Euroopan unionin osarahoittama

LUT University

7.10.2026

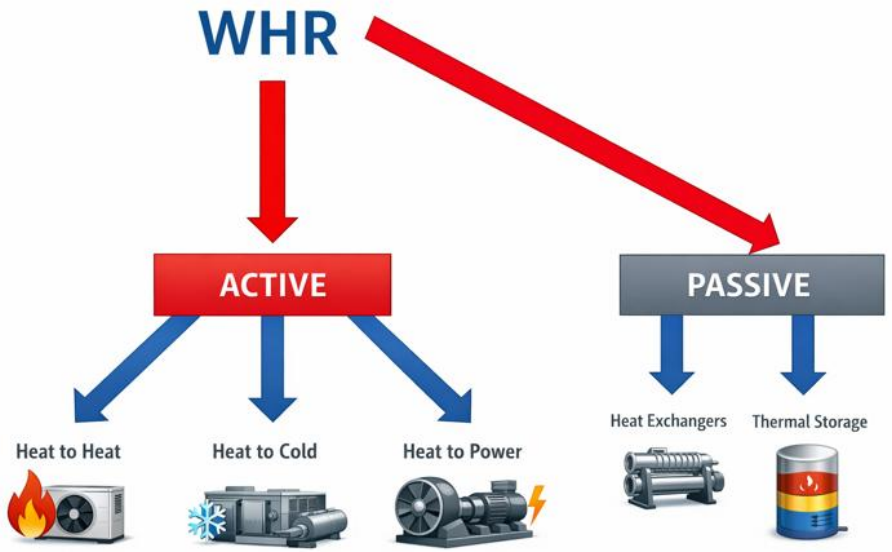
SELVITYS HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMISEN TEKNOLOGIOISTA

HÄMEEN HUKKALÄMMÖT JA NIIDEN TEKNOLOGINEN HYÖDYNNETTÄVYYS (LÄMPÖ)

LUT University

Hukkalämmön hyödyntämisen vaihtoehdot

- Hukkalämmön lämpötilataso, laatu, määrä ja käyttökohde ohjaavat menetelmän valintaa.
- Passiiviset menetelmät hyödyntävät tai varastoivat lämpöä ilman lämmön jatkojalostamista.
- Aktiiviset menetelmät korottavat hukkalämmön lämpötilaa tai tuottavat lämmöstä jäähdytystä tai sähköä.



Hyödyntämistapa	Keskeinen tekniikka
Suora lämpökäyttö	Lämmönsiirtimet
Lämmön varastointi	Vesi, kiinteät aineet ja faasimuutosmateriaalit
Lämpötilan korotus	Kompressori- ja absorptiolämpöpumput
Jäähdytys	Absorptiojäähdytys
Sähköksimuunto	ORC ja muut voimaprosessit

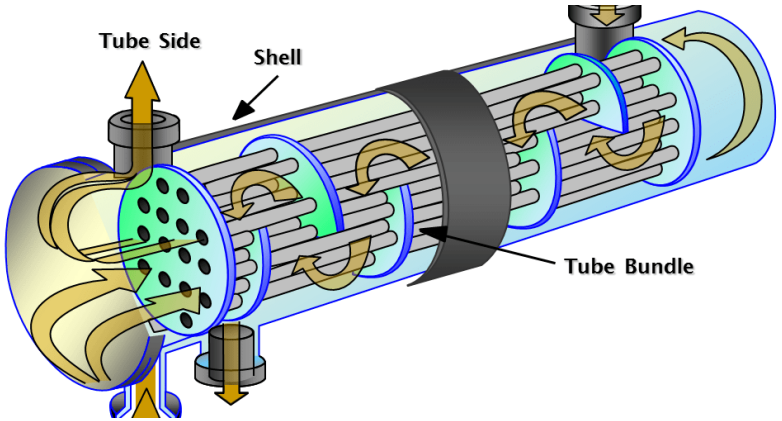
Hyödynnettävä potentiaali on kohdekohtainen

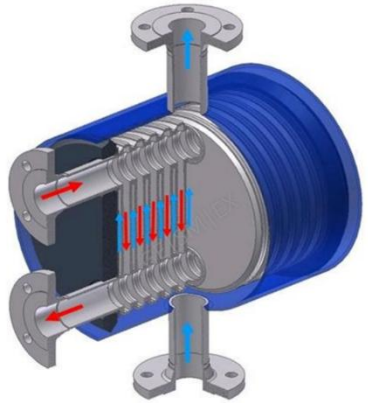
- Suuri osa teollisuuden hukkalämmöstä on alle 100 °C:n lämpötilassa, mutta myös korkeampia lämpötiloja löytyy.
- Lämpömäärä ja lämpötilataso määrittävät hyödyntämisen teknistä potentiaalia.
- Ajallinen saatavuus, likaantuminen ja mahdollinen korroosio rajaavat toteutusta.
- Taloudellisesti kannattavasti hyödynnettävän lämmön osuus jää teoreettista potentiaalia pienemmäksi.

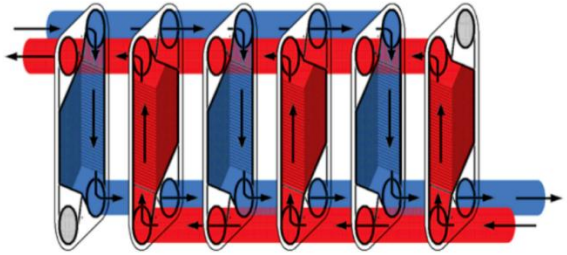
Arvioinnin taso	Keskeinen rajaus
Teoreettinen potentiaali	Lämpövirran koko energiasisältö
Teknologian potentiaali	Valitun menetelmän teoreettiset rajat
Teknisesti toteutettava	Laitteiden häviöt ja käytännön rajoitteet
Taloudellisesti kannattava	Investointi ja käytöstä saatava hyöty

Suora hyödyntäminen ja lämmönsiirtimet

- Hukkalämmön suora käyttö (passiiviset menetelmät) sopii kohteisiin, joissa hukkalämmön lämpötila riittää suoraan kattamaan lämmöntarpeen ja on siirrettävissä käyttökohteeseen
- Materiaalit ja rakenne valitaan likaantumisen, korroosion ja paineiden mukaan.
- Tyypillisiä lämmönsiirrinrakenteita mm. putki-vaippa, ripaputki ja erilaiset levylämmönsiirtimet.
- Käyttökohteita mm. tilojen ja prosessien lämmitys, kaukolämpö, kuivausprosessit ja tulevaisuudessa myös mahdollisesti Direct air capture (DAC)-prosessit.
- Lämpövarastoilla voidaan sovittaa yhteen ajallista vaihtelua hukkalämmön saatavuudessa, sekä lämmönkulutustarpeessa. Varastoinnista on hyötyä myös tasaiselle lämmönlähteelle, jos kulutus vaihtelee.



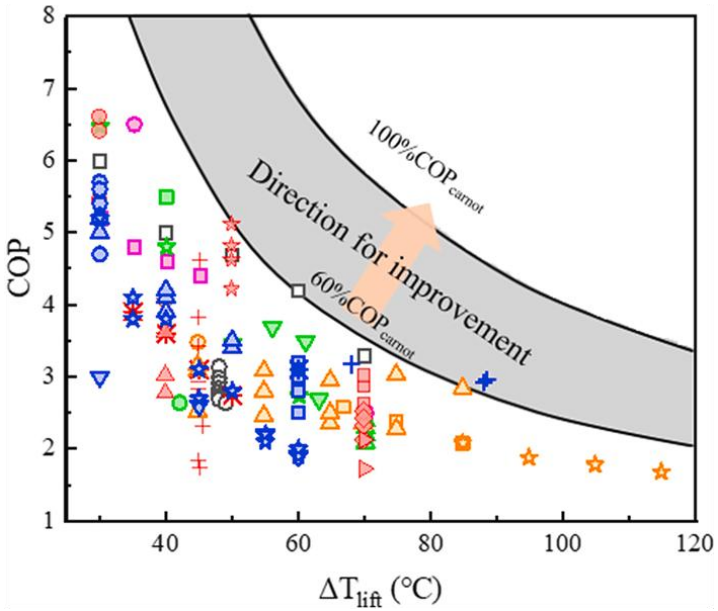




Kuvat: Arventraining, Saari J. ja Gesmex

Lämpötilan korottaminen lämpöpumpuilla

- Lämpöpumppu nostaa hukkalämmön käyttökohteen vaatimalle lämpötilatasolle.
- COP kuvaa tuotettua lämpötehoa suhteessa kompressorin kuluttamaan tehoon.
- Suurempi lämpötilanosto yleensä pienentää COP-arvoa.
- Myös lämmönlähteen lämpötila vaikuttaa tehokkuuteen, ei vain tuottolämpötila.

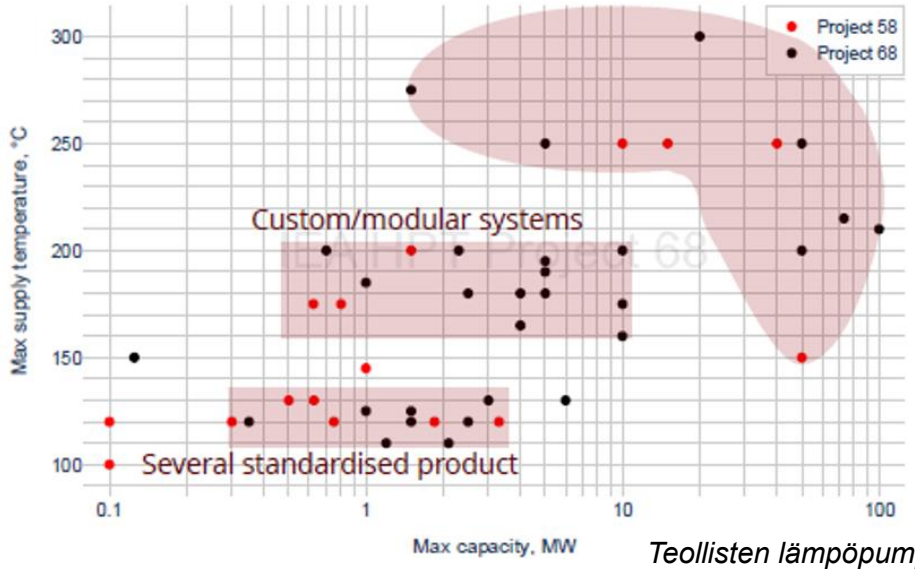


Lämpöpumpun lämpötilannoston vaikutus COP-arvoon (Jiang et al. 2022)

Komponentti	Tehtävä suljetussa kierrossa
Höyrystin	Ottaa lämpöä hukkalämpövirrasta
Kompressori	Nostaa kylmäaineen painetta ja lämpötilaa
Lauhdutin	Luovuttaa lämmön käyttökohteeseen
Paisuntaventtiili	Laskee paineen ennen höyrystintä

Korkean lämpötilan lämpöpumput kehittyvät

- Markkinoilla on jo laajasti teollisia lämpöpumppuja ja valmistajia.
- Kehitys ollut aktiivista viime vuosina ja kehitys painottuu korkeampiin tuottolämpötiloihin, sekä suuriin tehoihin.
- Korkea lämpötilanosto voi edellyttää moniportaista tai kaskadikytkentää.
- Öljytön kompressoritekniikka voi helpottaa korkeiden lämpötilojen toteutusta.

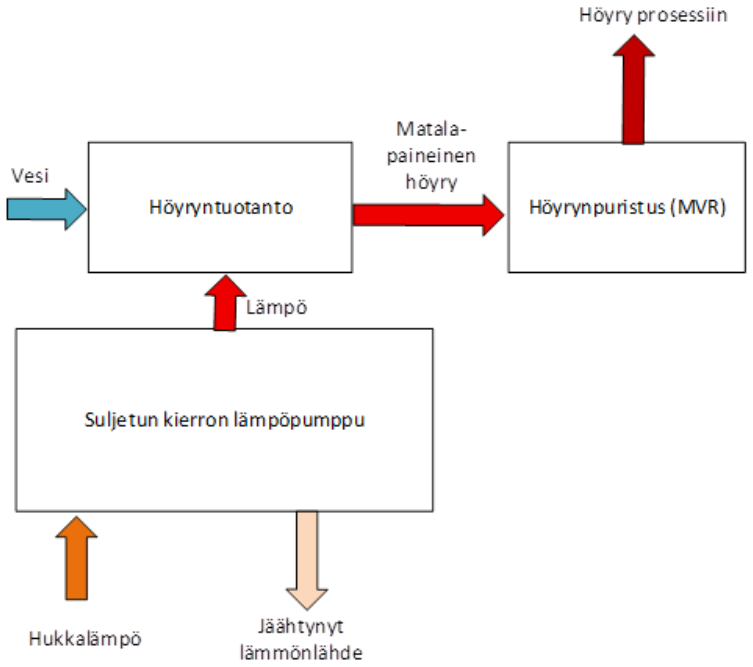


Tunnusluku	Raportin kuvaama taso
Saavutettava tuottolämpötila (kaupalliset)	Noin 130–150 °C
Korkeimmat tuottolämpötilat (Demonstraatio/pilotit)	Jopa yli 200 °C
Lämpöteho	Suurin osa tarkastelluista n. 1-10 MW, mutta myös jopa 50 MW järjestelmiä
Todellinen tehokkuus vs. teoreettiseen COP	Parhaimmillaan noin 50–60 %

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

Hukkalämmöstä prosessihöyryä: höyryä tuottavat lämpöpumput

- Lämpöpumpuilla voidaan tuottaa matalapaineista höyryä teollisuuden tarpeisiin (120-jopa 200 °C).
- Mekaaninen höyryn puristusta (MVR) käyttää nostamaan höyrynpaine haluttuun käyttöpaineeseen.
- Suljetun lämpöpumpun ja MVR yhdistelmät mahdollistavat hukkalämmön hyödyntämisen teollisuuden höyryntuotannossa, korvaten polttoon perustuvaa höyryntuotantoa.
- Raportin esimerkki: Delfortin Tervakosken tehdas, 13 MW:n höyrylämpöpumppu vuonna 2026.



Toteutustapa	Höyryntuotannon periaate
Suora veden höyrystys	Lämpöpumppu höyrystää veden käyttöpaineessa
Lämpöpumppu ja höyryn puristus (MVR)	Matalapaineisen höyryn puristus kompressorilla käyttöpaineeseen
Flash-höyry	Paineistetun ja kuumennetun veden paisutus höyrystää osan vedestä

Kylmäainevalinta

- Kylmäaine vaikuttaa saavutettavaan lämpötilaan ja prosessin tehokkuuteen.
- Luonnolliset kylmäaineet kuten erilaiset hiilivedyt, hiilidioksidi ja ammoniakki korostuvat eurooppalaisessa kehitystyössä.
- Paineet, syttyvyys ja myrkyllisyys vaikuttavat sijoitukseen ja turvallisuuteen.
- Synteettisten aineiden sääntely ja sen muutokset on huomioitava valinnassa.

Kylmäaine	Huomioitavaa
Hiilidioksidi	Korkea paine, transkriittinen prosessi
Ammoniakki	Myrkyllisyys ja lievä syttyvyys
Hiilivedyt (butaani, pentaani..)	Korkea syttyvyys
Vesi	Avoimet höyryn puristusprosessit
HFC- ja HFO-aineet	Synteettisiä: ilmasto- ja ympäristövaikutukset, sääntely ja tulevat käyttörajoitukset

Euroopan unionin osarahoittama

Hukkalämmöllä jäähdytystä ja muita lämpöpumppu/jäähdytys tekniikoita

- Absorptiojäähdytys käyttää lämpöä jäähdytyksessä mekaanisen kompressorin sijaan.
- Selvityksen mukaan verrattain matalalämpöiset hukkalämpövirrat (noin 70–120 °C:n lämmönlähde) voi soveltua jäähdytyksen tuottamiseen.
- Etuna on vähäinen sähkön tarve. Rajoitteita ovat koko, hinta ja matala COP.
- Absorptio-teknologia soveltuu myös lämpöpumppukäyttöön.
- Muita kehitteillä olevia lämpöpumpputekniikoita mm. käänteinen Brayton, käänteinen Stirling, hybridijärjestelmät ja magnetokalorimetriset järjestelmät.

Teknologia	Tilanne tai käyttötarkoitus
Absorptio	Vakiintunut lämpöä hyödyntävä jäähdytysratkaisu, käytössä mm. joissakin laivoissa
Hybridilämpöpumppu	Kompressori- ja absorptiotekniikan yhdistäminen (kehitysasteella)
Käänteinen Brayton	Erittäin korkeat tuottolämpötila, mm. kuuma ilma (kehitysasteella/pilotointi)
Käänteinen stirling ja magnetokalorimetriset järjestelmät	Vaihtoehtoiset lämpöpumpputeknologiat (kehitysasteella/pilotointi)

Hukkalämmöstä sähköä: ORC-voimalat

- ORC-prosessi on vakiintunein ja kaupallisesti laajimmin saatavilla oleva teknologia hukkalämmön muuntamiseen sähköksi.
- Orgaaninen työaine, esimerkiksi hiilivety, piiöljy tai fluorattu työaine, höyrystyy, paisuu turbiinissa ja lauhtuu takaisin nesteeksi.
- Korkea lämmönlähteen lämpötila ja kylmä jäähdyte parantavat sähköntuotannon hyötysuhdetta.
- Euroopassa on suuri määrä hukkalämmöllä toimivia ORC-voimaloita teknologia on kaupallisesti käytössä myös Suomessa. Alla oleva karttakuva näyttää Euroopassa toimivat hukkalämpöä hyödyntävät ORC-voimalat ((ORC world map, 2025)



Ominaisuus	Tyypillisiä arvoja
Tyypillinen lämmönlähde	Noin 80–350 °C
Sähköteho	Muutamista kilowateista useisiin megawatteihin
Noin 100 °C:n hukkalämpö	Hyötysuhde tyypillisesti alle 10 %
Kuuma lämmönlähde ja kylmä jäähdyte	Hyötysuhde voi olla noin 20–25 %

Muut sähköntuotantotavat ja Carnot-akut

- TEG tuottaa sähköä lämpötilaerosta ilman liikkuvia osia (perustuu ns. Seebeck-efektiin ja puolijohdemateriaaleihin).
- TEG sopii pieniin tehoihin ja kohteisiin, joissa vähäinen huoltotarve on tärkeää ja hukkalämmön määrä on liian pieni erilaisille kiertoprosesseille).
- Muut termodynaamiset, kuten ylikriittinen CO2-kierto, Striling ja Kalina-kiertoprosessit voivat täydentää ORC:n ja TEG:n sovellusaluetta.
- Carnot-akku yhdistää lämmön varastoinnin ja myöhemmän sähköntuotannon.

Ratkaisu	Soveltuvuus ja rajoite
TEG	Pienet tehot, alhainen hyötysuhde ja korkea hinta
Kalina	Ammoniakki-vesiseos, monimutkaisempi prosessi
Ylikriittinen CO_2	Korkeat lämpötilat ja suuret tehot
Stirling	Korkealämpöiset lähteet, rajallinen käyttö
Carnot-akku	Varastointi ja voimaprosessi, kohdekohtainen tehokkuus

Yhteenveto

- Suora hukkalämmön hyödyntäminen mahdollista silloin kun lämmönlähteen lämpötilataso riittää lämmönkulutuskohteelle.
- Lämpöpumppu avaa käyttökohteita matalalämpöiselle hukkalämmölle.
- Jäähdytys ja sähköntuotanto tarjoavat vaihtoehtoja erityisesti silloin kun hukkalämmölle ei ole tarvetta lämpönä.
- Kohdekohtainen tekninen ja taloudellinen arvio määrittää toteutuskelpoisuuden.

Kohteen tilanne	Hyödyntämisvaihtoehto
Lämpötila riittää	Suora lämmönsiirto
Lämpötila ei riitä	Lämpöpumppu tai MVR
Saatavuus ja kysyntä eri aikaan	Lämpövarasto
Ei tarvetta lämmölle, mutta jäähdytykselle tarve	Absorptiojäähdytys
Hukkalämmön muuntaminen sähköksi	ORC tai muu sähköntuotantotapa

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

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

Lämpötilat kuvaavat tuottoa, paitsi absorptiojäähdytyksen lämmönlähde. MVR = mekaaninen, TVR = terminen höyryn puristus.

Euroopan unionin osarahoittama

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


LUT
University
LAND
OF THE
CURIOUS