



**TEOLLISUUSPROSESSIEN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN
LÄMMITYKSEN SÄHKÖISTÄMISELLÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2022

Opri Partanen

Tarkastaja: Apulaisprofessori Kristian Melin

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Opri Partanen

Teollisuusprosessien hiilidioksidipäästöjen vähentäminen lämmityksen sähköistämällä

Kemiantekniikan kandidaatintyö

35 sivua, 8 kuvaa ja 7 taulukkoa

Tarkastaja: Apulaisprofessori Kristian Melin

Avainsanat: Teollisuuden sähköistystekniikat, sähköiset prosessiuunit, teollisuuden lämpöpumput, metaanin kuivareformointi

Teollisuus on yksi maailman suurimmista energiankäyttäjistä. Näin ollen siellä syntyy myös paljon hiilidioksidipäästöjä, joita tulisi vähentää radikaalisti ilmastomuutoksen torjumiseksi. Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää sähköistämällä teollisuuden lämmitys. Tässä kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan eri sähköistystekniikoita lämmityksen toteuttamiseen.

Sähköinen lämmitys toteutetaan sähköisillä prosessiuuneilla sekä lämpöpumpuilla. Sähköisillä prosessiuuneilla on mahdollista toteuttaa korkean lämpötilan prosessit. Prosessiuunien sähköistystekniikoita ovat infrapuna-, mikroaalto-, radiotaajuus-, induktio-, vastus-, sähkökaari- ja plasmateknologia. Lämpöpumput hyödyntävät lämmönlähteenä prosessin hukkalämpöä, jolloin myös prosessin energiatehokkuus paranee. Lämpöpumpuilla pystytään kattamaan prosessien matala lämmöntarve 150 °C lämpötilaan asti.

Sähköisillä sovelluksilla voidaan tehostaa prosessien ominaisuuksia. Sähköisillä prosessiuuneilla pystytään parantamaan prosessin hallittavuutta, joustavuutta ja turvallisuutta. Lisäksi tuotteen laatu ja saanto voivat parantua sekä prosessointiaika lyhentyä. Esimerkiksi metaanin kuivareformointiprosessista saadaan tehokkaampi, kun se toteutetaan sähköisellä sovelluksella. Sähköiset lämmitystekniikat voivat myös hyödyntää mekaanista työtä lämmön tuottamiseen.

Teollisuuden korkean lämpötilan lämpöpumput ovat pääsääntöisesti kompressiolämpöpumppuja. Kaupallisilla lämpöpumpuilla päästään 90–160 °C lämpötiloihin. Lämpöpumppuja on saatavilla useissa eri kokoluokissa kymmenistä kW:sta kymmeneen MW:n. Kustannuksiltaan lämpöpumput tulevat halvemmiksi kuin lämmön tuottaminen polttoaineista. Jatkossa lämpöpumppujen tuottamaa lämpötilaa yritetään nostaa vieläkin korkeammaksi.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

h	entalpia	[kJ/kg]
p	paine	[bar]
Q	lämpömäärä	[J]
W	työ	[J]

Alaindeksit

sisään	sisäänvirtaus
ulos	ulosvirtaus

Lyhenteet

CFC	Chloro-Fluoro-Carbon
COP	Coefficient Of Performance
GWP	Global Warming Potential
HC	Hydro-Carbon
HCFC	Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon
HFC	Hydro-Fluoro-Carbons
HFO	Hydro-Fluoro-Olefin
ODP	Ozone Depletion Potential
PFC	Per-Fluoro-Carbon
TRL	Technology Readiness Levels
VHC	Volumetric Heat Capacity

Sisällysluettelo

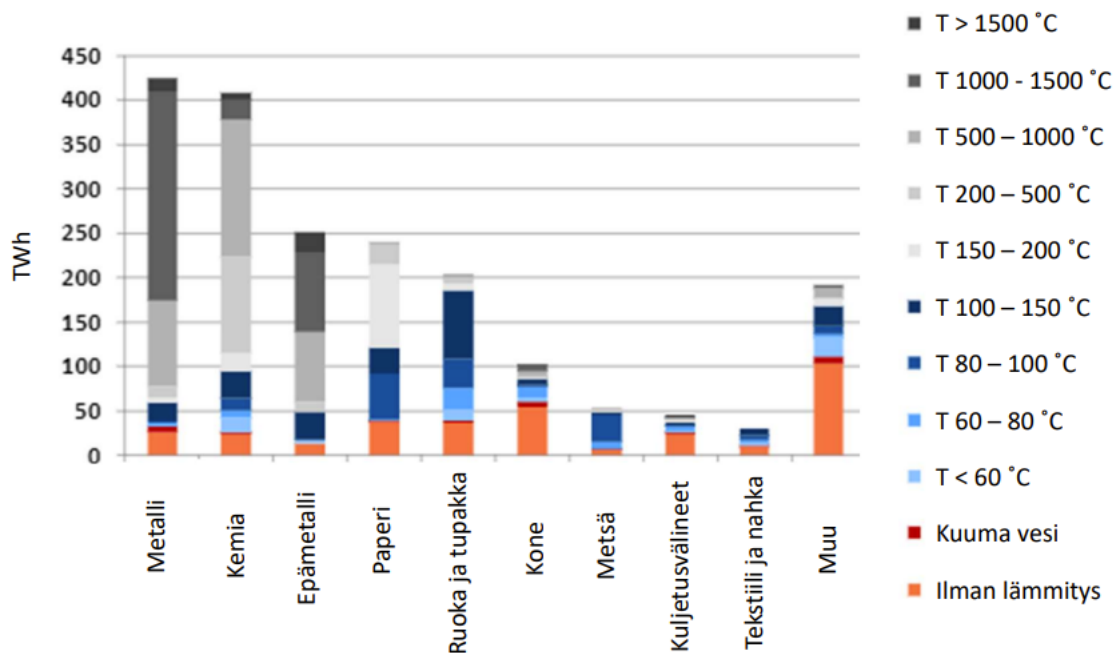
Tiivistelmä

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto	5
2	Sähköiset prosessisuunit.....	7
2.1	Teollisuusuunien sähköistystekniikat.....	7
2.2	Kehitysaste	8
2.3	Teknologian valmiustaso	9
2.4	Tunnetut käyttökohteet.....	10
2.5	Lämmönsiirto	11
2.6	Uunien koko ja tehokkuus.....	12
2.7	Edut prosessin tehostuksessa.....	12
2.8	Sähköistyksen sovellukset teollisuudessa	13
2.8.1	Metaanin kuivareformointi.....	13
2.9	Muut teolliset sähköistystekniikat.....	15
2.10	Sähköuunien käyttö tulevaisuudessa.....	16
3	Lämpöpumput	18
3.1	Kompressiolämpöpumppu ja kiertoprosessi	19
3.2	Käyttökohteet ja -lämpötilat.....	22
3.3	Kylmäaineet	23
3.3.1	Kylmäaineiden vertailu	26
3.4	Lämpökerroin.....	27
3.5	Lämpöpumppujen saatavuus ja niiden kokoluokat	27
3.6	Kustannukset ja säästöt	29
3.7	Lähitulevaisuuden kehitysnäkymät.....	30
4	Johtopäätökset.....	31
	Lähteet.....	33

1 Johdanto

EU on asettanut tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80–95 prosentilla vuoteen 2050 mennessä, kun aikaisempia päästöjä verrataan vuoden 1990 lukemiin. Teollisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi on ehdotettu 83–87 prosentin vähennystä. (Lechtenbömer, Nilsson, Åhman & Schneider, 2016, s. 1623.) Koko maailman energiankäytöstä yli kolmannes kuluu teollisuuteen. Uusiutuvan sähkön kustannukset ovat laskeneet huomattavasti viimeisen vuosikymmenen aikana. Tämän johdosta teollisuuden sähköistäminen on potentiaalinen ratkaisu hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Sähköistämiseen liittyy kuitenkin monia haasteita, joista yksi on teollisuudessa tarvittavat korkeat lämpötilat. Yli puolet teollisuuden vaatimasta lämmöntarpeesta on 500 °C ja kolmanneksen vaatima lämmöntarve on yli 1000 °C. Teknisesti korkean lämpötilan prosessilämmitys on kuitenkin mahdollista sähköistää. (McMillan, de la Rue du Can, Stephane & Wei, 2019, s. 140.) Kuvassa 1 on esitetty eri lämpötilojen jakautuminen teollisuusalojen kokonaisenergian käytössä. Kuvasta voidaan huomata, että eniten korkeita lämpötiloja vaativia aloja ovat metalli- ja kemianteollisuus. Kyseiset alat ovat samasta syystä vaikeimmin sähköistettäviä teollisuuden aloja.



Kuva 1 Lämpöenergian jakautuminen eri teollisuusalojen kesken Euroopassa (suomenennettu Nellissen ja Wolf, 2015, s. 9).

Teollisuuden vaatima lämmitys korkeisiin lämpötiloihin on toteutettavissa sähköisillä prosessiuuneilla. Sähköiset prosessiuunit on toteutettu erilaisilla tekniikoilla, jotka tekevät niistä paremmin soveltuvia tietyille teollisuuden aloille. Sähköisten teollisuusuunien tekniikka on jo pitkälle kehittynyttä, mutta uuneja ei välttämättä ole vielä kannattavaa investoida prosesseihin niiden käyttökustannusten ollessa korkeammat kuin fossiilisilla polttoaineilla toimivien uunien (McMillan et al. 2019, s. 140). Kuitenkin vallitsevan maailmantilanteen takia on mahdollista, että varsinkin maakaasulla toimivia prosessiuuneja halutaan sähköistää, jotta ei oltaisi riippuvaisia Venäjän maakaasusta. Teollisuuden matalalämpöistä ylijäämäenergiaa pystytään hyödyntämään lämpöpumpuilla. Lämpöpumpuilla on mahdollista nostaa prosessien matalalämpöisen ylijäämälämmön lämpötila korkeammalle tasolle, jolloin sitä on mahdollista hyödyntää teollisessa prosessissa (Motiva, 2014, s. 15). Nykyisillä lämpöpumpuilla pystytään saavuttamaan jopa 90–160 °C lämpötila (Arpagaus, Bertsch, Bless, Schiffmann & Uhlmann, 2018, s. 985.)

Kandityön tavoitteena on selvittää teollisuuden sähköistämisen mahdollisuuksia sähköisten prosessiuunien sekä lämpöpumppujen avulla. Tässä kirjallisuuskatsauksessa selvitetään nykyisten teollisuudessa käytettävien sähköuunien tekniikan taso ja kehitysaste, tunnetut käyttökohteet, uunien koko ja tehokkuus sekä edut prosessin tehostuksessa. Erityisenä tarkastelukohteenä tutustutaan metaanin kuivareformointiin, jonka avulla hiilidioksidia pystytään hyödyntämään polttoaineen tai raaka-aineen tuotannossa sähköistä prosessiuunia käyttämällä. Lämpöpumppujen osalta selvitetään lämpöpumppujen kokoluokat, kustannukset, käyttökohteet ja -lämpötilat sekä lämpöpumppujen saatavuus. Lisäksi vertaillaan kaupallisten sovellusten tuottamia lämpötiloja, lämmityskapasiteettia ja COP (Coefficient Of Performance) -hyötysuhteita. Sekä prosessiuunien että lämpöpumppujen osalta arvioidaan laitteiden käyttöä ja kehittymistä tulevaisuudessa.

2 Sähköiset prosessisuunit

Prosessiuuneja käytetään kemiallisten reaktioiden tehostamisessa, koska niiden avulla pysytään saavuttamaan korkeampi prosessilämpötila kuin ulkoilmassa olisi mahdollista ja näin ollen vältetään lämpöhäviöt ympäristöön. Vaikka jotkin prosessit pystyttäisiinkin suorittamaan ulkoilmassa, siihen kuluisi huomattavasti enemmän polttoainetta, ja prosessia olisi vaikeampi hallita. Prosessiuunien avulla on myös mahdollista suorittaa erilaisia prosesseja kuten kuivaus tai hehkutus. (Jenkins & Mullinger, 2014, s. 4.) Nykyään on olemassa sähköisiä prosessiuuneja, jotka mahdollistavat fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen ja jopa niistä kokonaan luopumisen.

Tässä luvussa käsitellään nykyisten sähköllä toimivien prosessiuunien tilannetta, kehityssatetta, tunnettuja käyttökohteita, uunien kokoa ja tehokkuutta, sähköistettyjen prosessien etuja, muita sähköistystekniikoita sekä sähköuunien käyttöä tulevaisuudessa. Lisäksi tarkastellaan sähköistyksen teollisena sovelluksena metaanin kuivareformointireaktiota, jossa hiilidioksidia hyödynnetään polttoaineen tai kemikaalin tuotannossa.

2.1 Teollisuusuunien sähköistystekniikat

Teollisuudessa lämmityksen sähköistämiseen voidaan ajatella olevan kaksi tapaa: suora ja epäsuora sähköistys. Jos prosessissa tarvittava lämpö syntyy kohteen sisällä, on kyseessä suora lämmitysmuoto. Epäsuorassa lämmitysmuodossa tuotettu lämpö siirretään kohteeseen säteilyn, konvektion tai johtumisen avulla. (Kim, Kim & Son. 2022, s. 3.)

Suoran sähköistämisen lämmitysmuotoja ovat sähkömagneettinen induktiotekniikka, dielektrinen lämmitystekniikka sekä resistiivinen lämmitystekniikka. Sähkömagneettisessa induktiotekniikassa käytetään muuttuvaa magneettikenttää sähköä johtavien materiaalien lämmittämiseen. Dielektrinen lämmitystekniikka eli mikroaaltouuni- ja radiotaajuuskuumennustekniikka käyttää materiaalin lämmittämiseen korkeataajuisia sähkömagneettista säteilyä. Resisttiivisen lämmitystekniikan ideana on, että lämmittämiseen käytetään lämmityselementtiä tai lämmitettävän materiaalin vastusta. (McMillan et al. 2019, s. 141–142.)

Epäsuoria lämmitysmuotoja ovat sähköinen valokaariuuni, infrapunalämmitys ja plasmalämmitys. Infrapunalämmitys vaikuttaa suoraan lämmitettävän kohteen pintaan. Lämpötila

puolestaan riippuu infrapunaaallonpituudesta. (Kim et al. 2022, s. 3.) Valokaariuunissa lämmitys tapahtuu fysikaalisella valokaari-ilmiöllä. Ilmiössä elektrodien välinen sähkökenttä kasvaa niin suureksi, että se purkautuu kaasun läpi, joka lämpenee voimakkaasti. (Mironov, 2021, s. 703.) Sähkökaariuunin voidaan ajatella olevan myös suora lämmitysmuoto, jos se on induktiolämmityksen kaltainen (Kim et al. 2022, s. 3). Plasmalämmityksessä niin sanottua lämpöplasmaa tuotetaan korkeassa paineessa joko mikroaalloilla, radiotaajuudella ja tasa- tai vaihtovirralla (Bonizzoni & Vassallo, 2002, s. 327).

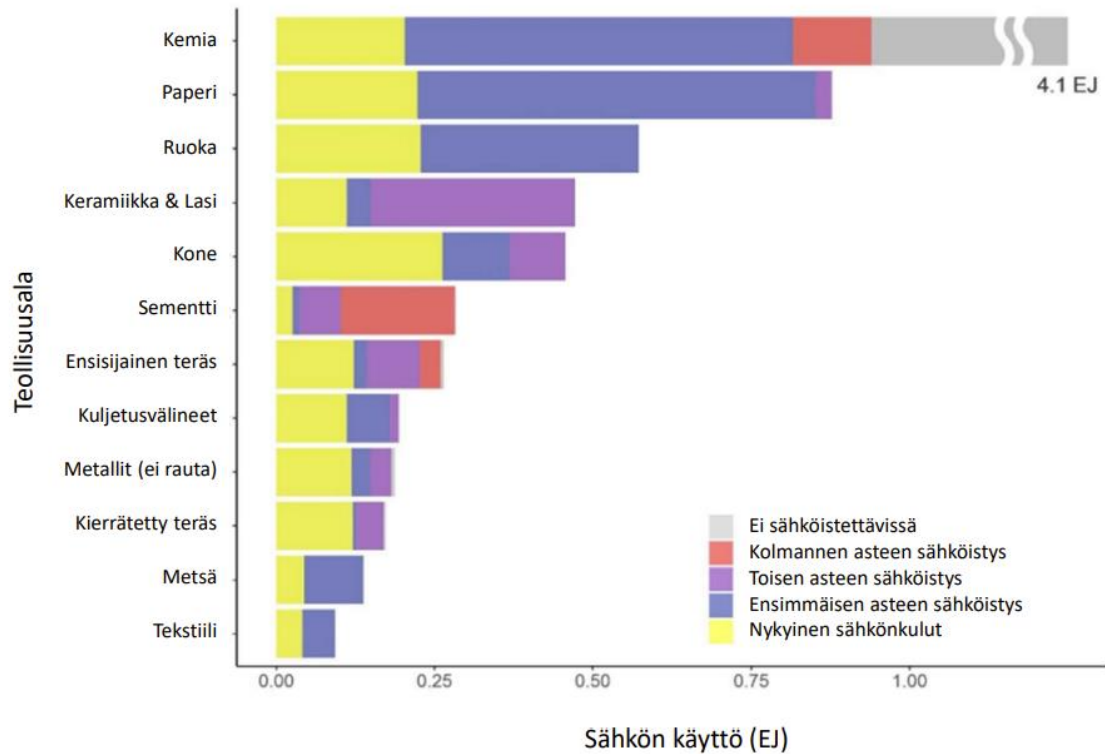
2.2 Kehitysaste

Euroopan teollisuuden sähköistämispotentiaali voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe sisältää kaikille teollisuuden aloille yhteisiä lämpöprosesseja matalan ja keskivaiheen lämpötiloissa. Matalan ja keskivaiheen lämpötiloiksi voidaan lukea kaikki alle 400 °C prosessit. Ensimmäisen vaiheen teknologioiden voidaan ajatella olevan teollisuuden sähköistämisen aloituspisteitä, sillä ne ovat kaikille aloille yhtä tarpeellisia ja näin ollen helposti hyödynnettävissä laaja-alaisesti. Prosessiuunien tekniikoista ensimmäiseen vaiheeseen kuuluvat infrapunateknologia sekä mikroaaltouuni- ja radiotaajuusteknologia.

Toinen vaihe kattaa kehittyneemmät teknologian vaiheet, jotka ovat yksityiskohtaisempia jokaiselle teollisuuden alalle. Kyseisen vaiheen tekniikat vaihtelevat lämmitysjärjestelmissä, sillä niihin vaikuttavat tuotteiden ja sovellusten tekniset ominaisuudet. Vaiheen 2 sisältämät teknologiat kattavat lämmön tuottamisen yli 400 °C:een. Niihin kuuluvat induktiounit, vastusuunit, sähkökaariuunit sekä plasmateknologia. Yhteensä ensimmäisen ja toisen vaiheen teknologioilla pystytään kattamaan 50 % käytettävän energian kysynnästä, kun raaka-aineena toimivat fossiiliset polttoaineet on laskettu mukaan. Jos raaka-aineina toimivia fossiilisia polttoaineita ei lasketa mukaan energiantuotannossa käytettäviin polttoaineisiin, on ensimmäisen ja toisen vaiheen teknologioiden avulla hyödynnettävissä 78 % käytettävän energian kysynnästä. Kaikki ensimmäisen ja toisen vaiheen teknologiat ovat jo täysin kehittyneet ja ne ovat vakiintuneita menetelmiä teollisuudessa.

Kolmannen vaiheen teknologiat ovat vielä alhaisessa kehitysvaiheessa ja niissä on suuria epävarmuuksia. Niiden avulla on kuitenkin tulevaisuudessa mahdollista saavuttaa maksimaalinen sähköistyspotentiaali teollisuudessa. Kolmannen vaiheen teknologioihin kuuluvat kaikki toisen vaiheen teknologiat, sillä niitä on mahdollista kehittää pidemmälle. Kuvassa 2 nähdään edellä käsiteltyjen vaiheiden sähköistyspotentiaalın jakautuminen eri

teollisuudenaloille Euroopassa. (Krüger, Kumar, Lord, Luderer, Madeddu, Pehl, Peterseim & Ueckerdt, 2020, s. 3–5.)



Kuva 2 Euroopan teollisuuden sähköistyspotentiaalin jakautuminen eri teollisuuden aloille. Nykyinen teollisuuden sähkönkulutus on esitetty keltaisilla palkeilla. Sinisellä on esitetty ensimmäisen vaiheen sähköistysmahdollisuudet ja violetilla toisen vaiheen sähköistysmahdollisuudet. Kolmannen vaiheen sähköistyspotentiaali on esitetty punaisella. Harmaalla palkilla kuvataan raaka-aineena käytettyjä fossiilisia polttoaineita. (Suomennettu Madeddu et al. 2020, s. 6.)

2.3 Teknologian valmiustaso

Sähköisten uunien kehitystasetta voidaan tarkastella Euroopan komission (2013) laatimalla teknologian valmiustasoasteikolla TRL (Technology Readiness Level). Kyseinen asteikko ja sen kuvaukset on esitetty taulukossa 1. Sähköisten lämmitystekniikoiden valmiustaso on arvioitu niiden kehitystasteen kuvausten perusteella.

Taulukko 1 Teknologian valmiustason kuvaukset (Euroopan komission päätös C, 2013/8631, s. 27).

TRL 1	Peruseriaatteet huomioitu
TRL 2	Teknologiakonsepti muotoiltu
TRL 3	Konsepti kokeellisesti todistettu
TRL 4	Tekniikka kehitetty laboratoriossa
TRL 5	Tekniikka vahvistettu asiaankuuluvassa ympäristössä
TRL 6	Tekniikka näytetty toteen asiaankuuluvassa ympäristössä
TRL 7	Prototyyppi esitelty käyttöympäristössä
TRL 8	Järjestelmä on valmis ja hyväksytty
TRL 9	Todellinen järjestelmä, joka todistettu toimivaksi käyttöympäristössä

Aikaisempien kuvausten perusteella ensimmäisen vaiheen teknologioihin kuuluvat infrapunateknologia sekä mikroaalto- ja radiotaajuusteknologia voisivat olla niiden kuvausten perusteella teknologian valmiustasolla 9, sillä ne ovat jo täysin vakiintuneita menetelmiä lämmön tuottamiseen teollisuudessa.

Toisen vaiheen teknologioihin kuuluvat induktiouunit, vastusuunit, sähkökaariuunit sekä plasmateknologia voisivat olla teknologian valmiustasolla 7–9, sillä niiden sovelluksia on jo pitkälti käytössä teollisuudessa. Kolmannen vaiheen teknologioihin kuuluvat kaikki toisen vaiheen teknologioiden korkeammat lämpötilasovellukset. Näiden teknologioiden valmiustaso voisi olla 1–3, sillä ne ovat vielä aikaisessa kehitysvaiheessa.

2.4 Tunnetut käyttökohteet

Vuonna 2015 tehdyssä Euroopan teollisuuden selvityksessä teollisuudella oli sillä hetkellä käytössään 19 % sähköistä energiaa kaikesta teollisuuden energiasta (Madeddu et al. 2020, s. 6). Vastaavasti Yhdysvalloissa vuonna 2014 tehdyssä tutkimuksessa prosessilämmön osuus oli 14,4 % teollisuuden sähkönkulutuksesta (McMillan et al. 2019, s. 141).

Metalliteollisuudessa induktiokuumennus on laajalti käytössä sulatuksessa. Induktiokuumennuksella esine on mahdollista lämmittää lyhyessä ajassa korkeaan lämpötilaan. (Kim et al. 2022, s. 3.) Metalliteollisuudessa lämmitettävän kohteen ympärille on asetettu useita induktorikeloja, joilla saadaan aikaiseksi tasainen tehotiheys sekä lämpötilaprofiili lämmitettävään kappaleeseen. (Caux, Egalon, Maussion, Pateau & Souley, 2012, s. 1692).

Induktiolämmityksen kanssa vastaavaa sähkökaariuunia käytetään korkeiden lämpötilojen lämmitykseen. Sitä pidetään tehokkaampana laitteiden koon, kustannusten sekä energiankulutuksen suhteen kuin raakaraudan sulattamiseen käytettävää uunia. (Kim et al. 2022, s. 3)

Infrapunalämmitystä käytetään teollisuudessa kuivaukseen, lämmitykseen ja kovetukseen (Weisman, 2019, s. 14). Lisäksi infrapunalämmitystä käytetään muovien käsittelyyn ja ruuan prosessointiin (Madeddu et al. 2020, s. 5). Mikroaaltoenergiaa käytetään kuivaamiseen, elintarvikkeiden kypsentämiseen ja keramiikan sintraamiseen, jossa kiinteistä hiukkasista muodostetaan lämmön avulla yhtenäinen massa (Basak, Chandrasekaran & Ramanathan, 2012, s. 330).

Vastuslämmitystä käytetään erityisesti metallien sulattamiseen, mutta myös muuhun sulattamiseen. Kemianteollisuudessa on käytössä vastuslämmittimiä. Lisäksi vastuslämmitystä käytetään keramiikan poltossa, lasin sulatuksessa sekä kalsinoinnissa, jossa haihtuvat epäpuhtaudet poistetaan aineesta kuumentamalla. Sähkökaariuuneja käytetään metallien sulattamiseen ja osittain myös jalostukseen. Plasmateknologiaa on käytössä jätteiden ja metallien käsittelyssä, sintrauksessa ja sementin tuotannossa. (Madeddu et al. 2020, s. 5.)

2.5 Lämmönsiirto

Prosessiuuneissa tapahtuva lämmönsiirto on käytännössä aina konvektiota ja säteilyä, sillä johtumisen osuus on erittäin pieni. Konvektiolla tapahtuva lämmönsiirto on merkittävä erityisesti matalamman lämpötilan uuneissa. Voimakkaat ilmavirtaukset, tarkasteltavan pinnan pysty- tai vaakasuunta sekä vallitseva lämpötilaero vaikuttavat konvektioon voimakkaasti.

Lämpösäteily perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn, jota kappaleet lähettävät ainoastaan niiden lämpötilansa perusteella. Säteilylämmönsiirto ei tarvitse lämmittämiseen erillistä väliainetta toisin kuin johtuminen tai konvektio. Säteilylämmönsiirto on monimutkainen prosessi. Siihen vaikuttavat muun muassa säteilevän ja vastaanottavan pinnan lämpötilat ja säteilyominaisuudet sekä säteilyn aallonpituudet. Korkeammissa lämpötiloissa säteilylämmönsiirto on täysin hallitseva verrattuna konvektioon. (Motiva, 2015, s. 8)

Tarkastelluista sähköisten prosessiuunien lämmitysmuodoista infrapunasäteily, mikroaalto- ja radiotaajuussäteily ovat lämmitysmuodoltaan lämpösäteilyä. Esimerkiksi infrapunalämmityksen tuottama lämpösäteily siirtyy suoraan tuotteen pinnalle, jolloin lämmönsiirto on paljon nopeampaa verrattuna konvektiiviseen lämmönsiirtoon (Weisman, 2019, s. 14).

2.6 Uunien koko ja tehokkuus

Sähköisillä prosessiuuneilla on mahdollista saavuttaa paremmat teho- ja tilavuussuhteet verrattuna perinteisiin prosessiuuneihin (Caux et al. 2012, s. 1692). Kokoluokaltaan sähköiset prosessiuunit voivat olla pienempiä kuin perinteiset prosessiuunit (Kim et al. 2022, s. 3). Kokonaisuudessaan sähköistetyt prosessit vievät vähemmän tilaa kuin polttoaineilla toimivat prosessit, sillä polttoaineet ja niiden varastointi eivät vie tilaa (McMillan et al. 2019, s. 142).

Sähköisellä teknologialla korvatut polttojärjestelmät voivat johtaa pienempään energiankulutukseen, sillä sähköisellä teknologialla on mahdollista saavuttaa korkeampi hyötysuhde (Madeddu et al. 2020, s. 3). Taulukkoon 2 on koottu tämänhetkisten kehitettyjen sähköisten prosessiuunien käyttölämpötilat tietyistä teollisuuden sovelluksista ja hyötysuhteet, kun hyödynnettävissä olevan energian määrää on verrattu käyttöön saadun energian määrään (Kim et al. 2022, s. 3; Madeddu et al. 2020, s. 5).

Taulukko 2 Sähköisten prosessiuunien käyttölämpötilat ja hyötysuhteet (Kim et al. 2022, s. 3; Madeddu et al. 2020, s. 5).

Lämmitysmuoto	Käyttölämpötila, °C	Hyötysuhde, -
Infrapuna	500	0,60–0,90
Mikroaalto ja radiotaajuus	alle 1000	0,50–0,85
Induktio	1450	0,50–0,90
Vastus	677	0,50–0,95
Sähkökaari	1600	0,60–0,90
Plasma	1600–2000	0,50–0,90

Hyötysuhteista voidaan huomata, että sähköisillä lämmitysmuodoilla on mahdollista saavuttaa jopa 90 % hyötysuhde, joka on todella hyvä. Sähköisiä lämmitysmuotoja on harkittu esimerkiksi petrokemian teollisuuteen niiden korkean energiatehokkuuden vuoksi (Kim et al. 2022, s. 2).

2.7 Edut prosessin tehostuksessa

Prosessiuunien sähköistyneen etuina voivat olla tuotteen laadun ja saannon paraneminen, sekä prosessiajan lyhentäminen. Sähköistetyn prosessin hallittavuus on parempaa. Prosessit

ovat myös joustavia ja turvallisia. Hyödyt ovat kuitenkin aina prosessi- ja tuotekohtaisia. (McMillan et al. 2019, s. 142.)

Esimerkiksi induktiolämmityksen käyttäminen parantaa prosessien nopeutta, tarkkuutta, tehokkuutta ja toistettavuutta. Nämä tekijät ovat keskeisiä ominaisuuksia, joita tarvitaan teollisten prosessien automatisoinnissa. Induktiotekniikan avulla kohde lämmitetään suoraan. Tällöin hukkalämmön määrä vähenee ja lämmitysaika lyhenee merkittävästi. Induktiolämmityksellä on mahdollista saavuttaa yli 90 %:n hyötysuhde sekä sen käyttämää tehoa ja lämmityksen sijaintia voidaan ohjata tarkasti. Tämä antaa esimerkiksi mahdollisuuden määrittellä ennalta lämpötilaprofiilit. Koska induktiolämmitys on kosketukseton lämmitysprosessi eli lämmitystyökalu ei koske lämmitettävään kohteeseen, voidaan tuotteen laadusta olla varmoja. Tällöin voidaan saavuttaa prosessin tuottavuuden maksimoiminen. (Burdio, Dede, Lucia & Maussion, 2014, s. 2509 & 2515.)

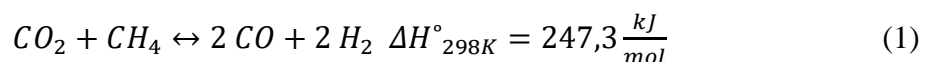
2.8 Sähköistyksen sovellukset teollisuudessa

Teollisuuden sähköistämisen tavoitteena on päästä eroon hiilidioksidipäästöistä. Sähköisten prosessiuunien etuna on tehostetut prosessin ominaisuudet. Erityisesti metaanin kuivareformointi on kiinnostava prosessi, sillä se mahdollistaa hiilidioksidin hyötykäytön prosessissa.

2.8.1 Metaanin kuivareformointi

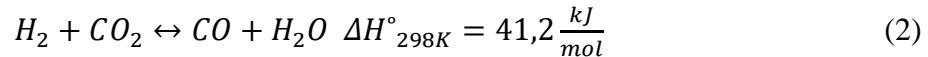
Metaanin kuivareformointi mahdollistaa hiilidioksidin hyödyntämisen sekä kemiallisena raaka-aineena käytetyn synteetikaasun tuottamisen. Synteetikaasu on monipuolinen väliaine, sillä sitä voidaan käyttää synteettisten polttoaineiden, puhtaan vedyn tai hiilimonoksidin valmistukseen.

Hiilidioksidin (CO₂) reagoi metaanin (CH₄) kanssa siitä muodostuu synteetikaasu. Kyseistä reaktiota kutsutaan metaanin kuivareformoinniksi ja sen reaktioyhtälö on esitetty alla yhtälössä (1).

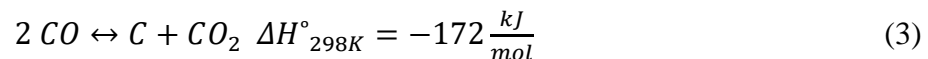


Kyseisessä reaktiossa muodostuva synteetikaasu on vedyn (H₂) ja hiilimonoksidin (CO) seos (Simakov, 2017, s. 2–3.) Metaanin kuivareformointireaktion rinnalla samanaikaisesti

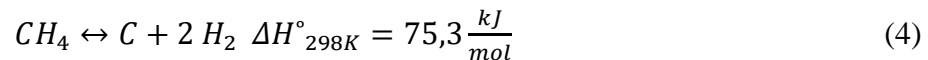
esiintyy käänteinen veden (H₂O) kaasutusreaktio, jonka reaktioyhtälö on kuvattuna yhtälössä (2).



Käänteinen veden kaasutusreaktio edistää hiilimonoksidin tuotantoa korkeissa lämpötiloissa. (Bellinghausen, Kockmann, Mleczko & Rieks, 2015, s. 15940–15941.) Metaanin kuivareformointireaktio on erittäin endoterminen, eli toteutuakseen se tarvitsee paljon lämpöä ympäristöstä (Simakov, 2017, s. 2). Tämän vuoksi reaktorissa on oltava suuria lämpövirtoja. Ratkaiseva parametri on reaktiolämpötila, sillä hiilidioksidin muodostumisesta johtuvaa hiilen (C) muodostumista tapahtuu alle 700 °C lämpötiloissa. Kyseinen hiilen muodostuminen hiilidioksidista tunnetaan Boudouard-reaktiona, ja sen reaktioyhtälö on esitetty yhtälössä (3).



Toinen epätoivottu sivureaktio hiilimonoksidin ja vedyn valmistuksessa korkeissa lämpötiloissa on metaanikrakkkaus, jossa sivutuotteena muodostuu hiiltä. Tässä reaktiossa metaani hajoaa kiinteäksi hiileksi ja vedyksi. Reaktio on esitetty yhtälössä (4).



Metaanin kuivareformointi on haastava reaktio, sillä toimiakseen se tarvitsee reaktorin, jolla saadaan aikaan tehokas lämmönsiirto katalyyttiin kylmäpisteiden välttämiseksi. Reaktiossa käytettävän katalyytin haasteena on sen stabiilisuus, sillä katalyytti deaktivoituu helposti, kun sivureaktioissa muodostuu hiiltä. Lisäksi reaktion lämpötilan tulee olla välillä 700–900 °C, jotta katalyytin deaktivoituminen olisi vähäisempää. (Bellinghausen et al. 2015, s. 15941).

Katalyyttinä kuivareformointireaktiossa on yleisesti käytetty nikkelpohjaisia katalyyttejä. Nikkelin kaupallista käyttöä rajoittavat korkeiden reaktiolämpötilojen lisäksi sivureaktioissa syntyvä kiinteä hiili, joka laskeutuu katalyytin päälle aiheuttaen sen deaktivoitumisen. Nikkelin sijaan voitaisiin käyttää jalometalleja, sillä niillä on korkea suorituskyky ja niissä hiilen kertyminen katalyytin pinnalle on vähäisempää. Jalometallit ovat kuitenkin kalliita ja niiden saatavuus on alhainen. (Gonzalez, Ocsachoque & Pompeo, 2011, s. 226.)

Tavallisesti metaanin kuivareformointireaktion vaatima lämpö on toteutettu polttamalla polttoaineita. Esimerkiksi osa reaktion raaka-aineena toimivasta metaanista on poltettu, jotta reaktiolle saadaan tarpeeksi korkea lämpötila. (Bellinghausen et al. 2015, s. 15942.) Metaanin kuivareformointi voidaan kuitenkin sähköistää, jolloin reaktion tarvitsema lämpö tuotetaan sähköisellä lämmitysovelluksella. Esimerkiksi mikroaaltoihin perustuvaa sovellusta käytetään kuivareformoinnin energianlähteenä. Mikroaaltoihin perustuvalla lämmitystavalla lämpö voidaan johtaa suoraan katalyyttiin, sillä katalyytit ovat kosketuksissa sähköiseen lämmönlähteeseen.

Mikroaaltojen käyttö energianlähteenä kuivareformoinnissa on antanut lupaavia tuloksia, mutta ongelmana on edelleen kuuma- ja kylmäpisteiden muodostuminen, joka oli ongelmana myös polttoaineita poltettaessa. (Cortese, Iervolino, Martino, Meloni, Palma & Renda, 2022, s. 32.) Toinen tutkittu sähköinen energianlähde kuivareformointiin on plasma. Plasmasovellusten avulla on havaittu metaanin korkea konversio ja lisäksi hiiltä on muodostunut vähemmän katalyytin pinnalle laboratoriotasoisissa kokeissa. Laajemmassa mittakaavassa plasman toimiminen kuivareformointireaktiossa on vielä kuitenkin epävarmaa. (Bellinghausen et al. 2015, s. 15942.)

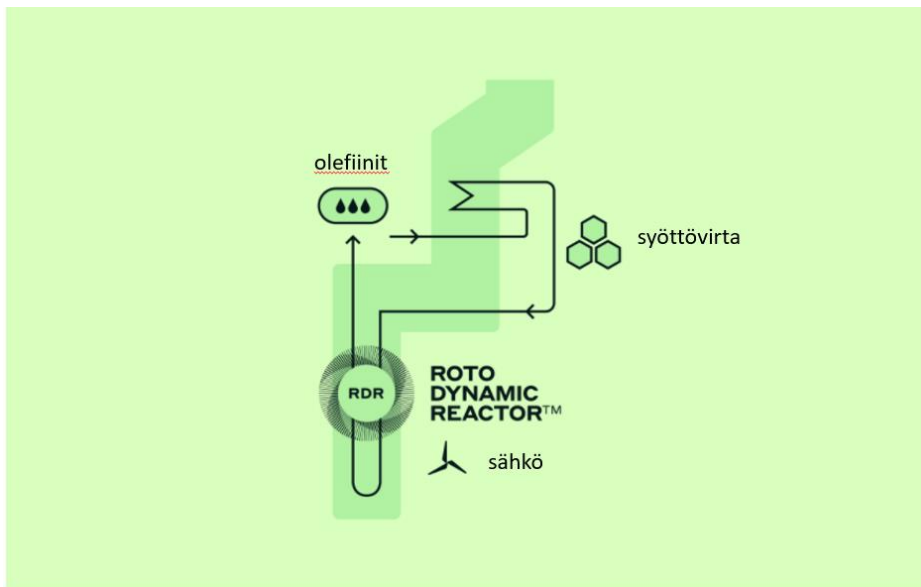
Sähköisellä sovelluksella toteutettava kuivareformointi on taloudellisempi tapa tuottaa vetyä ja synteetikaasua kuin perinteinen reformointi. Lisäksi kuivareformoinnissa pystytään käyttämään hyödyksi hiilidioksidia, joka ilmaston lämpenemisen kannalta on positiivinen asia. Kuivareformointireaktion kustannuksiin vaikuttavat kuitenkin esimerkiksi metaanin ja sähkön hinta, mutta käytettäessä uusiutuvaa sähköä ovat perinteinen reformointi sekä kuivareformointi arviolta saman hintaisia. (De Vasconcelos & Lavoie, 2018, s. 52–53.)

2.9 Muut teolliset sähköistystekniikat

Teolliset sähköistystekniikat voivat hyödyntää mekaanista työtä lämmön tuottamiseen. Esimerkiksi mekaaninen höyryn komprimointi on tällainen sovellus. (McMillan et al. 2019, s. 142.)

Kemianteollisuudessa tuotettavat olefiinit, kuten eteeni ja propeeni, ovat raaka-aineena pääasiassa polymeerien valmistuksessa (ABB, 2022). Olefiinien valmistukseen on kehitetty sähköllä toimiva RDR-krakkaus perinteisen höyrykrakkauksen tilalle. Perinteisessä höyrykrakkauksessa olefiineja valmistetaan krakkaamalla etaania tai teollisuusbensiiniä erittäin

korkeissa lämpötiloissa krakkauuneilla. RDR-krakkauksessa roottorin siivet pyörivät suurella nopeudella lämmittäen raaka-aineseosta reaktiovyöhykkeen sisällä. RDR-krakkauksella pystytään saavuttamaan riittävän korkeat lämpötilat tehokkaammin kuin perinteisellä höyrykrakkauksella. Lisäksi RDR-krakkaukseen käytettävä laitteisto on pienikokoisempi kuin perinteinen krakkausuuni. RDR-krakkausprosessin pääpiirteet on esitetty kuvassa 3. (Coolbrook, 2020.)



Kuva 3 RDR-krakkauksen prosessi. Roottorin siivet pyörivät reaktioalueen sisällä tuottaen reaktiossa tarvittavan lämmön. (Suomennettu Coolbrook, 2020.)

RDR- krakkauksen avulla olefiinien tuotannolla on mahdollista päästä kokonaan eroon hiilidioksidipäästöistä (ABB, 2022). RDR- krakkaus mahdollistaa myös typpioksidipäästöjen vähenemisen. Tulevaisuudessa RDR- krakkauksen raaka-aineena on mahdollista käyttää biopohjaisia vaihtoehtoja. (Coolbrook, 2020.)

2.10 Sähköuunien käyttö tulevaisuudessa

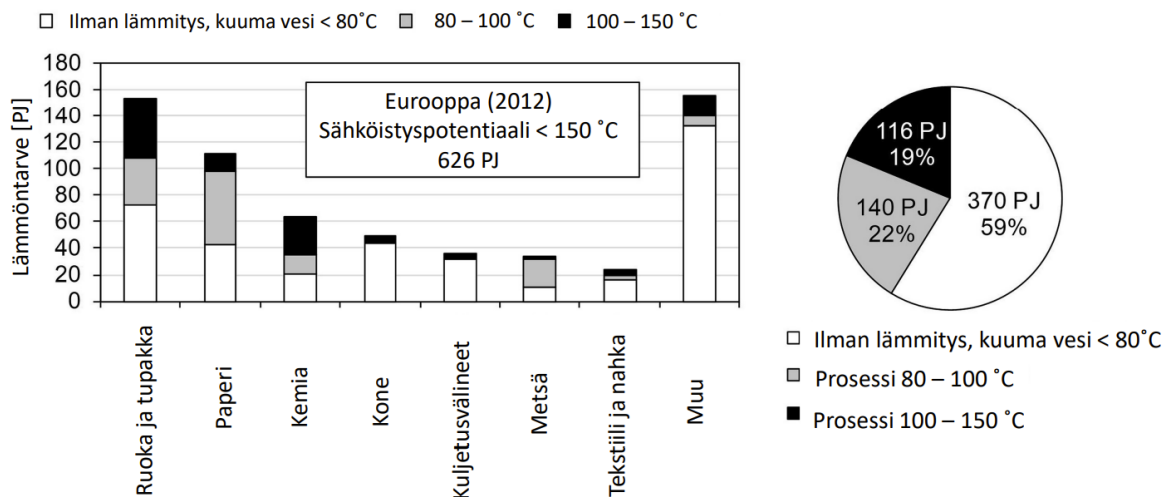
Suoran sähköistämisen käyttöön ottaminen riippuu suurelta osin kustannuksista, kun niitä verrataan muiden vähähiilisten lämmitysteknologioiden käyttökustannuksiin (Kim et al. 2022, s. 3). Muita vähähiilisiä lämmitystekniikoita ovat muun muassa biopohjaisten polttoaineiden käyttäminen nykyisissä prosessiuuneissa. Fossiilisen polttoaineen vaihtaminen uusiutuvaan polttoaineeseen on myös halvempi ratkaisu kuin kokonaan uuden lämmitysjärjestelmän integroiminen prosessiin.

Sähkön hinnan ollessa korkea tulee fossiilisiin polttoaineisiin perustuva lämmitystekniikka paljon halvemmaksi kuin sähköisten prosessiuunien käyttäminen. Näin ollen tarvittaisiin alhaisempia sähkön kustannuksia tai uusia, kustannuksiltaan kilpailukykyisiä sähköteknologian sovelluksia, jotka mahdollistavat teollisuuden sähköistämisen. Teollisuuden sähköistämiseen tarvittaisiin enemmän poliittisia tukitoimia, jotta se olisi kannattavaa toteuttaa. (McMillan et al. 2019, s. 145–146.)

Sähköisten prosessiuunien ongelmana niiden aiheuttamien kustannusten lisäksi on vielä riittämätön kehitystyö. Suuren mittakaavan järjestelmistä on olemassa vain rajallinen määrä todistettuja sovelluksia. On hyvin todennäköistä, että teollisuuden investoinnit sähköistykseen eivät etene ennen kuin sähkön kustannusten kilpailukyvyistä on selkeä skenaario. Kuitenkin tämänhetkiset kehitetyt teknologiat teollisuuden sähköistämiseksi tarjoavat yrityksille mahdollisuuden prosessien laajaan sähköistämiseen. (Madeddu et al. 2020, s. 11–12.)

3 Lämpöpumput

Lämpöpumput ovat epäsuoran sähköistyksen keino hyödyntää prosessien matalalämpöistä ylijäämälämpöä, joka muuten olisi hukkalämpöä. Lämpöpumppu nostaa ylijäämälämmön lämpötilan sellaiselle tasolle, että se voidaan teollisessa prosessissa käyttää hyödyksi. (Motiva, 2014, s.15.) Nellissen ja Wolf (2015) ovat arvioineet, että Euroopassa lämpöpumpuilla tuotettavan lämmön potentiaali olisi 174 TWh (626 PJ) aina 150 °C lämpötilaan saakka. Kuvas-
sassa 4 nähdään prosessilämmön tarpeen jakautuminen eri teollisuuden aloille.



Kuva 4 Euroopan tekninen markkinapotentiaali prosessilämmölle vuonna 2012. Prosessilämpö on mahdollista saavuttaa teollisuuden lämpöpumpuilla. (Suomen-
nettu Arpagaus et al. 2018, s. 989)

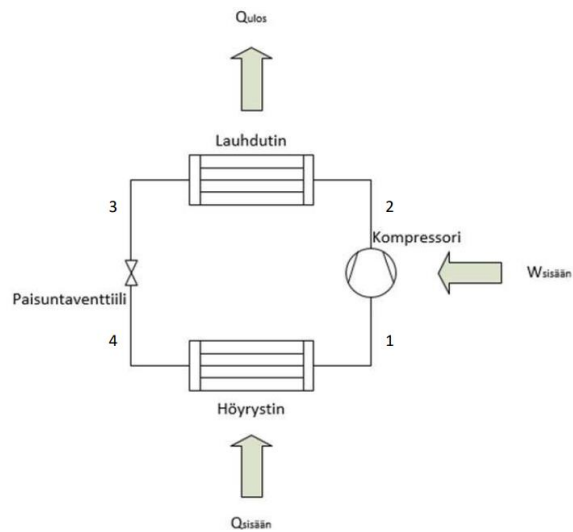
Teollisuudessa hyödynnettäviä lämpöpumppuja kutsutaan korkean lämpötilan lämpöpum-
puiksi, sillä ne pystyvät tuottamaan lämpöä jopa 90–100 °C asteen lämpötiloissa (Kosmada-
kis, 2019, s. 288). Lämpöpumpputyypit pystytään jakamaan kahteen pääryhmään niiden toi-
mintaperiaatteen mukaan. Avoimen systeemin lämpöpumppuihin kuuluvat mekaaniset höy-
ryn komprimointilaitteet sekä termokompressorit. Suljetun systeemin lämpöpumppuihin
puolestaan kuuluvat kompressorilämpöpumput sekä sorptiojärjestelmät, jotka jakautuvat
lämmön korotusjärjestelmiin ja absorptiolämpöpumppuihin. (Motiva, 2014, s. 16.) Näistä
korkean lämpötilan lämpöpumput ovat pääasiassa suljetun systeemin kompressorilämpö-
pumppuja (Arpagaus et al. 2018, s. 986).

Tässä luvussa käsitellään kompressiolämpöpumpun toimintaa, kylmäaineita, käyttökohteita ja -lämpötiloja sekä kokoluokkia. Lopuksi tarkastellaan lämpöpumppujen saatavuutta, kustannuksia sekä tulevaisuuden kehitysnäkymiä.

3.1 Kompressiolämpöpumppu ja kiertoprosessi

Kompressiolämpöpumpun toiminta perustuu kiertoaineen eli kylmäaineen paineen ja lämpötilan korottamiseen sähkökäyttöisellä kompressorilla (Motiva, 2014, s. 16). Kompressiolämpöpumpun pääkomponentit ovat kompressorin, lauhdutin, paisuntaventtiili ja höyrystin. Kompressorin tehtävänä on korottaa höyrystyneen kylmäaineen paine höyrystymislämpötilasta lauhtumislämpötilaan. Paine-eron ansiosta kylmäaine siirtyy lauhduttimesta höyrystimeen. Lauhdutin puolestaan nesteyttää kompressorin puristaman kylmäainehöyrin eli se luovuttaa sisältämänsä energian hyötykäyttöön. Paisuntaventtiilin avulla säädetään kylmäaineen pääsyä höyrystimeen. Lisäksi paisuntaventtiilissä nestemäisen kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat adiabaattisesti eli systeemiin ei tuoda lämpöä paisunnan aikana. Tällöin osa kylmäaineesta höyrystyy jo ennen höyrystintä. Höyrystimessä kylmäaine pystyy sitomaan lämpöä ympäristöstä eli hyödynnettävästä hukkalämmöstä samalla, kun se höyrystyy. (Hirvelä, Jokela, Kaappola & Kianta, 2011, s. 51, 55, 57 & 59.)

Nesteen ja kaasun seoksena esiintyvä kylmäaine saapuu höyrystimelle, jolloin siihen siirtyy lämpöä. Täysin höyrystyneessä muodossa oleva kylmäaine siirtyy höyrystimen jälkeen kompressorille, jossa se puristetaan korkeaan paineeseen. Tällöin myös kylmäaineen lämpötila kasvaa entisestään. Kompressorin jälkeen kylmäaine siirtyy lauhduttimeen, jossa se luovuttaa lämmön hyötykäyttöön. Lauhduttimessa kylmäaineelle tapahtuu faasimuutos kaasusta nesteeksi, jolloin siirtyneen lämmön määrä on suurempaa kuin yksinomaan höyrystä siirretty lämpö. Lauhduttimen jälkeen kylmäaine on nestemäisessä muodossa, jolloin se siirtyy paisuntaventtiiliin, jossa sen paine tiputetaan höyrystintä varten. (Grassi, 2018, s. 15.) Kuvassa 5 on esitetty lämpöpumpun kiertoprosessi.

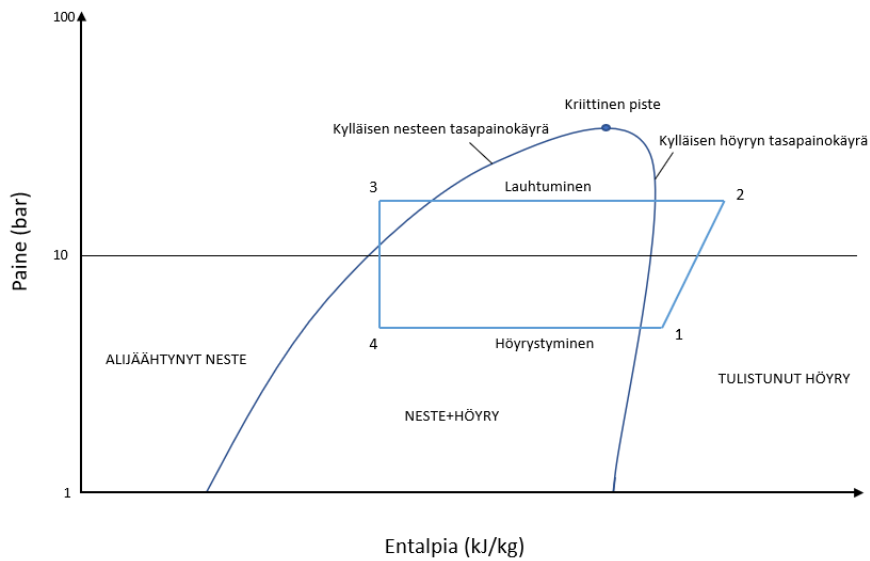


Kuva 5 Lämpöpumpun kiertoprosessi (mukautettu Hirvelä et al. 2011, s. 17).

Kuvassa 5 oleva yksinkertainen kiertoprosessi on niin sanottu yksivaiheinen kierto. Jotta lämpöpumpuilla on mahdollista tuottaa korkeampia lämpötiloja, on kiertoprosessia yleensä muokattava. Muokkaukset voivat olla eri kompressorityypin käyttäminen, esilämmittimen lisääminen kiertoprosessiin tai kaksivaiheisen kierron käyttäminen. Kaksivaiheinen kierto sisältää yksivaiheisen kierron kahdesti. Kaksivaiheisessa kierrossa on mahdollista käyttää kahta eri kylmäainetta, jolloin kylmäaineiden ominaisuuksia pystytään yhdistelemään ja hukkalämmöstä saadaan tuotettua korkein mahdollinen lämpötila. (Arpagaus et al. 2018, s. 1005–1006.)

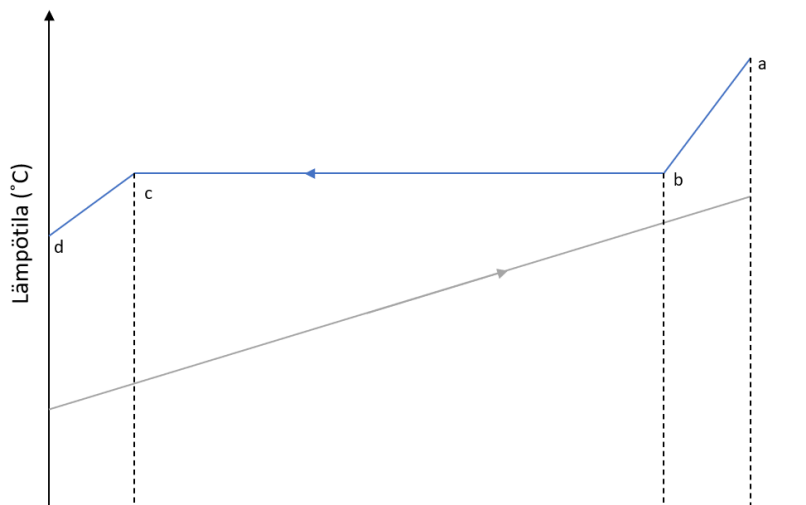
Log p, h- piirros ja lämpötiladiagrammit

Jokaiselle kylmäaineelle on olemassa niille ominainen paine-entalpia-tilapiirros, jonka avulla kiertoprosessi voidaan esittää. Piirroksen vaaka-akselilla on esitetty entalpian arvot ja logaritmisella pystyakselilla absoluuttisen paineen arvot. (Hirvelä et al. 2011, s. 19.) Kyseinen log p, h- piirros on esitetty kuvassa 6. Kuvaan on piirretty myös edellä esitelty kiertoprosessi ja sen tilapisteet 1–4 sekä kylmäaineen olomuodot ja kriittinen piste.



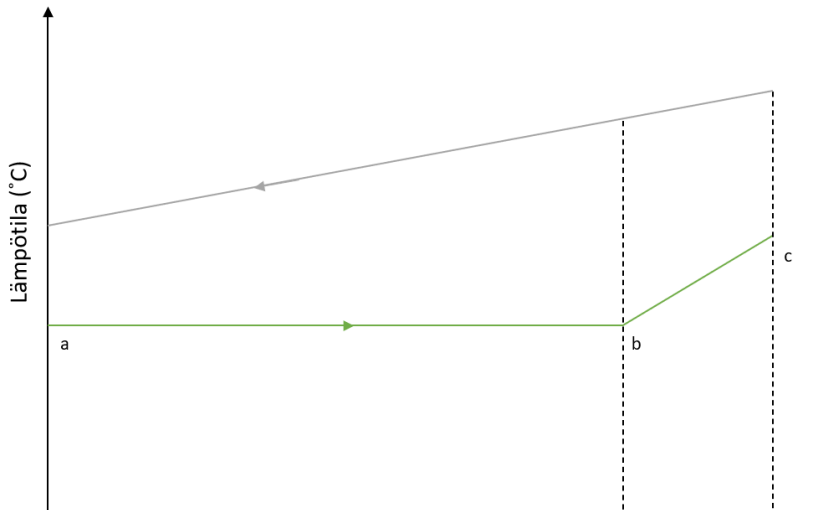
Kuva 6 Log p, h- piirroksen esimerkki. Kiertoprosessissa pisteiden 1–2 välillä tapahtuu kylmäaineen puristuminen kompressorin toimesta. Pisteiden 2–3 välillä kylmäaine lauhtuu lauhduttimessa. Pisteiden 3–4 välillä kylmäaineen paine laskee paisuntaventtiilissä eli se paisuu. Pisteissä 4–1 kylmäaine höyrystyy höyrystimessä. (Mukautettu Hirvelä et al. 2011, s. 19 & 26.)

Kylmäaineen lämpötiloja lauhduttimessa ja höyrystimessä voidaan havainnollistaa lämpötiladiagrammilla. Lämpötiladiagrammista nähdään kylmäaineen lämpötilojen sekä faasien muutokset. Lauhduttimen lämpötiladiagrammi on esitetty kuvassa 7 ja höyrystimen lämpötiladiagrammi on esitetty kuvassa 8.



Kuva 7 Kylmäaineen (sininen) lämpötilakäyrä lauhduttimessa. Pisteiden a-b välillä tapahtuu kylmäaineen höyryn tulistuksen poisto, pisteiden b-c välillä kylmäaine

lauhtuu eli sen olomuoto muuttuu höyrystä nesteeksi ja pisteiden c-d välillä kylmäaine alijäähtyy. Harmaalla käyrällä kuvataan kohdetta, johon lämpöpumppu siirtää lämpöä, esimerkiksi vesi. (SWEF, 2019a.)



Kuva 8 Kylmäaineen lämpötiläkäyrä höyrystimessä. Pisteiden a-b välillä tapahtuu kylmäaineen faasimuutos nesteestä höyryksi. Pisteiden b-c välillä höyrystynyt kylmäaine tulistuu. Harmaalla käyrällä kuvataan hyödynnettävää ylijäämälämpöä. (SWEF, 2019b.)

3.2 Käyttökohteet ja -lämpötilat

Taulukossa 3 on esitetty useimpien teollisuuden alojen prosessien lämpötiloja, jotka on mahdollista kattaa lämpöpumpuilla. Tavallisilla lämpöpumpuilla pystytään tuottamaan alle 80 °C asteen lämpötilat ja tällaisia lämpöpumppuja on jo käytössä teollisuudessa useilla eri aloilla. Tällä hetkellä avainteknologiana olevilla kuumalämpöpumpuilla pystytään kattamaan 80–100 °C asteen lämpötilat. Kehitetyllä kuumalämpöpumpun prototyypillä pystytään kattamaan lämpötilat 100–140 °C. Yli 140 °C olevat lämpötilat ovat myös mahdollista saavuttaa kuumalämpöpumpun sovelluksella. Tästä teknologiasta on olemassa laboratoriotason tutkimusta sekä toiminnallisia malleja. (Arpagaus et al. 2018, s. 987–989.)

Taulukko 3 Eri teollisuusalojen prosesseille tyypillisiä lämpötiloja, jotka on mahdollista kattaa lämpöpumppujen sovelluksilla (Arpagaus et al. 2018, s. 990).

Teollisuuden ala	Lämpötila, °C
Paperiteollisuus	50–240
Elintarviketeollisuus	20–250
Kemikaaliteollisuus	20–300
Autoteollisuus	70–130
Metalliteollisuus	20–200
Muoviteollisuus	50–300
Konetekniikka	20–200
Tekstiilituotanto	40–160
Metsäteollisuus	40–180
Muut teollisuusalat	20–110

Teollisuudessa lämpöpumpuilla katettavat lämpötilat ovat varsin korkeita vielä tämän päivän kaupallisille lämpöpumpuille. Alhaisemmille lämpötiloille (alle 100 °C) löytyy jo useita kaupallisia lämpöpumppuja, mutta kun tuotettava lämpötila nousee yli 150 °C, ei kaupallisia tuotteita juurikaan ole. Korkeimmillaan tunnettu kaupallinen lämpöpumppu pystyy tuottamaan 165 °C (Arpagaus et al. 2018, s. 992).

3.3 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat nestemäisessä muodossa olevia kaasuja, joita käytetään väliaineena lämmönsiirtämiseen. Kylmäaineiden käyttö perustuu niiden olomuodon muutokseen nestemäisestä kaasumaiseksi, kun ne vastaanottavat lämpöä ympäristöstä. Vastaavasti, kun ne luovuttavat lämpöä ympäristöön, niiden olomuoto muuttuu kaasumaisesta nestemäiseksi. Olomuodon muutoksen avulla on mahdollista siirtää suhteellisen suuria lämpömääriä pienellä kylmäaineen massavirralla. (Hirvelä et al. 2011, s. 31.)

Kylmäaineiden valintaominaisuudet

Kylmäaineiden oikealla valinnalla on tärkeä rooli kuormalämpöpumpun suunnittelussa. Kenties tärkeimmät ominaisuudet ovat kylmäaineen sopivuus lämpökäyttöön, korkea kriittinen lämpötila ja matala kriittinen paine sekä korkea COP-hyötysuhde korkeissa lämpötiloissa.

Ympäristön kannalta on tärkeää, että kylmäaineen ODP (Ozone Depletion Potential) on 0 eli se ei aiheuta otsonikatoa. Lisäksi on huomioitava, että sen ilmaston lämpenemistä kasvattava potentiaali GWP (Global Warming Potential) on alle 10. Taulukossa 4 on esitetty kuumalämpöpumppujen kannalta tärkeimmät valintakriteerit kylmäaineelle. (Arpagaus et al. 2018, s. 999 & 1001.)

Taulukko 4 Kylmäaineen valintakriteerit kuumalämpöpumpun kannalta (Arpagaus et al. 2018, s. 1001).

Sopivuus lämpökäyttöön	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korkea kriittinen lämpötila (yli 150 °C) ▪ Matala kriittinen paine (alle 30 bar) ▪ Paine seisahduksessa alle 1 atm ▪ Matala painesuhde
Yhteensopivuus ympäristöön	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ODP = 0, ei otsonikatoa ▪ GWP alle 10 ▪ Mahdollisimman kestävä käyttö tulevaisuudessa
Turvallisuus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ei myrkyllinen ▪ Syttyvyys maksimissaan vähäistä
Tehokkuus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korkea COP-hyötysuhde korkeissa lämpötiloissa ▪ Minimaalinen tulistus nesteen puristumisen estämiseksi ▪ Suuri tilavuuslämmityskapasiteetti VHC (Volumetric Heat Capacity)
Saatavuus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saatavilla markkinoilla ▪ Alhainen hinta
Muut tekijät	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tyydyttävä liukoisuus öljyyn ▪ Kylmäaine-öljy-seoksen terminen pysyvyys ▪ Voiteluominaisuudet korkeissa lämpötiloissa ▪ Materiaalin yhteensopivuus alumiinin, teräksen ja kuparin kanssa

Kylmäaineet voidaan luokitella niiden turvallisuuden perusteella. Kylmäaineiden turvallisuusluokitus on jaoteltu niiden myrkyllisyyteen sekä syttymisherkkyyteen. (Hirvelä et al. 2011, s. 41.) Taulukossa 5 on esitetty kylmäaineiden turvallisuusluokitus.

Taulukko 5 Kylmäaineiden turvaluokitus. Numerot kuvaavat syttymisherkkyyttä ja kirjaimet myrkyllisyyttä. Kirjain L vastaa lievästi syttyvää. (Hirvelä et al. 2011, s. 42; Arpagaus et al. 2018, s. 1002.)

	Turvaryhmä	
Suuri syttymisherkkyyys	A3	B3
Pieni syttymisherkkyyys	A2 A2L	B2 B2L
Ei syttyvä	A1	B1
	Pienempi myrkyllisyys (terveydelle haitaton)	Suurempi myrkyllisyys (terveydelle haitallinen)

Kylmäaineiden jaottelu

Pääasiassa kylmäaineet ovat hiilivetyjä, joiden vetyatomeja on korvattu halogeenimolekyyleillä. Halogeenimolekyyliperusteella kylmäaineet voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin: CFC (Chloro-Fluoro-Carbon) -, HCFC (Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon) -, HFC (Hydro-Fluoro-Carbons) - ja PFC (Per-Fluoro-Carbon) -kylmäaineisiin. CFC-kylmäaineet ovat kokonaan halogenoituja hiilivetyjä, joiden molekyylirakenteesta ei löydy vetyatomeja. Vetyjen sijaan CFC-kylmäaineet sisältävät klooria ja fluoria sekä hiiltä. Osittain halogenoituja hiilivetyjä ovat HCFC-kylmäaineet, eli ne sisältävät klooria, fluoria, vetyä ja hiiltä. HFC-kylmäaineet ovat myös osittain halogenoituja hiilivetyjä, mutta halogenointiin on käytetty ainoastaan fluoria. Näin ollen HFC-kylmäaineet sisältävät fluoria, vetyä ja hiiltä. PFC-kylmäaineet ovat täysin halogenoituja hiilivetyjä ja ne sisältävät yksinomaan fluoria ja hiiltä.

Näistä edellä mainituista ryhmistä CFC-kylmäaineet ovat kaikkein haitallisimpia ympäristölle niiden suuren otsoni- ja merkittävän kasvihuonehaitallisuuden vuoksi. HCFC-kylmäaineet omaavat pienen otsonihaitallisuuden ja merkittävän kasvihuonehaitallisuuden. Sekä HFC- että PFC-kylmäaineet ovat molemmat otsonihaitattomia, mutta niillä on merkittävä kasvihuonehaitallisuus.

Edellä mainittujen ryhmien lisäksi on olemassa HC (Hydro-Carbon) -kylmäaineet ja epäorgaaniset kylmäaineet. HC-kylmäaineet ovat puhtaita hiilivetyjä. Epäorgaaniset kylmäaineet sisältävät nimensä mukaan puhtaita epäorgaanisia yhdisteitä. Molemmat ovat otsonihaitattomia ja niiden GWP on 0 tai lähes 0. Näitä luonnonmukaisia kylmäaineita ovat muun muassa ammoniakki ja hiilidioksidi. (Hirvelä et al. 2011, s. 34–35.)

Osittain halogenoituja HFO (Hydro-Fluoro-Olefin) -kylmäaineita pidetään ympäristöystävällisenä vaihtoehtona HFC-aineille, jotka luetaan Kioton pöytäkirjan mukaan kasvihuonekaasuiksi. EU:n F-kaasuasetuksen N:o 517/2014 mukaan vuoden 2022 jälkeen saa käyttää ainoastaan sellaisia kylmäaineita, joiden GWP on alle 150. (Arpagaus et al. 2018, s. 999.)

3.3.1 Kylmäaineiden vertailu

Valitaan kylmäaineiden vertailuun Oilonin (2019) ja Finessin (2022) käyttämät kylmäaineet teollisuuslämpöpumpuissa, joita ovat R134a, R513A, R450A ja R123ze. Näiden lisäksi tarkastellaan kylmäaineita R1234ze ja R245fa, sillä ne ovat yleisesti käytössä korkean lämpötilan teollisuuslämpöpumpuissa (Arpagaus et al. 2018, s. 992). Vertaillaan myös ammoniakkia ja hiilidioksidia, koska ne ovat luonnonmukaisia kylmäaineita ja näin ollen niitä on mahdollista käyttää pitkään ilman, että niiden käyttöä rajoitetaan mitenkään. Taulukossa 6 on vertailtu kylmäaineiden GWP-arvoa ja turvallisuusluokitusta. Lisäksi vertaillaan kylmäaineiden kriittisiä lämpötiloja.

Taulukko 6 Kylmäaineiden GWP- arvojen, turvallisuusluokitusten ja kriittisten lämpötilojen vertailu (Hirvelä et al. s. 43–44; Eyerer, Eyerer, Eicheldinger, Spliethoff, Tübke & Wieland, 2018, s. 784; Kondou & Koyama, 2015, s. 129; Lucchini, Maria Colombo & Molinaroli, 2021, s. 142.)

Kylmäaine	GWP	Turvallisuusluokitus	Kriittinen lämpötila
R134a (tetrafluorietaani)	1430	A1	101,1
R513a (R134a/R1234yf)	573	A1	94,9
R450a (R134a/R1234ze)	547	A1	104,5
R1234ze (tetrafluoripropeni)	7	A2L	109,4
R245fa (pentafluoripropaani)	1030	B1	154,0
R717 (ammoniakki)	0	B2	132,3
R744 (hiilidioksidi)	1	A1	31,1

Kyseisistä kylmäaineista oletettavasti R134a:n sekä R245fa:n käyttö joudutaan lopettamaan ensimmäisinä niiden suuren GWP-arvon vuoksi. Kriittisiä lämpötiloja tarkastelemalla voidaan huomata, että hiilidioksidilla on huomattavasti alhaisempi kriittinen lämpötila kuin muilla vertailtavilla kylmäaineilla. Tämä hankaloittaa sen käyttöä korkean lämpötilan lämpöpumpuissa.

3.4 Lämpökerroin

Lämpöpumppujen tehokkuus voidaan mitata lämpökertoimen (COP) avulla. Lämpökerroin määritellään lämpöpumpun siirtämän lämmön sekä lämpöpumpun tekemän työn suhteena. (Grassi, 2018, s. 4 & 6.) Lämpökerroin voidaan laskea oheisella kaavalla:

$$COP = \frac{Q_{ulos}}{W_{sisään}} \quad (5)$$

jossa	COP	lämpökerroin
	Q_{ulos}	lämpöpumpusta hyötykäyttöön saatava lämpöenergia
	$W_{sisään}$	lämpöpumpun tekemä työ lämmön tuottamiseksi

Motivan (2014) mukaan teollisuudessa käytettävien lämpöpumppujen COP-arvot vaihtelevat välillä 2,5–7,5.

3.5 Lämpöpumppujen saatavuus ja niiden kokoluokat

Korkean lämpötilan teollisuuslämpöpumppuja valmistetaan maailmanlaajuisesti. Vuoteen 2018 mennessä oli julkaistu yli 20 lämpöpumppumallia 13 eri valmistajalta, joiden tuottama maksimilämpötila on yli 90°C astetta. (Arpagaus et al. 2018, s. 991.) Suomessa teollisuuslämpöpumppuja valmistavia yrityksiä ovat muun muassa Oilon, Calefa, Finess ja Johnson Controls (Oilon Group Oy, 2019; Harmaala, 2020; Finess, 2022; Johnson Controls, 2022). Taulukossa 7 on esitetty tunnetuimmat lämpöpumppuvalmistajat, lämpöpumpuissa käytetyt kylmäaineet, niiden tuottama maksimi lämpötila, lämmityskapasiteetti ja COP-arvot.

Taulukko 7 Teollisuuden lämpöpumppuja, joiden tuottama maksimilämpötila on yli 90 °C (mukautettu Arpagaus et al. 2018, s. 992; Oilon, 2019; Harmaala, 2020; Finess, 2022).

Valmistaja	Tuote	Kylmäaine	Maksimi lämpötila	Lämmityskapasiteetti	COP
Kobe Steel	SGH 165	R134a/R245fa	165 °C	70–660 kW	1,6–3,5
	SGH 120	R245fa	120 °C	70–370 kW	1,6–3,5
	HEM-HR90,-90A	R134a/R245fa	90 °C	70–230 kW	1,7–3,0
Vicking Heating Engines AS	HeatBooster S4	R1336mzz(Z) R245fa	150 °C	28–188 kW	2,1–4,7
Ochsner	IWWDS R2R3b	R134a	130 °C	170–750 kW	4,0
	IWWDS ER3b	R245fa	130 °C	170–750 kW	2,7
	IWWHS ER3b	R245fa	95 °C	60–850 kW	2,7–5,8
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717/R718	120 °C	0,25–2,5 MW	2,4–4,5
Mayekawa	Eco Sirocco	R744	120 °C	65–90 kW	2,6–3,6
	Eco Cute Unimo	R744	90 °C	45–110 kW	-
Combitherm	HWW 245fa	R245fa	120 °C	62–252 kW	3,4
	HWW R1234ze	R1234ze	95 °C	85–1301 kW	-
Dürr thermea	thermeo2	R744	110 °C	51–2200 kW	3,9
Friotherm	Unitop 22	R1234ze	95 °C	0,6–3,6 MW	2,7–3,7
	Unitop 50	R134a	90 °C	9–20 MW	-
Star Refrigeration	Neatpump	R717	90 °C	0,35–15 MW	3,0–5,0
GEA Refrigeration	GEA Grasso	R717	90 °C	2–4,5 MW	5,0
Johnson Controls	HeatPAC HPX	R717	90 °C	326–1324 kW	4,0
	HeatPAC Screw	R717	90 °C	230–1315 kW	-
	Titan OM	R134a	90 °C	5–20 MW	-
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90 °C	340–600 kW	4,1
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze	90 °C	148–390 kW	3,4
Oilon	ChillHeat P 30-P 450	R134a, R513a, R450a, R1234ze	120 °C	30–450 kW	4,0–6,0
Calefa	Hot- Level®	ei ilmoitettu	130 °C	100–1000 kW	3,0–7,0
Finess	-	R1234ze, R450a R513a, R717	120 °C	100–5000 kW	3,0–6,0

Taulukkoa 7 tarkastelemalla voidaan huomata, että eri teollisuuden lämpöpumppuja on saatavilla kymmenistä kilowateista muutamaan kymmeneen megawattiin. Näin laajan lämmityskapasiteettien vaihtelun ansiosta on todennäköistä, että yhä useampaan erilaiseen

prosessiin on mahdollista sijoittaa lämpöpumppu. Taulukossa 7 olevat lämpöpumppujen tehoalueet ovat yksittäisille lämpöpumpuille laadittuja (Arpagaus et al. 2018, s. 992). Käyttämällä useampaa lämpöpumppua voidaan kapasiteetti moninkertaistaa. Suurin mahdollinen tuotettu lämpötila on 165 °C, joka pystytään tuottamaan Kobe Steelin valmistamalla SGH 165-lämpöpumpulla. Myös laajan lämpötilaskaalan ansiosta yhä useampaan prosessiin on mahdollista löytää sopiva lämpöpumppu.

3.6 Kustannukset ja säästöt

Lämpöpumpuilla ylijäämälämmön hyödyntämisen edellytyksenä on, että tuotettu energia tulee halvemmaksi kuin sillä korvattu energia. Kyseessä on siis lämmön ja lämpöpumpun käyttöenergian hinnoista, sähkön/höyryn hinnoista sekä hintasuhteista. Investointi ei ole kannattava, jos sähkö/höyry on tuotettuun lämpöön nähden kallista. Myös hyödynnettävän ylijäämälämmön tulee olla hyvin edullista tai ilmaista, jotta kustannukset syntyvät vain lämmön siirtämisestä sitä hyödyntävälle laitteistolle ja siltä pois.

Lämpöpumppujen ominaisinvestointi on suhteellisen vakio riippumatta laitoksen kokoluokasta, jos jätetään huomioimatta vaadittavien ulkoisten liitännöiden aiheuttamat kustannukset. Lämpöpumppuinvestoinneissa lämpöpumpun ja kytkentäratkaisujen hinnat vaihtelevat kohdekohtaisesti. Tarvittavien liitännöiden kustannuksista on hankalaa muodostaa mitään yleispeväää sääntöä. Lämpöpumpun sijainnin optimoinnilla liitännöiden kustannuksiin on mahdollista vaikuttaa, sillä pitkät siirtoetäisyydet nostavat investointi- ja käyttökustannuksia ja näin ollen laskevat hankkeen kannattavuutta. (Motiva, 2014, s. 63–64.)

Käyttämällä lämpöpumppuja säästetään hukkalämmön hyödyntämisessä huomattava määrä energiaa. Lisäksi säästetään polttoaineen käytössä, sillä ilman lämpöpumppuja lämpö tuotettaisiin polttamalla. Esimerkiksi Pietarsaareissa sijaitsevalla Snellmanin Lihanjalostus Oy tehtaalla säästetään vuodessa 2,9 miljoonaa kg öljyä lämpöpumppujen ansiosta. Myös tehtaalla hiilidioksidipäästöt ovat vuodessa 8 700 tonnia pienemmät kuin ennen lämpöpumppujen käyttöön ottamista. Rahallinen säästö lämpöpumppujen käyttämisellä on vuositasolla noin 580 000 €. (Oilon Group Oy, s.a.)

3.7 Lähitulevaisuuden kehitysnäkymät

Maa­ilman­laajuisesti on käynnissä useita tutkimusprojekteja korkean lämpötilan lämpöpum­puista, joiden tuottama lämpötila on yli 100 °C. Tärkeimpinä tutkimustavoitteena ovat läm­pöpumpun hyötysuhteen lisääminen, uusien ympäristöystävällisten kylmäaineiden testaami­nen sekä korkean tuotetun lämpötilan saavuttaminen. Lisäksi tutkimus- ja kehitystyötä on suunnattu lämpöpumppujen tehokkuuden lisäämiseen.

Tähän päivään mennessä tutkimuksista on saatu lupaavia tuloksia korkean lämpötilan läm­pöpumppujen kehityksestä. Laboratoriotason tutkimuksissa on saavutettu korkeampia COP- arvoja kuin mitä kaupallisesti saatavilla olevien korkean lämpötilan lämpöpumppujen COP- arvot ovat. Korkeimmissa tuotetuissa lämpötiloissa COP-arvot laskevat huippulukemastaan, joten parhaimpiin COP-arvoihin päästään yleensä matalammilla poistolämpötiloilla. COP- arvon laskeminen liittyy ilmiöön, jossa kylmäaine on lähellä sen kriittistä pistettä eli tilaa, jossa faaseja ei voida enää erottaa toisistaan.

Myös korkeampien lämpötilojen saavuttamiseen on panostettu tutkimuksissa. Esimerkiksi Norjassa olevan HeatUp-projektin tavoitteena on nostaa lämpöpumppujen tuottama lämpö- tila yli 200 °C:een käyttämällä ainoastaan luonnollisia kylmäaineita kuten butaania (R600), ammoniakia (R717) ja vettä (R718). (Arpagaus et al. 2018, s. 995, 1005–1006.)

4 Johtopäätökset

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin teollisuuden lämmityksen sähköistämismahdollisuuksia nykyisellä, olemassa olevalla teknologialla. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää prosessiuunien osalta sähköistystekniikoiden kehitysaste, tunnetut käyttökohteet, uunien koko ja tehokkuus, sähköistettyjen prosessien edut sekä sähköisten prosessiuunien käyttö tulevaisuudessa. Lämpöpumppujen osalta tavoitteena oli selvittää käyttökohteet ja -lämpötilat, saatavuus, kokoluokat, kustannukset sekä tulevaisuuden kehitysnäkymät.

Prosessiuuneissa käytettävistä sähköistysteknologioista infrapuna-, mikroaalto ja radiotaajuusteknologia ovat kaikkein kehittyneimmät, mutta niillä on mahdollista kattaa ainoastaan alle 1000 °C:n prosessit. Korkeampiin lämpötiloihin päästään induktio-, sähkökaari ja plasmasovelluksilla. Nämä sovellukset sekä vastuslämmitys tarvitsevat vielä kehitystyötä, jotta niitä on mahdollista hyödyntää laaja-alaisesti eri teollisuuden prosesseissa. Kehitettyjen kuumalämpöpumppujen avulla on mahdollista tuottaa jopa 90–160 °C lämpöä, joka on korkea lämpötila lämpöpumpuille. Tällä hetkellä sähköisiä lämmitysratkaisuja on käytössä monissa eri teollisuuden prosesseissa, mutta niiden käyttö ei ole vielä kovinkaan yleistä.

Tutkimuksessa saatiin selville, että tuotteen laatua ja saantoa voidaan parantaa sähköistämällä prosessien lämmitys. Lisäksi prosessiajat lyhentyvät, prosessien hallittavuus on parempaa sekä prosessit ovat joustavia ja turvallisia. Sähköiset prosessiuunit ovat myös kooltaan pienempiä kuin perinteiset prosessiuunit ja näin ollen vievät vähemmän tilaa. Sähköisten prosessiuunien lämmönsiirto on tehokkaampaa kuin perinteisten prosessiuunien. Tulevaisuudessa sähköisten prosessiuunien käyttö riippuu suuresti muiden vähähiilisten lämmitystekniikoiden kustannuksista. Esimerkiksi vaihtaminen uusiutuvaan polttoaineeseen tulee halvemmaksi kuin kokonaan uuden lämmitysjärjestelmän integroiminen prosessiin. Käyttöönottamista hankaloittaa myös riittämätön kehitystyö suurten mittakaavan järjestelmistä.

Lämpöpumppujen osalta tutkimuksessa saatiin selville, että kaupallisia lämpöpumppuja on saatavilla kymmenien kW:n kokoluokista jopa 20 MW:n kokoluokkiin. Maksimi tuotettu lämpötila kaupallisella sovelluksella on 165 °C. Korkea tuotettu lämpötila sekä laaja kokoluokkaskaala mahdollistavat yhdessä lämpöpumpun sijoittamisen yhä useampaan prosessiin. Kaupallisten lämpöpumppujen COP-arvot vaihtelevat välillä 1,6–7,0. Tulevaisuudessa

lämpöpumppujen tuottamaa lämpötilaa pyritään nostamaan entisestään sekä niiden tehokkuutta yritetään kasvattaa. Lisäksi halutaan kehittää entistä ympäristöystävällisempiä kylmäaineita.

Ympäristöystävällisyyden kannalta teollisten prosessien sähköistäminen siirtää hiilidioksidipäästöt sähköntuotantoon. Tällöin hiilidioksidipäästöjen väheneminen riippuu tavasta tuottaa sähköä. Mitä enemmän sähköntuotannossa käytetään uusiutuvia energialähteitä, sitä enemmän hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää.

Aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin monipuolisesti sekä sähköisiä prosessiuuneja että lämpöpumppuja, kun aikaisemmissa tutkimuksissa on tyypillisesti keskitytty vain toiseen. Tässä tutkimuksessa keskityttiin yleisellä tasolla kaikkiin olemassa oleviin teknologioihin, ei ainoastaan tietyn prosessin näkökulmasta. Jatkossa tutkimuksissa tulisi keskittyä enemmän analyysin ja mallinnuksen tekemiseen jokaisella eri teollisuuden alalla, jotta saadaan yksityiskohtaisempaa lisätutkimusta prosessien sähköistysmahdollisuuksista.

Lähteet

Abas N, Kalair AR, Khan N, Haider A, Saleem Z, Saleem MS (2018) Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 90: 557–569.

ABB (2022) ABB ja Coolbrook yhteistyöhön muoviteollisuuden päästöjen vähentämiseksi. [Online]. [Accessed 19.3.2022]. Available: <https://new.abb.com/news/fi/detail/87016/abb-ja-coolbrook-yhteistyohon-muoviteollisuuden-paastojen-vahentamiseksi>

Arpagaus C, Bertsch SS, Bless F, Schiffmann Jü, Uhlmann M (2018) High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy (Oxford)* 152: 985–1010.

Basak T, Chandrasekaran S, Ramanathan S (2012) Microwave material processing-a review. *AIChE Journal; AIChE J* 58(2): 330–363.

Bellinghausen R, Kockmann N, Mleczko L, Rieks M (2015) Experimental study of methane dry reforming in an electrically heated reactor. *International Journal of Hydrogen Energy* 40(46): 15940–15951.

Bonizzoni G, Vassallo E (2002) Plasma physics and technology; industrial applications. *Vacuum* 64(3): 327–336.

Burdio JM, Dede EJ, Lucia O, Maussion P (2014) Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics (1982)* 61(5): 2509–2520.

Caux S, Egalon J, Maussion P, Pateau O, Souley M (2012) Multiphase System for Metal Disc Induction Heating: Modeling and RMS Current Control. *IEEE Transactions on Industry Applications* 48(5): 1692–1699.

Coolbrook (2020) RDR is a cleaner, faster and more profitable way to produce olefins. [Online]. [Accessed 19.3.2022]. Available: <https://coolbrook.com/technology/>

Cortese M, Iervolino G, Martino M, Meloni E, Palma V, Renda S (2022) Electrically driven SiC-based structured catalysts for intensified reforming processes. *Catalysis Today* 383: 31–43.

De Vasconcelos BR, Lavoie J (2018) Is dry reforming the solution to reduce natural gas carbon footprint? *International Journal of Energy Production and Management* 3(1): 44–56.

European Commission Decision C 8631/2013.

Eyerer S, Eyerer P, Eicheldinger M, Spliethoff H, Tübke B, Wieland C (2018) Theoretical analysis and experimental investigation of material compatibility between refrigerants and polymers. *Energy (Oxford)* 163: 782–799.

Finess (2022) Teollisuuslämpöpumput. [Online]. [Accessed 23.2.2022]. Available: <https://finess.fi/laitteet/lampopumput/teollisuuslampopumput/>

- Gonzalez G, Ocsachoque M, Pompeo F (2011) Rh–Ni/CeO₂–Al₂O₃ catalysts for methane dry reforming. *Catalysis Today* 172(1): 226–231.
- Grassi W (2018) *Heat Pumps Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing.
- Harmaala P (2020) HotLevel® -kuumalämpöpumppu mullisti energiantuotannon. [Online]. [Accessed 23.2.2022]. Available: <https://www.calefa.fi/hotlevel/>
- Hirvelä E, Jokela M, Kaappola A, & Kianta J (2011) *Kylmätekniiikan perusteet*. Helsinki: Opetushallitus.
- Johnson Controls (2022) Teollisuuslämpöpumput. [Online]. [Accessed 23.2.2022]. Available: https://www.johnsoncontrols.com/fi_fi/buildings/heat-pumps
- Kim J, Kim M, Son H (2022) Sustainable process integration of electrification technologies with industrial energy systems. *Energy (Oxford)* 239: 122060.
- Kondou C, Koyama S (2015) Thermodynamic assessment of high-temperature heat pumps using Low-GWP HFO refrigerants for heat recovery. *International Journal of Refrigeration* 53: 126–141.
- Kosmadakis G (2019) Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries. *Applied Thermal Engineering* 156: 287–298.
- Krüger C, Kumar KA, Lord M, Luderer G, Madeddu S, Pehl M, Peterseim J, Ueckerdt F (2020) The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). *Environmental Research Letters; Environ.Res.Lett* 15(12): 124004.
- Lechtenböhmer S, Nilsson LJ, Åhman M, Schneider C (2016) Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy (Oxford)* 115: 1623–1631.
- Lucchini A, Maria Colombo LP, Molinaroli L (2021) Drop-in analysis of R450A and R513A as low-GWP alternatives to R134a in a water-to-water heat pump. *International Journal of Refrigeration*.
- McMillan CA, de la Rue du Can, Stephane, Wei M (2019) Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 6(4): 140–148.
- Mironov YM (2021) Specific Features of Electric Arc Furnaces as Electric Energy Receivers. *Russian Metallurgy Metally* 2021(6): 703–708.
- Motiva (2015) Teollisuusunien energiatehokkuus. [Online]. [Accessed 9.3.2022]. Available: https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusunien_energiatehokkuus.pdf
- Motiva (2014) Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. [Online]. [Accessed 8.2.2022]. Available: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf#page=1
- Mullinger P and Jenkins B (2014) *Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Nellissen P, Wolf S (2015) Heat pumps in non-domestic applications in Europe: Potential for an energy revolution. *Emerson Climate Technologies, Delta-Ee 3rd Annual Heat Pumps & Utilities Roundtable*.

Oilon Group Oy (2019) Oilon ChillHeat. [Online]. [Accessed 23.2.2022]. Available: https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/03/Oilon_ChillHeat_FI.pdf

Oilon Group Oy. Snellman, Pietarsaari. [Online]. [Accessed 28.3.2022]. Available: <https://oilon.com/fi/references/snellman-pietarsaari/>

Simakov DSA (2017) *Renewable Synthetic Fuels and Chemicals from Carbon Dioxide Fundamentals, Catalysis, Design Considerations and Technological Challenges*. Cham: Springer International Publishing.

SWEP International AB (2019a) 7.1 General function and theory. [Online]. [Accessed 9.3.2022]. Available: <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/7.-condensers/asd5/>

SWEP International AB (2019b) 6.1 General function and theory. [Online]. [Accessed 9.3.2022]. Available: <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/6.-evaporators/asas10/>

Weisman D (2019) Using INFRARED HEATING. *Process Heating* 26(7): 14–18.