotietokanta]. 2022. [Viitattu 2.12.2022]. Saatavissa: <https://pxdata.stat.fi:443/PxWeb/sq/662945c0-3b58-4e1d-a50f-2226355f53ae>

- 12 Motiva Oy. Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutus energiatehokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen [Verkkojulkaisu]. 2021. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/yritykset/yhteishankkeet/sahkoistyminen_hukkalammot_ja_lampopumput_teollisuudessa_yhteishanke
- 13 Fang, H. & Xia, J & Jiang, Y. Key issues and solutions in a district heating system using low-grade industrial waste heat. Energy. [Verkkolehti]. 2015. 86. S. 589–602. [Viitattu 1.12.2022]. Saatavissa: doi: 10.1016/j.energy.2015.04.052.
- 14 Motiva Oy. Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. [Verkkojulkaisu]. 2019. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf
- 15 Ympäristöministeriö. Pariisin ilmastopimus. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: <https://ym.fi/pariisin-ilmastopimus>
- 16 World Meteorological Organization. WMO update: 50:50 chance of global temperature temporarily reaching 1.5°C threshold in next five years. [Verkkojulkaisu]. 2022. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-update-5050-chance-of-global-temperature-temporarily-reaching-15%C2%B0c-threshold>
- 17 Energiateollisuus ry & ÅF-Consult Oy. Uudet energiateknologiat – yhteenveto polttamisen vaihtoehdoista. [Verkkojulkaisu]. 2019. [Viitattu 15.10.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/uudet_energiateknologiat_-_yhteenveto_polttamisen_vaihtoehdoista_af-consult_oy_2019.html
- 18 Suomen virallinen tilasto (SVT). Kasvihuonekaasupäästöjen raportoinnissa alkaa uusi kausi. [Verkkojulkaisu]. 2022. [Viitattu: 6.12.2022]. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cktlew2c03aln0a515eyjyxe8>
- 19 Patronen, J. & Uimonen, H. Työ- ja elinkeinoministeriö & AFRY Management Consulting. [Verkkodokumentti]. 2020. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2897650/EEDselvitys+1%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppuraportti+2020.pdf/88a0e63b-e2b6-eef9-1b4c-8c5411a0e531/EEDselvitys+1%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppuraportti+2020.pdf?t=1601627038073
- 20 Suomen virallinen tilasto (SVT). Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2020. [Verkkolehti]. 2021. [Viitattu: 25.11.2022]. ISSN 2670–2568. Saatavissa: https://www.tilastokeskus.fi/static/media/uploads/yymp_kahup_1990-2020_2021_23462_net.pdf

- 21 Wallerand, A. S. & Kermani, M. & Kantor, I. & Marechal, F. Optimal heat pump integration in industrial processes. *Applied Energy*. [Verkkolehti]. 2018. 219. S. 68–92. [Viitattu 1.12.2022]. Saatavissa: doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.114.
- 22 Motiva Oy. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. [Verkkajulkaisu]. 2013. [Viitattu 28.10.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.10766.shtml
- 23 Motiva Oy. Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. [Verkkajulkaisu]. 2019. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf
- 24 Uudenmaan ELY-keskus. Helen Oy, Kilpilahden teollisuusalueen hukkalämmön hyödyntäminen Helsingin kaukolämmön tuotannossa. [Verkkajulkaisu]. 2022. [Viitattu 16.11.2022]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Ymparistovaikutusten_arviointi/YVAhankkeet/Helen_Oy_Kilpilahden_teollisuusalueen_hukkalammon_hyodyntaminen_Helsingin_kaukolammon_tuotannossa
- 25 Arponen, T. Helen Oy. Jättimäisillä luolalämpövarastoilla joustavuutta ja lisää uusiutuvaa energiaa. [Verkkajulkaisu]. 2018. [Viitattu 5.12.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2018/j%C3%A4ttim%C3%A4isill%C3%A4-luolal%C3%A4mp%C3%B6varastoilla-joustavuutta-ja-lis%C3%A4-uusiutuvaa-energiaa>
- 26 IRENA. Innovation outlook: Thermal energy storage. [Verkkodokumentti]. 2020. [Viitattu 15.11.2022]. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>
- 27 Chua, K. J. & Chou, S. K. & Yang, W. M. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*. [Verkkolehti]. 2010. 87(12). S. 3611–3624. [Viitattu 26.11.2022]. Saatavissa: doi:10.1016/j.apenergy.2010.06.014.
- 28 David, A. & Mathiesen, B. V. & Averfalk, H. & Werner, S. & Lund, H. Heat Roadmap Europe: Large-scale electric heat pumps in district heating systems. *Energies*. [Verkkolehti]. 2017. 10(4). 578. [Viitattu 1.12.2022]. Saatavissa: doi:10.3390/en10040578.
- 29 Suomen Kylmäyhdistys ry. Kylmäainetilanne 2017. [Verkkajulkaisu]. 2017. [Viitattu 16.10.2022]. Saatavissa: <https://iisoy.fi/wp-content/uploads/2021/07/Kylma%CC%88ainetilanne-2017-final.pdf>

- 30 Motiva Oy. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. [Verkkojulkaisu]. 2014. [Viitattu 13.11.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_lampopumppu- ja_orc-sovellukset.10766.shtml
- 31 Motiva Oy. Lämpöä ilmassa – lämmitysjärjestelmät ilmalämpöpumput. [Verkkojulkaisu]. 2008. [Viitattu 15.10.2022]. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/files/175/Ilmalampopumput.pdf>
- 32 Koljonen, T. & Sipilä, K. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä - VTT tiedotteita 1926. [Verkkodokumentti]. 1998. [Viitattu 13.11.2022]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>
- 33 Uusitalo, S. Helen Oy. Vuosaaren uusi, ainutlaatuinen meriveden lämpöä hyödyntävä lämpöpumppu. [Verkkojulkaisu]. 2019. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2019/merivesilampopumppu>
- 34 Harmaala, P. Calefa Oy. HotLevel® -kuumalämpöpumppu mullisti energiantuotannon. [Verkkojulkaisu]. 2020. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: <https://www.calefa.fi/hotlevel/#>
- 35 Harmaala, P. Calefa Oy. UPM Korkeakosken saha siirtyy lämpöpumpputeknologiaan. [Verkkojulkaisu]. 2022. [Viitattu 16.11.2022]. Saatavissa: <https://www.calefa.fi/upm-korkeakosken-saha-siirtyy-lampopumpputeknologiaan/>
- 36 Energiateollisuus ry & Työ- ja elinkeinoministeriö & Teknologian tutkimuskeskus VTT. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. [Verkkodokumentti]. 2020. [Viitattu 5.12.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTT_2020.pdf
- 37 Teknologiateollisuus ry. Verotukseen tulossa iso joukko muutoksia 2022. [Verkkojulkaisu]. 2021. [Viitattu 5.12.2022]. Saatavissa: <https://teknologiateollisuus.fi/fi/ajankohtaista/uutinen/verotukseen-tulossa-iso-joukko-muutoksia-2022>
- 38 Valtiovarainministeriö. Energiaverotus. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.12.2022]. Saatavissa: <https://vm.fi/energiaverotus>
- 39 Harmaala, P. Calefa Oy. Kiilto ja Lempäälän Lämpö aloittavat yhteisen energia-ekosysteemin – päästöt leikkaantuvat merkittävästi. [Verkkojulkaisu]. 2022 [Viitattu 6.12.2022]. Saatavissa: <https://www.calefa.fi/kiilto-ja-lempaalan-lampo-aloittavat-yhteisen-energiaekosysteemin-paastot-leikkaantuvat-merkittavasti/>

- 40 Hyysalo, S. & Marttila, T. & Temmes, A. & Lovio, R. & Kivimaa, P. ym. Uusia näkymiä energiamurroksen Suomeen: Murrosareenan tuottamia kunnianhimoisia energia- ja ilmastotoimia vuosille 2018–2030. [Verkkodokumentti]. 2017. [Viitattu 6.12.2022]. Saatavissa: https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/11/Uusia_nakymia_energiaturroksen_Suomeen.pdf
- 41 Remes, M. Kemianteollisuus ry. [Verkkajulkaisu]. 2022. [Viitattu 6.12.2022]. Saatavissa: <https://www.kemianteollisuus.fi/fi/uutishuone/juttusarjat/hiilineutraali-kemia/kiilto/>
- 42 Harmaala, P. Calefa Oy. Paroc Panelsin vuosi AmbiHeatin kanssa: ”Kyllä tämä on ollut hyvä”. [Verkkajulkaisu]. 2022. [Viitattu 6.12.2022]. Saatavissa: <https://www.calefa.fi/paroc-panelsin-vuosi-ambiheatin-kanssa-kylla-tama-on-ollut-hyva/>
- 43 Energiateollisuus ry. Kaukolämpö 2021. [Verkkajulkaisu]. 2022. [Viitattu 7.12.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampo_2021_v2.pdf
- 44 Finlex. Energiatehokkuuslaki. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.12.2022]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20141429>
- 45 Energiateollisuus ry & Valor Partners Oy. Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. [Verkkajulkaisu]. 2016. [Viitattu 7.12.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf
- 46 Helen Oy. Kilpilahden hukkalämpöhanke etenee – kattaisi toteutuessaan neljäsosan pääkaupunkiseudun kaukolämmön tarpeesta. [Verkkajulkaisu]. 2020. [Viitattu 8.12.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2020/kilpilahti2>
- 47 Peura, P. & Hiltunen, E. & Haapanen, A. & Auvinen, K. & Soukka, R. & ym. Valtionneuvosto. Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet. [Verkkodokumentti]. 2017. [Viitattu 8.12.2022]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160251/Hajautettun_uusiutuvan_energian_mahdollisuudet_ja_rajoitteet_%28HEMU%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y