LUT University

Selvitys hukkalämmön hyödyntämisen teknologioista

Hämeen hukkalämmöt ja niiden teknologinen hyödynnettävyys (LÄMPÖ)

Euroopan unionin osarahoittama

LUT University

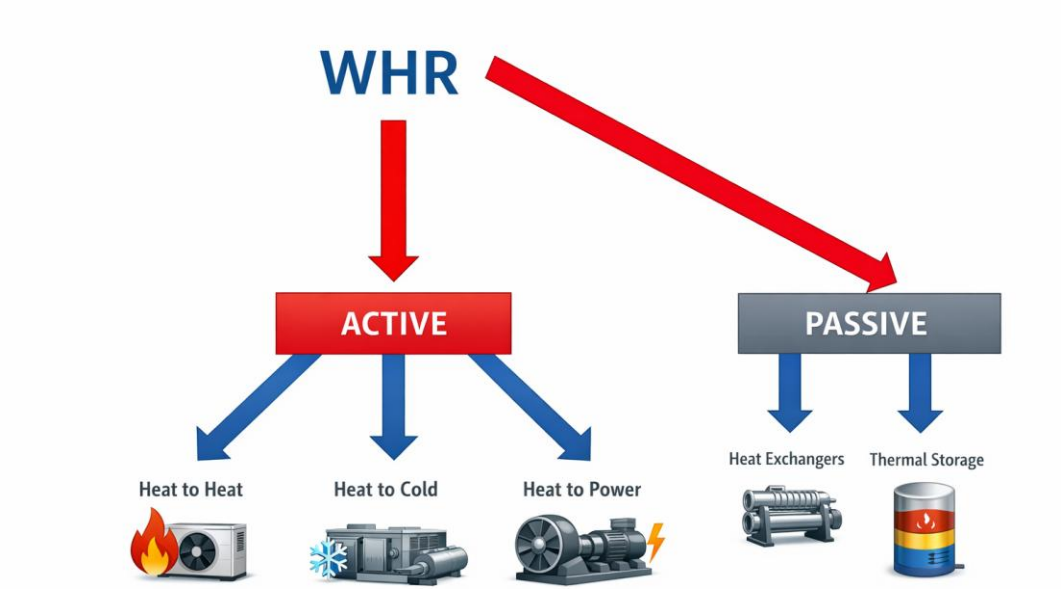
Sisällysluettelo

1. Johdanto 3
2. Lämmön suora hyödyntäminen ja lämmön varastointi (passiiviset menetelmät) 6
2.1 Lämmön suora hyödyntäminen ja lämmönsiirtimet 6
2.2 Lämpövarastot 7
2.3 Hukkalämmön suora hyödyntäminen hiilidioksidin talteenotossa (DAC) 8
3. Hukkalämmön lämpötilan korottaminen, hukkalämmön hyödyntäminen jäähdytyksessä ... 9
3.1 Taustaa ja lämpöpumppujen toimintaperiaate 9
3.2 Kylmäaineet 11
3.3 Höyryä tuottavat lämpöpumput 13
3.4 Teolliset ja korkean lämpötilan lämpöpumput, state-of-the-art 14
3.5 Absorptiolämpöpumput ja jäähdyttimet 20
3.6 Muita teknologioita hukkalämmön lämpötilan korottamiseksi 21
3.6.1 Hybridilämpöpumput 21
3.6.2 Käänteinen Brayton 22
3.6.3 Käänteinen Stirling 22
3.6.4 Kalorimetriset lämpöpumput ja jäähdyttimet 22
4. Hukkalämmön muuntaminen sähköksi 24
4.1 Organic Rankine Cycle (ORC) 24
4.2 Termosähköiset generaattorit (TEG) 30
4.3 Muita lämmöstä sähköksi -teknologioita 34
4.3.1 Kalina-prosessi 34
4.3.2 Ylikriittiseen hiilidioksidiin perustuvat prosessit 34
4.3.3 Stirling 35
4.3.4 Carnot-akut 36
6. Yhteenveto ja johtopäätökset 37
7. Lähteet 39

1. Johdanto

Tässä raportissa käydään läpi hukkalämmön talteenottoon soveltuvia teknisiä ratkaisuja, ja eri teknologioiden toimintaperiaatteita, sekä selvitetään hukkalämmön hyödyntämisen state-of-the-art teknologiaa sekä tehokkuuksia. Raportti on tehty osana Hämeen hukkalämmöt ja niiden teknologinen hyödynnettävyys (LÄMPÖ)-hanketta.

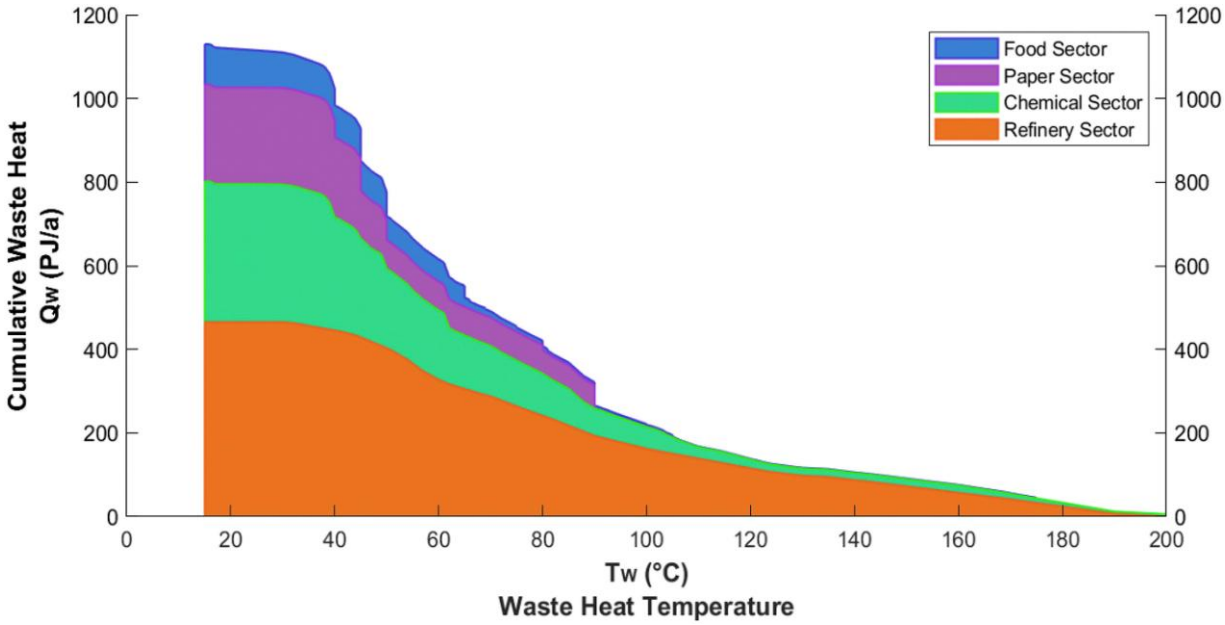
Hukkalämmön hyödyntäminen on yksi tehokkaimmista keinoista lisätä järjestelmien energiatehokkuutta, sekä vähentää syntyviä päästöjä ja energian käytöstä aiheutuvia kustannuksia. Hukkalämmön hyödyntämiselle on olemassa erilaisia mahdollisuuksia, sisältäen hukkalämmön suoran hyödyntämisen lämpönä tai lämmön varastoinnin, lämpötilan korottamisen lämpöpumpuilla, hukkalämmön hyödyntämisen jäähdytykseen tai hukkalämmön muuntamisen sähköksi. Eri hyödyntämismahdollisuudet ja hukkalämpöteknologiat voidaan jakaa aktiivisiin tai passiivisiin menetelmiin, hukkalämpöjärjestelmän toimintaperiaatteen mukaisesti. Aktiivisiin menetelmiin luetaan tyypillisesti erilaiset kiertoprosessit, kuten lämmöstä sähköksi prosessit tai lämpöpumpputeknologiat. Aktiivisille menetelmille on yhteistä se, että hukkalämpö jalostetaan toiseen muotoon (jäähdytykseksi, lämpötilatason korotus, tai muuntaminen sähköksi tai mekaaniseksi energiaksi). Passiivisiin menetelmiin kuuluviksi luetaan tyypillisesti lämmönsiirtimet tai lämmönvarastointi, eli lämmön suora hyödyntäminen lämpönä ilman hukkalämmön jatkojalostamista. Kuvassa 1 on esitetty eri hukkalämpöteknologioiden periaatteellinen jako aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin.



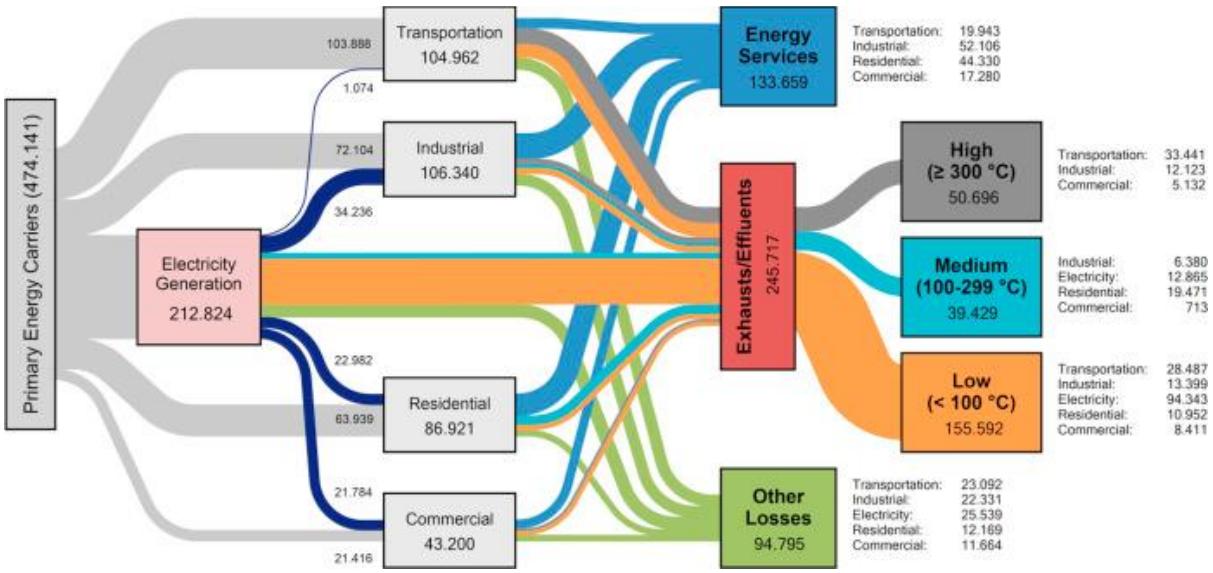
Kuva 1. *Hukkalämpöteknologioiden jaottelu aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin.*

Teollisuudessa ja muissa sovelluksissa syntyvä hukkalämpö poistuu prosesseista pääasiassa matalissa lämpötiloissa. Kuvassa 2 on esitetty kumulatiivinen hukkalämmön määrä elintarvike- paperi- ja sellu-, kemian- sekä jalostamoteollisuudessa Euroopassa (kuvassa tarkastelussa vain 15 °C -200 °C, hukkalämpö). Selvästi suurin osa teollisuuden

hukkalämmöstä on alle 100 asteista, mutta myös korkeamassa lämpötilassa poistuvia hukkalämpövirtoja syntyy erilaisissa teollisuuden prosesseissa ja energiantuotannossa, esimerkiksi kuumien savukaasujen muodossa. Kuvassa 3 on esitetty arvio hukkalämmön jakautumisesta eri sektoreilla matalan (alle 100 °C), keskitason (100-300 °C) ja korkean lämpötilan (yli 300 °C) hukkalämpövirtoihin.



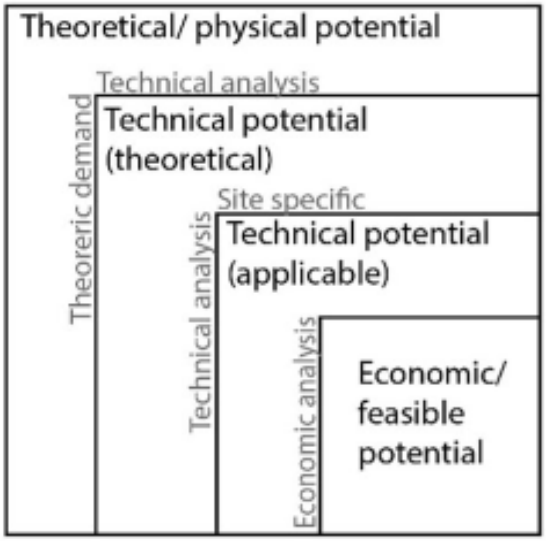
Kuva 2. *Euroopan elintarvike-, metsä-, kemian- ja jalostamoteollisuudessa syntyvän hukkalämmön lämpötilatasot alle 200 °C hukkalämpöjen osalta (Marina et al. 2021).*



Kuva 3. *Arvio Hukkalämmön jakautumisesta eri sektoreille globaalilla tasolla (Forman et al. 2016).*

Erilaisten teollisuusprosessien ja muiden hukkalämpökohteiden hukkalämpöpotentiaali voidaan jakaa neljään eri tasoon: ensimmäinen taso on hukkalämmössä teoreettisesti

oleva potentiaali, toinen taso on teknisesti teoriassa hyödynnettävissä oleva potentiaali, kolmas taso on teknisesti hyödynnettävissä oleva todellinen potentiaali sisältäen laitteistoissa tapahtuvat häviöt ja muut rajoitukset. Neljäs taso on sekä teknisesti että taloudellisesti kannattavasti hyödynnettävissä oleva potentiaali. Vaikka teoreettinen lämpömäärä eri hukkalämpövirroissa on tyypillisesti suuri, jää todellinen teknisesti ja taloudellisesti hyödynnettävissä oleva hukkalämmön määrä lähes aina teoreettista potentiaalia pienemmäksi kuvassa 3 esitetyn periaatteen mukaisesti.



Kuva 4. *Periaatekuva hukkalämmön hyödyntämisen eri tasoista (teoreettinen potentiaali, teknologian teoreettinen potentiaali, teknisesti toteutettavissa oleva potentiaali, taloudellisesti kannattava hyödyntämispotentiaali (Bianchi et al. 2019).*

Hukkalämmönhyödyntämispotentiaaliin vaikuttaa ennen kaikkea syntyvän hukkalämmön määrä sekä lämpötilataso. Yleisesti, mitä suurempi on syntyvän hukkalämmön määrä ja mitä korkeampi on hukkalämmön lämpötila, sen paremmat mahdollisuudet hukkalämmön hyödyntämiselle on. Lämpötilan ja hukkalämmönmäärän lisäksi hukkalämmön hyödyntämisessä tulee huomioida myös hukkalämmön muita ominaisuuksia, kuten likaisuus. Lisäksi hukkalämmön ajallinen saatavuus ja lämpövirran tasaisuus, mahdolliset korroosio ongelmat, sekä se onko hukkalämpö sitoutuneena nestemäisessä virtauksessa, kaasumaisessa virtauksessa, vai säteileekö lämpö ympäristöön esimerkiksi kuumilta pinnoilta, vaikuttavat soveltuvan teknologian valintaan, sekä hukkalämmön hyödyntämisen potentiaaliin.

Raportin seuraavissa kappaleissa esitellään tarkemmin eri hukkalämmön hyödyntämiseen liittyviä teknologioita ja hyödyntämistapoja. Kappaleessa 2 esitellään lyhyesti hukkalämmönhyödyntämistä suoraan lämpönä (passiiviset menetelmät). Kappaleessa 3 käsitellään lämpötilan korotukseen, sekä jäähdytykseen soveltuvia tekniikoita. Kappaleessa 4 käsitellään hukkalämmön sähköksi muuntoon soveltuvia tekniikoita. Kappaleessa 5 tehdään yhteenveto eri tekniikoista ja kappaleessa 6 esitetään selvityksen yhteenveto sekä tehdyt johtopäätökset.

2. Lämmön suora hyödyntäminen ja lämmön varastointi (passiiviset menetelmät)

2.1 Lämmön suora hyödyntäminen ja lämmönsiirtimet

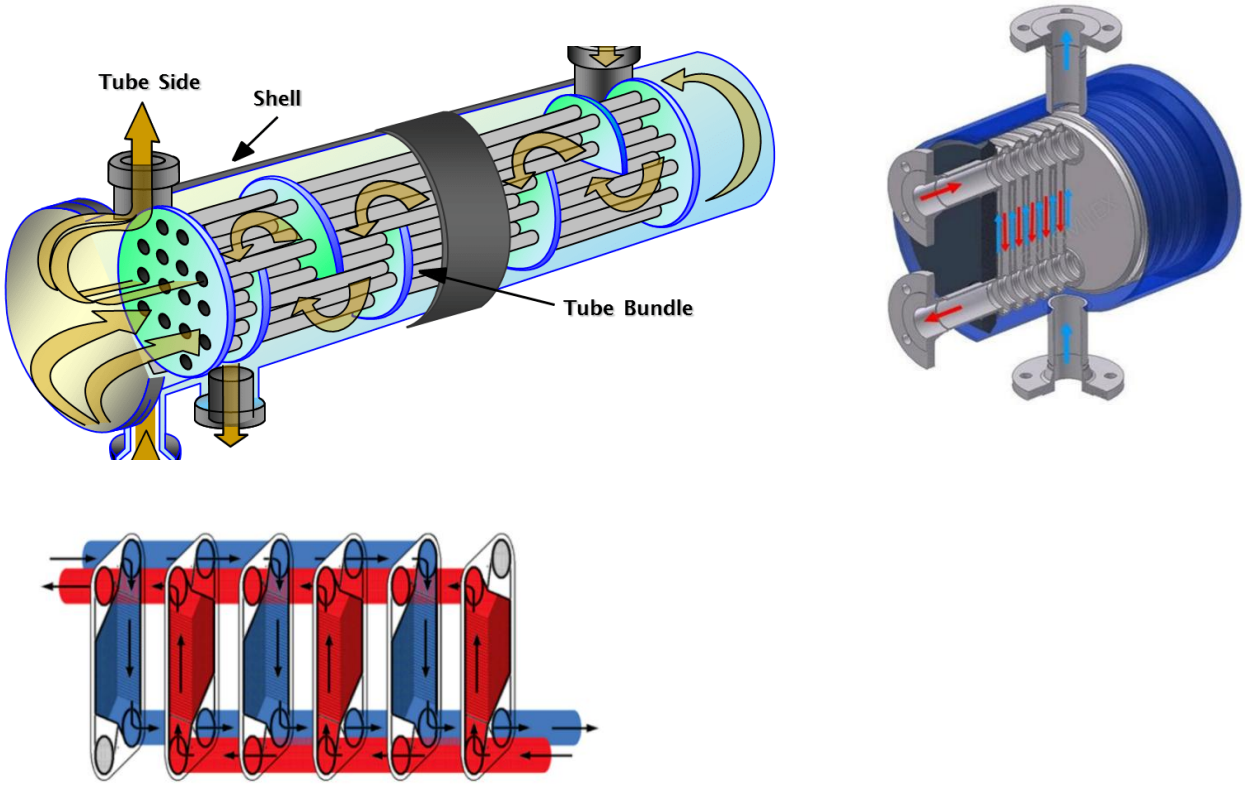
Mikäli hukkalämmön lämpötilataso on valmiiksi riittävän korkea lämmityksen tarpeisiin, voidaan käyttää passiivisia menetelmiä eli lämmön suoraa hyödyntämistä. Tyypillinen tapa on käyttää lämmönsiirtimiä ja erityyppisiä lämmönsiirtimiä onkin jo laajasti käytetty ja kehitetty hukkalämmön hyödyntämiseen. Lämmönsiirtimiä ei tarvita kaikissa hukkalämmön hyödyntämistapauksissa, varsinkin silloin, jos hukkalämpövirta soveltuu sellaisenaan suoraan lämmityskäyttöön ilman että lämpöä siirretään virtauksesta toiseen. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi jotkin kuivausprosessit, erityisesti jos hukkalämpö on sitoutuneena esimerkiksi ilmaan tai savukaasuihin.

Käytettäessä lämmönsiirtimiä hyödyntämään hukkalämpöä suoraan lämmityskäyttöön, tyypillisiä ratkaisuja ovat erilaiset putki- ja levylämmönsiirtimet. Oikean lämmönsiirrintyypin valintaan vaikuttavat hyödynnettävän hukkalämmön ominaisuudet, kuten tiheys (kaasumainen vai nestevirtaus), hukkalämmön määrä sekä lämpötilataso ja mahdolliset hukkalämpövirrassa olevat epäpuhtaudet. Lämmönsiirtimen materiaalivalintaan ja tyypin valintaan vaikuttaa edellä mainittujen lisäksi myös mm. hukkalämpövirran korroosioisuus. Edellä mainittuja lämmönsiirrintyyppejä käytetään yleisesti myös osana aktiivisia hukkalämmön hyödyntämisen menetelmiä, kuten lämpöpumpuissa ja ORC-voimaloissa.

Erilaisia putkilämmönsiirtimiä käytetään erityisesti silloin kun toinen virtaamista on nestemäistä ja toinen virtaus on kaasua. Tyypillisesti putkilämmönsiirtimissä nestemäinen aine, esimerkiksi kaukolämpövesi tai muu lämmitettävä neste, virtaa putkien sisällä. Putkien ulkopuolella virtaava aine voi olla joko nestemäistä tai kaasumaista, esimerkiksi kuumia savukaasuja. Jos putkien ulkopuolella virtaava aine on kaasumaista, voidaan lämmönsiirtoa tehostaa putkien ulkopuolisella rivoituksella, joka lisää kaasupuolen lämmönsiirtopinta-alaa ja lämmönsiirron tehokkuutta. Kun lämpöä otetaan talteen suuria määriä (esimerkiksi joitakin megawatteja) erilaiset putki-vaippa lämmönsiirtimet ovat yleisesti käytettyjä hukkalämmön talteenotossa. Putki-vaippa siirtimissä lämmönsiirtimen sisäisillä ohjauslevyillä ja rakenteilla vaippapuolella voidaan tehostaa lämmöntalteenottoa. Eräs putkilämmönsiirrin tyyppi on savukaasukattilat, joissa esimerkiksi kuumista savukaasuista tuotetaan höyryä. Savukaasu- ja lämmöntalteenottokattiloissa käytetään tyypillisesti rivoitettuja putkia, lämmönsiirron parantamiseksi putkien ulkopuolella kulkevan kuuman kaasun ja putken sisällä höyrystyvän paineistetun veden välillä.

Putkilämmönsiirtimien lisäksi toinen yleisesti käytettävä lämmönsiirrintyyppi on levylämmönsiirtimet, jotka soveltuvat myös hukkalämmön suoraan hyödyntämiseen.

Levylämmönsiirtimet ovat erityisen hyvä vaihtoehto silloin, kun lämmönsiirtimestä halutaan rakenteeltaan kompakti. Levylämmönsiirtimet ovat tehokkaimmillaan silloin kun lämmönsiirtimen molemmilla puolilla virtaa nestemäistä ainetta (sekä hukkalämpövirta, että lämmitettävä virtaus), mutta ne soveltuvat huonommin kaasumaisille virtauksille mm. painehäviöiden ja rajoitetun lämmönsiirtopinnan vuoksi. Lisäksi levylämmönsiirtimiä ei käytetä erittäin suurissa teholuokissa ja ne ovat tyypillisesti käytössä hieman pienemmissä järjestelmissä kuin putki-vaippa siirtimet. Tyypillisen levylämmönsiirtimen lisäksi voidaan käyttää levy-vaippa lämmönsiirtimiä, joiden etuna on mm. täysin hitsattu rakenne ilman tiivisteitä tai juotoksia, sekä hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. Lisäksi levy-vaippa lämmönsiirtimillä voidaan saavuttaa tavallisia levylämmönsiirtimiä parempi paineen- ja lämpötilan kesto.



Kuva 5. *Putki-vaippa, levy ja levy-vaippa lämmönsiirtimen toimintaperiaate ja esimerkkirakenne (Kuvat: Arventraining, Saari J. ja Gesmex)*

2.2 Lämpövarastot

Passiivisiin hukkalämmön hyödyntämismenetelmiin kuuluu lämmönsiirtimien lisäksi lämmönvarastointi. Hyödyntämällä lämpövarastoja voidaan hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia parantaa erityisesti silloin kun hukkalämmön määrässä on merkittävää ajallista vaihtelua. Myös sellaisissa tapauksissa, joissa hukkalämpöä syntyy tasaisesti voi lämmönvarastoinnista olla hyötyä, erityisesti mikäli lämmitystarpeessa on ajallista vaihtelua. Miró et al. (2016) tekemässä selvityksessä

löydettiin yli 30 erilaista esimerkkiä lämpövarastojen hyödyntämisestä hukkalämmön talteenotossa. Suuri osa näistä liittyi energiaintensiivisiin teollisuusprosesseihin, joissa hukkalämpöä otettiin talteen ja hyödynnettiin myöhemmin samassa prosessissa. Varastoitua hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää teollisuusprosessien lisäksi myös kaukolämpöverkoissa.

Hukkalämmön sisältämää lämpöä voidaan varastoida erityyppisiin lämpövarastoihin riippuen hukkalämmön lämpötilatasosta, sekä määrästä. Varastointimenetelmiin sisältyy mm. veteen perustuvat lämpöakut, kiinteisiin materiaaleihin perustuvat varastot kuten hiekka-akut, sulasuolavarastot, sekä muut erilaisiin faasimuutosmateriaaleihin perustuvat lämpövarastot. Veteen perustuvien varastojen etuina on lämpövaraston yksinkertaisuus ja se että ne soveltuvat hyvin erityisesti suhteellisen matalalämpöisen (n. 100 °C tai alle) lämmön varastointiin. Kiinteiden materiaalien käyttöön perustuvien akkujen, kuten hiekka-akkujen ja myös sulasuola-akkujen etuna on niiden kyky varastoida lämpöä korkeissa lämpötiloissa, mahdollistaen lämmön käyttämisen myöhemmin esimerkiksi kaukolämmöksi, prosessihöyryn tuottamiseen tai jopa sähkön tuottamiseen (Bhatnagar et al. 2022, https://polarnightenergy.com/).

2.3 Hukkalämmön suora hyödyntäminen hiilidioksidin talteenotossa (DAC)

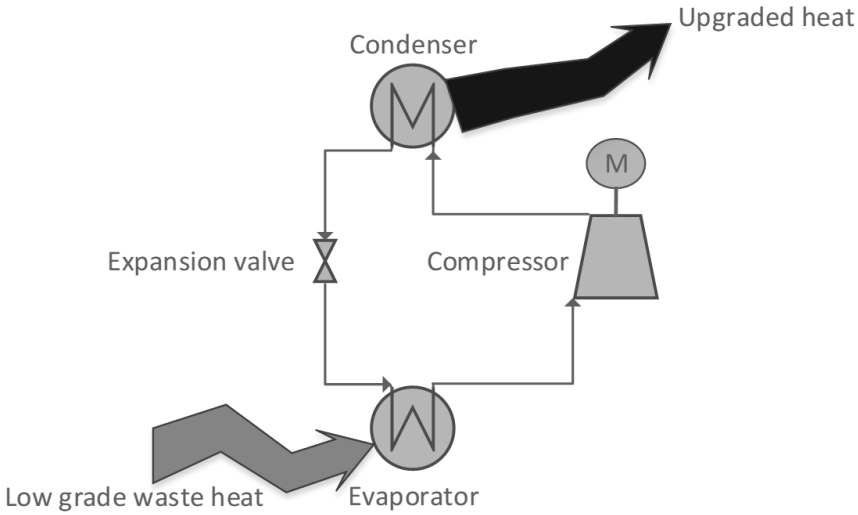
Hukkalämmön hyödyntäminen hiilidioksidin talteenotossa suoraan ilmasta (DAC, *Direct Air Capture*) on yksi mielenkiintoinen vaihtoehto hukkalämmön suoralle hyödyntämiselle. DAC-järjestelmiä on kehitetty perustuen erilaisiin menetelmiin ja DAC-järjestelmien on todettu olevan mahdollinen avainteknologia päästövähennnystavoitteiden saavuttamisessa tulevaisuudessa (Bouaboula et al. 2024). Esimerkiksi kiinteään sorbenttiin perustuvissa DAC-prosesseissa tarvitaan suuri määrä lämpöä ja laitteistojen energiatehokkuutta voitaisiin parantaa merkittävästi hyödyntämällä hukkalämpöä lämmönlähteenä. Hukkalämpöä, kuten teollisuuden prosesseista saatavaa matala- tai keskilämpötilaista lämpöä, voitaisiin hyödyntää DAC-prosessien lämmitykseen. Näin voidaan vähentää erillisen lämmöntuotannon tarvetta ja parantaa DAC-laitoksen kokonaisenergiatehokkuutta. Erityisen hyödyllistä hukkalämmön käyttö on silloin, kun lämmön lämpötila ja saatavuus sopivat DAC-prosessin vaatimuksiin. Kiinteään sorbettiin perustuvissa järjestelmissä tarvittava lämpötilataso on n. 80 °C-120 °C, mahdollistaen jo verrattain matalalämpötilaisten hukkalämpövirtojen hyödyntämisen DAC-prosesseissa (Zentou et al. 2025).

3. Hukkalämmön lämpötilan korottaminen, hukkalämmön hyödyntäminen jäähdytyksessä

3.1 Taustaa ja lämpöpumppujen toimintaperiaate

Kuten raportin kuvassa 2 ja 3 esitettiin, suuri osa syntyvästä hukkalämmöstä on matalassa lämpötilassa ja sen suora hyödyntäminen lämpönä passiivisin menetelmin ei ole mahdollista. Tämän vuoksi hukkalämmön hyödyntäminen lämmitykseen vaatii usein lämpötilatason korottamista. Lämpöpumppujen avulla hukkalämmön sisältämää matalalämpöistä hukkaenergiaa voidaan hyödyntää uudelleen korottamalla lämpötila käyttökohteen vaatimalle tasolle. Korotettu lämpö voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa, kiinteistöjen lämmityksessä tai teollisuuden prosesseissa. Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpuilla on yleistynyt viime vuosina erilaisissa sovelluksissa, parantaen järjestelmien energiatehokkuutta ja samalla vähentäen polttoon perustuvien lämmitysmuotojen tarvetta. Erilaisia hukkalämpöä hyödyntäviä lämpöpumppuja onkin saatavilla markkinoilla jo laajasti. Pienempiä hukkalämpövirtoja hyödyntäviä lämpöpumppuja, kuten rakennusten poistoilmaa hyödyntäviä ratkaisuja on laajasti saatavilla ja poistoilmalämpöpumppuja asennettiin Suomessa vuonna 2025 n. 1700 kappaletta (SULPU 2026). Suuret useiden MW kokoluokan teollisuuslämpöä tai kaukolämpöä tuottavat lämpöpumppujärjestelmät ovat myös kehittyneet ja yleistyneet voimakkaasti viime vuosina (Zühlsdorf et al. 2023, Arpagaus et al. 2018).

Lämpöpumput voidaan jaotella niiden toimintaperiaatteen mukaan joko suljetun kierron lämpöpumppuihin tai avoimiin lämpöpumppuihin. Suljetun kierron järjestelmiin kuuluvat tyypilliset kylmäaineiden käyttöön ja kompressoripuristukseen perustuvat lämpöpumput, sekä absorptio/adsorptio koneet. Avoimen kierron lämpöpumput ovat pääasiassa höyryn mekaaniseen (MVR) tai termiseen puristukseen (TVR) perustuvia järjestelmiä. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu hukkalämpöä hyödyntävän suljetun kompressorilämpöpumpun periaatekaavio. Hukkalämpövirrassa oleva lämpö sitoutuu kylmäaineeseen höyrystimessä, muuttaen kylmäaineen olomuodon nesteestä höyryksi. Tämän jälkeen kompressori puristaa kylmäaineen korkeaan lämpötilaan ja paineeseen. Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämmön lämpönieluun (esimerkiksi kaukolämpövesi tai prosessilämpö), lauhtuen takaisin nesteeksi. Korkeassa paineessa oleva nestemäinen kylmäaine paisutetaan paisuntaventtiilissä takaisin matalaan paineeseen ennen höyrystimeen syöttämistä. Koska höyrystimessä lämmönlähde jäähtyy, voidaan samaa laitteistoa käyttää myös jäähdytykseen, esimerkiksi kaukolämmön, että kaukojäähdytyksen yhteistuotannossa.

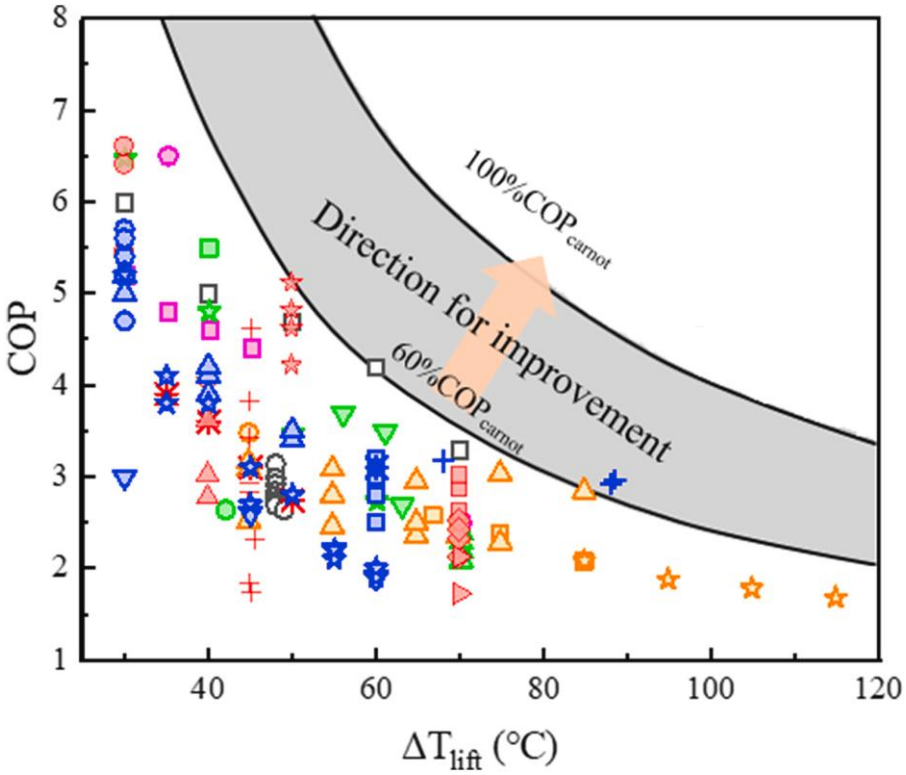


Kuva 6. *Yksinkertaistettu hukkalämpöä hyödyntävän kompressorilämpöpumpun prosessikaavio.*

Lämpöpumppujen hyötysuhdetta kuvataan lämpökertoimella (COP), jolla määritetään tuotettu lämpöteho suhteessa kompressorin kuluttamaan tehoon. Mitä korkeampi COP-arvo laitteistolla saavutetaan, sen energiatehokkaammin lämpöpumppujärjestelmä toimii. Monissa teollisissa sovelluksissa lämpöpumpulta vaadittu lämpötilankorotus on suuri, jolloin myös COP-arvo on matalampi kuin matalilla lämpötilaeroilla toimivissa järjestelmissä. Koska COP-arvo on riippuvainen pääasiassa lämpöpumpun tuottamasta lämpötilannoususta, ei pelkästään vaaditusta tuottolämpötilasta, tehokkuus on riippuvainen myös hyödynnettävän hukkalämpövirran lämpötilatasosta. Lisäksi korkeilla lämpötilannousuilla käytetään tyypillisesti monimutkaisempia prosessikytkentöjä, kuten erilaisia kaskadikytkentöjä, sisäisiä lämmönsiirtimiä, tai ejektoreita COP-arvon kasvattamiseksi. Kuvassa 7 on esitetty lämpöpumpun lämpötilannousun vaikutusta COP-arvoon. Kuvassa eri värit kuvaavat erilaisia prosessikytkentöjä. Modernit korkean lämpötilan lämpöpumput saavuttavat parhaimmillaan n. 50-60 % tehokkuuksia suhteessa lämpötilatasoilla määritettävään teoreettiseen COP-arvoon (Jiang et al. 2022, IEA 2026).

Valitun prosessikytkennän ja kylmäaineen lisäksi lämpöpumpun tehokkuuteen ja toimintaan vaikuttaa valittu kompressoriteknologia. Moderneissa lämpöpumpuissa käytetään pääasiassa syrjäytyskompressoreita (mäntä-, ruuvi-, tai scroll-kompressori), mutta myös kineettisiin keskipakokompressoreihin perustuvia järjestelmiä on nykyään saatavilla, erityisesti suuremman kokoluokan järjestelmissä (IEA 2026). Keskipakokompressoreiden etuna on niiden korkea hyötysuhde, sekä öljyttömät laakerointiratkaisut. Öljyttömyys on merkittävä etu erityisesti korkeilla lämpötiloilla, sillä

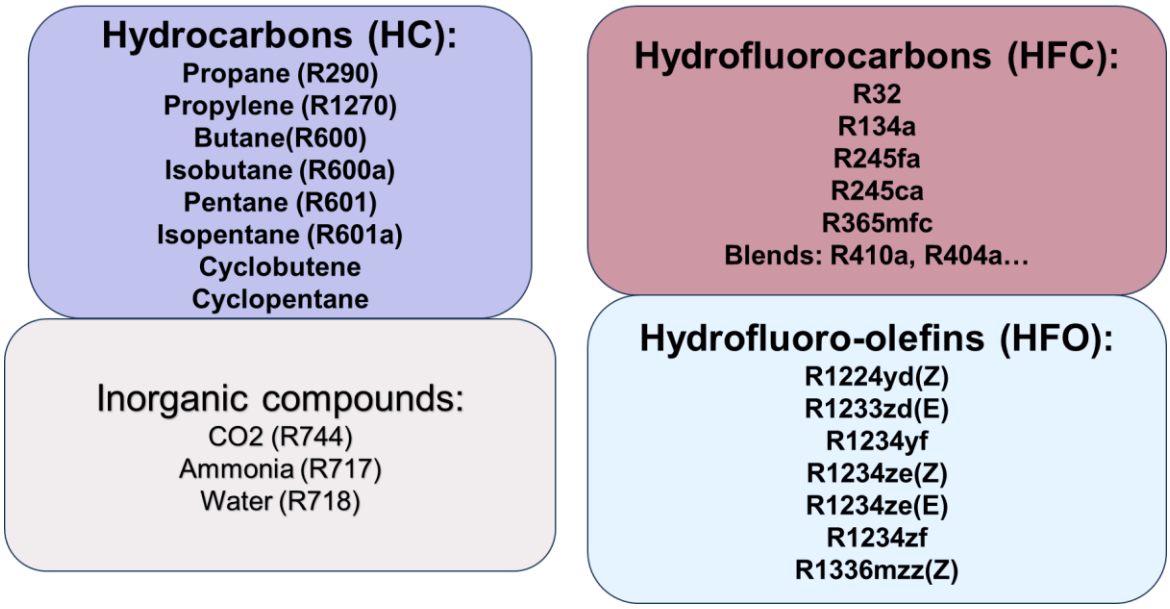
voiteluöljyjen lämpötilankesto voi rajoittaa saavutettavia tuottolämpötiloja ja kompressorin kestävyyttä.



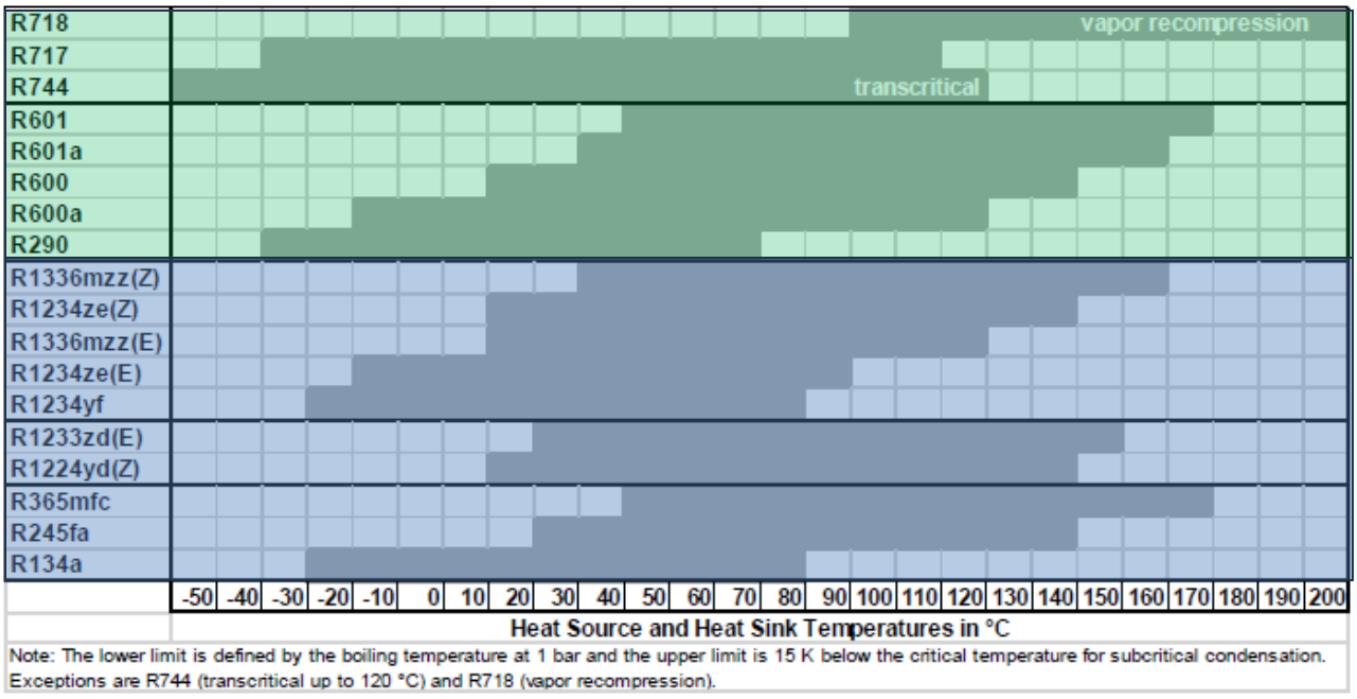
Kuva 7. *Lämpöpumpun lämpötilannoston vaikutus COP-arvoon. Eri värit edustavat erilaisia prosessikytkentöjä*, punainen*: yksiportainen, sininen: parannettu yksiportainen, vihreä: kaksiportainen, musta: prosessissa ejektori, oranssi: kaskadijärjestelmä, pinkki: rinnakkaiset järjestelmät (Jiang et al. 2022).*

3.2 Kylmäaineet

Kylmäaineen valinnalla on merkittävä vaikutus lämpöpumppuprosessin toimintaan, tehokkuuteen, sekä saavutettaviin lämpötilatasoihin. Lämpöpumpuissa käytettävät kylmäaineet voidaan jaotella kahteen pääryhmään: luonnollisiin kylmäaineisiin ja synteettisiin (halogenoituihin) kylmäaineisiin. Tyypillisiä luonnollisia kylmäaineita, joita käytetään suljetuissa lämpöpumpuissa ovat ammoniakki, hiilidioksidi, sekä erilaiset hiilivedyt. Lisäksi vettä käytetään laajasti avoimissa prosesseissa, kuten vesihöyryn mekaaniseen puristukseen (MVR) perustuvissa järjestelmissä. Nykyaikaisissa lämpöpumppujärjestelmissä käytettävät synteettiset kylmäaineet sisältävät laajan joukon erilaisia fluorattuja kaasuja, hiilifluoridien (HFC) ja hydrofluoro-olefiinien (HFO) muodostaessa synteettisten kylmäaineiden kaksi pääjoukkoa. Esimerkkejä kylmäaineista on annettu kuvassa 8 sisältäen aineiden jaottelun eri ryhmiin ja kuvassa 9 on esitetty soveltuva lämpötila-alue erilaisille kylmäaineille. Yksikomponenttisten kylmäaineiden lisäksi käytetään useita R4xx ja R5xx-nimettyjä kylmäaineseoksia.



Kuva 8. *Esimerkkejä kylmäaineista. Vasemmalla puolella olevat kylmäaineet ovat luonnollisia kylmäaineita ja oikealla puolella olevat kylmäaineet ovat synteettisiä kylmäaineita.*



Kuva 9. *Eri kylmäaineiden soveltuvuus erilaisille lämpötilatasoille. Vihreällä värillä oleva laatikko sisältää luonnollisia kylmäaineita ja sininen synteettisiä kylmäaineita (muokattu Zühlsdorf et al. 2023 perusteella).*

Käytetyissä kylmäaineissa on historian saatossa tapahtunut kehitystä ja muutoksia. Tällä hetkellä erityisesti HFC-aineiden käytöstä ollaan asteittain luopumassa EU:n vuonna 2024 voimaan tulleen uuden F-kaasuasetuksen myötä, jossa voimakkaan

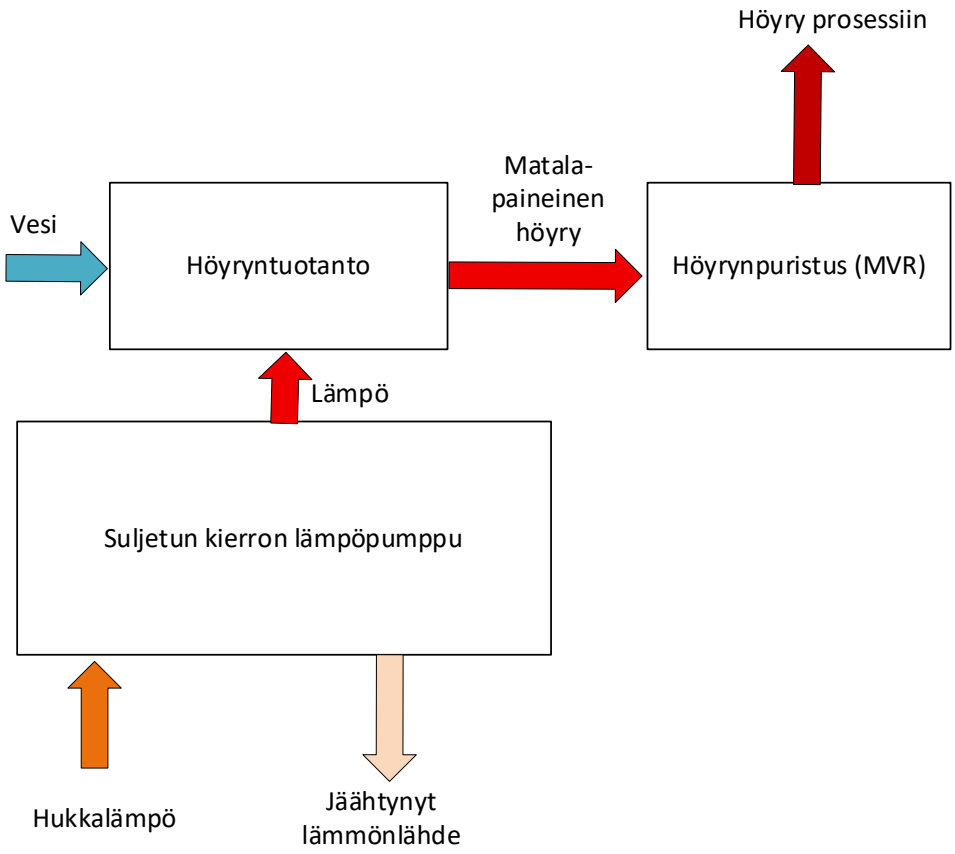
kasvihuonekaasuvaikutuksen kylmäaineiden käyttöä rajoitetaan merkittävästi (EU, 2024). Synteettisiin kylmäaineisiin kuuluvat HFO-aineet eivät kuulu F-kaasuasetuksen rajoitusteen piiriin, sillä niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus on verrattain vähäinen. HFO-aineiden hajoamisen seurauksena on kuitenkin todettu syntyvän ihmisille ja luonnolle haitallisia PFAS-aineita, jotka ovat erittäin pitkään luonnossa säilyviä ns. ikuisuuskemikaaleja. HFO-aineiden merkittävin PFAS-aineeksi luokiteltava hajoamistuote on trifluorietikkahappo (TFA). EU:ssa on tällä hetkellä käynnissä PFAS-aineiden käyttöä rajoittava lainsäädäntöprosessi REACH-kemikaaliasetuksen alla, joka saattaa tulevaisuudessa kieltää/rajoittaa voimakkaasti myös HFO-aineiden käyttöä lämpöpumppujen kylmäaineena (ECHA 2026).

F-kaasuasetuksen jo asettamien rajoitusten ja PFAS-aineille mahdollisesti asetettavien rajoitusten takia lämpöpumppujärjestelmien kehityksessä keskitytään Euroopassa yhä enemmän luonnollisiin kylmäaineisiin, kuten hiilidioksidiin, ammoniakkiin, ja erilaisiin hiilivetyihin kuten propaani, butaani ja pentaani. Hiilidioksidia käytetään jo laajasti esimerkiksi kaupan kylmässä, mutta myös joissakin suurissa lämpöpumpuissa. Hiilidioksidin käytössä tulee huomioida sen vaatimat korkeat painetasot, sekä alhainen kriittinen lämpötila, joka johtaa lämpöpumppukäytössä transkriittiseen prosessiin (osa prosessista ylikriittisessä tilassa). Ammoniakkia käytetään myös jo nyt laajasti esimerkiksi teollisuuden kylmän sovelluksissa, sekä suurissa lämpöpumpuissa. Ammoniakin käytön haittapuolena on sen lievä syttyvyys ja myrkyllisyys. Erilaisiin hiilivetyihin, kuten propaaniin tai butaanin perustuvia lämpöpumppuja on myös jo saatavilla ja näihin liittyvä kehitystyö on aktiivista. Hiilivetyjen käytön haittapuolena on niiden korkea syttyvyys, joka täytyy huomioida laitteen sijoittelussa ja turvallisuudessa. (Bantillo et al. 2024, IEA 2026, EN 378 standard).

3.3 Höyryä tuottavat lämpöpumput

Teollisuuden prosessihöyryä tuottavia lämpöpumppuja on kehitetty viime vuosina aktiivisesti. Järjestelmät voivat olla avoimia, pääasiassa vesihöyryn puristamiseen perustuvia järjestelmiä (MVR), suljettuja kylmäaineeseen perustuvia järjestelmiä, tai näiden yhdistelmiä, joissa ensin kylmäaineeseen perustuvalla suljetulla järjestelmällä tuotetaan vedestä matalapaineista höyryä, joka puristetaan edelleen korkeampaan paineeseen ja lämpötilaan MVR järjestelmällä. Vesihöyryn puristamiseen on käytössä erilaisia kompressoritekniikoita ja vesihöyryä voidaan puristaa esimerkiksi keskipakokompressoreilla, Root-puhaltimilla tai ruuvikompressorilla. Kun suljetulla kylmäainekiertoon perustuvalla järjestelmällä tehdään prosessihöyryä, järjestelmä voidaan toteuttaa kolmella erilaisella periaatteella; 1) lämpöpumpun lauhduttimessa höyrystetään suoraan vettä halutussa höyryn käyttöpaineessa, 2) vettä höyrystetään lämpöpumpun höyrystimessä n. 1 bar paineessa ja höyry puristetaan haluttuun käyttöpaineeseen MVR-järjestelmässä tai 3) paineistettua vettä kuumennetaan lämpöpumpun lauhduttimessa kuitenkaan höyrystämättä vettä. Tämän jälkeen

paineistettu vesi paisutetaan matalampaan paineeseen, jolloin osa vedestä höyrystyy (ns. flash-höyry). Kuvassa 10 on esitetty suljetun lämpöpumppukierron ja MVR järjestelmän periaate höyryn tuottamiseksi.



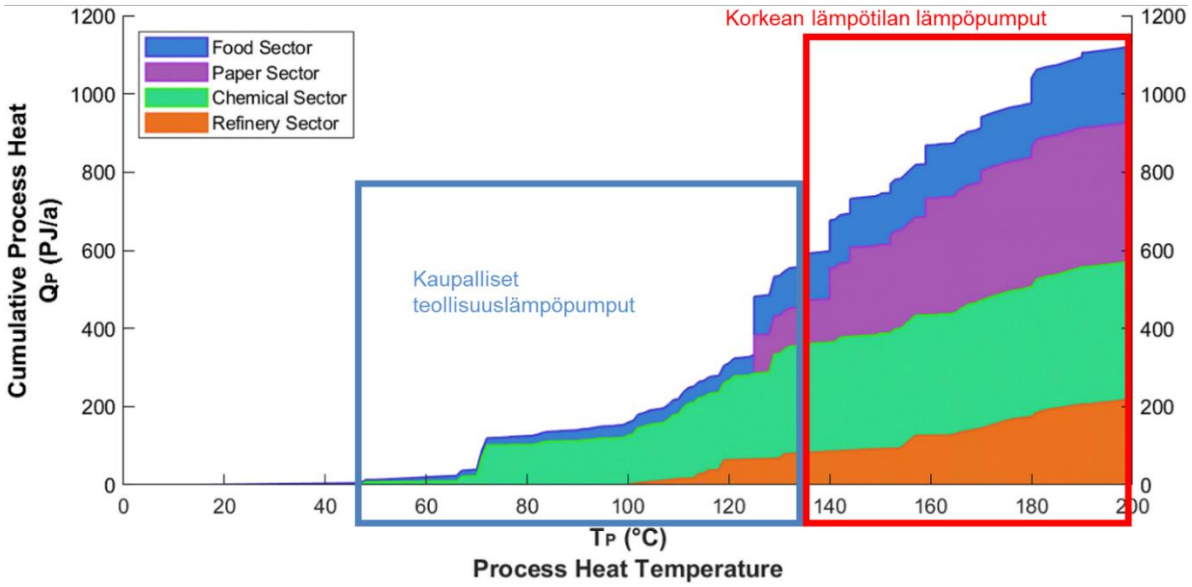
Kuva 10. *Yksinkertaistettu periaatekuva suljetun kompressorilämpöpumpun ja vesihöyryn puristuksen yhdistämisestä.*

Prosessihöyryä tuottavia lämpöpumppuja on tutkittu ja kehitetty paljon viime vuosina, sillä ne mahdollistavat suhteellisen matalapaineisten höyrynpainetasojen (≈ 1-5 bar) tuottamisen teollisuuden prosesseihin hyödyntäen syntyvää hukkalämpöä ja korvaten polttoon perustuvan höyryntuotannon tarvetta (Klute et al. 2024). Esimerkiksi BASF rakentaa Saksan Ludwigshafenin tehtaalleen 50 MW tehoista höyrylämpöpumppua, jolla tehtaan hukkalämmöstä voidaan tuottaa prosessihöyryä, samalla korvaten tehtaan fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa höyryntuotantoa (BASF 2024). Suomessa esimerkiksi Tervakoskella sijaitseva Delfortin paperitehdas on ottanut vuonna 2026 käyttöön tehtaan hukkalämpöjä hyödyntävän, teholtaan 13 MW höyryä tuottavan lämpöpumppulaitoksen (Tekniikka & Talous, 2026).

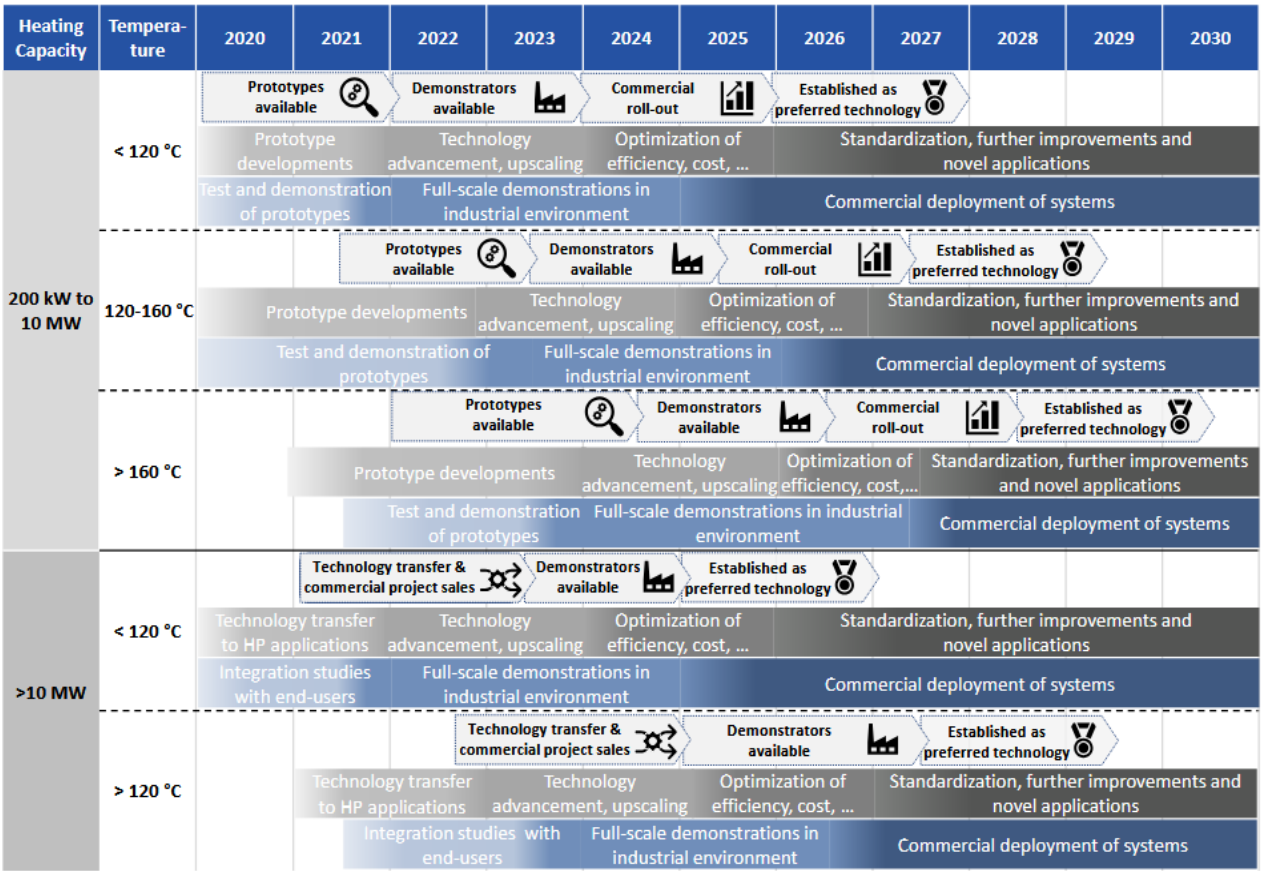
3.4 Teolliset ja korkean lämpötilan lämpöpumput, state-of-the-art

IEA:n käynnissä olevassa kansainvälisessä yhteisprojektissa ”Project 68 Industrial High-Temperature Heat Pumps” (IEA, 2026) ja tätä edeltäneessä, vuosina 2021–2023

toteutetussa IEA:n projektissa 58 on selvitetty kattavasti teollisten lämpöpumppujen teknologiaa ja kehitystä, sekä kerätty esimerkkejä lämpöpumppujen integroinnista eri teollisuuden aloille. Selvitysten perusteella nykyiset lämpöpumppujärjestelmät pääsevät jopa yli 200 °C tuottolämpötiloihin, mutta pääosa markkinoilla olevista teollisista lämpöpumpuista pystyy tuottamaan noin 130 °C - 150 °C tuottolämpötiloja. Marina et al. (2021) tutkimuksessa selvitettiin kattavasti alle 200 °C prosessilämmön tarvetta Euroopan neljässä energiaintensiivisellä teollisuuden alalla ja lämmöntarve eri teollisuuden sektoreilla on esitetty kuvassa 11. Korkean lämpötilan lämpöpumput pystyisivät kattamaan teknisestä näkökulmasta jo kattavasti kuvaan sinisellä merkityn lämmöntarpeen. Myös yli 150 °C lämmölle on teollisuudessa merkittävää tarvetta, esimerkiksi prosessihöyrynä. Kehitteillä ja demonstraatioasteella olevat korkean lämpötilan lämpöpumput sekä yhdistetyt lämpöpumppu ja MVR-ratkaisut pystyisivät kattamaan lämmöntarvetta 200 °C saakka ja jopa korkeampia lämmöntarpeita tulevaisuudessa (merkitty kuvaan punaisella). Kuvassa 12 on esitetty tarkemmin korkean lämpötilan lämpöpumppujen ennakoitua kehitystä kohti vuotta 2030 (Zühlsdorf et al. 2023).

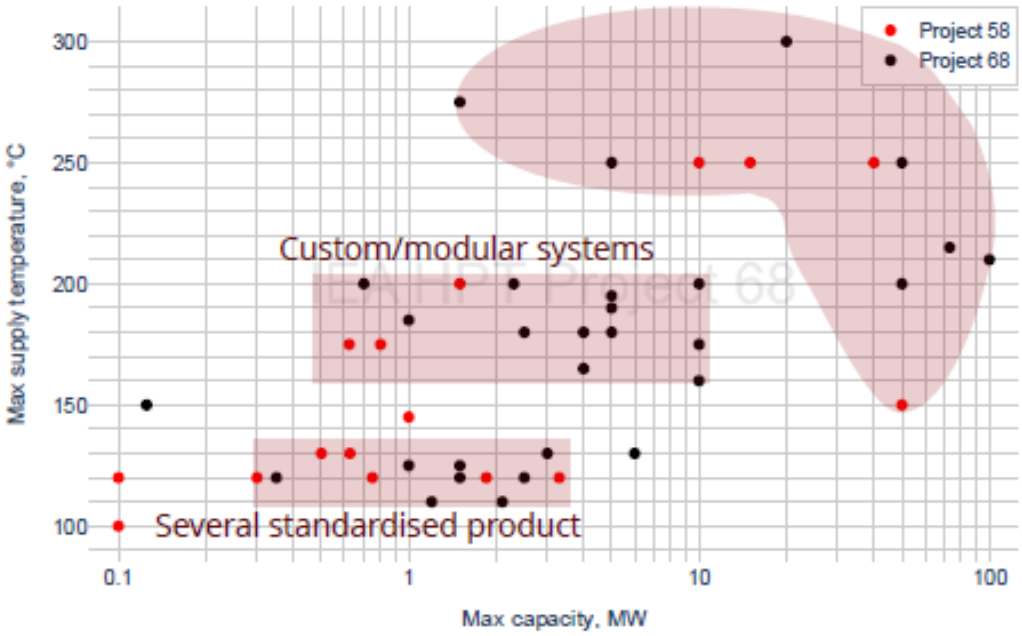


Kuva 11. *Alle 200 °C teollisuuslämmön tarve Euroopassa valituilla teollisuuden aloilla (muokattu Marina et al. 2021 kuvan perusteella).*



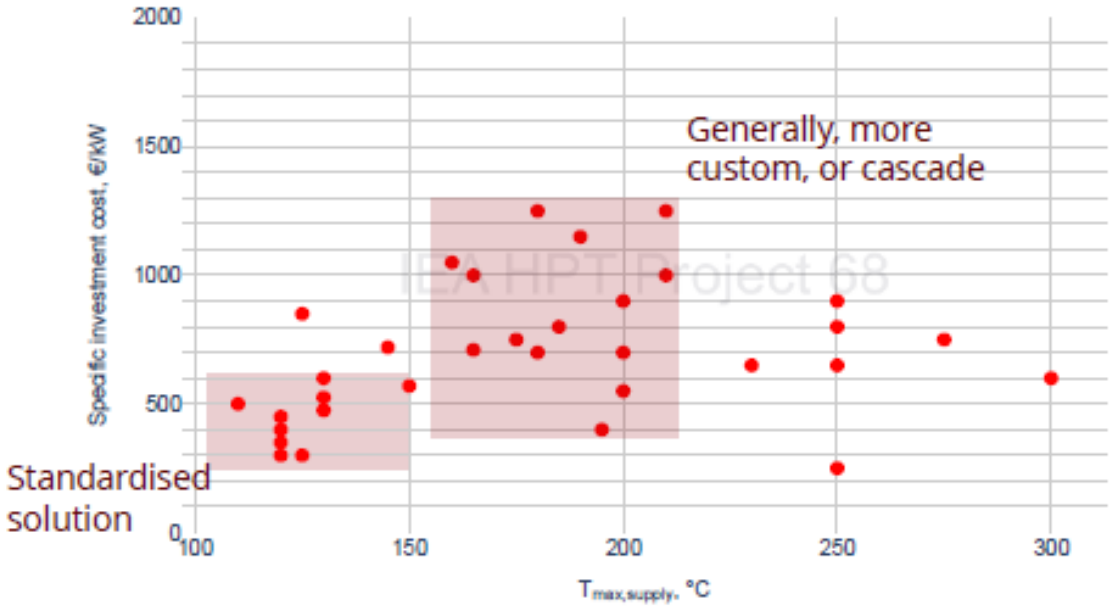
Kuva 12. *Korkean lämpötilan lämpöpumppujen teknologian ennakoitu kehitys vuoteen 2030 saakka (Zühlsdorf et al. 2023)*

Kuvassa 13 on esitetty kerättyä dataa yli *100* °C tuottolämpötiloihin pääsevistä teollisten lämpöpumppujen teholuokista ja kapasiteeteista. Kuvasta huomataan, että suurin osa lämpöpumpuista on lämpöteholtaan alle 10 MW, mutta myös lämpöteholtaan hyvin suuria lämpöpumppuja on jo markkinoilla. Noin 130 °C tuottolämpötiloihin on jo olemassa useita lämpöpumppuvalmistajia ja ratkaisuja, mutta myös n. 200 °C tuottolämpötiloihin yltäviä ratkaisuja on saatavilla. Huomionarvoista on se, että kuvassa mustat pisteet kuvaavat nyt käynnissä olevan IEA:n project 68 aikana dataan lisättyjä järjestelmiä, kun punaiset pisteet kuvaavat puolestaan vuosina 2021-2023 käynnissä olleen projektin aikana kerättyä dataa. Datassa on huomionarvoista viime vuosina tapahtunut kehitys erityisesti 150 °C- 200 °C tuottolämpötiloihin yltävissä järjestelmissä, mutta myös hyvin korkeisiin lämpötiloihin tai hyvin suuriin tehoihin yltävissä järjestelmissä.



Kuva 13. *Teollisten lämpöpumppujen teholuokkia ja maksimituottolämpötiloja (Andersen et al. 2026)*

Kuvassa 14 on esitetty lämpöpumppujärjestelmien ominaisinvestointihintoja (€/kW$_{lämpöä}$). Datasta huomataan, että ominaishinnat vaihtelevat voimakkaasti eri järjestelmien välillä, vaihdellen noin 200 €/kW yli 1000 €/kW. Suuri vaihtelu selittynee erilaisilla teknisillä ratkaisuilla, sekä ratkaisujen modulaarisuudella. Lisäksi osassa projekteissa on otettu huomioon vain laitteiston hinta, kun osa hintadatasta sisältää laitteiston kokonaistoimituksen. (Andersen et al. 2026)



Kuva 14. *Teollisten lämpöpumppujen ominaisinvestointihintoja ja maksimituottolämpötiloja (Andersen et al. 2026)*

Taulukossa 1 on esitetty joitakin teollisten lämpöpumppujen valmistajia, sekä annettu tietoa tuottolämpötiloista, kapasiteeteista, kylmäaineesta ja käytetystä kompressoriteknologiasta. Taulukossa ei ole esitetty suomalaisten lämpöpumppuvalmistajien teknologioita, mutta Suomessa teollisia- ja korkean lämpötilan lämpöpumppuja kehittävät ja valmistavat ainakin Calefa (https://calefa.fi/), Oilon (https://oilon.com/fi/), Tekojää (https://www.tekojaa.fi/), sekä Upheat (https://upheat.com/).

Suomessa teollisia lämpöpumppuja on käytössä tai otettu viime aikoina käyttöön eri teollisuuden prosesseissa. Viimeaikaisia esimerkkejä löytyy mm. metsäteollisuudesta (Tekniikka & talous 2026), lääketeollisuudesta (Calefa, 2025) sekä elintarviketeollisuudesta (Nevel 2026). Lisäksi Suomen kaukolämmöstä merkittävä osuus (n. 20 %) tuotetaan nykyisin lämpöpumpuilla ja hukkalämmöistä (Energiateollisuus 2024). Suomen suurissa kaupungeissa jäteveden puhdistamoiden jälkeisen veden lämmön hyödyntäminen ja kaukolämmön sekä kaukokylmän tuottaminen lämpöpumpuilla on yleistä. Esimerkkejä löytyy mm. Helsingistä (Helen 2023), Turusta (Turun Sanomat, 2003), Espoosta (Fortum, 2021) ja Seinäjoelta (Seinäjoen Energia 2024).

LUT University

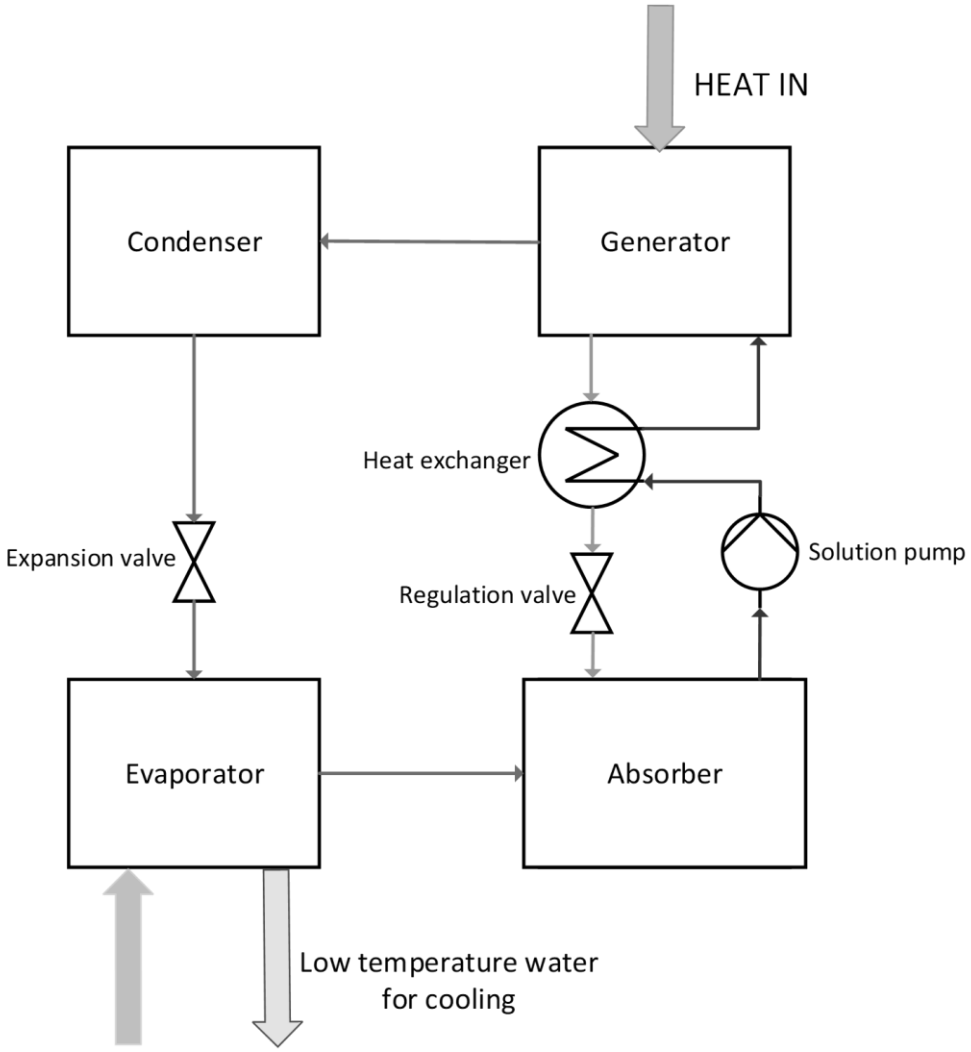
Taulukko 1. *Teollisten korkean lämpöpumppujen valmistajia sekä teknisiä tietoja (IEA,2026)*

	Supplier	Compressor type	Working fluid	Capacity [MW]	Max supply temperature [°C]	TRL	From Project 58, Apr. 2025
<120 °C	Dutek (HT heat pump)	Reciprocating, screw	R600a	0.025-1.2	110	9	
	Johnson Controls – Sabroe (HyePAC)	Piston	R717/R718	0.5-2.1	110	9	
	Mayekawa (Eco Circuit 100)	Reciprocating	R1234ze(E)	0.1	100	8-9	•
<140 °C	COMBITHERM	Screw	R1233zd	0.3-3.3	120	9	•
	Dutek (XT heat pump)	Screw	R600	0.5-3	130	9	
	Fuji Electric	Reciprocating	R245fa	0.03-0.3	120	9	•
	GEA (CO_2 heat pump)	Reciprocating	R744	0.1-6	130	9	
	Johnson Controls – Sabroe (HitemHP)	Reciprocating	R600, R600a	0.3-1	125	9	
	KOBELCO (SGH120)	Screw	R245fa	0.37-1.85	120	9	•
	Mayekawa (Eco Sirocco)	Reciprocating	R744	0.1	120	9	•
	MHI Thermal Systems	Turbo compressor (centrifugal)	R134a	0.627	130	9	•
	Ochsner	Screw	R1233zd	0.5	130	9	•
	HECK Kältetechnik	Piston, screw	HFOs, HFCs	0.025-1.5	120	7	
	Mayekawa Europe (HS-compressor)	Piston	R600	0.75	120	7	•
	Taeyang Electric	Turbo compressor (centrifugal)	R245fa	0.3-0.35	120	7	
	THERMODRAFT	Screw with vapor injection	HFOs, HFCs	0.1-1.5	125	7	
	AF Energy	Reciprocating, screw	R1234ze(E), R1233zd	0.02	120	6	
	Emerson	Reciprocating + Reciprocating	R245fa, R410a	0.03	120	6	•
<160 °C	Everllence (CO_2 heat pump)	Turbo compressor (centrifugal)	R744	10-50	150	9	•
	Tocircle Industries (MVR1000)	Rotary positive displacement	R718	0.4-2.5	153	7	
	Pars Makina	Rotary double-hinged arc vane compressor	R1233zd(E)	0.025-0.125	150	6	
	RANK	Screw	HFOs	>0.5	150	6-9	
	Mayekawa Europe (FC-compressor)	Screw	R601	1	145	5	•
<200 °C	Solid Energy	Screw	Hydrocarbons	>0.2	165	9	
	AGO Energie & Anlagen	Piston, screw	R717/R718	1-10	160	8-9	
	Aneo Industry	Piston, screw (R717); screw, turbo (R718)	R717, R718	1-5	190	8-9	
	AtmosZero	Turbocompressor (centrifugal)	R1234ze(E), R515B, R1233zd(E)	<1	185	8	
	GEA (Ammonia steam generator)	Piston, screw (R717); screw, turbo (R718)	R717, R718	1.2-10	175	8-9	
	SPH Sustainable Process Heat	Piston	Hydrocarbons, HFOs	0.3-2.5	180	8-9	
	Tocircle Industries (MVR400)	Rotary positive displacement	R718	0.4-2.5	180	7	
	SRM	Screw	R718	1-4	165	6	
	WSE-Turbo	Turbo compressor (centrifugal)	R718	0.5-5	195	4-6	

3.5 Absorptiolämpöpumput ja jäähdyttimet

Sorptio(Absorptio/adsorptio)-järjestelmät perustuvat termodynaamiseen kiertoprosessiin, jossa kylmäenergiaa tai lämpöä tuotetaan käyttämällä ulkoista lämpöenergiaa mekaanisen kompressorin sijaan. Järjestelmän pääasiallisena etuna on se että sähkön- tai ulkoisen mekaanisen energian tarve on huomattavasti pienempi kuin suljetuissa kompressori lämpöpumpuissa tai kylmäkoneissa. Järjestelmissä käytetään joko kahden nesteen seosta (absorptio), tai kiinteää ja nestemäistä ainetta (adsorptio). Monissa teollisuuden prosesseissa ja esimerkiksi laivoissa jäähdytysenergialle on merkittävää tarvetta, kun taas kaikelle syntyvälle hukkalämmölle ei välttämättä ole suoria hyödyntämiskohteita. Absorptiojäähdytyksen keskeinen etu hukkalämmön hyödyntämisessä onkin järjestelmän kyky tuottaa jäähdytystä verrattain matalalämpöisistä lämmönlähteistä, kuten teollisuusprosessien ylijäämälämmöstä, moottorien jäähdytysvesistä tai pakokaasuista, pienentäen jäähdytykseen käytettävän sähkön tain muun energian tarvetta. (Brückner et al .2015, Kuchmacz et al. 2019)

Absoriptiojäähdyttimen periaatteellinen prosessikaavio, sekä järjestelmän pääkomponentit on esitetty kuvassa 15. Absorptio- ja adsorptiojärjestelmissä mekaanisen kompressorin korvaa ns. terminen kompressori, joka muodostuu absorberista, liuospumpusta, sekä keittimestä (generator). Absorptiojärjestelmissä yleisimmät työaineparit ovat litiumbromidi (LiBr) – vesi (H_2O) tai ammoniakki (NH_3)–H_2O. Valitun aineparin ominaisuudet määrittävät järjestelmän soveltuvuuden erilaisiin käyttökohteisiin. Järjestelmän toimintaperiaate on seuraava: keittimessä ulkoisen lämmönlähteen avulla toinen työaineista höyrystyy toisen pysyessä nesteenä. Höyrystynyt aine, esimerkiksi ammoniakki (NH_3)–H_2O järjestelmissä ohjataan lauhduttimelle, jossa lämpöä luovutetaan lämpönieluun ja aine lauhtuu takaisin nesteeksi. Tämän jälkeen aine paisuu kaksifaasialueelle paisuntaventtiilissä, kuten tavallisissa kylmäkoneissa ja lämpöpumpuissa. Paisuntaventtiilin jälkeen prosessiin sidotaan lämpöä jäähdytettävästä kohteesta, minkä jälkeen se absorboituu takaisin kahden aineen liuokseen imeyttimessä (absorber). Tämän jälkeen liuos pumpataan imeyttimestä takaisin keittimeen, jossa ulkoinen lämmönlähde, esimerkiksi teollisuuden hukkalämpö, höyrystää kylmäaineen liuoksesta. Absorptiojärjestelmät voivat hyödyntää verrattain matalalämpöisiä hukkalämpövirtoja (n. 70–120 °C) jäähdytyksen tekemiseen, mutta niiden kilpailukykyä muihin jäähdytysjärjestelmiin vähentää mm. verrattain alhainen COP-arvo, suuri fyysinen koko ja kompressorilaitteita korkeampi hinta. (Brückner et al .2015, Kuchmacz et al. 2019, Bäckström, 2022)



Kuva 15. *Absorptiojäähdyttimen periaatteellinen prosessikaavio*

Absorptiojärjestelmiä voidaan käyttää jäähdytyksen lisäksi myös lämpöpumppuna. Toimintaperiaate lämpöpumppukäytössä on seuraava: höyrystimessä lämpöä otetaan matalalämpöisestä lämmönlähteestä ja keittimeen tuodaan korkeassa lämpötilassa oleva lämmönlähde. Tällöin saadaan tuotettua ja otettua talteen suuri määrä keskimääräisessä lämpötilassa olevaa lämpöä laitteen lauhduttimelta. Tuotettu lämpö voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa tai muuna prosessilämpönä.

3.6 Muita teknologioita hukkalämmön lämpötilan korottamiseksi

3.6.1 Hybridilämpöpumput

Kirjallisuudessa nousee esiin tulevaisuuden ratkaisuiksi myös useita uusia ja kehitysasteella olevia lämpöpumpputeknologioita, joita ei ole vielä kaupallisesti laajasti saatavilla. Yksi teknologioista on erilaiset hybridijärjestelmät, joissa yhdistetään sekä suljettu kompressorilämpöpumppu ja absorptioteknologia. Tämän kaltaiset

lämpöpumput ovat vielä kehitysasteella, mutta niillä voitaisiin saavuttaa korkeita lämpötilannousuja korkealla COP-arvolla. Esimerkiksi Su et al. (2023) tekemässä tutkimuksessa, hybridijärjestelmällä voitiin saavuttaa yli 4 COP-arvoja, kun korotetaan 50 °C hukkalämpöä, 110-130 °C prosessiveden tuottamiseen. Koska järjestelmä yhdistää kaksi lämpöpumpputeknologiaa toisiinsa, kyseiset järjestelmät ovat kuitenkin monimutkaisia ja investoinniltaan kalliita.

3.6.2 Käänteinen Brayton

Lisäksi erittäin korkean lämpötilan (yli 200 °C) lämpötilojen tuottamiseen on tutkittu ja kehitetty käänteiseen kaasuturbiiniprosessiin (Brayton) perustuvia järjestelmiä. Järjestelmä voidaan toteuttaa avoimena tai suljettuna ja siinä käytetään työaineena tyypillisesti ilmaa. Prosessissa ilman lämpötila kasvaa kompressoripuristuksessa ja jäähtyy paisunnassa. Tällaisilla järjestelmillä voitaisiin saavuttaa jopa yli 300 °C tuottolämpötiloja (Kim et al. 2024) ja ne soveltuvat hyvin esimerkiksi kuuman prosessi- tai kuivausilman tuottamiseen.

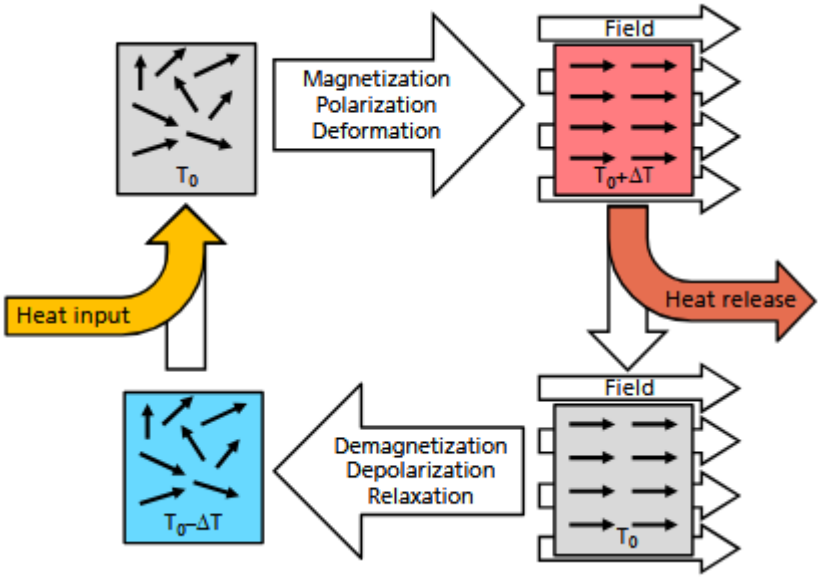
3.6.3 Käänteinen Stirling

Stirling-teknologiaan perustuvat ratkaisut ovat yksi tekninen vaihtoehto myös lämpöpumppukäytössä. Stirling-moottoreita käytetään pääasiassa voimaprosessina mutta toimintaperiaate käänteisenä soveltuu myös jäähdytykseen, tai lämmöntuottoon. Stirling-moottorien toimintaperiaatetta sähköntuotannossa esitellään lyhyesti myöhemmin tässä raportissa. Minela et al. (2024) tutkivat Stirling-kiertoon perustuvien lämpöpumppujen potentiaalia erilaisissa lämmityssovelluksissa. Tutkimuksen mukaan niihin liittyy edelleen useita haasteita ja Stirling-lämpöpumppuja koskeva tutkimus on toistaiseksi vähäistä. Erityisiksi jatkokehitystarpeiksi tunnistettiin sopivan rakenteen valinta, sopivan työaineen valinta, termodynaaminen mallinnus, rakenteen saaminen kompaktiksi ja kustannusten pienentäminen, sekä tehokkaat ohjausjärjestelmät. Kaupallisia Stirling-teknologiaan perustuvia korkean lämpötilan lämpöpumppuja on kehittänyt mm. norjalainen Olvondo (https://olvondotech.no/the-technology/).

3.6.4 Kalorimetriset lämpöpumput ja jäähdyttimet

Kehitteillä on myös ns. kalorimetrisiä jäähdyttimiä ja lämpöpumppulaitteita. Kalorimetriset järjestelmät eroavat muista järjestelmistä erityisesti siinä, että ne eivät tarvitse toimiakseen kiertoprosessia tai prosessia ajavaa kompressoria. Tällaisen lämpöpumpun tai jäähdyttimen toiminta perustuu magneettikentän hyödyntämiseen (materiaalin magnetointiin ja demagnetointiin) sekä kiinteisiin magnetokaloristen materiaalien käyttöön. Järjestelmässä kiinteä aine saadaan kuumenemaan tai jäähtymään eli muuttamaan lämpötilaansa magneettikentän avulla. Magnetokaloristen järjestelmien toimintaperiaate on vahvistettu kokeellisesti, mutta ne ovat edelleen kehitysasteella. Tulevaisuudessa teknologian kehittyessä magnetokaloriset järjestelmät voisivat korvata kylmäaineisiin perustuvia lämmitys ja jäähdytysratkaisuja. Kuvassa 16

on kuvattu kalorimetrisen järjestelmän toimintaperiaate. (Lyubina 2017, Kitanowski 2020)



Kuva 16. *Kalorimetrisen lämpöpumpun toimintaperiaate. Järjestelmää voidaan käyttää joko lämpöpumppuna tai jäähdytykseen (Fraunhofer IPM).*

4. Hukkalämmön muuntaminen sähköksi

Hukkalämmön muuntaminen sähköksi on kiinnostava vaihtoehto erityisesti silloin kun hukkalämmölle ei löydy käyttökohteita lämpönä ja mikäli sähkön hinta on korkea. Hukkalämmön muuntamiseksi sähköksi on kehitetty erilaisia teknologioita, joista osa teknologioista on kaupallisesti jo laajasti saatavilla, kun taas osa teknologioista on vielä kehitysasteella. Taulukossa 2 on esitetty erilaisia lämmön sähköksi muuntoon soveltuvia teknologioita, sekä niiden tyypillisiä lämpötilatasoja ja teholuokkia. Taulukossa esitetyistä teknologioista perinteinen Rankine-prosessi, eli höyryturbiiniprosessi on vakiintunutta teknologiaa sellaisissa sovelluksissa, joissa lämpötila, sekä hukkalämmöstä saatava teho ovat riittävän korkeita. Esimerkkisovelluksia ovat kaasuturbiinien kuumien pakokaasujen ja muiden prosessien kuumien savukaasuvirtojen lämmön hyödyntäminen (kombiprosessit). Höyryturbiinilaitteiston tehokas toiminta vaatii vähintään n. 1 MW sähkötehon, sekä vähintään 300 °C hukkalämmönlämpötilan. Koska tällaisia vielä hyödyntämättömiä hukkalämpökohteita on olemassa melko vähän, esitellään raportissa tarkemmin muita hukkalämmöstä sähköksi teknologioita.

Taulukko 2. Hukkalämmön sähköksi muuntoon soveltuvia teknologioita ja niiden soveltuvuus eri lämpötilatasoille, sekä tyypillinen teholuokka.

Teknologia	Tyypillinen hukkalämmön lämpötila	Tyypillinen teholuokka
Höyryturbiiniprosessi	> 300 °C	> 1MW
ORC	80 - 350 °C	muutamista kW - useisiin MW
Kalina	> 200 °C	n. 100 kW –useisiin MW
Stirling	Korkea	Kymmeniä kW
Ylikriittiset CO2-prosessit	> 300 °C	Useita MW
TEG	Soveltuu erilaisille lämpötiloille	W muutamiin kW

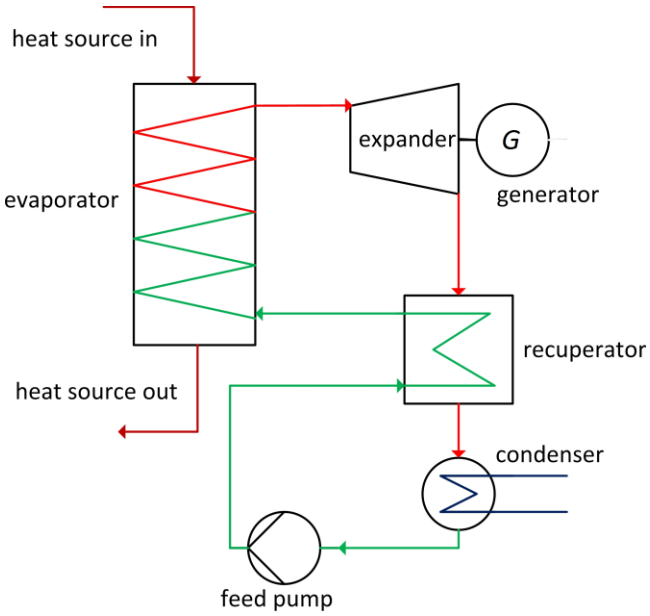
4.1 Organic Rankine Cycle (ORC)

Organic Rankine Cycle (ORC) teknologia perustuu termodynaamiseen energianmuuntoprosessiin, jolla voidaan muuntaa hukkalämpöä sähköksi. ORC-prosessit ovat tällä hetkellä laajimmin käytössä oleva teknologia hukkalämmön muuntamiseksi sähköksi, mutta sitä voidaan käyttää myös muissa sovelluksissa. ORC-

prosessit ovat erityisen kilpailukykyisiä silloin, kun prosessin teho tai lämpötilataso eivät ole riittäviä vesihöyryllä toimivien turbiiniprosessin käyttämiseksi. ORC-prosesseja käytettään myös monissa geotermisissä voimaloissa, pienissä CHP biomassavoimaloissa ja mm. joissakin keskittäviä keräinpeilejä käyttävissä aurinkovoimaloissa. Vuonna 2023 tehdyssä selvityksessä tunnistettiin maailmanlaajuisesti yli 2900 ORC-voimalaitosprojektia yhteensä yli 30 teknologiatoimittajalta (Wieland et al. 2023).

Kuten perinteiset höyryvoimalat, myös ORC-prosessi perustuu Rankine-kiertoon ja kiertoaineen faasimuutokseen, mutta prosessissa käytetään veden sijasta jotain orgaanista työainetta. ORC-prosesseissa käytetään myös paljon samankaltaisia teknisiä ratkaisuja ja työaineita kuin lämpöpumpuissa. ORC-prosesseissa käytettävät työaineet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: 1) hiilivedyt, 2) synteettiset (fluoratut) aineet, ja 3) siloksaanit eli piiöljyt. (Colonna et al. 2015, Lecompte et al. 2015, Wieland et al. 2023).

ORC-prosessien toimintaperiaate on seuraava: hukkalämpö tai muu lämmönlähde lämmittää paineistettua nestemäistä kiertoainetta höyrystimessä, höyrystäen aineen kaasuksi. Höyrystynyt kiertoaine paisutetaan turbiinissa, tuottaen mekaanista työtä. Turbiini puolestaan pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. Turbiini voi olla kineettinen turbiini, kuten keskipako tai aksiaaliturbiini, tai syrjäytysperiaatteella toimiva paisutin, kuten scroll- tai ruuviturbiini. Turbiinin jälkeen höyry lauhtuu lauhduttimessa takaisin nesteeksi ja syöttöpumppu kierrättää nesteen uudelleen höyrystimeen. Suurin osa orgaanisista kiertoaineista pysyy tulistetun höyryn alueella turbiinipaisunnassa, jonka vuoksi turbiinilta poistuvalla lämmöllä voidaan esilämmittää höyrystimeen menevää nestettä lisäämällä prosessiin ylimääräinen lämmönsiirrin, rekuperaattori. Kuvassa 17 on esitetty rekuperaattorilla varustetun ORC-prosessin periaatekaavio.



Kuva 17. Rekuperaattorilla varustetun ORC-prosessin periaatekaavio. Punainen esittää kaasumaista kiertoainetta ja vihreä nestemäistä kiertoainetta.

ORC-prosessi muodostaa suljetun kierron, joka toimii tehokkaasti myös suhteellisen matalissa lämpötiloissa, minkä vuoksi ORC soveltuu hyvin teollisuuden hukkalämmön, moottorien ja geotermisten lähteiden lämmön hyödyntämiseen. Erilaisille lämpötilatasoille ja valmistajakohtaisesti käytetään erilaisia työaineita, ja optimaalinen kiertoaine valitaan prosessin tehon, lämpötilatasojen ja käyttökohteen perusteella. Perusperiaate sopivan työaineen valinnassa on, että korkean kriittisen lämpötilan fluidit (esimerkiksi syklopentaani ja tolueeni, tai erilaiset piiöljyt, kuten MDM tai MM) ovat tehokkaampia korkean lämpötilan sovelluksissa ja matalamman kriittisen lämpötilan omaavat fluidit (esimerkiksi pentaani ja butaani, monet HFO-aineet) sopivat paremmin matalille lämpötilatasoille. Lisäksi työaineen valintaan vaikuttavat muut termodynaamiset ominaisuudet kuten massavirta, sekä fluidin tiheys ja painetasot. Lisäksi työaineen myrkyllisyys, syttyvyys, hinta ja yhteensopivuus erilaisten materiaalien kanssa tulee ottaa huomioon sopivan työaineen valinnassa, sekä ORC-laitoksen käyttöturvallisuudessa. Lisäksi kuten lämpöpumpuissa ja kylmäkoneissa, lainsäädäntö, kuten EU:n uudistettu F-kaasuasetus (EU 2024) ja mahdollisesti voimaan tulevat rajoitukset PFAS-aineille (ECHA 2026) voivat vaikuttaa tulevaisuudessa ORC-voimaloissa käytettäviin työaineisiin.

ORC prosessit soveltuvat erilaisille lämpötilatasoille ja tyypillinen lämpötila on alle 100 °C hukkalämmöstä jopa yli 400 °C hukkalämpöön. Hieman alle 100 °C hukkalämpöä hyödyntäviä ORC-voimaloita on jo käytössä mm. laivoissa ja joissain teollisuusprosesseissa, mutta teknologian kehitys hyödyntämään yhä matalampia lämpötilatasoja mahdollistaisi ORC-teknologian hyödyntämisen esimerkiksi datakeskuksissa. Erittäin korkeita lämpötiloja hyödynnettäessä järjestelmässä käytetään tyypillisesti lämmönkeruussa välipiiriä, joka suojelee työainetta altistumasta

liian korkeille lämpötiloilla (yli 300-350 °C) ja termiseltä hajoamiselta. Erillistä lämmönkeruupiiriä voidaan hyödyntää myös silloin, jos lämpöä kerätään esimerkiksi useasta eri hukkalämpövirrasta hyödynnettäväksi yhdelle ORC-laitokselle. Voimaprosessien toimintaperiaatteen mukaisesti sähköntuotannon hyötysuhde kasvaa lämpötilaerojen kasvaessa. Hukkalämmön lämpötilatason lisäksi myös prosessin jäähdyttämiseen käytettävän fluidin lämpötila vaikuttaa merkittävästi prosessin sähköntuottohyötysuhteeseen. ORC prosesseilla päästään todellisessa sähköntuotanto hyötysuhteessa noin 50 % teoreettisen Carnot-hyötysuhteen tehokkuudesta. n. 100 °C hukkalämpöä hyödynnettäessä, sähköntuottohyötysuhde on tyypillisesti alle 10 % kun taas kuumemmilla lämmönlähteillä ja käytettäessä matalalämpötilaista jäähdytettä lauhduttimessa on mahdollista päästä n. 20-25 % sähköntuottohyötysuhteisiin (Colonna et al. 2015, Lecompte et al. 2015, Uusitalo et al. 2018, Wieland et al. 2023)

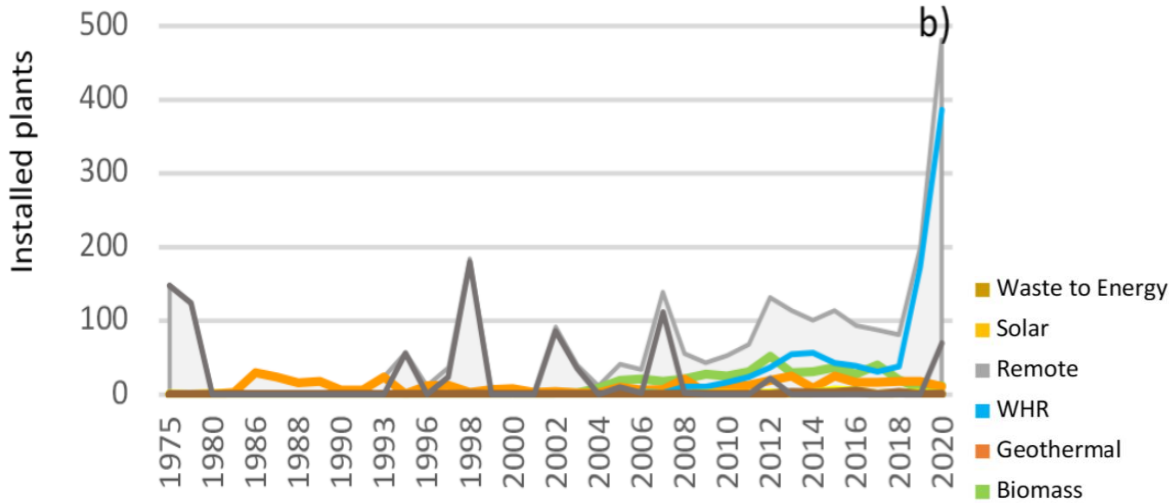
ORC prosessin hyödyntäminen hukkalämmön sähköksi muuntamisessa on yleistynyt ja esimerkiksi Euroopassa on jo satoja hukkalämpöä hyödyntäviä ORC-voimalaitoksia (ORC world map, 2025). Kuvan 18 kartassa on esitettynä Euroopassa toiminnassa olevat hukkalämpöä hyödyntävät ORC-voimalaitokset. Euroopan lisäksi hukkalämpöä hyödyntävien ORC-voimaloiden määrä on kasvanut Aasiassa ja Pohjois-Amerikassa. Tyypillisiä sovelluksia ovat esimerkiksi polttomoottoreiden hukkalämmön talteenotto, sekä erilaisten teollisuusprosessien hukkalämmön muuntaminen sähköksi.

Kuvassa 19 esitetään vuosina 1975-2020 asennettujen ORC voimaloiden määrä ja tilastossa nähdään merkittävää kasvua erityisesti hukkalämpösovelluksissa. ORC-voimaloiden yleistymistä rajoittaa edelleen laitteistojen korkea hinta, joka johtaa pitkiin takaisinmaksuaikoihin. Käytetystä teknologiasta, lämpötilatasoista, sekä laitteiston teholuokasta riippuen ORC-voimaloiden investointihinnaksi annetaan eri lähteissä n. 1000-4000 €/kW_e. Investoinnin kannattavuus ja takaisinmaksuaika riippuvat investointihinnan lisäksi voimakkaasti myös sähkön hinnasta. Lisäksi tukipolitiikka esimerkiksi Saksassa on vauhdittanut ORC-teknologian yleistymistä (Wieland et al. 2023).



https://orc-world-map.org/

Kuva 18. *Hukkalämpöä hyödyntävät ORC voimalat Euroopassa (ORC world map, 2025)*



Kuva 19. *Asennettuja ORC-voimaloita vuosittain välillä 1975-2020. Sininen kuvastaa hukkalämpöä hyödyntävien ORC-voimaloiden määrää osoittaen voimakasta kasvua (Wieland et al.2023).*

Vaikka ORC-teknologia ei ole vielä yleistynyt Suomessa, myös Suomessa on toiminnassa joitakin hukkalämmöstä sähköä tekeviä ORC-voimaloita. Esimerkkejä ovat HSY:n kaasumoottoreiden hukkalämpöä hyödyntävät Turbodenin Ämmässuolle ja Tri-O-Genin jätevedenpuhdistamoille toimittamat ORC-voimalat sekä mm. Climeonin valmistamat Viking Linen risteilyaluksille asennetut moottoreiden matalalämpöistä hukkalämpöä hyödyntävät laitokset. Kuvassa 20 on esitetty esimerkkinä polttomoottorien kuumia pakokaasuja hyödyntävä Espoossa sijaitseva korkean lämpötilan n. 150 kW ORC-voimala. Yksi ORC-voimala hyödyntää pakokaasujen lämmön neljältä rinnakkaiselta polttomoottorilta.



Kuva 20. *Esimerkki kaasumoottoreiden kuumaa savukaasua hyödyntävästä ORC-prosessista. Espoossa sijaitsevassa laitoksessa n. 150 kW ORC-voimala hyödyntää neljän kaasumoottorin savukaasuja sähköntuotantoon. Alkuperäinen kuva www.triogen.nl.*

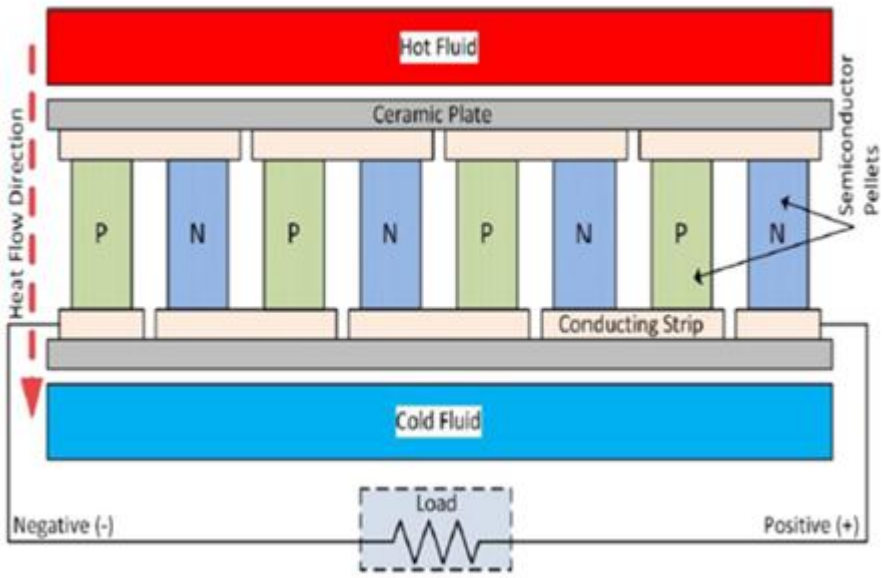
Taulukossa 3 on esitetty eri ORC-valmistajia, teholuokkia, sekä valmistajien ilmoittamia tyypillisiä sovelluksia.

Taulukko 3. *ORC-voimaloiden valmistajia, sähkötehojen kokoluokka sekä sovelluskohteet (G=geoterminen, B=biomassa, W = hukkalämpö ja C = keskittävät aurinkovoimalat).*

Valmistaja	Nettisivu	Teholuokka	Sovellukset
Turboden	turboden.com	100 kW – kymmeniä MW	G, B, W, C
Exergy International	exergy-orc.com	100 kW –kymmeniä MW	G, B, W, C
Ormat Technologies	ormat.com	MW–kymmeniä MW	G, W
Kaishan	kaishanusa.com	MW-kokoluokka	G, W, C
ENOGIA	enogia.com	10–180 kW / moduuli	W, B
Orcan Energy	orcan.energy	kW–satoja kW	G, W
Climeon	climeon.com	~150–300 kW / moduuli	G, W
Againity	againity.com	50 kW–10 MW	G, W
Enertime / Heatlift	heatlift.fr	500 kW–10 MW	G, B, W, C
Zuccato Energia	zuccatoenergia.it	30–100 kW	B, W
Triogen	—	~160 kW	W
Calnetix Technologies	calnetix.com	~100–500 kW	W
Dürr / Cyplan	durr.com	kW–MW	W
GMK / INTEC	intec-energy.com	kW–MW	B, W
Rank® ORC	rank-orc.com	kW–MW	G, B, W
ElectraTherm / BITZER	bitzer.de	35–110 kW	G, W
Infinity Turbine	infinityturbine.com	kW	B, W, C

4.2 Termosähköiset generaattorit (TEG)

Termosähköiset generaattorit (Thermoelectric Generators, TEG) ovat energianmuuntolaitteita, joilla voidaan muuntaa lämpöenergiaa suoraan sähköenergiaksi ilman liikkuvia osia tai erillistä kiertoprosessia. TEG-teknologia perustuu Seebeck-ilmiön hyödyntämiseen, jossa lämpötilaero kahden eri puolijohdemateriaalin välillä synnyttää jännitteen. Hyödynnettäessä hukkalämpöä TEG-laitteilla elementtien toista puolta kuumennetaan hukkalämmöllä, kun taas elementin toista puolta jäähdytetään jäähdytteellä (esimerkiksi ilmalla tai jäähdytysvedellä) lämpötilaeron aikaansaamiseksi. TEG-elementin esimerkkirakenne on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. *TEG-elementin periaaterakenne. P ja N edustavat puolijohdemateriaaleja (Sing and Pedersen, 2016)*

Hukkalämmön talteenotossa TEG-järjestelmät soveltuvat erityisesti sellaisiin tilanteisiin ja kohteisiin, joissa hukkalämpöä on saatavilla hajautetusti, hukkalämmön määrä on verrattain pieni tai sellaisissa olosuhteissa, joissa muiden kiertoprosesseihin perustuvien teknologioiden käyttö on teknisesti haastavaa. TEG-teknologian merkittävimpiä etuja ovat sen yksinkertainen rakenne, korkea käyttövarmuus, huoltovapaus sekä kyky toimia laajalla lämpötila-alueella ilman liikkuvia osia tai työaineita. Lisäksi järjestelmät ovat hiljaisia ja modulaarisia, mikä helpottaa niiden integrointia olemassa oleviin prosesseihin. Näiden ominaisuuksien ansiosta TEG-elementit ovat erityisen houkuttelevia sellaisissa kohteissa, joissa luotettavuus ja vähäinen ylläpito ovat keskeisiä vaatimuksia. TEG-teknologiaa on kehitetty ja tutkittu viime vuosina mm. avaruussovelluksissa (Candolfi et al. 2023), sekä esimerkiksi henkilöautokokoluokan polttomoottoreiden pakokaasulämmön hyödyntämisessä (Bhakta & Kundu, 2024).

TEG-elementin hyvyyttä tai hyötysuhdetta kuvataan yleisesti hyvyyskertoimella ZT, joka riippuu elementissä käytettävistä materiaaleista. Mitä korkeampi hyvyyskerroin on, sitä paremmalla hyötysuhteella elementti pystyy muuntamaan lämpötilaeron sähköksi. Keskeisiä ominaisuuksia sopiville materiaaleille ovat matala lämmönjohtavuus, mutta korkea sähkönjohtavuus, sekä korkea Seebeckin-kerroin. Hyvyysluku ZT, sekä TEG-elementin hyötysuhde voidaan määritellä seuraavilla yhtälöillä:

$$\mathrm{ZT} = \frac{\sigma S^2 T}{\kappa},$$

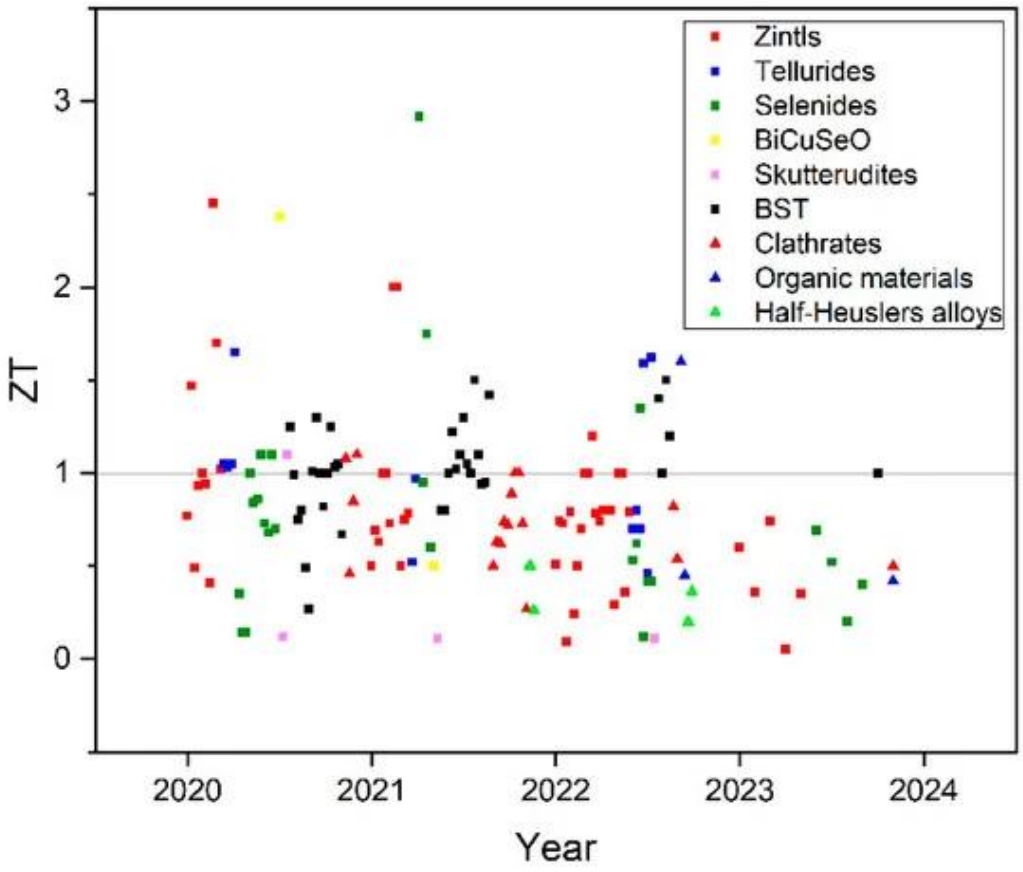
, missä σ = sähkönjohtavuus, κ = lämmönjohtavuus, S = Seebeck-kerroin.

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{\sqrt{1 + Z * T_{avg}} - 1}{\sqrt{1 + Z * T_{avg}} + \frac{T_c}{T_h}}$$

, missä Tc = kylmän puolen lämpötila, T_h = kuuman puolen lämpötila, ZT_{avg} = hyvyyskerroin keskimääräisessä lämpötilassa (lämpötilariippuvainen).

Yleisesti käytetyt TEG-materiaalit sisältävät eri aineiden seoksia haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Tyypillisesti TEG-elementit sisältävät lyijyä, antimonia, vismuttia, seleenia tai telluuria. Korkean lämpötilan TEG-elementeissä käytetään lisäksi yleisesti piitä tai germaniumia (Macia, 2015). Kuvassa 22 on esitetty erilaisilla materiaaleilla saavutettavia ZT-hyvyyslukuja TEG elementeille.

TEG-teknologian keskeinen rajoite hukkalämmön hyödyntämisessä on niiden alhainen hyötysuhde ja korkea hinta verrattuna kiertoprosesseihin perustuviin ratkaisuihin. TEG-teknologialla sähköntuotannon määrä riippuu voimakkaasti saavutettavasta lämpötilaerosta (jäähdytteen lämpötila ja lämmönlähde) elementin yli sekä käytettyjen termosähköisten materiaalien ominaisuuksista. Kuten muillakin hukkalämmöstä sähköksi tekniikoilla, erityisesti matalilla lämpötilaeroilla saatava sähköteho ja hyötysuhde jäävät mataliksi, mikä yhdessä TEG-elementtien verrattain korkeiden hintojen kanssa rajoittaa teknologian hyödynnettävyyttä ja investointien taloudellista kannattavuutta. Tällä hetkellä TEG-teknologia ei yleensä kilpaile ORC-prosessien tai muiden lämpövoimakoneisiin perustuvien ratkaisujen kanssa suurissa teholuokissa, mutta se täydentää hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia erityisesti pienen teholuokan sovelluksissa, sekä tietyissä erityissovelluksissa. Materiaaleihin liittyvä kehitys, kuten nanorakenteiset puolijohteet, sekä muut uudet korkean ZT-arvon materiaalit, parantavat jatkuvasti termosähköisten generaattoreiden suorituskykyä, mutta merkittävänä haasteena on tehokkaimpien materiaalien rajoitettu saatavuus, sekä korkea hinta.



Kuva 22. *Erilaisilla materiaaleilla saavutettavia ZT-hyvyyslukuja TEG-elementeille (d'Angelo et al. 2023)*

Taulukko 4. *Kaupallisia TEG-elementtejä ja niiden toiminta-arvoja (Champier, 2017)*

Manufacturer	Materials	Temperature difference ΔT	Power weight	Status	Maximum temperature	Information, outlook
HiZ, Thermonamic, Lairdtech, Marlow, Komatsu etc.	Bi_2Te_3	300 K	20 W 115 g	€40–€100	300 °C	Scarce (rare earth), toxicity
Evident Thermoelectric	Half-Heusler	500 K	15 W	Coming soon	600 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
Shanghai Institute of Ceramics	Skutterudites	510 K	25 W	Coming soon	600 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
TEGMA	Skutterudites			s still in development		Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
TECTEG MFR	Calcium/Manganese oxide	750 K	12.3 W	Available	800 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
TECTEG MFR cascade modules	Calcium/Manganese oxides with Bi_2Te_3	435 K	11 W	Available	600 °C	
TECTEG MFR hybrid modules	BiTe–PbTe	320 K	21.7 W	Available	360 °C	Scarce (rare earth), toxicity
Hotblock Onboard	Silicon-based alloy	500 K	3.6 W 6 g	Available	600 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
Romny Scientific	Magnesium silicide			Coming soon	600 °C	Low $/Watt target: 1$/W
Alphabet Energy	p-type tetrahedrites n-type magnesium silicide	300 K	9.2 W	Available	600 °C	Tetrahedrite is a naturally-occurring p-type mineral
OTEGO CDT	Organic TEG	Small temperature gradients		Coming soon	130 °C	Environmentally-friendly, low cost, easily scalable

4.3 Muita lämmöstä sähköksi -teknologioita

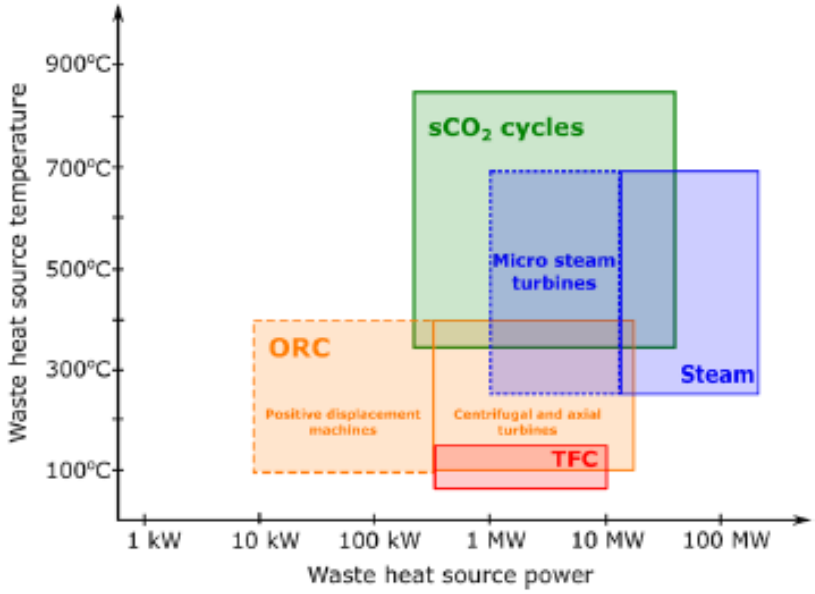
4.3.1 Kalina-prosessi

Kalina prosessit ovat toimintaperiaatteeltaan vastaavia kuin tavalliset höyryturbiinivoimalat tai ORC-voimalaitokset, mutta keskeisenä erona on, että Kalina-prosesseissa käytetään työaineena ammoniakin ja veden seosta. Yhtenä prosessin eduista on, että työaineseoksella saavutetaan lämpötilaliukuma höyrystimessä, sekä lauhduttimessa, jolloin työaineen lämpötila saadaan paremmin seuraamaan sekä prosessin lämmönlähteen, että prosessin jäähdytteen lämpötiloja. Lämpötilan liukumalla voidaan saavuttaa etuja laitteiston tehokkuudessa ja hyötysuhteessa, mutta toisaalta järjestelmä on monimutkaisempi toteuttaa kuin esimerkiksi ORC-voimalat. Kalina prosesseja on käytössä mm. geotermisen lämmön hyödyntämisessä ja joissakin hukkalämpösovelluksissa, erityisesti Aasiassa, mutta Kalina-teknologia ei ole yhtä laajasti käytössä kuin esimerkiksi ORC-teknologia. (Zhang et al. 2012, Kinnunen 2017)

4.3.2 Ylikriittiseen hiilidioksidiin perustuvat prosessit

Hiilidioksidia on käytetty jo laajasti kylmäaineena lämpöpumpuissa ja kylmäprosesseissa, mutta sitä voidaan hyödyntää myös voimaprosessien työaineena. Viime vuosina on kehitetty hiilidioksidiin perustuvia voimalaitosprosesseja erityisesti kuumille lämmönlähteille, kuten keskittäviin aurinkovoimaloihin, ydinreaktoreihin, sekä korkean lämpötilan hukkalämmölle (Marchionni et al. 2020, Xu et al. 2019). Ylikriittisten hiilidioksidijärjestelmien merkittävimpinä etuina on niiden korkea hyötysuhde, sekä erittäin korkea tehotiheys, eli laitteiston pieni fyysinen koko suhteessa saatavaan tehoon. Lisäksi hiilidioksidi on halpaa, termisesti stabiilia, palamatonta ja myrkytöntä, mikä tekee hiilidioksidista kiinnostavan työaineen myös voimaprosesseihin. Hiilidioksidin käytön haittapuolina on mm. sen vaatimat korkeat painetasot, sekä se että hyvin pieni tehoisten voimalaitosjärjestelmien toteuttaminen on hankalaa (johtuen korkeasta tehotiheydestä).

Kuvassa 23 on esitetty ylikriittisten hiilidioksidiprosessien soveltuvuus erilaisille hukkalämmön lämpötiloille ja lämpömäärille. Kuten kuvasta nähdään tällaiset järjestelmät soveltuvat parhaiten korkealämpöisen hukkalämmön muuntamiseksi sähköksi. SCO2-järjestelmät ovat näin ollen lämpötilatasojen ja lämpömäärien suhteen melko samanlaisella toiminta-alueella kuin perinteiset vesihöyryprosessit tai sellaiset ORC-voimalat joissa hyödynnetään korkealämpöistä hukkalämpöä.



Kuva 23. *Ylikriittisten hiilidoksidiprosessien toiminta-alue suhteessa hukkalämmön lämpötilaan ja lämpötehoon. (Marchionni et al. 2020)*

Järjestelmä voidaan toteuttaa kahdella tavalla: kokonaan ylikriittisenä (Brayton-prosessi) tai transkriittisenä (osa prosessista alikriittisenä, osa ylikriittisenä). Mm. Echogen-yritys on kehittänyt transkriittistä CO2-teknologiaa mm. laivamoottoreiden pakokaasujen, sekä muiden korkean lämpötilan hukkalämpövirtojen hyödyntämiseen (Echogen). Kiinassa on äskettäin otettu käyttöön maailman suurin teollista hukkalämpö sähköksi muuntava CO2-voimalaitosprosessi. Järjestelmä ottaa talteen terästehtaan hukkalämpöä tuottaen n. 30 MW sähköä (Interesting engineering, 2026).

Vaikka SCO2-voimalaitoksia on kehitetty intensiivisesti viime vuosina, teknologia on kehittynyt ja mm. demonstraatiolaitoksia on jo rakennettu, teknologian laajamittainen käyttöönotto korkean lämpötilan hukkalämpöjen hyödyntämisessä ei ole vielä saanut merkittävää jalansijaa.

4.3.3 Stirling

Yksi voimalaitostyyppi, joka voisi soveltua myös hukkalämmön sähköksi muuntamiseen on Stirling-moottoriteknologia. Stirling-moottoreiden toiminta perustuu männän/mäntien liikkeeseen, mutta erona esimerkiksi tavallisiin polttomoottoreihin on se että, Stirling-moottoreiden työkaasu on suljetussa tilavuudessa järjestelmän sisällä. Työkaasuna käytetään yleensä kevyitä kaasuja, kuten ilmaa tai heliumia. Stirling-moottorin männät saadaan liikkumaan lämmittämällä sylinteriä ulkoisella lämmönlähteellä, sekä poistamalla lämpöä sylinteristä ulkoisella jäähdytteellä. Lämpötilan muutos saa aikaiseksi työkaasun tilavuuden muutoksen, jonka avulla männät liikkuvat ja tuottavat tehoa. (Arslan, and Kocakulak 2023)

Vaikka Stirling-moottoreita voitaisiin käyttää erityisesti korkealämpöisen hukkalämmön muuntamisessa sähköksi, niiden käyttö hukkalämpösovelluksissa ei ole yleistynyt.

Kuitnekin esimerkiksi Japanissa on testattu Stirling-moottoriin perustuvaa ratkaisua laivojen hukkalämmön hyödyntämisessä (Hirata et al. 2008).

Männällä tapahtuvan puristuksen ja paisunnan lisäksi on tutkittu ja kehitetty myös termoakustisia järjestelmiä, jotka toimivat Striling-prosessin periaatteella. Esimerkiksi Nasa on tutkinut ja kehittänyt kyseistä teknologiaa ja sen toimintaperiaatteena on muuntaa lämpöä sähköksi ääniaaltoja hyödyntämällä. Tällaisten laitteiden etuna olisi se, että liikkuvia osia ei tarvittaisi. Lisäksi ääniaaltoihin liittyvällä tekniikalla saavutettavat hyötysuhteet ovat korkeita. (NASA)

4.3.4 Carnot-akut

Yksi mahdollinen teknologia hukkalämmön hyödyntämiseen ja hukkalämmön energian varastointiin myöhempään hyötykäyttöön on Carnot-akut. Carnot-akut ovat energian ja erityisesti sähkön varastointiin perustuva teknologia, jolla hukkalämpöä voitaisiin varastoida ja muuntaa myöhemmin sähköksi. Carnot-akkuja voidaan toteuttaa erilaisilla teknisillä ratkaisuilla, riippuen valitusta teknologiasta ja käytetystä lämmönlähteestä. Matalalämpöisillä hukkalämpövirroilla toimivien Carnot-akkujen toimintaperiaate on seuraava: hukkalämmön lämpötila korotetaan ensin korkean lämpötilan lämpöpumpulla ja lämpö varastoidaan lämpövarastoon. Lämpöä voidaan varastoida esimerkiksi faasimuutosmateriaaliin, paineistettuun veteen tai kiinteän aineen lämpövarastoon. Lämpö voidaan varastoida myös suoraan lämpövarastoon ilman lämpöpumppua, mikäli hukkalämmön lämpötilataso on riittävän korkea. Varastoitua lämpöä voidaan myöhemmin hyödyntää sähköntuotannossa järjestelmään kytketyn lämpövoimakoneen avulla. Suhteellisen matalasta lämmön varastointilämpötilasta johtuen (esim. 150-200 °C), lämmön sähköksi muunnossa voidaan hyödyntää esimerkiksi ORC-teknologiaa. Järjestelmän toiminta on tehokkaimmillaan silloin, kun lämmönlähteenä voidaan käyttää esimerkiksi teollisuuden tai energiantuotannon hukkalämpöä, jolloin muuten hyödyntämätön lämpö voidaan ottaa talteen ja varastoida. Järjestelmän round-trip, eli sähköstä sähköksi hyötysuhde on voimakkaasti riippuvainen sekä lämmönlähteen lämpötilatasosta, että voimaprosessin jäähdyttämiseen käytettävän fluidin lämpötilasta. (Dumont et al. 2020, Vecchi et al. 2022)

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Raportissa selvitettiin hukkalämmöntalteenottoteknologioita sekä eri teknologioihin liittyvää viimeaikaista kehitystä. Raportissa on esitetty lyhyt yhteenveto keskeisimmistä tavoista ja teknologioista, joilla hukkalämpöä voidaan hyödyntää. Raportin alussa käsitellään lyhyesti lämmön suoraa hyödyntämistä lämmönvaihtimilla sekä lämmön varastoinnin periaatteita. Tämän jälkeen esiteltiin lämpötilan korotusta lämpöpumpputeknologioilla, sekä hukkalämmön hyödyntämistä jäähdytyksessä. Lisäksi raportissa käsiteltiin hukkalämmön sähköksi muuntoon soveltuvia teknologioita.

Selvityksessä tunnistettiin useita teknologioita, joiden avulla hukkalämpö voitaisiin hyödyntää eri tavoilla. Mikäli hukkalämmön lämpötila on korkeampi kuin lämmön kulutuskohteen, suoraa hyödyntämistä lämpönä voidaan tehdä erilaisilla lämmönsiirtimillä ja teknologisia ratkaisuja on jo laajasti saatavilla. Lämpöä voidaan myös varastoida erilaisiin lämpövarastoihin, kuten veteen perustuvat lämpöakut, kiinteisiin materiaaleihin perustuvat varastot kuten hiekka-akut, sulasuolavarastot, sekä muut erilaisiin faasimuutosmateriaaleihin perustuvat lämpövarastot.

Mikäli hukkalämpöä ei voida suoraan hyödyntää lämpönä voidaan käyttää erilaisia aktiivisia lämmöntalteenoton menetelmiä. Mikäli hukkalämmön lämpötila on liian matala suoraan hyödyntämiseen, mutta lämmölle on tarvetta lämpöenergiana, lämpöpumpputeknologia voidaan hyödyntää hukkalämmön hyödyntämisessä. Erityisesti korkean lämpötilan lämpöpumppujen ja prosessihöyryä tuottavien lämpöpumppujen teknologiassa on tapahtunut viime vuosina merkittävää kehitystä. Tämä mahdollistaa hukkalämmön tehokkaan takaisinkierrätyksen erilaisissa teollisuuden prosesseissa, sekä mm. kaukolämmön tuotannon hukkalämmöstä. Kompressorilämpöpumppujen lisäksi erilaisia absorptiojärjestelmiä voidaan hyödyntää sekä lämpöpumppuna, että jäähdytyskäytössä. Jo olemassa olevien ratkaisujen lisäksi erilaisia hyvin korkean lämpötilan lämpöpumpputeknologioita, kuten käänteiseen Brayton-prosessiin tai käänteiseen Stirling-moottoreita on kehitetty viime vuosina. Lisäksi magnetokalorimetrinen jäähdytys tai lämpöpumpputeknologia on tunnistettu lupaavaksi ratkaisuksi tulevaisuuden järjestelmissä.

Mikäli syntyvälle hukkalämmölle ei ole hyödyntämiskohteita lämpönä, yksi mahdollisuus on muuntaa hukkalämpöä sähköksi. Mikäli hukkalämpöä syntyy suuria määriä ja hukkalämmönlämpötilataso on riittävän korkea, voidaan hyödyntää perinteisiä höyryturbiiniprosesseja. Suurin osa hukkalämmöstä on kuitenkin liian matalalämpöistä vesihöyryyn perustuville voimaloille. ORC-voimalat ovat selvästi yleisin hukkalämpövirtojen sähköksimuuntoteknologia ja ORC-voimalat soveltuvat hyvin erilaisille lämpötila- ja tehotasoille. Euroopassa toimii jo useita satoja hukkalämpöä

hyödyntäviä ORC-voimaloita. Hukkalämpöä voidaan muuntaa sähköksi myös muilla teknologioilla kuten termosähköisillä generaattoreilla, ylikriittiseen hiilidioksidiin perustuvilla prosesseilla, Kalina-prosesseilla ja Stirling-moottoreilla. Näiden teknologioiden mahdollisuudet hukkalämpövirtojen hyödyntämisessä on tunnistettu ja pilottilaitoksia on jo toteutettu, mutta näiden teknologioiden merkittävää kaupallista läpimurtoa ei ole vielä tapahtunut hukkalämpösovelluksissa.

Taulukko 5. Kooste: suora lämmön hyödyntäminen ja varastointi

Tekniikka / vaihtoehto	Hyödyntäminen	Lämpötila / ehto	Keskeinen huomio
Suora käyttö ja lämmönsiirtimet	Lämmitys, kuivaus, prosessilämpö	Lähteen lämpötila riittää käyttökohteen tarpeeseen	Putki-, levy- ja levy-vaippasiirtimet
Vesilämpövarasto	Lämmön käyttö myöhemmin	Tyypillisesti noin 100 °C tai alle	Yksinkertainen ratkaisu saatavuuden vaihteluun
Kiinteä materiaali ja sulasuolavarasto	Lämmön käyttö myöhemmin	Myös korkeammat varastointilämpötilat	Esimerkiksi hiekka, prosessihöyryn tuotanto
Faasimuutosvarasto	Lämmön käyttö myöhemmin	Materiaalin faasimuutoslämpötila	Faasimuutoksessa varastointilämpötila pysyy tasaisena
Suora käyttö DAC:ssa	Hiilidioksidin talteenotto ilmasta	Kiinteä sorbentti: noin 80–120 °C	Lämpötilan ja saatavuuden on vastattava prosessia

Taulukko 6. Kooste: lämpötilan korotus ja jäähdytys

Tekniikka	Hyödyntäminen	Lämpötila / ehto	Keskeinen huomio
Kompressorilämpöpumppu	Lämpötilan korotus, myös jäähdytys	Tuotto usein 130–150 °C, ratkaisuja yli 200 °C	COP heikkenee lämpötilanoston kasvaessa
Höyrylämpöpumppu, MVR / TVR	Prosessihöyry, höyryn paineen nosto	Sovelluskohtainen höyryn käyttöpaine	Suljettu kierto, avoin puristus tai yhdistelmä
Absorptio / adsorptio	Jäähdytys ja lämmöntuotto	Absorptiojäähdytys: lähde noin 70–120 °C	Kuluttaa vähän sähköä, rajoitteina koko ja hinta
Hybridilämpöpumppu	Lämpötilan korotus	Suuret lämpötilanostot mahdollisia	Kompressori + absorptio, kehitysasteella
Käänteinen Brayton	Kuuma prosessi- tai kuivausilma	Tuotto yli 200 °C, tutkimuksissa yli 300 °C	Ilma työaineena, avoin tai suljettu kierto
Käänteinen Stirling	Lämpötilan korotus tai jäähdytys	Myös korkean lämpötilan lämpöpumppuja	Kaupallisia ratkaisuja olemassa, mutta myös kehitystarpeita jäljellä
Magnetokalorinen	Lämpötilan korotus tai jäähdytys	Materiaalin ja toteutuksen mukaan	Kiinteä aine ja magneetti-kenttä, kehitysasteella

Taulukko 7. Kooste: sähköntuotanto ja Carnot-akut

Tekniikka	Hyödyntäminen	Lämmönlähde / teholuokka	Keskeinen huomio
Höyryturbiiniprosessi	Sähköntuotanto	Tyypillisesti yli 300 °C ja yli 1 MW sähköä	Vakiintunut tekniikka kuumille, lämpömäärältä suurille hukkalämpövirroille
ORC	Sähköntuotanto	Tyypillisesti 80–350 °C, muutamista kW:sta useisiin MW:iin	Kaupallinen tekniikka ja useita valmistajia
Termosähköinen generaattori (TEG)	Sähköntuotanto	Eri lämpötiloille, wateista muutamiin kW:iin	Ei liikkuvia osia, heikko hyötysuhde, kallis
Kalina-prosessi	Sähköntuotanto	Yli 200 °C (raportin arvio), noin 100 kW:sta MW:iin	Ammoniakki-vesiseos, ORC:ta monimutkaisempi
Ylikriittinen CO_2	Sähköntuotanto	Tyypillisesti yli 300 °C, useita MW	Suuri tehotiheys, korkeat paineet
Stirling ja termoakustinen	Sähköntuotanto	Stirling: korkea lämpötila, kymmenien kW:n luokka	Vähäinen käyttö, termoakustiikka tutkimuksessa
Carnot-akku	Varastointi ja sähköntuotanto	Esim. varastointi 150–200 °C ja ORC-purkaus	Lämpöpumppu tarvittaessa, kohdekohtainen hyötysuhde

7. Lähteet

Andersen et al. (2026). HTHP Technologies – Status & Perspectives. HTHP Symposium 2026, Denmark.

Arslan, T. A., & Kocakulak, T. (2023). A comprehensive review on Stirling engines. Engineering Perspective, 3(3), 42–56.

Bäckström, S. (2022). Prizztech hukkalämpöselvitys. Ramboll Finland Oy. Saatavilla: https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/ramboll_hukkalamposelvitys_loppuraportti.pdf

Bantillo, S. M. R., Callejo, G. A. C., Camacho, S. M. K. G., Montalban, M. A., Valderin, R. E., & Rubi, R. V. C. (2024). Future Trends of Natural Refrigerants: Selection, Preparation, and Evaluation. Engineering Proceedings, 67(1), 9. https://doi.org/10.3390/engproc2024067009

BASF (2024). “BASF receives funding approval for the construction of the world’s largest industrial heat pump for CO2-free steam generation”. Saatavilla: https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2024/10/p-24-300

Bhakta, S., & Kundu, B. (2024). A review of thermoelectric generators in automobile waste heat recovery systems for improving energy utilization. Energies, 17(5), 1016.

Bhatnagar, P., Siddiqui, S., Sreedhar, I., & Parameshwaran, R. (2022). Molten salts: Potential candidates for thermal energy storage applications. International Journal of Energy Research, 46(13), 17755–17785.

Bianchi, G., Panayiotou, G. P., Aresti, L., Kalogirou, S. A., Florides, G. A., Tsamos, K., Tassou, S. A., & Christodoulides, P. (2019). Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry. Energy, Ecology and Environment, 4(5), 211–221.

Bouaboula, H., Chaouki, J., Belmabkhout, Y., & Zaabout, A. (2024). Comparative review of Direct air capture technologies: From technical, commercial, economic, and environmental aspects. *Chemical Engineering Journal*, *484*, 149411.

Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F., & Lävemann, E. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. Applied Energy, 151, 157–167.

Calefa (2025). Orion Espoo vähentää 2200 tonnia CO_2-päästöjä palkitun AmbiHeat-laitoksen mallilla. Saatavilla: https://calefa.fi/referenssit/orion-espoo-vahentaa-co2-paastoja-ambiheatilla/

Candolfi, C., El Oualid, S., Lenoir, B., & Caillat, T. (2023). Progress and perspectives in thermoelectric generators for waste-heat recovery and space applications. Journal of Applied Physics, 134(10).

Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. Energy Conversion and Management, 140, 167–181.

Climeon. Viking Grace heat recovery system. Saatavilla: https://climeon.com/case-study-viking-line-grace/

Colonna, P., Casati, E., Trapp, C., Mathijssen, T., Larjola, J., Turunen-Saaresti, T., & Uusitalo, A. (2015). Organic Rankine cycle power systems: from the concept to current technology, applications, and an outlook to the future. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 137(10), 100801.

d'Angelo, M., Galassi, C., & Lecis, N. (2023). Thermoelectric Materials and Applications: A Review. Energies, 16(17), 6409.

Dumont, O., Frate, G. F., Pillai, A., Lecompte, S., & Lemort, V. (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. Journal of Energy Storage, 32, 101756.

Echogen. Company webpage. Saatavilla: https://www.echogen.com/

EN 378. European Standard EN 378 Refrigerating Systems and Heat Pumps – Safety and Environmental Requirements.

Energiateollisuus (2026). Kaukolämpötilasto 2024. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2026/01/Kaukolampotilasto_2024.pdf

EU (2024). Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014.

European Chemicals Agency (ECHA) (2026). Saatavilla: https://echa.europa.eu/es/-/echa-supports-pfas-restriction-with-targeted-derogations

Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 1568–1579.

Fortum (2021). Fortumin Suomen suurin lämpöpumppu korvaa fossiilista kaukolämmöntuotantoa jäteveden hukkalämmöllä. Saatavilla: https://www.fortum.com/fi/media/2021/06/fortumin-suomen-suurin-lampopumppu-korvaa-fossiilista-kaukolammontuotantoa-jateveden-hukkalammolla-0

Fraunhofer IPM. Caloric Systems, solid-state cooling and heating. Saatavilla: https://www.ipm.fraunhofer.de/en/bu/gas-and-process-technology/applications/cooling-heating/caloric-heat-pump.html

Helen (2023). Hukkalämmöillä merkittävä rooli kestävässä energiajärjestelmässä – Katri Valan lämpöpumppulaitos lämmittää jopa keskikokoisen kaupungin. Saatavilla: https://www.helen.fi/uutiset/2023/hukkalammoilla-merkittava-rooli-kestavassa-energiajarjestelmassa

Hirata, K., Ishimura, E., Nishio, S., Kawagoe, Y., Kano, T., Senda, T., et al. (2008). Development of heat recovery system with Stirling engine generator for ship. Papers of National Maritime Research Institute (Japan), 8(2), 17–56.

IEA (2026). Project 68: Industrial High-Temperature Heat Pumps. Saatavilla: https://heatpumpingtechnologies.org/project68/

Interesting Engineering (2026). China brings world's first 30 MW supercritical CO_2 waste heat power plant online. Saatavilla: https://interestingengineering.com/energy/worlds-first-commercial-supercritical-co2-power-plant

Jiang, J., Hu, B., Wang, R. Z., Deng, N., Cao, F., & Wang, C. C. (2022). A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112106.

Kim, J. S., Chung, I. H., Kim, T. S., & Song, C. H. (2024). Thermal performance design and analysis of reversed Brayton cycle heat pumps for high-temperature heat supply. Energies, 17(12), 2953.

Kinnunen, H. (2017). Hukkalämmön muuttaminen sähköksi. Kandidaatintyö, LUT-yliopisto.

Kitanovski, A. (2020). Energy applications of magnetocaloric materials. Advanced Energy Materials, 10(10), 1903741.

Klute, S., Budt, M., van Beek, M., & Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps: Overview, classification, economics, and basic modeling principles. Energy Conversion and Management, 299, 117882.

Kuchmacz, J., Bieniek, A., & Mika, Ł. (2019). The use of adsorption chillers for waste heat recovery. Polityka Energetyczna, 22(2), 89–106.

Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 448–461.

Lyubina, J. (2017). Magnetocaloric materials for energy efficient cooling. Journal of Physics D: Applied Physics, 50(5), 053002.

Macia, E. (2015). Thermoelectric Materials: Advances and Applications. Singapore: Jenny Stanford Publishing. Available at: http://ebookcentral.proquest.com/lib/lut/detail.action?docID=1538317

Marchionni, M., Bianchi, G., & Tassou, S. A. (2020). Review of supercritical carbon dioxide (sCO_2) technologies for high-grade waste heat to power conversion. SN Applied Sciences, 2(4), 611.

Marina, A., Spoelstra, S., Zondag, H. A., & Wemmers, A. K. (2021). An estimation of the European industrial heat pump market potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139, 110545.

Minale, T. A., Lanzetta, F., Bégot, S., & Getie, M. Z. (2024). Review on the technological advancement of Stirling cycle heat pumps. Energy Reports, 12, 3504–3518.

Miró, L., Gasia, J., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. Applied Energy, 179, 284–301.

NASA. Power Generation and Storage Stirling Thermoacoustic Power Converter and Magnetostrictive Alternator. Saatavilla: https://technology.nasa.gov/patent/TOP2-255

Nevel (2026). Tiedote. Saatavilla: https://nevel.com/fi/reference/fazer/

Polar Night Energy. Saatavilla: https://polarnightenergy.com/

Seinäjoen Energia (2024). Jätevedestä lämpöä 2 000 omakotitalon verran. Saatavilla: https://www.seinajoenenergia.fi/ajankohtaista/jatevedesta-lampoa-2-000-omakotitalon-verran/

Singh, D. V., & Pedersen, E. (2016). A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. Energy Conversion and Management, 111, 315–328.

Suomen Lämpöpumppuyhdistys (SULPU) (2026). Vuoden 2025 lämpöpumppujen myyntitilastot Suomessa. Saatavilla: https://www.sulpu.fi/lampopumppujen-myynti-palasi-kasvu-uralle-kasvua-10-suomeen-myyty-lampopumppuja-jo-10-miljardilla/

Sun, J., Qin, Y., Liu, R., Wang, G., Liu, D., & Yang, Y. (2023). Cycle characteristics of a new high-temperature heat pump based on absorption–compression revolution. Energies, 16(11), 4267.

Tekniikka & Talous (2026). “Suomalainen paperitehdas teki historiaa – Tässä on maailman suurin 13 MW lämpöpumppu, joka tuottaa höyryä.” 21/2026.

Turboden. HSY ORC plant. Saatavilla: https://www.turboden.com/case-histories/1445/hsy

Turun Sanomat (2023). Lämpöpumppu tuottaa sähkön voimalla jätevedestä lämpöä. Saatavilla: https://www.ts.fi/a/45496

Uusitalo, A., Honkatukia, J., Turunen-Saaresti, T., & Grönman, A. (2018). Thermodynamic evaluation on the effect of working fluid type and fluids critical properties on design and performance of Organic Rankine Cycles. Journal of Cleaner Production, 188, 253–263.

Vecchi, A., Knobloch, K., Liang, T., Kildahl, H., Sciacovelli, A., Engelbrecht, K., et al. (2022). Carnot Battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art. Journal of Energy Storage, 55, 105782.

Wieland, C., Schifflechner, C., Dawo, F., & Astolfi, M. (2023). The organic Rankine cycle power systems market: Recent developments and future perspectives. Applied Thermal Engineering, 224, 119980.

Xu, J., Liu, C., Sun, E., Xie, J., Li, M., Yang, Y., & Liu, J. (2019). Perspective of S-CO_2 power cycles. Energy, 186, 115831.

Zentou, H., Hoque, B., Abdalla, M. A., Saber, A. F., Abdelaziz, O. Y., Aliyu, M., ... & Abdelnaby, M. M. (2025). Recent advances and challenges in solid sorbents for CO2 capture. *Carbon Capture Science & Technology*, *15*, 100386.

Zhang, X., He, M., & Zhang, Y. (2012). A review of research on the Kalina cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(7), 5309–5318.

Zühlsdorf, B. et al. (2023). High-Temperature Heat Pumps: Task 1 – Technologies. Annex 58 about High-Temperature Heat Pump.