



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Valtteri Lamminpohja

# **Datakeskusten tuottaman hukkalämmön muuttaminen sähköksi ORC-prosessin avulla**

ORC-prosessin tehostaminen lämpöpumpulla

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Diplomityö  
Energiatekniikka

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Valtteri Lamminpohja		
<b>Diplomityön nimi:</b>	Datakeskusten tuottaman hukkalämmön muuttaminen sähköksi ORC-prosessin avulla: ORC-prosessin tehostaminen lämpöpumpulla		
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri		
<b>Oppiaine:</b>	Energiatekniikka		
<b>Työn valvoja:</b>	Pekka Ruuskanen (Vaasan yliopisto)		
<b>Työn ohjaajat:</b>	Birgitta Martinkauppi (Vaasan yliopisto) & Antti-Jussi Laine (Sweco Finland Oy)		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	<b>104</b>

---

**TIIVISTELMÄ:**

Datakeskusten määrä ja niiden sähköenergian kulutus kasvavat kansainvälisen tiedonprosessoinnin kysynnän kasvun mukana. Globaalin datakeskusalan kasvun myötä myös Suomeen on tehty useita datakeskusinvestointeja kotimaisten ja ulkomaisten yhtiöiden toimesta. Suomi on otollinen paikka sijoittaa datakeskus viileään ilmaston ja saatavilla olevan uusiutuvan sähköenergian myötä, joka on kohtuuhintaista. Datakeskukset kuluttavat suuren määrän sähköenergiaa, joka lopulta muuttuu lämmöksi ja tätä hukkalämmöksi kutsuttua lämpöenergiaa pyritään hyödyntämään eri tavoin. Suomessa hukkalämpöä hyödynnetään pääasiallisesti kaukolämmön tuotannossa, mutta myös muita hyödyntämiskeinoja tulee tutkia kaukolämmön vaatiman infrastruktuurin puuttuessa usealta eri alueelta, jonne datakeskuksia saatetaan sijoittaa. Taloudellisen hyödyn lisäksi myös kiristyvät kansalliset ja kansainväliset vaatimukset ohjaavat tutkimaan mahdollisimman tehokkaan hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia. Työn tavoitteena oli tutkia vaihtoehtoa, jossa datakeskusten tuottama hukkalämpö hyödynnetään sähköenergian tuotannossa. Tämä ORC-prosessin avulla datakeskuksen yhteydessä tuotettu sähköenergia olisi mahdollista hyödyntää osana datakeskuksen sähkönkulutusta.

Koska datakeskuksesta saatavan hukkalämmön lämpötila on suhteellisen matala, on sähköntuotannon hyötysuhde rajallinen. ORC-prosessin tehostamiseksi työssä tutkittiin, onko lämpöpumpun integroiminen osaksi tuotantoprosessia taloudellisesti ja teknisesti kannattavaa. ORC-prosessin lämpöhyötysuhde eli sen tuottaman sähköenergian määrä suhteessa vastaanotettuun hukkalämmön määrään, kasvaa hukkalämmön lämpötilan noustessa. Todettiin, että hukkalämmön lämpötilaa on mahdollista nostaa lämpöpumpulla, jolloin voidaan saavuttaa korkeampi ORC-prosessin lämpöhyötysuhde. Lämpöpumpun vaatima investointikustannus asettaa kuitenkin rajoitteita integraation taloudelliselle kannattavuudelle. Lämpöpumpun ja ORC-prosessin integroiminen datakeskuksen yhteyteen havaittiin olevan teknisesti mahdollista, mutta toistaiseksi taloudellisen kannattavuuden selvitys on haastavaa. Koska ORC-prosessin integraatio datakeskusympäristöön on suhteellisen tuore keksintö, sisältää laitteiston investointi- ja ylläpitokustannuksien selvittäminen runsaasti epävarmuustekijöitä. Teknisestä näkökulmasta työssä tutkittiin tärkeimmät laitteiston suunnittelua ja sen ylläpitoa koskevat seikat, jotka tulee ottaa huomioon onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi. Onnistunut ORC-järjestelmän integraatio edellyttää datakeskuksen jäähdytysjärjestelmästä alkaen huolellista suunnittelua ja tarkasti mitoitettua toimintaympäristöä.

---

**AVAINSANAT:** ORC-prosessi, Lämpöpumppu, Datakeskus, Palvelinkeskus, Hukkalämpö

---

**UNIVERSITY OF VAASA****School of Technology and Innovations**

<b>Author:</b>	Valtteri Lamminpohja		
<b>Title of the thesis:</b>	Converting Waste Heat from Data Centers into Electricity Using the ORC Process: Enhancing the ORC process with a Heat Pump		
<b>Degree:</b>	Master of Science		
<b>Degree Programme:</b>	Energy Engineering		
<b>Supervisor:</b>	Pekka Ruuskanen (University of Vaasa)		
<b>Instructors:</b>	Birgitta Martinkauppi (University of Vaasa) & Antti-Jussi Laine (Sweco Finland Oy)		
<b>Year:</b>	2026	<b>Pages:</b>	<b>104</b>

---

**ABSTRACT:**

The number of Data Centers and their electricity consumption are growing along with the growth in international demand for data processing. With the growth of the global Data Center industry, several Data Center investments have also been made in Finland by domestic and foreign companies. Finland is a suitable place to locate a Data Center due to its cool climate and the availability of affordable renewable electricity. Data Centers consume a large amount of electricity which ultimately turns into heat. This thermal energy, called waste heat, is being utilized in various ways. In Finland, waste heat is mainly utilized in the production of district heating. Other means of utilization should also be investigated due to the lack of the infrastructure required for district heating in several different areas where Data Centers may be located. In addition to the economic benefits, increasing national and international requirements also guide the investigation of the possibilities of utilizing waste heat as efficiently as possible. The aim of this thesis was to investigate an alternative in which the waste heat produced by Data Centers is utilized in the production of electricity. This electrical energy produced in the Data Center area through the ORC process could be utilized as part of the Data Center's electricity consumption.

Since the temperature of the waste heat from the Data Center is relatively low, the efficiency of electricity production is limited. To improve the efficiency of the ORC process, this thesis investigated whether integrating a heat pump into the production process is economically and technically viable. The thermal efficiency of the ORC process, i.e. the amount electrical energy it produces in relation to the amount of waste heat received, increases as the temperature of the waste heat increases. It was found that it is possible to raise the temperature of the waste heat with a heat pump, thereby achieving a higher thermal efficiency of the ORC process. However, the investment cost required by the heat pump places limitations on the economic viability of the integration. Integrating a heat pump and ORC process into a Data Center was found to be technically feasible, but so far, the economic viability is challenging to determine. Since the integration of the ORC process into the Data Center environment is a relatively recent invention, the evaluation of the investment and maintenance cost of the equipment contains a lot of uncertainty. From a technical perspective, the thesis examined the most important aspects of the equipment design and its maintenance that must be considered to achieve a successful outcome. Successful integration of the ORC system requires careful planning, starting with the Data Center cooling system, and a precisely dimensioned operating environment.

---

**KEYWORDS:** ORC process, Heat Pump, Data Center, Waste Heat

## **Alkusanat**

Tämän diplomityön laatiminen on ollut mielenkiintoinen kokonaisuus. Aihe on hyvin ajankohtainen ja siihen tutustuminen on antanut minulle arvokasta tietotaitoa, jota pystyn hyödyntämään tulevaisuudessa omalla työurallani. Kiitän Sweco Finlandia ja omia esihenkilöitäni joustavuudesta, joka on helpottanut huomattavasti työtehtävieni ja opiskeluideni yhteensovittamista. Kiitän työni ohjaajaa Swecolta avusta, jota olen saanut aina aiheen valitsemisesta alkaen. Apu on ollut erittäin ammattitaitoista.

Vaasan yliopistoa kiitän laadukkaasta opetuksesta ja mielenkiintoisesta opintokokonaisuudesta, joka on antanut hyvät lähtökohdat työelämässä menestymiseen. Työni ohjaajia Vaasan yliopistolta kiitän selkeästä ja johdonmukaisesta tiedonannosta, joka on mahdollistanut jouhevan diplomityöprosessin läpiviennin.

## Sisällys

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	4
1 Johdanto	9
2 Datakeskusten toiminta	11
2.1 Datakeskusliiketoiminta Suomessa	11
2.2 Datakeskusten sähkönkulutus Suomessa	13
2.3 Datakeskusten tunnusluvut	15
2.4 Datakeskusten jäähdytys	18
2.5 Hukkalämmön hyödyntämiskeinot	22
2.6 Lämpöpumpun toimintaperiaate	25
3 Hukkalämmön muuttaminen sähköksi	33
3.1 ORC-prosessi	33
3.2 ORC-prosessin integrointi datakeskukseen ja prosessiarvojen laskenta	39
3.3 ORC-prosessin kiertoaineen valinta	43
3.3.1 Esimerkkitapaus ORC-prosessin mallinnuksesta	47
4 Lämpöpumpun ja ORC-prosessin integraatio	55
4.1 Lämpöpumpulla tehostettu ORC-prosessi	55
4.2 Tekninen toteutus	56
4.2.1 Pinch-rajoitus	56
4.2.2 Laitteisto ja prosessin toiminta	60
4.3 Kiertoaineiden valinta ja prosessiarvojen laskenta	65
4.3.1 Esimerkkilaskelma	73
4.4 Taloudellinen tarkastelu	78
4.4.1 Taloudellisten tekijöiden laskenta	78
4.4.2 Kustannuksien määräytyminen	83
5 Johtopäätökset	91

5.1	ORC-prosessin ja lämpöpumpun integraation tekninen onnistuminen datakeskusympäristössä	91
5.2	ORC-prosessin ja lämpöpumpun integraation taloudellisen kannattavuuden selvitys	94
6	Yhteenveto	98
	Lähteet	99

## Kuvat

Kuva 1. Datakeskuksen ilmajäähdetyksen periaate .....	19
Kuva 2. Lämpöpumpun rakenne ja toiminta . .....	27
Kuva 3. Log-ph-diagrammin rakenne.....	29
Kuva 4. R410A <i>Log-ph</i> -diagrammi . .....	30
Kuva 5. Kylmäainekierron tilapisteet Log-ph-diagrammissa . .....	32
Kuva 6. Rankine-syklin toiminta .....	34
Kuva 7. ORC-prosessin toimintakaavio .....	35
Kuva 8. Märän (Wet), kuivan (Dry) ja isentrooppisen (Isentropic) kiertoaineen käyttäytyminen T-s–diagrammissa .....	37
Kuva 9. ORC-prosessin termodynaaminen sykli . .....	38
Kuva 10. Kaksivaiheisen nestejäähdytysjärjestelmän integraatio ORC-prosessiin. ....	40
Kuva 11. ORC-prosessin toimintapisteet entalpian ja paineen arvoina .....	41
Kuva 12. Epäsuora lämmöntalteenotto-prosessi .....	48
Kuva 13. Suora lämmöntalteenotto-prosessi .....	48
Kuva 14. ORC-prosessin toimintakaavio .....	49
Kuva 15. Pentaanilla saavutetut tulokset: kohdat a) entropia-lämpötila-diagrammissa, b) paineen ja hyötysuhteen osalta, c) lämpötilatasojen ja tuotetun energian osalta ja d) massavirtauksien osalta .....	50
Kuva 16. Isopentaanilla saavutetut tulokset: kohdat a) entropia-lämpötila-diagrammissa, b) paineen ja hyötysuhteen osalta, c) lämpötilatasojen ja tuotetun energian osalta ja d) massavirtauksien osalta .....	51
Kuva 17. Pinch-ilmiö eri höyrystymislämpötiloilla .....	57
Kuva 18. ORC-prosessiin integroitu lämpöpumppu .....	59
Kuva 19. Lämmönsiirron Pinch-piste . .....	60
Kuva 20. Lämpöpumpun periaatteella toimivan jäähdytyskierron ja ORC-prosessin integraatio kaksivaiheisen nestejäähdytyksen tapauksessa .....	61
Kuva 21. Erillisen lämpöpumpun ja ORC-prosessin integraatio .....	62
Kuva 22. Electratherm POWER MODULE75 .....	63
Kuva 23. Climeon HeatPower 300 . .....	64

Kuva 24. INTEC GMK Low temperature ORC Power Plant .....	64
Kuva 25. ElectraTherm POWER MODULE75 -laitteiston ruuvilaajennin ja generaattori	65
Kuva 26. Pinch-pisteiden analyysi .....	68
Kuva 27. Lämmönlähteen lämpötilan ja ORC-kiertoaineen massavirran vaikutus ORC- prosessin hyötysuhteeseen . .....	72
Kuva 28. Lauhtumislämpötilan vaikutus ORC-prosessin hyötysuhteeseen .....	73
Kuva 29. Yhteensopivat hukkalämmön ja ORC-kiertoaineen profiilit .....	74
Kuva 30. Epäsuhta hukkalämmön ja ORC-prosessin välillä, ilman lämpöpumppua .....	74
Kuva 31. R236fa ORC-kiertoaineella saavutetut tulokset .....	75
Kuva 32. R600a ORC-kiertoaineella saavutetut tulokset .....	76
Kuva 33. Lämpöpumppuavusteinen prosessi .....	77
Kuva 34. Takaisinmaksuaika eri höyrystyslämpötilan mukaan .....	84
Kuva 35. Tulojen nykyarvo eri höyrystyslämpötilan mukaan . .....	85
Kuva 36. Kokonaisinvestointikustannukset eri lauhtumislämpötilan mukaan . .....	86
Kuva 37. Nettotulot eri lauhtumislämpötilan mukaan .....	86
Kuva 38. Kokonaisinvestointikustannukset eri lämmönlähteen lämpötiloilla .....	87
Kuva 39. Nettotulot eri lämmönlähteen lämpötiloilla .....	87
Kuva 40. Tulojen nykyarvo eri lämmönlähteen lämpötiloilla .....	88
Kuva 41. LEC-arvot eri lämmönlähteen massavirroilla .....	89
Kuva 42. Tulojen nykyarvo eri lämmönlähteen massavirroilla .....	89

## Taulukot

Taulukko 1. Jäähdytysjärjestelmien lämpötilat .....	23
Taulukko 2. Matalalämpöiseen ORC-prosessiin mahdollisesti soveltuvia kiertoaineita	46

# 1 Johdanto

Keskustelu datakeskuksista ja niihin liittyvä liiketoiminta on noussut Suomessa viimeisten vuosien aikana hyvin näkyväksi ilmiöksi. Edellisen kymmenen vuoden aikana Suomeen on pystytetty useita datakeskuksia, ja vauhti on ainakin toistaiseksi jatkunut hurjana (Markkanen, 2025). Vaikka datakeskusinvestoinnit ulkomaisten yritysten toimesta tuovatkin verotuloja ja työpaikkoja Suomeen, piilee ”datakeskushuumassa” myös omat ongelmansa. Erityisesti datakeskusten suuri sähkönkulutus aiheuttaa huolta Suomen sähköntuotannon ja sähköverkon kantokyvyssä. Huolta herättää myös datakeskusten omistavien yritysten taustat ja niiden keräämän datan ja tonttikauppojen tarkoitusperät (Hänninen & Roslund, 2025; Mäntysalo, 2025; Tolkki, 2025).

Datakeskusten kuluttama sähköenergia muuttuu lopulta lämpöenergiaksi. Tätä hukkalämmöksi kutsuttua energiaa pystytään Suomessa hyödyntämään tehokkaasti viileän ilmaston vuoksi. Suurin mielenkiinto eri hyödyntämisvaihtoehdoista on kohdistunut kaukolämpöön, jonka tuottamiseen Suomessa jo useassa tapauksessa hyödynnetään hukkalämmönlähteitä, myös datakeskuksia (Tauriainen & Kähkönen, 2024; Juuti, 2023). Mikäli datakeskusten määrä jatkuvasti kasvaa ja niitä sijoitetaan kauemmaksi asutuskeskuksista, on niistä saatavan hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa kuitenkin hankalaa kaukolämpöverkoston vaatiman infrastruktuurin vuoksi. Kaukolämmön kysyntä on myös hyvin vuodenajasta riippuvaista, eikä lämpimään aikaan vuodesta lämpöenergialle ole välttämättä kysyntää. Tästä syystä on pohdittava myös muita hukkalämmön hyödyntämisen keinoja kaukolämmön tuotannon tilalle, tai sen rinnalle. Oman haasteensa asettaa myös datakeskuksista saatavan hukkalämmön suhteellisen matala (alle 90 °C) lämpötila.

Tässä työssä tutkitaan datakeskusten tuottaman hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia sähkön tuotannossa Organic Rankine Cycle (ORC) -prosessin avulla. Mielenkiinto aiheen tiimoilla on viime vuosina noussut datakeskusten hukkalämpöjen uusien hyödyntämismahdollisuuksien tutkimuksen myötä, mutta ORC-prosesseja datakeskuksen yhteydessä on toistaiseksi tutkittu verrattain vähän. ORC-

prosessissa matala- tai keskilämpöinen lämpöenergia pystytään muuttamaan sähköenergiaksi hukkalämmön avulla höyrytetyn orgaanisen kiertoaineen pyörittäessä turbiinia, johon on kytketty sähköä tuottava generaattori (Loni ja muut, 2020, s. 2–3). ORC-prosessilla voitaisiin tuottaa sähköä datakeskuksen omaan käyttöön tai tarvittaessa syöttää sitä myös valtakunnan sähköverkkoon. Onnistuneella datakeskuksen yhteyteen integroidulla ORC-prosessilla pystyttäisiin vähentämään datakeskuksen valtakunnallisesta sähköverkosta syötetyn sähköenergian kysynnän määrää ja käyttämään hukkalämpöä hyödyksi vuoden ympäri.

Työn tavoitteena on selvittää, pystytäänkö datakeskusten hukkalämmöstä tuottamaan integroidulla ORC-prosessilla sähköä ja pystytäänkö tätä prosessia tehostamaan lämpöpumpulla. Selvitettävänä on näiden järjestelmien teknisen toteutuksen onnistuminen, toteutuksen taloudellisen investoinnin ja ylläpidon kannattavuus sekä mahdolliset seuraukset datakeskusten ulkoisen sähkön kysynnän muuttumisessa.

Tutkimusaihe on verrattain uusi ja siihen liittyvä tutkimustieto on pääsääntöisesti uutta. Tutkimus toteutetaan monimenetelmällisellä tutkimusmenetelmällä, missä yhdistellään kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tutkimuksen menetelmiä. Tutkimuksen aineistonkeruumenetelmä pohjautuu valmiisiin dokumentteihin, joita aiheeseen liittyen on laadittu. Aineistoa hankintaan tutustumalla kirjallisuuteen ja tieteellisiin tutkimuksiin aiheen eri osa-alueista, jotka koostetaan yhteen ja muodostetaan tutkimuksen kohteesta kokonaiskuva.

## 2 Datakeskusten toiminta

Datakeskus eli palvelinkeskus on fyysinen rakennus, jonka sisällä on suuri määrä tietotekniikkaa. Tietotekniikka koostuu tietokoneista, verkkolaitteista ja muista internetiin yhteydessä olevista palvelimista. Datakeskuksissa säilötään internetin tietomäärää, niiden toimiessa tiedon tallennus- ja käsittelytilana (Koistinen, 2015). Datakeskuksen sisällä verkkolaitteet ja muut IT-varusteet kootaan päällekkäin palvelinkaappeihin eli räkkeihin, joita sijoitetaan vierekkäin riveihin. Palvelinkaappi on noin kaksi metriä korkea, puoli metriä leveä ja metrin syvä standardoitu metallikaappi. Palvelinkaappeja on samassa rivissä riippuen datakeskuksen koosta useimmiten 6–20. Palvelinkaappien kokonaismäärä riippuu datakeskuksen koosta. Palvelinkaappien lisäksi datakeskuksen sisällä on tehokas ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmä, varavoimajärjestelmä ja mahdollisesti muita tiloja esimerkiksi henkilökunnalle. Palvelimet ja muu laitteisto kuluttavat paljon sähköä muuttaen sen lämmöksi, joten tehokkaasta jäähdytyksestä on huolehdittava, jotta sisälämpötila ei nouse laitteistolle liian korkeaksi. Datakeskukset ovat rakennuksina tyyppillisesti simppeleitä, sillä niiden käyttötarkoituksena on lähtökohtaisesti vain toimia keskitettynä verkkolaitteiston, palvelininfrastruktuurin ja niiden vaatiman taloteknisten järjestelmien sijoituspaikkana.

### 2.1 Datakeskusliiketoiminta Suomessa

Suomeen on noussut edellisen kymmenen vuoden aikana runsaasti datakeskuksia. Suomi on otollinen paikka sijoittaa datakeskus, sillä Suomessa on tarjolla runsaasti kohtuuhintaista uusiutuvaa sähköenergiaa, joka on päästötasoiltaan alhaista. Suomessa on myös paljon tilaa, kehittynyt kantaverkko, runsaasti vettä, vähäinen riski maanjäristyksille ja muille luonnonkatastrofeille sekä viileä ilmasto, joka vähentää datakeskuksen jäähdytykseen tarvittavaa energiaa ja mahdollistaa tehokkaan hukkalämpöjen hyödyntämisen (Lehtilä & Aaltonen, 2025).

Datakeskusten tarkkaa määrää Suomessa on vaikea sanoa. Datakeskuksia on kooltaan hyvin erilaisia aina pienistä konesaleista jättimäisiin keskuksiin, eikä yhtenäistä listaa

kaikista Suomessa sijaitsevista datakeskuksista ole saatavilla. Gyntherin ja muiden (2022, s. 7–8) laatimassa tutkielmassa esitellään erilaisia verkkopalveluita, joihin on listattu Suomessa sijaitsevia datakeskuksia. Verkkopalveluiden kesken on kuitenkin eroja datakeskusten määrissä, eikä niiden tiedot ole täysin kattavia. Suuria ja keskisuuria datakeskuksia, joihin ei lasketa yritysten omia konesaleja, sijaitsee Suomessa arviolta 30. Suureksi katsotun datakeskuksen raja on häilyvä, mutta usein yli 10 MW sähkönteholtaan olevat datakeskukset luetellaan merkittävän kokoiseksi. Niin kutsuttujen ”Hyperskaala” -kokoluokan datakeskusten sähköteho voi olla useita satoja megawatteja.

Lehtilän ja Aaltosen (2025) laatimassa jutussa eritellään Suomessa tällä hetkellä käynnissä olevien uusien datakeskushankkeiden määrää. Elinkeinoelämän keskusliiton (EK) tietoon tuli vuonna 2024 22 uutta datakeskushanketta, kun taas syyskuun loppuun mennessä vuonna 2025 käynnistettyjä hankkeita oli jo 35 (EK, 2025). Todellinen lukema voi olla tätäkin suurempi, sillä kaikki hankkeet eivät ole julkisesti listattuja. Pietarilan (2025) koostamassa artikkelissa Fingridin asiakaspäällikkö Petri Parviainen arvioi, että datakeskusten liityntäkyselyitä on artikkelin kirjoitushetkellä vireillä noin satakunta. On odotettavissa, että datakeskushankkeiden määrä jatkaa kasvuaan, sillä maailmanlaajuinen digitalisaatio ja tekoälyn kysynnän kasvu vaativat jatkuvasti lisää tiedon prosessointikapasiteettia (Lehtilä ja Aaltonen, 2025).

Datakeskushankkeiden toivotaan tuovan Suomeen työllisyyttä sekä verotuloja. Ulkomaisia toimijoita houkutellaankin investoimaan Suomeen muun muassa veroeduilla. Datakeskukset ovat kuuluneet Suomessa alempaan sähköveron veroluokkaan 2, jossa energiavero on 0,05 snt/kWh. Vuoden 2025 keväällä Suomen hallitus ilmoitti, että datakeskukset nostettaisiin yleisen sähköveroluokan 1 piiriin, jossa vero olisi 2,24 snt/kWh. Molemmissa veroluokissa energiaveron lisäksi maksetaan 0,013 snt/kWh huoltovarmuusmaksua, joka nostaa kokonaissähköveron määräksi 2,253 snt/kWh veroluokassa 1 ja 0,063 snt/kWh veroluokassa 2 (Verohallinto, 2023). Hallitus jäädytti muutama kuukausi myöhemmin uudistuksen datakeskus-alan voimakkaan vastareaktion

seurauksena (Mäntylä, 2025). Sähköveroluokan noston pelättiin karkottavan ulkomaisten toimijoiden datakeskushankkeita Suomesta. Työn kirjoitushetkellä keskustelu datakeskusten nostamisesta yleisen sähköveroluokan piiriin käy kuitenkin edelleen kiivaana, ja lokakuussa 2025 tilanne on se, että veroetu korvataan muilla tuilla tai kannustimilla ja datakeskukset nostetaan yleisen sähköveroluokan piiriin 1.7.2026 alkaen (Hakahuhta, 2025). Verohelpotuksen tilalle tulevasta tuista ei kirjoitushetkellä ole tarkempaa tietoa.

Vastustusta datakeskushankkeille myös löytyy. Aalto-yliopiston tietoverkkotekniikan professori Jukka Manner kertoo Markkasen (2025) laatimassa jutussa, että Suomen saama hyöty ulkomaisten toimijoiden pystyttämistä datakeskuksista on pieni. Mannerin mukaan datakeskusten suurimmat rahavirrat ohjautuvat laitehankintojen ja liiketoiminnan tulojen muodossa muualle kuin Suomeen. Lehtilän ja Aaltosen (2025) koostamassa jutussa Business Finlandin vanhempi neuvonantaja Jouni Salonen arvioi, että vain 20–30 % datakeskusten investointihinnasta päättyy Suomeen, Mannerin arvioidessa Suomeen päätyvän osuuden olevan noin 10 % luokkaa. Markkasen (2025) laatimassa jutussa on myös tutkittu datakeskustoimijoiden työllistävää vaikutusta ja verojen maksua Suomeen. Muun muassa Haminassa sijaitsevan Googlen datakeskusten operoinnista vastaava Tuike Finland ei ole maksanut yhteisöveroa joinakin vuosina lainkaan. Datakeskus on kooltaan Suomen suurimpia, työllistäen 103 henkilöä vuonna 2023. Kaikkiaan Haminan datakeskus-kompleksin kerrotaan työllistävän yli 400 henkilöä, kun mukaan lasketaan muun muassa siivoojat ja vartijat (Markkanen, 2025).

## **2.2 Datakeskusten sähkönkulutus Suomessa**

Datakeskuksille on ominaista niiden suuri sähkönkulutus. Coriglianon ja muiden (2024, s. 4) mukaan nykyiset datakeskusten serverit vaativat sähköenergiaa noin 0,5–2 kW/m<sup>2</sup>, muodostaen n. 30 kW tehontarpeen palvelinkaappia kohden. Sähkötehon tarve vaihtelee datakeskuksen serverien kuormituksen mukaan, mutta tyhjäkäynnilläkin serverit kuluttavat noin 60 % täydestä tehon tarpeesta. Datakeskukset, joiden sisätilat on hyödynnetty tiheästi, saattavat kuluttaa sähköenergiaa 40 kW/m<sup>2</sup> rakennettua pinta-

alaa kohden ja erittäin tiheästi rakennetut datakeskukset jopa 96 kW/m<sup>2</sup>. Datakeskuksen sähkönkulutus koostuu pääosin IT-laitteiston sekä ilmanvaihdon ja jäähdytyksen sähkönkulutuksesta. IT-laitteistot tuottavat paljon lämpöä, joten jäähdytys saattaa muodostaa jopa 30–50 % datakeskuksen kokonaissähköenergian kulutuksesta (Corigliano ja muut, 2024, s. 4–5).

Vuodesta 2014 alkaen yli 5 MW sähköteholtaan olevat datakeskukset ovat kuuluneet Suomessa alemman veroluokan piiriin. Verohallinto on kerännyt alempaan veroluokkaan kuuluvien datakeskusten kulutustietoja ja vuonna 2019 nämä yli 5 MW tehoiset datakeskukset kuluttivat yhteensä noin 787 GWh sähköä, joka vastasi noin yhtä prosenttia Suomen kokonaissähkönkulutuksesta (Gynther ja muut, 2022, s. 9). Vuodesta 2022 lähtien tehorajoitus poistettiin ja kaikki datakeskukset liitettiin osaksi alempaa veroluokkaa. Vuonna 2024 datakeskusten sähkönkulutus oli noin 1,66 TWh ja se vastasi noin 2 % osuutta Suomen sähkönkulutuksesta, kokonaiskulutuksen ollessa Suomessa n. 83 TWh (FDCA, 2025). Fingridin (2025) ennusteen mukaan Suomen sähkönkulutus tulisi kasvamaan noin 103–123 Terawattituntiin vuoteen 2030 ja 104–159 Terawattituntiin vuoteen 2035 mennessä. Vastaavasti sähkön tuotanto kasvaisi Suomessa 108–122 Terawattituntiin vuoteen 2030 ja 120–169 Terawattituntiin vuoteen 2035 mennessä. Datakeskukset, vihreä teollisuus eli vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotanto, sekä muu teollisuus vastaavat n. 60 % syntyvästä kysynnän kasvusta. Tuotannon kasvu koostuu ensisijaisesti tuulivoimasta sekä lisääntyvästä aurinkovoimasta ja ydinvoiman tehon korotuksista (Fingrid, 2025). FDCA:n ennusteen mukaan datakeskusten sähkönkulutus voi nousta noin 4 % osuuteen Suomen sähkönkulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. On kuitenkin huomioitava, että nyky maailman ennustettavuus on hankalaa ja erityisesti ennusteet tiedon prosessoinnin vaatimasta sähkönkulutuksen kehityksestä voivat muuttua radikaalisti.

Koska datakeskusyhtiöt tyypillisesti tekevät energiayhtiöiden kanssa monivuotisia sopimuksia, jolla takaavat käyttämällensä sähköenergialle kiinteän hinnan, datakeskusten sähkönkulutuksen ei odoteta olevan joustavaa. Tämä voi tulevaisuudessa

aiheuttaa haasteita, kun sähköntuotannossa siirrytään entistä enemmän sääriippuvaisen tuulivoiman varaan (Markkanen, 2025). Lisääntyvä sähkönkulutus asettaa myös sähkön siirtokapasiteetille vaatimuksia, kun paljon sähköä kuluttavat datakeskukset sijaitsevat kaukana sähkön tuotantopaikasta. Esimerkiksi vuosina 2025–2027 Fingrid aikoo rajoittaa Etelä-Suomessa sijaitsevien yli 10 MW teholtaan olevien laitoksien liittämistä sähköverkkoon siirtoverkon kapasiteetin rajallisuuden vuoksi (Pietarila, 2025). Uudet datakeskukset pyritään liittämään suoraan kantaverkkoon, joka ohjaa niiden sijainnin mahdollisimman lähelle olemassa tai rakenteilla olevia suurjännitelinjoja, sillä suuret datakeskukset voivat olla sähköteholtaan jopa useita satoja megawatteja. Suuruusluokan hahmottamiseksi Markkasen (2025) laatimassa jutussa on esitelty vertaus, jossa sähköteholtaan 200 MW hyperskaalan-luokan datakeskuksen vuosittainen sähkönkulutus voi täydellä teholla olla jopa 1 752 000 MWh (= 1,752 TWh), vastaten 87 600 omakotitalon vuotuista sähkönkulutusta. Tämän sähköenergian tuottamiseksi vaaditaan 117 keskimäärin 15 000 MWh sähköä vuodessa tuottavaa tuulivoimalaa.

### **2.3 Datakeskusten tunnusluvut**

Sähköntuotannon ja sähköverkon kuormituksen näkökulmasta datakeskuksen sähköteho on tärkein tarkasteltava suure. Vaikka sähköteho kertoo datakeskuksen koosta, on datakeskusten vertailu keskenään pelkästään sen valossa haastavaa. Pelkkä sähköteho ei kerro kuinka suuri osa energiasta kuluu datakeskuksen jäähdytykseen, kuinka tehokkaasti datakeskuksen hukkalämpöä pystytään hyödyntämään tai kuinka paljon päästöjä datakeskuksen toimintaan käytetyn sähköenergian tuotanto on aiheuttanut. Tähän tarpeeseen on kehitetty kansainvälisiä tunnuslukuja, indikaattoreita, joiden avulla pystytään vertailemaan eri datakeskusten energiankulutusta, hukkalämmön hyödyntämistä ja niiden käyttämän energian alkuperää keskenään. Eri indikaattorien laskentaohjeita ja niiden hyödyntämistä on esitelty kansainvälisessä standardissa ISO/IEC 30134 Information technology – Data centres – Key performance indicators (ISO/IEC 30134) ja Euroopan standardissa EN 50600 Information technology – Data centre facilities and infrastructures (SFS, 2017). Vaikka indikaattorien on tarkoitus olla

vertailukelpoisia erikokoisten ja eri paikassa sijaitsevien datakeskusten kesken, on niiden laskennassa kuitenkin usein tulkinnanvaraisuutta.

Standardissa ISO/IEC 30134 määritellään laskentamenetelmät muun muassa Power Usage Effectiveness; *PUE*:n (ISO/IEC 30134-2:2016), Renewable Energy Factor; *REF*:n (ISO/IEC 30134-3:2016), Energy Reuse Factor; *ERF*:n (ISO/IEC 30134-6:2021), Cooling Effectiveness ratio; *CER*:n (ISO/IEC 30134-7:2023), Carbon Usage Effectiveness; *CUE*:n (ISO/IEC 30134-8:2022) ja Water Usage Effectiveness; *WUE*:n (ISO/IEC 30134-9:2022), laskentaan. Laskentakaavat on esitelty alla kaavoissa 1–6.

$$PUE = \frac{\text{Datakeskuksen kokonaissähköteho}}{\text{Datakeskuksen IT-laitteiden sähköteho}}, \quad (1)$$

missä *PUE*:n teoreettinen miniarvo on 1.

Globaalisti datakeskusten *PUE*-arvo vuonna 2021 oli keskimäärin 1,57. Euroopan unionin asettamien tavoitteiden mukaisesti vuodesta 2025 lähtien uusien yli 50 kW sähköteholtaan olevien datakeskusten *PUE*-arvon tulisi olla kylmän ilmaston alueella (ml. Suomi) korkeintaan 1,3 ja lämpimän ilmaston alueella 1,4 (EUDCA, 2025a).

$$REF = \frac{\text{Datakeskuksessa käytetyn uusiutuvan sähkön määrä}}{\text{Datakeskuksen kokonaisenergiankulutus}}, \quad (2)$$

missä *REF*:n teoreettinen maksimiarvo on 1.

$$ERF = \frac{\text{Hyödynnetyn datakeskuksen hukkalämmön määrä}}{\text{Datakeskuksen kokonaisenergiankulutus}}, \quad (3)$$

missä *ERF* saa arvoja 0–1 välillä.

$$CER = \frac{Q \text{ (poistettu)}}{E \text{ (jäähdytys)}}, \quad (4)$$

missä

$Q$  (poistettu) = vuotuinen poistettu lämpömäärä datakeskuksesta (kWh)

$E$  (jäähdytys) = vuotuinen datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus (kWh).

$$CUE = \frac{\text{Datakeskuksen } CO_2 \text{ päästöt (kgCO}_2\text{eq)}}{\text{energian yksikkö (kWh)}} \times PUE, \quad (5)$$

missä teoreettinen *CUE*:n minimiarvo on 0.

$$WUE = \frac{\text{Datakeskuksen vuotuinen vedenkäytön määrä (m}^3\text{)}}{\text{Datakeskuksen IT-laitteiden sähköenergian kulutus (kWh)}}. \quad (6)$$

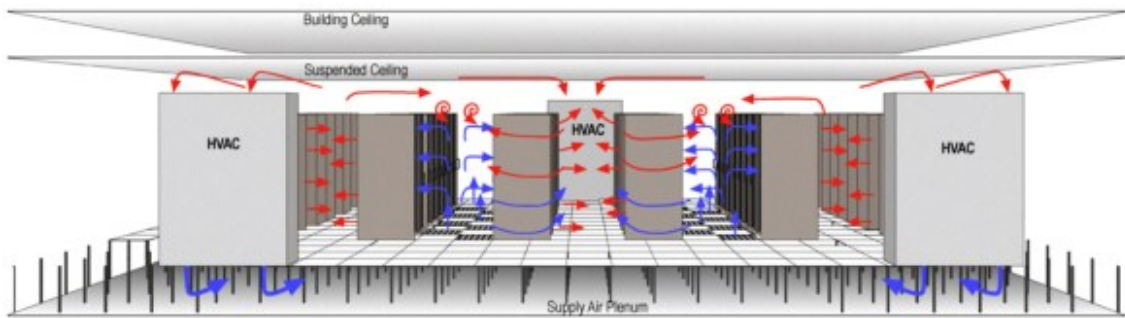
Vaikka yllä esiteltyjä indikaattorien avulla on pyritty yhtenäistämään datakeskuksiin liittyvien tunnuslukujen laskentaa, on yhtenäinen kansallisen ja kansainvälisen tason valvonta indikaattorien toteutumisesta haastavaa. Gyntherin ja muiden (2022, s. 14) mukaan datakeskusalalla on esiintynyt paljon keskustelua siitä, miten kestävän kehityksen tavoitteiden mukaisia indikaattoreita tulisi painottaa ja valvoa tai kuinka tulisi toimia tilanteissa, joissa jotkin indikaattorit ovat ristiriidassa keskenään. On myös epäselvää, kuinka tulisi suhtautua alueellisiin eroihin esimerkiksi jäähdytykseen käytettävän veden saatavuudessa. *WUE*-arvo ei ole kriittinen tekijä esimerkiksi Suomessa, missä vettä on saatavilla runsaasti.

Osana päivitettyä EU-alueen energiatehokkuusdirektiiviä, EED-direktiiviä, vuoden 2024 alusta lähtien Euroopan unioni on vaatinut tarkempaa raportointia datakeskusten energiankulutukseen liittyen. Kaikki IT-laitteiston teholtaan yli 500 kW olevat EU:n alueella sijaitsevat datakeskukset ovat velvoitettu raportoimaan keskeisten indikaattorien arvoista joko kansalliselle viranomaiselle, mikäli EED-direktiivi on jo otettu kansallisella tasolla osaksi lainsäädäntöä, tai suoraan Euroopan unionin datakeskustietokantaan (EUDCA, 2025b). Raportointivastuun lisäksi on toistaiseksi kuitenkin vielä määrittelemättä tarkat raja-arvot indikaattoreille ja mahdolliset seuraamukset mikäli datakeskus ei määritelmiä täytä. Vaatimuksien toteutumisen seuraaminen ja niistä seuraavat toimenpiteet tulevat pitkälti olemaan EU:n jäsenvaltioiden itse päätettävissä, ja muun muassa Suomessa lainsäädännön valmistelu on vielä kesken.

## 2.4 Datakeskusten jäähdytys

Käytännössä kaikki datakeskuksen kuluttama sähkö muuttuu lämmöksi. Tämä lämpö tulee datakeskuksesta siirtää muualle, jotta olosuhde datakeskuksen sisällä pysyy laitteistolle sopivana. Lämpötilan lisäksi myös sisäilman kosteutta tulee pystyä hallitsemaan ilmanvaihdon ja jäähdytyksen avulla. Sisäilman kosteus ei saa olla liian suuri laitteiston vaurioitumisen riskin vuoksi, eikä liian alhainen staattisen sähkön syntymisen riskin vuoksi. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 2021, s.5) julkaisemien suositusten mukaan datakeskuksen sisälämpötilan tulisi yleisesti ottaen olla 15 °C – 32 °C ja sisäilman suhteellinen kosteus 20 % – 80 % datakeskusten koosta ja tyypistä riippuen. Palvelintelineissä sijaitsevien prosessorien lämpötilan maksimirajana pidetään 85 °C. Eri arvioiden mukaan 30–50 % datakeskusten kuluttamasta sähköstä kuluu ilmanvaihtoon, jäähdytykseen ja sisäilman kosteuden hallintaan (Alkrush ja muut, 2024, s.2; Corigliano ja muut 2024, s 4).

Datakeskusten jäähdytysjärjestelminä on perinteisesti käytetty kolmea eri vaihtoehtoa; ilmajäähdytystä, yksivaiheista nestemäistä jäähdytystä tai kaksivaiheista nestemäistä jäähdytystä (Corigliano ja muut, 2024, s. 5–6). Näistä ilmajäähdytys on toistaiseksi ollut suosituin sen yksinkertaisuuden vuoksi, muodostaen noin 70 % globaalista käytöstä. Ilmajäähdytyksessä nimensä mukaisesti datakeskuksen IT-laitteiston tuottama lämpö poistetaan kierrätettävän ilman avulla. Ilmajäähdytyksessä tavoitteena on luoda palvelintelineiden eli rakkien muodostamien rivien väleihin paikalliset kylmä- ja kuumakäytävät, jossa lattian alle tai kattoon sijoitettujen ilmanvaihtokanavien kautta viileää ilmaa puhalletaan palvelinkaappien etupuolella olevalle kylmäkäytävälle (eng. cold aisle). Viileä ilma liikkuu palvelinkaappien lävitse absorboiden lämpöä itseensä ja kulkeutuu kaappien takapuolella olevalle kuumakäytävälle (eng. hot aisle). Kuvan 1 periaatteen mukaisesti kuumakäytävällä lämmennyt ilma imetään poistoilmakanavaan ja ohjataan takaisin jäähdytettäväksi CRAC (Computer Room Air Conditioner) -laitteiden avulla. Onnistuneen ilmajäähdytyksen aikaansaamiseksi palvelinkaapit tulee asetella riveissä samansuuntaisesti eli etupuoli kylmäkäytävää kohden.



**Kuva 1.** Datakeskuksen ilmajäähdytyksen periaate (Corigliano ja muut, 2024, s. 6).

CRAC-laitteet, joista suomen kielessä käytetään toisinaan termiä vakioilmastointikone, vastaavat datakeskuksen sisäolosuhteiden hallinnasta niiden ylläpitäessä IT-laitteistolle sopiva lämpötila sekä ilmankosteus. CRAC-laitteet toimivat suoraan höyrystyvän kylmäaineen kiertosykliä, missä puhallin ohjaa kanavistosta tulevan kuumakäytävältä poistetun palvelinkaappien lämmittämän ilman jäähdytyspatterin läpi, jossa se luovuttaa lämpöä patterissa kiertävään kylmäaineeseen. Lämmennyt kylmäaine viilennetään ulkoilmassa sijaitsevan lauhduttimen avulla ja kierrätetään putkistoa pitkin takaisin jäähdytyspatteriin (Kirvan ja Gillis, 2025). Tyypillisesti kylmäkäytävälle puhallettavan viileän ilman lämpötila on n. 25 °C ja palvelinkaappien läpi kulkeneen, kuumakäytävältä poistettavan ilman lämpötila on n. 40 °C (Ebrahim ja muut, 2014, s. 5).

Ilmajäähdytys voidaan myös toteuttaa CRAH (Computer Room Air Handler) -laitteistolla. Siinä missä CRAC-laitteen jäähdytyspatterissa kiertää kompressorivusteisesti kylmäaine, CRAH-laitteen jäähdytyspatterissa kierrätetään pumpun ja säätöventtiilien avulla vettä tai vesi-glykoli-seosta. Toimintaperiaate on sama, eli palvelinkaappien läpi kulkenut lämmennyt ilma ohjataan CRAH-laitteeseen ja sen jäähdytyspatterin lävitse, jossa kylmäaineen sijasta siinä kiertävään veteen tai vesi-glykoli-seokseen ilma luovuttaa lämpöä. (Kirvan ja Gillis, 2025) CRAH-järjestelmä voidaan toteuttaa vedenjäähdytyskoneen avulla, jossa jäähdytyksen paluuilma lämpöä vastaanottanut neste johdetaan ulkoilmassa sijaitsevalle vedenjäähdytyskoneelle. Vedenjäähdytyskoneen höyrystimessä neste luovuttaa lämpöä koneikon sisällä

kiertävään kylmäaineeseen. Vedenjäähdytinkoneen lauhduttimessa puhaltimet kierrättävät ulkoilmaa kylmäaineputkiston väleistä, jonka avulla vedestä lämpöä vastaanottanut kylmäaine siirtää lämmön ulkoilmaan ja jäähtyy. Vedenjäähdytyskone voi olla myös sisäasenteinen, jolloin ulos asennetaan erillinen nestejäähdytin. Nestejäähdyttimen ja sisäasenteisen vedenjäähdytyskoneen välillä kiertää pohjoisen olosuhteissa tyypillisesti vesi-glykoliseos.

CRAH-laitteistolta tuleva vesi voidaan jäähdyttää myös rakennuksen sisällä erillisessä jäähdyttimessä, joka koostuu niin ikään höyrystimestä ja lauhduttimesta. Sisätiloissa olevan jäähdyttimen höyrystimessä CRAH-laitteilta tulevalta vedeltä lämpöä vastaanottanut kylmäaine siirtää lauhduttimessa lämmön toiseen vesikiertoon, joka kiertää lauhduttimen ja jäähdytystornin välillä. Lauhduttimessa vesikierto lämpenee ja se ohjataan jäähdytystorniin, jossa vesi luovuttaa lämpöä ulkoilmaan (The Engineering Mindset, 2022). CRAH-laitteet eivät tarvitse toimiakseen kompressoria, joka vähentää oleellisesti laitteiston sähkönkulutusta. Tästä syystä erityisesti suuret, yli 200 kW sähkötehoaltaan olevat datakeskukset, hyödyntävät useimmiten CRAH-järjestelmää ilmajäähdytyksen toteutuksessa (Kirvan ja Gillis, 2025).

Ebrahimin ja muiden (2014, s. 4) esittämien arvioiden mukaan hyvin tiheästi täytettyjen datakeskusten IT-laitteiston lämmöntuotanto voi olla jopa  $100 \text{ W/cm}^2$  ja koska ilmajäähdytyksen kapasiteetiksi arvioidaan noin  $37 \text{ W/cm}^2$ , on mahdollisesti tarpeen hyödyntää muita jäähdytyksen keinoja joko ilmajäähdytyksen tilalla tai sen rinnalla. Tällöin kysymykseen tulee nestemäinen jäähdytys, joka on ilmajäähdytystä tehokkaampi. Nestemäisen jäähdytyksen tehokkuus perustuu nesteen ilmaa korkeampaan lämmönsiirtokerrotimeen, jonka vuoksi jäähdytykseen käytettävän nesteen lämpötila on voi olla korkeampi kuin ilmajäähdytteisessä järjestelmässä kiertävän veden, mahdollistaen korkeampilaatuisen lämmöntalteenoton. Jäähdytykseen käytettävien nesteiden ilmaa korkeampi lämmönsiirtokerroin on seurausta nesteiden korkeammasta tiheydestä, korkeammasta ominaislämpökapasiteetista, paremmasta lämmönjohtavuudesta sekä tehokkaammasta lämmönsiirrosta konvektion avulla.

Ilmajäähdetyksen CRAH-laitteistossa kiertävän veden lämpötila voi olla suurimmillaan noin 35 °C kun taas suoraan palvelintelineissä kiertävän nesteen paluulämpötila voi olla jopa 75 °C (Corigliano ja muut, 2024, s. 5).

Yksivaiheinen nestemäinen jäähditys voidaan toteuttaa palvelintelineissä kiertävällä putkistolla. Putkistossa kiertävä jäähditysneste, useimmiten vesi, absorboi palvelimien tuottamaa lämpöä ja nesteen lämpötila nousee. Lämmennyt neste jäähdytetään esimerkiksi ulkoilman avulla. Nestettä kierrätetään jatkuvasti palvelintelineissä, jotta tasainen jäähditys varmistetaan. Jäähditysnesteen korkean lämmönsiirtokapasiteetin vuoksi nesteen lämpötilan ei tarvitse nousta kuin n. 10 °C tehokkaan jäähdityksen aikaansaamiseksi (Alkrush ja muut, 2024, s. 10). Tämän vuoksi jäähdityspotkistoon syötettävän nesteen lämpötila voi olla ennen palvelintelineitä jopa yli 60 °C, silti saavuttaen tarvittavan jäähditystehon. Palvelintilasta palaavan nesteen lämpötila on tyypillisesti noin 70–75 °C. Yksivaiheinen nestemäinen jäähditys voidaan toteuttaa myös upottamalla palvelinteline suoraan jäähdyttävään sähköä johtamattomaan dielektriseen nesteeseen (engl. immersion cooling), jossa tuotettu lämpö siirtyy suoraan palvelintelinettä ympäröivään nesteeseen. Uputusjäähditys on tehokas, mutta sen vaatiman erityisen nesteen vuoksi kallis jäähdityskeino. Nestemäiset jäähditykset toteutetaan usein normaalilla vedellä, joka osaltaan vaikuttaa *WUE*-arvoon. Suomessa pääsääntöisesti vettä on hyvin saatavilla, joten vesikiertoisia nestejäähdytyksiä pystytään toteuttamaan.

Mikäli vaaditaan huomattavan suuria jäähditystehoja, on kaksivaiheinen nestemäinen jäähditys vielä yksivaiheista nestemäistä jäähditystä tehokkaampi. Kaksivaiheinen nestemäisen jäähditys toteutetaan kylmäaineella, jonka lämmönsiirtokerroin on vettä korkeampi. Kaksivaiheisessa nestemäisessä jäähdityksessä hyödynnetään putkistossa kiertävän kylmäaineen olomuodon muutoksia suuren jäähditystehon aikaansaamisessa. Kaksivaiheisessa nestemäisessä jäähdityksessä pystytään siis sitomaan myös latenttilämpö ja sillä voidaan täten saavuttaa korkeat jäähditystehot sen pystyessä poistamaan lämpöä jopa  $0,8 \text{ kW/cm}^2 - 27 \text{ kW/cm}^2$  (Corigliano ja muut, 2024, s. 6).

Kaksivaiheinen nestemäinen jäähdytys pystytään toteuttamaan neljä kertaa pienemmillä massavirroilla ja kymmenen kertaa pienemmillä pumppaustehoilla yksivaiheiseen nestejäähdytykseen verrattuna. Kaksivaiheisen nestejäähdytyksen kylmäaineen paluulämpötila palvelinkaappien jälkeen on samaa luokkaa kuin yksivaiheisessa nestejäähdytyksessä, sen ollessa maksimissaan noin 80 °C. Toistaiseksi kaksivaiheista nestemäistä jäähdytystä on kansainvälisesti hyödynnetty vähemmän sen monimutkaisemmasta toiminnasta ja korkeammasta hinnasta johtuen.

## **2.5 Hukkalämmön hyödyntämiskeinot**

Suomessa datakeskukset kuluttavat yhteensä sähköenergiaa eri arvioiden mukaan n. 1,5–2 TWh, joten saatavilla olevan hukkalämpöenergian määrä on huomattava. Kiristyvien ympäristövaatimusten vuoksi datakeskuksissa muodostuvaa hukkalämpöä tulisi pystyä käyttämään hyödyksi, mielellään mahdollisimman kustannustehokkaasti. Datakeskusten tuottaman hukkalämmön ongelma on kuitenkin sen alhainen laatu eli alhainen lämpötila. Palvelinkaapeissa sijaitsevien prosessorien maksimilämpötilana pidetään n. 85 °C, joka rajoittaa tätä korkeampien jäähdytyksen paluuvirtojen lämpötilaa. Datakeskuksen jäähdytysjärjestelmä vaikuttaa suuresti hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin, sillä esimerkiksi yksivaiheisella nestejäähdytyksellä saavutettavat korkeammat jäähdytysnesteen paluulämpötilat ovat helpommin hyödynnettävissä kuin ilmajäähdytyksen aikaansaamat alhaisemmat paluunesteen lämpötilat. Taulukossa 1 on esitelty Kinnusta ja muita (2025, s. 7) mukailten eri jäähdytysjärjestelmien tuottamia hukkalämmön lämpötiloja sekä jäähdytysjärjestelmän kohdat, josta lämpö voidaan kerätä talteen.

**Taulukko 1.** Jäähdytysjärjestelmien lämpötilat (Kinnunen ja muut, 2025, s. 7; Corigliano ja muut, 2024, s. 5).

Jäähdytysmuoto	Jäähdytysaine	Hukkalämmön talteenotto	Hukkalämmön lämpötila
Ilmajäähdytys	Ilma	Paluuilma palvelinkaappien jälkeen	35–45 °C
		Paluuilma CRAH-laitteeseen	25–40 °C
		CRAH-jäähdytysvesi	10–40 °C
Yksivaiheinen nestejäähdytys	Vesi	Jäähdytinväsi palvelinkaappien jälkeen	22–75 °C
Kaksivaiheinen nestejäähdytys	Kylmäaine	Kylmäaine palvelinkaappien jälkeen	62–80 °C
		Kylmäainekiertoa jäähdyttävä vesi	45–90 °C

Kinnusen ja muiden (2025) tuottamassa selvityksessä on perehdytty erilaisiin mahdollisuuksiin datakeskusten tuottaman hukkalämmön hyödyntämisessä. Erilaisista hyödyntämiskeinoista tuodaan esille muun muassa kaukolämmön tuotanto, ORC-prosessi, sahatavaran ja sahojen sivutuotteiden kuivaus, biokaasun tuotanto ja mädätteen kuivaus, jäteveden puhdistuksen ja ruoantuotannon lämpöä vaativat prosessit sekä vesiviljely ja kalankasvatus. Suomessa erityisesti kaukolämmön tuotantomahdollisuudet hukkalämpöjen avulla on tunnustettu jo hyvissä ajoin ja esimerkkejä toimivista prosesseista on jo useita. Kaukolämmössä maanalaisilla putkilla syötetään kaukolämmön tuotantolaitoksilta kaukolämpöverkoston liitettyihin

rakennuksiin kuumaa vettä. Vesivirtaa vastaanottavissa rakennuksissa lämmönsiirtimien välityksellä siirretään kaukolämpöverkostosta lämpöä rakennuksen tiloja ja käyttövettä lämmittäviin lämmitysverkostoihin. Siirtimien läpi kulkenut kaukolämpövesi palaa paluuputkea pitkin jäähtyneenä takaisin tuotantolaitokselle. Kaukolämmön meno- ja paluueden lämpötilat vaihtelevat lämmöntarpeen, eli ulkoilman lämpötilan mukaan, talviaikaisen menopuolen mitoituslämpötilan ollessa 90 °C. Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto kattaen asuin- ja palvelurakennusten lämmitysmuotojen markkinaosuudesta 45 % vuonna 2022, vuotuisen tuotetun kaukolämmön ollessa yli 35 TWh (Energiateollisuus, 2025). Suomessa on kaukolämpöverkosto yli 170 kunnassa ja asennettua kaukolämpöverkostoa on yhteensä yli 16000 km, arviolta noin 2,7 miljoonan suomalaisen asuessa kaukolämmöllä lämmitetyssä talossa. Vuonna 2024 tuotetusta kaukolämmöstä yli 70 % tuotettiin uusiutuvilla energiamuodoilla ja hukkalämmöillä. Hukkalämpöjen osuus kokonaistuotannosta nousi vuonna 2023 jo yli 14 %:iin (Kinnunen ja muut, 2025, s. 20). Vuoteen 2030 mennessä yli 12 TWh kaukolämpöä odotetaan tuotettavan pelkästään erilaisten hukkalämpöjen ja lämmöntalteenottojärjestelmien avulla (Energiateollisuus, 2025).

Datakeskusten hukkalämpöä hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa jo muun muassa Kajaanissa ja Haminassa. Suunnitelmia vastaavasta on laadittu useammalla paikkakunnalla. Kajaanissa Lumi supertietokoneen tuottaman hukkalämmön avulla pyritään tuottamaan 20 % kaupungin vaatimasta kaukolämmöstä, kun taas Haminassa Googlen datakeskukselta saatavan hukkalämmön avulla pystytään kattamaan yli 70 % Haminan kaukolämmön tarpeesta (Tauriainen ja Kähkönen, 2024). Pelkästään lähellä datakeskusta oleva kaukolämpöverkosto ei kuitenkaan yksinään riitä datakeskusten hukkalämpöjen hyödyntämiseen kaukolämmön tuotannossa. Taulukosta 1 voidaan todeta datakeskuksen ilmajäähdytyksen, joka on toistaiseksi ylivoimaisesti yleisin jäähdytyskeino, avulla saatavan hukkalämmön lämpötilan olevan korkeintaan n. 45 °C. Koska kaukolämpöverkostossa vaaditaan 90 °C vettä, on hukkalämmön lämpötilaa nostettava lämpöpumpulla.

Kaukolämmön tarve vaihtelee suuresti vuodenajan mukaan, sillä talvikuukausina kaukolämmön kysyntä on yli viisinkertainen kesään verrattuna (Energiateollisuus, 2025), kun taas datakeskusten tuottama lämpö on tasaista vuoden ympäri. Datakeskusten hukkalämpöjen muuttaminen kaukolämmöksi ei muutenkaan ole aina tarpeellista, jos alueelta löytyvät kaukolämmön muut tuotantokeinot ovat päästöttömiä ja kustannustehokkaampia. Kaukolämmön tuotanto hukkalämmöillä vaatii myös pitkäkestoisen sopimuksen paikallisen lämpöyhtiön ja datakeskustoimijan kesken, jonka avulla turvataan kaukolämmön tuotanto useammaksi vuodeksi. Epävarmuudet pitkän aikavälin suunnitelmissa datakeskuksen tai kaukolämpöyhtiön toiminnassa tai kaukolämmön kysynnässä saattavat estää yhteisen sopimuksen syntymisen. Datakeskus saatetaan myös sijoittaa paikkaan, jossa kaukolämpöverkostoa ei ole. Hukkalämpöä voidaan siirtää myös ilman kaukolämpöverkostoa esimerkiksi viereiselle tontille, mutta tämä vaatii sopivan asiakkaan, jolla on lämmölle jatkuvaa tarvetta. Tämäkään vaihtoehto ei siis ole aina mahdollinen. Hukkalämmön hyödyntämiskeinoiksi on siis pohdittava myös muita mahdollisuuksia. Kuten kaukolämmön tuotannossa, myös muissa hyödyntämiskeinoissa datakeskuksen jäähdytysjärjestelmästä saatava hukkalämmön lämpötila ei välttämättä sellaisenaan riitä, minkä vuoksi lämpötilaa on nostettava lämpöpumpulla.

## **2.6 Lämpöpumpun toimintaperiaate**

Datakeskuksesta saatavan hukkalämmön lämpötilaa tulee usein nostaa, jotta sitä pystytään käyttämään tehokkaasti hyödyksi. Lämpöpumpun toimintaperiaate perustuu kylmäaineen kierrättämiseen, jonka avulla lämpölähteen puolelta absorboitua lämpöä siirretään lämpönielun puolelle. Lämmönlähde eli lämmön keräyskohde voi olla esimerkiksi ulkoilma tai maaperä. Lämpönieluna eli lämmönsiirron kohteena voi toimia esimerkiksi sisäilma tai lämmitettävä vesi. Lämpöpumppuja käytetään erilaisiin tarkoituksiin ja niiden avulla lämpöä voidaan siirtää ilmasta ilmaan, ilmasta nesteeseen, nesteestä ilmaan tai nesteestä nesteeseen. Kaikki lämmönsiirto perustuu kiertävän kylmäaineen ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon. Lämmönlähde on korkeamassa lämpötilassa kuin kylmäaine, jonka seurauksena lämpö siirtyy kylmäaineeseen.

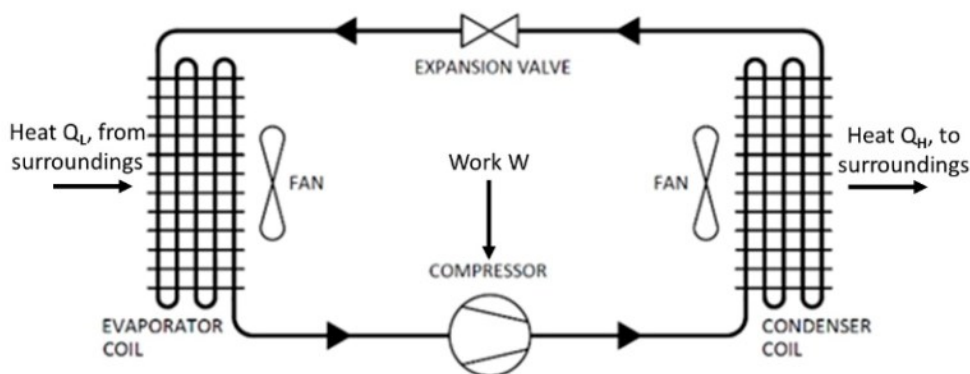
Lämpönielu taas on alhaisemmassa lämpötilassa kuin kylmäaine, jonka seurauksena kylmäaine luovuttaa lämpöä. Lämpöpumppu koostuu neljästä keskeisestä komponentista; kompressorista, paisuntaventtiilistä sekä kahdesta lämmönvaihtimesta eli höyrystimestä ja lauhduttimesta. (Wang ja muut, 2021, s. 3–4) Kylmäaine valitaan sen ominaisuuksien perusteella siten, että käytettävissä olevilla lämpötiloilla sen olomuotoa pystytään muuttamaan. Kylmäaineen olomuodon muutoksessa saadaan piilevä lämpöenergia, eli latenttilämpö, hyödynnettyä tehokkaasti. Latenttilämpö on olomuodon muutokseen tarvittavaa lämpöenergiaa. Latenttilämpö siis muuttaa kylmäaineen olomuotoa, mutta ei nosta sen lämpötilaa, jonka ansiosta kylmäaineen lämpötilan muutokset pysyvät pieninä. Lämpöpumpussa kylmäaineen lämpötilan muutokset latenttilämmönsiirtoon yhdistettynä saavat aikaan hyvin tehokkaan lämpöenergian siirtämisen.

Kylmäaineen kierto perustuu neljään eri vaiheeseen; höyrystymiseen, puristukseen, tiivistymiseen ja paisuntaan. Höyrystimessä ympäristöstä saatava lämpö, joka datakeskuksen tapauksessa on esimerkiksi datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän lämmennyt paluuvesi, luovuttaa lämpöä kylmäaineelle. Jäähdytysjärjestelmän vesi jäähtyy ja lämpöä vastaanottanut kylmäaine höyrystyy. (Wang ja muut, 2021, s. 4) Höyrystimessä kylmäaine höyrystyy vakiopaineessa ja siitä tulee kylläistä höyryä, jossa neste ja höyry esiintyvät samanaikaisesti kaksifaasisessa tilassa. Kylmäaineen tulisi kompressorissa olla kuitenkin täysin höyrystyneessä muodossa, sillä nestepisarat saattavat aiheuttaa kompressorille vaurioita. Tästä syystä huolehditaan, että höyrystimen lopussa, kompressorin imuputkessa tai erillisessä tulistimessa kylmäaineen lämpötila nousee entisestään, eli se tulistuu. Tulistunut kylmäaine on yli kyllästymislämpötilassa olevaa pelkkää höyryä, jonka seassa ei ole enää nestettä.

Täysin höyrystyneenä kylmäaine siirtyy kompressorin, jossa kylmäainetta puristetaan, lisäten sen painetta ja lämpötilaa. Korkeassa paineessa ja lämpötilassa oleva kylmäaine siirtyy kompressorin jälkeen lauhduttimeen, jossa se luovuttaa lämpöenergiaansa lämpönieluun. Lämpönielu voi datakeskuksen tapauksessa olla esimerkiksi

kaukolämmön menovesi, jonka vuoksi hukkalämmön lämpötilaa halutaan korottaa kaukolämmön tuottamisen vaatimalle tasolle. Lämpöenergiaa luovuttanut kylmäaine nesteytyy, mutta on edelleen korkeassa lämpötilassa ja paineessa kulkiessa kohti paisuntaventtiiliä. Paisuntaventtiili kuristaa kylmäaineen virtausta, jonka seurauksena kylmäaineen paine laskee. (Wang ja muut, 2021, s. 4) Kylmäaineen paineen laskiessa sen kyllästymislämpötila laskee ja osa kylmäaineesta höyrystyy heti paisuntaventtiilin jälkeen, samalla laskien kylmäaineen lämpötilaa. Kylmäaine siirtyy höyrystimeen osittain höyrystyneenä, jossa kylmäaine vastaanottaa lämmönlähteestä lämpöä ja kierto alkaa alusta.

Kuvasta 2 nähdään lämpöpumpun rakenne ja sen toiminta. Vasemmalla kuvassa on höyrystin, jossa kylmäaine vastaanottaa lämpöä ympäristöstä. Alhaalla keskellä kuvassa on kompressor, joka tarvitsee toimiakseen ulkoista sähköenergiaa. Oikealla on lauhdutin, missä kylmäaine luovuttaa lämpöä ja ylhäällä keskellä paisuntaventtiili.



**Kuva 2.** Lämpöpumpun rakenne ja toiminta (Wang ja muut, 2021, s. 4).

Lämpöpumppu tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa. Lämpöpumpun kompressorin kuluttama sähkö on suurin yksittäinen tekijä lämpöpumpun käyttökuluissa. Kaavasta 7 nähdään, kuinka lämpöpumpun lämpönieluun luovuttama lämpöenergia  $Q_H$  jouleina koostuu lämpönielusta saatavasta lämpöenergiasta  $Q_L$ , johon lisätään kompressorin tekemä työ  $W$  (Wang ja muut, 2021, s. 4)

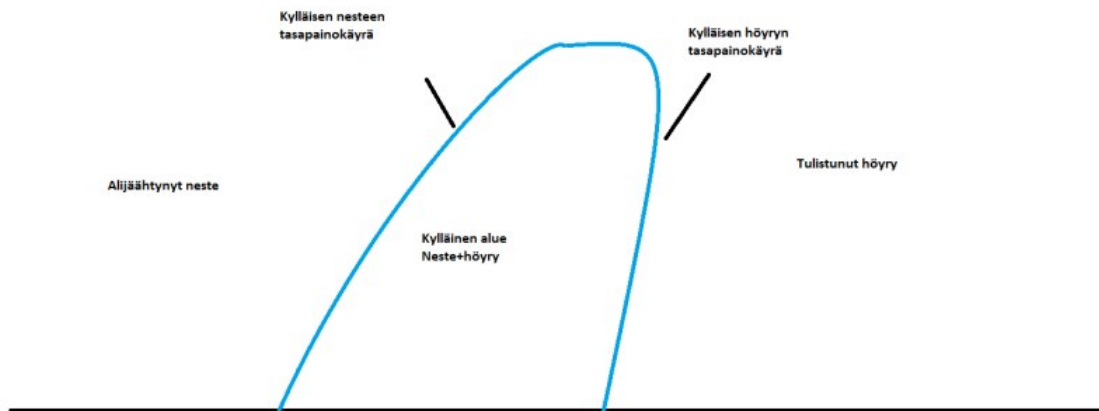
$$Q_L + W = Q_H. \quad (7)$$

Lämpöpumpun suorituskykyä mitataan *COP*-arvolla, joka kertoo kuinka monta yksikköä lämpöenergiaa se tuottaa kulutettua sähköenergiaa kohden. Lämpöpumppu ei fysiikan lakien vastaisesti pysty tyhjästä luomaan energiaa, vaan *COP*-arvo mittaa, kuinka tehokkaasti sähköenergian avulla lämpöpumppu pystyy lämpöenergiaa siirtämään lämmönlähteestä lämpönieluun. *COP*-arvo lasketaan kaavan 8 mukaisesti, missä  $Q_H$  on lämpönieluun luovutettu lämpöenergia ja  $W$  kompressorin tekemä työ, eli sen käyttämä sähköenergia (Wang ja muut 2021, s. 4)

$$COP = \frac{Q_H}{W}. \quad (8)$$

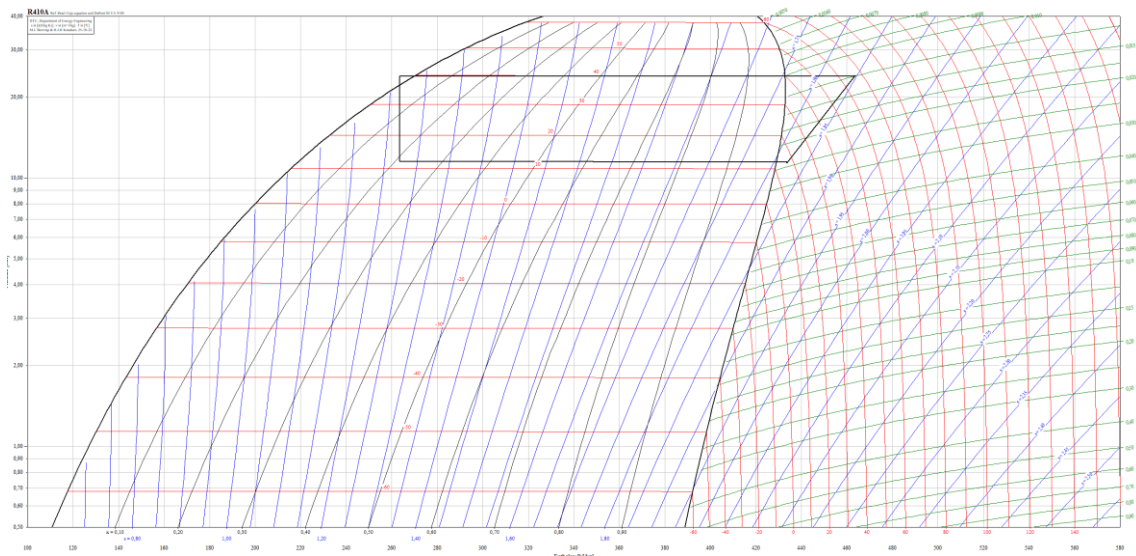
Mikäli *COP*-arvo on 3, saadaan lämpöpumpulla siirrettyä lämpötehoa 3 kW sen sähkötehon ollessa 1 kW. *COP*-arvoon vaikuttaa muun muassa lämmönlähteen lämpötila, lämmönlähteen lämpötilaero lämpönielun kanssa, kylmäaineen ominaisuudet sekä lämpöpumpun komponenttien tarpeenmukainen mitoittaminen. Mitä pienempi lämpötilaero lämmönlähteen ja lämpönielun välillä on, sitä vähemmän sähköenergiaa tarvitaan lämpöenergian siirtämiseksi ja *COP* paranee. Lämpötilaeron tulisi olla myös suhteellisen tasainen, jotta lämpöpumpun mitoittaminen on helpompaa. Datakeskusten hukkalämpöä jalostavien lämpöpumppujen *COP*-arvon on tyypillisesti hyvä, sillä datakeskuksesta saatavan hukkalämmön lämpötila on korkea verrattuna esimerkiksi ulkoilmasta lämpöenergiaa absorboivaan lämpöpumppuun. Datakeskuksesta saatava lämpöenergia on myös tasaista vuoden ympäri, mikä helpottaa lämpöpumpun mitoittamista.

Lämpöpumpussa kiertävän kylmäaineen kiertoprosessin kuvaamisessa ja lämpöpumppuprosessin arvojen laskennassa käytetään *Log-ph*-diagrammia. Jokaisella kylmäaineella on oma *Log-ph*-diagrammi, jossa näkyy sen olomuodon muutoksien rajat. Kuvassa 3 on esitetty *Log-ph*-diagrammin rakenne.



**Kuva 3.** Log-ph-diagrammin rakenne (Kontio, 2020, s. 10).

Kuvassa 4 on esitelty CoolPack-sovelluksella laadittu lämpöpumpuissa useasti käytettävän R410A kylmäaineen *Log-ph*-diagrammi. Diagrammissa näkyy kylmäaineen kiertoprosessi lämpöpumpussa ja kylmäaineen entalpian, eli sen lämpösisällön, ja paineen muutokset. Entalpia on termodynamiikan suure, joka kuvastaa aineen energiamäärää kilogrammaa kohden. Sitä käytetään termodynaamisten prosessien laskennassa. Diagrammin *y*-akselilla on kylmäaineen paine (bar) ja *x*-akselilla sen entalpia (kJ/kg).



**Kuva 4.** R410A Log-ph-diagrammi (kuva laadittu CoolPack-sovelluksella).

Kuvassa 4 näkyvän, puolisuunnikasta muistuttavan ja mustalla viivalla piirretyn, diagrammin alempi vaakaviiva kuvastaa kylmäaineen entalpiasisällön kasvua höyrystimessä. Kylläisen höyryn rajan ylittyessä on kyse tulistetusta kylmäaineesta, jonka jälkeen kompressor nostaa kylmäaineen lämpötilaa ja painetta. Ylempi vaakaviiva kuvaa lauhdutinta, jossa kylmäaineen entalpiasisältö vähenee sen luovuttaessa lämpöä lämpönieluun. Lauhduttimessa kylmäaine alijäähtyy, eli se pysyy nesteinä, vaikka se alittaa sen jäätymispisteen. Tämä on toivottua, sillä paisuntaventtiilille siirtyvä kylmäaine tällöin vain nestemäisessä muodossa, jolloin paisuntaprosessi toimii optimaalisesti. Tällöin höyrystimelle siirtyvä kylmäaine on mahdollisimman suurelta osin nestemäisessä muodossa, tehostaen höyrystimen toimintaa. Vasemmalla oleva pystyviiva kuvaa paisuntaventtiilissä tapahtuvaa kylmäaineen paineenlaskua.

Kuvan 4 diagrammi on esimerkki, jossa höyrystymislämpötilana on käytetty 12 °C ja lauhtumislämpötilana 40 °C. Kompressorin isentrooppihyötysuhteena, eli sen todellisena puristusprosessin tehokkuutena verrattuna ideaaliseen puristukseen, on käytetty arvoa 0,7. Isentrooppihyötysuhde ottaa siis huomioon kompressorin häviöt. Tulistuksessa kylmäaineen lämpötilan nousuna on käytetty arvoa 5 °C ja alijäähtymisessä kylmäaineen jäähtymisen arvoa 3 °C. Tulistus siis nostaa kylmäaineen lämpötilaa

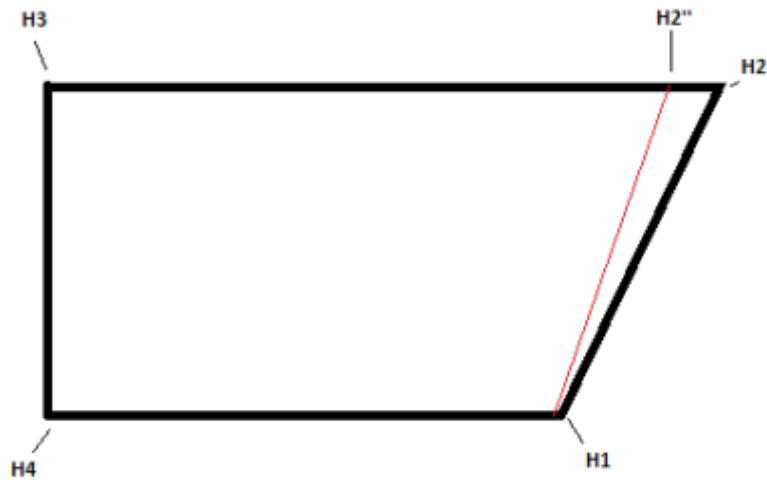
entisestään ja alijäähditys laskee. Todellinen lämpöpumppuprosessin mallinnus vaatisi lisäksi eri laitteiston osien painehäviöiden laskemista.

Kuvassa 5 nähdään kylmäainekierron tilapisteet, joiden avulla eri toiminta-arvoja voidaan laskea. Kuvassa arvo  $H1$  on kylmäaineen tilapiste höyrystymisen jälkeen ennen kompressoria. Piste  $H2''$  kuvastaa isentrooppisen, eli ideaalisen puristuksen jälkeistä tilapistettä, kun taas  $H2$  on todellinen puristuksen jälkeinen tilapiste, missä on otettu huomioon puristusprosessin isentrooppihyötysuhde. Piste  $H3$  on kylmäaineen tilapiste lauhduttimen jälkeen ja  $H4$  paisuntaventtiilin jälkeen. Pisteiden  $H2$  ja  $H1$  välinen entalpiaerotus kuvastaa kompressorin käyttämää ulkopuolista energiaa, eli sähköenergiaa, joka prosessiin joudutaan tuomaan puristustyön saavuttamiseksi. Mikäli halutaan laskea ideaalinen puristustyö, lasketaan  $H2''$  ja  $H1$  erotus, joka on todellista puristustyötä pienempi, sillä siinä ei huomioida kompressorin häviöitä.

Mikäli todellista puristuksen jälkeistä arvoa ei ole tiedossa, mutta isentrooppihyötysuhde tiedetään, voidaan se selvittää kaavalla 9;

$$H2 = H1 + (H2'' - H1)/\eta_s, \quad (9)$$

missä  $\eta_s$  on isentrooppihyötysuhde.



**Kuva 5.** Kylmäainekierron tilapisteet Log-ph-diagrammissa (Kontio, 2020, s. 6).

Log-ph-diagrammista voidaan laskea lämpöpumpun *COP*-arvo eri tilapisteiden entalpioiden avulla. Laskenta on esitetty kaavassa 10, jossa *H2* on todellinen puristuksen jälkeinen entalpia (kJ/kg), *H1* kylmäaineen entalpia ennen puristusta ja *H3* kylmäaineen entalpia ennen höyrystintä.

$$\frac{H2-H3}{H2-H1} \quad (10)$$

Kuvan 4 esimerkin mukainen *COP*-arvo olisi tällöin

$$COP = \frac{463 \frac{kJ}{kg} - 263 \frac{kJ}{kg}}{463 \frac{kJ}{kg} - 434 \frac{kJ}{kg}} = 6,9 \quad (11)$$

Lämpöpumpun lauhduttimesta saatava lämpöteho  $\dot{Q}$  (kW) pystytään laskemaan kaavalla 12, missä lauhduttimessa kylmäaineen luovuttama entalpiasisältö kerrotaan kylmäaineen massavirralla  $\dot{m}$  (kg/s);

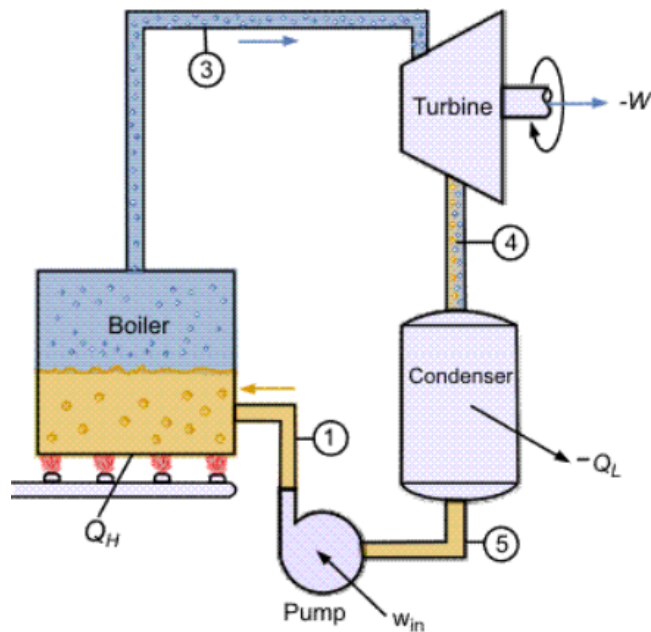
$$Q_{\text{lämmitys}} = \dot{m} \cdot (H2 - H1). \quad (12)$$

### 3 Hukkalämmön muuttaminen sähköksi

Hukkalämmön muuttaminen sähköenergiaksi on mahdollista, mikäli lämpöenergialle ei sellaisenaan ole tarvetta. ORC-prosessin avulla voidaan erilaisista lämmönlähteistä tuottaa sähköenergiaa ja se soveltuu laajalti erilaisten hukkalämmönlähteiden hyödyntämiseen. ORC-prosessia voidaan hyödyntää esimerkiksi jätevesien, geotermisen energian, teollisuusprosessien ja erilaisten biomassojen sisältämän lämpöenergian talteenoton yhteydessä.

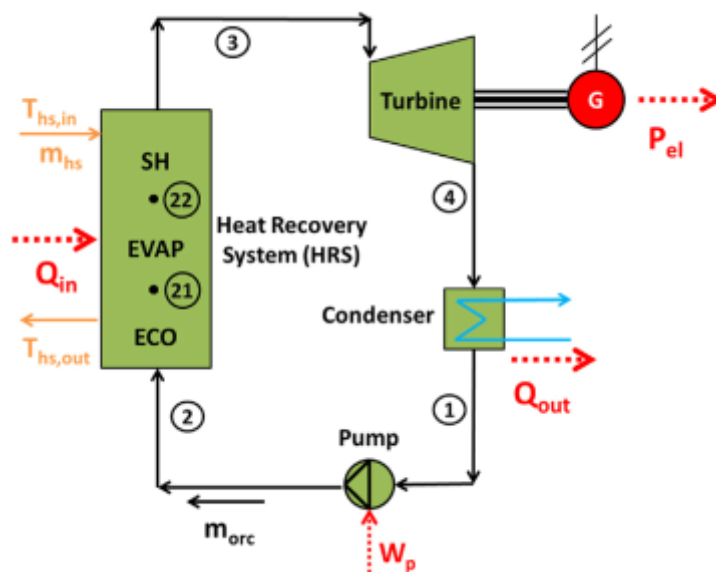
#### 3.1 ORC-prosessi

Organic Rankine Process (ORC) -prosessi on ollut jo 1970-luvulta lähtien yleisesti tunnettu tapa tuottaa sähköä matala- tai keskilämpöisen lämmönlähteen avulla (Yu ja muut, 2018, s. 2). ORC-prosessi toimii normaalin Rankine-syklin tavoin. Rankine-sykliksi, joka on nimetty skotlantilaisen fyysikon William John Macquorn Rankinen mukaan, kutsutaan voimalaitoksissa käytettävää lämpövoimakoneen perussykliä, jossa kiertoainetta jatkuvasti höyrytetään ja lauhdutetaan. Kiertoaineena useimmiten toimii vesi. Vettä kuumennetaan ulkoisen polttoaine-energian avulla höyrykattilassa, jossa muodostuvaa kuumaa ja korkeapaineista höyryä käytetään turbiinin pyörittämiseen. Turbiini pyörittää siihen kytkettyä generaattoria ja tuottaa sähköä. Turbiinista tuleva jäähtynyt ja matalassa paineessa oleva höyry lauhdutetaan lauhduttimessa takaisin vedeksi, jonka jälkeen kiertopumppu nostaa veden painetta ja syöttää sen höyrykattilaan. (Muller-Steinhagen, 2011). Kuvassa 6 on esitelty Rankine-syklin peruskierto.



**Kuva 6.** Rankine-syklin toiminta (Muller-Steinhagen, 2011).

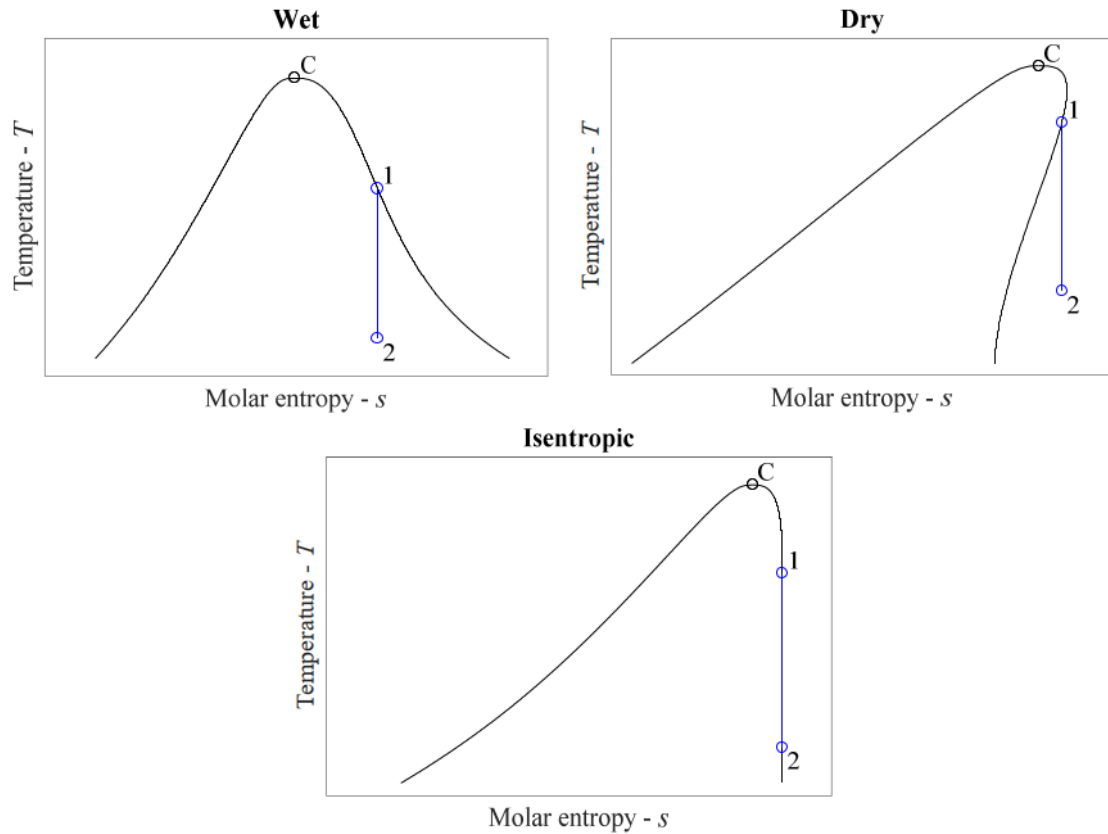
ORC-prosessi eroaa normaalista Rankine syklistä siten, että sen kiertoineena käytetään veden sijasta orgaanisia fluideja, joilla on korkeampi molekyylimassa ja monesti matalampi kiehumispiste. ORC-prosessissa mahdollisia käytettäviä orgaanisia kiertaineita on useita, joista sopivin tulee valita muun muassa prosessin lämpötila-alueen mukaan. Vaihtoehtoina voi olla esimerkiksi pentaani, isobutaani tai tolueeni. Matalamman kiehumispisteen ja kriittisen lämpötilan ansiosta orgaaninen kiertoine höyrystyy vettä alhaisemmassa lämpötilassa, jonka vuoksi ORC-prosessi soveltuu matalampien lämmönlähteiden, kuten datakeskusten hukkalämmönlähteiden, hyödyntämiseen. (Corigliano ja muut, 2024; Loni ja muut, 2020) Kuvassa 7 on esitetty ORC-prosessin toimintakaavio.



Kuva 7. ORC-prosessin toimintakaavio (Loni ja muut, 2020, s. 2).

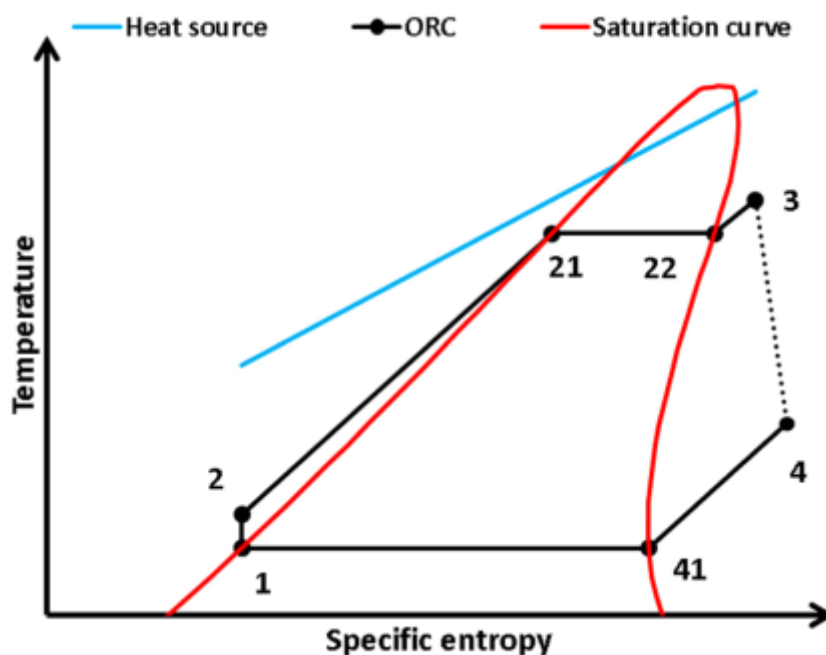
Kuvasta 7 nähdään, että ORC-prosessin toimintakaavio on samanlainen kuin perinteisen Rankine-syklin. Perinteisen Rankine-syklin tavoin ORC-prosessissa siirretään lämmönlähteen lämpöenergiaa kiertoaineeseen, joka höyrystyy ja pyörittää turbiinia sekä siihen liitettyä sähkögeneraattoria. Lämmönsiirto kiertoaineeseen ORC-prosessissa ei kuitenkaan tapahdu polttokattilassa vaan lämmönsiirtimessä, joka kuvan 7 tapauksessa on vasemmalla oleva Heat Recovery System (HRS). Kiertoaine saapuu lämmönsiirtimeen korkeapaineisena ja alihöyrystyneenä nesteinä, jossa se kulkee ensiksi höyrystimen esilämmittimenä toimivan ekonomaiserin (ECO) läpi. Ekonomaiserissa kiertoaine vastaanottaa lämpöä, jonka seurauksena siitä tulee korkeassa paineessa olevaa kylläistä nestettä. Kiertoaine siirtyy seuraavaksi höyrystimeen (EVAP) ja tulistimeen (SH), jossa se vastaanottaa lisää lämpöä muuttuen ensin kylläiseksi höyryksi ja tulistimen jälkeen tulistetuksi höyryksi. Tulistuksen avulla varmistetaan, että turbiiniin ei pääse eikä siellä synny vesipisaroita, jotka voivat vahingoittaa turbiinia ja heikentää prosessin hyötysuhdetta. Tulistusta ei välttämättä ORC-prosessissa tarvita, mikäli käytetään kiertoainetta, joka ei kondensoidu turbiinissa (Ebrahimi ja muut, 2017, s. 2).

Perinteisesti orgaaniset kiertoaineet on jaettu kolmeen eri kategoriaan; märkiin (wet), isentrooppisiin (isentropic) ja kuiviin (dry). Luokittelu perustuu kiertoaineen tilaan turbiinissa tapahtuneen paisunnan jälkeen. Kiertoaine luokitellaan märäksi, joista tyypillisin esimerkki on vesi, mikäli sen kylläisenä höyrynä alkanut isentrooppinen paisunta päättyy kaksifaasialueelle paisunnan lopussa, tarkoittaen sen kondensoitumista.  $T$ - $s$ -diagrammissa märän kiertoaineen höyrystymiskäyrä on negatiivinen ( $dT / ds < 0$ ). Kiertoainetta kutsutaan kuivaksi, mikäli sen paisunnan jälkeinen tila päättyy yksivaiheiselle alueelle, eli se kondensoitumisen sijaan tulistuu turbiinissa. Isentrooppinen kiertoaine käyttäytyy isentrooppisen laajentumisen seurauksena siten, että se seuraa hyvin tarkasti kylläisen höyryn rajakäyrää pysyen kylläisenä höyrynä läpi koko paisuntavaiheen. Kuivalla kiertoaineella höyrystymiskäyrä on pääosin positiivinen ( $dT / ds > 0$ ) ja isentrooppisella pystysuora ( $dT / ds \rightarrow \infty$ ) sen jälkeen, kun piste  $ds/dT=0$  on saavutettu. (Györke ja muut, 2019, s. 2–3) Kuivat ja isentrooppiset kiertoaineet pysyvät kuivana läpi turbiinin eikä niitä täten tarvitse erikseen tulistaa. Tulistuksen poisjättäminen vähentää laitteiston kustannuksia ja lämmönlähteen tarvittavaa lämpötilaa, mistä syystä ORC-prosessissa usein suositetaan juuri kuivia tai isentrooppisia kiertoaineita. Kuvasta 8 on nähtävillä eri kiertoaineiden käyttäytyminen paisunnan seurauksena. Kyllästymiskäyrän rajaaman alueen sisäpuolella on kahden faasin alue, jossa kiertoaine esiintyy sekä nesteinä että höyrynä. Sininen viiva kuvastaa isentrooppista paisuntaa, ja mikäli se päättyy kahden faasin alueelle, kiertoaine kondensoituu ja syntyy vesipisaroita. Kuvasta nähdään, kuinka kuiva kiertoaine päättyy paisunnan seurauksena tulistuneelle alueelle ja isentrooppinen kiertoaine pysyy kylläisen höyryn rajakäyrällä.



**Kuva 8.** Märän (Wet), kuivan (Dry) ja isentrooppisen (Isentropic) kiertöaineen käyttäytyminen T-s-diagrammissa (Györke ja muut, 2019, s. 3).

Lämmönsiirtimen jälkeen korkeassa paineessa oleva, ja mahdollisesti tulistimessa tulistettu, höyry siirtyy turbiiniin, jossa se paisuessaan tekee työtä turbiinin liikuttamiseksi. Turbiinin jälkeen höyry on edelleen korkeassa lämpötilassa, mutta alhaisessa paineessa liikkuessaan kohti lauhdutinta, jossa kiertöaine luovuttaa lämpöä lauhduttimessa kiertävään nesteeseen tai ilmaan. Myös lauhduttimeen luovutettava lämpö voidaan pyrkiä käyttämään hyödyksi. Lauhduttimen jälkeen kiertöaine siirtyy kylläisenä nesteenä kiertopumppuun, joka nostaa sen painetta ja siirtää sen alijäähtyneenä nesteenä lämmönsiirtimeen. (Loni ja muut, 2020, s. 2–4; Corigliano ja muut, 2024, s. 7–8) Kuvassa 9 on esitetty ORC-prosessin termodynaaminen sykli T-s-diagrammissa.



Kuva 9. ORC-prosessin termodynaaminen sykli (Loni ja muut, 2020, s. 3).

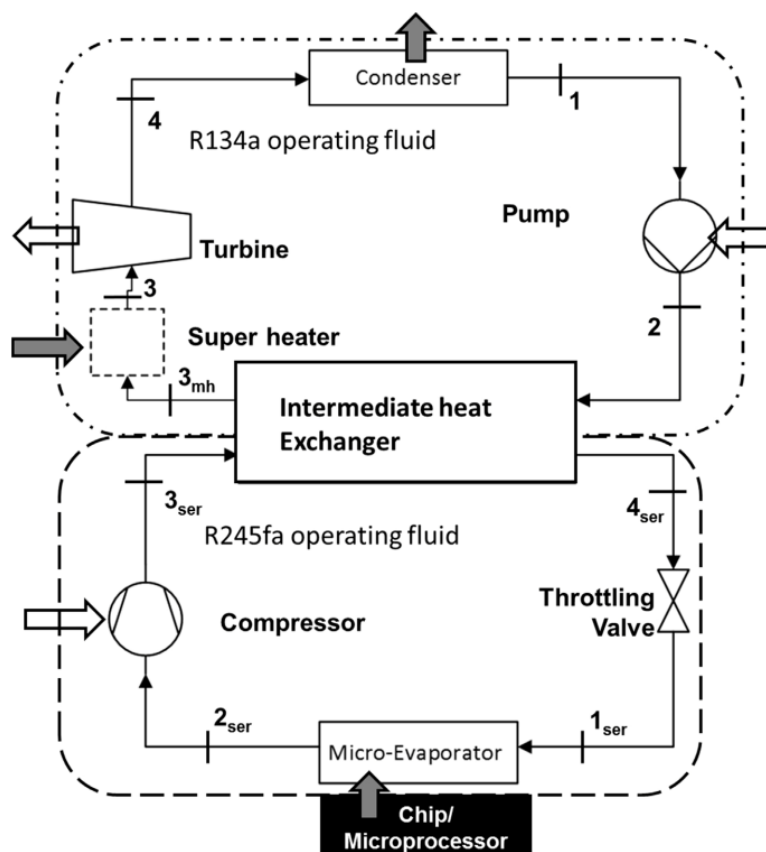
Kuvassa 9 pystyakselilla on lämpötila ja vaaka-akselilla ominaisentropia. Entropia on termodynamiikassa käytettävä fysikaalinen suure, joka kuvaa systeemin tai aineen epäjärjestyksen määrää. Mitä suurempi entropia on, sitä vähemmän on järjestäytyneitä energiaa. Fysiikan toisen pääsäännön mukaisesti esimerkiksi lämpövoimakoneessa kaikkea lämpöenergiaa ei entropian kasvun seurauksena voida käyttää hyödyksi mekaanisena työnä, vaan osa lämpöenergiasta menee aina hukkaan. Ominaisentropia kuvaa entropiaa per massayksikkö, eli kuinka paljon epäjärjestyksiä massayksikkö sisältää. Ominaisentropiaa tarkastellaan systeemikohtaisesti esimerkiksi lämpövoimakoneprosessissa ja sen yksikkönä käytetään  $J/(kg \cdot K)$ . Mitä suurempi ominaisentropia on, sitä vähemmän järjestäytyneitä energiaa on systeemissä käytettävissä työksi.

Kuvassa 9 on nähtävissä lämpövoimakoneena toimivan ORC-prosessin toimintapisteet lämpötilan ja spesifin entropian arvoina (Loni ja muut, 2020, s. 3). Pisteessä 1 kiertoaaine on lauhduttimen jälkeen matalassa lämpötilassa kylläisenä nesteinä siirtyessään pumpun läpi pisteeseen 2. Piste 2 kuvastaa kiertoaineen tilaa ennen sen siirtymistä

lämmönsiirtimeen. Pisteet 21 ja 22 ovat lämmönsiirtimeen sisäisiä tilapisteitä ekonomaiserin ja tulistuksen kohdalla. Piste 3 on lämmönsiirtimeen jälkeinen, tässä tapauksessa tulistetun, höyryn tila. Huomataan, että pisteiden 2 ja 3 välillä kiertoaine vastaanottaa lämmönsiirtimessä lämpöä ja se höyrystyy. Höyrystyessä kiertoaineen lämpötila nousee sekä entropia kasvaa, sillä sen epäjärjestys lisääntyy. Höyry on entropian kasvun seurauksesta huolimatta käyttökelpoista, sillä sen energiasisältö on korkea. Pisteiden 3 ja 4 välillä kiertoaine laajenee turbiinissa tehden työtä. Piste 4 jälkeen kiertoaine siirtyy lauhduttimeen, jossa se menettää lämpöä ja tiivistyy takaisin nesteeksi, vähentäen sen entropiaa.

### **3.2 ORC-prosessin integrointi datakeskukseen ja prosessiarvojen laskenta**

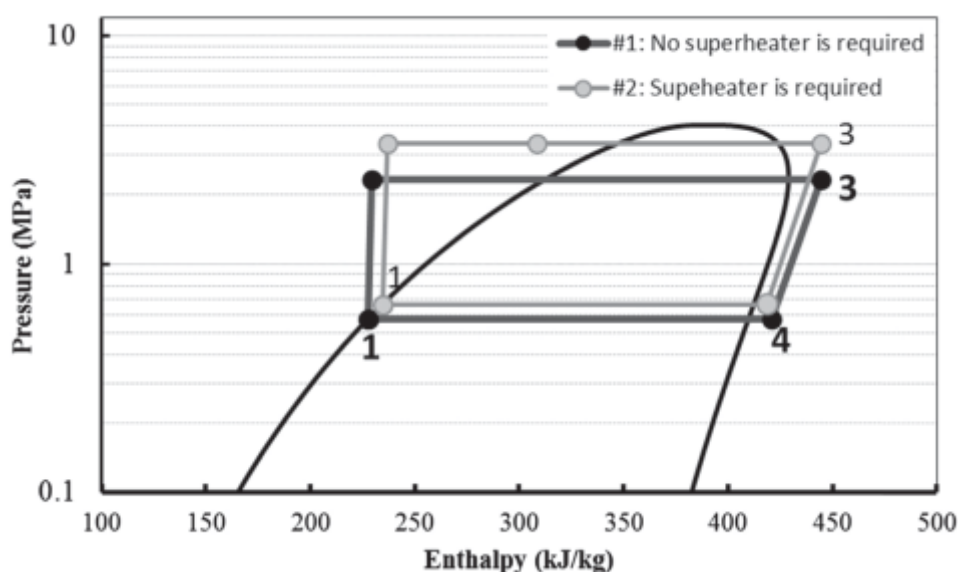
Mikäli ORC-prosessi integroidaan datakeskukseen siten, että datakeskuksen jäähdytysjärjestelmästä saatava lämpö hyödynnetään sellaisenaan ilman sen erillistä lämpötilan nostamista lämpöpumpulla, tulisi datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän olla kaksivaiheinen nestejäähdytys maksimaalisen hyödyn saavuttamiseksi. Taulukosta 1 näemme, että kaksivaiheinen nestejäähdytys omaa korkeimman jäähdytyskierron paluunesteen, eli hukkalämmön, lämpötilan. Mitä korkeampi jäähdytysnesteen paluulämpötila on, sitä tehokkaammin ORC-prosessin avulla pystytään hukkalämpöä muuttamaan sähköenergiaksi. Datakeskuksista saatava hukkalämpö on lämpötilatasoltaan matala, joten ORC-prosessin lämpöhyötysuhde on alhaisempi verrattuna esimerkiksi teollisuuden korkeampia lämpötilatasoja hyödyntäviin ORC-prosesseihin. Lämpöhyötysuhde kuvaa kykyä muuttaa saatavilla oleva lämpöenergia sähköenergiaksi. Teoreettisesti tarkasteltuna datakeskuksen yhteyteen integroitu ORC-prosessi voi saavuttaa parhaimmillaan n. 15–20 % lämpöhyötysuhteen. Kuvassa 10 on esitetty kaksivaiheisen jäähdytysjärjestelmän integraatio ORC-prosessiin.



**Kuva 10.** Kaksivaiheisen nestejäähdytysjärjestelmän integraatio ORC-prosessiin. (Ebrahimi ja muut, 2017, s. 7).

Kuvassa 10 alempana sijaitsee datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän toimintakaavio ja yläpuolella ORC-prosessin toimintakaavio. Jäähdytysjärjestelmä on liitetty ORC-prosessiin yhteisellä lämmönvaihtimella (Intermediate Heat Exchanger), joka toimii jäähdytysjärjestelmän lauhduttimena ja ORC-prosessin höyrystimenä. Kaksivaiheisessa nestejäähdytyksessä käytettävä kiertoaine, tässä tapauksessa R245fa, kiertää palvelinkaappien läpi, joissa palvelinkaappien sisällä olevat piirilevyt ja mikroprosessorit luovuttavat lämpöä mikrohöyrystimien (Micro-Evaporator) välityksellä kiertoaineeseen. Kiertopiirissä lämmennyt kiertoainetta vielä kompressorilla puristetaan, jonka avulla sen lämmönluovutuskykyä ja lämpötilaa saadaan nostettua. Palvelinkaapeissa lämpötila ei saa ylittää 85 °C, joka rajoittaa jäähdytysjärjestelmän paluupuolen lämpötilaa. Kompressorin jälkeisen, lämmönsiirtimille menevän jäähdytyksen kiertoaineen maksimilämpötilana voidaan pitää noin 90 °C. Jäähdytettävien komponenttien

lämmönkeston vaatimukset vaikuttavat ORC-prosessin lämpötilatasoon ja täten sen tehokkuuteen ja hyötysuhteeseen. Erittäin matalilla, alle 50 °C lämpötilatasoilla, järjestelmää on haastava saada kannattavaksi. Komponenttien lämmönkesto tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti. Jäähdytysjärjestelmän kierto vastaa lämpöpumpun kiertoprosessia ja siihen voidaan soveltaa samoja laskentamenetelmiä. ORC-prosessi on lämpövoimakone, jossa lämpöpumpulle käänteisesti lämmön avulla tuotetaan sähköä. Kuvassa 11 on esitetty ORC-prosessin toimintapisteet entalpien ja paineen arvoina.



**Kuva 11.** ORC-prosessin toimintapisteet entalpien ja paineen arvoina (Ebrahimi ja muut, 2017. s- 8).

Kuvassa 11 on kuvattu kaksi erillistä ORC-prosessin toimintakäyrää, joista toisessa kiertoainetta tulistetaan tulistimessa ja toisessa ei. Tulistimen tarve riippuu kiertoaineen tyypistä. Mikäli kiertoaine on tyypiltään märkä, se tulee tulistaa, jotta kondensoitua kiertoaine ei vahingoita turbiinia. Piste 1 on lauhduttimen jälkeinen kiertoaineen tilapiste, jonka jälkeen se siirtyy kiertopumppuun, mikä korottaa painetta. Ylempi vaakaviiva kuvaa kiertoaineen vastaanottaman lämpömäärän aiheuttamaa entalpien kasvua, joka tapahtuu höyrystimessä, eli lämmönsiirtimessä, missä jäähdytysjärjestelmän kiertoaine luovuttaa lämpöä ORC-prosessin kiertoaineelle. Piste 3 kuvastaa kiertoaineen tilaa ennen sen siirtymistä turbiiniin, missä sen paine laskee.

Turbiinin jälkeinen ja lauhdutinta edeltävä tilapiste on 4. Lauhduttimessa pisteiden 4 ja 1 välillä entalpiamäärä laskee, sillä kiertoaine luovuttaa lämpöä pois. ORC-prosessin tunnuslukuja voidaan laskea kaavoilla 13–16;

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4), \quad (13)$$

missä  $\dot{W}_T$  on turbiinissa tapahtuva paisunnasta seuraava teho (W),  $\dot{m}$  on kiertoaineen massavirta (kg/s) ja  $h_3$  ja  $h_4$  turbiinia edeltävä ja sen jälkeinen kiertoaineen entalpia (kJ/kg) (Ebrahimi ja muut, 2017, s. 4).

$$\dot{W}_P = \dot{m}(h_2 - h_1), \quad (14)$$

missä  $\dot{W}_P$  on kiertopumpun kuluttama sähköteho (W),  $\dot{m}$  on kiertoaineen massavirta (kg/s) ja  $h_2$  ja  $h_1$  kiertopumpun jälkeinen ja sitä edeltävä kiertoaineen entalpia (kJ/kg) (Ebrahimi ja muut, 2017, s. 4).

$$Q_C = \dot{m}(h_4 - h_1), \quad (15)$$

missä  $Q_C$  on lauhduttimen luovuttama lämpövirta (W),  $\dot{m}$  on kiertoaineen massavirta (kg/s) ja  $h_4$  ja  $h_1$  lauhdutinta edeltävä ja sen jälkeinen kiertoaineen entalpia (kJ/kg) (Ebrahimi ja muut, 2017, s. 4).

$$\eta = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_P}{Q_{sis}}, \quad (16)$$

missä  $\eta$  on ORC-prosessin lämpöhyötysuhde,  $\dot{W}_T$  turbiinin tuottama sähköteho (W),  $\dot{W}_P$  kiertopumpun kuluttama sähköteho (W) ja  $Q_{sis}$  lämmönsiirtimeen eli ORC-prosessiin tuotava lämpövirta (W), joka tässä tapauksessa on datakeskuksesta saatava hukkalämpö (Ebrahimi ja muut, 2017, s. 5).

On huomioitava, että usein puhutaan turbiinin tuottamasta sähkötehosta. Turbiini ei kuitenkaan itsessään tuota sähköenergiaa, vaan pyörittää sähköenergiaa tuottavaa generaattoria. Generaattorin hyötysuhde on kuitenkin itsessään niin hyvä (lähes 100 %), että sähkötehon tuotanto riippuu lähinnä turbiinin tuottamasta työstä. ORC-prosessissa käytettävien turbiinien hyötysuhde vaihtelee prosessin lämpötila- ja painetasojen

mukaan, yleensä ollen n. 70–80 % (Vanslambrouck ja muut, 2012, s. 7). Turbiinin pyörittämästä generaattorista saatavan sähkötehon sekä kiertopumpun kuluttaman sähkötehon laskennassa tulee aina huomioida laitteiston hyötysuhteet. Generaattorin tuottama sähköteho laskee, kun laitteistojen hyötysuhde huomioidaan ja kiertopumpun käyttämä sähköteho kasvaa. Teoreettinen saatavilla olevien lämpötilatasojen mukainen ORC-prosessin suurin mahdollinen lämpöhyötysuhde voidaan laskea Carnot-hyötysuhteella kaavan 17 mukaisesti. Carnot-hyötysuhde kertoo suurimman mahdollisen lämpöhyötysuhteen, jonka lisäksi tulee huomioida laitteiston ja prosessin häviöt.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{lauhdutus}}{T_{höyrystyminen}}. \quad (17)$$

### 3.3 ORC-prosessin kiertoaineen valinta

Matalalämpöistä hukkalämpöä hyödyntävien ORC-järjestelmien lämpöhyötysuhde vaihtelee noin 5–20 % välillä (Ebrahimi ja muut, 2014). Lämpöhyötysuhde kuvastaa tuotetun sähköenergian määrää suhteessa käytettävissä olevan lämpöenergian määrään. ORC-prosessin lämpöhyötysuhteen maksimoimiseksi oikean kiertoaineen valinta on kriittistä. Lonin ja muiden (2020, s. 4) mukaan valitun kiertoaineen tulisi olla termodynaamisesti tehokas, jolloin se pystyy ottamaan mahdollisimman paljon lämpöenergiaa vastaan lämmönsiirtimessä. Tärkein yksittäinen parametri kiertoaineen valinnassa on käytettävissä olevan hukkalämmön lämpötila, joka datakeskusten tapauksessa tarkoittaa jäähdytysjärjestelmän kiertoaineen paluuvirrasta saatavaa lämpöä.

Kriittinen lämpötila on lämpötila, jonka yläpuolella kiertoaine ei muutu nesteeksi missään paineessa. Coriglianon ja muiden (2024, s. 11) mukaan kiertoaineen kriittisen lämpötilan tulee olla hyödynnettävälle hukkalämmön lämpötilatasolle sopiva, jotta höyrystymislämpötila ja täten höyryn kylläisyyspaine saadaan mahdollisimman korkeaksi ilman ylikriittistä prosessia. Korkeampi kylläisyyspaine tehostaa lämmönsiirtoa

ja tuottaa turbiinissa enemmän työtä. Kiertoaineen kriittinen lämpötila ei tule olla matalampi kuin sen höyrystymislämpötila, muutoin prosessista tulee ylikriittinen eikä se toimi tarkoitetulla tavalla. Ylikriittisen prosessin kustannukset ovat huomattavasti korkeammat, sen suunnittelu on monimutkaisempaa ja sen hallinta sekä turvallisuuden varmistaminen on haastavampaa. Sopiva kiertoaineen lämpötilaprofiili myös tehostaa lauhtumista, joka on yhtä lailla merkittävä tekijä prosessin tehokkuuden maksimoinnissa. Kiertoaineen tulee kestää prosessiolosuhteita hyvin, jotta sen suorituskyky pysyy yllä ajan kuluessa.

Sopivan kriittisen lämpötilan lisäksi valittavan kiertoaineen tulee täyttää myös muita vaatimuksia. Kiertoaineen tulee olla ympäristölle kestävä valinta, jota ohjaavat muun muassa ODP (Ozone Depletion Potential) ja GWP (Global Warming Potential) -arvot. ODP-arvo kuvastaa kiertoaineen, josta tässä yhteydessä monesti puhutaan kylmäaineena, kykyä tuhota otsonikerrosta, kun taas GWP-arvo kuvastaa kiertoaineen aiheuttamaa päästöpotentiaalia. ODP-arvoja verrataan kylmäaineeseen R11, jonka ODP-arvo on 1. Nykyään käytettävien kylmäaineiden ODP-arvon maksimiarvona pidetään 0,05. GWP-arvo kertoo käytettävän kylmäaineen haitallisuuden vertailukohtana hiilidioksiidiin, jonka GWP-arvo on 1. Mitä suurempi GWP-arvo on, sitä voimakkaampi kasvihuonekaasu se on. Käytettävän kiertoaineen turvallisuus tulee huomioida sen aiheuttaman tulipalovaaran ja räjähdysvaaran osalta sekä sen käyttökelpoisuus korroosion ja myrkyllisyyden osalta (Darvish ja muut, 2015, s. 7). Räjähdys- ja syttymisherkät kiertoaineet saattavat lisätä prosessitiloihin ATEX-vaatimuksia, jonka myötä tulee tarkastella esimerkiksi paloluokitusta ja hätätuuletuksen tarpeellisuutta kylmäainevuodon sattuessa.

Myös kiertoaineen kriittinen paine sekä sen latentti lämpö vaikuttavat prosessin tehokkuuteen. Kriittinen paine vaikuttaa järjestelmän eri komponentteihin, joiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon prosessin painetasot. Korkeamman kriittisen paineen avulla prosessin lämmönsiirron lämpötilaprofiilia voidaan saada tehokkaammin yhteensovitettua, mutta korkeamman paineen omaava prosessi on haastavampi

suunnitella ja sen vaatima kestävyys laitteistolta nostaa kustannuksia. Kiertoaineen latentti lämpö taas kertoo, kuinka paljon energiaa pystytään absorboimaan höyrystymisprosessissa ja luovuttamaan lauhtumisprosessissa ilman lämpötilan muutosta. Tämä siis tehostaa prosessin energiansiirtoa lämpötilan muutoksen rinnalla. Sopiva kiertoaineen lämpötilaprofiili tehostaa latentin lämmön hyödyntämistä, sillä höyrystymisprosessissa tapahtuu selkeä faasimuutos. Tehokas höyrystymisprosessi tuottaa turbiinille tiheämpää höyryä, joka parantaa ORC-prosessin hyötysuhdetta. Mikäli kiertoaineen kriittinen lämpötila on liian suuri verrattuna lämmönlähteen lämpötilaan, höyrystymisprosessin tehokkuus laskee. Tällöin prosessin painetaso ja paisunnan tuottama työ pienenee ja ORC-prosessin hyötysuhde laskee. Kiertoaineen kiehumispiste kertoo sen lämpötilatason, jossa faasimuutos tapahtuu höyrystimessä ja lauhtuttimessa. Kiehumispiste ilmoitetaan normaalissa ilmanpaineessa 0,1 MPa.

Taulukossa 2 on esitetty kiertoaineita, jotka voisivat soveltua matalaa lämmönlähdettä hyödyntävään ORC-järjestelmään. Taulukossa on esitelty kiertoaineiden ODP ja GWP-arvot, kriittinen lämpötila ja kriittinen paine, latentti lämpö ja kiehumispiste.

**Taulukko 2.** Matalalämpöiseen ORC-prosessiin mahdollisesti soveltuvia kiertoaineita (Corigliano ja muut, 2024, s. 11).

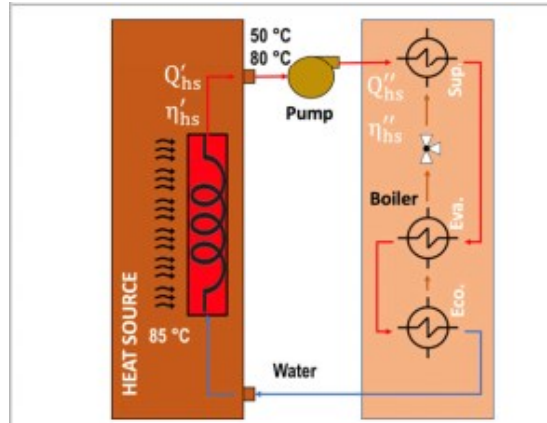
Kiertoaine	Kriittinen lämpötila (°C)	Kriittinen paine (MPa)	ODP-arvo	GWP-arvo, per 100-vuotta	Latentti lämpö (kJ/kg)	Kiehumispiste paineessa 0,1 MPa (°C)
R22	96,15	4,99	0,05	1810	158,46	-9,10
R32	78,11	5,78	0	675	218,59	-52,15
R123	183,68	3,66	0,02	77	161,82	27
R134a	101,06	4,06	0	1430	155,42	-26,07
R143a	72,71	3,76	0	4470	124,81	-47
R152a	113,26	4,52	0	140	249,67	-24,65
R218	71,87	2,64	0	8830	58,29	-37
R227ea	102,80	2,93	0	3220	97,14	-15,61
R236ea	139,26	3,5	0	6300	142,98	6,19
R245fa	154,05	3,64	0	1030	177,08	58,80
R290	96,68	4,25	0	20	292,13	-42,11
R600	151,98	3,8	0	20	336,82	-0,49
R600a	134,66	3,63	0	20	303,44	-12
R601	196,55	3,37	0	20	349	36,06
R601a	187,25	3,38	0	20	343,28	27,83
R1270	92,42	4,66	0	20	283,34	48

Kuten taulukosta 2 nähdään, eri kiertoaineiden tunnusluvut eroavat huomattavasti keskenään. ORC-prosessiin valittavan kiertoaineen tarkastelu tulee tehdä hyvin huolellisesti, jotta prosessin hyötysuhde saadaan maksimoitua. Myös ympäristöä ja turvallisuutta koskevat asiat tulee ottaa suunnittelussa huomioon. Muun muassa Euroopan unioni rajoittaa uudella F-kaasuasetuksella HFC-, PFC- ja SF<sub>6</sub> -yhdisteiden käyttöä edeten tiettyjen aineiden markkinoille saattamisen kieltoon vuoteen 2050 mennessä (Valtioneuvosto, 2024). F-kaasuasetuksen rajoitusten piirissä ovat korkean

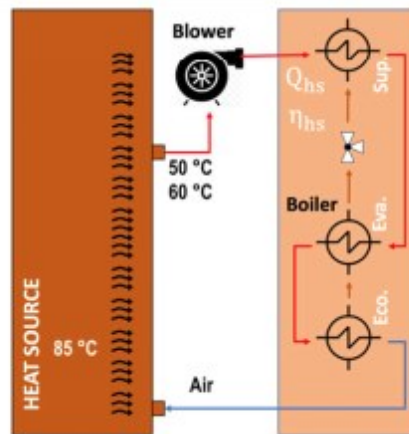
GWP-arvon omaavat fluorihilivedyt (HFC-yhdisteet) ja perfluoratut hiilivedyt (PFC-yhdisteet), joita yllä olevassa listassa ovat R22, R32, R134a, R143a, R152a, R218, R227ea, R236ea ja R245fa. F-kaasusetuksen piiriin kuuluvien aineiden osalta sääntely lisääntyy, joka tarkoittaa muun muassa kovempia vaatimuksia prosessin vuotojen seuraamiseksi. Vaatimukset laitteiston suunnitteluun, huoltamiseen, kierrätykseen ja hävitykseen myös tarkentuvat, joka lisää prosessin kustannuksia. Osan ympäristölle hyvin haitallisista kylmäaineista, kuten R22, käyttö on jo nyt kokonaan kielletty. Alhaisen GWP-arvon omaavat luonnolliset kylmäaineet, kuten R600, eivät kuulu F-kaasusetuksen ilmastoperusteisen sääntelyn piiriin.

### 3.3.1 Esimerkkitapaus ORC-prosessin mallinnuksesta

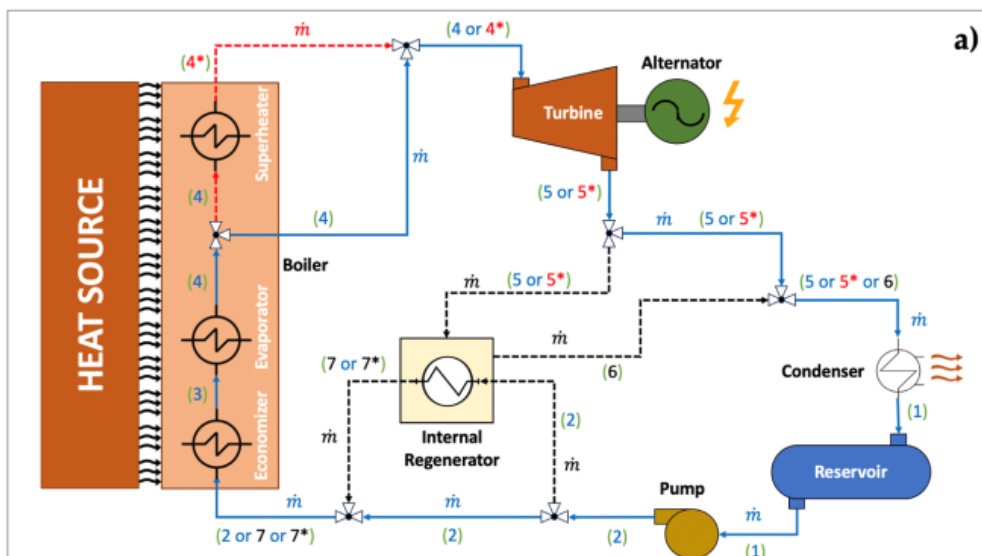
Corigliano ja muut (2024, s. 13–17) suorittivat simulaation, jossa tutkittiin samasta datakeskuksen hukkalämpöä hyödyntävästä ORC-prosessista saatavia tuloksia kahdella eri kiertoaineella kahdessa eri lämpötilassa. ORC-prosessin onnistumisen kannalta tärkeimmät tarkasteltavat tekijät liittyvät saatavilla olevan lämpömäärän kykyyn höyrystää kiertoaine ja saatavilla olevien luonnonvarojen (esim. merivesi tai ulkoilma) tai jäähdytysvesivirran kykyyn lauhduttaa kiertoaine. Lauhdutus voidaan toteuttaa erillisellä jäähdytysvesivirralla, jonka etuna on, että lämpötila saadaan pidettyä tasaisena. Tämä helpottaa ORC-prosessin lauhdutuksen suunnittelua, mutta vaatii suurempia investointeja jäähdytyslaitteistoa varten. Simulaatiossa datakeskuksesta saatava 30 °C sisäilma esilämmitti kiertoaineen. Varsinainen kiertoaineen höyryttäminen lämmönsiirtimessä tapahtui vesilämmitteisen eli epäsuoran lämmöntalteenotto-prosessin, kuva 12, tapauksessa 50 °C ja 80 °C vedellä ja ilmalämmitteisen eli suoran lämmöntalteenotto-prosessin, kuva 13, tapauksessa 50 °C ja 60 °C ilmalla. Pinch-pointiksi, eli minimilämpötilaeroksi lämmönsiirtimessä hukkalämmönlähteen ja ORC-kiertoaineen välillä, määriteltiin 10 °C. Lämpötilatasojen avulla kahdeksi kiertoainevaihtoehdoksi simulaatiossa määriteltiin ympäristöystävälliset pentaani (R601) ja isopentaani (R601a), jotka tulistetaan. Koko prosessin kaavio on esitelty kuvassa 14.



**Kuva 12.** Epäsuora lämmöntalteenotto-prosessi (Corigliano ja muut, 2024, s. 8).

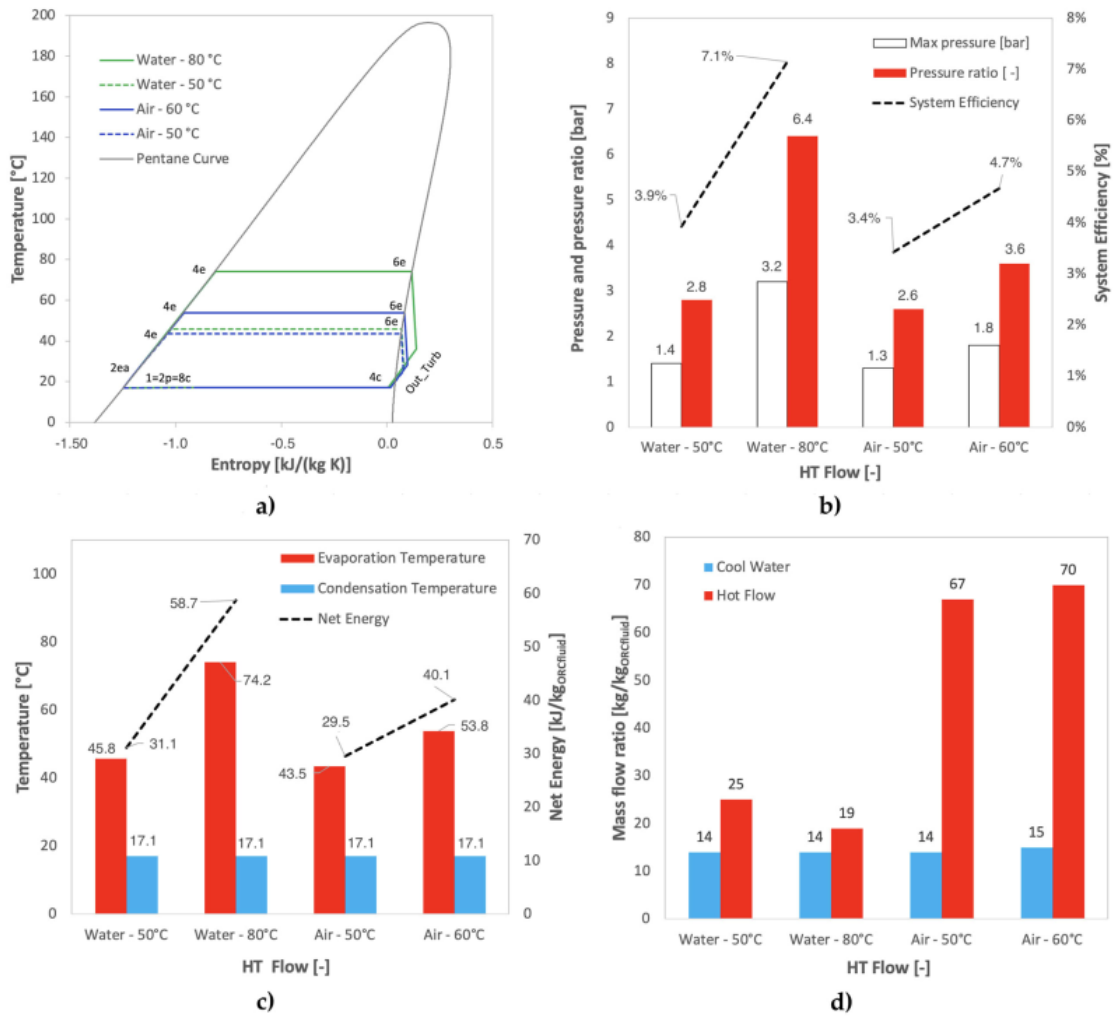


**Kuva 13.** Suora lämmöntalteenotto-prosessi (Corigliano ja muut, 2024, s. 8).



Kuva 14. ORC-prosessin toimintakaavio (Corigliano ja muut, 2024, s. 8).

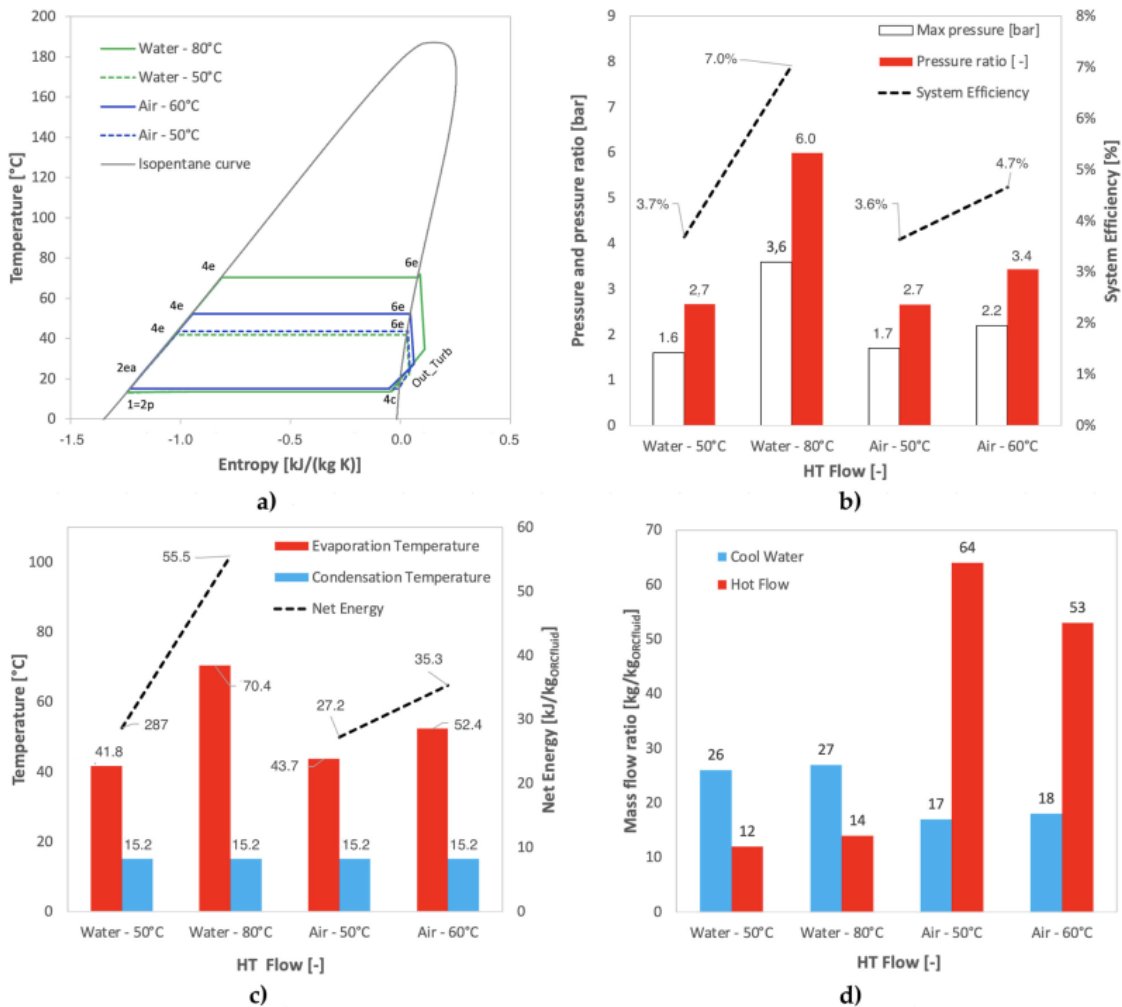
Corigliano ja muut (2024, s. 13–17) toteuttivat simulaation prosessisimulaatioihin soveltuvalla DWSIM-ohjelmistolla ja laativat saaduista tuloksista taulukot. Lauhduksessa kiertävän veden lämpötilaksi simulaatiossa asetettiin 10 °C ja ORC-kiertoaineen massavirraksi 1 kg/s. Tarkasteltavina suureina oli prosessin painetasot, hyötysuhde, höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat sekä kiertoaineen höyrystämiseen ja lauhtuttamiseen käytettävät massavirrat. Kuvassa 15 on esitelty pentaanilla saadut tulokset ja kuvassa 16 isopentaanilla saadut tulokset. Tuloksissa on esitelty saadut tunnusluvut epäsuoran lämmöntalteenotto-prosessin ja suoran lämmöntalteenotto-prosessin osalta.



**Kuva 15.** Pentaanilla saavutetut tulokset: kohdat a) entropia-lämpötila-diagrammissa, b) paineen ja hyötysuhteen osalta, c) lämpötilatasojen ja tuotetun energian osalta ja d) massavirtauksien osalta (Corigliano ja muut, 2024, s. 16).

Kuvan 15 kaaviosta b) huomataan, että epäsuora lämmöntalteenotto-prosessi, missä kiertoaine lämmitetään höyrystimessä jäähdytysjärjestelmästä palaavan veden avulla, on ilmalämmitteistä prosessia tehokkaampi. Kun vertaillaan hukkalämmön lämpötilatasoja, huomataan että korkeamman lämmönlähteen avulla saavutetaan parempi hyötysuhde. Korkein prosessin painetaso ja täten lämpöhyötysuhde saavutetaan 80 °C vedellä, jolla päästään arvoon 7,1 %, joka on jopa yli 89 prosenttia ja 3,3 prosenttiyksikköä korkeampi verrattuna 50 °C vettä lämmönlähteenä käyttävään prosessiin. Kaaviosta c) nähtävä nettosähköntuotanto, jossa on huomioitu prosessin kuluttama energia, on suurimmillaan 58,7 kJ/kg, joka myös saavutetaan 80 °C vedellä.

Kiertoineen höyrystyslämpötila on n. 5–7 °C lämmönlähdettä alhaisempi, lauhtumislämpötilan ollessa kaikissa tapauksissa sama 17,1 °C. Kaaviosta d) nähdään, että 1 kg/s pentaania höyrystämiseksi vaaditaan 19–25 kg/s vettä tai 67–70 kg/s ilmaa. Vedellä on ilmaa suurempi tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. On hyvä huomioida, että todellisessa datakeskuksen jäähdytysjärjestelmässä jäähdytysveden sekaan joudutaan usein sekoittamaan esim. glykolia tai etanolia, jolla ehkäistään mikrobien ja biofilmin kasvua putkistossa.



**Kuva 16.** Isopentaanilla saavutetut tulokset: kohdat a) entropia-lämpötila-diagrammissa, b) paineen ja hyötysuhteen osalta, c) lämpötilatasojen ja tuotetun energian osalta ja d) massavirtauksien osalta (Corigliano ja muut, 2024, s. 17).

Coriglianon ja muiden (2024, s. 16–17) laatimista kaavioista, kuvat 15 ja 16, sekä taulukon 2 arvoista huomataan, että pentaani ja isopentaani ovat toisiaan läheisesti vastaavat kiertoaineet, eivätkä prosessiarvot hyötysuhteen osalta oleellisesti eroa. Myös isopentaanin tapauksessa tässä vertailussa maksimaalinen lämpöhyötysuhde saavutetaan 80 °C vedellä, jonka prosessissa maksimipaine ja painesuhde ovat korkeimmat. Korkeamman painesuhteen avulla turbiini tuottaa enemmän työtä. Pentaaniin verrattuna isopentaania hyödyntävässä prosessissa höyrystymislämpötilat ovat epäsuoran lämmöntalteenotto-prosessin tapauksessa alhaisemmat, lauhtumislämpötilan ollessa niin ikään pentaaniprosessia alhaisempi 15,2 °C. Isopentaania käytettäessä nettosähköenergian tuotanto laskee 50 °C ja 80 °C veden tapauksessa sekä 50 °C ja 80 °C ilman tapauksessa verrattuna pentaanilla saavutettuihin tuloksiin. Kuvan 16 kaaviosta d) nähdään, kuinka epäsuoran lämmöntalteenotto-prosessin tapauksessa isopentaani saadaan höyrystettyä pienemmällä kuuman veden määrillä suhteessa pentaaniin, mutta lauhtumiseen vaaditaan suurempi jäähdytyksen massavirtaus.

Höyrystymisen ja lauhtumisen massavirrat vaikuttavat oleellisesti höyrystimen ja lauhtuttimen fyysiseen kokoon, sillä niiden tarvittava lämmönsiirtopinta-ala riippuu lämmönsiirron tehokkuudesta. Kaavojen 18–21 avulla voidaan laskea höyrystimen ja lauhtuttimen koot (Corigliano ja muut, 2024, s. 20). Kaavalla 18 lasketaan lämmönlähteen massavirtaus suhteessa 1 kg/s massavirtaan ORC-prosessin kiertoainetta, kaavalla 19 höyrystimen koko suhteessa lämmittävään massavirtaan, kaavalla 20 lasketaan lauhtuttava massavirtaus suhteessa 1 kg/s massavirtaan ORC-prosessin kiertoainetta ja kaavalla 21 lasketaan lauhtuttimen koko suhteessa lauhtuttavaan massavirtaan;

$$\frac{\dot{m}_h}{\dot{m}} = \frac{h_{u,\text{höyrystyminen}} - h_{s,\text{höyrystyminen}}}{\eta_{hs} c_{p,h} (T_{h,s} - T_{h,u})}, \quad (18)$$

missä  $\dot{m}_h$  on kuuman nesteen massavirta,  $\dot{m}$  ORC-kiertoaineen massavirta,  $h_{u,\text{höyrystyminen}} - h_{s,\text{höyrystyminen}}$  höyrystymisen latentti lämpö (kJ/kg),  $\eta_{hs}$  hyötysuhde,  $c_{p,h}$  lämpimän nesteen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK) ja  $T_{h,s} - T_{h,u}$

höyrystimeen saapuvan ja sieltä lähtevän nesteen lämpötilojen erotus (K) (Corigliano ja muut, 2024, s. 20).

$$\frac{l_{höyr}}{\dot{m}_h} = \frac{(\eta_{hs} c_{p,h} (T_{h,s} - T_{h,u}))}{U_{höyr} (\pi d) (\Delta T_{ln})}, \quad (19)$$

missä  $l_{höyr}$  on höyrystimen pituus,  $U_{höyr}$  höyrystimen lämmönsiirtokerroin,  $d$  höyrystimen lämmönsiirtopinta-alan halkaisija ja  $(\Delta T_{ln})$  logaritminen lämpötilaero (Corigliano ja muut, 2024, s. 20).

$$\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}} = \frac{h_{s,lauhtuminen} - h_{u,lauhtuminen}}{\eta_{hs} c_{p,c} (T_{c,u} - T_{c,s})}, \quad (20)$$

missä  $\dot{m}_c$  on kylmän nesteen massavirta,  $\dot{m}$  ORC-kiertoaineen massavirta,  $h_{s,lauhtuminen} - h_{u,lauhtuminen}$  lauhtumisen latentti lämpö (kJ/kg),  $\eta_{hs}$  hyötysuhde,  $c_{p,c}$  kylmän nesteen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK) ja  $T_{c,u} - T_{c,s}$  lauhduttimesta lähtevän ja sinne saapuvan nesteen lämpötilojen erotus (K) (Corigliano ja muut, 2024, s. 20).

$$\frac{l_{lauhd}}{\dot{m}_c} = \frac{(\eta_{hs} c_{p,c} (T_{c,u} - T_{c,s}))}{U_{lauhd} (\pi d) (\Delta T_{ln})}, \quad (21)$$

missä  $l_{lauhd}$  on lauhduttimen pituus,  $U_{lauhd}$  lauhduttimen lämmönsiirtokerroin,  $d$  lauhduttimen lämmönsiirtopinta-alan halkaisija ja  $(\Delta T_{ln})$  logaritminen lämpötilaero (Corigliano ja muut, 2024, s. 20).

Coriglianon ja muiden (2024) tuottaman esimerkin avulla voidaan todeta, että ORC-prosessin suunnittelu on hyvin haastavaa ja työlästä. Käytettävissä olevat lämpötilat kiertoaineen höyrystämiseen ja lauhduttamiseen sekä datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän tyyppi asettavat suurimmat kiertoaineen valintaa ja prosessin hyötysuhdetta ohjaavat rajoitteet. Esimerkiksi lauhtumislämpötilaa laskemalla voidaan saavuttaa korkeampi painesuhde, joka tehostaa prosessia, mutta tämä asettaa suurempia vaatimuksia lauhdutukseen käytettävän veden tai ilman lämpötilan suhteen. Kiertoaineiden fyysiset ominaisuudet aiheuttavat eroavaisuuksia prosessin eri vaiheissa

ja komponenttien hyötysuhteet vaihtelevat eri valmistajien ja laitetyyppien kesken. Myös ORC-kiertoaineiden elinikä tulee huomioida, sillä erityisesti prosessissa tapahtuvat ennalta-arvaamattomat lämpötilavaihtelut lyhentävät kiertoaineen elinikää ja sen suorituskykyä. Kiertoaineen elinkaari tulee huomioida myös taloudellisissa tarkasteluissa.

## 4 Lämpöpumpun ja ORC-prosessin integraatio

Hyödynnettävän hukkalämmön korkeamman lämpötilan avulla ORC-prosessin lämpöhyötysuhdetta voidaan nostaa. Toistaiseksi suurin osa etenkin Suomessa sijaitsevista datakeskuksista on ilmajäähdytteisiä tai yksivaiheista nestejäähdytystä hyödyntäviä. Kuten taulukosta 1 nähdään, ilmajäähdytyksestä tai yksivaiheisesta nestejäähdytyksestä saatavat jäähdytyskierron paluulämpötilat ovat suhteellisen matalia. Erittäin matalat tai matalat lämpötilat rajoittavat ORC-prosessin lämpöhyötysuhdetta ja täten siitä saatavaa sähkötehoa.

### 4.1 Lämpöpumpulla tehostettu ORC-prosessi

Suomessa toimiviin datakeskuksiin on integroitu lämpöpumppuja, joiden avulla jäähdytysjärjestelmästä talteen kerättyä hukkalämpöä pystytään nostamaan kaukolämmön tuotannon vaatimalle tasolle. Lämpöpumpulla voidaan myös nostaa hukkalämmön lämpötilaa ORC-prosessia varten. Hukkalämmönlähteen avulla lämmitetään lämpöpumpussa kiertävä kylmäaine, joka luovuttaa lämpöenergiaa lauhduttimen välityksellä ORC-kiertoaineeseen. Lämpöpumppu on kuitenkin investointina suuri ja kuluttaa sähköenergiaa, joten prosessin kokonaishyötysuhde ei välttämättä lämpöpumpun lisäämisellä nouse.

ORC-prosessin hyötysuhdetta voidaan pyrkiä parantamaan esimerkiksi turbiinin väliotolla (turbine bleeding), jossa turbiinissa paisuvasta kiertoaineesta osa otetaan turbiinista ulos ennen paisunnan loppua. Poistettu väliottohöyry ohjataan lämmittämään ORC-kiertoainetta ennen höyrystintä (Desai ja muut, 2009, s. 2–3). Väliotto soveltuu useimmiten kuumempia lämmönlähteitä hyödyntäviin ORC-prosesseihin, joissa ORC-kiertoaine pyritään saamaan lähemmäksi lämmönlähteen lämpötilaa ja täten pyritään pienentämään höyrystimessä tapahtuvia häviöitä. Matalaa lämpöä hyödyntävään ORC-prosessiin väliotto ei kuitenkaan sovellu erityisen hyvin. Matalalämpöisen ORC-prosessin väliottohöyry ei ole riittävän kuumaa, väliotto vähentää turbiinin tekemää työtä, ja täten tuotetun sähköenergian määrää, sekä matalan

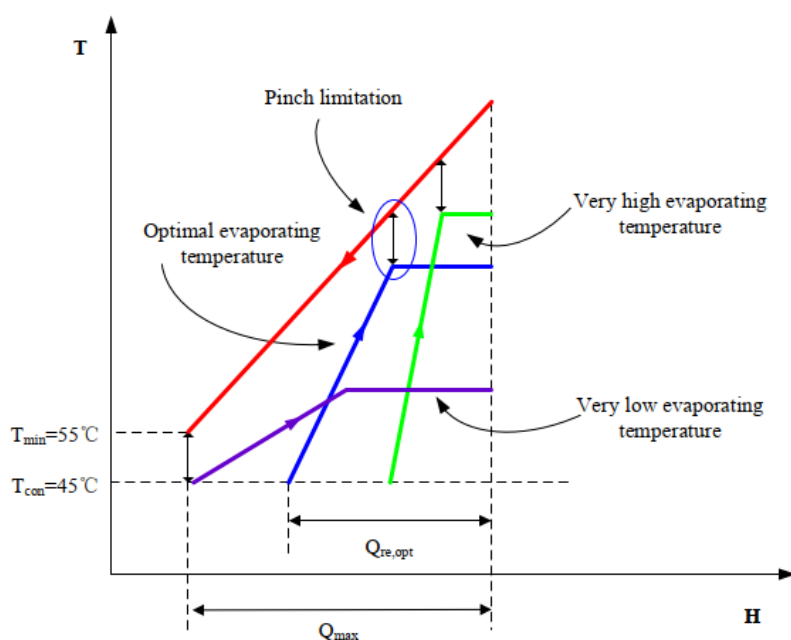
lämmönlähteen ja ORC-kiertoaineen välinen lämpötila on jo valmiiksi suhteellisen lähellä toisiaan. Väliotto matalalämpöisessä ORC-prosessissa heikentää hyötysuhdetta, sillä toisin kuin korkealämpöisessä prosessissa, ei turbiinin tuottamaa työmäärää kannata vähentää höyrystimen häviöiden pienentämiseksi. Toisin kuin väliotto, lämpöpumppu soveltuu matalalämpöisen prosessin tehostamiseen, sillä se tuottaa itsenäisen ORC-prosessin ulkopuolelta korkeampilaatuista lämpöä ORC-prosessin käyttöön.

## **4.2 Tekninen toteutus**

### **4.2.1 Pinch-rajoitus**

ORC-prosessin yhteydessä käytetään termiä pinch-rajoitus (pinch limitation), joka tarkoittaa pienintä mahdollista lämpötilaeroa hyödynnettävän hukkalämmön lämpötilan ja höyrystettävän ORC-kiertoaineen välillä. Lämpötilojen ollessa hyvin lähellä toisiaan, pinch-rajoitus rajoittaa lämmönsiirron tehokkuutta. Mikäli kiertoaineen höyrystymislämpötila on lähellä sen kriittistä lämpötilaa, jäävät höyrystymisprosessin latentti lämpö ja isoterminen faasimuutos vähäisiksi. Mikäli kiertoaineen lämpötila nousee tasaisesti läpi höyrystimen, pinch-rajoitus voi teoriassa kadota, jolloin kiertoaineen lämpötila vastaa täysin lämmönlähteen lämpötilaa ja lämmönsiirto pysähtyy. (Yu ja muut, 2018, s. 5) Mikäli höyrystymislämpö nousee kiertoaineen kriittisen lämpötilan yli, tulee ORC-prosessista ylikriittinen. Ylikriittinen tai lähes ylikriittinen prosessi voi teoriassa olla tehokkaampi, mutta se on huomattavasti kalliimpi ja haastavampi toteuttaa turvallisesti sekä hallitusti, jonka vuoksi käytännön ORC-prosessit toteutetaan alikriittisinä. Alikriittisessä ORC-prosessissa kiertoaineen höyrystymislämpötila ei ylitä sen kriittistä lämpötilaa, ja jotta prosessista saadaan mahdollisimman helposti hallittava, kriittisen lämpötilan tulee olla verrattain huomattavasti höyrystymislämpötilaa korkeampi. Tämän seurauksena pinch-rajoitus tulee huomioida; höyrystymislämpötilan ollessa liian suuri, prosessi lähenee kriittistä lämpötilaa, ja höyrystymislämpötilan ollessa liian pieni, lämmönlähteen lämpötilaa ei saada tehokkaasti hyödynnettyä (Yu ja muut, 2018, s. 6).

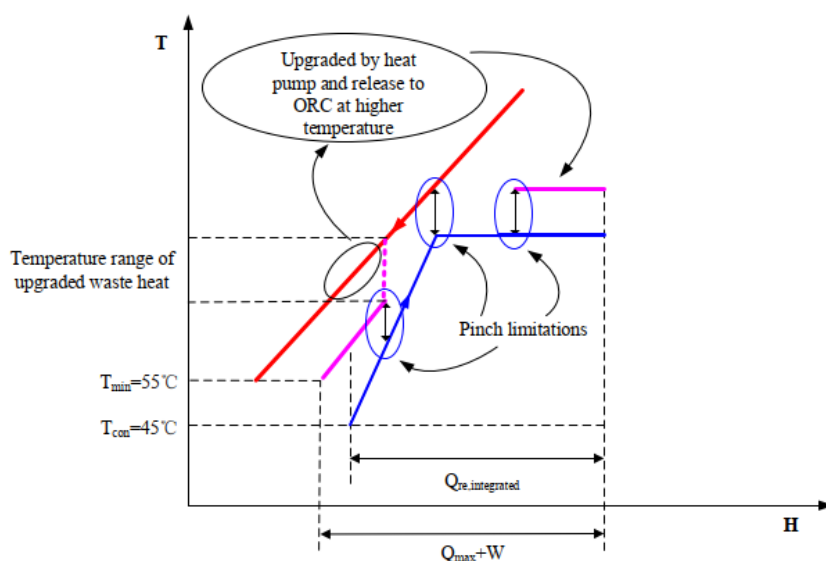
Kuvassa 17 (Yu ja muut, 2018, s. 7) osoitetaan pinch-ilmion ja tehokkaan prosessin vaatiman korkean lämpöhyötysuhteen kompromissi käytännössä. ORC-kiertoaineen lauhtumislämpötilaksi on asetettu  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hukkalämmön alimmaksi mahdolliseksi ulosmenolämpötilaksi lämmönluvutuksen jälkeen on asetettu  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , olettaen että hukkalämmön lämpötilan tulee olla vähintään  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  korkeampi kuin ORC-kiertoaineen. Kuvassa 17 violetti viiva kuvaa alhaisen höyrystyslämpötilan omaavaa kiertoainetta, joka pystyy ottamaan tehokkaasti lämpöä vastaan vastaan koko höyrystimen ajan, pinch-rajoituksen ollessa merkityksetön. Lämmönsiirto on tehokasta, mutta lämpöhyötysuhde jää matalalla höyrystyslämpötilalla alhaiseksi eikä prosessin sähköntuotanto ole tehokasta turbiinissa tapahtuvan heikon paisunnan vuoksi. Vihreällä viivalla höyrystyslämpötila on korkea, jolloin sen höyrystyminen tapahtuu lähempänä lämmönlähteen, punainen viiva, lämpötilaa. Tällöin lämpöhyötysuhde kasvaa turbiinissa tapahtuvan tehokkaamman paisunnan seurauksena. Kun kiertoaineen lämpötila nousee höyrystimessä, se alkaa lähestymään hukkalämmön lämpötilaa, jolloin pinch-rajoitus rajoittaa lämmön siirtymistä ja lämmönsiirtoprosessin tehokkuutta.



**Kuva 17.** Pinch-ilmio eri höyrystyslämpötiloilla (Yu ja muut, 2018, s. 7).

Kuvassa 17 sininen viiva kuvastaa optimaalista kompromissia, jossa prosessin lämpöhyötysuhde on vihreää viivaa alhaisempi, mutta violettiä viivaa korkeampi. Hukkalämmöstä vastaanotettu lämpömäärä on sinisellä viivalla suuremman pinch-rajoituksen vuoksi violettiä viivaa vähäisempi, mutta vihreään viivaan verrattuna vuorostaan korkeampi (Yu ja muut, 2018, s. 7). Isotermisessä faasimuutoksessa lämpötilaero voi olla pieni ja täten lämmön siirtyminen on vähäistä. Kompromississa sekä lämmön siirtyminen että lämpöhyötysuhde pyritään pitämään kohtalaisena. Tällöin kaikkea hukkalämpöä ei saada vastaanotettua, mutta korkeamman lämpöhyötysuhteen avulla tuotetun sähköenergian määrä kasvaa.

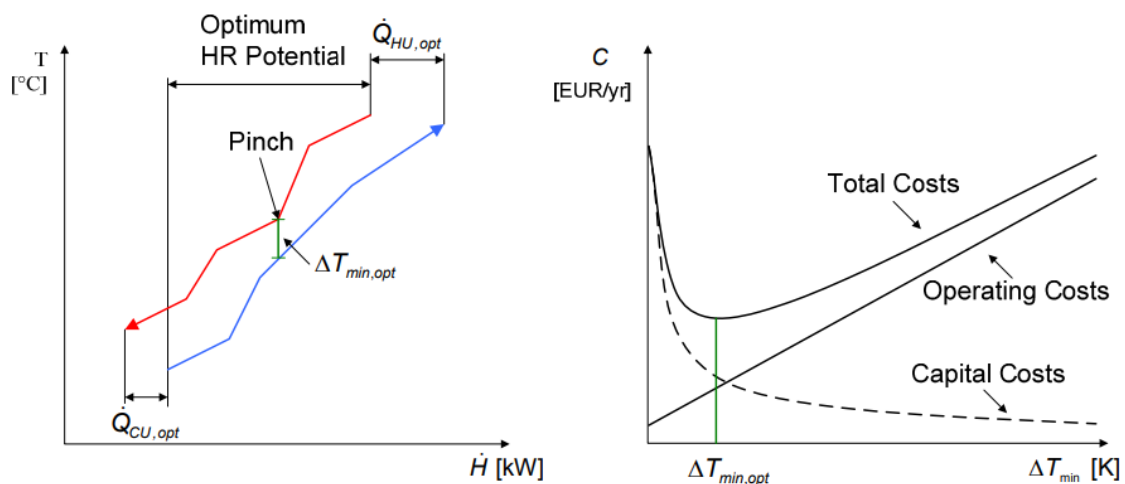
Mikäli ORC-prosessin yhteyteen integroidaan lämpöpumppu, saadaan hukkalämmön lämpötilaa nostettua ja täten mahdollisesti tuotetun sähköenergian määrää lisättyä. Lämpöpumpun lauhduttimessa pumpussa kiertävä kylmäaine tiivistyy ja se luovuttaa latenttia lämpöä vakiossa lämpötilassa. Tällä lämmöllä lämmitetään ORC-kiertoainetta höyrystimessä, ja lämmönluovutuksen ollessa tasaista, saadaan isotermiset faasimuutokset yhteensovittettua tehokkaasti ja pinch-rajoitus pidettyä maltillisena. Kuvassa 18 on esitetty, kuinka osa hukkalämmöstä käytetään sellaisenaan ORC-kiertoaineen lämmittämiseen, kun taas osan hukkalämmöstä lämpötilaa korotetaan lämpöpumpulla ennen lämmönluovutusta ORC-kiertoaineelle (Yu ja muut, 2018, s. 7). Pinkin ja punaisen viivan väli kuvastaa lämpöpumpulla nostetun lämpötilan erotusta. Sininen viiva kuvastaa ORC-prosessin kiertoainetta ja kuvasta nähdään, kuinka kiertoaineen ja lämmönlähteen pinch-rajoitus siirtyy oikealle lämpöpumpulla nostetun lämpötilan (punainen viiva) tapauksessa, verrattuna alkuperäiseen lämmönlähteen lämpötilaan (pinkki viiva). Tällöin ORC-kiertoaine pystyy vastaanottamaan enemmän lämpöä ennen kuin pinch-rajoitus rajoittaa lämmönsiirtoa, tehden prosessin lämmönsiirrosta tehokkaamman. ORC-kiertoaineen elinkaari tulee myös huomioida lämmönsiirtoprosessin yhteydessä, sillä suuret lämpötilaerot höyrystymisen ja lauhtumisen välillä voivat parantaa prosessin lämpöhyötysuhdetta mutta samalla lyhentää kiertoaineen elinkaarta.



**Kuva 18.** ORC-prosessiin integroitu lämpöpumppu (Yu ja muut, 2018, s. 8).

ORC-prosessin pinch-pisteen määrittely on siis tärkeä osa prosessia. Pinch-analyysi on työvaihe, jossa pinch-piste määritellään prosessin hyötysuhteen kannalta mahdollisimman sopivaksi. Analyysissa tarkastellaan prosessissa käytettäviä lämpötiloja ja niiden yhteensopivuutta graafisilla laskentatyökaluilla. Tärkein tarkasteltava grafiikka on  $T$ - $H$ -diagrammiin sijoitettu yhdistelmäkäyrä, joka näkyy kuvassa 19 vasemmalla. Kuvassa sininen käyrä kuvastaa lämpöä vastaanottavaa ja punainen käyrä lämpöä luovuttavaa virtausta. Pinch-piste on kohta, missä käyrien lämpötilaero  $\Delta T_{min,opt}$  on pienimmillään eli niiden lämpötilat ovat lähimpänä toisiaan (Olsen ja muut, 2017, s. 2–3). Käyrät on sijoitettu kaavioon tarkasteltavan prosessin rajoitteiden mukaisesti. Sinistä käyrää liikuttaessa oikealle, käyrien välinen lämpötilaero kasvaa ja lämmönlähteen hyödyntämismahdollisuus (Optimum Heat Recovery Potential) pienenee. Jos sinistä käyrää nostetaan ylöspäin, höyrystyslämpötilaa voidaan nostaa, mutta pienemmän lämpötilaeron vuoksi vaaditaan suuremmat investoinnit lämmönsiirtimiin tehokkaan lämmönsiirron aikaansaamiseksi. Lämmönsiirron pinta-alan kasvattaminen kompensoi pienentyneen lämpötilaeron lämmönsiirrossa vain tiettyyn pisteeseen asti. Optimaalisen prosessin suunnittelu on tasapainoilua mahdollisimman tehokkaan lämmönsiirron ja sähköntuotannon tehokkuuden sekä kustannuksien välillä. Kuvassa 19 oikealla näkyvä kaavio kuvastaa eri lämpötilaerojen mukaisesti vaihtuvaa

kustannuskäyrää, jossa pienimmät kokonaiskustannukset saavutetaan lämpötilaerolla  $\Delta T_{min,opt}$ . Liian pienellä lämpötilaerolla siirtimien vaatima investointi nostaa kokonaiskustannuksia, kun taas suuremmalla lämpötilaerolla vaadittu lämmönsiirtopinta-ala pienenee, mutta operointikulut kasvavat. Operointikulujen kasvu tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti, sillä ne voivat kasvaa esimerkiksi vaaditun pumppaustehon myötä.

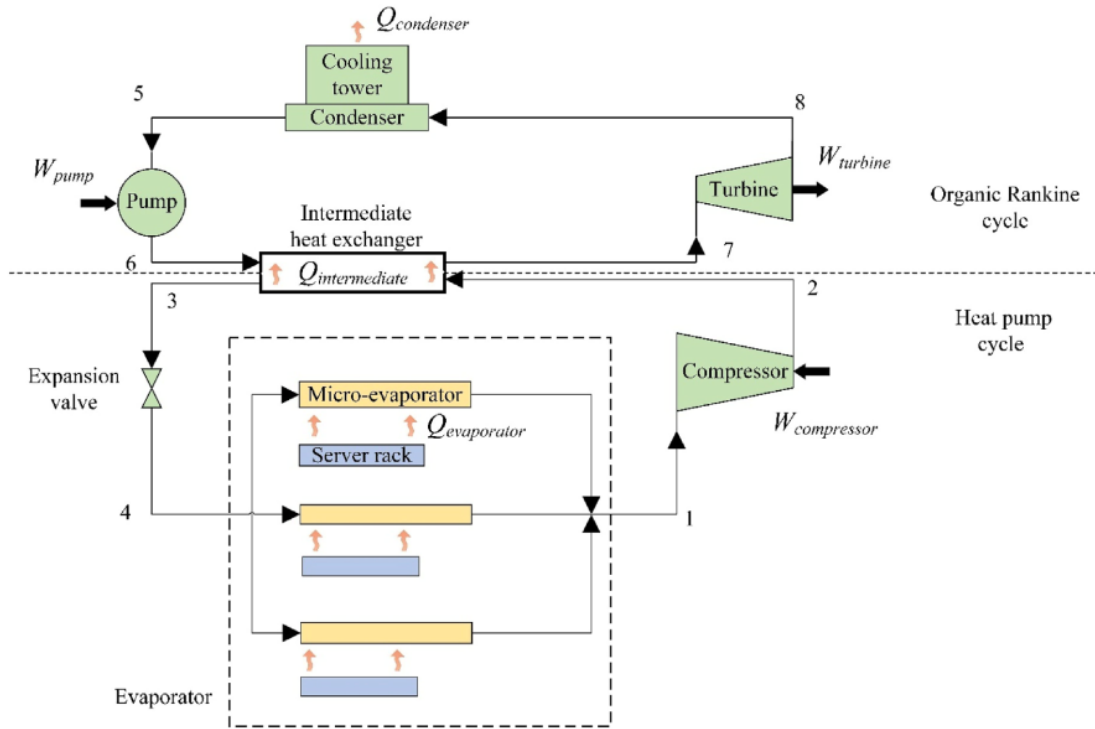


Kuva 19. Lämmönsiirron Pinch-piste (Olsen ja muut, 2017, s. 3).

#### 4.2.2 Laitteisto ja prosessin toiminta

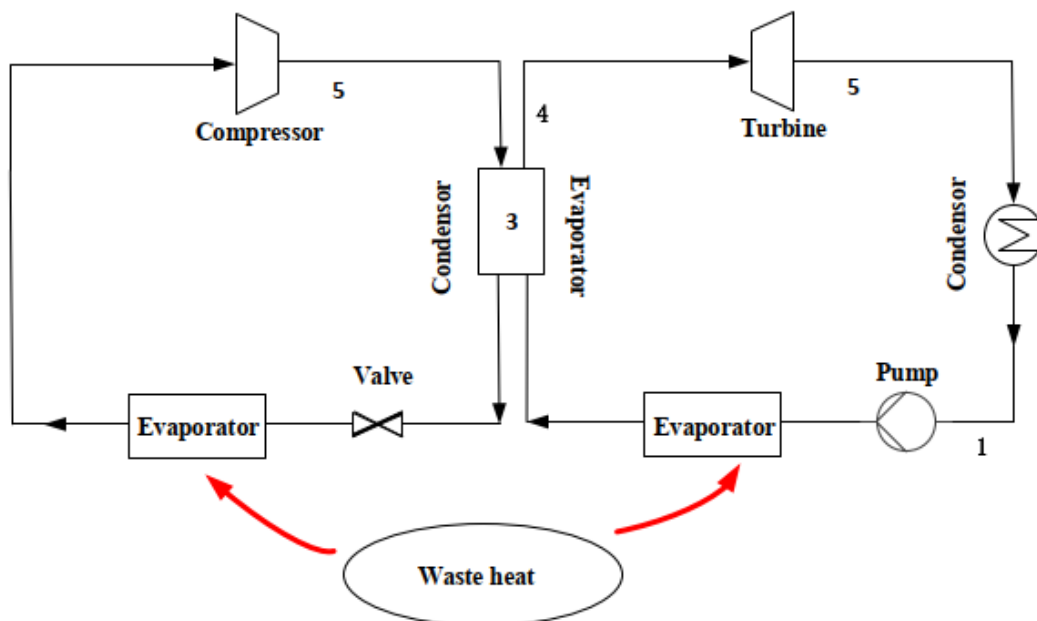
Lämpöpumppu voidaan integroida ORC-prosessiin eri tavoin. Mikäli datakeskusta jäähdytetään vedellä, voidaan jäähdytyksen paluuvesivirta ohjata lämpöpumpulle, jossa kiertävään kylmäaineeseen vesivirta luovuttaa lämpöenergiaa lämmönvaihtimen välityksellä. Mikäli datakeskuksessa on kaksivaiheinen nestejäähdytys, voidaan lämpöä luovuttavia palvelinkaappeja pitää mikrohöyrystyminä. Tällöin palvelinkaapeilta palaava höyrystynyt jäähdytysneste kulkeutuu suoraan kompressorin kautta ORC-prosessiin yhteydessä olevaan lämmönsiirtimeen, jonka jälkeen se palautuu paisuntaventtiilin kautta takaisin palvelimia jäähdyttävään kiertoon (Marshall ja muut, 2021, s. 2). Jäähdytyskierto siis itsessään toimii lämpöpumpun kiertoperiaatteella, ilman että kyseessä olisi yksittäinen fyysinen lämpöpumppu kuten yksivaiheisen nestejäähdytyksen

tapauksessa. Kuvassa 20 on esitetty lämpöpumpun periaatteella toimivan kaksivaiheisen nestejäähdytyksen integrointi ORC-prosessiin.



**Kuva 20.** Lämpöpumpun periaatteella toimivan jäähdytyskierron ja ORC-prosessin integraatio kaksivaiheisen nestejäähdytyksen tapauksessa (Marshall ja muut, 2021, s. 3).

Kaksivaiheista nestejäähdytystä yleisemmät tavat toteuttaa datakeskuksen jäähdytys ovat ainakin toistaiseksi yksivaiheinen nestejäähdytys ja ilmajäähdytys, jonka CRAH-laitteissa on vesikiertoinen jäähdytys. Tämän vuoksi erillinen fyysinen lämpöpumppu on yleisempi ratkaisu, ja todennäköisempi vaihtoehto myös ORC-prosessiin integroidessa. Kuvassa 21 on esitetty erillisen lämpöpumpun ja ORC-prosessin integraation toimintakaavio, jossa kuvan vasemmalla puolella on lämpöpumppu ja oikealla ORC-järjestelmä. On huomioitavaa, että hukkalämpöä johdetaan sekä lämpöpumpun höyrystimeen, että myös suoraan ORC-järjestelmän höyrystimeen. Osa hukkalämmöstä käytetään siis sellaisenaan, esimerkiksi kiertoaineen esilämmittämiseen, ja osan lämpötilaa korotetaan lämpöpumpulla.



**Kuva 21.** Erillisen lämpöpumpun ja ORC-prosessin integraatio (Yu ja muut, 2018, s. 8).

Tunnettuja ORC-järjestelmiä toimittavia yrityksiä on lukuisia, muun muassa italialaiset Exergy International Srl ja Mitsubishi Heavy Industries -konsernin osana toimiva Turboden, yhdysvaltalaiset Ormat Technologies ja ElectraTherm, ruotsalainen Climeon sekä saksalaiset INTEC Engineering GmbH ja Dürr CTS GmbH. Osa ORC-järjestelmiin erikoistuneista yhtiöistä valmistaa myös suuritehoisia lämpöpumppuja, joka helpottaa mahdollista lämpöpumpun ja ORC-laitteiston integrointia. Eri valmistajista useilla on myös matalaan hukkalämmön lämpötilatasoon (alle 100 °C) soveltuvia ORC-järjestelmiä, joita on mahdollista hyödyntää datakeskusten yhteydessä. ORC-laitteiston kokoluokka vaihtelee prosessin mukaisesti, matalan lämpötilatason järjestelmien ollessa useimmiten kokoluokaltaan pienempiä. Pienemmän kokoluokan laitteistot toimitetaan usein tehdasvalmisteisina valmiina moduuleina. Valmiit moduulit ovat helppokäyttöisiä ja niiden toiminta on pystytty standardisoimaan valmistajan omissa tuotetestauksissa. Eri valmistajien kesken matalalla hukkalämmön lämpötilatasolla, n. 65–90 °C, saavutettavat ORC-prosessin tuottamat sähkötehot vaihtelevat tyypillisesti n. 20–1000 kW välillä per yksi tehdasvalmisteinen moduuli. Sähkötehot kasvavat lämpötilatasojen kasvaessa. Kuvassa 22 on nähtävillä Electrathermin toimitusvalmis ORC-moduuli, jonka

sähköntuotantotehon maksimiksi on määritelty 75 kW. Kuvassa 23 on vastaava toimitusvalmis Climeonin ORC-moduuli, jonka suurimmaksi sähköntuotantotehoksi on matalalla lämpötilatasolla määritelty 355 kW. Kuvassa 24 on INTEC GMK:n matalalämpöiden ORC-moduuli, jonka maksimisähköteho on 500 kW. Kuvassa 25 on Electrathermin käyttämä ruuvilaajennin (Screw expander). Laajennin (Expander) on yleistermi, jota käytetään usein ORC-prosessien yhteydessä. Pienillä tehoilla turbiinin sijasta voidaan käyttää samalla toimintaperiaatteella toimivia, mutta matalampiin paineisiin ja virtaamiin soveltuvia ruuvilaajentimia tai kolmilapaturbiineja (Roots expander). On huomioitava, että optimaaliset lämpötilatasot ja muut maksimaaliseen sähköntuotantotehoon vaikuttavat tekijät vaihtelevat eri valmistajien kesken. Edellä mainittuja suurempien sähkötehojen tuottaminen vaatii mahdollisesti useamman pienemmän moduulin yhdistämistä tai erikseen räätälöidyn prosessin.



**Kuva 22.** Electratherm POWER MODULE75 (Electratherm.com).



**Kuva 23.** Climeon HeatPower 300 (Climeon.com).



**Kuva 24.** INTEC GMK Low temperature ORC Power Plant (INTEC-energy.de).



**Kuva 25.** ElectraTherm POWER MODULE75 -laitteiston ruuvilaajennin ja generaattori (Electratherm.com).

### 4.3 Kiertoaineiden valinta ja prosessiarvojen laskenta

ORC-prosessin nettosähköntuotanto kasvaa hyödynnettävän hukkalämmön lämpötilan kasvaessa. Korkeamman höyrystyslämpötilan avulla kiertoaineen höyrystymispaine kasvaa ja turbiini tuottaa enemmän työtä. Mikäli saatavilla olevalla lämpötilatasolla ei hukkalämpöä pystytä tehokkaasti ORC-prosessissa käyttämään hyödyksi, on hyödyllistä tutkia lämpöpumpun integroinnin mahdollisuutta. Integroinnin onnistumisen tarkastelu teknisestä näkökulmasta tulee aloittaa sekä lämpöpumpulle että ORC:lle sopivien kiertoaineiden tutkimisella. ORC-prosessille ja lämpöpumpulle valitaan sopivat kiertoaineet eri kriteerein. Lämpöpumpulle tulee valita kiertoaine, jolla saavutetaan suurin mahdollinen *COP*-arvo, kun taas ORC-prosessin kiertoaineen valinnassa tulee huomioida useampi eri tekijä (Yu ja muut, 2018, s. 9). Kuten aiemmin esiteltä, lämmönlähteen maksimaalisen tehokkaaksi hyödyntämiseksi, tulee ORC-prosessin kiertoaineen profiilin olla yhteensopiva lämmönlähteen kanssa. ORC-kiertoaineeksi valitaan suurimman nettosähköntuotantotehon saavuttava kiertoaine.

Integraatioon sopiva ORC-kiertoaine tulee valita paitsi lämpötilatasojen, myös latentin ja tuntuvan lämmön suhteen (the ratio of latent to sensible heat) perusteella. Mitä pienempi latentin ja tuntuvan lämmön suhde ORC-kiertoaineella on, sitä tehokkaammin

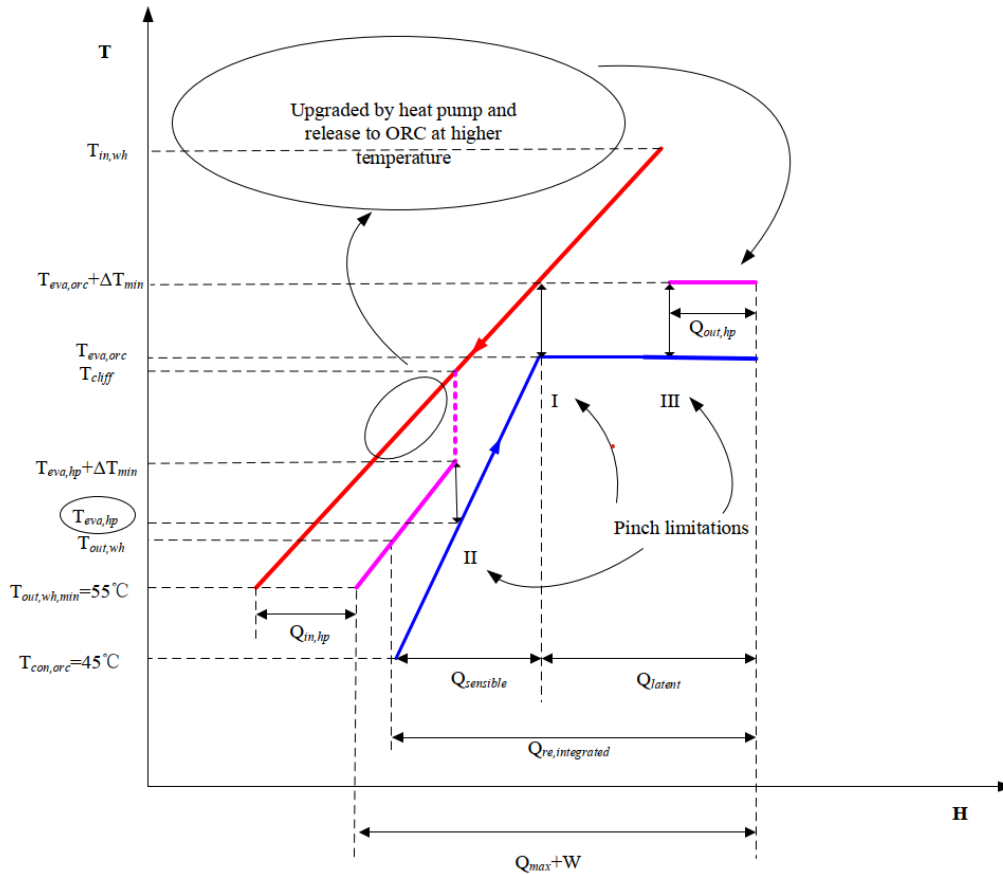
työaineen lämpötila nousee ja vähemmän energiaa kuluu faasimuutokseen. Korkeammalla höyrystymislämpötilalla saavutetaan pienempi ORC-kiertoaineen latentti lämpö, jolloin latentin ja tuntuvan lämmön suhde pienenee, eli prosessi tehostuu. Kun ORC-kiertoaineen latentin ja tuntuvan lämmön suhde on pieni, on lämpöpumpun integroiminen kannattavampaa. Tällöin lämpöpumppua hyödynnetään lähinnä höyrystymislämpötilan nostamiseen, jolloin sen energiankulutus tehostuu ja *COP*-arvo paranee. (Yu ja muut, 2018, s. 10–13) Latentin ja tuntuvan lämmön suhde muodostuu ORC-kiertoaineen höyrystymis- ja lauhtumislämpötilasta, ja koska lauhtumislämpötila on yleensä vakioitu, tulee höyrystymislämpötila saattaa mahdollisimman korkeaksi lämpöpumpun avulla. Lauhtumislämpötila määrittyy useimmiten ulkoisten tekijöiden perusteella. Lauhdutusprosessi saatetaan toteuttaa esimerkiksi merivedellä tai ulkoilmalla, jolloin saatavilla olevaan lauhdutuslämpötilaan ei pystytä täysin vaikuttamaan. Lauhdutuksen lämpötilan muutokset vaikuttavat prosessin toimintaan. Mikäli lauhdutusta varten toteutetaan erillinen jäähdytysjärjestelmä, jonka avulla syötetään tasaista ja lämpötilaltaan alhaista jäähdytysvesivirtaa ORC-prosessin lauhtuttimelle, on prosessin suunnittelu ja optimaalinen ylläpito helpompaa, mutta investointikustannukset nousevat.

Valittaessa lämpöpumpulle sopivaa kiertoainetta, tulee ottaa huomioon, että lämpöpumpun lauhtumislämpötilan tulee olla ORC-prosessin höyrystymislämpötilaa korkeampi, jotta lämmönsiirto on mahdollista. Tämän seurauksena lämpöpumpun kiertoaineen kriittinen lämpötila tulee olla ORC-prosessin höyrystymislämpötilaa korkeampi. Lämpöpumpun kiertoaineen höyrystymisprosessin ollessa isoterminen, lämpöpumpun tapauksessa ei tarvitse ottaa höyrystimen pinch-rajoitusta huomioon. Kuten aiemmin esitelty, ORC-prosessissa lämmönsiirron tehokkuus ja pinch-rajoitus tulee huomioida, mutta lämpöpumpun tapauksessa voidaan keskittyä kiertoaineen valinnassa vain maksimaalisen *COP*-arvon saavuttamiseen (Yu ja muut, 2018, s. 12).

Yu ja muut (2018) sekä Marshall ja Duquette (2021) ovat tutkineet lämpöpumppuprosessin ja ORC-prosessin integroimista. Teknisen onnistumisen

näkökulmasta on useita eri prosessiin vaikuttavia tekijöitä otettava huomioon, joita pyritään selvittämään muun muassa simulointien ja laskentakaavojen avulla. Lähdettäessä liikkeelle, tulee ensiksi selvittää datakeskuksen jäähdytysjärjestelmästä saatavilla oleva lämpötila ja jäähdytysnesteen massavirta sekä ORC-prosessin lauhtumislämpötila. Koska ORC-prosessin kiertoaineen höyrystymislämpötilan tulee olla mahdollisimman korkea, ja lämpöpumpun kiertoaineen lauhtumislämpötilan tätä korkeampi, tulee määrittää lämpöpumpun kiertoaineen höyrystymislämpötila. Koska lämpöpumpun kiertoaineen höyrystymislämpötilan tulee olla alhaisempi kuin siihen lämpöä luovuttavan datakeskuksesta palaavan jäähdytysnesteen lämpötilan, on mallinnettava, kuinka suuri osuus jäähdytyksestä saatavasta lämmöstä nostetaan lämpöpumpulla ja kuinka suuri osa hyödynnetään ORC-prosessin kiertoaineen höyrystämiseen sellaisenaan, mikäli lämpötilatasot ovat siihen riittävät. Liian alhaisen jäähdytyksen paluulämpötilan nostaminen taas ei ole lämpöpumpullakaan kannattavaa, sillä *COP*-arvo heikkenee ja prosessin hyötysuhde on alhainen. Yun ja muiden tutkimuksessa (2018, s. 14–17) optimaalista lämpöpumpun käyttöasteikkoa saatavilla olevalla lämpötilatasolla selvitetään kolmen pinch-pisteen avulla, jotka ovat esitelty kuvassa 26. Pinch I kuvastaa pistettä, jossa osa hukkalämmöstä hyödynnetään ORC-prosessissa sellaisenaan, pinch II kuvastaa pistettä, jossa osan hukkalämmöstä lämpötilaa nostetaan lämpöpumpulla ORC-prosessille sopivaksi ja pinch III kuvastaa pistettä, missä jäljelle jäävä hukkalämpö on liian alhaisessa lämpötilassa hyödynnettäväksi. Kun kaikki kolme pinch-pistettä saavutetaan samanaikaisesti, on lämmönsiirron määrä optimaalinen käytettävällä lämpöpumpun höyrystymislämpötilalla. Tällöin hukkalämpöä korotetaan lämpöpumpulla juuri oikea määrä siten, että lämpöpumpun energiankulutus saadaan optimoitua. Hukkalämpöä ei siis ohjata lämpöpumpulle lämpötilan nostoa varten liikaa eikä liian vähän. Liian vähäinen lämpöpumpulle ohjatun hukkalämmön määrä ei ole lämpöpumpun integroimisen kannalta kannattavaa, sillä suurin osa hukkalämmöstä on hyödynnettävissä ORC-prosessille sellaisenaan. Kun määritetään sopiva osuus, joka hukkalämmöstä lämpöpumpulle ohjataan, energiankulutus on tehokasta ja ORC-prosessin lämpöhyötysuhde on mahdollisimman suuri sen höyrystymisprosessin

tehostuessa. Sopiva lämpöpumpun höyrystyslämpötila tulee simuloida, jotta tiedetään lämpötilatasot, missä pinch-pisteiden analyysi voidaan suorittaa.



**Kuva 26.** Pinch-pisteiden analyysi (Yu ja muut, 2018, s. 15).

Lämpöpumpun ja ORC-prosessin integraation prosessiarvot voidaan laskea alla olevien kaavojen 22–34 (Yu ja muut, 2018, s. 16–17) avulla. Yun ja muiden esittelemässä laskentamallissa kolme pinch-pistettä kehittyi yhtäaikaisesti, eli prosessin maksimaalinen nettosähköntuotanto voidaan laskea. Kaavoissa muuttujana on lämpöpumpun höyrystyslämpötila. Prosessin tunnusluvut tulee laskea eri lämpöpumpun höyrystyslämpötiloilla, jolloin optimaalinen höyrystyslämpötila saadaan selville.

Tuntuvan (sensible,  $s$ ) ja latentin lämmön (latent,  $l$ ) suhde on vakio tietyllä höyrystymis- ja lauhtumislämpötilalla. Kaavalla 22 voidaan laskea kiertoaineen  $R$  tuntuvan lämmön hyödynnettävä määrä annetuilla lämpötiloilla;

$$\frac{R_{s,cliff}}{R_s} = \frac{T_{eva,orc} - T_{eva,hp}}{T_{eva,orc} - T_{con,orc}}, \quad (22)$$

missä  $R_{s,cliff}$  on hyödynnettävä tuntuva lämpö,  $R_s$  tuntuvan lämmön määrä,  $T_{eva,orc}$  on ORC-prosessin höyrystymislämpötila,  $T_{eva,hp}$  lämpöpumpun höyrystymislämpötila ja  $T_{con,orc}$  ORC-prosessin lauhtumislämpötila.

Kun Pinch-pisteet 1 ja 2 saavutetaan samaan aikaan, optimaalinen  $T_{cliff}$  toteuttaa yhtälön;

$$\frac{R_{s,cliff}}{R_l} = \frac{FCP_{wh}(T_{eva,orc} + \Delta T_{min} - T_{cliff})}{FCP_{wh}(T_{in,wh} - T_{eva,orc} - \Delta T_{min}) + Q_{out,hp}}, \quad (23)$$

missä  $FCP_{wh}$  on hukkalämmön lämpökapasiteettivirta, eli massavirran ja ominaislämpökapasiteetin tulo ( $\frac{J}{sK}$ ) ja  $Q_{out,hp}$  lämpöpumpusta saatava lämpövirta ( $\frac{J}{s}$ ).

Optimaalinen lämpöpumpulla korotettava lämpövirta  $Q_{in,hp}$  voidaan laskea kaavalla 24;

$$Q_{in,hp} = \frac{FCP_{wh}[(T_{eva,orc} - T_{con,orc})R_{l/s} - (T_{in,wh} - T_{eva,orc} - \Delta T_{min})]}{R_{l/s}(T_{eva,orc} - T_{con,orc}) / (T_{eva,orc} - T_{eva,hp}) + [COP / (COP - 1)]}, \quad (24)$$

missä  $R_{l/s}$  on latentin ja tuntuvan lämmön suhde.

Lämpöpumpun kuluttama sähköteho  $W_{hp}$  voidaan täten laskea kaavalla 25;

$$W_{hp} = (COP - 1)Q_{in,hp}. \quad (25)$$

$T_{cliff}$  lämpötila voidaan laskea kaavalla 26;

$$T_{cliff} = T_{eva,hp} + \Delta T_{min} + Q_{in,hp} / FCP_{wh}, \quad (26)$$

missä  $\Delta T_{min}$  on hukkalämmön lämpötilan ja lämpöpumpun höyrystymislämpötilan välinen lämpötilaero (K).

ORC-prosessin kiertoaineen lämpökapasiteettivirta voidaan täten laskea kaavalla 27;

$$FCP_{orc} = \frac{FCP_{wh}(T_{eva,orc} + \Delta T_{min} - T_{cliff})}{T_{eva,orc} - T_{eva,hp}}. \quad (27)$$

ORC-prosessin kiertoaineen lämpökapasiteettivirta tulee olla pienempi kuin hukkalämmönlähteen lämpökapasiteettivirta, joten kaavan 28 tulee päteä

$$\frac{FCP_{orc}}{FCP_{wh}} = \frac{(T_{eva,orc} - T_{eva,hp} - Q_{in,hp}/FCP_{wh})}{T_{eva,orc} - T_{eva,hp}} < 1. \quad (28)$$

ORC-prosessin kiertoaineen tuntuva lämpö voidaan laskea kaavalla 29;

$$Q_{orc,s} = FCP_{orc}(T_{eva,orc} - T_{con,orc}). \quad (29)$$

Lämpövirta  $Q_{wh,unre}$ , jota ei saada hyödynnettyä, lasketaan kaavalla 30;

$$Q_{wh,unre} = FCP_{wh}(T_{eva,orc} + \Delta T_{min} - T_{cliff} + T_{eva,hp} + \Delta T_{min} - T_{out,wh,min}) - Q_{orc,s}, \quad (30)$$

missä  $T_{out,wh,min}$  on hukkalämmönlähteen poistuvan lämpötilan minimiarvo ja  $Q_{orc,s}$  ORC-kiertoaineen vastaanottama tuntuva lämpö.

Tällöin poistuvan hukkalämmönlähteen lämpötila voidaan laskea kaavalla 31;

$$T_{out,wh} = T_{out,wh,min} + Q_{wh,unre}/FCP_{wh}. \quad (31)$$

Lopulta kaavalla 32 voidaan laskea yhteenlaskettu hukkalämmöstä hyödynnettävä lämpövirta;

$$Q_{wh,re} = FCP_{wh}(T_{in,wh} - T_{out,wh,min}) + W - Q_{wh,unre}, \quad (32)$$

missä  $W$  kuvastaa lämpöpumpun kuluttamaa energiaa ( $\frac{J}{s}$ ).

ORC-prosessin tuottama sähköteho on tällöin;

$$P_{orc} = \eta_{orc} Q_{wh,re}, \quad (33)$$

missä  $\eta_{orc}$  on ORC-prosessin hyötysuhde. ORC-prosessin nettosähkötehon laskennassa tulee myös huomioida itse prosessin, eli kiertovesipumpun, kuluttama energia (kts. kaava 35).

Nettosähköenergiantuotanto lasketaan kaavalla 34;

$$P_{net} = P_{orc} - W_{hp}, \quad (34)$$

missä  $W_{hp}$  on lämpöpumpun kuluttama sähköenergia (kaavat 22–34 Yu ja muut, s. 16–17).

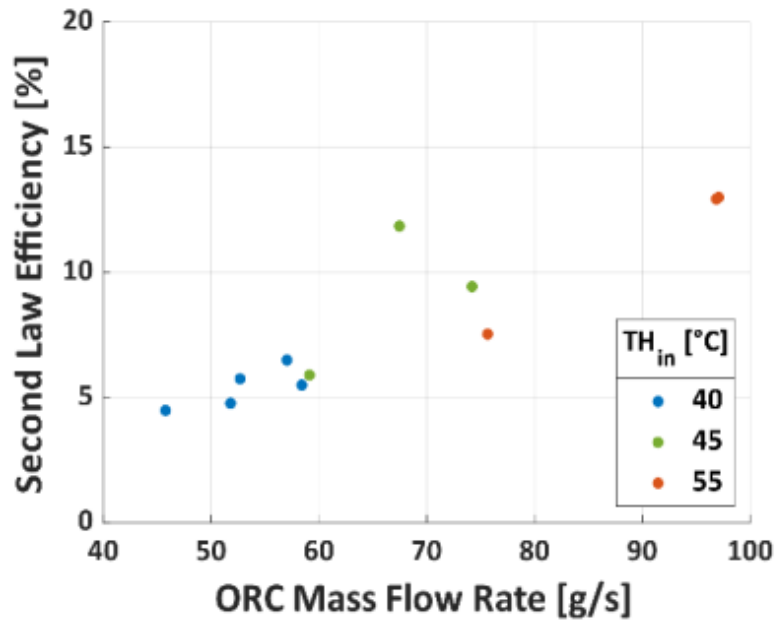
ORC-prosessin toisen pääsäännön hyötysuhde  $\eta_{II}$ , voidaan ilmoittaa termodynamiikan toisen lain muodossa kaavan 35 mukaisesti;

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{net}}{\eta_{Carnot}} = \frac{\dot{W}_{exp} - \dot{W}_{pp}}{Q_{ev}} \cdot \frac{1}{\eta_{Carnot}}, \quad (35)$$

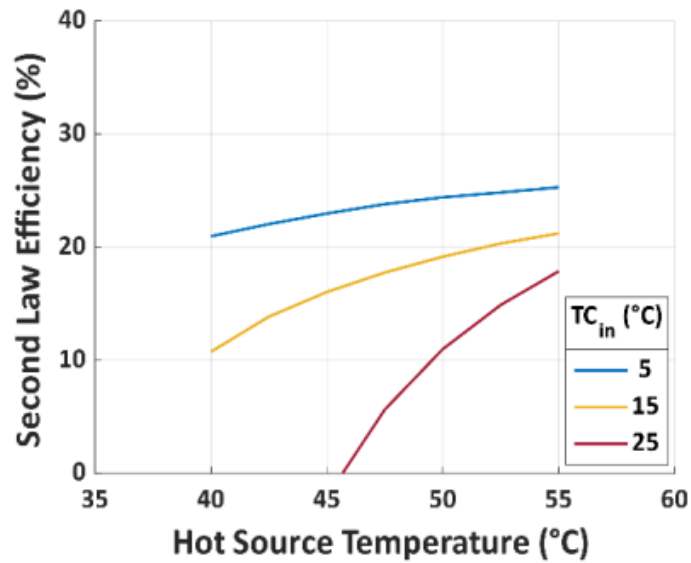
missä  $\dot{W}_{exp}$  on turbiinin (käytetään myös termiä "expander") tuottama sähköteho,  $\dot{W}_{pp}$  kiertopumpun kuluttama energia ja  $Q_{ev}$  höyrystimen vastaanottama lämpöteho (Ancona ja muut, 2022, s. 7).

Ancona ja muut (2022) tutkivat mikro-ORC-prosessin (n. 1 kW tuotettua sähkötehoa) hyötysuhteita, ja loivat esimerkkitalanteen, missä vertailivat lämmönlähteen lämpötilan ja ORC-kiertoaineen massavirran vaikutusta saavutettuun kokonaishyötysuhteeseen. Kuvan 27 perusteella voidaan todeta, että korkeampi hukkalämmön lämpötilataso ( $TH_{in}$ ) yhdessä suuremman massavirran kanssa, parantaa prosessin lämpöhyötysuhdetta. Tästä syystä lämpöpumpun integroiminen voi olla kannattavaa. Kuvasta 28 nähdään, kuinka lämpöhyötysuhde on myös riippuvainen lauhtumislämpötilasta  $TC_{in}$ , johon ei kuitenkaan välttämättä pystytä vaikuttamaan. Paras lämpöhyötysuhde saavutetaan mahdollisimman korkealla lämmönlähteen lämpötilalla ja mahdollisimman alhaisella

lämmön luovutuslämpötilalla. Kuvissa näkyvä "Second Law Efficiency" kuvastaa toisen pääsäännön hyötysuhdetta, eli lämpöhyötysuhteen osuutta maksimaalisesta Carnot-hyötysuhteesta.



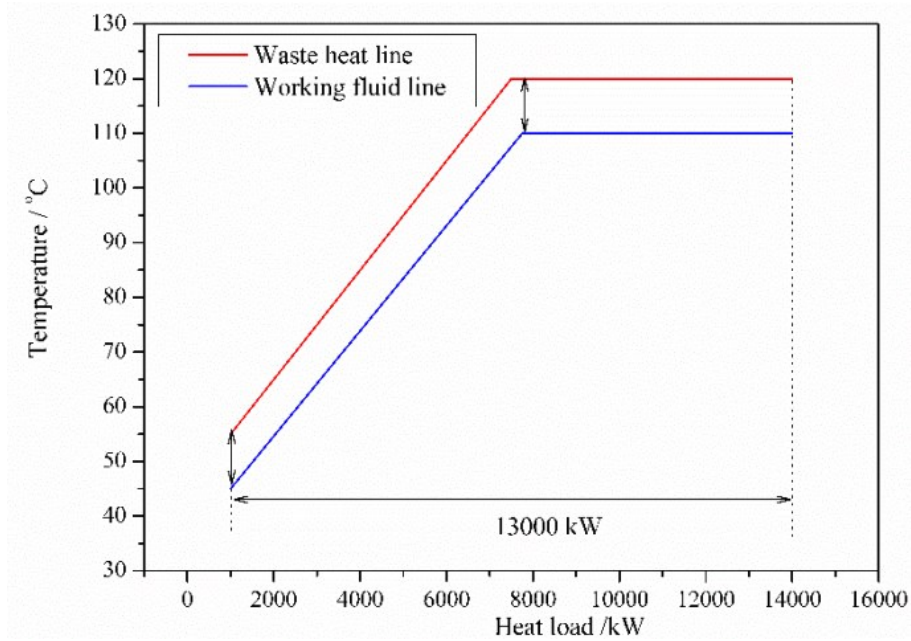
**Kuva 27.** Lämmönlähteen lämpötilan ja ORC-kiertoaineen massavirran vaikutus ORC-prosessin hyötysuhteeseen (Ancona ja muut, 2022, s. 8).



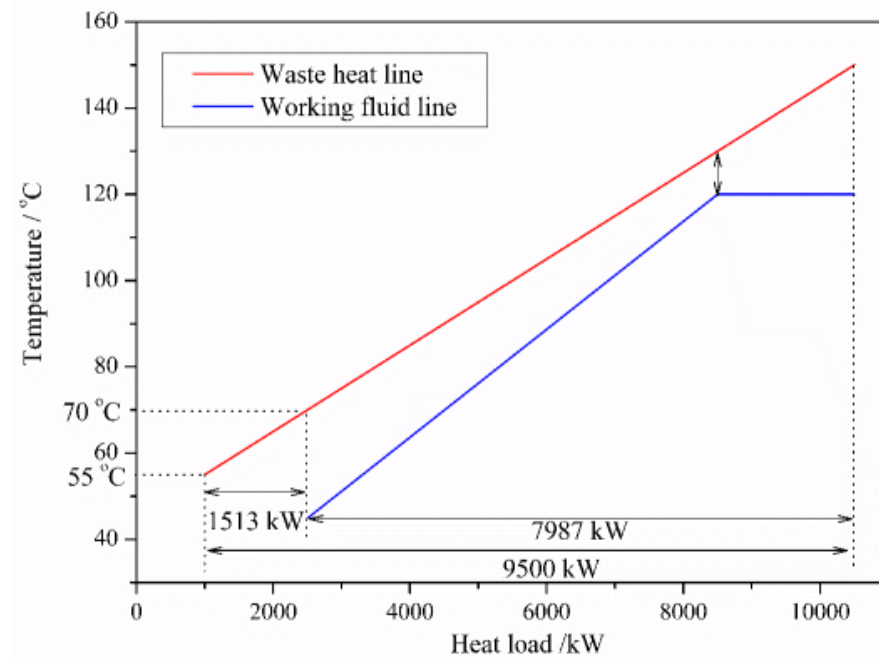
**Kuva 28.** Lauhtumislämpötilan vaikutus ORC-prosessin hyötysuhteeseen (Ancona ja muut, 2022, s. 10).

#### 4.3.1 Esimerkkilaskelma

Kaavojen 22–34 avulla Yu ja muut (2018, s. 18–25) ovat luoneet esimerkkitalanteet, joissa lämpöpumpun integroiminen ORC-prosessin yhteyteen ei ole ja on kannattavaa. Kuvassa 29 esitellyssä tilanteessa hukkalämmön profiili vastaa hyvin ORC-kiertoainetta, jolloin lämpöpumpun integroimisella ei parannettaisi siirretyn lämmön määrää tai ORC-prosessin lämpöhyötysuhdetta. Kuvassa 30 sen sijaan on tilanne, jossa vain 7987 kW saatavilla olevasta 9500 kW hukkalämmön määrästä pystytään hyödyntämään. Tällöin lämpöpumpun integroimista tulee tutkia.



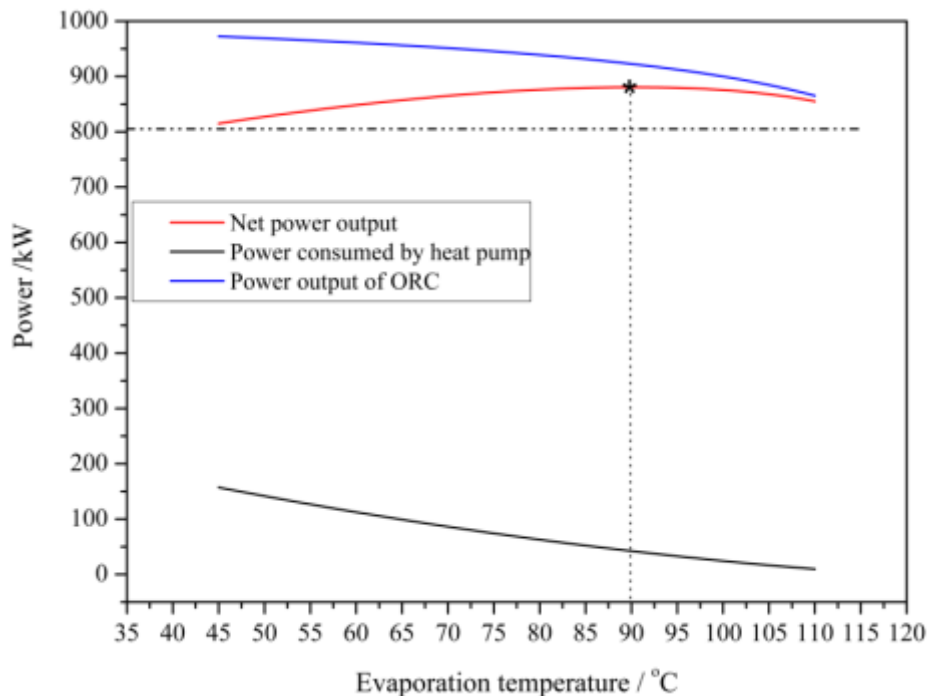
**Kuva 29.** Yhteensopivat hukkalämmön ja ORC-kiertoaineen profiilit (Yu ja muut, 2018, s. 19).



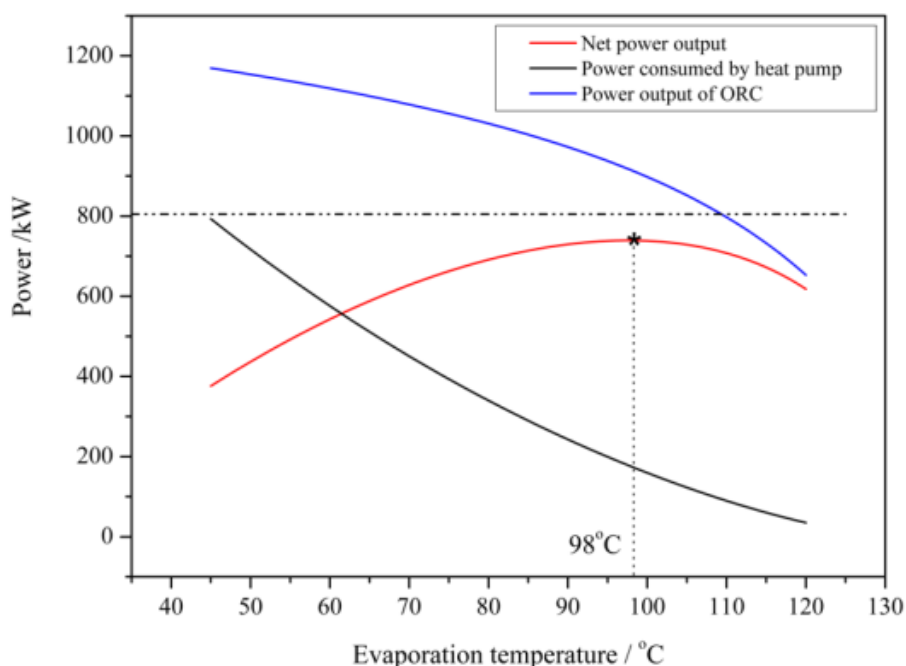
**Kuva 30.** Epäsuhta hukkalämmön ja ORC-prosessin välillä, ilman lämpöpumpua (Yu ja muut, 2018, s. 20).

Kuvan 30 osoittamassa tilanteessa tulee tarkastella, kuinka lämpöpumpulla pystytään ORC-prosessin vastaanottaman lämmön määrää tai lämpöhyötysuhdetta kasvattamaan.

Tarkastelu tulee aloittaa optimaalisten kiertoaineiden valinnalla. Yun ja muiden (2018, s. 21–25) esimerkissä lämpöpumpun kiertoaineeksi valitaan N-pentaani sen saavuttaman suurimman *COP*-arvon vuoksi ja ORC-prosessin kiertoaineina vertaillaan kiertoaineita R236fa ja R600a, niiden sopivien kriittisten lämpötilatasojen, höyrystyslämpötilan ja valituilla höyrystyslämpötiloilla olevien pienten latentin ja tuntuvan lämmön suhteiden (0,33 ja 0,37) vuoksi. Hukkalämmön lämpötilana esimerkissä käytetään 150 °C. Jos ORC-prosessin kiertoaineeksi valitaan R236fa, sen kriittinen lämpötila 124,92 °C rajoittaa höyrystyslämpötilaksi 120 °C, jolloin lämpöpumpun lauhtumislämpötilaksi asetetaan 130 °C. R600a kiertoaineella vastaavat arvot ovat n. 10 °C korkeammat. Laskentakaavojen avulla eri hukkalämmönlähteen lämpötilojen mukaisesti voidaan määrittää lämpöpumpun höyrystyslämpötila ja sen korottaman hukkalämmön määrä. Kuvisa 31 ja 32 on esitetty tärkeimmät indikaattorit, eli ORC-prosessin nettosähköteho lämpöpumpuavusteisessa prosessissa (punainen käyrä), pelkän ORC-prosessin tuottama sähköteho ilman lämpöpumpua (tasainen katkoviiva), lämpöpumpun kuluttama sähköteho (musta käyrä) ja ORC-prosessin tuottama sähköteho (sininen käyrä).

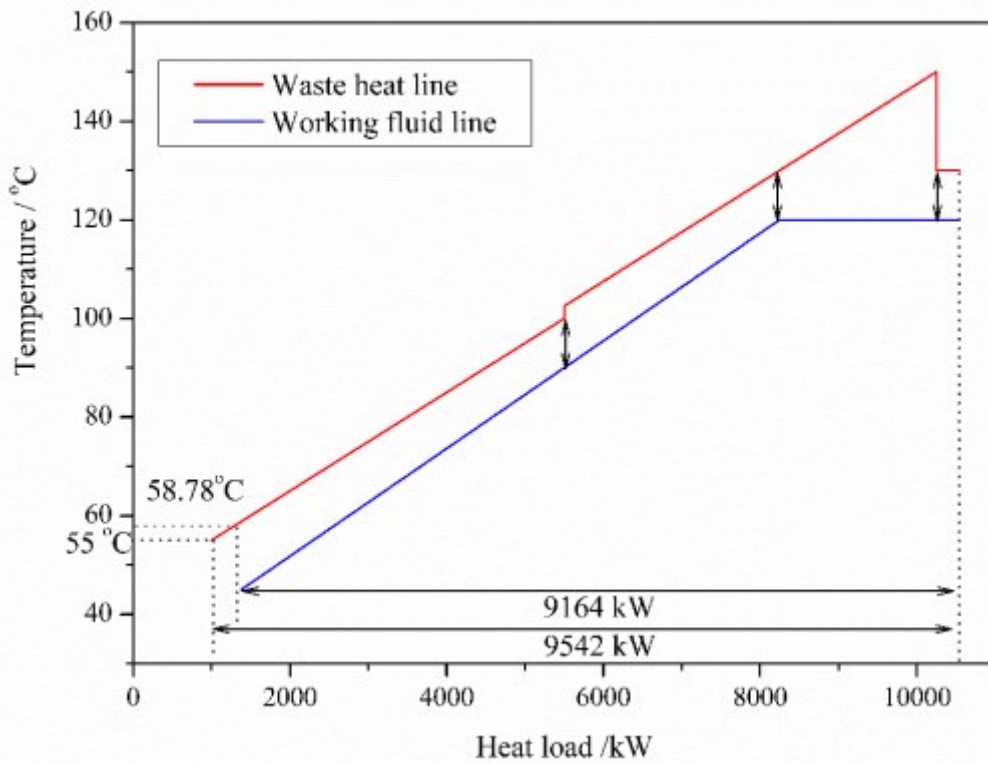


**Kuva 31.** R236fa ORC-kiertoaineella saavutetut tulokset (Yu ja muut, 2018, s. 22).



**Kuva 32.** R600a ORC-kiertoaineella saavutetut tulokset (Yu ja muut, 2018, s. 25).

Kuvista 31 ja 32 voidaan huomata, että lämpöpumpun integroiminen on kannattavaa, mikäli ORC-prosessin kiertoaineeksi valitaan R236fa, mutta R600a kiertoaineella nettosähköteho jää alhaisemmaksi lämpöpumpun kanssa kuin ilman lämpöpumppua. Vaaka-akselilla on esitelty lämpöpumpun höyrystyslämpötila ja laskentakaavojen avulla on kuvasta 31 nähtävillä, että suurin nettosähköteho saatavilla olevilla lämpötilatasoilla ja valitulla ORC-kiertoaineella saavutetaan lämpöpumpun höyrystyslämpötilan ollessa 90 °C (pystysuora pisteviiva). Lämpöpumppu saavuttaa COP-arvon 6,97. Pelkän ORC-prosessin maksimisähkötehon ollessa 805 kW ja lämpöpumppuavusteisen prosessin nettosähkötehon saavuttaessa arvon 880 kW, voidaan todeta lämpöpumpun integraation tässä tapauksessa olevan kannattavaa. Kuvassa 33 nähdään, kuinka ORC-kiertoaineella R236fa saavutetaan lämpöpumpun integraation avulla parempi hukkalämmön lämpöprofiili kiertoaineeseen, jolloin hyödynnetyn hukkalämmön ja tuotetun sähköenergian määrä kasvaa (Yu ja muut, 2018, s. 23). Kuvan 33 arvoja verrattaessa kuvan 30 arvoihin, voidaan todeta, että hyödynnetyn hukkalämmön määrä kasvaa arvosta 7987 kW arvoon 9164 kW.



**Kuva 33.** Lämpöpumppuavusteinen prosessi (Yu ja muut, 2018, s. 24).

Sopivien lämpötilatasojen ja lämmönsiirtomäärien määrittäminen on siis moninainen työvaihe, jossa pitää ottaa useampi eri muuttuja huomioon. Datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän lämpötilat, lämpöpumpun ja ORC-prosessin optimaalinen toiminta yksin ja erikseen sekä saatavilla olevat lauhdutuslämpötilat tulee simuloida, jotta nettosähköenergian tuotanto voidaan maksimoida. Onnistunut optimaalisen höyrystyslämpötilan asettaminen ja kiertoaineiden valinta saatavilla olevien lämpötilatasojen ollessa tiedossa, on kannattavan prosessin saavuttamisen kannalta kriittisen tärkeää. Kiertoaineiden kriittinen lämpötila sekä lämpötilatason mukainen latentin ja tuntuvan lämmön suhde ohjaavat valintaa. Lisäksi tulee huomioida muut tekijät hukkalämmön hyödyntämisessä. Osa hukkalämmöstä saatetaan talviaikoina hyödyntää esimerkiksi tilalämmitykseen tai kaukolämmön tuotantoon, jolloin ORC-prosessille saatavilla olevan hukkalämmön määrä rajoittuu.

## 4.4 Taloudellinen tarkastelu

### 4.4.1 Taloudellisten tekijöiden laskenta

ORC-prosessin integroiminen datakeskuksen yhteyteen on taloudellisesti kannattavaa, mikäli sen tuottaman sähköenergian arvo ylittää sen investointi- ja ylläpitokustannukset halutun takaisinmaksuajan puitteissa. Datakeskusinvestointien suuruus ja niiden operointikulut kasvavat kansainvälisen tiedonprosessointikyvyn kysynnän kasvun mukana. Datakeskuksista tulee, ja on jo tullut, aiempaa suurempia, niiden sähkökulutuksen kasvaessa useisiin satoihin megawatteihin per keskus. Datakeskusten serveritiheys kasvaa, joka tarkoittaa suurempien sähkötehojen myötä suurempia hukkalämmön lämpökuormia, jolloin hukkalämmön taloudellinen hyödyntämismahdollisuus on alati suurempi. Taloudellisten mahdollisuuksien lisäksi myös lainsäädäntö ohjaa erityisesti Suomessa ja muualla EU:ssa tutkimaan hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksia tehokkaasti. Datakeskustoimijoiden kuitenkin toimiessa taloudellisilla ehdoilla, tulee hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksien taloudellinen kannattavuus selvittää mahdollisimman hyvin ennen investointipäätöksen tekemistä. Tehokas hukkalämpöjen hyödyntäminen voi olla ratkaiseva tekijä koko datakeskusinvestoinnin näkökulmasta.

Pärssinen ja muut (2019) ovat tutkineet datakeskuksesta saatavan hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia taloudellisesta näkökulmasta kaukolämmön tuotannossa. Vaikka kyseessä onkin kaukolämpö, voidaan tiettyjä laskentamenetelmiä soveltaa myös ORC-prosessin integraation taloudellisen kannattavuuden tutkimisessa. On myös muistettava, että ORC-prosessi voi toimia kaukolämmön tuotannon rinnalla, jolloin molempien järjestelmien taloudellinen kannattavuus on selvitettävä. Hukkalämmön hyödyntämisen taloudellinen kannattavuus on suuresti riippuvainen datakeskuksen jäähdytysjärjestelmästä, joka vaikuttaa, kuten aiemmin esitelty, ORC-prosessin tapauksessa suoraan lämpöhyötysuhteeseen. Tällöin myös investointi- ja operointikustannukset eri jäähdytysjärjestelmien välillä on otettava huomioon. Esimerkiksi kaksivaiheinen nestejäähdytys pystyy tuottamaan ilmajäähdytystä

korkeampia lämpötiloja pelkän ORC-prosessin tai lämpöpumpputehosteisen ORC-prosessin käytettäväksi, jolloin sähköenergian tuotantoa pystytään kasvattamaan. Korkeampia jäähdytyksen paluulämpötiloja tuottavat jäähdytysjärjestelmät ovat kuitenkin lähtökohtaisesti kalliimpia toteuttaa. Kokonaiskustannuksien selvitys on siis moninainen työvaihe, johon ei tässä työssä sen laajuuden vuoksi pystytä kokonaan pureutumaan.

Taloudellisen selvityksen pohjana Pärssinen ja muut (2019, s. 2–3) ovat valinneet neljä laskentametodia; *NPV*-arvo (Net present value), *IRR*-arvo (Internal Rate of Return), *PB*-arvo (discounted Payback period) ja *ROI*-arvo (Return On Investment). ORC-prosessin tuottama hyöty muodostuu sen tuottaman nettosähköenergian määrästä, jonka arvo on riippuvainen sähkön hinnasta.

Kaavalla 36 lasketaan investoinnin tulevien kassavirtojen nykyarvo;

$$NPV = \sum_i^n = \frac{OFCF_i}{(1+r)^i}, \quad (36)$$

missä *OFCF* on arvio operatiivisesta vapaasta kassavirrasta vuonna *i* (*1...n vuotta*), *n* on tarkasteluajanjakso ja *r* diskonttaus korko (Pärssinen ja muut, 2019, s. 3).

Kun tulevien kassavirtojen nykyarvosta vähennetään alun investointisumma, saadaan investoinnin nykyarvo, eli *NPV*-arvo, selvitettyä. Mikäli *NPV*-arvo on positiivinen, tuotot ylittävät kustannukset ja investointia voidaan pitää kannattavana. *NPV*-arvon laskennassa *r* vaihtelee investoinnin riskin ja tuotto-odottaman mukaisesti. Huomioon tulee ottaa ylläpidon investointi- ja operointikulut, investoinnin elinkaaren pituus, inflaatio ja korkotaso (Pärssinen ja muut, 2019, s. 2–3). ORC-prosessin tapauksessa erityisesti arvio sähkön hinnasta sekä laitteiston elinkaaresta ja laitteiston vaatimista ylläpitokustannuksista, eli esimerkiksi huolloista ja kiertoaineiden täytöistä, tulee ottaa huomioon kassavirtoja laskettaessa. ORC-prosessin tapauksessa epävarmuudet ovat suhteellisen suuret, koska tekniikka on toistaiseksi datakeskuksien yhteydessä uutta, sähkön hinta voi vaihdella rajusti ja nettosähköenergian tuotanto voi vaihdella usean eri

tekijän vuoksi. Tällöin *NPV*-arvoa laskettaessa on *ORC*-prosessin tapauksessa käytettävä suurempaa  $r$ :n arvoa. Luonnollisesti myös laitoksen koko vaikuttaa taloudellisiin arvioihin, sillä suuremmalla laitoksella pystytään tuottamaan enemmän sähköä, mutta investoinnit ja erityisesti epävarmuustekijät, kuten mahdolliset huoltokustannukset, ovat myös suuremmat. *IRR*-arvo on se  $r$ :n arvo, jolla *NPV*-arvosta tulee nolla, eli investoinnin menot ja tulot ovat tasapainossa.

*ROI*-arvo lasketaan kaavalla 37;

$$ROI \% = \frac{\text{Nettoliikevoitto verojen jälkeen}}{\text{Investointi}} \cdot 100, \quad (37)$$

missä datakeskuksen yhteyteen integroidun *ORC*-prosessin tapauksessa nettoliikevoitto on tuotetun sähkön arvo (Pärssinen ja muut, 2019, s 3).

Mitä suurempi *ROI*-arvo on, sitä parempi. On kuitenkin huomioitava, että *ROI*-arvo ei ota huomioon rahan ajallista arvon vaihtelua (Pärssinen ja muut, 2019, s. 3). Takaisinmaksuaika taas kertoo, kuinka kauan kestää ennen kuin investoinnin tuotto saavuttaa pääomakustannuksien arvon. Takaisinmaksuaika lasketaan *CAPEX*-menojen (eli investointikustannuksien) ja vuosittaisten nettokassavirtojen suhteena, ottaen huomioon diskonttauksen. *PB*-arvo voidaan laskea kaavalla 38;

$$PB = \frac{p+R_p}{R_p+R_{p-1}}, \quad (38)$$

missä  $p$  kertoo ajan vuosina, jolloin kumulatiivinen diskontattu kassavirta muuttuu positiiviseksi,  $R_p$  on kumulatiivinen diskontattu kassavirta ajanhetkellä  $p$ , eli silloin kun diskontattu kassavirta kääntyy positiiviseksi ja  $R_{p-1}$  kertoo kumulatiivisen diskontatun kassavirran määrän ajanhetkellä  $p+1$  (Pärssinen ja muut, 2019, s. 3).

Tekijä  $R_{p-1}$  laskee siis kumulatiivisen kassavirran ajanhetkellä  $p+1$ , jolloin takaisinmaksuaika on jo ylitetty. Tällöin diskontattu kumulatiivinen kassavirta on jo kääntynyt positiiviseksi, eikä kyseisiä ajanhetkiä tule ottaa huomioon etsittäessä rajaa, jolloin takaisinmaksuaika saavuttaa arvon missä kumulatiivinen diskontattu

nettokassavirta on tasapainossa investointisumman kanssa. Kyseisestä takaisinmaksuajan täyttymisen ajankohdasta eteenpäin tuotto on positiivista.  $R_p$  on viimeisin vuoden loppu, jolloin takaisinmaksuaikaa ei ole vielä saavutettu, eli kertynyt diskontattu nettokassavirta on vielä negatiivinen ja  $R_{p-1}$  on siitä seuraavan vuoden loppu, jolloin takaisinmaksuaika on jo ylitetty, eli kertynyt diskontattu nettokassavirta on kääntynyt positiiviseksi. Kaavalla interpoloidaan näiden kahden ajanhetken välissä oleva ajanhetki, missä diskontattu kassavirta saavuttaa nollan eli takaisinmaksuajan. Hyväksi takaisinmaksuajaksi arvioidaan n. 3 vuotta (Pärssinen ja muut, 2019, s. 3). Mitä lyhyempi laitteiston elinkaari on, sitä lyhyempi takaisinmaksuajan tulisi olla.

NPV-arvon laskennassa, kun hukkalämpöä hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa, ovat Pärssinen ja muut (2019, s. 3) käyttäneet  $r$ :n arvona 15 %. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttaviksi tekijöiksi on lueteltu muun muassa laitteiston elinkaaren kesto, vaihtelut datakeskuksen kuormituksessa, joka vaikuttaa saatavilla olevan hukkalämmön määrään, verotus (pätee myös ORC-prosessiin, erityisesti jos tuotettua sähköä myydään), laitteiston toimintavarmuus ja lämmöntuotannon (tai ORC-prosessin tapauksessa sähköntuotannon) heilahtelut, työntekijäkulut, huoltokulut sekä lämpöpumpun COP-arvo, joka on oleellinen myös lämpöpumppuavusteisen ORC-prosessin tapauksessa. Lämmöntuotannon tapauksessa tuotettua lämpöä voidaan myydä kiinteällä hinnalla paikalliselle lämmönjakelijalle, esim. kaukolämpöyhtiölle, mutta ORC-prosessilla tuotetun sähkön arvo vaihtelee sen sähkön hinnan mukaisesti.

Zhang ja muut (2019, s. 8–9) ovat luoneet laskentakaavoja, joiden avulla ORC-prosessin taloudellista kannattavuutta voidaan selvittää. ORC-järjestelmän investointikustannukset  $C_{tot}$  muodostuvat kaavan 39 mukaisesti;

$$C_{tot} = C_{BM,e} + C_{BM,c} + C_{BM,p} + C_{BM,ex} + C_{BM,wf}, \quad (39)$$

missä  $C_{BM,e}$  on höyrystimen investointikustannus,  $C_{BM,c}$  on lauhduttimen investointikustannus,  $C_{BM,p}$  on pumpun investointikustannus,  $C_{BM,t}$  on expanderin

(turbiinin ja generaattorin) investointikustannus ja  $C_{BM,t}$  on kiertoaineen investointikustannus (Zhang ja muut, 2019, s. 8).

ORC-prosessin tuottamat nettotulot  $NE$  voidaan laskea kaavalla 40;

$$NE = p_e(W_{ex} - W_p)t_{op}, \quad (40)$$

missä  $p_e$  on sähköenergian arvo (esim. 0,05 €/kWh),  $W_{ex}$  on turbiinin tuottama vuosittainen sähköteho (kW),  $W_p$  pumpun sähköteho (kW) ja  $t_{op}$  vuotuinen prosessin käyntiaika tunteina (esim. 8200 h) (Zhang ja muut, 2019, s. 8).

ORC-prosessin takaisinmaksuaika  $PP$  voidaan laskea kaavalla 41. Tässäkin tapauksessa takaisinmaksuaika kertoo kuinka kauan kestää, että kumulatiiviset nettokassavirrat saavuttavat investointikustannuksien tason, diskonttaus huomioiden.

$$PP = \frac{\ln \frac{NE - COM}{NE - COM - iC_{tot}}}{\ln(1+i)}, \quad (41)$$

missä  $COM$  on huolto- ja ylläpitokulut, jotka on arvioitu olevan 1,5 % ORC-prosessin kokonaiskustannuksista ja  $i$  on vuotuinen diskonttauskorko, esim. 5 % (Zhang ja muut, 2019, s. 8).

Energian vertailukustannushinta  $LEC$  (Levelized Energy Cost) kertoo kuinka paljon tuotettu sähköenergia maksaa per tuotettu yksikkö, eli esimerkiksi kuinka monta euroa maksaa tuottaa yksi kilowattitunti sähköenergiaa.  $LEC$ -arvoja voidaan vertailla eri sähköntuotantomuotojen kesken ja se voi antaa osviittaa investoinnin kannattavuudesta. Tulee kuitenkin muistaa, että datakeskusten yhteyteen integroitu ORC-prosessi on hukkalämpöä hyödyntävä laitos, jonka kokoluokka voi olla pieni. Sen  $LEC$ -arvo ei täten ole täysin vertailukelpoinen suuren mittakaavan sähköä tuottaviin voimalaitoksiin.  $LEC$ -arvo lasketaan kaavalla 42;

$$LEC = \frac{\frac{i(1+i)^{T_s}}{(1+i)^{T_s-1}} C_{tot} + COM}{(W_{ex} - W_p) t_{op}}, \quad (42)$$

missä  $T_s$  on ORC-järjestelmän elinkaari, esim. 10 vuotta ja  $i$  korkotaso (Zhang ja muut, 2019, s. 8).

Nykyarvossa mitattuna ORC-prosessin elinkaaren aikaiset kokonaistuotot  $C_{PV}$  voidaan laskea kaavalla 43;

$$C_{PV} = \sum_1^{n=10} \frac{NE - COM}{(1+i)^n} - C_{tot}, \quad (43)$$

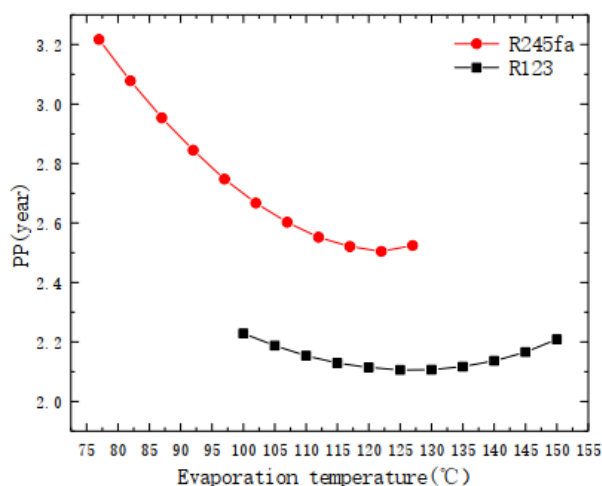
missä  $i$  on diskonttaus korko ja  $n$  on laitteiston elinkaari (nyt 10 vuotta) (Zhang ja muut, 2019, s. 9).

#### 4.4.2 Kustannuksien määräytyminen

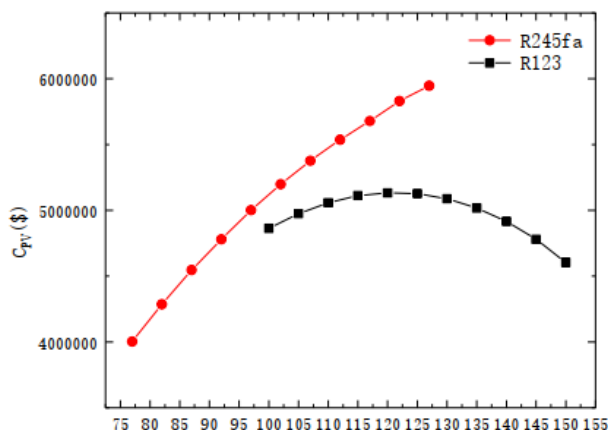
Tarkkoja investointikustannuksien tasoja on hankala arvioida, koska datakeskushankkeiden luvut ovat usein salattuja ja ORC-prosessien hinta vaihtelee kokoluokan ja prosessin vaatiman räätälöinnin mukaisesti. Tarkkojen taloudellisten arvioiden laskenta vaatisi laitteiston investointikustannukset, valmistajan arviot laitteiston elinkaaresta, hyötysuhteista ja huoltotarpeesta sekä simulointeja tuotoista eri sähkön hinnoilla ja prosessin toiminta-arvoilla. Joka tapauksessa voidaan arvioida, että lähtökohtaisesti datakeskuksen yhteyteen integroitu ORC-prosessi on kokoluokaltaan pieni tai keskisuuri. Tekniikka on datakeskusten yhteydessä vielä uutta, joten ensimmäiset datakeskusten yhteyteen toteutettavat ORC-prosessit toteutetaan todennäköisesti alle 1 MW sähkötehoa tuottavina.

ORC-prosessin tekniset suoritusarvot vaikuttavat suoraan myös sen taloudelliseen kannattavuuteen. Zhang ja muut (2019, s. 9–19) laativat kokeen, jossa testasivat ORC-prosessin toimintaa kahdella eri kuivalla kiertoaineella (R123 ja R245fa) ja selvittivät laatimansa ORC-prosessin kustannustasojen määräytymistä eri tekijöiden perusteella. Tavoitteena oli selvittää höyrystymislämpötilan, lauhtumislämpötilan, lämmönlähteen lämpötilan ja lämmönlähteen massavirran vaikutus ORC-prosessin

investointikustannuksiin, nettotuloihin, takaisinmaksuaikaan, *ROI*- ja *LEC*-arvoihin sekä nettonykyarvoon. Kokeen perusteella ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä yleisesti ORC-prosessin kustannustasoista, mutta se osoittaa kuinka tärkeää prosessin tekninen suunnittelu ja sen mallinnus on myös taloudellisesta näkökulmasta. Taloudellisessa tarkastelussa ORC-prosessin tuottama maksimaalisen nettotulo, eli sähköenergia, tulee suhteuttaa sen vaatimiin investointi- ja ylläpitokustannuksiin. ORC-prosessin kustannukset ja tuotot tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti. Kuvissa 34 ja 35 on esitelty tuloksia, joissa muuttujana on ollut ORC-kiertoaineen höyrystyslämpötila, lauhtumislämpötilan ollessa 27 °C ja lämmönlähteen lämpötilan 197 °C.

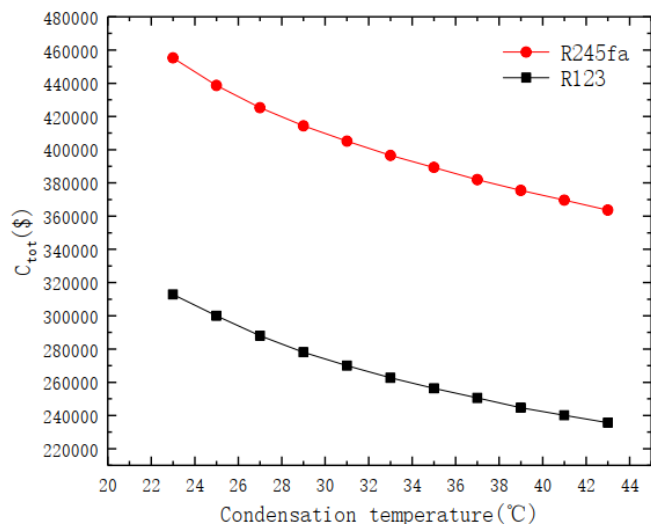


**Kuva 34.** Takaisinmaksuaika eri höyrystyslämpötilan mukaan (Zhang ja muut, 2019, s. 11)

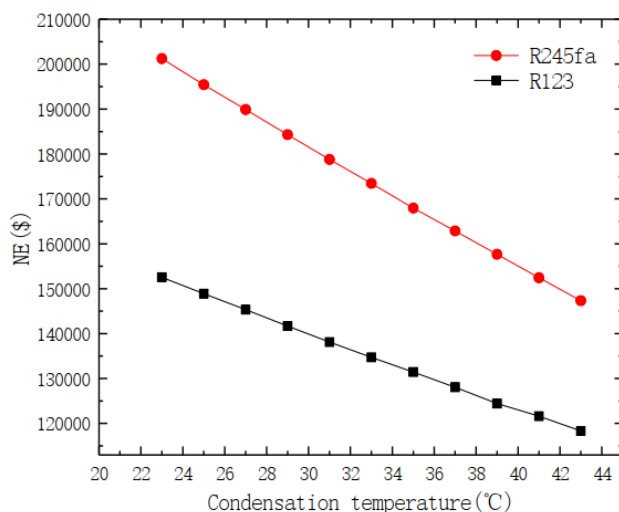


**Kuva 35.** Tulojen nykyarvo eri höyrystyslämpötilan mukaan (Zhang ja muut, 2019, s. 12).

Kuvista 34 ja 35 huomataan, kuinka eri kiertoaineiden kesken optimaaliset lämpötilatasot vaihtelevat ja täten taloudelliset arvot käyttäytyvät eri tavoin. Esimerkiksi lyhin mahdollinen takaisinmaksuaika tai suurin kokonaistulojen nykyarvo vaihtelevat kiertoaineiden kesken, koska ORC-prosessi saavuttaa optimaalisen hyötysuhteen eri kiertoaineilla eri lämpötiloilla. Lämpötilat vaikuttavat myös investointeihin muun muassa vaaditun höyrystimen ja lauhduttimen lämmönsiirtopinta-alojen muodossa. (Zhang ja muut, 2019, s. 9–12) Kuvissa 36 ja 37 on tarkasteltu lauhtumislämpötilan vaikutusta kokonaisinvestointikustannuksiin ja nettotuloihin. Huomataan, että molempien kiertoaineiden tapauksessa sekä investointikustannukset että nettotulot laskevat lauhtumislämpötilan noustessa. Kun lauhtumislämpötila nousee, lauhduttimen vaadittu koko pienenee ja sen investointikustannus laskee. Samalla prosessin tehontuoton potentiaali ja täten turbiinin kustannus laskee. Koska tuotettu teho laskee, myös nettotulot laskevat.



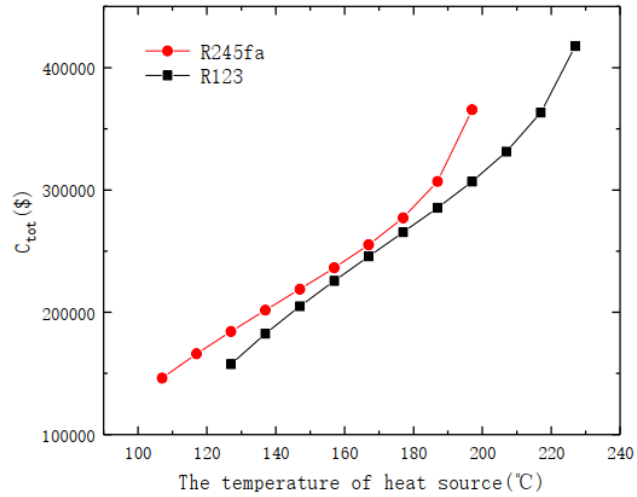
**Kuva 36.** Kokonaisinvestointikustannukset eri lauhtumislämpötilan mukaan (Zhang ja muut, 2019, s. 13).



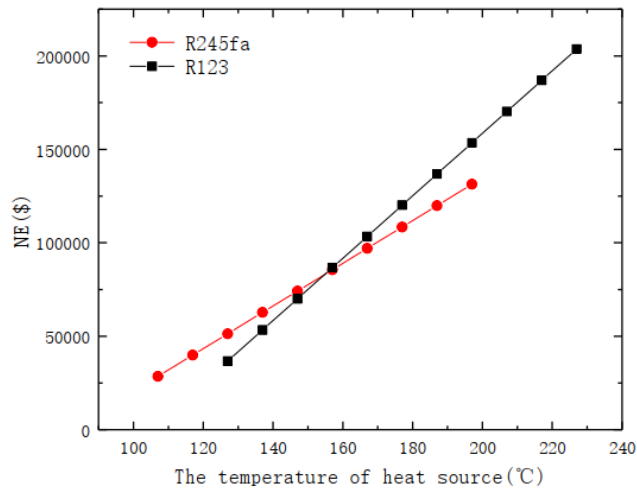
**Kuva 37.** Nettotulot eri lauhtumislämpötilan mukaan (Zhang ja muut, 2019, s. 13).

Tarkastellessa lämmönlähteen lämpötilaa, huomataan, että investointikustannukset, nettotulot ja kokonaistulojen nykyarvo kasvavat yhdessä lämmönlähteen lämpötilan kanssa. Korkeammalla lämmönlähteen lämpötilalla kiertoaineen massavirta kasvaa, pumppauskustannukset nousevat ja täten höyrystimen ja lauhtuttimen vaatima lämmönsiirtopinta-ala lisääntyy. Korkeammalla lämmönlähteen lämpötilalla ja suuremmalla massavirralla kuitenkin saavutetaan suurempi turbiinin tuottama teho,

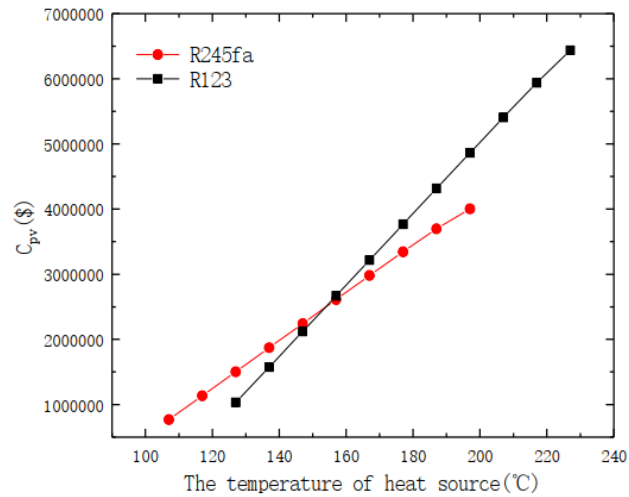
jolloin ORC-prosessin tuottama tulo lisääntyy (Zhang ja muut, 2019, s. 14). Kuvissa 38, 39 ja 40 on esitelty arvot eri lämmönlähteen lämpötiloilla.



**Kuva 38.** Kokonaisinvestointikustannukset eri lämmönlähteen lämpötiloilla (Zhang ja muut, 2019, s. 15).

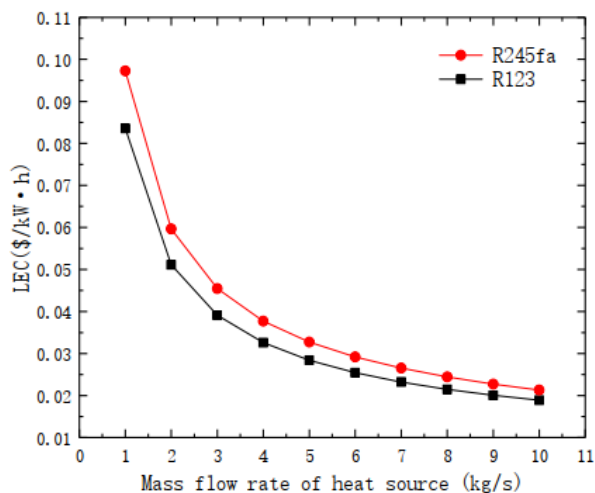


**Kuva 39.** Nettotulot eri lämmönlähteen lämpötiloilla (Zhang ja muut, 2019, s. 15).

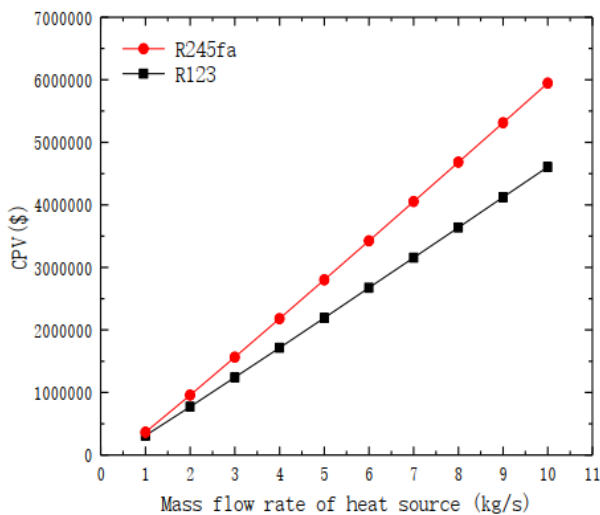


**Kuva 40.** Tulojen nykyarvo eri lämmönlähteen lämpötiloilla (Zhang ja muut, 2019, s. 16).

Lämmönlähteen lämpötilan lisäksi sen määrä vaikuttaa suoraan ORC-prosessin toiminta-arvoihin ja täten myös taloudellisiin mittareihin. Kuten lämpötilan tapauksessa, myös lämmönlähteen massavirtauksen lisääntyessä investointikustannukset, nettotulot ja tulojen nykyarvo kasvavat. Suurempi massavirtaus vaatii suuremman laitteiston, jonka myötä investointi- ja pumppauskustannukset nousevat, mutta tuotettu teho ja tuotot nousevat suhteessa enemmän. Kuvista 41 ja 42 nähdään, kuinka ORC-prosessilla tuotetun sähkön kustannus laskee lämmönlähteen massavirtauksen kasvaessa, ja kokonaistuottojen nykyarvo lisääntyy.



**Kuva 41.** LEC-arvot eri lämmönlähteen massavirroilla (Zhang ja muut, 2019, s. 18).



**Kuva 42.** Tulojen nykyarvo eri lämmönlähteen massavirroilla (Zhang ja muut, 2019, s. 19).

Tarkkojen taloudellisten arvioiden laskenta edellyttää aina prosessin teknisen puolen optimointia. Investoinnin kustannustasot vaihtelevat huomattavasti halutun järjestelmän kokoluokan mukaisesti, mutta mahdollisimman suurien nettotulojen saavuttaminen vaatii prosessilta aina optimaalisen mitoituksen sen toimintaympäristöön. ORC-prosessin tuottaman sähkön arvo on tekijä, johon datakeskuksen operoija ei pysty vaikuttamaan. Tuotetun sähkön arvo on suoraan verrannollinen sähkön hintaan, jolla sitä pystytään myymään valtakunnan verkkoon. Mikäli ORC-prosessilla tuotettua sähköä käytetään vain datakeskuksen omiin tarpeisiin, esimerkiksi valaistukseen tms., tuotetun

sähkön arvo vastaa säästetyn ostosähkön kokonaishintaa. Ostosähkön hinta määräytyy sähköenergian hinnan lisäksi siirtomaksuista, mahdollisista perusmaksuista ja veroista.

Suuren mittaluokan ORC-laitteiston yhteyteen on myös mahdollista integroida akusto, jolla tuotettua sähköenergiaa pystytään säilömään. Akkuteknologian kehittyessä ratkaisu voi olla taloudellisesti kannattavaa, mikäli akkujen avulla pystytään säilötyä sähköenergiaa hyödyntämään korkean sähkön hinnan aikana. Akuston investointihinta on kuitenkin hyvin merkittävä ja akusto tulee kyseeseen vain tilanteissa, joissa sähköenergiaa pystytään säilömään suuria määriä ja näin ollen mahdollistetaan suurempi säästömahdollisuus. Mikäli datakeskusoperaattori maksaa keskuksen kuluttamasta sähköenergiasta kiinteää hintaa ja datakeskukselle tyypillisesti sähköenergian kulutus on hyvin tasaista, ei akuston investointi todennäköisesti ole taloudellisesti kannattavaa. Mikäli ORC-prosessin tuottamaa sähköenergiaa pystytään hyödyntämään jatkuvasti suoraan datakeskuksen toiminnassa, sähköenergian säilömiselle ei ole teknisestäkään näkökulmasta tarvetta.

## 5 Johtopäätökset

Datakeskusten määrä ja niiden vaatima sähköteho tulevat globaalilla tasolla kasvamaan. Vuonna 2021 datakeskusten sähköenergian vuotuiseksi kulutukseksi arvioitiin maailmanlaajuisesti noin 220–320 TWh, joka vastasi noin 0,9–1,3 % osuutta globaalista sähköenergian kysynnästä. Euroopan unionin alueella datakeskukset kuluttivat vuonna 2018 noin 76,8 TWh energiaa, ja määrän odotetaan eri arvioiden mukaan kasvavan huomattavasti. 2018 EU-alueella ennustettiin datakeskusten energiankysynnän kasvavan 28 % vuoteen 2030 mennessä, mutta tekoälyn kysynnän kiihtymisen myötä kasvuluvut voivat olla tiheästi datakeskuksia rakentavissa maissa jopa kuusinkertaisia reilun 10 vuoden tarkastelujaksolla. (Pärssinen ja muut, 2019, s. 1; Corigliano ja muut, 2024, s. 2) Tekoälyn lisäksi myös supertietokoneiden yleistymisen kasvattaa datakeskuksilta vaadittua kapasiteettia ja lisäävät niiden sähköenergian kysyntää.

### 5.1 ORC-prosessin ja lämpöpumpun integraation tekninen onnistuminen datakeskusympäristössä

Datakeskusten kuluttamasta sähköstä käytännössä 100 % muuttuu lämmöksi, ja tästä lämmöstä useimmiten vähintään 70 % tulee datakeskuksesta poistaa, jotta palvelinlaitteiston toimintakyky pystytään ylläpitämään. Datakeskusten kuluttamasta sähköenergiasta jopa yli 45 % kuluu palvelinlaitteistolle sopivan sisäilmaston ylläpitämiseen, sisältäen ilmanvaihdon, jäähdytyksen ja kosteuden hallinnan (Alkrush ja muut, 2024, s. 2; Ancona ja muut, 2022, s. 2). Koska datakeskuksista saatava hukkalämmön potentiaali on valtava, tulee sitä hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Suomessa on toistaiseksi datakeskuksista tai pienemmistä palvelinsaleista saatavaa hukkalämpöä hyödynnetty kaukolämmön tuotannossa tai tilalämmityksessä, mutta sähkötehojen kasvaessa myös muita hyödyntämismahdollisuuksia tulee tarkastella. Työssä havaittiin, että hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien selvitys on hyvä aloittaa tarkastelemalla datakeskuksen jäähdytysjärjestelmää, sillä datakeskusten koon ja sähkötehojen kasvaessa niiden jäähdytysjärjestelmään tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota. Ilmajäähdytystä tehokkaammat yksi- tai kaksivaiheiset

nestejäähdytykset mahdollistavat korkeammat jäähdytyksen paluulämpötilat, jotka saattavat avata mahdollisuuden ORC-prosessin hyödyntämiselle.

ORC-järjestelmän lämpöhyötysuhde paranee sen hyödyntämän hukkalämmönlähteen lämpötilan kasvun myötä. Hukkalämmön lämpötilaa voidaan kasvattaa nostamalla datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän paluulämpötilaa tai integroimalla lämpöpumppu osaksi prosessia. Koska jäähdytysjärjestelmän paluulämpötilaa ei voida rajattomasti kasvattaa, havaittiin, että lämpöpumpun integraation mahdollisuutta on hyödyllistä tutkia. ORC-prosessin lämpöhyötysuhde vaihtelee hukkalämmönlähteen alhaisen lämpötilatason (esim. alle 80 °C) noin 5–10 prosentista aina korkeampien lämpötilojen (yli 150 °C) 15–20 % alueelle, ja esimerkiksi muutaman kymmenen asteen toimintalämpötilan nostaminen saattaa parantaa lämpöhyötysuhdetta useita prosenttiyksiköjä. Lämpöhyötysuhteen parantaminen vaikuttaa suoraan ORC-prosessin tuottaman sähköenergian määrään ja mikäli lämpöpumppuavusteisen prosessin avulla tuotettu suurempi sähköenergian määrä ylittää arvollaan lämpöpumpun investointi- ja ylläpitokustannukset, voidaan integraatiota pitää kannattavana.

Teknisesti onnistunut ORC-järjestelmän ja lämpöpumppuavusteisen ORC-järjestelmän integraatio datakeskuksen yhteyteen edellyttää tarkkaa suunnittelua ja toimintaympäristön optimointia. Lämmönlähteen lämpötilan lisäksi ORC-järjestelmän lauhdituksen lämpötila on merkittävä tekijä. Lauhdituksen toteutusmenetelmä tulee päättää heti suunnittelun alkuvaiheessa, jotta lämpötilatasot ovat tiedossa. Lähtökohtaisesti alhaisemmalla lauhdutuslämpötilalla saavutetaan parempi prosessin lämpöhyötysuhde. Myös mahdollinen ORC-prosessista saatava lauhdelämmön hyödyntäminen tulee tutkia. Kun sekä lämmönlähteen että lauhdituksen lämpötilatasot ovat tiedossa, tulee ORC-prosessiin valita sopiva kiertoaine. Kiertoaineen valinnassa tulee huomioida sen termodynaamiset ominaisuudet, ympäristöystävällisyys, elinkaaren kesto ja turvallisuus. Optimaalisen kiertoaineen valinta ja prosessin arvojen löytäminen edellyttää simulointia, jonka havaittiin olevan hyvin oleellinen osa toimivan prosessin mahdollistamista. Kiertoaineen valinnan seurauksena tulee mitoittaa ORC-järjestelmän

komponentit, eli kiertopumppu, lämmönsiirtimet, turbiini ja generaattori. Prosessin suunnittelu edellyttää myös erityistä palo- ja räjähdysturvallisuuden huomiointia, sekä mahdollisia kiertoaineiden vuototilanteita varten tarpeellisten vuotohälytysten ja hätätuuletuksen järjestämistä.

Mikäli ORC-järjestelmän ja datakeskuksen jäähdytysjärjestelmän väliin lisätään lämpöpumppu, tulee lämpötilaprofiilit ja kiertoaineiden yhteensopivuus tarkastella jokaisessa prosessin kohdassa. Lämpöpumpun tapauksessa tavoitellaan maksimaalista *COP*-arvoa, jonka avulla lämpöpumpun käyttökustannukset saadaan minimoitua. Pinch-ilmion vuoksi ORC-prosessin vastaanottaman lämpömäärän mitoituksessa tulee laskea sopiva kompromissi, jossa ORC-prosessin tuottama sähköenergia on mahdollisimman suuri, huomioiden mahdollisimman tehokas lämpöenergian vastaanottaminen lämmönlähteestä. Havaittiin, että nämä ovat yhteydessä ORC-kiertoaineen höyrystyslämpötilaan. Mitä korkeampi höyrystyslämpötila on, sitä enemmän turbiinilla pystytään tuottamaan työtä. Korkean höyrystyslämpötilan myötä lämpötilaero kiertoaineen ja lämmönlähteen välillä kuitenkin pienenee, mikä vähentää lämmönsiirron tehokkuutta.

Voidaan todeta, että teknisestä näkökulmasta lämpöpumppuavusteinen ORC-prosessi on mahdollista integroida onnistuneesti datakeskuksen yhteyteen. Matalampaan lämpötilatasoon soveltuvia ORC-laitteistoja valmistetaan useamman eri tahon toimesta ja tulevaisuudessa datakeskusten tuottamien hukkalämpöjen määrän kasvu voi lisätä kiinnostusta ORC-laitteistoja kohtaan myös datakeskusalalla. Toiminnassa olevia ORC-järjestelmiä, jotka hyödyntäisivät jäähdytysjärjestelmän keräämää lämpöenergiaa, ei ole tiittävästi datakeskuksen yhteyteen vielä ainakaan suuressa mittakaavassa toteutettu. Suomessa suurin mielenkiinto datakeskusten tuottaman hukkalämmön hyödyntämisessä kohdistunee tulevaisuudessakin kaukolämmön tuotantoon, mutta kansainvälisesti itse lämpöenergialle ei monessa tapauksessa ole kysyntää, joten lämpöenergian muuttaminen sähköenergiaksi voi olla houkutteleva vaihtoehto. Integraatiosta tarvitaan lisää käytännön kokemusta, jotta sen tuomat mahdollisuudet

saadaan mahdollisimman hyvin selvitettyä. Oletettavasti ensimmäiset ORC-järjestelmät datakeskusten yhteyteen toteutetaan pienessä tai keskisuudessa mittakaavassa, jossa järjestelmän tuottamaa sähköenergiaa pystyttäisiin hyödyntämään osana datakeskuksen oman sähkönsyynän kattamista, esimerkiksi valaistuksessa tai taloteknisten järjestelmien toiminnassa. Teknisestä näkökulmasta mahdollisuudet ovat olemassa, jonka vuoksi lisää tutkimustietoa ja käytännön kokemusta aiheen tiimoilta tullaan toivon mukaan näkemään. Käytännön kokemusta muun muassa laitteiston toiminnan optimoinnista, huolto- ja ylläpitotarpeesta, elinkaaresta ja sähköenergian tuotannon tasaisuudesta on saatava lisää ennen suuren mittakaavan investointeja.

Järjestelmä tarvitsee toimiakseen onnistunutta prosessin suunnittelutyötä, automatiikan ymmärrystä ja optimointia sekä mahdollisimman tasaiset käyttöolosuhteet. ORC-prosessin integraation lisäksi myös datakeskusten jäähdytysjärjestelmät tulevat vaatimaan tulevaisuudessa lisää tutkimustietoa. Sähkötehojen kasvaessa jäähdytysjärjestelmältä tullaan vaatimaan lisää suorituskykyä ja tässä yhteydessä tulee huomioida mahdollisimman tehokas lämmöntalteenotto ja hukkalämpöjen hyödyntämispotentiaali, sekä jäähdytysjärjestelmän käyttämän kiertoaineen ympäristön kuormittavuus ja elinkaari.

## **5.2 ORC-prosessin ja lämpöpumpun integraation taloudellisen kannattavuuden selvitys**

Teknisestä näkökulmasta lämpöpumppuavusteinen ORC-prosessi on mahdollista integroida datakeskuksen yhteyteen onnistuneesti. Integraation taloudellisen kannattavuuden selvityksen sen sijaan havaittiin vaativan huomattavasti lisää tutkimustietoa ja käytännön kokemusta laitteiston teknisestä elinkaaresta, suorituskyvystä ja investointihinnasta. Lämpöpumppuavusteisen ORC-prosessin integroinnin takaisinmaksuaika voi arvioiden mukaan vaihdella 3–8 vuoden välillä, mutta tähän vaikuttaa useampi eri tekijä (Marshall ja muut, 2021, s. 2). Laitteiston tekninen suorituskyky on suoraan yhteydessä taloudelliseen kannattavuuteen, mutta myös ORC-prosessilla tuotetun sähköenergian arvo saattaa vaihdella. Mikäli tuotettua

sähköenergiaa käytetään osana datakeskuksen sähkönkulutusta, voidaan arvoksi laskea säästetyn ostosähköenergian arvo. Sähköenergian arvo saattaa kuitenkin heitellä ja täten datakeskusoperaattorin tulee huomioida tämä kannattavuuslaskelmien laadinnassa. Datakeskus saattaa hyödyntää kiinteähintaista sähköenergiaa, jolloin säästetyn ostoenergian arvo on helpompi laskea, mutta pörssiinnoiteltua sähköenergiaa käytettäessä vaihtelu voi olla suurta.

Taloudellisen kannattavuuden selvittäminen on hyvä aloittaa laitteiston investointikustannuksien selvittämisellä. Mikäli halutaan maksimoida ORC-prosessin hyöty, tulee tarkasteluun sisällyttää myös datakeskuksen jäähdytysjärjestelmä. Korkeampia jäähdytyksen paluulämpötiloja tuottavat jäähdytysjärjestelmät ovat lähtökohtaisesti investointi- ja ylläpito hinnaltaan kalliimpia. Mikäli ORC-laitteisto sijoitetaan jo olemassa olevaan datakeskukseen, tulee sopeutua niin ikään olemassa olevaan jäähdytysjärjestelmään. Hukkalämmönlähteen ja lauhdutuslämpötilan ollessa tiedossa, on järjestelmän komponentit mahdollista mitoittaa ja investointikustannus selvittää. ORC-prosessin höyrystimen ja lauhduttimen koko ovat yhteydessä lämpötilaeroihin lämpöenergian vastaanotossa ja luovutuksessa. ORC-prosessin kiertoaine valitaan lämpötilaprofiiliin sopivaksi, ja kun kiertoaine on tiedossa, tulee selvittää sen elinkaari. Kiertoaineen täyttö on laitteiston elinkaaren aikana kuluerä ja kiertoaineen valinnan myötä tulee myös huomioida mahdolliset hätätuuletuksen ja ATEX-vaatimuksien mukana tulevat kulut. Mikäli ORC-prosessilla tavoitellaan esimerkiksi 200 kW tuotettua sähkötehoa, on kiertopumppu ja turbiini-generaattori –yhdistelmä mitoitettava tämän mukaisesti. Tuotettava teho vaatii kiertoaineelta tietyn massavirtauksen, joka vaikuttaa kiertopumpun kokoon. Kiertopumpun kuluttama sähköenergia on laitteiston elinkaaren aikana huomattava kuluerä, ja vaaditun massavirtauksen kasvun myötä pumpun koko ja täten sen investointikustannus nousee. Kiertopumppu hyödyntää usein ORC-prosessin tuottamaa sähköenergiaa, mutta tämä vähentää sähköenergian nettotuotantoa. Lämpöpumppuavusteisessa ORC-prosessissa itse lämpöpumpun investointikustannus on merkittävä.

Huolto- ja ylläpitokustannusten selvityksessä huomioidaan ORC-laitteiston kiertopumpun sekä lämpöpumpun sähköenergian kulutus. Laitteisto toimii itsenäisesti, joten työntekijäkulut liittyvät lähinnä huoltotilanteisiin. Laitteisto vaatii optimaaliseen toimintaan tarkan automaatio-ohjauksen, joka tulee integroida datakeskuksen jäähdytyksen ohjauksen automatiikkaan. Mikäli ORC-laitteiston lauhdutusta varten toteutetaan erillinen jäähdytysvesivirta, tämän investointi- ja ylläpitokustannukset tulee myös huomioida. Todennäköisin vaihtoehto on lauhduttaa ORC-kiertoaine esimerkiksi ulkoilman avulla, jolloin kustannus on alhaisempi mutta teknisestä näkökulmasta prosessin lämpöhyötysuhde saattaa rajoittua.

Taloudellisen selvityksen tueksi esiteltiin useampi eri laskentamalli, jolla muun muassa takaisinmaksuaika pystytään selvittämään. Laskentamallit ovat kuitenkin suuntaa-antavia arvioita, ja niiden tueksi on saatava todellista dataa. Pienen mittakaavan lämpöpumppuavusteisen ORC-laitteiston investointi datakeskusympäristöön antaisi arvokasta tietoa laitteiston käyttäytymisestä ja elinkaaresta, jolloin suuremman mittaluokan laitteistojen taloudellisen kannattavuuden selvitys helpottuisi. Laitteisto on lähtökohtaisesti hyvin skaalautuvaa, sillä investointikustannusten nousun myötä myös tuotetun sähköenergian määrä kasvaa.

Suomessa suurin mielenkiinto datakeskusten tuottaman hukkalämmön hyödyntämisessä on kohdistunut kaukolämmön tuotantoon. ORC-laitteiston integrointia Suomessa sijaitseviin datakeskuksiin ei todennäköisesti tulla ensisijaisesti tarkastelemaan, mikäli datakeskus sijoitetaan alueelle, mistä löytyy kaukolämpöinfrastruktuuri. Kaukolämmön kysyntä on kesäaikaan kuitenkin huomattavasti talviaikaa alhaisempaa, ja kesäisin datakeskuksen hukkalämmöillä tuotetaan kaukolämmön välityksellä lähinnä lämmintä käyttövettä. Koska kaukolämmön tuotanto vaatii datakeskuksen yhteyteen lämpöpumppuinvestoinnit, pystyttäisiin niitä hyödyntämään myös lämpöpumppuavusteisessa ORC-prosessissa. Tällöin ORC-laitteisto toimisi kaukolämmön tuotannon rinnalla ja hukkalämpöä pystyisi ohjaamaan enemmän ORC-laitteiston hyödynnettäväksi, kun kaukolämmölle ei ole kysyntää. Tämä järjestely

vaatii edistynyttä automaatiota. Teknisestä ja taloudellista näkökulmasta ORC-laitteiston optimointi ja takaisinmaksuajan selvitys on kuitenkin haastavaa, jos saatavilla olevan hukkalämmön määrä ei ole tasainen. ORC-laitteiston hyöty voi jäädä hyvin vähäiseksi, jos hukkalämpöä hyödynnetään pääsääntöisesti kaukolämmön tuotannossa. Täten ORC-laitteiston integraatio on todennäköisempää datakeskuksiin alueilla, jossa kaukolämmön tuotanto ei ole mahdollista puuttuvan kaukolämpöinfrastruktuurin tai kysynnän myötä. On mahdollista, että tulevaisuudessa kaukolämmön tuotantoon hyödynnetään useita eri hukkalämmönlähteitä, jolloin kaikilta datakeskuksilta saatavaa lämpöenergiaa ei kaukolämmön tuotannossa ole tarve hyödyntää.

## 6 Yhteenveto

Lämpöpumppuavusteisen ORC-prosessin integrointi datakeskusympäristöön on tulevaisuudessa potentiaalinen vaihtoehto datakeskusten tuottaman hukkalämmön hyödyntämisessä. Ratkaisu vaatii vielä huomattavasti lisää käytännön kokemusta ennen sen skaalaamista suureen mittaluokkaan. Erityisesti ratkaisua voidaan pitää houkuttelevana globaalisti alueilla, joissa datakeskuksista saatavalle lämpöenergialle ei ole kysyntää. Suomessa ja muualla kylmissä olosuhteissa lämpöenergialle on usein tarvetta, eikä lämpöenergian muuttaminen sähköenergiaksi ole täten usein taloudellisesti kannattavaa. Tilanne on kuitenkin globaalilla tasolla eri, jonka vuoksi ORC-laitteiston potentiaali on huomattava.

Onnistunut ORC-integraatio vaatii tarkkaa suunnittelutyötä sekä kehittyneen automaatiojärjestelmän. Jo nyt prosessin eri osa-alueista on kuitenkin tehty tutkimustyötä riittävästi, jotta teknisesti onnistunut ratkaisu pystytään toteuttamaan. ORC-laitteisto ei kuitenkaan tule yleistymään datakeskusten yhteydessä, ennen kuin sen taloudellinen kannattavuus on pystytty todistamaan.

Kansainvälisesti tiedonprosessoinnin kysyntä tulee kasvamaan huomattavasti. Kiristyvät kansainväliset ja kansalliset vaatimukset hukkalämpöjen hyödyntämisestä tulevat vauhdittamaan eri vaihtoehtojen kartoittamista ja kehitystä, joka koskee myös ORC-laitteistoja. ORC-laitteistojen integroinnin avulla on mahdollista laskea datakeskusten hiilidioksidipäästöjä, mutta datakeskusoperaattoreiden näkökulmasta hiilidioksidipäästöjäkin tärkeämpi aspekti on kustannussäästöt, mitä ostosähkön säästöllä voidaan saavuttaa. Etenkin taloudellisen kannattavuuden osalta tutkimustietoa käytännön sovelluksista tarvitaan lisää, jotta alan kehitystä voidaan kiihdyttää.

## Lähteet

- Alkrush, A.A, Mohamed, S.S., Abdelrehmein, O. & Hegazi, A.A. (2024). *Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700724000458>
- Ancona, M. A., Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Ottaviano, S., Peretto, A. & Poletto, C. (2022). *Experimental and numerical investigation of a micro-ORC system for heat recovery from data centers*.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2385/1/012122>
- ASHRAE. 2021. Equipment Thermal Guidelines for Data Processing Environments.  
<https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/supplemental%20files/therm-gdlns-5th-r-e-refcard.pdf>
- Climeon.com. Climeon HeatPower 300. Valmistajan nettisivut. Noudettu 4.12.2025 osoitteesta: <https://climeon.com/heatpower-300-technology/>
- Corigliano, O., Algieri, A. & Fragiaco, P. (2024). *Turning Data Center Waste Heat into Energy: A Guide to Organic Rankine Cycle System Design and Performance Evaluation*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/14/6046>
- Darwish, K., Ehyaei, M.A., Atabi, F. & Rosen, M.A. (2015). *Selection of Optimum Working fluid for Organic Rankine Cycles by Exergy and Exergy-Economic Analyses*.  
<https://www.mdpi.com/2071-1050/7/11/15362>
- Desai, N.B. & Bandyopadhyay, S. 2009. *Process integration of organic Rankine cycle*. Teoksessa R. Wang (toim.), *Energy volume 34, issue 10 (2009)* (s. 1674-1686).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209002205>
- Ebrahimi, K. Jones, G.F. & Fleischer, A.S. (2014). *A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities*. Teoksessa L. Kazmerski (toim.), *Renewable and Sustainable Energy Reviews volume 31 (2014)* (s. 622-638).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113008216>
- Ebrahimi, K., Jones, G.F. & Fleischer, A.S. (2017). *The viability of ultra low temperature waste heat recovery using organic Rankine cycle in dual loop data center applications*. Teoksessa T.S. Zhao (toim.), *Applied Thermal engineering 126 (2017)*

(s.393–406).

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116326114>

ElectraTherm.com. ElectraTherm Power Module75. Valmistajan nettisivut. Noudettu

4.12.2025 osoitteesta: <https://electratherm.com/en/power-module-75/>

Elinkeinoelämän keskusliitto (EK). 2025. Dataikkuna: Suomen vihreät investoinnit.

Tilastot haettu 8.10.2025 osoitteesta <https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/>

Energiateollisuus ry. (2025, 28. tammikuuta). Energiavuosi 2024 – Kaukolämpö.

[https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/01/Kaukolampovuosi-2024\\_ennakkograafit.pdf](https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/01/Kaukolampovuosi-2024_ennakkograafit.pdf)

European Data Centre Association (EUDCA). (2025a). *Climate Neutral Data Centre Pact*.

Noudettu 18.10.2025 osoitteesta <https://www.eudca.org/climate-neutral-data-centre-pact>

European Data Centre Association (EUDCA). (2025b). *Energy Efficiency Directive*.

Noudettu 18.10.2025 osoitteesta [https://www.eudca.org/energy-efficiency-directive?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.eudca.org/energy-efficiency-directive?utm_source=chatgpt.com)

The Engineering Mindset. (2022, 12. lokakuuta). *Computer Room Air Conditioning – How*

*do CRAC units Work?* Youtube-video. <https://www.youtube.com/watch?v=WNOyBdWZNwE>

Fingid. 2025. *Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q3 2025*. Noudettu

8.10.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat/>

Finnish Data Center Association (FDCA). (2025, 30. kesäkuuta). *Datakeskukset eivät ole*

*sähkösyöppö, vaan Suomen kasvun älykäs moottori*. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://www.fdca.fi/datakeskukset-eivat-ole-sahkosyoppo/>

Györke, G., Groniewsky, A. & Attila, I.R. (2019) *A Simple Method of Finding New Dry and*

*Iisentropic Working Fluids for Organic Rankine Cycle*. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/480>

Gynther, L., Kiuru, T. & Meetteri, J. (2022). *Energy Efficiency of Data Centers in Finland*.

Motiva.

[https://www.motiva.fi/files/20768/Energy Efficiency of Data Centers in Finland - November 2022.pdf](https://www.motiva.fi/files/20768/Energy_Efficiency_of_Data_Centers_in_Finland_-_November_2022.pdf)

Hakahuhta, A. (2025, 23. lokakuuta). *Datakeskuksille uusi tuki – kiistelty lakiesitys datakeskusten sähköverotuen poistosta eteni*. Yle. Noudettu 25.11.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20189971>

Hänninen, J. & Roslund, R. (2025, 7. toukokuuta). Kouvolan jättimäisen Tiktok-diilin takaa paljastui sekava vyyhti: kiinalaisia ja dubailainen miljardööri. Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20160174>

Intec-energy.de/en/. ORC Power Plants – Low temperature ORC. Valmistajan nettisivut. Noudettu 4.12.2025 osoitteesta: <https://www.intec-energy.de/en/system-solutions/orc-kw>

ISO/IEC 30134 Information technology – Data centres key performance indicators. Osat ISO/IEC 30134-1–30134-9.

Juuti, P. (2023, 7. kesäkuuta). Datakeskusten hukkalämpö ei aluksi kelvannut Helsingin kaukolämpöyhtiölle – sitten maailma muuttui ja nyt lämpö virtaa Pitäjänmäessä. Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20035644>

Kirvan, P. & Gillis, A.S. (2025, 10. kesäkuuta). *What is computer room air conditioning (CRAC)? CRAC vs. CRAH unit differences*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/definition/computer-room-air-conditioning-unit>

Kinnunen, J., Laajala, P., Härkönen, L.S., Ruuttunen, K., Näkkilä, J., Keränen, S., Kerttula, M., Pietarila, J. & Lappalainen, E. (2025). *Kirjallisuuskatsaus datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksista*. KAMK.

Koistinen, A. (2015, 22. lokakuuta). Datakeskukset – Mitä ne ovat? Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/3-8396487>

Kontio, J. (2020). *Ilmalämpöpumpun lämpökerrointutkimus*. Opinnäytetyö. Centria-ammattikorkeakoulu.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/333020/Kontio\\_Joonas.pdf;jsessionid=4927DA73D89CA8E189F0DA11BE37D746?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/333020/Kontio_Joonas.pdf;jsessionid=4927DA73D89CA8E189F0DA11BE37D746?sequence=2)

- Lehtilä, S. & Aaltonen, E. (2025, 15. toukokuuta). Kartta näyttää, mihin datakeskuksia nousee Suomessa. Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20161487>
- Loni, A., Najafi, G., Bellos, E., Rajaei, F., Said, Z. & Mazlan, M. (2020). *A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620351143>
- Markkanen, M. (2025, 2. maaliskuuta). Kallis huuma. *Taloussanomat*. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://www.is.fi/taloussanomat/art-2000011061070.html>
- Marshall, Z.M. & Duquette, J. (2021). *A techno-economic evaluation of low global warming potential heat pump assisted organic Rankine cycle systems for data center waste heat*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221027778?via%3Dihub>
- Muller-Steinhagen, H.M.G. (2011, 2. helmikuuta). *Rankine Cycle*. <https://www.thermopedia.com/content/1072/>
- Mäntylä, J. (2025, 15. elokuuta). Hallitus jäädytti datakeskusten sähköveron korotuksen – Fortum vaatii nyt uudelta mallilta selkeyttä. Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20177352>
- Mäntysalo, J. (2025, 7. toukokuuta). Suojelupoliisi on varoittanut Tiktokista jo pitkään – mitä mieltä se on Kouvolan jättimäisestä datakeskuksesta? Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20160346>
- Olsen, D., Abdelouadoud, Y., Liem, P. & Wellig, B. (2017). *The Role of Pinch Analysis for industrial ORC Integration*. Teoksessa V. Dosseba (toim.), *Energy Procedia*, Volume 129 (s. 74–81). [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217341073?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=9a49c391ced08d7b](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217341073?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=9a49c391ced08d7b)
- Pietarila, P. (2025, 11. helmikuuta). Jopa sata datakeskusta – Kartta näyttää, minne Suomen seuraavat jätti-investoinnit voivat syntyä. Kauppalehti. Noudettu

- 8.10.2025 osoitteesta <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/a/7c7dae13-11b2-4b54-ad5a-7fb3e2f350f0>
- Pärssinen, M., Wahlroos, M., Manner, J. & Syri, S. (2019). *Waste heat from data centers: An investment analysis*. Teoksessa F. Haghghat (toim.) *Sustainable Cities and Society*, Volume 44 (s. 428-444).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718314318>
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2017). SFS-EN 50600 Information technology – Data centre facilities and infrastructures. Osat 4–1–4–9.
- Tauriainen, A. & Kähkönen, S. (2024, 19. maaliskuuta). Datakeskusten hukkalämpöä on pian pakko hyötykäyttää, ja Suomella on siihen tarkoitukseen hyvä kohde. Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20078877>
- Tolkki, K. (2025, 8. toukokuuta). Google ja Meta otettiin avosylin vastaan, Tiktok herättää epäilyksiä tietoturvasta – turhaan, sanovat asiantuntijat. Yle. Noudettu 8.10.2025 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20160290>
- Valtioneuvosto. (2024, 20. helmikuuta). Suomen ympäristökeskuksen ja ympäristöministeriön tiedote. *EU:n uusi asetus hillitsee fluorattujen kasvihuonekaasujen päästöjä*. Noudettu 19.11.2025 osoitteesta <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/eu-n-uusi-asetus-hillitsee-fluorattujen-kasvihuonekaasujen-paastoja>
- Vanslambrouck, B., Broek, Van den, M., Vankeirsbilck, I., De Paepe, M. & Gusev, S. (2012). *Efficiency comparison between the steam cycle and the organic rankine cycle for small scale power generation*.  
[https://www.researchgate.net/publication/257570518\\_Efficiency\\_comparison\\_between\\_the\\_steam\\_cycle\\_and\\_the\\_organic\\_rankine\\_cycle\\_for\\_small\\_scale\\_p  
ower\\_generation](https://www.researchgate.net/publication/257570518_Efficiency_comparison_between_the_steam_cycle_and_the_organic_rankine_cycle_for_small_scale_power_generation)
- Verohallinto. (2023, 18. tammikuuta). *Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot*. Noudettu 30.12.2025 osoitteesta <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>

Wang, Z., Luther, M.B., Amirkhani, M., Liu, C. & Horan, P. (2021). *State of the Art on Heat Pumps for Residential Buildings*. <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/8/350>

Yu, H., Feng, X. & Gundersen, T. (2018). *Process integration of organic Rankine cycle (ORC) and heat pump for low temperature waste heat recovery*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218313239>

Zhang, X., Cao, M., Yang., Guo. & Wang, J. (2019). *Economic Analysis of Organic Rankine Cycle Using R123 and R245fa as Working Fluids and a Demonstration Project Report*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/2/288>