



KIRJALLISUUSKATSAUS DATAKESKUSTEN HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMISEN MAHDOLLISUUKSISTA

Tekijät:

Jenni Kinnunen (KAMK), Pasi Laajala (LUKE), Laura S. Härkönen (LUKE), Kyösti Ruuttunen (LUKE), Juha Näkkilä (LUKE), Silja Keränen (KAMK), Mikko Kerttula (CSC), Janne Pietarila (KAMK) ja Enna Lappalainen (KAMK)



Euroopan unionin
osarahoittama



Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B

Raportteja ja selvityksiä B 190

KIRJALLISUUSKATSAUS DATAKESKUSTEN HUKKALÄMMÖN HYÖ- DYNTÄMISEN MAHDOLLISUUKSISTA

Tekijät:

Jenni Kinnunen (KAMK), Pasi Laajala (LUKE), Laura S. Härkönen (LUKE), Kyösti Ruuttunen (LUKE),
Juha Näkkilä (LUKE), Silja Keränen (KAMK), Mikko Kerttula (CSC), Janne Pietarila (KAMK) ja Enna
Lappalainen (KAMK)

Yhteystiedot:

Kajaanin Ammattikorkeakoulun kirjasto

PL 240, 87101 KAJAANI

Puh. 044 7157042

Sähköposti: amkkirjasto@kamk.fi

<http://www.kamk.fi>

Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B 190 / 2025

ISBN 978-952-7522-50-9

ISSN 1458-915X

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Datakeskusten hukkalämpö.....	2
2.1	Datakeskusten jäähdytys ja hukkalämpö	6
2.2	Hukkalämmön potentiaali Suomessa ja Kajaanissa	9
3	Hukkalämpö lämmöntuotannossa ja varastointi.....	14
3.1	Lämmöntuotanto	14
3.2	Hukkalämmön varastointi	15
4	Sähköntuotanto, viilennys ja hybridijärjestelmät.....	18
4.1	Lämmöstä sähköä -ilmiö.....	18
4.2	Hukkalämmön hyödyntäminen viilennyksessä	21
4.3	Hybridijärjestelmät datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämisessä	23
5	Hukkalämmön hyödyntäminen biomassojen prosessoinnissa.....	24
5.1	Sahatavaran ja sahan sivutuotteiden kuivaus	24
5.2	Biokaasun tuotanto ja mädätteen kuivaus.....	26
5.3	Hukkalämmön hyödyntäminen jätevedenpuhdistuksessa	29
6	Hukkalämmön hyödyntäminen ruoantuotannossa.....	30
6.1	Hukkalämpö kasvien ja sienten tuotannossa	30
6.1.1	Kasvihuoneet.....	31
6.1.2	Sienimöt	37
6.2	Hukkalämpö vesiviljelyssä	39
6.2.1	Kalankasvatus.....	39
6.2.2	Äyriäisten kasvatus	44
6.2.3	Levien kasvatus	46
6.3	Hukkalämpö hyönteisten kasvatuksessa.....	48
7	Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen teollisessa ekosysteemissä	50
8	Hukkalämmön hyödyntäminen muissa kohteissa	52
9	Yhteenveto ja pohdinta	53
	Lähteet.....	57

1 Johdanto

Kirjallisuuskatsaus on tehty osana Kajaanin ammattikorkeakoulun, Luonnonvarakeskuksen (LUKE) sekä CSC - Tieteen tietotekniikan keskus Oy:n ”Konesalien hukkalämmöt hyödyksi” -hanketta. Konesalien hukkalämmöt -hanke rahoitetaan pääsääntöisesti EU:n Oikeudenmukaisen siirtymän rahaston (JTF) varoilla, Kainuun liiton myöntämänä. Hankkeen osarahoittajia toteuttajien lisäksi ovat Kajaanin kaupunki, Loiste Lämpö Oy sekä Kansallisholding Oy.

Konesalien hukkalämmöt hyödyksi -hankkeen keskeisenä tavoitteena on edistää energiasektorin vihreää siirtymää, luoda uusia vähähiilisen kiertotalouden liiketoimintamahdollisuuksia, uudistaa elinkeinorakennetta, varmistaa uusien investointien toteutuminen sekä kehittää uutta liiketoimintaa TKI-toiminnan myötä. Hankkeessa kartoitetaan hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia teknologiaselvitysten, kirjallisuuskatsausten sekä tutustumiskäyntien muodossa. Samalla selvitetään Kajaanin alueella syntyvien hukkalämpöjen määrä nyt ja tulevaisuudessa sekä tiedossa olevien datakeskusten, että mahdollisten uusien investointien pohjalta.

Näiden perusteella luodaan ensin yleissuunnitelma mittakaavan ja suuruusluokkien ymmärtämiseksi eri kokoluokan konesali-investointiskenaarioille. Lisäksi tehdään tarkempia kohdekohtaisia suunnitelmia hukkalämmön konkreettiseksi hyödyntämiseksi esimerkiksi kaukolämmöntuotannossa lämmön varastointia hyödyntäen, ruoantuotannossa sekä osana biotalouden arvoketjua esimerkiksi biomassaa kuivaamalla.

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on selvittää kirjallisuuden pohjalta mahdollisuuksia datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseen. Aiheesta on tehty erilaisia julkaisuja jo parin vuosikymmenen ajan, mutta teknologian kehittymisen ja ajantasaisen tiedon saamiseksi tässä katsauksessa on pyritty rajaamaan lähteitä uusimpiin, noin vuoden 2018 jälkeen tuotettuihin julkaisuihin. Raja on kuitenkin keinotekoinen, koska myös tätä ennen on julkaistu erittäin paljon edelleen relevanttia kirjallisuutta aiheesta, erityisesti sellaista, joka avaa perusymmärrystä aiheen tiimoilta. Sen vuoksi aiemmin valmistuneita julkaisuja ei ole täysin jätetty huomiotta. Lisäksi kirjallisuuskatsauksessa on pyritty kartoittamaan internetlähteiden avulla hukkalämmön hyödyntämisen nykytilaa käytännön tasolla.

2 Datakeskusten hukkalämpö

Hukkalämmön hyödyntämispotentiaali datakeskuksissa on nykyään tiedostettu, ja olennainen osa kestäväen kehityksen mukaista datakeskustoimintaa Suomessa ja maailmalla. Yleisesti käytössä oleva termi ”Green data center”, tarkoittaa sellaista datakeskusta, jossa keskeisenä suunnittelun ja toteutuksen lähtökohtana on energiatehokkuus. Esimerkiksi Suomen Kajaanissa sijaitseva EuroHPC/CSC Tieteen tietotekniikan keskuksen hallinnoima LUMI-datakeskus hyödyntää uusiutuvaa energiaa sekä hukkalämmön kierrätystä paikalliseen kaukolämpöverkkoon, ollen yksi maailman energiatehokkaimmista datakeskuksista.

Energiatehokkuus on entistäkin keskeisemmässä roolissa, sillä datakeskusten energiankulutus kasvaa eksponentiaalisesti muun muassa tekoälyn kehityksen ja käytön lisääntyessä. Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) raportoi tammikuussa 2024, että datakeskusten ja tekoälyn energiantarve voi kaksinkertaistua vuoteen 2026 mennessä, korostaen energiatehokkuustoimien merkitystä (IEA, 2021).

Datakeskusten energiatehokkuuden tai ”vihreyden” mittareiksi on kehitetty sertifioituja menetelmiä, kuten PUE-luku, joka kuvaa keskuksen energiatehokkuutta, ja ERF-luku, joka mittaa energian uudelleenkäytön määrää suhteessa kulutettuun energiaan. Hyvä PUE-luku, esimerkiksi 1,2, tarkoittaa, että muu energiankulutus jää alle 20 % laskentatehtävään kuluvasta energiasta, kun taas korkea ERF-luku osoittaa sen lisäksi tehokasta hukkalämmön uudelleenkäyttöä. Nämä mittarit auttavat yrityksiä arvioimaan keskustensa suorituskykyä ja tekemään strategisia päätöksiä energiankäytön optimoinnissa. Näiden lisäksi on olemassa joukko muita laskennallisia arvoja, joiden perusteella voidaan vertailla eri keskusten energiatehokkuutta tai esimerkiksi hiilijalanjälkeä (CUE).

Vihreän datakeskuksen määritelmää ei ole virallisesti olemassa, mutta termin käyttö pohjautuu yleisesti hyväksytyihin periaatteisiin, kuten energiatehokkuuden optimointiin ja käyttöiän pidentämiseen kestäväen kehityksen mukaisesti. ”Vanhemmissa datakeskuksissa PUE-luku on tyypillisesti noin 2, kun taas suurissa hyperdatakeskuksissa se voi olla alle 1,2. Maailmanlaajuinen keskiarvo vuonna 2020 oli noin 1,67. Tämä tarkoittaa, että keskimäärin 40 prosenttia kokonaisenergiankäytöstä oli muuta kuin IT-laitteiden kulutusta. PUE-luku on kuitenkin suhdeluku, joten se ei kerro meille mitään kokonaisenergiankulutuksesta. Jos IT-laitteet kuluttavat suuret määrät energiaa jäähdytysjärjestelmään verrattuna, PUE-luku näyttää hyvältä. Siksi on tärkeää mitata myös

kokonaisenergiankulutusta sekä IT-laitteiden energiatehokkuutta ja elinkaarta.” (Dunnivant, Kätkä, n.d).

Energiatehokkuuden lisäksi määritelmään kuuluvat kestävän veden käytön hallinta, erityisesti vesijäähdytteisten keskusten optimointi veden kierrätystä ja energiatehokkuutta silmällä pitäen, sekä hukkalämmön hyödyntäminen ja uusiutuvan energian, kuten aurinko- ja tuulienergian, käyttö. Uusiutuvilla energianlähteillä tarkoitetaan uusiutuvista, ei-fossiilisista lähteistä peräisin olevaa energiaa, kuten tuuli- ja aurinkoenergiaa, geotermistä energiaa, ympäristön energiaa, vuorovesi- ja aaltoenergiaa, vesivoimaa sekä biomassaa ja biokaasua. (Euroopan Parlamentti, 2024)

Kaikilla datakeskuksilla on tarve a) turvatulle ja vakaalle sähkölle, joka takaa keskeytyksettömän toiminnan b) energialle, jota käytetään tehokkaaseen datan käsittelyyn (laskentaan) ja optimoituun jäähdytykseen, sekä c) hukkalämmön hyödyntämiselle, esimerkiksi syötettäessä kaukolämpöverkkoon tai teollisuusprosesseihin (Terenius, Garraghan & Harper, 2023). Hukkalämmön hyödyntäminen rinnastetaan kiertotalouden konseptiin, jossa resurssien tehokas kierrätys ja uudelleenkäyttö on keskeistä. Datakeskuksen hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kasvihuoneiden lämmittämiseen tai kalankasvatuslaitoksissa, mikä parantaa sekä resurssien käyttöastetta että taloudellista kannattavuutta.

Yhden hukka- tai ylijäämälämpö (engl. waste heat tai excess heat) on toisen syöte ja toisen tekijän hyödyke. Jotta toisen tuottaman hukkalämmön hyödyntäminen on mahdollista, vaatii se uudenlaista toimijoiden välistä yhteistyötä ja selkeitä liiketoimintamalleja. Esimerkiksi datakeskuksen ja kaukolämpöyrityksen välillä voidaan sopia hukkalämmön ostamisesta kiinteään hintaan, samalla luoden sopimuksia, jotka takaavat toimitusvarmuuden ja teknisen yhteensopivuuden. Näin yhteistyöstä tulee ennakoitavaa ja molempia osapuolia hyödyttävää.

Terenius ym. (2023) sekä Sovacool ym. (2022) esittävät ajatuksen, että kokonaisvaltaisempi, koordinoitu lähestymistapa on tarpeen, jossa ylemmät tahot, kuten paikallishallinto tai kansalliset energiavirastot, voisivat toimia välittäjinä datakeskusten ja hukkalämmön hyödyntäjien välillä. Tämä voisi sisältää esimerkiksi yhteisiä suunnittelualueita ja liiketoimintamallien standardointia. Tähän liittyvät teollisuuden prosessien tarkastelut, yhteiskunnallinen hallinto, lainsäädäntö, tarpeet ja visiot, ympäristöä koskevat huolenaiheet sekä se, miten teollisuus, yhteiskunta ja ympäristö ovat yhteydessä toisiinsa.

Sähköverkko ja energiaverotus Suomessa

Sähköverkon kapasiteetti on kriittinen tekijä datakeskusten sijoittamisessa, sillä nykyaikaiset datakeskukset kuluttavat huomattavia määriä sähköä, ja niiden luotettava toiminta edellyttää vahvaa siirtokapasiteettia sekä mahdollisuutta integroitua paikallisiin energiantuotantolähteisiin. Kapasiteettipuutteet voivat rajoittaa datakeskusten sijoittumista ja hidastaa niiden kehitystä, kuten on havaittu joillakin alueilla Suomessa ja muualla Euroopassa.

Suomessa kantaverkosta vastaa Fingrid Oyj, joka ylläpitää noin 14 500 kilometriä voimajohtoja ja yli 120 sähköasemaa. Vaikka Suomen sähköverkko on tunnettu luotettavuudestaan, alueellisia kapasiteettihaasteita on tunnistettu erityisesti Etelä-Suomessa, missä kantaverkon kapasiteetti on ennustettu olevan tiukilla lähivuosina. Tämän vuoksi datakeskusten sijoittuminen Pohjois-Suomeen tarjoaa merkittävän mahdollisuuden tasapainottaa sähköjärjestelmää ja hyödyntää alueen uusiutuvan energian tuotantoa tehokkaasti (Fingrid, Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033).

Pohjois-Suomessa, kuten Kajaanin seudulla, paikallisesti tuotetun tuulivoiman käyttö datakeskuksissa ja teollisuuslaitoksissa vähentää tarvetta siirtää suuria sähkömääriä Etelä-Suomeen. Tämä paikallinen energiankulutus auttaa tasapainottamaan sähköjärjestelmää, vähentämään siirtohäviöitä ja vakauttamaan tuulivoiman tuotannon vaihteluita. Fingridin investointihankkeet, kuten Järvinlinja-voimajohdon vahvistaminen, parantavat pohjois-eteläsuuntaista siirtokapasiteettia ja luovat paremmat edellytykset uusille datakeskuksille ja energiaintensiiviselle teollisuudelle (Fingrid, Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033).

Datakeskukset rakentavat yleensä jonkinlaisen varavoimajärjestelmän turvatakseen sähkön saannin jokaisessa tilanteessa. Akkuihin perustuvat (UPS-järjestelmät) voivat tarjota merkittävän joustoresurssin, jota voidaan käyttää primäärikäyttötarkoituksen ohella myös nopeaan taajuussäätöön. Koska akkujärjestelmät on suunniteltu reagoimaan nopeasti sähkönsyötön katkeamiseen, ne voivat vastata myös häiriöreservissä taajuuden ylössäätöön ja hetkellisesti nostaa kulutusta tarjoten alassäätömahdollisuuden. Tällaiset ratkaisut vakauttavat sähköverkkoa ja mahdollistavat datakeskuksille osallistumisen energiamarkkinoille kysyntäjouston keinoin (Alaperä, 2019).

Esimerkiksi Fortum ja Ericsson ovat testanneet tätä Ericssonin datakeskuksessa (Fortum, 2023), ja Microsoft hyödyntää UPS-järjestelmiä Yhdysvalloissa yhteistyössä Eaton-yhtiön kanssa parantaakseen sähköverkon vakautta ja lisätäkseen uusiutuvan energian käyttöä (Microsoft, 2023). Li-

säksi Google on ottanut käyttöön kysyntäjoustoa ja hiiliälykästä laskentaa Haminan datakeskussessaan Suomessa, mikä tukee sähköverkon tasapainottamista ja parantaa energiatehokkuutta (Google, 2023).

Vertailun vuoksi Alankomaissa on kohdattu merkittäviä haasteita datakeskusten sijoittamisen suhteen kantaverkon kapasiteettirajoitusten vuoksi. Vuonna 2022 joillakin alueilla, erityisesti Haarlemin ja Amsterdamin ympäristössä, uusien datakeskusten rakentamishankkeet jouduttiin pysäyttämään kapasiteettipulan takia. Tämä jatkuva ylikuormitus on vaikeuttanut energiaintensiivisten hankkeiden sijoittumista, ja uusia investointeja on jouduttu lykkäämään, kunnes siirtokapasiteettia saadaan vahvistettua (Netbeheer Nederland, 2024). Muun muassa tämä tilanne korostaa Suomen vahvuuksia, sillä Fingridin investoinnit kantaverkon vahvistamiseen luovat kilpailuetua ja mahdollistavat uusien datakeskusten sijoittumisen sujuvammin eri puolille maata. (Fingrid, Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033).

Datakeskusten sähköverotus ja energiatehokkuusvaatimukset Suomessa ohjaavat myös kehitystä. Vuoden 2022 alusta alkaen datakeskukset ovat olleet oikeutettuja alennettuun sähköveroluokkaan II, mikäli ne täyttävät tietyt hukkalämmön talteenottoa ja hyödyntämistä koskevat ehdot. Näihin ehtoihin kuuluu muun muassa, että datakeskuksen on hyödynnettävä hukkalämpöä vähintään 10 megawatin (MW) tehoon asti ja käytettävä vähintään 0,5 MW:n lämpötehoisia laitteistoja hukkalämmön ohjaamiseksi kaukolämpöverkkoon tai muihin hyväksytyihin käyttökohteisiin. Alennus sähköveroluokassa on merkittävä, koska ylemmän sähköveroluokan vero on 22,5 e / MWh ja alemman sähköveroluokan puolestaan 0,63 e / MWh. (Verohallinto, Sähkön veroluokat ja niiden soveltaminen, 2022.)

Tämä mahdollisuus hyödyntää hukkalämpöä laajemmin kuin pelkästään kaukolämpöverkossa lisää datakeskusten joustavuutta energiankäytössä ja vahvistaa niiden roolia paikallisessa energiataloudessa. Joskin tätä kirjallisuuskatsausta kirjoitettaessa on herännyt keskustelu datakeskusten siirtämiseksi korkeampaan veroluokkaan. Tällöin myös kannuste hukkalämmön hyödyntämiseksi poistuisi. (Valtionvarainministeriö, 2025.)

Lisäksi energiatehokkuusdirektiivi, joka tuli voimaan lokakuussa 2023, asettaa uusia velvoitteita datakeskuksille hukkalämmön talteenottoon ja hyödyntämiseen, mikäli se on teknisesti ja taloudellisesti toteutettavissa (energiatehokkuusdirektiivi 2023/1791 [EDD]). Direktiivin vaatimukset tukevat Suomen tavoitteita lisätä hukkalämmön hyödyntämistä teollisessa mittakaavassa ja voivat jatkossa edelleen kannustaa datakeskuksia sijoittumaan alueille, joissa hukkalämpöä voidaan käyttää tehokkaasti esimerkiksi kasvihuoneviljelyssä tai teollisuusprosesseissa (Energiavirasto,

2023). Direktiivi tulee saattaa voimaan kansallisessa lainsäädännössä lokakuuhun 2025 mennessä.

Kun otetaan huomioon sähköveron alennukset, uusiutuvan energian läheisyys sekä kantaverkon vahvistamiseen liittyvät investoinnit, Kajaanin ja muiden Pohjois-Suomen alueiden kilpailukyky datakeskusten sijoituspaikkana vahvistuu entisestään. Tällainen strateginen kehitys tukee kansallisia energiatehokkuus- ja päästövähennystavoitteita samalla, kun se mahdollistaa alueellisen talouden ja teollisuuden kasvun.

2.1 Datakeskusten jäähdytys ja hukkalämpö

Datakeskusten jäähdytyksen tarkoitus on varmistaa IT-laitteille optimaaliset lämpötila- ja ilman kosteuden tasot, jotta niiden toiminta olisi luotettavaa ja energiatehokasta. Datakeskusten palvelimissa komponenttien lämpötilanhallinta on kriittistä luotettavuuden ja suorituskyvyn kannalta. Viime vuosina julkaistu tutkimus on syventänyt ymmärrystä erityisesti massamuistien (HDD/SSD) ja laskentakorttien (GPU) lämpötilan sietokyvystä.

Useimpien kiintolevyvalmistajien mukaan HDD:n suositeltu pitkäaikainen maksimilämpötila on 40–45 °C. Joidenkin mukaan levyt kestävät tilapäisesti jopa 60 °C, mutta vikaantumisriski kasvaa merkittävästi yli 45 °C:ssa (Elerath & Schindler, 2020; Yang et al., 2023). SSD:t sietävät tyypillisesti jopa 70 °C, mutta NAND-muistin luotettavuus heikkenee korkeissa lämpötiloissa. Thermal throttling voi alkaa jo ennen tätä rajaa erityisesti intensiivisessä käytössä (Li et al., 2022; Park et al., 2021). Palvelintason GPU:t toimivat luotettavasti noin 85 °C:een asti. Tämän ylittyessä suorituskykyä rajoitetaan automaattisesti. Yli 90 °C lämpötilat voivat heikentää muistin luotettavuutta ja kiihdyttää elektroniikan vanhenemista (Wang et al., 2023; Huang et al., 2020).

Korkeammat käyttölämpötilat mahdollistavat datakeskusten hukkalämmön laajemman hyödyntämisen esimerkiksi kaukolämmössä tai teollisissa prosesseissa. On kuitenkin huomioitava, että palvelinlaitteiden läheisyydessä työskentely muuttuu työturvallisuuskysymykseksi, mikäli laitteiden jäähdytystehokkuuden parantamiseksi sallitaan korkeampi huonelämpötila.

Ebrahimi ym. (2014) esittivät suhteellisen kattavan tarkastelun eri jäähdytysmuodoista sekä niiden eduista ja haitoista hukkalämmön hyödyntämisen näkökulmasta. Heidän työssään käsitellään kolmea pääasiallista jäähdytysmuotoa: ilmajäähdytys, vesijäähdytys ja kaksifaasinen nestejääh-

dytys. Näistä jäähdytysmuodoista on toteutettu myös erilaisia kokeellisia variaatioita, kuten Judgen (2022) mainitsema Japanissa sijaitseva lumijäähdytteinen datakeskus. Lisäksi mm. Microsoft on panostanut erilaisten jäähdytysjärjestelmien kehitykseen ja pilotointiin – merivesi-immersiojäähdytyspilotti (Project Natick) päättyi vuonna 2021. (Datacenterdynamics, 2024.) Tämän lisäksi yhtiö patentoi vuonna 2019 korkeapainedatakeskuksen, ”joka mahdollistaa tehokkaamman lämmönsiirron”. (Datacenterdynamics, 2019)

Jäähdytysmenetelmä määrittää, millaista ja miten korkealaatuista hukkalämpöä voidaan talteen ottaa ja hyödyntää. Alla on tarkempi katsaus eri jäähdytysmenetelmiin ja niiden mahdollisuuksiin hukkalämmön talteenotossa (Taulukko 1).

TAULUKKO 1. ERI JÄÄHDYTYSTAPOJEN VAIKUTUS LÄMPÖILOIHIN. (VUORINEN 2019).

Jäähdytysmuoto	Palvelimien jäähdytysaine	Hukkalämmön talteenottoaika	Hukkalämmön lämpötila
Ilmajäähdytys	Ilma	Palautusilma palvelimien jälkeen	35 - 45 ° C
		Palautusilma ilmastointilaitteen paluupuolella	25 - 40 ° C
		Ilmastointikoneen jäähdytinneste	10 - 20 ° C
Nestejäähdytys (yksifaasinen)	Vesi	Jäähdytinväli palvelimien jälkeen	22 - 65 ° C
Nestejäähdytys (kaksifaasinen)	Jäähdytinneste	Jäähdytinneste/kaasu palvelimien jälkeen	62 - 80 ° C
		Ensisijaista jäähdytinkiertoa jäähdyttävä vesi	45 - 90 ° C

Ilmajäähdytys ja vapaajäähdytys

Ilmajäähdytys on yleisin ja perinteinen jäähdytysratkaisu, jossa palvelinhuoneen ilma kierrätetään ja siirretään poistoilmana ulos. Nykyisin todennäköisesti yleisimmin käytössä on kylmä-kuumakäytävä-konfiguraatio, jossa kylmä ilma johdetaan palvelimen etupuolelle ja kuuma ilma poistuu takakäytävältä. Tämä estää kylmän ja lämpimän ilman sekoittumisen, mikä vähentää turhaa jäähdytystä ja säästää energiaa. Hukkalämmön lämpötila on kuitenkin yleensä vain 25–45 °C, mikä rajoittaa sen hyödyntämistä.

Vapaajäähdytys hyödyntää ulkoilman viileyttä palvelinhuoneen jäähdyttämiseen ilman mekaanisia jäähdyttimiä. Tämä menetelmä on erityisen tehokas viileillä alueilla, (kuten Pohjois-Suomessa,) ja se vähentää jäähdytyksen kustannuksia huomattavasti. (Ebrahimi ym., 2014.)

Nestejäähdytys

Nestejäähdytys on tehokkaampi jäähdytysratkaisu kuin ilmajäähdytys, ja se mahdollistaa hukkalämmön talteenoton korkeammissa lämpötiloissa, mikä laajentaa hyödyntämismahdollisuuksia.

Yksivaiheinen nestejäähdytys voi olla suora tai epäsuora. Suorassa jäähdytyksessä jäähdytysneste on suorassa kosketuksessa komponentteihin, kun taas epäsuorassa lämmönsiirto tapahtuu välillisesti lämmönvaihtimen kautta. Jäähdytysveden lämpötila voi nousta jopa 65 °C:een, mikä sopii hyvin rakennusten lämmitykseen ja matalalämpöisiin teollisuusprosesseihin. (Ebrahimi ym., 2014.) Uputusjäähdytys (immersio) on yksi yksivaiheisen jäähdytyksen erikoismuodoista, jossa laitteet upotetaan suoraan lämmönsiirtonesteeseen. Tämä vähentää mekaanisten jäähdyttimien tarvetta ja tarjoaa mahdollisuuden kerätä hukkalämpöä jopa 70 °C lämpötilassa. (Ebrahimi ym., 2014.)

MinersLoopin datakeskus Seinäjoella hyödyntää immersiojäähdytystä. Siellä laitteet upotetaan lämmönjohtavaan nesteeseen, tässä tapauksessa öljyyn, jäähdytyksen tehostamiseksi. Menetelmä sopii erityisesti korkean lämpökuorman sovelluksiin, kuten kryptovaluutan louhintaan. Järjestelmän toimittaneen Calefan mukaan saadun hukkalämmön lämpötila on tällä tekniikalla noin 60 asteista. Immersiojäähdytyksen hukkalämpö kerätään talteen ja siirretään lämpöpumppujen avulla kaukolämpöverkkoon. Calefan mukaan saavutettu COP-arvo on 5, mikä parantaa lämmön hyödyntämisen energiatehokkuutta. Lisäksi kaukolämmöntuotannossa sähkökattila lisää järjestelmän joustavuutta ja tukee kaukolämmöntuotantoa huippukulutuksen aikana. (Harmaala, 2023)

Kaksifaasinen nestejäähdytys tarkoittaa jäähdytysjärjestelmää, jossa jäähdytysneste höyrystyy absorboidessaan lämpöä ja tiivistyy takaisin nesteeksi, kun lämpö poistetaan. Tämä olomuodon muutos tehostaa lämmönsiirtoa verrattuna perinteisiin yksivaiheisiin järjestelmiin, joissa neste vain lämpenee ja jäähtyy ilman höyrystymistä.

Tällaisessa jäähdytyksessä hukkalämmön lämpötila voi nousta jopa 80–90 °C:een, mikä tekee siitä hyödyllisen monille käyttökohteille. Vaikka kaksifaasinen jäähdytys on teknisesti monimutkaisempi ja ainakin toistaiseksi kalliimpi toteuttaa, sen mahdollistama tehokas lämmön talteenotto voi tuoda merkittäviä etuja.

Tällä hetkellä ei ole varmaa tietoa siitä, onko kaupallisia toimijoita, jotka käyttävät kaksifaasista jäähdystä laajamittaisesti. Ebrahimi ym. (2014) esittävät kuitenkin, että yhdistämällä kaksifaasinen jäähdytys ja vapaajäähdytys voitaisiin parantaa datakeskusten energiatehokkuutta ja tehdä hukkalämmön hyödyntämisestä kannattavampaa. (Meyer ym., 2013; Almqvist, 2017.)

Datakeskuksen sijainnin merkitys hukkalämmön hyödyntämisessä

Datakeskuksen sijainti vaikuttaa suoraan hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksiin. Sijainnin ja jäähdytysmenetelmän yhteensovittaminen voi tuottaa merkittäviä synergiaetuja. Tiiviisti rakennetut kaupunkialueet tarjoavat hyvät edellytykset hukkalämmön käytölle kiinteistöjen lämmityksessä tai kaukolämpöverkossa. Hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa on tehokas ja helppo ratkaisu. Muita suuria hukkalämmön hyödyntämissovelluksia, kuten kasvihuoneviljelyä tai kalan kiertovesikasvatusta, tilanpuute kaupunkialueilla voi rajoittaa.

Maaseutu- ja teollisuusalueilla taas on usein enemmän tilaa suurille hukkalämmön hyödyntämisratkaisuille, kuten kasvihuoneille tai teollisuuden esilämmitysprosesseille. Alueet, joilla ulkoilman keskilämpötila on matala, ovat erityisen hyviä vapaajäähdytyksen hyödyntämiseen, mikä vähentää jäähdystarvetta ja parantaa energiatehokkuutta.

2.2 Hukkalämmön potentiaali Suomessa ja Kajaanissa

Datakeskusten hukkalämpöpotentiaalia arvioitaessa joudutaan tyytymään monessa kohdin valituneeseen arvaukseen. Useimmat datakeskukset eivät avoimesti kerro esimerkiksi sähkönkulutukseen liittyvää dataa, tietoturvan tai kilpailun vuoksi. Euroopan komission delegoidun asetuksen ((EU) 2024/1364) myötä yli 500 kW datakeskusten tulee raportoida energiantarpeeseensa liittyviä tietoja EU:n yhteiseen tietokantaan. Ensimmäinen raportointi tuli tehdä vuoden 2024 loppuun mennessä vuoden 2023 tiedoista, ja tämän jälkeen aina edeltävän vuoden tiedot tulee raportoida seuraava vuoden toukokuun puoliväliin mennessä. (Energiavirasto, 2023).

Vuonna 2020 AFRY on toteuttanut selvityksen työ- ja elinkeinoministeriölle nimikkeellä ”Energiatehokkuusdirektiivin mukainen selvitys hukkalämmön potentiaalista ja kustannushyötyanalyysi tehokkaasta lämmityksestä”. Tuolloin Suomessa on ollut arviolta 50 keskikokoista (0,5–5 MW) ja alle kymmenen yli 5 MW datakeskusta.

AFRY:n arvioiden mukaan datakeskusten kokonaissähköteho oli vuonna 2020 noin 300 MW, mikä vastaa 2 TWh lämmöntuotantoa, josta suurin osa olisi hyödynnettävissä kaukolämpönä. Granlundin (2023) arvion mukaan datakeskukset kuluttivat Suomessa sähköä noin 1,9 TWh vuodessa, mikä on noin 3 % Suomen sähkönkulutuksesta.

AFRY:n ja Granlundin luvut eivät ole täysin suoraan vertailukelpoisia, sillä AFRY arvioi hetkellistä sähkötehoa ja sen muuntumista lämmöksi, kun taas Granlund tarkastelee koko vuoden sähkönkulutusta. Koska lähes kaikki datakeskusten kuluttama sähkö muuttuu lämmöksi, voidaan arvioida, että 1,9 TWh:ta valtaosa olisi hyödynnettävissä lämmöntuotantoon, kuten AFRY arvioi omissa laskelmissaan. Jos käytämme AFRY:n suhdelukua (300 MW vastaa 2 TWh lämmöntuotantoa), Granlundin ilmoittama 1,9 TWh sähkönkulutus vastaisi arviolta 217 MW keskimääräistä tehoa, joka tuottaisi noin 1,45 TWh hyödynnettävissä olevaa lämpöenergiaa. Tämä on hieman vähemmän kuin AFRY:n 2020 arvio, mutta kokoluokka on kuitenkin ymmärrettävä. On selvää, että vuoteen 2025 mennessä nämä luvut ovat kasvaneet uusien datakeskusinvestointien myötä.

Wahlroos ym. (2018) arvioi, että tulevaisuudessa datakeskusten sähkönkulutus voisi nousta jopa 5 % Suomen kokonaiskulutuksesta, mikä vastaisi noin 5 TWh:a. Maaliskuussa 2025 Granlundin liiketoimintajohtaja Jari Innanen sanoi Talouselämä -lehden haastattelussa, että tällä hetkellä datakeskusten energiankulutus koko teollisuuden käyttämästä energiasta on noin 3,6 %. Tilastokeskuksen mukaan teollisuuden ja rakentamisen sähkönkulutuksen kokonaismäärä oli vuonna 2023, jolloin viimeisin tilasto on julkaistu, 34,47 TWh. Tällöin datakeskusten 3,6 % vastaa noin 1,24 TWh vuosikulutusta. (Tilastokeskus, 2024) Tästä valtaosa olisi teknisesti hyödynnettävissä hukkalämmöksi. Wahlroosin mukaan Suomen kaukolämmön vuosittainen kulutus on noin 35 TWh. Koska datakeskusten hukkalämmön lämpötila on usein liian matala suoraan kaukolämpöverkkoon syötettäväksi, tarvitaan lämpöpumppuja nostamaan lämpötila sopivalle tasolle. Kun hukkalämpöä käsitellään lämpöpumpuilla, voidaan siitä tuottaa 7,5–8 TWh lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon. Tämä määrä vastaisi noin 20 % Suomen kaukolämmön kokonaiskulutuksesta. Lisäksi energiatehokkuusdirektiivin muutokset tuovat mukanaan tarkennuksia laskentamalleihin, mikä voi parantaa tällaisten arvioiden tarkkuutta tulevaisuudessa.

Kajaanissa datakeskusten määrä on kasvussa, mikä tarjoaa merkittävän potentiaalín hukkalämmön hyödyntämiselle. CSC:n Renforsin Rannassa ylläpitämä EuroHPC LUMI -supertietokoneen hukkalämpöteho on jo nykyisellään huomattava, maksimissaan 7 MW. Jatkossa CSC on korvaamassa kansalliset supertietokoneet (Puhti ja Mahti) uudella Roihu-supertietokoneella. Lisäksi LUMI AI Factory tulee korvaamaan nykyisen LUMI-supertietokoneen vuodesta 2028 alkaen.

Nämä investoinnit tulevat kasvattamaan olemassa olevien datakeskusten hukkalämpöpotentiaalia.

Kajaanissa hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia lisää entisestään XTX Marketsin uusi datakeskus, joka sijoittuu kahden kilometrin päähän Renforsin Rannasta. XTX Markets on aloittanut ensimmäisen vaiheen rakentamisen jonka IT-teho tulee olemaan 22,5 megawattia. Lisäksi yhtiö on tiedotteessaan ilmoittanut aikeistaan rakentaa tämän jälkeen vielä neljä vastaavaa datakeskusta – jolloin keskusten yhteenlaskettu IT-teho ylittää 110 megawattia. (XTX Markets, 2025.) Lisäksi Renforsin Rannan teollisuusalueella toimii islantilainen co-location konesalipalveluita tuottava Borealis Data Center, jonka tavoitteena on kasvattaa konesalikapasiteettiaan alkuvaiheessa 10 MW saakka, ja myöhemmin mahdollisesti vielä tästä lisää.

Renforsin Rannan datakeskusten arvioidaan tuottavan vuonna 2027 yli 50 MW ja vuonna 2030 jopa yli 200 MW hukkalämpöä. Se vastaa vuositasolla vuonna 2027 yli 450 GWh, ja vuonna 2030 lähes 1800 GWh lämpöenergiaa. On kuitenkin huomioitava, että nämä arviot kuvaavat matalalämpötilaista raakalämpöä, joka vaatii lähes poikkeuksetta lämpöpumppujen käyttöä jatkohyödyntämiseen.

Lämpöpumppujen myötä hukkalämmöstä saatava teho lisääntyy, mutta samalla niiden lämpöpumppujen vaatima sähkönkulutus on otettava huomioon. Eri lämpöpumpuilla on eri hyötysuhteet, jota kuvaa termi COP (Coefficient of performance). COP tarkoittaa lämmitysjärjestelmien yhteydessä sitä, kuinka monta kilowattituntia (kWh) lämpöä saadaan yhdellä kilowattitunnilla sähköä. Mitä korkeampi COP on, sitä energiatehokkaampi järjestelmä on. Taulukkoon 2 on laskettuna lämpöpumpulla tuotettu lämpö eri hyötysuhteilla.

TAULUKKO 2. LÄMPÖPUMPULLA HUKKALÄMMÖSTÄ (RAAKALÄMPÖ) TUOTETTAVAN LÄMMÖN MÄÄRÄ ERI LÄMPÖPUMPUN HYÖTYSUHEILLA (COP).

MW	Raakalämpö (GWh)/vuosi	COP	Lämpöpumpulla tuotettu lämpö (GWh)	Kulutettu sähköenergia (GWh)
50	438	3	657	219
50	438	4	584	146
50	438	5	547	109,5
200	1752	3	2628	876
200	1752	4	2336	584
200	1752	5	2190	438

Datakeskuksen tuottaman raakalämmön määrä voidaan arvioida sen sähkönkulutuksen perusteella, sillä IT-laitteet, jäähdytysjärjestelmät ja muut tukitoiminnot vapauttavat energiansa lopulta lämpönä ympäristöön (Oró et al., 2015). Tämä yksinkertainen ja luotettava malli tarjoaa selkeän perustan datakeskusten hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin arviointiin erityisesti lämmitysovelluksissa, kuten kaukolämmössä, teollisuuden prosesseissa ja vedenpuhdistuksessa. Yksinkertaisimmillaan datakeskuksen raakalämpö vastaa sen sähkötehoa, koska energian säilymlain mukaisesti kaikki kulutettu sähkö muuntuu lämmöksi, ellei sitä varastoida tai ohjata muihin energiankäyttökohteisiin (Patterson, 2008). Vuotuinen raakalämpöenergia (EEE) tarkoittaa sitä lämpömäärää, jonka datakeskus vapauttaa ympäristöön esimerkiksi jäähdytysjärjestelmien kautta. Koska lähes koko datakeskuksessa kulutettu sähkö muuttuu lopulta lämmöksi, voidaan koko sähkönkulutus laskea syntyvänä lämpöenergiana (raakalämpönä).

Tyypillisesti datakeskukset toimivat jatkuvasti 24 tuntia vuorokaudessa ympäri vuoden, joten käytetty aikayksikkö on 8760 tuntia vuodessa. Tämän laskentamallin perusteella 50 MW datakeskus tuottaa vuodessa noin 438 GWh lämpöenergiaa ja 200 MW datakeskus vastaavasti 1752 GWh lämpöenergiaa. Vaikka laskentamalli on suoraviivainen, joissakin tilanteissa datakeskuksen Power Usage Effectiveness (PUE) -luku ja hukkalämmön osittainen hyödyntäminen voivat vaikuttaa todelliseen lämpömäärään. PUE-luku kuvaa datakeskuksen energiatehokkuutta, ja se voidaan laskea suhteena kokonaisenergiankulutuksen ja IT-laitteiden energiankulutuksen välillä (Masanet et al., 2020). Alhaisempi PUE-arvo viittaa tehokkaampaan energiankäyttöön, mutta koska myös tukijärjestelmät vapauttavat lämpöä, kokonaisuudessaan lähes kaikki sähkö muuttuu lopulta hukkalämmöksi.

Yhteenlaskettuna Kajaanin datakeskusten hukkalämpöpotentiaali on erittäin merkittävä ja tarjoaa mahdollisuuden kattaa merkittävä osa kaupungin lämmöntarpeesta. Loiste Lämpö Oy:n kaukolämmön energiankulutus Kajaanissa on tällä hetkellä keskimäärin noin 300 GWh vuodessa ja Pölkky Oy:n puun ja sahanpurun kuivaus vaatii noin 120 GWh lämpöä vuodessa. Tuotetun hukkalämpömäärän pohjalta voidaan arvioida, että jopa 80 prosenttia Kajaanin kaukolämmön tarpeesta voitaisiin kattaa datakeskusten hukkalämmöllä.

Loiste Lämpö on kertonut julkisuuteen muuttavansa kaukolämmöntuotantoa siten, että se perustuu entistä enemmän datakeskusten hukkalämpöihin. Mukana kokonaisuudessa ovat sähkökattilat, joilla pystytään tasamaan lämmöntuotantoa ja tuottamaan lämpöä piikkikulutusten aikana. Loisteen mukaan datakeskusten hukkalämmöllä on tarkoitus kattaa yli 80 % Kajaanin kaukolämmön tarpeesta. (Yleisradio[Yle], 2024.)

Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa on merkittävässä roolissa alueen energiantuotannossa ja edistää Kajaanin siirtymistä kohti hiilineutraalia energiantuotantoa. On tärkeää huomioida, että hukkalämmön hyödyntäminen vaatii investointeja lämpöpumppeihin ja lämmönsiirtoinfrastruktuuriin.

3 Hukkalämpö lämmöntuotannossa ja varastointi

3.1 Lämmöntuotanto

Datakeskuksen hukkalämpöä voidaan yksinkertaisimmillaan hyödyntää läheisten tilojen, kuten toimistojen tai muiden datakeskukseen liittyvien rakennusten, lämmittämiseen. Tämä on mahdollista erityisesti vesikiertoisella lattialämmityksellä tai nykyään harvinaisemmalla ilmalämmitysjärjestelmällä. Matalalämpöinen hukkalämpö ei yleensä kuitenkaan suoraan riitä lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Esimerkkinä tästä toimii Seattlessa sijaitseva Amazon Spheres -kampus, jonka lasikupolit lämpenevät läheisten datakeskusten hukkalämmöllä vesikiertoisen lattialämmityksen kautta. (Jung, Jung, Choi, Jang, Park, 2022; Niva, 2021)

Kaukolämpöverkossa hukkalämpöä voidaan hyödyntää laajemmin, mutta matalalämpötilainen hukkalämpö ei sellaisenaan sovellu kaukolämpöverkkoon, jonka lämpötila on menoputkessa vuonna 2021 päivitetyn ohjeen mukaan noin 90 °C ja paluuputkessa 40–60 °C (Energiateollisuus, 2021). Lämpötilan nostamiseen käytetään yleensä lämpöpumppuja, mutta vaihtoehtoisesti se voidaan toteuttaa myös sähkökattiloilla. (Niva, 2021)

Hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuuteen vaikuttaa useita tekijöitä, kuten hukkalämmön lämpötilataso, tuotannon tasaisuus sekä sijainti suhteessa kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkon läheisyys pienentää liittymiskustannuksia, kun taas tasainen tuotanto ympäri vuoden parantaa hyödyntämismahdollisuuksia ja vähentää varatehon tarvetta. Pitkäaikainen ja luotettava hukkalämmön saatavuus on kriittistä, sillä kaukolämpötoimijat edellyttävät varmuutta energianlähteen jatkuvuudesta ennen merkittäviä investointeja. (AFRY Management Consulting, 2020)

Hintataso ja verotus voivat joko tukea tai rajoittaa hukkalämmön hyödyntämistä. Erityisesti sähkön hinta vaikuttaa lämpöpumppuratkaisujen kannattavuuteen. Jos sähkö on kallista, lämpöpumppujen käyttö voi nostaa kustannuksia liikaa, mikä tekee hukkalämmön hyödyntämisestä vähemmän houkuttelevaa. AFRY Management Consultingin raportti korostaa, että optimaalinen hukkalämmön hyödyntäminen vaatii huolellista teknistä ja taloudellista suunnittelua, sekä mahdollisten tukimekanismien huomioimista. Toisaalta viime vuosina nousussa olleet metsäenergian ja turpeen hinnat parantavat suhteellisesti lämpöpumppu- ja sähkökattilainvestointien kilpailukykyä.

Hukkalämpöjen merkitys kaukolämpöverkossa on kasvanut nopeasti. Vuonna 2015 hukkalämpö kattoi 3,3 % Suomen kaukolämmöntuotannosta, ja vuoteen 2023 mennessä osuus oli noussut 14 %:iin (Patronen & Takala, 2021; Energiateollisuus Ry). Näissä tilastoissa ei kuitenkaan eritellä datakeskusten ja muun teollisuuden hukkalämmön osuuksia.

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisestä on useita esimerkkejä Suomessa. Mäntsälässä Yandexin datakeskus tuottaa huomattavan määrän hukkalämpöä, joka ohjataan paikalliseen kaukolämpöverkkoon, mikä vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä lämmöntuotannossa. (Lampila, 2020) Espoossa Fortum ja Microsoft ovat käynnistäneet hankkeen, jossa Microsoftin datakeskusten hukkalämpöä hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa. Tavoitteena on kattaa noin 40 % Espoon, Kauniaisten ja Kirkkonummen alueiden kaukolämmön tarpeesta datakeskusten hukkalämmöllä vuoteen 2030 mennessä. (AFRY, n.d.)

Suomi on etulyöntiasemassa hukkalämpöjen hyödyntämisessä lämmitykseen, sillä Suomessa on mittava kaukolämpöverkosto – noin 16 000 km, kasvaen vuosittain noin 250–500 km. (Petersen-Dyggve, 2024). Myös muun muassa Norjassa ja Ruotsissa hukkalämpöä voidaan hyödyntää, ja hyödynnetään kaukolämpöverkostossa, esimerkiksi Tukholmassa. Tukholmassa on käynnissä Stockholm Data Parks -hanke, joka on Tukholman kaupungin, Stockholm Exergin, Ellevion ja Stokabin yhteinen projekti, jonka tavoitteena on tehdä Tukholmasta houkutteleva keskus suurille datakeskuksille, jotka hyödyntävät hukkalämpöä. Hankkeen visiona on datakeskusala, jossa yhtään lämpöä ei mene hukkaan. (Stockholmdataparks, n.d)

3.2 Hukkalämmön varastointi

Datakeskuksia on erilaisia, ja niiden tuottaman hukkalämmön määrä sekä tasaisuus vaihtelevat keskuksen tyyppin ja toiminnan mukaan. Kaupalliset pilvipalvelukeskukset, kuten Googlen ja Amazonin kaltaiset toimijat, toimivat ympäri vuorokauden ja käsittelevät suuria määriä tietoliikennettä, mikä johtaa tasaiseen ja jatkuvaan hukkalämmön tuotantoon. Yritysten omat konesalit ovat usein pienempiä ja palvelevat yrityksen sisäisiä tarpeita, jolloin niiden lämpökuorma voi olla epätasaisempaa ja riippua liiketoiminnan aktiivisuudesta. Korkean suorituskyvyn laskentakeskukset (HPC), kuten Kajaanin LUMI-supertietokone, tuottavat suuren laskentakapasiteettinsa vuoksi merkittäviä määriä hukkalämpöä, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa. Kryptovaluutan louhintakeskukset, kuten MinersLoop Seinäjoella, edustavat erityistä ryhmää, jossa jatkuva ja intensiivinen laskentateho tuottaa huomattavan määrän lämpöä.

Useat datakeskukset tuottavat hukkalämpöä tasaisesti ympäri vuoden, sillä niiden laskentatehtävät ja tietoliikennekuorma eivät riipu ulkoisista tekijöistä, kuten vuodenaajoista. Tämä jatkuva tuotanto tekee niistä merkittävän lämpöenergian lähteen. Samalla se asettaa haasteita hukkalämmön hyödyntämiselle, sillä lämmön kulutuksen ja tuotannon ajankohdat eivät aina kohtaa. Tässä tilanteessa lämmön varastointi on keskeinen ratkaisu, sillä se mahdollistaa energian käytön silloin, kun sen kysyntä on suurimmillaan. Laajamittainen lämpövarastojen käyttöönotto kuitenkin edellyttää merkittäviä investointeja ja myöskin poliittista tukea infrastruktuurin kehittämiseen.

Matalalämpöisen hukkalämmön varastointimahdollisuuksia on tutkittu viime vuosina eri teknologioiden avulla. Yksi yleisimmistä menetelmistä on tuntuvan lämmön varastointi, jossa lämpöenergia varastoidaan suoraan materiaalin, kuten veteen tai hiekkaan. Vesivarastot ovat kustannustehokkaita ja yksinkertaisia ratkaisuja, mutta niiden tehokkuus riippuu suuresti varaston koosta ja käytettävissä olevan lämpötilan vaihteluvälistä (Berilaj, 2020)

Edinburghissa tutkitaan vanhojen kaivoskuilujen käyttöä lämpövarastoina. Näihin kaivoskuiluihin johdettaisiin hukkalämpöä muun muassa yliopiston konesaleista, jätteenpolttolaitoksista ja teollisuusprosesseista. Varastoidun veden lämpötila pysyisi noin 40 °C:ssa, ja käyttöön otettaessa lämpötilaa nostettaisiin edelleen lämpöpumpuilla noin 78 °C:een, joka on Isossa-Britanniassa suositeltu keskuslämmityksen lämpötila. (Fraser-Harris ym., 2022)

Ruotsin Arlandan lentokentällä hyödynnetään Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) -järjestelmää, jossa ylimääräinen lämpö varastoidaan pohjaveteen. Kesällä jäädytyksessä syntyvä lämpö siirtyy pohjaveteen, jonka lämpötila nousee noin 15–20 °C:een. Talvella lämpö käytetään rakennusten lämmitykseen, ja kylmä vesi siirtyy takaisin varastoon odottamaan seuraavaa kesää. Järjestelmän kylmän puolen keskimääräinen lämpötila on noin 6 °C, joten sitä voidaan hyödyntää myös passiiviseen jäädytykseen kesäisin. (Hiironen, 2023)

Veden lisäksi lämpöä varastoidaan öljyyn. Öljypohjaiset lämpövarastot mahdollistavat korkeammat lämpötilat kuin vesipohjaiset varastot, jopa 300–400 °C, mikä parantaa hyötysuhdetta ja lämmönsiirtoa. Mineraali- ja synteettisten öljyjen lisäksi tutkitaan kasviöljyjen, kuten auringonkukkaöljyn, käyttöä, koska ne ovat ympäristöystävällisempiä ja niiden lämmönsiirtokykyä voidaan parantaa hiilen nanopartikkeleilla. Matalalämpötilaisten hukkalämpöjen osalta lämmön varastoinnista öljyyn voisi olla juuri lämmönsiirtokyvyn vuoksi hyötyä. (Zhao ym., 2023).

Hiekkalämpövarastot tarjoavat pitkäaikaisen ratkaisun lämpöenergian varastointiin. Suomessa Polar Night Energy on kehittänyt hiekkapohjaisen varastointiratkaisun, joka soveltuu erityisesti

lämpötilavälille 50–90 °C. Tämä menetelmä on käyttökelpoinen monissa matalalämpöisissä kohteissa. (Polar Night Energy, 2024)

Yksi kehittynyt varastointimenetelmä on latenttilämmön varastointi, jossa käytetään faasimuutosmateriaaleja (PCM = phase change materials) hyödyntäen niiden olomuodon muutokseen sitoutuvaa energiaa. Kun materiaali muuttuu esimerkiksi kiinteästä nesteeksi, se sitoo suuren määrän energiaa ilman lämpötilan muutosta. Lappeenrantaan on toteutettu Suomen ensimmäinen pilottikokoluokan latenttilämpövarasto vuonna 2020. Siellä käytetään suolapohjaista lämpöakua, jonka hyötysuhde on jopa 95 %. Suola lämmitetään 250–300 °C:een, ja sulaessaan se varastoi merkittävän määrän lämpöenergiaa, joka vapautetaan myöhemmin lämmitykseen. Lappeenrantaan ”lämpöakun odotetaan tuottavan noin 7 megawattituntia lämpöenergiaa vuorokaudessa, ja sen varastointikapasiteetti on noin 4 megawattituntia.” Kyseisen lämpövaraston kohdalla puhutaan energiamääristä, joilla pystytään tuottamaan kaukolämpöä noin 300 omakotitalolle. (Hiili-neutraalisuomi.fi, 2024)

Kemiallinen lämpövarastointi (TCHS) on yksi lupaavimmista varastointimenetelmistä, sillä se mahdollistaa lämpöenergian pitkäaikaisen varastoinnin hyvin vähäisin energiahäviöin. Tässä menetelmässä lämpö varastoidaan kemiallisten reaktioiden, kuten adsorptio- tai absorptioprosessien, avulla. Zeoliitit ja metallisuolat ovat yleisiä materiaaleja, jotka reagoivat veden kanssa sitoen tai vapauttaen lämpöä tarpeen mukaan. TCHS:lla voidaan saavuttaa korkea energiatiheys, ja se soveltuu erityisesti teollisuuteen ja rakennusten lämmitykseen, joissa tarvitaan pitkäaikaista energian varastointia ilman merkittäviä lämpöhäviöitä. (Berilaj, 2020)

Geoterminen lämpövarastointi (GSTES) tarjoaa pitkän aikavälin ratkaisun, jossa lämpöenergia varastoidaan maaperään tai kallioperään. Vaikka investointikustannukset voivat olla suuria, tämä menetelmä soveltuu hyvin kaukolämpöverkkoihin ja mahdollistaa hukkalämmön käytön ympäri vuoden.

Zhao ym. (2023) on tutkinut lämpövarastojen sovelluksia eri lämpötila-alueilla (alle 150 °C, 150–350 °C, yli 350 °C) erilaisissa käyttökohteissa, kuten rakennusten lämmityksessä, teollisuudessa ja sähköntuotannossa. Lisäksi lämpövarastojen kehitystyössä korostetaan uusien materiaalien, kuten metallihydridien ja nanomateriaalien, roolia lämmönsiirron parantamisessa ja järjestelmien tehokkuuden kasvattamisessa. Tutkimuksessa mainitaan Carnot-akut lupaavana teknologiana, joka yhdistää lämmön ja sähkön varastoinnin laajalla lämpötila-alueella. Ne tarjoavat mahdollisuuden parantaa uusiutuvan energian hyödyntämistä ja energijärjestelmien joustavuutta. (Zhao ym. 2023).

4 Sähköntuotanto, viilennys ja hybridijärjestelmät

4.1 Lämmöstä sähköä -ilmiö

Datakeskukset tuottavat merkittäviä määriä hukkalämpöä, joiden lämpötila on yleensä 30–60 °C, joskus jopa 80–90 °C. Tällaiset lämpötilat ovat liian matalia perinteisille höyryturbiineille, mutta tarjoavat mahdollisuuksia muille teknologioille, kuten Organic Rankine Cycle (ORC), Kalina-kierto ja lämpösähköiset generaattorit (TEG). Näiden teknologioiden avulla hukkalämpö voidaan muuttaa sähköksi, mikä voi parantaa datakeskuksen energiatehokkuutta ja vähentää ulkoisen sähkön tarvetta.

Lämpösähköiset generaattorit (TEG)

Lämpösähköiset generaattorit (TEG) perustuvat Seeback-ilmiöön, joka mahdollistaa suoran sähköntuotannon lämpötilaerojen avulla. Seeback-ilmiöön perustuva lämpösähköinen generaattori tuottaa sähköenergiaa kahden toisiinsa kosketuksissa olevan materiaalin välille, kun näiden välillä on lämpötilaero. Näiden eri lämpötilassa olevan kahden eri materiaalin välille syntyy sähkövirta. Lämpösähköinen generaattori muodostuu yhdestä tai useammasta tällaisesta termoparista. (Myllynen, 2022). Ilmiöön perustuvia järjestelyjä ovat Seeback -ilmiön lisäksi käänteinen Seeback -ilmiö, eli Peltier, ja Thomson -ilmiö (Olin, 2023).

Käytetyistä materiaaleista riippuen ilmiötä voidaan käyttää hyvinkin eri lämpötiloissa, 25 °C-asteesta aina yli tuhannen asteen (Celcius) lämpötiloihin. (Olin, 2023) Niiden hyötysuhde jää kuitenkin matalaksi datakeskusten tyypillisissä lämpötilaolosuhteissa, minkä vuoksi teknologia ei ole toistaiseksi kaupallisesti kilpailukykyinen. Uusien materiaalien kehitys, kuten nanokomposiitit, saattaa kuitenkin tulevaisuudessa avata uusia sovelluskohteita (Yang ym. 2018). Lämpösähköisten generaattorien teknologiaa käytetään esimerkiksi voimalaitoksissa ja ajoneuvoissa sekä sähköverkon ulkopuoliseen sähköntuotantoon. Teknologialla voi olla potentiaalia hukkalämpöjen hyödyntämisen näkökulmasta.

Organic Rankine Cycle (ORC) ja Kalina-kierto

Organic Rankine Cycle (ORC) on yksi Rankine-kierron sovellutus. Rankine-kierrossa lämmönlähteen lämpö siirtyy väliaineeseen (vesi), mikä aiheuttaa sen höyrystymisen tai kaasun muodostumisen. Höyrystynyt väliaine syötetään turbiiniin, jossa se laajenee ja tekee työtä. Turbiinin pyörivä liike liittyy generaattoriin, tuottaen sähköenergiaa. Laajentunut väliaine jäädytetään lämmönvaihtimessa, joka voi olla esimerkiksi ilmajäädytin tai vesijäädytin. Jäädytys aiheuttaa väliaineen tiivistymisen takaisin nestemäiseen muotoon. Tiivistynyt väliaine pumpataan takaisin lämmön lähteeseen aloittaakseen kierron uudelleen. Pumpaus vaatii energiaa, mutta koska prosessi on suljettu järjestelmä, vain vähän uutta väliainetta tarvitaan.

Organic Rankine Cycle (ORC) on mahdollisesti tällä hetkellä laajimmin kiinnostusta herättänyt teknologia matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntämiseen. ORC-prosessi muistuttaa perinteistä Rankine-kiertoa, mutta veden sijasta käytettävät orgaaniset nesteet parantavat hyötysuhdetta matalissa, alle sadan asteen lämpötiloissa.

ORC-prosessin väliaineena käytetään erilaisia orgaanisia yhdisteitä, kuten fluorihilivetyjä (HFC) ja aromaattisia hiilivetyjä, riippuen prosessin lämpötilavaatimuksista. Fluorihilivedyt, kuten R245fa, soveltuvat erityisesti matalalämpöisiin prosesseihin, koska niiden kiehumispiste on alhainen ja ne ovat vähemmän vaarallisia käsitellä. Sen sijaan tolueni ja bentseeni, jotka ovat aromaattisia hiilivetyjä, soveltuvat korkeampien lämpötilojen sovelluksiin, mutta ne ovat syttyviä ja vaativat huolellista turvallisuushallintaa käytössä - niiden höyryt voivat muodostaa räjähdysvaaran tietyissä olosuhteissa. Lisäksi bentseeni on tunnettu karsinogeeni, joten sen käsittely ja varastointi vaativat erityisiä turvallisuusjärjestelyjä terveys- ja ympäristöriskien minimoimiseksi. (Työterveyslaitos, n.d)

Kalina-kierto käyttää väliaineenaan ammoniakkivesiseosta, joka mahdollistaa laajemman lämpötila-alueen hyödyntämisen verrattuna ORC-prosessiin. Tämä tekee siitä erityisen sopivan matalalämpöisiin ja vaihteleviin lämpötiloihin, joissa ORC:n suorituskyky voi jäädä heikommaksi (Atashbozorg ym., 2022). Vaikka Kalina-kierron tekninen monimutkaisuus ja korkeammat investointikustannukset ovat rajoittaneet sen yleistymistä datakeskuksissa, se on osoittanut suurta potentiaalia teollisuuden hukkalämpösovelluksissa.

Kandityössä Yli-Kojola (2020) on kirjallisuuden pohjalta arvioinut ORC-prosessia ja lämpöpumpputekniikkaa datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisessä. Tässä työssä havaittiin, että lämpöpumpput ovat tehokkaampia silloin, kun hukkalämpöä hyödynnetään kaukolämpöverkkoon, kun

taas ORC-prosessin kannattavuus riippuu lähinnä sähkön hinnasta. Sanna Yli-Kojolan (2020) tutkimuksessa havaittiin, että ORC on taloudellisesti kannattava, kun sähköntuotanto ylittää 20 kilowattia ja sähkön hinta on vähintään 0,15 €/kWh (Yli-Kojola, 2020).

Hybridijärjestelmät

Hybridijärjestelmät, joissa yhdistetään useita teknologioita, tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia datakeskusten hukkalämmön tehokkaampaan hyödyntämiseen. Yksi lupaavimmista yhdistelmistä on ORC-prosessin ja lämpöpumpputeknologian integrointi. Lämpöpumppu nostaa alhaisen lämpötilan hukkalämmön korkeammalle tasolle, mikä parantaa ORC-järjestelmän hyötysuhdetta. Esimerkiksi norjalaisyhdysvaltalaisessa tutkimuksessa lämpöpumpun integrointi lisäsi ORC-järjestelmän nettotehoa 9,4 prosenttia ja talteen otetun hukkalämmön määrää 15 prosenttia (Al-Sayyab ym. 2023).

Al-Sayyabin, Mota-Babilonin ja Navarro-Esbrinin (2023) julkaisussa *Renewable and Waste Heat Applications for Heating, Cooling, and Power* käsitellään uusiutuvien energianlähteiden ja hukkalämmön hyödyntämistä energiatehokkuuden parantamiseksi sekä sähköriippuvuuden vähentämiseksi. Tutkimuksessa pyrittiin yhdistämään matalalämpötilainen hukkalämpö muiden teknologioiden kanssa. Tutkimuksessa nostetaan ORC-syklille johdettavaa lämpötilaa aurinkoavusteisilla lämpöpumpuilla (solar-assisted heat pumps), ja todettiin aurinkoenergian integroinnin parantavan järjestelmän kokonaistehokkuutta. Lisäksi julkaisussa on tutkittu ORC:n ja VCC:n (vapour compression cycle, höyrykompressiosykli) yhdistämistä, jolloin hybridijärjestelmässä ORC tuottaa hukkalämmöstä sähköä, ja VCC-prosessi käyttää jäljelle jäävää lämpöä tuottamaan jäähdytystä. Tämä parantaa kokonaistehokkuutta, koska molemmat prosessit hyödyntävät hukkalämpöä eri tavoilla. Taloudellista analyysiä järjestelmistä ei kuitenkaan ole tässä tehty (Al-Sayyab ym., 2023).

Absorptiojäähdytys voi lisätä hybridijärjestelmän potentiaalia entisestään. Matalalämpöistä hukkalämpöä voidaan käyttää viilennysenergian tuottamiseen, mikä on hyvä asia datakeskuksissa, joissa jäähdytystarve on jatkuvaa. Käytännössä hybridijärjestelmä voi jakaa saatavilla olevan hukkalämmön sähköntuotannon ja jäähdytyksen kesken, mikä optimoi energiankäytön kuormituksen ja lämpötilan mukaan. Itävallassa toteutetussa hybridijärjestelmässä datakeskuksen 60 °C hukkalämpöä käytettiin sekä ORC-prosessiin että absorptiojäähdytykseen, mikä nosti järjestelmän kokonaishyötysuhteen yli 25 prosenttiin (Al-Sayyab ym. 2023).

Taloudellisesta näkökulmasta hybridijärjestelmät voivat tarjota lyhyemmän takaisinmaksuajan, koska ne hyödyntävät hukkalämpöä laajemmin ja tehokkaammin kuin yksittäiset teknologiat. Vaikka alkuinvestointi voi olla suurempi, järjestelmän hyödyt voivat kompensoida kustannuksia nopeammin. Kylmempinä kuukausina hukkalämpö voidaan ohjata pääosin sähköntuotantoon, kun taas kesällä painopiste siirtyy jäähdytyksen tuottamiseen, mikä parantaa käyttöastetta ja vähentää energiahävikkiä (Ebrahim ym., 2014).

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen hybridijärjestelmissä avaa uusia mahdollisuuksia entistä älykkäämpien ja tehokkaampien energiaratkaisujen kehittämiseen. Jatkossa tutkimukset uusista väliaineista ja älykkäistä ohjausjärjestelmistä, sekä järjestelmän kokonaisvaltaisesta optimoinnista yhdessä datakeskuksen jäähdytyksen kanssa voivat edelleen parantaa näiden järjestelmien suorituskykyä ja lisätä niiden käyttöä osana laajempia energiakokonaisuuksia.

4.2 Hukkalämmön hyödyntäminen viilennyksessä

Datakeskusten energiankulutus kasvaa jatkuvasti, ja merkittävä osa siitä kuluu jäähdytykseen. On arvioitu, että jopa 40 % datakeskusten kokonaisenergiankulutuksesta menee jäähdytykseen (IEA, 2023). Hukkalämmön hyödyntäminen jäähdytyksessä onkin keskeinen tutkimusalue energiatehokkuuden parantamiseksi ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi ICT-alalla. Adsorptio- ja absorptiojäähdytysjärjestelmät sekä näiden erilaiset hybridijärjestelmät tarjoavat vaihtoehtoisia tapoja hyödyntää hukkalämpöä ilman merkittävää lisäsähkön kulutusta. Näiden teknologioiden käyttöä datakeskuksissa rajoittaa kuitenkin niiden hyötysuhde, investointikustannukset ja järjestelmien skaalautuvuus. Tämä osio tarkastelee teknologioiden soveltuvuutta ja kypsyyttä käytännön sovelluksissa.

Absorptiojäähdytys

Absorptiojäähdyttimet hyödyntävät lämpöenergiaa jäähdytysprosessin aikaansaamiseksi, mikä tekee niistä erityisen soveltuvia datakeskusten matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntämiseen. Valitettavasti konkreettisia, dokumentoituja esimerkkejä absorptiojäähdytyksen käytöstä datakeskuksissa on rajoitetusti saatavilla. Kuitenkin tutkimukset, kuten Amiri ym. (2021), osoittavat absorptiojäähdytyksen potentiaalin datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisessä.

Absorptiojäähdytyksen toimintaperiaate perustuu kylmäaineen ja absorboivan aineen väliseen prosessiin. Tyypillisessä absorptiojäähdyttimessä kylmäaine, kuten vesi tai ammoniakki, absorboituu liuokseen (esimerkiksi litiumbromidiin tai veteen), minkä jälkeen liuosta kuumennetaan kylmäaineen erottamiseksi. Prosessi perustuu siihen, että kylmäaine höyrystyy ja tiivistyy uudelleen, minkä seurauksena syntyy jäähdytysvaikutus (Amiri ym., 2021; Ebrahimi ym., 2015).

Tutkimukset osoittavat, että absorptiojäähdyttimet voivat toimia tehokkaasti jo 60 °C:n lämpötiloissa, mikä tekee niistä erityisen hyödyllisiä erityisesti niille nestejäähdytteisille datakeskuksille, joiden hukkalämmön lämpötila on tällä alueella (Amiri ym., 2021). Absorptiokylmäkoneiden takaisinmaksuaika on suhteellisen lyhyt, vaihdellen noin 2,6 vuodesta 2,8 vuoteen datakeskuksen koon mukaan, mikä tekee niistä houkuttelevan investoinnin datakeskusoperaattoreille, jotka pyrkivät optimoimaan energiatehokkuuttaan ja vähentämään toimintakustannuksia.

Adsorptiojäähdytys

Adsorptiojäähdyttimet edustavat toista lupaavaa teknologiaa datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisessä. Gupta & Puri (2021) tarkastelivat vastaavaa ratkaisua, jossa adsorptiokylmäkone käyttää datakeskuksen nestekiertojäähdytyksessä syntyvää hukkalämpöä ja tuottaa jäähdytettyä vettä, jota käytetään ilmakiertojäähdytettyjen palvelintelineiden viilennykseen. Tämä ratkaisu vähentää perinteisen höyrykompressorijäähdyttimen (VCC) energiankulutusta 22,5 %, mikä johtaa merkittäviin energiansäästöihin.

Toisin kuin absorptiojäähdyttimet, jotka käyttävät nestemäistä absorboivaa ainetta, adsorptiojäähdyttimet perustuvat kiinteään adsorbenttiin, kuten piigeelin tai zeoliittien, kykyyn sitoa kylmäaineen höyryä. Adsorptiojäähdyttimen jäähdytysprosessi etenee vaiheittain: ensin kylmäainehöyry adsorboituu kiinteään aineeseen, minkä jälkeen se desorboidaan lämmön avulla, mahdollistaen jäähdytysvaikutuksen syntymisen.

4.3 Hybridijärjestelmät datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämisessä

Kaskadiabsorptiojäähdytysjärjestelmät

Kaskadiabsorptiojäähdytysjärjestelmä on hybridiratkaisu, jossa absorptio- ja höyrykompressio-tekniikat yhdistetään parantamaan jäähdytystehokkuutta ja hyödyntämään hukkalämpöä tehokkaammin. Näissä järjestelmissä absorptiojäähdytys toimii ensisijaisena prosessina, joka hyödyntää datakeskusten matalalämpöistä hukkalämpöä, kun taas höyrykompressioprosessi täydentää jäähdytystä nostamalla järjestelmän kokonaistehokkuutta. Tämä yhdistelmä mahdollistaa laajemman käyttölämpötila-alueen sekä korkeamman energiatehokkuuden, mikä tekee siitä houkuttelevan ratkaisun datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisessä (Yang ym., 2018).

Hybridiset absorptiojäähdytysjärjestelmät

Hybridiset absorptiojäähdytysjärjestelmät, jotka hyödyntävät sekä aurinkoenergiaa että hukkalämpöä, ovat tehokas ratkaisu jäähdytysprosessien vakauden ja tehokkuuden parantamiseen. Qu (2024) korostaa tutkimuksessaan, että absorptiojäähdytysjärjestelmien yhdistäminen aurinkoenergiiaan voi ratkaista perinteisiin järjestelmiin liittyviä jatkuvuus- ja vakaushaasteita. Esimerkiksi Kiinassa toteutetussa pilottilaitoksessa aurinkoenergialla esilämmitetty absorptiojäähdytysjärjestelmä paransi jäähdytystehoa 18 % ja vähensi sähköntarvetta 25 % verrattuna perinteisiin järjestelmiin (Qu, 2024).

Hybridiratkaisut datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisessä tarjoavat mahdollisuuden energiatehokkuuden ja kestävyuden parantamiseen. Jatkuva tutkimus ja innovaatio hybridijärjestelmissä ovat ratkaisevassa roolissa datakeskusten kasvavan energiatarpeen hallinnassa ja kestävien käytäntöjen edistämässä.

5 Hukkalämmön hyödyntäminen biomassojen prosessoinnissa

Erilaisia biomassoja käytetään tai niitä muodostuu teollisuuden tuotteina tai sivutuotteina. Usein näitä kuivataan jossain vaiheessa prosessia, tai niiden kuivaus parantaisi energiatehokkuutta tai pienentäisi kuljetuskustannuksia.

Mikrobiologiset prosessit ovat keskeisessä roolissa monissa biojalostuksen ja jätehuollon sovelluksissa, joissa orgaaninen aines hajotetaan tai muunnetaan hyödyllisiksi lopputuotteiksi. Anaerobiset ja aerobiset mikrobit hajottavat biomassoja erilaisissa prosesseissa, kuten biokaasun tuotannossa ja jätevesien puhdistuksessa.

Datakeskusten hukkalämmöllä voi olla merkittävä rooli esimerkiksi mikrobiologisten prosessien tehostamisessa sekä biomassojen kuivaamisessa. Tässä yhteydessä asiaa tarkastellaan sahatavaran kuivauksen, biokaasun valmistuksen sekä jätevesien puhdistuksen näkökulmista.

5.1 Sahatavaran ja sahan sivutuotteiden kuivaus

Suomessa tuotettiin sahatavaraa vuonna 2022 reilut 11 miljoonaa kuutiometriä (Mutanen, 2023). Samana vuonna Suomessa oli 80 teollista sahaa (Sahateollisuus, n.d), jotka käyttivät raaka-ainettaan yli 26 miljoonaa m³ tukkipuuta, josta suurin osa kuusitukkia (reilut 14 miljoonaa m³) (Luonnonvarakeskus, 2023). Sahatavaran kokonaisvienti oli hieman yli 8,5 miljoonaa m³ ja tärkeimmät vientialueet olivat euroalue (2,6 miljoonaa m³), Aasia (2,8 miljoonaa m³) ja Afrikka (1,8 miljoonaa m³); viennin arvo vuonna 2022 oli lähes 2,6 miljardia euroa (Mutanen, 2023).

Kainuun maakunnassa tukkipuun hakkuukertymä vuonna 2022 oli hieman yli miljoona kuutiometriä (Luke, 2015). Edellä mainittujen tietojen perusteella voidaan laskea, että tästä raaka-ainemäärästä voidaan valmistaa noin 430 000 m³ sahatavaraa, jonka arvo olisi n. 130 miljoonaa euroa. Toisin sanoen sahteollisuus on taloudellisesti merkittävä ala Kainuulle ja koko maallemme.

Keskimäärin yhtä tuotettua sahatavarakuutiometriä varten tarvitaan 2,2 m³ tukkipuuta. Samalla syntyy sivutuotteina 0,7 m³ (32 %) haketta, 0,3 m³ (14 %) purua ja 0,2 m³ (9 %) kuorta – päätuotteen saanto on siis n. 45 %; tarkat lukemat vaihtelevat laitoksittain ja raaka-aineittain. Sahalla

syntyvä hake käytetään sellunvalmistuksen raaka-aineeksi. Sahanpurusta voidaan valmistaa rakennus- ja huonekalulevyjä tai pellettiä. Kuori, ja usein myös ainakin osa purusta, poltetaan energiaksi. (Puuteollisuus, 2023).

Tuoreen puun kosteuspitoisuus on 50–60 %, kaupallisen sahatavaran 20 % ja pelletin 8-10 % (Alakangas ym., 2016, 259; Puuinfo, 2020). Nämä luvut tarkoittavat, että sahalla puuta ja mahdollisesti myös muita sivutuotteita on kuivattava. Sahahaketta ei kuivata, vaan se kaupataan sellutehtaalle sellaisenaan.

Teollisilla sahoilla sahatavaran kuivaus tehdään koneellisesti. Normaalissa ilmanpaineessa tapahtuvassa kuivauksessa kuivausilman lämpötila on 50–130 °C (Hajian ym., 2024; Puuproffa, n.d), käytetyn menetelmän mukaan. Sivutuotteiden kuivaamiseen on monia erilaisia tekniikoita, joita Stenström (2017) kuvaa katsausartikkelissaan. Samaa aihepiiriä käsitellään myös Holmbergin ja Stenströmin (2014) artikkelissa, jossa esitetään myös esimerkkejä erilaisista teollisista prosessikokonaisuuksista kuoren kuivaamiseen liittyen. Kuivurit, joissa lämmitetty ilma kulkee hake- tai purukerroksen läpi, voivat hyödyntää matalalämpötilaista ($T < 90$ °C) hukkalämpöä. Kuivattavan biomassan kerros voi olla staattinen tai sitten liikkua esimerkiksi ilmavirran vaikutuksesta (*fixed/static bed, moving bed*). Koska lämpötila on matala, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä höyrystyy vain vähän, mikä pienentää tulipalojen riskiä.

Datakeskusten hukkalämmön käyttämisestä kuivausprosesseihin sahoilla ei löydy tieteellistä kirjallisuutta. Jo aiemmin mainitussa Vesterlundin ym. (2019) raportissa kerrotaan puuhakkeen kuivauskokeista, joissa käytettiin datakeskuksen hukkalämpöä, mutta esitetyt tulokset ovat koeasetelman puutteiden takia varsin epätarkkoja. Datacenter Forum -sivustolla olevassa uutisessa (2021) on hyvin lyhyt maininta norjalaisesta hankkeesta, jossa datakeskuksen hukkalämpöä on hyödynnetty puutavaran kuivaukseen; tarkemmat tiedot puuttuvat. UPM Timber ilmoittaa sivustollaan (2023), että yrityksen Korkeakosken saha tehostaa energiankäyttöään hukkalämpöä hyödyntävällä lämpöpumpulla. Vaikka uutisen mukaan hukkalämpö on peräisin sahan omista prosesseista, tämä esimerkki osoittaa, että suhteellisen alhaisen lämpötilan (52–60 °C) hukkalämpöä voidaan hyödyntää kannattavasti sahatavaran kuivaukseen.

Kuten aiemmin mainittiin, sahoilla poltetaan sivutuotteita, mistä saadaan kuivaukseen tarvittava lämpöenergia. Sahojen tärkein polttoaine on puunkuori, jonka kosteuspitoisuus voi olla varsin korkea (Alakangas ym., 2016), minkä vuoksi polttoprosessin energiatehokkuus on heikko (Nummelin ym., 2014). Yksi vaihtoehto sahoilla olisikin kuivata kuorta hukkalämmöllä ennen sen polttoa, jolloin energiatehokkuus paranisi.

Tämän lisäksi kuoren jatkojalostus kuumavesiuuton avulla olisi varsin yksinkertainen menetelmä, jolla saataisiin talteen arvokkaita yhdisteitä, kuten tanniineja. (Ding ym., 2017; Jyske ym., 2023; Rasi ym., 2019; Varila ym., 2020.) Tanniineilla on antibakteerisia ja -viraalisia ominaisuuksia ja niitä voidaan hyödyntää myös mm. nahan parkitsemiseen, liiman ja sideaineiden sekä vaahtotuotteiden valmistamiseen ja lisäksi myös elintarvike- ja juomateollisuuden lisäaineina (Feng et al., 2013; Fraga-Corral ym., 2020; Jablonsky ym., 2017; Shirm, 2019; Shirmohammadli ym., 2018). Kuumavesiuuton jälkeen kiinteää kuorijätettä olisi jäljellä vielä yli 90 % alkuperäisestä kuorimateriaalin kuiva-aineesta (Ding ym., 2017). Tämä jäte olisi käytettävissä joko polttoaineeksi tai sitten arvokkaiden tuotteiden valmistamiseen erilaisilla jatkojalostusprosesseilla (Rasi ym., 2019).

5.2 Biokaasun tuotanto ja mädätteen kuivaus

Biokaasua tuotetaan anaerobisessa, eli hapettomassa, prosessissa mikro-organismeille otollisessa lämpötilassa: mesofiilisen prosessin lämpötila-alue on 30–42 °C, kun taas termofiilinen prosessi toimii korkeammissa lämpötiloissa (43–55 °C). Raaka-aineena biokaasuprosessissa voidaan käyttää erilaisia maatalouden ja teollisuuden sivuvirtoja, kuten elintarvikejätettä, jätevetä, karjanlantaa, puhdistamolietettä, olkea sekä muuta maatalouden kasvibiomassaa (Issah ym., 2020; Kymäläinen & Pakarinen, 2015; Luostarinen ym., 2016). Raaka-aineista puhdistamolietteet ovat ongelmallisia: ne voivat sisältää raskasmetalleja, muita haitallisia kemikaaleja ja materiaaleja sekä ihmisperäisiä taudinaiheuttajia (Vieno ym., 2018), eikä näitä kaikkia haitta-aineita saada poistettua biokaasuprosessissa.

Yleisimmin käytetyssä biokaasuteknologiassa, märkäprosessissa, raaka-aineen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti varsin alhainen (5–12 %). Raaka-aineliete pumpataan reaktoriin, jossa organisesta aineksestä alkaa muodostua mikrobien toiminnan vaikutuksesta biokaasua. Muodostunut raakakaasu erotetaan lietteestä ja jalostetaan puhtaaksi metaaniksi (CH₄) poistamalla hiilidioksidi (CO₂) ja muut epäpuhtaudet (mm. vesihöyry sekä pieni määrä haihtuvia rikki- ja typpiyhdisteitä). Puhdistettu metaani voidaan polttaa lämmöksi ja sähköksi CHP-laitoksessa (*Combined Heat and Power*), tai sitten metaani markkinoidaan ulkopuolisille toimijoille esimerkiksi liikennepolttoaineeksi. (Kymäläinen & Pakarinen, 2015; Luostarinen ym., 2016.)

Biokaasun muodostuessa raaka-ainelietteen orgaaninen aines hajoaa, mikä muuttaa lietteen koostumusta: sen kuiva-ainepitoisuus ja happamuus pienenevät, ravinteet (mm. typpiyhdisteet)

muuttuvat liukoisempaan muotoon ja liete muuttuu myös fyysisiltä ominaisuuksiltaan homogeenisemmäksi. Biokaasuprosessissa muodostuva liete, eli mädäte, onkin ravinteiden koostumuksen ja levitettävyyden perusteella parempaa lannoitetta pelloille kuin esimerkiksi prosessin raaka-aineena usein käytettävä lietelanta. (Kymäläinen & Pakarinen, 2015)

Biokaasuprosessi on tyypillisesti jatkuvatoiminen ja raaka-aineen keskimääräinen viipymä mesofiilisessä reaktorissa on normaalisti 20–40 vuorokautta – termofiilisessä prosessissa viipymä voi olla monia vuorokausia lyhyempi. Kirjallisuuden mukaan (Issah ym., 2020; Kymäläinen & Pakarinen, 2015) nopeuden lisäksi termofiilisen prosessin etuna on myös mesofiiliseen prosessiin verrattuna suurempi metaanisaanto. Tästä huolimatta esitettyjen esimerkkien perusteella Suomessa käytettävät biokaasureaktorit ovat valtaosin mesofiilisiä (Luostarinen, 2013; Luostarinen ym., 2016, 2023; Marttinen ym., 2015). Yksi tärkeä syy tähän lienee, että termofiilinen prosessi on mesofiilistä häiriöalttiimpi (Kymäläinen & Pakarinen, 2015; Luostarinen, 2013).

Koska mesofiilisen prosessin lämpötila on useimmiten korkeampi kuin suomalaisen ulkoilman, on reaktoria lämmitettävä prosessin aikana. Lisäksi energiaa tarvitaan reaktorin sekoittamiseen, joka takaa tasaiset reaktio-olosuhteet sekä kaasun tasaisen erottumisen. Pienillä, esimerkiksi maatilamittakaavan biokaasulaitoksilla (syötteen määrä korkeintaan tuhansia tonneja vuodessa) (Luostarinen, 2013), lämmityksen ja sekoituksen vaatima energia saadaan metaania polttavalta CHP-laitokselta (Kymäläinen & Pakarinen, 2015). Pienillä biokaasulaitoksilla mädäte useimmiten levitetään pelloille sellaisenaan, joten energiaa ei kulu mädätteen kuivaamiseen.

Mädätteen jalostaminen kierrätyslannoitteiksi

Kun biokaasulaitoksen koko on teollista mittaluokkaa (syötteen määrä yli satatuhatta tonnia vuodessa) (Marttinen ym., 2015), mädätteen jatkojalostaminen on usein kannattavaa. Tämä tarkoittaa yleensä kierrätyslannoitteen valmistusta (Luostarinen ym., 2023). Mädätteestä poistetaan vettä ja yleensä se myös pelletoidään varastoinnin ja loppukäytön helpottamiseksi. Vesi poistetaan mekaanisesti ja termisesti, esimerkiksi käyttämällä linkoamista tai suodattamista kuivajakeen erottamiseksi sekä haihduttamalla vettä kuivajakeesta; karkeasti sanottuna kuivajakeeseen päätyy suurin osa fosforipitoisista kasviravinteista, kun taas erotetussa nesteessä on pääasiassa typpiravinteita. (Kymäläinen & Pakarinen, 2015)

Nestefaasin sisältämää ammoniakkia (NH_3) voidaan ottaa talteen strippaamalla (Kymäläinen & Pakarinen, 2015). Tämä perustuu pH:n ja lämpötilan nostamiseen niin, että ammoniakki siirtyy

nestefaasista kaasufaasiin. Kaasufaasi johdetaan kaasupesuriin, jossa ammoniakki liuotetaan esimerkiksi rikkihappoon, jolloin syntyy ammoniumsulfaattiliuosta ((NH₄)₂SO₄). Kuivajakeen jalostaminen lannoitteeksi puolestaan tapahtuu termisesti kuivaamalla lämmön, ilmavirran tai säteilyn avulla. (Salamat ym., 2022.) Tyypillisesti energiankulutus näillä tekniikoilla on 0,7–1 MWh yhtä haihdutettua vesitonnia kohti (Awiszus ym., 2018; Pöyry Finland Oy, 2019; Spinosa ym., 2011), ja kuivaus ennen pelletöintiä tehdään vähintään 90 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Kun käytetään riittävän korkeaa lämpötilaa ja tarpeeksi pitkää kuivausaikaa, kuivajae myös hygienisoituu (Kymäläinen & Pakarinen, 2015), eli siinä mahdollisesti olevat taudinaiheuttajat tuhoutuvat. Kuivana tuotteenä pellettien kuljetus on halvempaa kuin kostean kuivajakeen, ja pelletit kestävät myös pidempiaikaista varastointia kuin kosteat tuotteet.

Kuten yllä olevasta selviää, biokaasun ja kierrätyslannoitteiden tuotanto vaatii lämpöenergiaa. Biokaasureaktorin lämpötilat ovat mesofiilisessä prosessissa varsin maltillisia (30–42 °C), mikä tarkoittaa, että datakeskusten hukkalämpöä voisi todennäköisesti joissakin tapauksissa käyttää biokaasureaktorin lämmitykseen sellaisenaan. Mädätteen termisen kuivauksen lämpötilat ovat puolestaan sen verran korkeita (70–180 °C), että datakeskuksen hukkalämmön lämpötilaa on pakko nostaa lämpöpumpulla. Biokaasun tuotanto on jatkuvatoiminen prosessi, mikä tarkoittaa, että lämmöntarvekin on jatkuvaa eikä vuodenaikaisvaihteluun ole suurta.

Suomessa tuotetun biokaasun energiasisältö vuonna 2019 oli 1 TWh ja tuotantoa halutaan lisätä vähintään nelinkertaiseksi vuoteen 2030 mennessä (Virolainen-Hynna, 2020). Tällä hetkellä orgaanisiin kierrätyslannoiteisiin tai maanparannusaineisiin käytetään vain noin kymmenesosa Suomessa syntyvistä ravinnerikkaista jätteistä, mutta tätä määrää pyritään lisäämään lähivuosina (Ravinnekierto, n.d). Jos nämä pyrkimykset toteutuvat, niin lämpöenergian tarve biokaasun tuotannossa lisääntyy. Tällä hetkellä osa tuotetusta biokaasusta poltetaan prosessien tarvitsemaksi lämpöenergiaksi. Jos metaanin polttamisen sijaan biokaasuprosessiin ja mädätteen jatkojalostamiseen käytettäisiin datakeskuksista saatavaa lämpöenergiaa, metaania jäisi enemmän markkinoitavaksi biokaasulaitosten ulkopuolelle.

Kirjallisuutta datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisestä biokaasun tuotannossa löytyy todella vähän. Digital Infra Network -sivuston blogikirjoituksessa raportoidaan tällaisesta yhteistyöstä Irlannissa. Myös norjalainen Green Mountain -datakeskusyritys visioi teollisesta symbioosista, jossa yhtenä datakeskusten hukkalämmön hyödyntäjänä olisi biokaasua valmistava laitos. (Atle Hagaseth, 2021). Tämän perusteella vaikuttaa siis siltä, että datakeskusten hukkalämpöä hyödynnetään tällä hetkellä maailmassa todella vähän biometaanin valmistuksessa.

5.3 Hukkalämmön hyödyntäminen jätevedenpuhdistuksessa

Jätevedenpuhdistaminen perustuu pitkälti erilaisiin mikrobiologisiin prosesseihin. Näiden prosessien tehokkuus riippuu lämpötilasta. Etenkin typenpoiston tehokkuus on vahvasti lämpötilariippuvainen, ja se hidastuu merkittävästi lämpötilan laskiessa alle 12 asteeseen. Jätevesien lämpötila esimerkiksi Kajaanin Veden Peuraniemen puhdistamolla vaihtelee kuuden ja 14 asteen välillä ja on yli 12 astetta vain kolmen kuukauden ajan vuodessa, vuonna 2016 annetun ympäristöluvan mukaan. (Aluehallintovirasto, 2016.)

Typenpoiston optimilämpötila on noin 20–32 °C. Tällä hetkellä kaikilla suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla ei ole vaatimusta typenpoistosta johtuen jätevedenpuhdistamon koosta, jäteveden lämpötilasta ja/tai vastaanottavan vesistön rehevöitymisalttiudesta ja sen minimiravinteesta. Esimerkiksi Kajaanin Veden jätevedenpuhdistamolla ei ole typenpoistovaatimusta. Puhdistetut jätevedet päätyvät Kajaaninjoesta Oulujärveen, jonka rehevöitymistä rajoittavan ravinteen on todettu olevan fosfori. Osa typestä poistuu nykyisessäkin prosessissa, ja esimerkiksi kokonaistypen osalta vuosien 2014–2024 puhdistusteho vaihteli 14–24 %. (Kajaanin Vesi 2025.)

Typenpoistovaatimus on tulossa myös pienemmille jätevedenpuhdistamoille EU:n yhdyskuntajätevesidirektiivin päivityksen myötä. Yli 150 000 asukasvastineluvultaan (avl) olevista jätevedenpuhdistamoista kaikkien tulee poistaa 80 % typestä (tai typpipitoisuus olla alle 8 mg /l) vuoden 2039 loppuun mennessä. 10 000–15 000 avl laitosten, joiden purkuvesistö on rehevöitymisaltis, tulee poistaa 80 % typestä tai typpipitoisuuden olla alle 10 mg /l. Sääntely on porrastettu seuraavasti: vuoden 2033 loppuun mennessä 20 % taajamista, vuoden 2036 loppuun mennessä 40 % taajamista, vuoden 2039 loppuun mennessä 60 % taajamista ja vuoden 2045 loppuun mennessä 100 % taajamista. (Vesilaitosyhdistys, 2024.)

Oulun yliopisto tutkii KAVENERO-nimisessä hankkeessa lämmön vaikutusta jätevesien puhdistuksen tehokkuuteen. Hankkeessa tehdään simulointi Oulun tilanteeseen ja hankkeessa ovat mukana myös Oulun Vesi sekä Oulun Energia. (Oulun yliopisto, 2024) KAVENERO-hankkeessa mallinetaan myös alustavasti tilannetta Kajaaniin – arvioiden lämpö määrän tarvetta typenpoiston tehostamiseksi ja mahdollisesti myöhemmin lämmön vaikutusta typenpoiston investointi- ja ope- rointikustannuksiin.

Toinen mahdollisuus hukkalämmön hyödyntämiseksi jätevedenpuhdistamon toimintaan liittyen olisi lietteen kuivaaminen. Riippuen lietteen jatkokäsittelystä se voi olla hyvinkin mahdollista ja järkevää.

6 Hukkalämmön hyödyntäminen ruoantuotannossa

Ruoantuotannon kestävyden parantamiselle on jatkuvasti yhä suurempi tarve, sillä ilmastonmuutos, luonnonvarojen ehtyminen ja väestönkasvu lisäävät painetta ruokajärjestelmille. Toisaalta ruoantuotannon energiatehokkuutta parantamalla voitaisiin vähentää sen ympäristövaikutuksia ja parantaa tuotannon kannattavuutta. Kannattavuuteen vaikuttavat myös muun muassa kasvatettavan lajin biologia, lämpötila sekä kasvatusmenetelmät. Useimmat viljeltävät lajit hyötyvät korkeammasta ilman tai veden lämpötilasta. Jo verrattain pieni lämpötilan nousu kasvatusolosuhteissa voi parantaa tuotannon tehokkuutta merkittävästi, minkä vuoksi matalalämpöinen hukkalämpö on lähtökohtaisesti helposti hyödynnettävissä useimmille viljeltäville lajeille. Teollisuuden hukkalämpöä onkin käytetty jo 1970-luvulta alkaen mm. maataloudessa ja vesiviljelyssä.

Datakeskusten tuottaman hukkalämmön hyödyntäminen esimerkiksi lämpöä vaativissa kasvinviljelyolosuhteissa ja kalojen kierto-vesiviljelyssä voisi merkittävästi vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja parantaa ruoantuotannon kestävyttä. Vaikka suunnitelmia datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseksi ruoantuotantoon on laadittu verrattain paljon, niiden käytännön toteutus on jäänyt vielä vähäiseksi datakeskusten alati kasvaneeseen määrään nähden. Haasteina voivat olla korkeat investointikustannukset, tekniset rajoitteet sekä hukkalämmön sijainnin ja tarvittavan infrastruktuurin yhteensopivuus.

Ruoantuotannon ohella myös ns. ”non-food”-tuotannossa, joissa hyödynnetään kasvihuoneita, sisäviljelytekniikoita tai suljettuja vesiviljelyjärjestelmiä, voitaisiin hyödyntää datakeskusten hukkalämpöä. Non-food-viljelyllä ja -eläintuotannolla tarkoitetaan kasvien, sienten ja eläinten kasvatusta muuhun kuin ihmisten elintarvikekäyttöön, kuten eläinrehujen, biopolttoaineiden, lääketieteellisuuden raaka-aineiden, tekstiilien, biomuovien ja koristekasvien tuotantoon.

6.1 Hukkalämpö kasvien ja sienten tuotannossa

Kasvien ja sienten kasvatusta sisätiloissa mahdollistaa optimoidut olosuhteet (valaistus, lämpötila, kosteus ja ravinteet) tehokkaan ja ympäristöystävällisen tuotannon saavuttamiseksi. Kasvihuoneiden ja sienikasvattamoiden etuina ovat myös ympärivuotinen tuotanto, vähäinen vedenkulutus ja torjunta-aineiden tarpeen väheneminen.

Hukkalämpöä, kuten datakeskusten ja teollisuuslaitosten ylijäämälämpöä, hyödyntämällä voitaisiin parantaa sisäviljelyjärjestelmien energiatehokkuutta. Hukkalämmön avulla voidaan ylläpitää sopivia kasvuolosuhteita ja vähentää lämmityskustannuksia sekä fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

6.1.1 Kasvihuoneet

Vuonna 2023 Suomessa oli kasvihuoneviljelyalaa 350 ha ja kasvihuoneyrityksiä 744 kpl (SVT 2023). Kasvihuonevihanneksia viljeltiin 195,6 ha, ruukkuvihanneksia 28,3 ha, koristekasveja 105,7 ha, taimia ja pistokkaita 12,8 ha ja marjoja 7,6 ha. Suurimmat kasvihuonealat sijoittuvat Pohjanmaan, Varsinais-Suomen, Satakunnan, Uudenmaan ja Etelä-Pohjanmaan maakuntiin.

Vuonna 2023 Kainuussa oli kasvihuoneviljelyalaa 1,7 ha (0,5 % Suomen kokonaisalasta) ja kasvihuoneyrityksiä 9 kpl (1 % Suomen kokonaisuudesta). Kainuussa viljeltiin kasvihuonevihanneksia 1 yrityksessä, ruukkuvihanneksia 1 yrityksessä, koristekasveja 6 yrityksessä, taimia ja pistokkaita 1 yrityksessä. Kasvihuoneissa viljeltiin koristekasveja 0,6 ha, mutta muiden kasvihuonetuotteiden tarkkoja viljelypinta-aloja tai satotietoja ei kerrota tietoturvasyistä. Kainuussa koristekasvien viljely kasvihuoneissa painottuu ryhmäkasvien (esim. orvokki, pelargoni, petunia, samettikukka, lobelia), kukkivien ruukkukasvien (esim. pauliinabegonia) ja amppeleiden tuottamiseen. Niitä voidaan viljellä kasvihuoneessa ilman lisävaloa. Kainuussa viljellään kasvihuonevihanneksista tomaattia ja ruukkuvihanneksista salaattia, persiljaa ja tilliä. Suomessa ruukkuvihannestuotanto on yleensä ympärivuotista, joten tuotannossa tarvitaan lisävalotusta. Myös tomaattia ja kasvihuonekurkkua viljellään usein ympärivuotisesti. Kainuun kasvihuoneyrityksissä ei vuoden 2023 Puutarhatilaston mukaan viljelty kasvihuonekurkkua tai paprikaa.

Kasvihuonetuotteiden tuonti ja kotimainen tuotanto

Maataloustuotteiden ja elintarvikkeiden ulkomaankaupan Suomen virallisen tilaston tietojen mukaan Suomeen tuodaan kasvihuoneessa viljeltävistä vihanneksista eniten tomaatteja, salaatteja ja sikureita ja paprikoita (taulukko 3). Marjoista tuodaan eniten vadelmia ja mansikoita. Marjojen tuonti ajoittuu todennäköisesti avomaan tuotantokauden ulkopuolelle. Niitä viljellään Suomessa myös tunneleissa ja kasvihuoneissa. Sienten ja uusien perunoiden tuontimäärät ovat kasvihuonevihanneksiin ja marjoihin verrattuna pieniä.

TAULUKKO 3. ELINTARVIKKEIDEN TUONTIMÄÄRIÄ SUOMEEN VUOSINA 2019 - 2023 (1000 KG)

Vuosi	Tomaatit	Kurkut	Paprikat	Salaatit ja siku- rit	Mansi- kat tuo- reet	Vadelmat tuoreet	Sienet	Uudet perunat
2019	26 800	6 800	16 300	25 600	2 900	1 100	2 300	1 600
2020	26 000	3 700	16 700	23 100	2 800	1 300	2 300	1 100
2021	25 300	4 100	16 400	24 000	2 800	1 400	2 000	1 000
2022	24 500	6 100	15 200	24 000	3 400	1 700	1 900	1 400
2023	23 300	5 900	14 700	24 000	3 200	1 600	2 100	1 400
Kes- kiarvo	25 200	5 300	15 900	24 100	3 000	1 400	2 100	1 300

Suomen virallisen tilaston puutarhatilastojen mukaan tomaattia tuotetaan Suomessa enemmän kuin kurkkua (taulukko 4). Tomaatin tuotantomäärässä on mukana myös erikoistomaatit (esim. terttu-, kirsikka- ja luumutomaatit), joiden tuotantomäärät ovat viime vuosina kasvaneet tavanomaisen pyöreän tomaatin kustannuksella. Erikoistomaatteja tuotetaan noin 15 % koko tomaattisadosta.

Kurkun tuotantomäärässä on mukana myös kasvihuoneessa viljelty avomaankurkku. Avomaankurkkua tuotetaan noin 1 % koko kurkkusadosta. Keräsalaattituotanto sisältää kasvihuoneiden tuottamat pehmeä- ja rapeakeräsalaatit. Rapeakeräsalaattia tuotetaan enintään 1 % koko keräsalaattituotannosta. Suomessa yleinen ruukkusalaatin tuotanto tilastoidaan vain kappalemääräisesti, joten ne eivät ole keräsalaatin tuotantomäärätaulukossa mukana. Mansikkaa tuotetaan avomaalla ja kasvihuoneessa. Kasvihuonetuotannon osuus on ollut noin 1 % verran kokonaisuudesta. Vadelmaa tuotetaan lähinnä avomaalla. Puutarhatilastoissa vadelman kasvihuonetuotanto on sen verran pientä, että se sisältyy muut marjat -otsakkeen alle.

TAULUKKO 4. KASVISTEN TUOTANTOMÄÄRIÄ SUOMESSA VUOSINA 2019 - 2023 (1000 KG)

	Tomaatit	Kurkut	Paprikat	Keräsalaatit	Mansikat	Vadelmat
2019	46 100	49 000	1 000	3 100	17 800	1 300
2020	47 500	54 800	1 200	2 900	15 200	1 300
2021	45 400	53 700	1 100	3 300	16 200	1 500
2022	41 300	50 700	1 400	2 400	15 900	1 500
2023	39 900	51 100	1 600	3 300	13 700	1 400
Keskiarvo	44 000	51 800	1 300	3 000	15 700	1 400

Suomessa omavaraisuudesta on tehty laskelmia tärkeimmistä ravintokasveista. Vuonna 2023 Suomen omavaraisuus kurkuista oli 94 % ja tomaateista 59 % (Ruokatieto 2024). Tomaattien omavaraisuus on viime vuosina laskenut, koska kuluttajat ostavat aiempaa enemmän erikoistomaatteja tavanomaisten tomaattilajikkeiden sijaan. Tomaattien, salaattien, paprikan ja kurkun kotimaista tuotantoa voisi vielä lisätä paremmin kysyntää vastaavaksi. Tuontitilastojen mukaan näillä tuotteilla on ollut kysyntää. Kotimaisten tuotteiden laatu ja hinta pitää vain saada kuluttajan hyväksymälle tasolle.

Kasvihuoneiden energiankulutus Suomessa

Vuonna 2021 kasvihuoneyritykset kuluttivat energiaa 1706 GWh (SVT 2021). Kulustietoja kerättiin 541 yrityksen sähköenergian, uusiutumattoman energian, turpeen, puu- ja peltoenergian ja ostetun lämpöenergian käytöstä. Sähköä kului eniten lämmitykseen, 619 GWh. Yleisin lämmityspolttoaine oli metsähake 311 GWh. Muista yrityksistä lämpöä (myös hukkalämpöä) ostavat kasvihuoneyritykset ovat mukana energiakulutustiedoissa ostetun lämpöenergian käyttäjinä.

Lämpöä ostavien kasvihuoneyritysten määrä on pysynyt ajanjakson 2011–2021 aikana lähes vakiona (50-53 kpl), mutta vuosittaiset ostomäärät ovat vaihdelleet. Vuonna 2021 ostoenergiaa kului 274 GWh. Ajanjakson 2011–2021 aikana sähkön sekä puu- ja peltoenergian määrät ovat kasvaneet, kun taas turpeen ja uusiutumattomien lämmön lähteiden määrät ovat vähentyneet.

Kasvihuoneiden sähkönkulutusta on lisännyt kasvien lisävalotuksen yleistymisen kasvihuoneyritysten siirtyessä kausiviljelystä ympärivuotiseen tuotantoon. Kausiviljelyssä kasvihuoneessa viljellään auringon luontaisen valon avulla helmikuun puolivälistä syyskuun loppuun. Lokakuun ja helmikuun puolivälin välisenä aikana auringon valo ei riitä kasvihuoneessa kasvien nettokasvuun.

Ympäri vuotisessa tuotannossa kasveille annetaan niukan auringonvalon lisäksi yhteyttämiskelpoista valoa suurpainenaatrium- tai LED-valaisimilla. Kasvihuonevalaisimet tuottavat yhteyttämisen lisäksi myös lämpöä, jota voidaan hyödyntää kasvihuoneen lämmityksessä.

Hukkalämpö kasvihuoneen lämmönlähteenä

Hukkalämpöä on tarjolla kasvihuoneille etenkin sähköä tuottavien CHP-laitoksien jäähdytysvedessä (Hanan 1998). Pääongelma hukkalämmön hyödyntämisessä on jäähdytysveden vaihteleva ja alhainen lämpötila ja se, että hukkalämmön tuotantopaikka ei ole kasvihuoneen toiminnan kannalta suotuisa. Tarjolla olevan lämmitysveden lämpötila voi vaihdella riippuen hukkalämpöä tuottavan laitoksen kuormituksesta.

Sähkön tuottajan pitäisi tuottaa sähköverkkoon perusvoimaa eikä tehuippuja. Hukkalämpöä tuottavan laitoksen ja kasvihuoneyrityksen pitää sijaita lähellä toisiaan, sillä lämmitysvesi täytyy aina pumpata hukkalämmön tuottajalta kasvihuoneelle ja takaisin. Tämä aiheuttaa lämpöhukkaa ja kustannuksia. Hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuutta laskettaessa on tiedettävä hukkalämmöntuottajan ja kasvihuonelaitoksien välinen etäisyys, ilmasto-olot, sähkön hinta, maan hinta ja etäisyys kasvihuonetuotteiden markkinoille. Lämmön tuottajan pitäisi taata vakaa lämpövirtaus vähintään kymmeneksi vuodeksi.

Stanghellin ym. (2019) mukaan kasvihuoneissa hyödynnetään usein voimalaitoksista saatavaa 80 °C lämpötilan vettä, joka pitää saada jäähtymään 25–40 °C lämpötilaan ennen sen palautusta voimalaitoksen jäähdytykseen. Hukkalämmön tuotanto, lämmön siirto ja lämmön tarve on mitoitettava oikein keskenään. Hukkalämmön hyödyntäjän maksimi investointikustannus sisältää kasvihuoneen lämmitysjärjestelmän kiinteät ja muuttuvat kustannukset lämpöyksikköä kohti (€ / MWh).

Hukkalämpöä hyödyntävät kasvihuoneet

Suomessa Honkatarhat Oy hyödyntää Honkajoki Oy:n eläinperäisten jätteiden käsittelylaitoksen hukkalämpöä ruukkusalaatin tuotantoon. Ikaalisissa Ikaalisten luomu hyödyntää Leppäkosken Lämpö Oy:n kaukolämpövoimalan savukaasupesurin hukkalämpöä tomaatin, ruukkusalaatin ja -

yrttien tuotantoon. Seinäjoella Taivalmaan Puutarha hyödyntää Neova Oy:n pellettitehtaan hukkalämpöä tomaatin tuotantoon. Suomessa hukkalämpöä hyödynnetään siis ainakin 9 ha kasvihuonepinta-alalla.

Ruotsin Lindesbergissä Billerud-kartonkitehtaan tuottamaa hukkalämpöä alkoi vuonna 2024 hyödyntää kasvihuoneviljelmä (WA3RM Regenergy Frövi, n.d). Tämän alankomaalaislähtöisen Food Ventures-kasvihuoneyrityksen (10 ha) tuottama ympärivuotinen tomaattisato markkinoidaan ICA- ja Coop-myymälöissä.

Ruotsin Gällivaressa Gällivare Energi-yrityksen ja LKAB Hybrit -terästehtaan hukkalämpöä suunnitellaan käytettäväksi esimerkiksi kasvihuonetuotantoon tai vesiviljelyyn (WA3RM Regenergy Gällivare, n.d). Hankkeen esivaihe päättyy 2027.

Alankomaissa hukkalämpöä hyödyntäviä kasvihuoneita on esimerkiksi Middenmeerissä Agriport A7-alueelle (AgriportA7, n.d). ECW Energy välittää alueella toimiville yrityksille sähköä, lämpöenergiaa, vettä, maakaasua ja hiilidioksidia. Alueen kasvihuoneissa kasvatetaan tomaattia 342 ha ja paprikaa 88 ha. Alueella toimivat kasvihuoneyritykset Agrocare, Combivliet, Kvekerij Helderman, Kvekerij de Wieringermeer, Red Harvest, Royal Pride Holland ja Sweetpoint. Ensimmäinen Microsoftin datakeskus aloitti alueella 2015 ja Googlen datakeskus aloitti alueella 2020. Tietokonesalien tuottaman hukkalämmön hyödyntämisestä ei erikseen mainita alueen kotisivulla.

Iso-Britanniassa Norwichin ja Bury St Edmunds lähistöllä Anglian Water-yrityksen jätevedenpuhdistamojen tuottamaa lämpöä alkavat hyödyntämään kaksi yli 13 ha kasvihuoneviljelmää (The Crown Point Estate ja Ingham) (van Zeijl, 2019). Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos tuottaa energian lämpöä siirtäville pumpuille ja hiilidioksidia kasvihuoneille. Artikkelissa ei mainita hukkalämmön lämpötilaa.

Kasvihuone datakeskuksen lämmön hyödyntäjänä

Ruotsin Bodenissa Genesis Digital Assets (GDA) -yrityksen tietokonekontin lähelle on rakennettu vuonna 2022 300 neliömetrin koekasvihuone, joka hyödyntää tietokonekontin hukkalämpöä (Genesis Digital Assets Greenhouse project). Lämpö siirretään kontista kasvihuoneeseen lämpimän ilman muodossa. Järjestelmää ovat kehittäneet Luleå University of Technology ja Research Institutes of Swedenin (RISE) tutkijat. He ovat julkaisseet energia- ja kannattavuuslaskelmat (Ljungqvist ym. 2020). Koekasvihuone ei ole kaupallisessa tuotannossa.

Ruotsin Luulajassa Containing greens Ab-yritys on rakentanut tutkimustietokonesalin yhteyteen kerrosviljelypilottiratkaisun 2022. Heat harvest -järjestelmässä tietokonesalin ilmajäähdytyksen lämpöä hyödynnetään hydroponisen kasvatusjärjestelmän lämmönlähteenä. Yritys kehittää ympärivuotisen tuotannon tekniikkaa, prosesseja ja tuotteita.

Ruotsissa Jämtkraft- ja EcoDataCenter-yritysten hukkalämpöä suunnitellaan hyödynnettäväksi esimerkiksi kasvihuonetuotannossa (SGRIRM Regenergy Östersund, n.d). Hankkeen esivaihe päättyy 2026.

Islannin Akureyrissä atNorth-yrityksen laajennettavan ICE03-tietokonesalin läheisyyteen suunnitellaan versotuotantoa Rækta Microfarm-yrityksen käyttöön (Swinhoe, 2024). Prototyypin suunnittelee Hringvarmi-niminen startup-yritys.

Tanskan Vardessa atNorth-yrityksen DENO2-tietokonesalin läheisyyteen suunnitellaan 30-40 ha kasvihuonetta, jossa viljeltäisiin vihanneksia tietokonesalin hukkalämmöllä (WA3RM Varde, n.d). Lämpöä siirrettäisiin kuuman veden muodossa kasvihuoneeseen ja sieltä jäähtynyt vesi palaisi jäähdyttämään tietokonesalia. Hankkeen odotetaan toteutuvan vuoden 2026 loppuun mennessä.

Kanadan Quebecin osavaltion Levis'iin sijoittuneen Qscale-yrityksen Q01-tietokonesalin hukkalämpöä suunniteltiin aluksi hyödynnettäväksi lähistölle perustettavan laajan kasvihuonetuotantoalueen käyttöön esimerkiksi kasvihuonevihannesten ja marjojen tuotantoon (Swinhoe, 2021). Maaliskuussa 2023 Qscale aloitti yhteistyön paikallisen Energir Development -energiayhtiön kanssa (Sokic, 2023). Tietokonesalien hukkalämpö annettiin ilmaiseksi energiayhtiön jakeluun. Kasvihuonerakentaminen lähialueelle näyttää viivästyneen.

Japanin Hokkaidossa White Data Center-tietokonesalin hukkalämpöä on käytetty kesällä lumen sulatukseen ja talvella kasvihuoneen lämmitykseen (Judge, 2022). Salin hukkalämmön avulla on koekasvatettu mm. kirsikkatomaattia, Komatsuna-vihannesinappia ja Abalone-kotiloita. Kaupallisen mittakaavan kasvatukseen valittiin Juudaksen korvasienet ja ankeriaat.

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntämistä kasvihuonetuotannossa on suunniteltu usein, mutta näitä suunnitelmia on toteutettu vasta vähän.

6.1.2 Sienimöt

Useat biotuotannon sovellutukset hyötyvät tasaisesta lämpötilasta, mutta Pohjois-Suomen olosuhteissa tällaisen tuotannon harjoittaminen on usein haasteellista suurten lämmityskustannusten ja pitkän, kylmän talvikauden vuoksi. Datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisen edellytyksiä voisi tutkia myös sienten viljelyyn. Tämä voisi tarjota energiatehokkaan lämmitysmuodon sienten viljelyyn, sekä myös parantaa datakeskusten kokonaistoiminnan tehokkuutta vähentämällä energiankulutukseen liittyviä ympäristövaikutuksia (Grimm & Wösten, 2018). Sienet vaativat kasvunsa eri vaiheissa tasaisia ja tarkasti säädeltyjä lämpötila- ja kosteusolosuhteita, joita datakeskuksen jäähdytysratkaisuista talteen otettu lämpö voi tarjota ympäri vuoden.

Tutkimusten mukaan sienten viljelyn optimaalinen lämpötila-alue on yleensä 20–30 °C, vaikka erityiset vaatimukset vaihtelevat lajeittain. Esimerkiksi osterivinokas menestyy parhaiten noin 25 °C lämpötilassa inkubointivaiheessa, kun taas hedelmöitysvaiheessa alhaisemmat lämpötilat (18–25 °C) ovat optimaalisia (Mihai ym., 2022). Inkubointivaihe sienten viljelyssä on kriittinen biologinen prosessi, jossa sienirihmasto eli myseeli kasvaa ja valtaa kasvualustan. Tämä vaihe alkaa inokulaation jälkeen, jossa sieniviljelmä siirretään alustalle, ja jatkuu, kunnes rihmasto on levinnyt tasaisesti koko viljelymateriaaliin. Inkuboinnin onnistuminen edellyttää optimaalisia olosuhteita, kuten vakaata lämpötilaa ja korkeaa ilmankosteutta.

Useimmat viljellyt sienilajit hyötyvät pimeästä tai hämärästä ympäristöstä tässä vaiheessa, sillä valo ei ole vielä rihmaston kehityksen kannalta olennainen tekijä. Lievästi kohonnut hiilidioksidipitoisuus on usein hyväksyttävää, mutta riittämätön ilmanvaihto voi edistää epätoivottujen mikrobin kasvua ja heikentää sadon laatua. Inkubointivaiheen tavoitteena on varmistaa, että myseeli muodostaa vahvan ja elinvoimaisen verkoston ennen siirtymistä hedelmöitysvaiheeseen, jossa varsinaiset itiöemät alkavat kehittyä. Tässä vaiheessa luodaan perusta sekä sadon määrälle että laadulle, joten se on sienten viljelyssä yksi huolellisimmin säädeltyistä tuotantovaiheista (Chang & Hayes, 1978).

Yleisesti ottaen datakeskusten tuottamaa hukkalämpöä voidaan tehokkaasti hyödyntää näiden lämpötila-alueiden ylläpitämiseen, mikä vähentää perinteisten lämmitysjärjestelmien tarvetta. Tämä on erityisen hyödyllistä alueilla, joilla ympäristön lämpötila ei ehkä muuten ole sienten kasvulle suotuisa, jolloin viljelijät voivat pidentää kasvukauttaan ja lisätä satoa. Hedelmöitysvaiheessa voidaan täydentävänä ratkaisuna hyödyntää passiivista ilmanvaihtoa, ulkoilmaa tai erillistä viilennystä. Sienituotanto on verrattain tilatehokasta ja hyvin skaalautuvaa, ja se soveltuu

erityisesti suljetun kierron ratkaisuihin, joissa kasvualustoina voidaan käyttää paikallisia biojätteitä tai jätepuupohjaisia materiaaleja.

Lisäksi hukkalämmön käyttö voi parantaa sienten kasvulle kriittisiä kosteustasoja. Sienten viljelyssä vaaditaan yleensä korkeaa kosteustasoa, usein 80–90 %, jotta kehitys tapahtuu asianmukaisesti ja kuivuminen estyy (Piazza ym., 2021). Datakeskusten hukkalämpöä käyttämällä voidaan luoda mikroilmasto, joka ylläpitää tarvittavia kosteustasoja, ja siten edistää optimaalista kasvua. Tämä hyödyttää erityisesti kontrolloiduissa ympäristöissä, joissa hukkalämmön ja kosteuden hallinnan yhdistelmä voi merkittävästi parantaa sadon määrää ja laatua.

Datakeskusten hukkalämmön yhdistäminen maatalousjätteiden käyttöön sienten kasvualustoina voi luoda suljetun kierron järjestelmän, joka parantaa kestävyyttä. Esimerkiksi maatalousjätteitä, kuten olkea, sahanpurua ja muita lignoselluloosamateriaaleja, voidaan käyttää sienten kasvualustoina, ja datakeskusten hukkalämpö tarjoaa tarvittavat termiset olosuhteet optimaaliseen kasvuun (Kumla ym., 2020). Tämä lähestymistapa vähentää jätettä ja lisää maatalousjärjestelmän kokonaiskestävyyttä.

Esimerkiksi Grimm ja Wösten korostavat, että sienten viljelyssä syntyvää hukkalämpöä ja hiilidioksidia voidaan hyödyntää kasvien kasvun stimuloimiseen läheisissä kasvihuoneissa, luoden synergisen suhteen eri maataloustoimintojen välille (Wyk, 2022). Tämä ei ainoastaan maksimoi resurssien käyttöä, vaan minimoi myös ympäristövaikutuksia, kun hukkalämpö hyödynnetään edelleen.

Hukkalämmön hyödyntämisellä sienten viljelyssä on huomattavia taloudellisia vaikutuksia. Vähentämällä lämmitykseen ja optimaalisten kasvuolosuhteiden ylläpitoon liittyviä energiakustannuksia viljelijät voivat parantaa kannattavuuttaan. Tutkimukset ovat osoittaneet, että hukkalämmön hyödyntäminen voi nopeuttaa kasvua ja lisätä satoa, mikä on kriittistä kilpailukykyisessä sienten markkinatilanteessa (Mahapatra ym., 2020). Lisäksi mahdollisuus hyödyntää hukkalämpöä voi tehdä sienten viljelystä taloudellisesti saavutettavampaa myös pienille tuottajille, erityisesti kehittyvissä maissa, joissa energiakustannukset voivat olla esteenä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että datakeskusten hukkalämmön integrointi sienten viljelyyn tarjoaa monipuolisen mahdollisuuden parantaa sekä maatalouskäytäntöjen tehokkuutta että kestävyyttä. Ylläpitämällä optimaalisia lämpötila- ja kosteustasoja viljelijät voivat merkittävästi parantaa kasvunopeutta ja satoa, lisäten siten taloudellista kannattavuutta. Kiertotalouden periaatteet tukevat tätä lähestymistapaa, koska yhden prosessin hukkaa ja jätteitä voidaan hyödyntää toi-

sessä prosessissa, luoden kestävämmän maatalousekosysteemin. Tulevaisuuden tutkimuksen tulisi edelleen tarkastella innovatiivisia menetelmiä hukkalämmön hyödyntämiseksi ja kasvuolosuhdeiden optimoimiseksi sienten viljelyn edistämiseksi.

Sienten tuonti ja kotimainen tuotanto

Maataloustuotteiden ja elintarvikkeiden ulkomaankauppatilaston mukaan sieniä tuotiin vuosina 2019-2023 keskimäärin 2 100 tonnia vuodessa (**TAULUKKO 3**). Sienten tuontimäärä oli kasvihuonevihanneksien tuontiin verrattuna pieni, mutta samaa suuruusluokkaa kuin tuoreiden marjojen tuonti. Puutarharekisterin mukaan sienten tuottajayrityksiä oli vuosina 2021-2023 kolme. Ne olivat Varsinais-Suomessa, Satakunnassa ja Pohjois-Savossa ja tuottivat herkkusieniä, siitakesieniä ja osterivinokkaita. Sienten tuotantomääriä ei ole julkaistu tuottajien pienen lukumäärän takia, mutta huonepinta-ala oli 4 000 neliometriä.

6.2 Hukkalämpö vesiviljelyssä

Vesiviljelyn merkitys maailman ruoantuotannossa on vahvistunut nopeasti, ja sitä pidetään yleisesti yhtenä kestävimmistä tavoista tuottaa eläinproteiinia kasvavalle väestölle. Tämä johtuu siitä, että vesieläinten, mutta myös vesikasvien, kasvu ja tuotantopotentiaali ovat moninkertaisia verrattuna maalla kasvatettaviin lajeihin. Myös niin sanottuun non-food vesiviljelyyn, kuten levien kasvatukseen, kohdistuu suuria odotuksia energiantuotannon, rehuraaka-aineiden sekä erilaisten lisäarvotuotteiden kehittämisen kannalta. Samalla tarve ekologisesti kestävään vesiviljelyyn ja ympäristövaikutusten hallintaan liittyvälle osaamiselle ja teknologialle kasvaa, ja luo edellytyksiä uudelle yritystoiminnalle, työpaikoille sekä kalaomavaraisuuden nostamiselle (ks. Valtionneuvosto, 2022).

6.2.1 Kalankasvatus

Vesiviljelyllä kasvatetun kalan osuus kulutuksessa on lisääntynyt nopeasti ja nykyisin puolet ihmisten syömästä kalasta on alkuperältään viljeltyä (FAO, 2024). Vesiviljely on yksi kestävimmistä keinoista tuottaa eläinproteiinia, sillä kalat pystyvät hyödyntämään niille tarjotun ravinnon kas-

vuun tehokkaammin kuin maalla kasvatettavat tuotantoeläimet. Vesiviljelyn merkittävin ympäristövaikutus on vesistöjen ravinnekuormitus, mutta tästä huolimatta kasvatetun kalan ilmasto- ja ympäristövaikutukset ovat pienemmät kuin muussa eläintuotannossa. Kalankasvatuksella vähennetään myös tarvetta luonnonvaraisten kalojen pyynnin lisäämiseen kasvavan kysynnän tyydyttämiseksi ja edistetään siten kalakantojen suojelua.

Kalankasvatus Suomessa

Vesiviljelytuotannon määrä Suomessa oli 80- ja 90-luvun vaihteessa korkeimmillaan yli 19 miljoonaa kiloa kalaa. Tämän jälkeen tuotanto on vähentynyt kiristyneen kansainvälisen kilpailun ja ympäristörajoitteiden takia. Vuonna 2023 Suomessa toimi 217 vesiviljely-yritystä, jotka kasvattivat ihmisravinnoksi 15,2 miljoonaa kiloa kalaa, joiden arvo oli 93 miljoonaa euroa (Luonnonvarakeskus, 2024). Elintarvikkeeksi tuotettiin pääosin kirjolohta (jopa 95 %), mutta myös muun muassa nieriää, siikaa, taimenta ja sampea sekä kirjolohen ja siian mätiä.

Nykyisellään Suomessa suurin osa, miltei 80 % viljelystä ruokakalasta kasvatetaan verkkoaltaissa merialueilla, erityisesti Ahvenenmaalla. Sisävesissä kasvatetaan pääosa kaikista kalanpoikasista ruokakalakasvatuksen tarpeisiin sekä istutettavaksi luonnonvesiin. Vuonna 2023 sisävesissä tuotettiin viljeltyä ruokakalaa noin 3,2 miljoonaa kiloa vuodessa (Luonnonvarakeskus, 2024). Sisävesissä tapahtuva kalankasvatus on keskittynyt erityisesti Kainuuseen ja Lappiin.

Vesiviljelyala on tärkeä osa Suomen huoltovarmuutta. Vuonna 2021 Valtioneuvosto hyväksyi kotimaisen kalan edistämishjelman periaatepäätöksen, jonka tavoitteena on lisätä kotimaisen kalan tarjontaa ja osuutta kulutuksesta kestävästi. Vuonna 2022 hyväksytyn Manner-Suomen vesiviljelystrategian tavoitteena on nostaa vuosittaisen ruokakalatuotannon kokonaismäärä vähintään 25 miljoonan kilon tasolle ja kasvatetun kalan kotimaisuusaste yli 50 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Strategian tavoitteena on vesiviljelyalan kestävä kasvu, joka yhdistää kilpailukyvyn, ympäristöystävällisyyden, kalojen hyvinvoinnin ja alan työllisyyden kehittämisen. Painopisteinä ovat myös innovaatioiden hyödyntäminen, ravinnekuormituksen vähentäminen sekä vastuullisten kalatuotteiden tuotannon ja viennin edistäminen (Valtioneuvosto, 2022).

Hukkalämmön hyödyntäminen kalankasvatuksessa

Maalla tapahtuva kiertovesikasvatus (Recirculating Aquaculture System, eli RAS) on nopeasti yleistynyt menetelmä kalanviljelyssä maailmalla. Kiertovesilaitoksessa vettä voidaan kierrättää kasvatusaltaan ja puhdistuslaitteiston välillä, jolloin uutta vettä kasvatukseen tarvitaan vain pieni osa kiertävän veden määrästä. Näin ollen kiertovesikasvatuksen avulla tuotanto voidaan viedä myös sellaisille paikoille, joissa vesi ei riittäisi perinteiseen kalankasvatukseen. Kiertovesikasvatuksessa pystytään sekä pienentämään toiminnasta syntyvää ravinnekuormitusta ympäristöön että ylläpitämään kalan kasvulle optimaalista lämpötilaa vuoden ympäri. Tasaiset kasvatusolosuhteet tasaavat myös kalan saatavuuteen, laatuun tai hintaan liittyvää sesonkivaihtelua.

Kiertovesikasvatus on kuitenkin liiketoimintana melko uutta, ja sen kannattavuus on ollut Suomessa toistaiseksi heikohkoa. Suomessa toimi 2010-luvulla parhaimmillaan 11 kiertovesikasvatustilasta. Useimmat näistä ovat ajautuneet konkurssiin tai lopettaneet toimintansa muista syistä (Vielma ym., 2022). Vuonna 2022 Suomessa toimi kolme kiertovesiyritystä, jotka tuottivat yhteensä 1,3 miljoonaa kiloa ruokakalaa (Valve ym. 2024).

Kiertovesikasvatuksen haasteena on toistaiseksi ollut taloudellinen kannattavuus ruokakalankasvatuksessa. Syitä kiertovesikasvatuksen heikkoon kannattavuuteen on lähtökohtaisesti korkeat investointikustannukset ja mm. veden lämmittämiseen tarvittavan energian lisääntyneet kustannukset (Vielma ym., 2022). Kiertovesitekniikan kehittymisen ja osaamisen lisääntymisen on ennakoitu lisäävän kiertovesikasvatuksen taloudellista kannattavuutta tulevaisuudessa.

Kiertovesikasvatuksen kustannuksia voitaisiin vähentää sijoittamalla laitos muun teollisuuden läheisyyteen. Kiertovesilaitosten kasvatustoiminnan energian tarve ja kokonaishiilijalanjälki pienee, kun käytettävissä on esimerkiksi teollisuuden hukkalämpöä, jolloin varsinaisen kasvatustoiminnan hiilijalanjälki voidaan saada lähelle nolaa (Silvenius ym., 2012.) Lisäksi voidaan mahdollisesti hyödyntää myös esimerkiksi alueen muuta infrastruktuuria ja jätevesien puhdistuslaitoksia. Toisaalta kalankasvatuksesta syntyvää jätettä, kuten lietettä ja kalanperkeitä, voidaan hyödyntää muissa hukkalämpöä hyödyntävissä prosesseissa, kuten biokaasun tuotannossa.

Kalankasvatuksessa hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää kiertovesijärjestelmissä, joissa esimerkiksi järvestä otettavan veden lämpötilaa on tarpeellista nostaa etenkin talviaikana, jotta se pysyy optimaalisena viljeltävän lajin kasvulle. Samaan aikaan kesäisin lisääntyneet hellejaksot aiheuttavat ongelmia kalankasvatuksessa (Prokkola ym. 2023), ja kesäaikaan voikin olla tarpeen jäähdyttää kasvatusvettä. Kirjolohen kasvu on tehokkainta veden lämpötilan ollessa 15–17 °C (Jobling, 1994).

Se kestää lyhyitä aikoja korkeampia lämpötiloja, mutta jo 21 C-asteessa sen kasvu hidastuu ja kuolleisuus kasvaa (Jiang ym. 2021). Kiertovesilaitoksissa voidaan kasvattaa kirjolohta aina markkinakokoiseksi asti, mutta niissä kasvatetaan myös kirjolohen poikasia muualla tapahtuva jatkokasvatuksen tarpeisiin. Kirjolahella yhdistetyn kiertovesi- ja merikasvatuksen avulla voidaan lyhentää perinteisen tuotannon kestoa (Koskela ym. 2019).

Kiertovesilaitoksissa on kasvatettu myös muita kalalajeja kuten siikaa, kuhaa ja sampea. Siika on viileiden vesien laji, jolla myyntikokoon kasvattamiseen tapahtuu tyypillisesti alle 15 °C lämpötiloissa (12–16 °C, Koskela ym. 2002). Siian kasvatusta mädistä markkinakokoiseksi ruokakalaksi kestää luonnonlämpötiloissa 3 vuotta, mutta kahden vuoden tuotantokierto on mahdollinen silloin, jos poikasvaiheen kehitystä nopeutetaan lämmittämällä vettä (Koskela ym. 2002). Kuhan ja ahvenen tiedetään puolestaan hyötyvän lämpenevästä luonnonvesistä, mutta perinteisten viljelykokeiluiden perusteella niiden kaupallinen kasvatusta on osoittanut teknisesti ja taloudellisesti haastaviksi (Koskela ym. 2005, Härkönen ym. 2016). Kuhan kasvatusta on kuitenkin tutkittu tehostuvan lämpimässä vedessä (16–20 °C) ja erilaiset lämminvesikasvatustekniikat voisivatkin tehdä sen kasvatuksesta kilpailukykyisempää (Koskela ym. 2007).

Kalankasvatuksessa matalan lämpötilan hukkalämpö on verrattain helposti hyödynnettävissä. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä kalankasvatuksessa onkin tutkittu jo yli 50 vuoden ajan. 1970-luvun alussa lisääntyneen sähkötarpeen myötä voimalaitosten määrä ja koko kasvoivat, ja viilennykseen käytettävää vettä testattiin käytettäväksi kalankasvatusaltaissa tai -lammissa muun muassa Yhdysvalloissa. Ensimmäisiä kokeiluja vesiviljelyn osalta toteutettiin jo 1970-luvulla, jolloin muun muassa katkarapujen, kirjolohen, kissakalan, tilapian ja ankerioiden kasvatusta voimalaitoksen viilennyksessä käytetyn ja lämmentyneen jokiveden avulla (Godfriaux ym., 1977, Guerra ym., 1979, Heckmann ym., 1984).

Suomessa on useita lauhdevettä tuottavia paperi- ja selluteollisuuslaitoksia, ja niiden hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuudet kalankasvatuksessa on tunnistettu jo vuosikymmeniä sitten (Virtanen ym., 1989). 1970- ja 1980-lukujen taitteessa selvitettiin muun muassa lohenpoikasten kasvatusta Inkoon voimalaitoksen jäähdytysvedessä (Tuunainen ym., 1977) sekä Olkiluodon ydinvoimalan jäähdytysvedessä (Westman, 1981).

Suomessa toimii tällä hetkellä yksi teollisuuden hukkalämpöä hyödyntävä kiertovesi- ja kalanjalostuslaitos, joka sijaitsee Varkaudessa Stora Enso Oyj:n tehdasalueella. Finnforel Oy:n kirjolohenkasvattamo ottaa kasvatusaltaisiin tarvittavan veden tehdasalueen yläpuoleisesta vesistöistä ja

tuottaa itse aurinkoenergiaa, mutta hyödyntää tuotannossaan tehdasalueen hukkalämpöä ja jätevedenpuhdistamo. Yrityksen vuosittaisen tuotantokapasiteetin odotetaan nousevan noin kolmeen miljoonaan kiloon.

Tällä vuosituhannella myös sammen ja monnin kasvatusta on kokeiltu hukkalämmön avulla sekä Stora Enson Imatran että Varkauden tehtaiden yhteydessä. Ruokakalatuotannon lisäksi tarkoituksena on ollut tuottaa myös kaviaaria, eli sammen mätiä. Esimerkiksi Imatralla sammenkasvatukseen tarvittava vesi otettiin pumpulla Vuoksen suulta ja lämmitettiin lämmönvaihtimien avulla tehtaalla syntyvän lämpimän veden turvin noin 22–24-asteiseksi (Yle 2008). Imatralla sammen ja kaviaarin tuotanto kuitenkin loppui vuonna 2015 ja Varkaudessa 2021.

Datakeskuksen hukkalämpö kalankasvatuksessa

Datakeskusten hukkalämpö poikkeaa perinteisempien teollisuusprosessien hukkalämmöstä. Konesalien ollessa aina toiminnassa lämmöntuotannon pysyvyys on varmaa ja tasaista, mikä on lisännyt ennakoitavuutta ja kiinnostusta matalalämpötilaisen veden hyödyntämiseen kalankasvatuksen osalta. Maailmalta löytyy muutamia jo toiminnassa olevia datakeskusten yhteydessä olevia vesiviljelylaitoksia.

Green Mountain Data Center:n viilennysveden hukkalämpöä käytetään kirjolohen kasvatukseen Norjan Rjukanissa (Green Mountain 2021a). Rjukanin datakeskus on yhdistetty putkistolla maailman toistaiseksi suurimpaan maalle perustettuun kalanviljelylaitokseen. Konesalien jäähdytysvesi ohjataan putkistoa pitkin 800 metrin päässä sijaitsevaan RAS-viljelylaitokseen. Kirjolohen kasvatukseen tarvittava vedenlämpötila on 14 °C, mikä saavutetaan lisäämällä jäähdytysveteen (25–26 °C) viileämpää vettä läheisestä joesta. Tällä tavoin viilennetty vesi ohjataan kalankasvatustaloksesta takaisin datakeskukseen sen jäähdyttämiseksi. Kumpaakin osapuolta hyödyttävä veden jäähdytys-lämmitys-kierto vähentää merkittävästi datakeskuksen sekä kalanviljelylaitoksen energiankulutusta ja hiilijalanjälkeä. Kirjolohta odotetaan täydessä tuotannossaan (vuodesta 2025 alkaen) viljeltävän jopa 9000 tonnia vuodessa (Fish Farming Expert, 2021).

Japanissa Hokkaidon saarella sijaitseva The White Data Center käyttää jäähdytykseensä talven aikana kerättyä lunta. Datakeskuksen jäähdytyksestä saatava lumen sulamisvesi on 33 C-asteista. Sulamisvettä on pyritty hyödyntämään muun muassa merenelävien viljelyyn (Judge, 2022). Alkuvaiheessa testattiin merikorvan ja merisiilin kasvatusta, mutta datakeskuksen toiminnan käynnis-

tyessä viljelyyn otettiin ankerias. Nuoria ankeriaita kasvatetaan datakeskuksen yhteydessä olevissa altaissa, joissa veden lämpötila on ankeriaan kasvulle optimaalinen 27 °C. Ankeriaita kasvatetaan seitsemän kuukauden ajan 250 gramman kokoisiksi. Ankerioiden kaupallinen kasvatusta alkoi vuonna 2024, ja tuotannon on ennustettu olevan noin 300 000 ankeriasta vuodessa.

Konesalien hukkalämmön hyödyntämistä kalankasvatuksessa on suunniteltu useissa erilaisissa kohteissa, mutta monet hankkeet eivät ole vielä edenneet toteutukseen tai niiden nykytilasta ei ole saatavilla tarkempaa tietoa. Esimerkiksi The Foundry Project suunnitteli jo vuonna 2016 yhdistävänsä kalankasvatamon Clevelandin (USA) maanalaiseen datakeskukseen (Business Wire, 2015), mutta hanke ei vaikuta edenneen. Sen sijaan Ruotsissa EcoDataCenter yhdessä WA3RM-yrityksen kanssa on julkistanut suunnitelmia yhdistää konesalien hukkalämpöä muun muassa vesiviljelytuotantoon. Tarkempia tietoja toteutuksesta ei ole vielä julkaistu.

6.2.2 Äyriäisten kasvatusta

Äyriäisten vesiviljely on merkittävä ja kasvava ala maailmanlaajuisesti. Tärkeimpiä viljeltyjä äyriäisiä ovat katkaravut, taskuravut ja hummerit, joita kasvatetaan sekä avovesiviljelyssä että suljetuissa RAS-kiertovesijärjestelmissä. Suomessa rapujen kasvatusta on nykyään hyvin pienimuotoista. Erittäin uhanalaista jokirapua on kasvatettu kaupallisesti pääosin istutustarkoituksiin, mutta poikasten ylitarjonnan myötä sitä kasvatettiin vielä viime vuosikymmenellä vähäisiä määriä myös ruuaksi (Savolainen & Moilanen, 2006).

Kotimaisen jokiravun kaupakokoon kasvattaminen saattaa viedä jopa kymmenen vuotta, joskin lämpimämmässä vedessä (21–23 °C) poikasten kasvua voitaisiin parantaa (Tulonen ym., 1998). Aikaisemmin Suomessa viljeltiin Pohjois-Amerikasta tuotua nopeakasvuisempaa täplärapua. Täpläravun intensiivikasvatusta tutkittiin myös Olkiluodon ydinvoimaloiden lauhdevesien hyödyntämisestä (Riista- ja Kalatalouden tutkimuslaitos, 2000). Vuonna 2015 täplärapu lisättiin EU:n vieraslajilistalle, joten sen viljely on nykyään kielletty Suomessa.

Maailmanlaajuisesti katkaravut ovat ylivoimaisesti tuotetuin äyriäisviljelyn lajiryhmä. Katkarapuja viljellään erityisesti lämpimillä rannikkoalueilla, joissa vesistöjen olosuhteet mahdollistavat luonnolliset kasvuolosuhteet eri lajien viljelylle. Alkuperänsä takia useimmat kaupallisesti viljeltävät katkarapulajit vaativat kasvaakseen korkean lämpötilan (24–32 °C) ja suolapitoisuuden (1–3,5 %). Euroopassa katkaravunviljelyn kehittämistä on vauhdittaneet muun muassa viljelyn epäeettisyyteen ja epäekologisuuteen liittyvät ongelmat Kaakkois-Aasiassa. Suomen kylmät ja pitkät talvet

sekä verrattain viileät kesät asettavat lähtökohtaisesti haasteita trooppisilta alueilta lähtöisin olevien äyriäisten kasvatukselle. Myös Suomen luonnonvesien suolapitoisuus on useimmille mereisille lajeille liian alhainen. Suljetut kierto-vesijärjestelmät voisivat mahdollistaa optimaalisten olosuhteiden ylläpitämisen ympäri vuoden katkaravuille myös Suomen oloissa.

Maa-ilmanlaajuisesti tärkeimmäksi vesiviljelyllä tuotettavaksi lajiksi on 2000-luvulla noussut valkokatkarapu (*Litopenaeus vannamei*), ja sen tuotanto vuonna 2022 oli jo miltei seitsemän miljoonaa tonnia (FAO 2024). Myös Suomessa valkokatkaravun viljelyn edellytyksiä on selvitetty (Junnila 2017), ja sen kierto-vesiviljelyä on kokeiltu pilottiluoteisesti (Suomen Kalastuslehti 2016). Valkokatkarapu kasvaa parhaiten 1–3,5 % suolapitoisuudessa ja 26–32°C lämpötilassa (Van Wyk & Scarpa 1999). Se kuitenkin kasvaa vielä kohtalaisen hyvin Itämeren alhaisessa (0,5 %) suolapitoisuudessa (Laramore ym., 2001), jolloin kasvatusta rannikolla on mahdollista suoraa Itämerestä otetussa vedessä ilman erillisen suolan lisäämistä.

Yhdysvalloista tuotujen valkokatkarapujen kasvatusta kokeiltiin Uudessakaupungissa, missä Itämerestä kierto-vesisysteemiin pumpattu vesi lämmitettiin 29 C-asteiseksi. Tietoja pilottikasvatuksen onnistumisesta tai syitä viljelykokeilun päättymiselle ei ole julkaistu. Junnilan (2017) katsauksen perusteella valkokatkaravun kasvattaminen Suomessa voisi kuitenkin olla mahdollista, mutta se vaatisi huomattavia alkuinvestointeja ja energiatehokkuuden optimointia, jotta se olisi kilpailukykyistä tuontiäyriäisten kanssa. Myös poikasten saatavuus rajoittaisi tuotantoa, sillä äyriäisten lisääntyminen vaatii usein erikoistuneita kasvatuslaitoksia, joita Suomessa ei ole.

Haasteena äyriäisviljelyn kannattavuudessa Suomen oloissa on viileät vedet, sillä useimmat kaupallisesti kannattavat lajit vaativat tasaisen lämmintä vettä, ja lajista riippuen myös suolaista vettä. Kierto-vesiviljelyssä veden lämmittäminen on suurin kustannus, johon hukkalämmön hyödyntäminen voisi tarjota ratkaisun (Junnila, 2017). Esimerkiksi isokatkarapu (*Macrobrachium rosenbergii*), joka on suurikokoinen makean veden katkarapu, vaatii kasvaakseen 22–30 °C:n lämpötilan. Useimpien muiden katkarapujen tapaan se ei kuitenkaan vaadi suolaista vettä kasvaakseen. Isokatkaravun kasvatuksessa onkin hyödynnetty teollisuuden jäähdytysvesiä jo 1980-luvulla (Hayes & Johnson, 1980; Khemeleva ym. 1989).

Viime vuosina erilaisten äyriäisten kasvatukseen on kehitetty uusia sisäviljelyteknologioita. Esimerkiksi Ruotsissa on kehitetty Pohjoismaiden oloihin soveltuvaa merirapujen (nk. scampi, *Nephrops norvegicus*) Bio-RAS -viljelyjärjestelmää, joka pystyy hyödyntämään matalalämpöistä hukkalämpöä ja tuottamaan samalla fermentoinnin avulla biomassaa kalojen rehuksi (Wright 2023). Ensimmäinen suuren mittakaavan pilottijärjestelmä on ollut suunnitteilla Ruotsin Västervikiin,

mutta kehiteltävän teknologian on esitetty olevan laajemmalti käytettävissä vuoteen 2028 mennessä.

Konesalien hukkalämpöä äyriäisten kasvatukseen on hyödynnetty norjalaisen Green Mountainin Rennesøyn datakeskuksen yhteydessä (Green Mountain, 2021b). Konesalien jäähdytysjärjestelmään johdetaan viereisestä vuonosta otettua 8°C merivettä, ja datakeskus toimittaa jäähdytysjärjestelmänsä veden suoraan sen läheisyydessä sijaitsevalle hummerikasvatuslaitokselle. Hummereiden optimaaliseen kasvuun tarvitaan suolaista vettä ja tasainen 20 °C lämpötila, mikä on suunnilleen sama lämpötila kuin vuonoveden lämpötila sen kuljettua ensin konesalien läpi. Käytön jälkeen vesi palautetaan puhdistettuna takaisin mereen. Hukkalämmön avulla meriveden lämmittämiseen kuluvan energiatarpeen on arvioitu vähenevän jopa 80 % (Gyland, 2021).

Datakeskuksen tarjoama lämmin vesi poistaa osaltaan myös tarpeen monimutkaiselle RAS-tekniikalle ja mahdollistaa hummereiden tehokkaan kasvun ympäri vuoden. Hummereiden kasvu kulusvalmiiseen kokoon (20 cm, 250 g) tapahtuu noin puolessatoista vuodessa tyypillisestä viidestä vuodesta poiketen. Hummerinkasvatuksen odotetaan pääsevään pilotointivaiheesta suuren mittakaavan tuotantoon (jopa 900 tonnia vuodessa) muutaman vuoden kuluessa.

6.2.3 Levien kasvatus

Levät ovat monimuotoinen eliöryhmä, jotka jaetaan kahteen pääluokkaan: mikroleviin ja makroleviin. Mikrolevät ovat yksisoluisia, mikroskooppisia organismeja, jotka kasvavat nopeasti ja sitovat tehokkaasti hiilidioksidia (CO₂). Niitä voidaan kasvattaa avonaisissa altaissa tai suljetuissa fotobioreaktoreissa, joissa kasvatusolosuhteita voidaan hallita tarkasti (Mohler ym., 2019). Mikrolevien korkea lipidipitoisuus tekee niistä potentiaalisen raaka-aineen biopolttoaineiden, kuten biodieselin, tuotantoon (Porphy & Farid, 2012).

Makrolevät, kuten ruskolevät ja punalevät, ovat monisoluisia ja voivat kasvaa useiden metrien pituisiksi. Niitä kasvatetaan usein meressä köysirakenteissa, ja niiden biomassaa voidaan hyödyntää sekä elintarviketeollisuudessa että teollisissa sovelluksissa (Kupczak & Kulig, 2024). Suomessa on tutkittu sekä mikro- että makrolevien kasvatusta erityisesti jätevesien käsittelyn yhteydessä, missä levät hyödyntävät ravinteita samalla kun ne puhdistavat vettä (Vares ym., 2014).

Datakeskukset tuottavat merkittäviä määriä hukkalämpöä, joka toistaiseksi on vielä monissa tapauksissa hyödyntämättä. Mikrolevien viljely tarjoaa yhden mahdollisen käyttökohteen tälle hukkalämmölle, sillä levät kasvavat tehokkaimmin 20–35 °C:n lämpötiloissa (Mohler ym., 2019). Näin matalista lämpötiloista puhuttaessa levän kasvatusta voisi tulla kyseeseen myös useimmissa ilmajäähdytteissä datakeskuksissa. Lämpötilan ylläpito on yksi mikrolevien kasvatuksen energiavaltaisimmista osa-alueista, joten hukkalämmön hyödyntäminen voi vähentää lisäenergian tarvetta ja parantaa prosessin taloudellista kannattavuutta (Leffler ym., 2012).

Levien tuotanto liittyy kiinteästi biopolttoaineiden tuotantoon, mutta levien biomassaa voidaan hyödyntää myös monilla muilla tavoilla. Elintarviketeollisuudessa makroleviä, kuten ruskoleviä, käytetään lisäaineina, ravintolisinä ja suoraan ihmisravinnoksi. Mikrolevät, kuten *Spirulina* ja *Chlorella*, ovat ravinnerikkaita ja niitä käytetään terveystuotteissa (Kupczak & Kulig, 2024). Rehu-teollisuudessa leväjohtannaisia käytetään karja- ja kalarehuissa proteiinin ja omega-3-rasvahappojen lähteenä (Porphy & Farid, 2012). Levät voivat myös toimia luonnonmukaisina lannoitteina ja biostimulantteina maataloudessa, sillä ne sisältävät runsaasti hivenaineita ja kasvunestittäjiä (Vares et al., 2014).

Lisäksi levien viljely voi tukea hiilidioksidin talteenottoa ja jätevesien käsittelyä. Kupczak ja Kulig (2024) korostavat, että levät voivat hyödyntää ravinteita, kuten typpeä ja fosforia, joita on jätevesissä, ja samalla sitoa ilmakehän hiilidioksidia. Tämä tekee mikrolevistä houkuttelevan vaihtoehdon hiilineutraalien biopolttoaineiden tuotantoon, erityisesti jos niiden kasvu yhdistetään datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseen ja mahdollisen teollisuussynteesin myötä hiilidioksidipäästöjen talteenottoon teollisuuden savukaasuista (Mohler ym., 2019).

Eräät tutkimukset ovat tarkastelleet levien kasvatusta voimalaitosten ja teollisuuden yhteydessä hukkalämmön hyödyntämiseksi (Mohler ym., 2019; Leffler ym., 2012), mutta datakeskuksiin keskittyvä tutkimus on vielä vähäistä. Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen voisi tarjota vaakaamman ja hallitumman lämpöenergian lähteen verrattuna perinteisiin teollisuuden lämmönlähteisiin. Tämä mahdollistaisi jatkuvan mikrolevätuotannon ilman suuria lämpötilavaihteluita, mikä parantaisi biomassan saantoa ja biopolttoaineiden jalostusprosessien tehokkuutta (Vares et al., 2014).

Ranskassa on käynnissä pilottihanke, jossa datakeskusten hukkalämpöä ja talteen otettua hiilidioksidia hyödynnetään levän kasvatuksessa. Data4 Group ja Pariisin Saclayn yliopisto aloittivat vuoden 2024 alussa yhteistyöprojektin Essonnessa, jossa pyritään jäljittelemään luonnollista fo-

tosynteesiä kasvattaen leviää datakeskuksen jätevirtojen avulla. Tavoitteena on tuottaa biomassaa, jota voidaan hyödyntää uusiutuvana energialähteenä ja biopohjaisten tuotteiden, kuten elintarvikkeiden ja kosmetiikan, valmistuksessa. Hankkeen hiilensidontatehokkuus voi olla jopa 20-kertainen puuhun verrattuna samalla pinta-alalla. (Data Center Knowledge, 2024; Data4 Group, 2024)

Yhdistämällä datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen leväkasvatukseen voidaan edistää uusiutuvan energian tuotantoa ja vähentää energiankulutuksen ympäristövaikutuksia. Lisäksi levien monipuolinen käyttö elintarvikkeissa, rehuissa, lannoitteissa ja biopolttoaineissa tekee niistä houkuttelevan ja kestävä vaihtoehdon biotalouden kehittämisessä. Hukkalämmön hyödyntäminen voisi parantaa levien kasvatuksen taloudellista kannattavuutta ja voi tehdä mikroleivistä kilpailukykyisen vaihtoehdon eri teollisuudenaloilla, erityisesti datakeskusten yhteydessä, missä matalalämpötilaista lämpöenergiaa on jatkuvasti saatavilla.

6.3 Hukkalämpö hyönteisten kasvatuksessa

Hyönteiset ovat olleet osa ihmisen ruokavaliota ja tärkeä proteiinin lähde jo esihistoriallisista ajoista lähtien. Hyönteiset ovat edelleen säännöllinen osa ruokavaliota noin 2,5 miljardille ihmiselle maailmassa, erityisesti Afrikassa, Aasiassa ja Latinalaisessa Amerikassa (Costa-Neto ja Dunkel, 2016). Hyönteisproteiinin osuuden on ennustettu kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa, sillä se tarjoaisi ekologisesti kestävämmän vaihtoehdon perinteisemmille eläinproteiinilähteille. Valtaosa Suomen vielä kohtalaisen vähäisestä hyönteistuotannosta on ruuaksi kasvatettavaa kotisirkkaa (*Acheta domesticus*).

Hyönteisten kasvatusta rehun raaka-aineeksi on niin ikään nopeasti kehittyvä ala. Hyönteiset, kuten keltajauhomadot (*Tenebrio molitor*), tarjoavat kestävämmän vaihtoehdon perinteisille rehuraka-aineille, kuten soijalle ja kalajauholle. Hyönteispohjainen rehu voi merkittävästi vähentää ympäristökuormitusta, sillä sen lähituotanto lyhentää kuljetusmatkoja, vaatii vähemmän maankäyttöä, vettä ja kasviuonekaasupäästöjä verrattuna perinteisten rehujen proteiinilähteisiin. Rehuksi kasvatettavien hyönteisten tuotanto on toistaiseksi vasta kehittymässä Suomessa (Lokka ym., 2021).

Hyönteisiä hyödynnetään myös elintarvikejätteen biokonversiossa. Mustasotilaskärpänen (*Hermetia illucens*) on maailmanlaajuisesti kiertotalouden tärkein hyönteislaji, ja sen toukkia käytetään hajottamaan ja muuntamaan ruokajätettä ravintorikkaaksi biomassaksi (Ramos-Elorduy ym., 2002). Hyönteisprosessoitua biomassaa, eli frassia, voidaan hyödyntää muun muassa eläinrehuissa ja orgaanisissa lannoitteissa (Fowles ym., 2020). Sivutuotteena syntyvistä hyönteisistä voidaan eristää rasvaa mm. biodieselin valmistukseen (Wang ym., 2017). Teollisen mittakaavan teknologiaa mustasotilaskärpäsen kasvatukseen on ollut kehittämässä ainakin kaksi suomalaista yritystä.

Hyönteisten kasvatuksessa lajien kasvunopeuteen vaikuttavat sekä lämpötila että ilmankosteus. Esimerkiksi jauhomatojen ja mustasotilaskärpästen toukkien kasvatusta on optimaalista noin 25–30 °C:n lämpötilassa ja 60–70 % suhteellisessa kosteudessa (Park ym., 2014; Kawasaki ym. 2019). Kasvatuksessa lämmöntarve liittyy pääasiassa tilan lämmitykseen. Vesterlund ym. (2024) tutkivat konesalien hukkalämmön hyödyntämistä optimoimaan hyönteisten kasvatusolosuhteita. He havaitsivat, että lämmittämällä 20 C-asteinen kasvatustila hukkalämmöllä 30 C-asteiseksi keltajauhomatojen tuotantoaika puoliintui. Matalalämpöistä hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää kasvatusvaiheen lisäksi hyönteisten prosessointiin, esim. kuivatukseen, ennen lopullista käyttöä.

7 Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen teollisessa ekosysteemissä

Nykyisten teollisuuden, ruoantuotannon ja energiankäytön ja -tuotannon kestävyysaasteet edellyttävät uudenlaisia ratkaisuja, joissa tuotannon erilaisia sivuvirtoja, kuten hukkalämpöä, hyödynnetään tehokkaasti. Esimerkiksi alueellisesti eriytyneessä tai erikoistuneessa ruoantuotannossa resurssien käyttö ja ravinteiden kierrätys on usein tehotonta. Tulevaisuuden ruoantuotanto Suomessa edellyttääkin tuotannon kotimaisuusasteen nostamista eri toimialojen yhteistyötä ja alueellisia biokiertoalouden ekosysteemejä kehittämällä (Kaukovirta & Karikallio 2023).

Datakeskukset tuottavat merkittäviä määriä matalalämpöistä hukkalämpöä, jota tämänkin kirjallisuuskatsauksen perusteella voitaisiin hyödyntää monipuolisesti eri sektoreilla. Datakeskusten hukkalämpö tarjoaa mahdollisuuden rakentaa ympärilleen ns. teollisia ekosysteemejä, jossa eri toimialat integroituvat kiertoalouden periaatteiden mukaisesti ja saavuttavat synergiaetuja resurssien jakamisen ja yhteiskäytön kautta (Reyes-Lúa ym. 2021). Hukkalämmön hyödyntäminen voisi merkittävästi parantaa eri toimijoiden energiankäytön tehokkuutta, vähentää päästöjä ja luoda uusia liiketoimintamahdollisuuksia datakeskusten läheisyyteen.

Sisällyttämällä esimerkiksi ruoantuotanto osaksi paikallista teollista ekosysteemiä ja kehittämällä eri alojen yhteistyötä voidaan parantaa ravinteiden kierrätystä, lisätä resurssitehokkuutta ja vähentää ympäristökuormitusta (Leppänen ym. 2018, Lokka ym. 2021). Esimerkiksi yhdistämällä kasvihuonetuotanto vesiviljelyyn siten, että kalojen tuottamat ravinteikkaat jätevedet lannoittavat kasveja, ja kasvit puolestaan puhdistavat veden takaisin kaloille, voitaisiin edistää synergiaetuja ja vahvistaa kotimaisen tuotannon kilpailukykyä. Samoin esimerkiksi biokaasulaitokset voivat toimia osana ekosysteemiä, hyödyntäen kasvin- ja kalanviljelyn orgaanisia sivuvirtoja raaka-aineena biopolttoaineiden tai kemikaalien tuotannossa.

Vaikka hukkalämmön hyödyntäminen tarjoaa merkittäviä etuja, siihen liittyy myös haasteita. Datakeskusten lämmöntuotanto on jatkuvaa, kun taas eri toimialojen lämmöntarve voi vaihdella vuodenaikojen mukaan. Esimerkiksi Suomen oloissa kasvihuonetuotannon ja kalanviljelyn lämmöntarve on suurimmillaan talvella ja olematon kesällä. Tähän vaihteluun voitaisiin vastata yhdistämällä useita erilaisia tuotantomuotoja, joiden lämmöntarve on eriaikainen, kuten esimerkiksi erilaiset kuivausprosessit tai muut elintarviketeollisuuden prosessit silloin kun kalan- ja kasvienkasvatus ei tarvitse lisälämpöä.

Teollisen ekosysteemin rakentaminen ja toiminta edellyttää eri sektoreiden välistä yhteistyötä sekä energian ja materiaalivirtojen integrointia. Infrastrukturi on suunniteltava niin, että hukkalämmön ja muiden resurssien hyödyntäminen on taloudellisesti ja teknisesti kannattavaa kaikille osapuolille. Tämä vaatii mittavia alkuinvestointeja, kuten lämpöverkkojen ja materiaalikierron hallintajärjestelmien rakentamista, mutta pitkällä aikavälillä ne voivat parantaa tuotannon tehokkuutta ja kannattavuutta.

Esimerkkejä nimenomaan datakeskusten ympärille suunnitelluista ja/tai toteutetuista ekosysteemistä. Ruotsissa WA3RM ja EcoDataCenter ovat kehittäneet teollista kiertotalouskonseptia, jossa yhdistyvät energiatehokkuus ja monialainen tuotanto. Lähitulevaisuudessa tarvitaan lisätutkimusta ja pilotoiteja, jotta eri tuotantomallien yhdistämisen hyödyt ja haasteet voidaan arvioida tarkemmin, ja esimerkiksi lämpöjärjestelmät suunnitella mahdollisimman kustannustehokkaiksi. Kansainväliset esimerkit kuitenkin jo osoittavat, että tällaisilla konsepteilla voi olla laaja soveltamispotentiaali myös Suomessa. Konesalien hukkalämmöt hyödyksi -hankkeessa suunnitellaan teollista ekosysteemiä Kajaanin Otanmäen alueelle.

8 Hukkalämmön hyödyntäminen muissa kohteissa

Tässä kirjallisuuskatsauksessa on käyty läpi hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia kaukolämmöntuotannossa, jäähdytyksessä, sähköntuotannossa, biomassojen kuivauksessa, biokaasun tuotannossa sekä ruoantuotannossa.

Hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää myös vielä tätä laajemmin esimerkiksi sellaisessa prosessiteollisuudessa, jossa on tarve lisälämmölle. Tässä kirjallisuuskatsauksessa on kuvattu datakeskusten hukkalämmön ominaisuuksia, joiden avulla teollisuuden toimijat pystyvät itsekin arvioimaan lämmön soveltuvuutta omaan prosessiin. Avainasemassa on tietysti datakeskusten sijainti ja se, voidaanko uusi teollisuus sijoittaa datakeskuksen hukkalämmön äärelle.

Esimerkiksi hukkalämmön käyttömahdollisuuksia voisi olla lääketeollisuudessa, puolijohdeteollisuudessa, panimoilla, tislamoissa sekä suolojen poistossa vedestä.

9 Yhteenveto ja pohdinta

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen on noussut yhdeksi keskeiseksi tutkimuskohteeksi niin energiatehokkuuden kuin kestäväen kehityksen näkökulmasta. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että datakeskusten tuottama hukkalämpö on merkittävä, mutta vielä alihyödynnetty energialähde, jonka integrointi osaksi laajempia ekosysteemejä edellyttää uusia teknologisia ja liiketoiminnallisia ratkaisuja. Hukkalämmön talteenoton ja hyödyntämisen kannalta ratkaisevia tekijöitä ovat sen lämpötila, jatkuvuus sekä teknisten ja taloudellisten esteiden ylittäminen. Erityisesti nestepohjaiset jäähdytysratkaisut tarjoavat korkeampia lämpötiloja, mikä mahdollistaa tehokkaamman lämmöntalteenoton ja monipuolisemmat sovellusmahdollisuudet.

Vaikka tekniset valmiudet hukkalämmön hyödyntämiseen ovat kehittyneet merkittävästi, käytännön soveltaminen kohtaa edelleen haasteita. Yksi keskeisimmistä ongelmista on infrastruktuurin ja lämmön jakelun epäyhtenäisyys, erityisesti alueilla, joilla ei ole valmista kaukolämpöverkkoa tai joissa lämmön kuluttajia on vähän, tai ne ovat maantieteellisesti hajautuneita. Tämä viittaa tarpeeseen kehittää paikallisia ja modulaarisia energian varastointi- ja jakeluratkaisuja, esimerkiksi lämpöakkuja ja kausivarastoja, jotka mahdollistavat joustavamman hyödyntämisen. Lisäksi tutkimusta tarvitaan datakeskusten sijoittelun optimointiin, jotta hukkalämpöä voidaan hyödyntää suoraan energiantarpeessa olevilla alueilla.

Toinen merkittävä tutkimustarve liittyy liiketoimintamalleihin ja kannustinjärjestelmiin. Tällä hetkellä markkinat eivät tue riittävästi hukkalämmön hyödyntämistä, ja siksi on kriittistä kehittää taloudellisesti kestäviä yhteistyömalleja datakeskusten, energiayhtiöiden ja teollisten toimijoiden välille. Erityisesti yhteiset investointimallit ja joustavat energianhinnoitteluratkaisut voisivat luoda edellytyksiä laajamittaiselle hyödyntämiselle. Tämä edellyttää käytännönläheistä analyysia muun muassa investointikustannusten jakamisesta, riskienhallintamekanismeista ja lämpöenergian hinnoittelun periaatteista.

Poliittisten ohjauskeinojen ja sääntelyn rooli tässä kehityksessä on keskeinen, ja jatkotutkimusta tarvitaan siitä, miten lainsäädännölliset ja taloudelliset kannustimet voivat edistää datakeskusten hukkalämmön käyttöönottoa laajemmin. Erityistä huolta datakeskusalan tulevaisuudesta on herättänyt tammikuussa 2025 valtiovarainministerin tekemä ehdotus alemman sähköveroluokan poistamisesta datakeskuksilta. Nykyinen alempi veroluokka, joka on myös muun teollisuuden yleinen veroluokka, on ollut merkittävä vetovoimatekijä datakeskusten sijoittumisessa Suomeen, ja

sen poistaminen voisi paitsi heikentää Suomen kilpailukykyä, myös vähentää investointihalukkuutta. Tämä puolestaan voi vaikuttaa myös hukkalämmön hyödyntämiseen, sillä mahdollisuudet lämmön talteenottoon voidaan huomioida tehokkaammin nimenomaan uusien datakeskusten suunnittelun ja rakentamisen yhteydessä.

Mikäli veroetu poistetaan ilman korvaavia ohjauskeinoja, vaarana on, että alalle syntyy epävarmuutta, joka heijastuu koko energiatehokkuuspotentiaalin hyödyntämiseen. Tästä syystä on tärkeää, että mahdolliset veromuutokset tehdään osana laajempaa strategista tarkastelua, jossa huomioidaan myös ilmasto- ja energiatavoitteet sekä paikalliset elinvoimahyödyt, kuten hukkalämmön tarjoamat mahdollisuudet alueelliseen energiantuotantoon ja teollisiin symbiooseihin. Lisäksi on huomioitava datakeskusten koko elinkaaren työllisyysvaikutukset. Yhtenä kehittämiskohteenä voidaan nähdä syvällisempi analyysi siitä, miten ohjaukseen ja säätelyyn liittyvät toimet valtion taholta todella vaikuttavat investointipäätökseen ja hukkalämmön hyödyntämiseen.

Ohjauskeinoja voi myös kehittää monipuolisemmiksi ja paremmin kohdistetuiksi. Yksi vaihtoehto olisi tukea investointeja, jotka edistävät hukkalämmön talteenottoa ja hyödyntämistä, esimerkiksi energiainvestointitukien tai nopeutettujen poistojen muodossa. Myös alueellisia tai kunnallisia kannustimia voitaisiin harkita tilanteissa, joissa hukkalämpö hyödynnetään paikallisesti esimerkiksi kaukolämpöverkossa tai teollisissa ekosysteemeissä. Lisäksi voisi olla perusteltua asettaa tiettyjä laajempia velvoitteita suuritehoisille uusille datakeskuksille lämmön talteenoton osalta; erityisesti näin voitaisiin toimia kryptovaluuttalouhintakeskuksien osalta, joiden yhteiskunnallinen merkitys on muutoin vähäinen.

Vaikuttaa siltä, että yhä useammat datakeskustoimijat asettavat tulevaisuuden kestävyystavoitteekseen sen, että toiminnan kokonaisilmastovaikutukset tai kokonaispäästöt ovat nollassa. Esimerkiksi Google on ilmoittanut pyrkivänsä ns. nettonollaan vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteen saavuttaminen ei kuitenkaan välttämättä onnistu pelkästään uusiutuvan energian käytöllä, sisäisen energiatehokkuuden parantamisella ja hiilikompensaatioilla. Ratkaisevaa tulee olemaan hukkalämmön tehokas hyödyntäminen ja datakeskusten tiivis osallistuminen paikallisiin energiainfrastruktuureihin ja resurssivirtoihin. Ilman näitä integraatioita datakeskukset jäävät helposti energiantuotannosta ja -käytöstä irrallisiksi yksiköiksi, joiden ympäristövaikutuksia on vaikea hallita kokonaisvaltaisesti.

Nettonollatavoitteet voivat siten toimia tärkeänä ajurina sekä teknologiselle kehitykselle että uusien yhteistyömallien syntymiselle. Nettonollapyrkimysten onnistuminen edellyttää myös mittamista ja läpinäkyvää raportointia: toimijoiden on sitouduttava yhteismitallisiin mittareihin, kuten

GHG Protocol -standardeihin, jotta tavoitteiden etenemistä voidaan seurata luotettavasti. GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) on maailmanlaajuisesti käytetyin standardi kasvihuonekaasupäästöjen mittaamiseen ja raportointiin. Se jakaa päästöt kolmeen luokkaan: suorat päästöt (Scope 1), ostetun energian tuotannosta aiheutuvat päästöt (Scope 2) ja muut epäsuorat päästöt, kuten toimitusketjun vaikutukset (Scope 3). GHG Protocol tarjoaa yhteisen viitekehyksen organisaatioille päästöjen kartoittamiseen, vertailuun ja ilmastotavoitteiden seurantaan.

Datakeskuksille nettonollatavoitteet voivat toimia kilpailuetuna, sillä ympäristövastuullisuutta painottavat asiakkaat ja sidosryhmät suosivat datakeskuksia, jotka osoittavat konkreettista sitoutumista päästövähennyksiin ja resurssitehokkuuteen. Näiden kehityskulkujen rinnalla myös sääntely tiukkenee, koska EU:n uusi energiatehokkuusdirektiivi (Energy Efficiency Directive, EED) asettaa jatkossa velvoitteita suurille datakeskuksille mm. energiankulutuksen mittaamiseen, läpinäkyvään raportointiin ja hukkalämmön hyödyntämiseen. Direktiivin täytäntöönpano edellyttää aktiivista vuoropuhelua viranomaisten ja toimijoiden välillä sekä käytännön ohjeistusta, jotta se tukee aidosti energiatehokkuuden ja ilmastotavoitteiden saavuttamista ilman kohtuuttomia hallinnollisia taakkoja.

Tutkimuskirjallisuus osoittaa, että teknologiat, kuten orgaaninen Rankine-kierto (ORC) ja lämpöpumppuratkaisut, mahdollistavat hukkalämmön muuntamisen sähköksi tai sen lämpötilan nostamisen kaukolämpöverkon ja teollisten prosessien tarpeisiin. Lisäksi sorptioprosessit, kuten absorptio- ja adsorptiokylmälaitteet, ovat kehittymässä kohti energiatehokkaampia ja kaupallisesti kilpailukykyisempiä ratkaisuja. Tulevaisuuden tutkimuksen kannalta on tärkeää tutkia ja kehittää hybridijärjestelmiä, joissa yhdistetään sähköntuotanto, jäähdytys ja lämmön talteenotto samanaikaisesti, sekä selvittää niiden sovellettavuus erityyppisissä datakeskuksissa.

Digitaalisten kaksosten rooli energiajärjestelmien optimoinnissa on nousemassa keskeiseksi tutkimusalueeksi. Digitaaliset kaksoset voivat tarjota tarkkaa ja reaaliaikaista tietoa datakeskusten energiavirroista, mahdollistaen energiatehokkuuden ja hukkalämmön hyödyntämisen tarkemman suunnittelun ja hallinnan. Erityisesti simulaatiopohjaiset mallit voivat auttaa ennustamaan hukkalämmön saatavuutta ja sen soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin, kuten kaukolämpöverkkoihin ja teollisuuden prosesseihin. Jatkossa on tarpeen kehittää dynaamisia ja itseoppivia digitaalisten kaksosten järjestelmiä, jotka voivat mukautua muuttuviin olosuhteisiin ja optimoida hukkalämmön hyödyntämistä reaaliaikaisesti.

Vaikka tämä kirjallisuuskatsaus kattaa keskeisiä datakeskusten hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia, se ei ole kaikenkattava. On useita hukkalämmön hyödyntämissovelluksia, joita ei ole

tässä tarkasteltu syvällisesti. Muun muassa lääke- ja puolijohdeteollisuudessa on potentiaalia hyödyntää hukkalämpöä erilaisissa prosesseissa. Puolijohdeteollisuuden tuotantotilat vaativat erittäin tarkkaa lämpötilanhallintaa ja ilmankosteuden säätelyä, joihin hukkalämpöä voidaan käyttää tukemaan energiaintensiivisiä HVAC-järjestelmiä. Lääkealalla hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet liittyvät erityisesti prosessien lämmitykseen ja sterilointiin, joissa tarvitaan vaikkaita lämpötiloja. Näiden teollisuudenalojen erityisvaatimukset edellyttävät kuitenkin tarkempaa tutkimusta ja toteutettavien ratkaisujen validointia ennen laajamittaista käyttöönottoa, eikä toistaiseksi tutkimuskirjallisuus ota kantaa näiden toteutettavuuteen tai rajoitteisiin.

Koska datakeskuksiin liittyvä tutkimus etenee nopeasti ja uusia innovaatioita julkaistaan jatkuvasti, on välttämätöntä seurata alan kehitystä määrätietoisesti ja kriittisesti. Tämä kirjallisuuskatseaus osoittaa, että vaikka hukkalämmön hyödyntämiseen liittyvä tietämys on laajentunut, monet keskeiset kysymykset, erityisesti liiketoimintamallien, energiajärjestelmien integraation ja teknologisten ratkaisujen tehokkuuden osalta, ovat edelleen aika alkutekijöissään ja vaativat tarkempaa analyysiä. Tulevaisuuden tutkimuksen on tärkeää pysyä ajantasaisena ja huomioida paitsi teknologiset edistysaskeleet myös muuttuvat säätely-ympäristöt ja energiamarkkinoiden kehitys. Ilman jatkuvaa seuranta ja uusien löydösten kriittistä arviointia on vaarana, että päätökset perustuvat vanhentuneisiin tai epätäydellisiin tietoihin. Tämä korostaa tarpeellisuutta systemaattisille tutkimusohjelmille ja monitieteisille yhteistyöhankkeille, joiden avulla voidaan yhdistää tekninen osaaminen, taloudellinen analyysi ja energiapoliittiset näkökulmat kokonaisvaltaiseksi lähestymistavaksi.

Lähteet

AFRY. (2020). Energiatehokkuusdirektiivin mukainen selvitys hukkalämmön potentiaalista ja kustannushyötyanalyysi tehokkaasta lämmityksestä: Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle 9/2020. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. https://tem.fi/documents/1410877/176066306/EEDselvitys+%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppuraportti+2020.pdf/88a0e63b-e2b6-eef9-1b4c-8c5411a0e531/EEDselvitys+%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppuraportti+2020.pdf?t=1693995295812

AFRY. (N.d.). *Datakeskusten hukkalämmöt talteen Fortumin kaukolämmöksi*. AFRY. [Verkojulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta <https://afry.com/fi-fi/projektit/datakeskusten-hukkalammot-talteen-fortumin-kaukolammoksi>

Agriport A7. (N.d.). *Glastuinbouwbedrijven locatie*. [Verkojulkaisu] Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://www.agriporta7.nl/glastuinbouwbedrijven>

Ahlqvist, E. (2017). Nestejäähdytyksen käyttömahdollisuudet data centreissä. AMK-Opinnäytetyö. Metropolia-ammattikorkeakoulu <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017060111752>

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., & Korhonen, J. (2016). *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia* (VTT Technology, s. 259). [Verkojulkaisu]. VTT Technical Research Centre of Finland. Viitattu 24.10.2024 <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2>

Al-Sayyabin, A., Mota-Babilon, A., & Navarro-Esbrin, J. (2023). Renewable and waste heat applications for heating, cooling, and power. *Energy Conversion and Management*, 291, Article 117253. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117253>

Aluehallintovirasto. (2016). *Lupapäätös Nro 22/2016/1: Kajaanin Peuraniemen jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Kajaani*. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto. Viitattu 7.3.2025 osoitteesta <https://ylupa.avi.fi/fi-FI/asia/891039>

Amiri, L., Madadian, E., Bahrani, N., & Ghoreishi-Madiseh, S. (2021). Techno-economic analysis of waste heat utilization in data centers: application of absorption chiller systems. *Energies*, 14(9), 2433. <https://doi.org/10.3390/en14092433>

Atashbozorg, D., Arasteh, A. M., Salehi, G., & Azad, M. T. (2022). Analysis of different organic Rankine and Kalina cycles for waste heat recovery in the iron and steel industry. *ACS Omega*, 7(50), 46099–46117. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03922>

Atle-Hagaseth, S. (2021). *Data centers' contribution to a true circular economy?* [Verkkajulkaisu]. Viitattu 23.10.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/data-centers-contribution-to-a-true-circular-economy/>

Awiszus, S., Meissner, K., Reyer, S., & Müller, J. (2018). Utilization of digestate in a convective hot air dryer with integrated nitrogen recovery. *LANDTECHNIK*, 73, 106–115. <https://doi.org/10.15150/lt.2018.3187>

Berilaj, K. (2020). Energiavarastot. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160583/KANDI2020_KrenareBerilaj.pdf;jsessionid=009418910633612C2F787FC7D8D0F9A9?sequence=

Bioenergia. (N.d.). Maa- ja metsätalousministeriön internetsivut [Verkkajulkaisu]. Viitattu 27.2.2024, osoitteesta. <https://mmm.fi/biotalous/bioenergia>

Borland, P.L., McDonnell, K., & Harty, M. (2023). Assessment of the potential to use the expelled heat energy from a typical data centre in Ireland for alternative farming methods. *Energies*, 16(18), 6704. <https://doi.org/10.3390/en16186704>

Bournefour, O., Ouadha, A., & Addad, Y. (2020). An exergy analysis of various layouts of ORC-VCC systems for usage in waste heat recovery onboard ships. *Maritime Systems and Ocean Technology*, 15, (1) 26–44. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00072-6>

Business Wire. (2015). The Foundry Project is the first, self-sustaining, symbiotic agricultural ecosystem to harvest heat emitted from underground data center. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.businesswire.com/news/home/20150520005057/en/The-Foundry-Project-is-the-First-Self-Sustaining-Symbiotic-Agricultural-Ecosystem-to-Harvest-Heat-Emitted-from-Underground-Data-Center>

Brown, S. (2024). Could Algae Be the Key to Data Center Sustainability? [Verkkajulkaisu] Viitattu 9.4.2025, osoitteesta <https://www.datacenterknowledge.com/sustainability/could-algae-be-the-key-to-data-center-sustainability->

Chang, S. T., & Hayes, W. A. (1978). *The biology and cultivation of edible mushrooms*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-10484-9>

Chernicoff, D. (2015). *Using data center waste heat to warm a fish farm*. ZDNet. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta. <https://www.zdnet.com/article/using-data-center-waste-heat-to-warm-a-fish-farm/>

Costa-Neto, E. M., & Dunkel, F. V. (2016). Insects as food: History, culture, and modern use around the world. In A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos, & M. G. Rojas (Eds.), *Insects as sustainable food ingredients* (pp. 29–60). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00002-8>

Containing Greens. (N.d.). *Containing greens*. [Verkkójulkaisu]. Luulaja: Containing Greens Ab. Viitattu 11.11.2024, osoitteesta <https://containinggreens.se/>

Data Center Forum. (2021). New requirements for waste heat from data centers [Verkkójulkaisu]. Norway. Viitattu 6.9.2024, osoitteesta <https://www.datacenter-forum.com/datacenter-forum/norway-new-requirements-for-waste-heat-from-data-centers>

Data4 Group. (2024). The University of Paris-Saclay and Data4 launch a pilot project to create the world's first bio-circular data centre. [Verkkójulkaisu]. Viitattu 9.4.2025, osoitteesta <https://www.data4group.com/en/news-data4/the-university-of-paris-saclay-and-data4-launch-a-pilot-project-to-create-the-worlds-first-bio-circular-data-centre>

Ding, T., Bianchi, S., Ganne-Chédeville, C., Kilpeläinen, P., Haapala, A., & Rätty, T. (2017). Life cycle assessment of tannin extraction from spruce bark. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10, 807. <https://doi.org/10.3832/ifor2342-010>

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. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 622-638. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>

Ebrahimi, K., Jones, G., & Fleischer, A. (2015). Thermo-economic analysis of steady-state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration. *Applied Energy*, 139, 384-397. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.067>

Elerath, J. G., & Schindler, J. (2020). "Temperature and reliability in hard disk drives: A field study." *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 20(3), 425–432. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2020.3010244>

Energiateollisuus Ry. (2024). Energiavuosi 2023, kaukolämpö. [Verkkójulkaisu]. Viitattu 4.3.2024, osoitteesta. https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/01/Kaukolampovuosi-2023_ennakkograafit.pdf

Energiateollisuus. (2021). *Rakennusten kaukolämmitys: Määräykset ja ohjeet K1/2021*. Energiateollisuus ry. [Verkkójulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta https://energia.fi/wp-content/uploads/2016/08/Julkaistu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitys_Maaraykset_ja_ohjeet_pdf-1.pdf

Energiavirasto. (2023). *Datakeskusten velvoitteet: Datakeskusten tietojen julkistaminen ja tietojen raportoiminen EU:n datakeskustietokantaan*. Energiavirasto [Verkkajulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta <https://energiavirasto.fi/-/datakeskusten-tietojen-raportointi-eurooppalaiseen-tietokantaan-on-kaynnistynyt>

Euroopan parlamentti. (2018). Uusiutuva energia: Euroopan kunnianhimoiset tavoitteet. Päivitetty 20. maaliskuuta 2024. Viitattu 3.12.2024, osoitteesta <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20171124STO88813/uusiutuva-energia-euroopan-kunnianhimoiset-tavoitteet>

Euroopan parlamentti & neuvosto. (2023). Direktiivi (EU) 2023/1791, annettu 13 päivänä syyskuuta 2023, energiatehokkuudesta ja asetuksen (EU) 2023/955 muuttamisesta. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>

FAO. (2024). *Global aquaculture production quantity (1950–2022)*. Viitattu 10.2.2025. osoitteessa https://www.fao.org/fishery/statistics-query/zh/aquaculture/aquaculture_quantity

Feng, S.; Cheng, S.; Yuan, Z.; Leitch, M. ja Xu, C. (2013). Valorization of bark for chemicals and materials: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 560–578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024>

Finlex. (1996). Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta (nro 1260/1996). Viitattu 21.10, osoitteesta. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961260>.

Fish Farming Expert. (2021). *9,000-tonne on-land trout farm to use waste heat from data centre* [Verkkajulkaisu]. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.fishfarmingexpert.com/dc2-telemark-green-mountain-data-centre-hima-seafood/9000-tonne-on-land-trout-farm-to-use-waste-heat-from-data-centre/1138752>

Fowles, T. M., & Nansen, C. (2020). Insect-based bioconversion: Value from food waste. In E. Närvänen, N. Mesiranta, M. Mattila, & A. Heikkinen (Eds.), *Food waste management: Solving the wicked problem* (pp. 321–346). Springer International Publishing.

Fraga-Corral, M.; García-Oliveira, P.; Pereira, A. G.; Lourenço-Lopes, C.; Jimenez-Lopez, C.; Prieto, M. A. ja Simal-Gandara, J. (2020). Technological Application of Tannin-Based Extracts, *Molecules*, 25, 614. <https://doi.org/10.3390/molecules25030614>

Fraser-Harris, A., McDermott, C. I., Receveur, M., Mouli-Castillo, J., Todd, F., Cartwright-Taylor, A., ... & Parsons, M. (2022). The Geobattery concept: a geothermal circular heat network for the

sustainable development of near surface low enthalpy geothermal energy to decarbonise heating. *Earth Science, Systems and Society*, 2, 10047. Viitattu 5.3.2024, osoitteesta <https://www.es-cubed.org/articles/10.3389/esss.2022.10047/full>.

Från Sverige. (2024). *Nya siffror visar Sveriges försörjningsförmåga 2024*. Stockholm: Svensk-märkning Ab. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://fransverige.se/aktuellt/nya-siffror-visar-sveriges-forsorjningsformaga-2>

Genesis Digital Assets. (N.d.). *Greenhouse project*. Houston: Genesis Digital Assets. [Verkkajulkaisu] Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://genesisdigitalassets.com/greenhouse-project/>

Global Seafood Alliance. (2023). *Responsible Seafood Innovation Award finalist Cresponix is rethinking land-based shrimp farming*. [Verkkajulkaisu] Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.globalseafood.org/advocate/responsible-seafood-innovation-award-finalist-cresponix-is-rethinking-land-based-shrimp-farming/>

Godfriaux, B. L., Guerra, C. R., & Resh, R. E. (1977). Venture analyses for intensive waste heat aquaculture. In *Proceedings of the annual meeting-World Mariculture Society* (Vol. 8, No. 1-4, pp. 707-722). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1977.tb00154.x>

Granlund. (2023). Datakeskusten hukkalämmöissä piilee huikkea potentiaali. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 10.2.2025, osoitteesta https://www.granlund.fi/uutinen/datakeskusten-hukkalammoissa-piilee-huikkea-potentiaali/?utm_source=chatgpt.com

Green Mountain. (2021a). The world's largest land-based trout farm will use waste heat from data center [Verkkajulkaisu]. Viitattu 20.10.2024, osoitteesta <https://press.greenmountain.no/pressreleases/the-worlds-largest-land-based-trout-farm-will-use-waste-heat-from-data-center-3112387>

Green Mountain. (2021b). *Land-based lobster farming will use waste heat from data center* [Verkkajulkaisu]. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://press.greenmountain.no/pressreleases/land-based-lobster-farming-will-use-waste-heat-from-data-center-3107932>

Green Mountain. (N.d.). *Pilot projects on data center heat reuse* [Verkkajulkaisu]. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta. <https://greenmountain.no/why-green-mountain/heat-reuse/>

Grimm, D., & Wösten, H. A. B. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 7795–7803. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>

Guerra, C. R., Resh, R. E., Godfriaux, B. L., & Stephens, C. A. (1979). Venture Analyses for a Proposed Commercial Waste Heat Aquaculture Facility. In *Proceedings of the World Mariculture Society* (Vol. 10, No. 1-4, pp. 28-38). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1979.tb00005.x>

Gupta, R., & Puri, I. (2021). Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiller: Technical and economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 236, 114576. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114576>

Gyland, T. R. (2021). Tackling the many challenges of data center heat re-use and what we learned along the way. [Video] Datacenter Forum Oslo 2021. Viitattu 11.2.2024, osoitteesta. [Green Mountain Data Centre - Tor Kristian Gyland - Tackling the many challenges of data center heat re-use and what we learned along the way - OSLO 2021](https://www.datacenterforum.com/2021/02/11/tackling-the-many-challenges-of-data-center-heat-re-use-and-what-we-learned-along-the-way-oslo-2021/)

Hagaseth, A. (2021). *Data centers' contribution to a true circular economy?* Viitattu 22.10.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/data-centers-contribution-to-a-true-circular-economy/>

Hajian, E., Huber, A. J., Hansson, L., & Sandberg, D. (2024). High temperature drying of sawn timber—A review. *Drying Technology*, 42, 1397–1414. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2365858>

Hanan, J. J. (1998). *Greenhouses: Advanced technology for protected horticulture*. Boca Raton, FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203719824>

Harmaala, P. (2023) Vihreä datasali tasapainottaa energiaverkkoja. Calefa. [Verkköjulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/orgaaniset-liuottimet?utm_source=chatgpt.com

Hayes, A., & Johnson, W. C. (1980). *Geothermal aquaculture: A guide to freshwater prawn culture*. Oregon Institute of Technology, Geo-Heat Utilization Center. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1181673/>

Heckmann, R. A., Winget, R. N., Infanger, R. C., Mickelsen, R. W., & Hendersen, J. M. (1984). Warm water aquaculture using waste heat and water from zero discharge power plants in the Great Basin. *The Great Basin Naturalist*, 75-82. <https://www.jstor.org/stable/41712044>

- Hiilineutraali Suomi. (2024). *Lappeenranta: Uuden tekniikan lämpövarasto kaukolämpöverkkoon* [Verkkójulkaisu]. Viitattu 2.10.2024, osoitteesta [https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Cane-mure/Osahankkeet/Lappeenranta/Lappeenranta_Uuden_tekniikan_lampovarast\(49430\)](https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Cane-mure/Osahankkeet/Lappeenranta/Lappeenranta_Uuden_tekniikan_lampovarast(49430))
- Hiironen, O. (2023). *ATES – Pohjavesivarantojen hyödyntäminen lämmön ja kylmän varastoinnissa. AMK-Opinnäytetyö*. Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 31.3.2025, osoitteesta [ATES – POHJAVESIVARANTOJEN HYÖDYNTÄMINEN LÄMMÖN JA KYLMÄN VARASTOINNISSA](#)
- Holmberg, A., & Stenström, S. (2014). Dewatering and drying of bark. *International Journal of Energy Engineering*, 4, 8–16. DOI. 10.5923/j.ijee.201401.02
- Huang, K., Li, X., & Zhang, T. (2020). "Characterizing DRAM and HBM thermal sensitivity in GPUs." *Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, 102–113. <https://doi.org/10.1109/HPCA47549.2020.00019>
- Härkönen, L., Hyvärinen, P., Mehtätalo, L., & Vainikka, A. (2017). Growth, survival and interspecific social learning in the first hatchery generation of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*). *Aquaculture*, 466, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.027>
- Issah, A.-A., Kabera, T., & Kemausuor, F. (2020). Biogas optimisation processes and effluent quality: A review. *Biomass and Bioenergy*, 133, 105449. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105449>
- Issah, A.-A., Kabera, T., & Kemausuor, F. (2020). Biokaasun optimointiprosessit ja jäteveden laatu: Katsaus. *Biomass and Bioenergy*, 133, 105449. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105449>
- Jablonsky, M.; Nosalova, J.; Sladkova, A.; Haz, A.; Kreps, F.; Valka, J.; Miertus, S.; Frečer, V.; Ondrejovic, M.; Sima, J. ja Surina, I. (2017). Valorisation of softwood bark through extraction of utilizable chemicals. A review, *Biotechnology Advances*, 35, 726–750. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.07.007>
- Jiang, X., Dong, S., Liu, R., Huang, M., Dong, K., Ge, J., Gao, Q., & Zhou, Y. (2021). Effects of temperature, dissolved oxygen, and their interaction on the growth performance and condition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Thermal Biology*, 98, 102928. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102928>
- Jobling, M. (1994). *Fish Bioenergetics*. Chapman & Hall, London, 309 p. Viitattu 11.3.2025 osoitteesta. https://www.google.fi/books/edition/Fish_Bioenergetics/-i3CvrSBSScC?hl=en

Judge, P. (2021). Crustacean cultivation: Lobsters and data centers: A land-based farm has finally produced plate-sized lobsters—thanks to a data center. DCD. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/crustacean-cultivation-lobsters-and-data-centers/>

Judge, P. (2022). Data centers cooled by snow. Lontoo: Data Center Dynamics Ltd. Viitattu 13.11.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/data-centers-cooled-by-snow/>

Judge, P. (2022). *EcoDataCenter to reuse heat in fish farms and greenhouses*. DCD. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/ecodatacenter-to-reuse-heat-in-fish-farms-and-greenhouses/>

Judge, P. (2022). *Japanese snow-cooled data center opens an eel farm: Hot aisles meet warm eels*. DCD. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/japanese-snow-cooled-data-center-opens-an-eel-farm/>

Jung, S. P., Jung, R., Choi, S., Jang, H., & Park, J. (2022). Current and prospects of waste heat utilization and cooling technology in data centers. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, 44(11), 493-503. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2022.44.11.493>

Junnila, L. (2017). Valkojalkakatkan (*Litopenaeus vannamei*) soveltuvuus viljelykäyttöön Suomessa. AMK- Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017121220758>

Jyske, T., Liimatainen, J., Tienaho, J., Brännström, H., Aoki, D., Kuroda, K., Reshamwala, D., Kunnas, S., Halmemies, E., Nakayama, E., Kilpeläinen, P., Ora, A., Kaseva, J., Hellström, J., Marjomäki, V. S., Karonen, M., & Fukushima, K. (2023). Inspired by nature: Fiber networks functionalized with tannic acid and condensed tannin-rich extracts of Norway spruce bark show antimicrobial efficacy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1171908>

Kajaanin Vesi. (2025). *Pöytäkirja: § 35 Kajaanin Vesi -liikelaitoksen johtokunnan tiedoksi merkitävät asiat*. Viitattu 7.3.2025, osoitteesta [https://kajaani.cloudnc.fi/fi-FI/Toimielimet/Kajaanin-Vesi-liikelaitoksen-johtokunta/Kokous-31102024/Kajaanin-Vesi-liikelaitoksen-johtokunnan\(44188\)](https://kajaani.cloudnc.fi/fi-FI/Toimielimet/Kajaanin-Vesi-liikelaitoksen-johtokunta/Kokous-31102024/Kajaanin-Vesi-liikelaitoksen-johtokunnan(44188))

Kaukovirta, A., & Karikallio, H. (2023). Poliitikasuositus: Suomalaista ruoantuotantoa on kehitettävä kokonaisuutena - Luken suositukset tulevaisuuden ruoantuotannon kestäviksi kehitysoiluiksi. Luonnonvarakeskus Policy Brief 2/2023. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-602-3>

Kawasaki, K., Hashimoto, Y., Hori, A., Kawasaki, T., Hirayasu, H., Iwase, S., Hashizume, A., Ido, A., Miura, C., Miura, T., et al. (2019). Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and prepupae raised on household organic waste, as potential ingredients for poultry feed. *Animals*, 9(3), 98. <http://dx.doi.org/10.3390/ani9030098>

Khmeleva, N. N., Kulesh, V. F., & Guiguiniak, Y. G. (1989). Growth potentialities of the giant tropical prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (De Man), in waste-heat discharge waters of a thermoelectric power station. *Aquaculture*, 81(2), 111–117. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(89\)90236-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90236-6)

Koskela, J., Kankainen, M., Setälä, J., Naukkarinen, M. & Vielma, J. (2007). Kuhan ruokakalakasvatuksen kannattavuus verkkoallaskasvatuksessa ja lämminvesiviljelyssä. Kala- ja riistaraportteja 403, 27s. Viitattu 11.3.2025 osoitteesta. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/536775/raportti403.pdf?sequence=1>

Koskela, J., Setälä, J., Saarni, K. & Kankainen, M. (2005). Esiselvitys kuhan kasvatuksen mahdollisuuksista. Kala- ja riistaraportteja nro 348 , 19 s. Viitattu 11.3.2025 osoitteesta. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/536721/raportti348.pdf?sequence=1>

Koskela, J., Vielma, J., Vehviläinen, H., Riihimäki, J., Pellinen, M., Bomberg, J. & Kytömaa, L. (2019). Kirjolohen yhdistetty kiertovesi- ja merikasvatus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 28/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 18 <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-751-0>

Koskela, J.; Määttä, V.; Vielma, J.; Rahkonen, R.; Forsman, L.; Setälä, J. & Honkanen, A. (2002). Siian kasvatusta ruokakalaksi. Helsinki: Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. Viitattu 11.3.2025 osoitteesta. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/537238/951-76-359-X-siian-kasvatus-2002-opt.pdf?sequence=3>

Kumla, J., Suwannarach, N., & Lumyong, S. (2020). Edible mushrooms: An overview of cultivation and environmental sustainability. *Sustainability*, 12(22), 9170. <https://doi.org/10.3390/su12229170>

Kupczak, P., & Kulig, S. (2024). The use of algae as carbon dioxide absorber in heat production industry. *Archives of Environmental Protection*, 13–18. <https://doi.org/10.24425/aep.2024.149428>

Kätkä, E., & Dunnavant, J. (N.d). Innovoinnin merkitys datenergiatehokInnovoinnin merkitys datakeskuksissa – miten mittauksen tarkkuus auttaamaan energiategokkuuden. [Verkojulkaisu] Asian-tuntija-artikkeli Vaisala. Viitattu 4.4.2025, osoitteesta <https://www.vaisala.com/fi/expert-article/data-center-innovation-how-measurement-accuracy-enables-energy-efficiency>

Leffler, R., Bradshaw, C., Groll, E., & Garimella, S. (2012). Alternative heat rejection methods for power plants. *Applied Energy*, 92, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.023>

Mohler, D., Wilson, M., Fan, Z., Groppo, J., & Crocker, M. (2019). Beneficial reuse of industrial CO₂ emissions using a microalgae photobioreactor: Waste heat utilization assessment. *Energies*, 12(13), 2634. <https://doi.org/10.3390/en12132634>

Porphy, S., & Farid, M. (2012). Feasibility study for production of biofuel and chemicals from marine microalgae *Nannochloropsis* sp. based on basic mass and energy analysis. *ISRN Renewable Energy*, 2012, 1–11. <https://doi.org/10.5402/2012/156824>

Vares, S., Klobut, K., & Itänen, A. (2014). Waste as a source for district heat production and greenhouse gas reduction: A case study. <https://doi.org/10.2495/esus140741>

Kymäläinen, M., & Pakarinen, O. (2015). *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeen ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1>

Lampila, J. (2017). Mäntsälässä näytetään mallia hukkalämmön hyödyntämisessä. Kestävä *Energiatalous*. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. <https://www.energiatalous.fi/?p=1841>.

Laramore, S., Laramore, C., & Scarpa, J. (2001). Effect of low salinity on growth and survival of postlarvae and juvenile *Litopenaeus vannamei*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 32(4), 385–392. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-7345.2001.tb00464.x>

Leffler, R., Bradshaw, C., Groll, E., & Garimella, S. (2012). Alternative heat rejection methods for power plants. *Applied Energy*, 92, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.023>

Leppänen, T., Anttila, J., Lind, V., Haapasalo, H., Ulvi, T., Rytönen, A-M., Ihme, R., Vehviläinen, H., Jokinen, K., Kankainen, M., & Vielma, J. (2017). *Kalankasvatuksen ympärille rakennettava yritysekosysteemi – SIBE-projektin tapaustutkimus*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2018. Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-530-1>

Leppänen, T., Romka, R., & Tervonen, P. (2020). Utilization of data center waste heat in northern Ostrobothnia. *Tehnički glasnik*, 14(3), 312-317. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20210216493>

Li, Y., Zhou, W., & Wu, Q. (2022). "Thermal-aware management of NVMe SSDs in data centers." *Design, Automation & Test in Europe Conference (DATE)*, 865–870. <https://doi.org/10.23919/DAT54114.2022.9774552>

Ljungqvist, H. M., Mattsson, L., Risberg, M., & Vesterlund, M. (2020). Data center heated greenhouses, a matter for enhanced food self-sufficiency in arctic regions. *Energy*, 119169. Viitattu 11.11.2024, osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119169>

Luke. (2015). *Hakkuukertymä omistajaryhmittäin ja maakunnittain 2015–* [Muuttujina ovat maakunta, vuosi ja puutavaralaji]. Viitattu 11.10.2024, osoitteesta https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_02%20Rakenne%20ja%20tuotanto_10%20Hakkuukertyma%20ja%20puuston%20poistuma/01b_Hakkuukertyma_maak.px/table/tableViewLayout2/?loadedQueryId=61c7675c-c296-4676-8934-a25b88254060&timeType=top&time

Luonnonvarakeskus. (2024). *Suomen virallinen tilasto (SVT): Vesiviljely 2023* [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Viitattu 20.11.2024, osoitteesta <https://www.luke.fi/fi/tilastot/vesiviljely/vesiviljely-2023>

Lokka, J., Haapalainen, P., Rasi, S., Kotilainen, T., Seppänen, A.-M., Tampio, E., Pulkkinen, J., Tapio, M., Tuuri, M., Lehtinen, V., Ervasti, S., Timonen, T., Rasa, K., Välisuo, P., & Uotila, L. (2021). *Teollinen ekosysteemi energian- ja ruoantuotantoon*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 65 s. Viitattu 10.2.2025, osoitteesta https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/547812/luke-luobio_64_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Luostarinen, S. (2013). Biokaasuteknologiaa maataloilla 1: Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT.maatilakohtaiselta laitokselta. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-481-6>

Luostarinen, S., Pyykkönen, V., Winquist, E., Kässi, P., Grönroos, J., Manninen, K., & Rankinen, K. (2016). Maatilojen biokaasulaitokset: Mahdollisuudet, kannattavuus ja ympäristövaikutukset. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/532222>

Luostarinen, S., Tampio, E., Lehtoranta, S., Valve, H., Laakso, J., Pyykkönen, V., Markkanen, J., Heikkinen, J., Haapala, H., Lång, K., Timonen, K., & Silfver, T. (2023). *Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa* (Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja). Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164889?show=full>

Lööv, H., Stenberg, C., Wretling Clarin, A., & Nilsson, F. (2011). *Svensk växthusproduktion av tomatater. Konkurrenskraft och utvecklingsmöjligheter*. Jordbruksverket, Raportti 2011:17.

Maa- ja metsätalousministeriö. (N.d.). Biotalous ja bioenergia [Verkkajulkaisu]. *Maa- ja metsätalousministeriö*. <https://mmm.fi/biotalous/bioenergia>

Mahapatra, A. K., Chandel, S. S., & Ramasamy, M. (2020). Utilization of waste heat from industrial sources in mushroom cultivation: A techno-economic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110035. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110035>

Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J., & Manninen, K. (2015). *Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin*. Luonnonvarakeskus (Luke). <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-013-9>

Melkas, E. (2024). Lausunnot: Datakeskuksille velvollisuus julkaista tietoja energian käytöstään [Verkkajulkaisu]. Viitattu 2.10.2024, osoitteesta. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/lausunnolle-datakeskuksille-velvollisuus-julkaista-tietoja-energian-kaytostaan>

Microsoft. (N.d.). Project Natick: A case study in underwater data centers. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://natick.research.microsoft.com/>

Mihai, A., Florea, S., & Rusu, L. (2022). Cultivation parameters of *Pleurotus ostreatus* in different controlled environments. *Scientific Papers: Series B, Horticulture*, 66(1), 123–130.

Mohler, D., Wilson, M., Fan, Z., Groppo, J., & Crocker, M. (2019). Beneficial reuse of industrial CO₂ emissions using a microalgae photobioreactor: Waste heat utilization assessment. *Energies*, 12(13), 2634. <https://doi.org/10.3390/en12132634>

Moss, S. (2024). Microsoft confirms Project Natick underwater data center is no more. But says it will use learnings from the project. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/microsoft-confirms-project-natick-underwater-data-center-is-no-more/>

Moss, S. (2024). Microsoft patents high pressure data center. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/microsoft-patents-high-pressure-data-center/>

Mutanen, A. (2023). Saha- ja vaneriteollisuuden tuotanto ja vienti. Teoksessa J. Viitanen, A. Mutanen & S. Karvinen (toim.), *Metsäsektorin suhdannekatsaus 2023-2024* (ss. 22–31). Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-795-2>

Niva, P. (2021). Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpönä: Energiaverotuksen muutosten vaikutus kannattavuuteen. AMK-Opinnäytetyö. Lapin AMK. Pysyvä osoite. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021063016727>

Nummelin, J., Hankalin, V., & Raiko, M. (2014). *Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Polttoaineen kuivaustekniikat* (s. 56). Motiva. Viitattu 8.9.2024, osoitteesta https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_polttoaineen_kuivaustekniikat.10766.shtml

Nykänen, K. (2023). *Kantaverkon kehittämissuunnitelma*. Fingrid. Viitattu 28.3.2025, osoitteesta. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/is-kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2024--2033---ita-suomen-alueilaisuus.pdf>

Olin, L. (2023). Lämpösähköisen ilmiön mahdollisuudet hukkalämmön hyödyntämiseksi. AMK-opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202304215893>

Oulun yliopisto. (2024). *KAVENERO – Kaukolämpö- ja vesihuoltojärjestelmän energiatehokas sektori-integraatio kaupunkien vihreän siirtymän edistämiseksi*. Viitattu 18.3.2025, osoitteesta <https://www oulu.fi/fi/projektit/kavenero-kaukolampo-ja-vesihuoltojarjestelman-energiatehokas-sektori-integraatio-kaupunkien-vihrean>

Patronen, J., & Takala, J. (2021). *Lämpöpumput ja konesalit energiaverotuksessa*. AFRY – Raportti Valtionvarainministeriölle. Viitattu 25.10.2024, osoitteesta <https://vm.fi/documents/10623/307625/L%C3%A4mp%C3%B6pumput+ja+konesalit+energiaverotuksessa+loppuraportti.pdf/8c9f730f-0599-79a5-783c-4c69d75a8137/L%C3%A4mp%C3%B6pumput+ja+konesalit+energiaverotuksessa+loppuraportti.pdf?t=1642422528742>

Park, J. B., Choi, W. H., Kim, S. H., Jin, H. J., Han, Y. S., Lee, Y. S., & Kim, N. J. (2014). Developmental characteristics of *Tenebrio molitor* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) in different instars. *International Journal of Industrial Entomology*, 28(1), 5–9. <http://dx.doi.org/10.7852/ijie.2014.28.1.5>

- Park, S., Kim, H., & Lee, J. (2021). "Aging effects in flash memory at high temperatures." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(9), 4706–4712. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3094776>
- Petersen-Dyggve, N. (2024). *A review of non-combustible technologies in district heating production in Finland* Master's thesis. Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20241217103596>
- Piazza, M., Di Benedetto, N., & Sabatini, L. (2021). Influence of air humidity on mushroom development. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 19(2), 45–52.
- Pizzi, A., Tannins: Prospectives and Actual Industrial Applications, *Biomolecules*. (2019). 9, 344. <https://doi.org/10.3390/biom9080344>
- Prokkola, J., Airaksinen, S., Kause, A., Vehviläinen, H., Ruuhijärvi, J., Ruokonen, T., & Kallasvuo, M. (2023). Vaikutukset vesistöissä ja kalataloudessa. Huhta, E. & Melin, M. (toim.) *Ilmastonmuutoksen ja sään ääri-ilmiöiden vaikutukset luontoon ja luonnonvaratalouteen: Synteesiraportti* (pp. 11–17). Luonnonvarakeskus. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus*, 118/2022. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-849-2>
- Polarnight Energy. (2024). Hiekkapatteri [Verkkójulkaisu]. Viitattu 2.10.2024, osoitteesta <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>
- Pollet, M. (2023, August 29). *On the menu: Norwegian cloud lobster*. Politico. Haettu 21.10.2024 <https://www.politico.eu/article/norway-lobster-water-green-mountain-data-farming/>
- Porphy, S., & Farid, M. (2012). Feasibility study for production of biofuel and chemicals from marine microalgae *Nannochloropsis* sp. based on basic mass and energy analysis. *ISRN Renewable Energy*, 2012, 1–11. <https://doi.org/10.5402/2012/156824>
- Puuinfo. (2020). *Kosteustekniset ominaisuudet*. [Verkkójulkaisu] Viitattu 15.19.2024, osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/puun-kosteustekniset-ominaisuudet/>
- Puuproffa. (N.d.). *Puun kuivaus*. [Verkkójulkaisu]. Viitattu 17.10.2024, osoitteesta <https://puuproffa.fi/puutieto/puun-kuivaus/>
- Puutuoteteollisuus. (2023). *Puunkäyttö ja tuotanto*. [Verkkójulkaisu] Viitattu 15.10.2024, osoitteesta <https://puutuoteteollisuus.fi/faktoja-ja-ohjeita/puunkaytto-ja-tuotanto>

Pöyry Finland Oy. (2019). *Puhdistamoliikkeen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen* [Verkojulkaisu]. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja. Suomen Vesilaitosyhdistys ry. Viitattu 17.10.2024, osoitteesta https://www.vesilaitosyhdistys.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntaliikkeen_kasittelyn_ja_hyodyntamisen_nykytilannekatsaus_2021.pdf

Qu, J. (2024). Hybrid solar-assisted absorption refrigeration systems: A review of performance improvements and practical applications. *Renewable Energy*, 215, 345-359. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.11.022>

Rasi, S., Kilpeläinen, P., Rasa, K., Korpinen, R., Raitanen, J.-E., Vainio, M., Kitunen, V., Pulkkinen, H., & Jyske, T. (2019). Cascade processing of softwood bark with hot water extraction, pyrolysis and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 292, 121893. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121893>

Rasi, S., Kilpeläinen, P., Rasa, K., Korpinen, R., Raitanen, J.-E., Vainio, M., Kitunen, V., Pulkkinen, H., & Jyske, T. (2019). Cascade processing of softwood bark with hot water extraction, pyrolysis, and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 292, 121893. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121893>

Ramos-Elorduy, J., González, E. A., Hernández, A. R., & Pino, J. M. (2002). Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens. *Journal of Economic Entomology*, 95(1), 214–220. <http://dx.doi.org/10.1603/0022-0493-95.1.214>

Ravinnekierto 2030. (N.d). *Julkilausuma ravinnehävikin minimoinniksi vuoteen 2030 mennessä*. [Verkojulkaisu]. Viitattu 23.10.2024, osoitteesta <https://ravinnekierto2030.fi/>

Reyes-Lúa, A., Straus, J., Skjervold, V. T., Durakovic, G., & Nordtvedt, T. S. (2021). A novel concept for sustainable food production utilizing low temperature industrial surplus heat. *Sustainability*, 13(17), 9786. <https://doi.org/10.3390/su13179786>

Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. (1999). Täpläravun intensiivisen viljelyn kehittäminen Olkiluodossa. *Projektin raportit 1–3*. Kala- ja riistaraportteja nro 170. <https://urn.fi/URN:ISBN:951-776-246-1>

Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. (2000). Täpläravun intensiivisen viljelyn kehittäminen Olkiluodossa. *Projektin raportit 4–5*. Kala- ja riistaraportteja nro 197. <https://urn.fi/URN:ISBN:951-776-289-5>

- Ruokatieto. (2024). *Tietohaarukka, tilastotietoa ruokaketjusta 2024* [Verkojulkaisu]. Helsinki: Ruokatieto Yhdistys Ry. Viitattu 6.11.2024, osoitteesta <https://www.ruokatieto.fi/tietohaarukka>
- Sahateollisuus. (N.d.). *Toimiala*. [Verkojulkaisu]. Viitattu 10.10.2024, osoitteesta <https://sahateollisuus.com/toimiala/>
- Salamat, R., Scaar, H., Weigler, F., Berg, W., & Mellmann, J. (2022). Drying of biogas digestate: A review with a focus on available drying techniques, drying kinetics, and gaseous emission behavior. *Drying Technology*, 40(1), 5–29. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1781879>
- Savolainen, R., & Moilanen, P. (2006). Ravun viljely 1980–2005. Teoksessa M. Pursianen & T. Ruokonen (toim.), *Raputalouuskatsaus 2006*. Kala- ja Riistaraportteja nro 395. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-776-544-4>
- Shirmohammadli, Y.; Efhamisisi, D. ja Pizzi, A., Tannins as a sustainable raw material for green chemistry: A review, *Industrial Crops and Products*, 2018, 126, 316–332. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.034>
- Silvenius, F., Mäkinen, T., Grönroos, J., Kurppa, S., Tahvonen, R., Kankainen, M., ... & Hartikainen, H. (2012). Kirjoloihen ympäristövaikutukset Suomessa. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-372-7>
- Sokic, N. (2023). QScale, Énergir partner to recover heat at Quebec data centres. Squall Inc. Viitattu 13.11.2024, osoitteesta <https://sustainablebiz.ca/qscale-partners-with-energir-for-waste-heat-recovery-projects>
- Sovacool, B. K., Upham, P., & Monyei, C. G. (2022). The “whole systems” energy sustainability of digitalization: Humanizing the community risks and benefits of Nordic datacenter development. *Energy Research & Social Science*, 88, 102493. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102493>
- Sparks, L. (2024). What is a green data center and why are they attracting big investment? *IT Pro*. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta . <https://www.itpro.com/infrastructure/data-centres/what-is-a-green-data-center-and-why-are-they-attracting-big-investment>
- Spinosa, L., Ayol, A., Baudez, J.-C., Canziani, R., Jenicek, P., Leonard, A., Rulkens, W., Xu, G., & Van Dijk, L. (2011). Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. *Water*, 3(3), 702–717. <https://doi.org/10.3390/w3030702>
- Stanghellini, C., van't Ooster, B., & Heuvelink, E. (2019). *Greenhouse horticulture: Technology for optimal crop production*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.

Stenström, S. (2017). Drying of biofuels from the forest—A review. *Drying technology*, 35(10), 1167-1181. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1258571>

Stockholm Data Parks. (N.d.). Green computing redefined: Imagine a place where the energy is green and excess data center heat isn't wasted. Imagine Stockholm. Stockholm Data Parks. [Verkojulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta <https://stockholmdataparks.com/https://stockholmdataparks.com/>

Tanaka, K., Fujimoto, Y., & Yamamoto, M. (2023). Experimental study on adsorption cooling for waste heat recovery in data centers. *International Journal of Refrigeration*, 145, 202-214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.05.004>

Tulonen, J., Erkamo, E., Järvenpää, T., Westman, K., Savolainen, R., & Mannonen, A. (1998). *Rapuvudet tuottaviksi*. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. [Verkojulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/532820/selvityksia_3_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Työterveyslaitos. (N.d.). Orgaaniset liuottimet. [Verkojulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijöille/kemiallisten-tekijöiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/orgaaniset-liuottimet>

Sullivan, J. F. (1979). Power plant's waste heat helps start a fish farm. *The New York Times*, Section A, p. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta [Power Plant's Waste Heat Helps Start a Fish Farm - The New York Times \(nytimes.com\)](https://www.nytimes.com/2024/10/21/us/politics/power-plant-waste-heat-starts-fish-farm.html)

Suomen virallinen tilasto (SVT). (2021). Puutarhatilastot: Kasvihuoneyritysten energiankulutus 2021. Luonnonvarakeskus. Viitattu 5.11.2024, osoitteesta <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puutarhatilastot>

Suomen virallinen tilasto (SVT). (2022). *Metsäteollisuuden puunkäyttö 2022* [verkojulkaisu]. Viitattu 10.10. 2024, osoitteesta. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/metsateollisuuden-puunkaytto-2022>

Suomen virallinen tilasto (SVT). (2023). Puutarhatilastot: Kasvihuonetuotanto 2023. Luonnonvarakeskus. [Tilastoraportti] Viitattu 13.11.2024, osoitteesta <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puutarhatilastot>

- Suomen Kalastuslehti. (2016). Jättikatkarapujen kasvatusta kokeillaan. *Suomen Kalastuslehti*, 8(6). Viitattu 10.2.2025 osoitteesta, https://www.lehtiluukku.fi/lehdet/suomen_kalastuslehti/08-2016/387489.html
- Swinhoe, D. (2021). New Canadian company QScale breaks ground on AI-focused data center in Lévis, Quebec. *Data Center Dynamics Ltd*. Viitattu 13.11.2024, osoitteesta <https://www.datacenter-dynamics.com/en/news/new-canadian-company-qscale-breaks-ground-on-ai-focused-data-center-in-l%C3%A9vis-quebec/>
- Swinhoe, D. (2024). AtNorth to expand two Icelandic data centers. *Data Center Dynamics Ltd*. Viitattu 12.11.2024, osoitteesta <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/atnorth-to-expand-two-icelandic-data-centers/>
- Zhar, R., Allouhi, A., Jamil, A., & Lahrech, K. (2022). Performance analysis of combined power and refrigeration: ORC-VCC system. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 745. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6893-4_55
- Tchanche, B. F. (2012). Low-grade heat conversion into power using small scale organic Rankine cycles Väitöskirja. Agricultural University of Athens. URI: <http://hdl.handle.net/10329/847>
- Terenius, P., Garraghan, P., & Harper, R. (2023). A material social view on data center waste heat: Novel uses and metrics. *Frontiers in Sustainability*, 3, Article 1008583. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1008583>
- The Fish Site. (2021). *Plans unveiled for "world's first" land-based lobster farm*. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://thefishsite.com/articles/plans-unveiled-for-worlds-first-land-based-lobster-farm>
- Toda, H. (2022). *Data center in Hokkaido uses server-cooling snow to raise eels*. The Asahi Shimbun. Haettu 21.10.2024. <https://www.asahi.com/ajw/articles/14568865>
- Tilastokeskus. (2024). Suomen virallinen tilasto (SVT): Energiatilastot. Viitattu 9.4.2025, osoitteesta https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html
- UPM Timber. (2023). Korkeakosken sahalla investoidaan modernisointiin ja vastuullisuuteen. Viitattu 6.9.2024, osoitteesta <https://www.upmtimber.com/fi/artikkelit/timber/2023/Korkeakosken-sahalla-investoidaan-modernisointiin-ja-vastuullisuuteen/>

- Valtioneuvosto. (2022). *Manner-Suomen vesiviljelystrategia 2030: Valtioneuvoston periaatepäätös*. Viitattu 21.11.2024, osoitteesta <https://mmm.fi/documents/1410837/145713754/Manner-Suomen+vesiviljelystrategia+2030.pdf>
- Valtiovarainministeriö. (2025). Makeisten arvonlisäverotus ei kiristy – valtiovarainministeriö valmistelee muutoksia viinien verotukseen sekä datakeskusten ja kaivosten verotuksiin. Viitattu 28.3.2025, osoitteesta <https://vm.fi/-/makeisten-arvonlisaverotus-ei-kiristy-valtiovarainministerio-valmistelee-muutoksia-viinien-verotukseen-seka-datakeskusten-ja-kaivosten-verotuksiin>
- Valve J., Vesala, L., ja Setälä, J. (2024). Kalatalouden toimialakatsaus 2023. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2024. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-877-5>
- Valve, H., Lukkarinen, J., Belinskij, A., Kara, P., Kolehmainen, L., Klap, A., ... & Pitzén, S. (2019). Lisäarvoa kalasta ja maatalouden sivuvirroista Varsinais-Suomessa: Sinisen biotalouden murrosareenan tulokset. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201911076125>
- Van Zeijl, M. (2019). UK: 29 hectares of new tomato greenhouses to use waste heat. *Hortidaily*. Viitattu 11.11.2024, osoitteesta <https://www.hortidaily.com/article/9149975/uk-29-hectares-of-new-tomato-greenhouses-to-use-waste-heat/>
- Van Wyk, P., & Scarpa, J. (1999). Water quality requirements and management. In *Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems* (pp. 141–161). 4520. Viitattu 10.2.2025 osoitteesta; https://www.researchgate.net/publication/242621708_Farming_Marine_Shrimp_in_Recirculating_Fresh_Water_Systems
- Vares, S., Klobut, K., & Itänen, A. (2014). Waste as a source for district heat production and greenhouse gas reduction: A case study. <https://doi.org/10.2495/esus140741>
- Varila, T., Brännström, H., Kilpeläinen, P., Hellström, J., Romar, H., Nurmi, J., & Lassi, U. (2020). From Norway spruce bark to carbon foams: Characterization and applications. *BioResources*, 15, 3651–3666. Viitattu 17.10.2024, osoitteesta <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/from-norway-spruce-bark-to-carbon-foams-characterization-and-applications/>
- Venables, M. (2021). *Biogas facility at data centre highlights the opportunities offered by sector coupling*. Viitattu 22.10.2024, osoitteesta <https://digitalinfranetwork.com/biogas-facility-at-data-centre-highlights-the-opportunities-offered-by-sector-coupling/>

Vento, J. (2024). Pian 1 050 TWh vuodessa: Datakeskukset kuluttavat yhä enemmän energiaa, vaikka nykyahtikin huimaa – Irlannissa uhkaavat viedä 32 % koko sähköverkosta. Tekniikka ja talous. Viitattu 26.2.2024, osoitteesta <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/pian-1050-twh-vuodessa-datakeskukset-kuluttavat-yha-enemman-energiaa-vaikka-nykyahtikin-huimaa-irlannissa-uhkaavat-vieda-32-koko-sahkoverkosta/74c73da1-b1f0-4280-917c-cebbb32f785a>

Verge, J. (2015). *Project seeks to combine sustainable fish farm and data center*. Data Center Knowledge. Viitattu 21.10.2024, osoitteesta <https://www.datacenterknowledge.com/sustainability/project-seeks-to-combine-sustainable-fish-farm-and-data-center>

Verohallinto. (2022) *Sähkön veroluokat ja verotuksen korjaaminen*. VH/5672/00.01.00/2021. Verohallinto. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/107822/s%C3%A4hk%C3%B6n-veroluokat-ja-verotuksen-korjaaminen/#1.1-s%C3%A4hk%C3%B6n-verotus-ja-veroluokat-i-ja-ii>

Vesterlund, M., Borisová, S., Lundmark, E., Leinonen, V., Tiensuu, H., Markeby-Ljungqvist, H., ... & Suutala, J. (2021). Data center for biomass drying. Viitattu 24.10.2024, osoitteesta <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Ari%3Adiva-54707>

Vesterlund, M., Borisová, S., & Emilsson, E. (2024). Data center excess heat for mealworm farming: An applied analysis for sustainable protein production. *Applied Energy*, 353(Part A), 121990. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121990>

Vielma, J., Kankainen, M., & Setälä, J. (2022). *Current status of recirculation aquaculture systems (RAS) and their profitability and competitiveness in the Baltic Sea area*. Natural resources and bioeconomy studies, 75/2022. Natural Resources Institute Finland. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-504-0>

Vieno, N., Sarvi, M., Salo, T., Rämö, S., Ylivainio, K., Pitkänen, T., & Kusnetsov, J. (2018). *Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä*. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-661-2>

Virolainen-Hynna, A. (2020). *Biokaasun tuotanto ja käyttö Suomessa 2030* [Verkkajulkaisu]. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Helsinki. Viitattu 21.10.2024, osoitteessa <https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2024/05/Biokaasun-tuotanto-ja-kaytto-Suomessa-2030-2035-ja-2040-artikkeli-10052024.pdf>

- Virtanen, E., Eskelinen, U., Westman, K., Huhtinen, M., Söderholm-Tana, L., & Mäkinen, T. (1989). *Jätelämmön hyväksikäyttö kalanviljelyssä*. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, kalantutkimusosasto. *Monistettuja julkaisuja* (85). <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2016082322849>
- Wang, H., Liu, Y., & Chen, M. (2023). "GPU thermal behavior and its impact on performance in large-scale computing." *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 174, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2023.02.008>
- Wang, H., Rehman, K. U., Liu, X., et al. (2017). Insect biorefinery: A green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein. *Biotechnology for Biofuels*, 10, 304. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0986-7>
- WA3RM. (N.d.). Regenergy Frövi. WA3RM. [Verkkójulkaisu] Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://wa3rm.com/projects/regenergy-frovi>
- WA3RM. (N.d.). Regenergy Gällivare. WA3RM. [Verkkójulkaisu] Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://wa3rm.com/projects/regenergy-gallivare>
- WA3RM. (N.d.). Regenergy Östersund. WA3RM. [Verkkójulkaisu] Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://wa3rm.com/projects/regenergy-ostersund>
- WA3RM. (N.d.). Varde. WA3RM. [Verkkójulkaisu] Viitattu 8.11.2024, osoitteesta <https://wa3rm.com/projects/varde>
- Westerlund, J., et al. (2021). Data center for biomass drying. Viitattu 27.2.2024, osoitteessa. <http://diva-portal.org/smash/get/diva2:1576003/FULLTEXT01.pdf>
- Westman, K. (1982). *Lohenpoikasten kasvatuskoe Olkiluodon ydinvoimalan jäähdytysvedessä talvikautena 1981-1982: Koeohjelma* (11 s.). Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos (RKTL). <https://www.suomenkalakirjasto.fi/kalakirjasto/teos.php?id=50938>
- White Data Center. (2024). Projects. [Verkkójulkaisu] Viitattu 21.10.2024, osoitteessa <https://corp.wdc.co.jp/en/home/>
- Wahlroos, M., Pärssinen, M., Rinne, S., Syri, S., & Manner, J. (2018). Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(Part 2), 1749-1764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.058>
- Wright, J. (2023). Responsible Seafood Innovation Award finalist Cresponix is rethinking land-based shrimp farming. *Responsible Seafood Advocate*. Global Seafood Alliance. Viitattu

10.2.2025, osoitteessa <https://www.globalseafood.org/advocate/responsible-seafood-innovation-award-finalist-cresponix-is-rethinking-land-based-shrimp-farming/>

Wyk, J. van. (2022). Integrating mushroom farming with greenhouse production: A systems approach. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131480>

XTX Markets. (2025) XTX Markets plans to invest over €1bn in large-scale data centre project in Kajaani Finland. XTX Markets, Press release. [Verkkajulkaisu] Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. <https://kajaani.fi/en/news/xtx-markets-plans-to-invest-over-e1bn-in-large-scale-data-centre-project-in-kajaani-finland/>

Yang, C., Chen, J., & Fu, X. (2023). "Reliability analysis of HDDs under thermal stress in data centers." *Applied Thermal Engineering*, 221, 119785. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119785>

Yang, X., Liu, Y., & Wang, Z. (2018). Performance Analysis of a Novel Cascade Absorption Refrigeration for Low-Grade Waste Heat Recovery. *Energy Reports*, 4, 120-130. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00397>

Yleisradio. (N.d.). *Lämpöä jätelaitokselta – kalat kasvavat nopeammin* [Verkkajulkaisu]. Viitattu 22.11.2024, osoitteesta <https://yle.fi/a/3-5123062>

Yleisradio. (2008). Teollisuuden hukkalämpö hyötykäyttöön sammen ja monnin viljelyssä. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 9.2.2024, osoitteessa <https://yle.fi/a/3-5123062>

Yleisradio. (2024) Kajaani lämpenee tulevaisuudessa datakeskusten hukkalämmöllä: Loiste sijoittaa kymmeniä miljoonia euroja Renforsin rantaan. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 11.2.2025, osoitteesta. https://yle.fi/a/74-20125986?utm_

Yli-Kojola, S. (2020). *Datakeskusten hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet: Organic Rankine kiertoprosessin ja lämpöpumpun teknoekonominen vertailu* Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202004304759>

Zhao, C., Yan, J., Tian, X., et al. (2023). Progress in thermal energy storage technologies for achieving carbon neutrality. *Carbon Neutrality*, 2, 10. <https://doi.org/10.1007/s43979-023-00050-y>