

DATAKESKUSTEN HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN KAUKOLÄMPÖNÄ

Energiaverotuksen muutosten vaikutus kannattavuuteen

Niva Pekka

Opinnäytetyö
Tekniikan ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Rakennusinsinööri (AMK)

2021

Tekniikan ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
rakennusinsinööri (AMK)

Tekijä	Pekka Niva	Vuosi	2021
Ohjaajat	TKT Petri Kuisma, Lapin AMK		
Toimeksiantaja	Granlund Oy		
Työn nimi	Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpönä		
Sivu- ja liitesivumäärä	79		

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää, kuinka pienten ja keskisuurten datakeskusten kaukolämmöntuotannon kannattavuus muuttuu, kun suunnitteilla oleva sähköveron alennus astuu voimaan.

Tutkimus suoritettiin mallintamalla kahden kuvitteellisen datakeskuksen, kooltaan 200 kW ja 2 MW, kaukolämmöntuotanto kahdeksan vuoden ajalta ja laskeamalla lämmöntuotannon kannattavuus tuntikohtaisesti sen hetkisen markkinasähkön hinnan ja ulkona vallitsevan säätilan mukaisesti.

Kuvitteellisille datakeskuksille laadittiin molemmille niiden kokoluokkaan sopiva kaukolämmön tuotantolaitteiston investointibudjetti. Investoinnille laskettiin takaisinmaksuajat ja sisäinen korko neljälle erilaiselle tuotantoskenaariolle. Tuotantoskenaarioissa sekä sähköveron määrä että lämmöstä saatava korvaus vaihteli skenaarion mukaan.

Työn tulos oli, että kaukolämpötuotannon kannattavuus paranee merkittävästi sähköveron alennuksen myötä. Lämmönmyynnistä tulee merkittävä lisätulon lähde datakeskusoperaattoreille. Myös pienten datakeskusten omistajien kannattaa harkita hukkalämmön jalostamista kaukolämmöksi, jos ne sijaitsevat keskellä tiheään asuttua infrastruktuuria. Se muuttuu kannattavaksi uuden sähköveron myötä. Keskisuurille datakeskuksille investointi lämmönmyyntiin saattaa kannattaa jo nyt, nykyisenkin sähköveron tasolla.

Avainsanat datakeskus, hukkalämpö, lämmöntalteenotto, kannattavuus, energiaverotus, sähkövero

Author	Pekka Niva	Year	2021
---------------	------------	------	------

Degree Programme in Civil
Engineering
Bachelor of Construction
Engineering

Supervisor	D.Sc. (Tech) Petri Kuisma, Lapin AMK
Commissioned by	Granlund Oy
Subject of thesis	Utilizing data center waste heat in district heating
Number of pages	79

The aim of this thesis was to determine how the profitability of district heat production would change if the planned reduction in electricity tax goes into effect.

Two hypothetical data centers with capacities of 200 kW and 2 MW were modeled. Their profitability was calculated for eight years on an hour-by-hour basis. The cost of the heat produced for each calculated hour was based on the actual electricity market price and outdoor temperature for the moment. An individual investment budget for district heat production equipment for both data centers was estimated. Payback time and internal rate of return were calculated for the investment in four different heat production scenarios. Production scenarios varied both in terms of electricity tax and prices paid for the sold heat.

After the electricity tax is lowered by the state, the profitability of district heat production investments will improve drastically. Waste heat sold to district heating network can generate significant revenues for data center operators. Even small data center owners should consider starting selling their waste heat if they are located near urban infrastructure. Even with the current, higher electricity tax prices, investments in heat production machinery can be profitable for medium-sized data centers.

Key words data center, district heating, waste heat, energy reuse, profitability, energy taxation, electricity tax

SISÄLLYS

LUETTELO TAULUKOISTA.....	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Tämän opinnäytetyön tausta ja tarkoitus	8
1.2 Tutkimusongelma	8
1.3 Tutkimusongelman rajauksia	9
1.4 Tutkimusmenetelmä ja aineisto	9
1.5 Opinnäytetyöideoita muille jalostettavaksi	10
2 DATAKESKUS.....	12
2.1 21. vuosisadan tärkein infrastruktuurirakenne	12
2.2 Sähkönkulutus	12
2.3 Datakeskuksien tyypeistä	13
2.4 Datakeskuksien kokoluokista.....	15
2.5 Datakeskusten hukkalämmön potentiaali.....	15
2.6 Räkki – tietokonesalin peruskaluste.....	16
2.7 Mikä datakeskuksissa käyttää sähköä?	18
2.8 Millaista lämpöä datakeskuksissa syntyy?	20
2.9 Konesalin perinteinen ilmajäähdytys.....	20
2.10 IT-tekniikan tuottaman hukkalämmön potentiaali.....	22
2.11 Datakeskuksen muut hukkalämmön lähteet	25
2.12 Tulevaisuuden konesalien jäähdytyksen kehityssuuntia.....	26
2.13 Uputusnestejäähdytyksen haasteita	27
2.14 Uputusnestejäähdytyksen pääajit ja niiden erot.....	28
2.15 Datakeskuksen energiatehokkuuden mittareita	29
2.15.1 PUE – Power Usage Effectiveness	29
2.15.2 PUE-arvoja käytännön datakeskuksissa	31
2.15.3 ERE – Energy Reuse Effectiveness.....	31
3 KAUKOLÄMMITYS.....	33
3.1 Yleistä kaukolämmöstä	33
3.2 Kaukolämmön historiasta.....	34
3.3 Kaukolämpöveden lämmitysvaatimukset olemassa olevissa verkostoissa	34

3.4	Kaukolämpö mitoitetaan uusissakin kiinteistöissä 1970-luvun ohjeilla.	38
3.5	Onko puun lisääntyvä poltto ratkaisu kaukolämmön ilmastokriisiin?	41
3.6	Kaksisuuntainen kaukolämpö	42
3.7	Yhteistyöstä kaukolämpöyhtiön kanssa	42
3.8	Mitä kaukolämpölaitos odottaa lämmöntoimittajaltaan?	43
3.9	Datakeskuksen kytkeytyminen kaukolämpöön	45
3.10	Datakeskushukkalämmön vahvuudet ja heikkoudet	47
4	LÄMPÖPUMPPU	49
4.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate	49
4.2	Lämpöpumpun hyötysuhdekerroin eli ns. COP-arvo	51
5	TEHDYT SIMULAATIOT JA SAATUJEN TULOSTEN ANALYYSI	56
5.1	Simulaatioon valitut datakeskustyytit	56
5.2	Datakeskusten KL-tuotannon simuloinnissa käytetty sijoituspaikkakunta 56	
5.3	Perämeren laitosten potentiaali KL-lämpöpumppujen pilottikohteina...	58
5.4	Käytetty sähkönhinta.....	59
5.5	Kannattavuussimulaation yleinen toteutusperiaate	59
5.6	Simulaatioissa käyttämäni kaukolämmön myyntihinnat	60
5.7	Ajetut KL-tuotantosimulaatiot	64
5.8	KL-tuotantosimulaatioiden tulokset	65
5.9	Sähköveron alennuksesta saatava säästö.....	67
5.10	KL-lämmöntuotantokyvyn vaatimat investoinnit.....	68
5.11	Investointien kannattavuus valituille laskentatapauksille	69
5.11.1	200 kW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus.....	70
5.11.2	2,5 MW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus	70
6	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	72
	LÄHTEET	76

LUETTELO KUVISTA

Kuva 1. Räkkiteline - tietokonesalin peruskaluste	17
Kuva 2. Räkkiteline, jossa on sekä blade- että räkkiservereitä (Kolbjornsrud). 18	
Kuva 3. Konesalin sähkönkäyttö (Motiva Oy 2011).....	19
Kuva 4. Perinteinen ilmankierto konesalissa (Colocation America 2014)	21
Kuva 5. Mooren lain toteutuminen 50 vuoden aikana (Ritchie & Roser)	23
Kuva 6. Kokeellisen konesalin upotusjäähdytysallas (Microsoft)	28
Kuva 7. KL-menoveden säätökäyrä Helsingissä.....	35
Kuva 8. KL-Menoveden säätökäyrä Ruotsissa (Energiföretagen, 2014).....	36
Kuva 9. Esimerkki kaukolämmön tuotantorakenteesta vuoden aikana	44
Kuva 10. Datakeskuksen kytketyminen kaukolämpöön (TIVI)	45
Kuva 11. Lämpöpumppuprosessi (Ympäristöministeriö).....	50
Kuva 12. Lämpöpumppujen luokittelu lauhdutislämpötilan mukaan.....	53
Kuva 13. R-1234ze(E) kylmäaineella laskettu KL-lämpöpumpun COP	55
Kuva 14. Mitoitusvyöhykkeet Suomessa. Lämmitystarve VTT:n mukaan	57
Kuva 15. Kaukolämpöverkon ylläpitokustannuksia Ruotsissa 2009 - 2013	63

LUETTELO TAULUKOISTA

Taulukko 1. Datakeskuselektroniikan tuottamia lämpötilatasoja	25
Taulukko 2. Kaukolämpöasiakkaan lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat	40
Taulukko 3. Tuotetun kaukolämmön hyvityshinnastoja	62
Taulukko 4. Lämmön myynnistä saadut myyntikatteet.....	65
Taulukko 5. Datakeskuksen säästö sähkölaskussa	67
Taulukko 6. 200 kW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus	70
Taulukko 7. 2,5 MW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus.....	71

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

AC/DC	Alternating Current/Direct Current – vaihtovirta/tasavirta
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – yhdysvaltalainen lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmastoinnin insinöörien yhdistys
CHP	Combined Heat and Power – voimalaitos, joka tuottaa sekä sähköä että lämpöä samanaikaisesti
CoLo	Co-location (data center) – konesaltilaa toimistohotellimaisesti vuokraava datakeskus
COP	Coefficient of Performance – lämpöpumpun hyötysuhde
DN	Diameter Nominal, putken nimellisläpimitta
EIA	Electronic Industries Association – yhdysvaltalainen elektroniikkavalmistajien toimialajärjestö
EPA	Environmental Protection Agency – Yhdysvaltain ympäristöministeriö
ERE	Energy Reuse Effectiveness – energian uudelleenkäytön tehokkuus
GWP	Global Warming Potential – ominaislämmitysvaikutus kasvihuoneilmiöön
IRR	Internal Rate of Return – investoinnin sisäinen korkokanta, jolla nykyarvo menee nolnaan
KL	kaukolämpö
MEP	Member of European Parliament - eurokansanedustaja
ORC	Organic Rankine Cycle – orgaaninen rankine-kierto, voimalaistyyppi matalan lämpötilatason lämmönlähteille
PUE	Power Usage Effectiveness – IT-laitteiston hyödyksi saatu käytetyn energian määrä
UPS	Uninterrupted Power Supply – laitteisto, joka takaa katkemattoman ja laadukkaan sähkön syötön

1 JOHDANTO

1.1 Tämän opinnäytetyön tausta ja tarkoitus

Vuoden 2019 eduskuntavaalien tuloksena Suomessa aloitti 6. kesäkuuta 2019 Rinteen johtama hallitus, jonka hallitusohjelmassa oli seuraavanlainen kirjaus: *”Lisätään energiantuotannon päästöohjausta poistamalla teollisuuden energiaveron palautusjärjestelmä ja alentamalla II veroluokan sähkövero kohti EU:n sallimaa minimitasoa. Uudistus toteutetaan kustannusneutraalisti siirtymäkauden kuluessa. Siirretään sähköveron veroluokkaan II kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat lämpöpumput ja konesalit.”* (pääministeri Rinteen hallitusohjelma, 2019). Antti Rinne on jo pääministerin tehtävistä väistynyt, mutta tilalle astunut Sanna Marinin hallitus on sitoutunut jatkamaan samalla hallitusohjelmalla, jolla Rinteen hallitus aloitti.

Kyseisestä hallitusohjelmataavoitteesta on jo toteutettu II veroluokan sähkön eli ns. teollisuussähkön sähköveron alennus EU:n sallimaan minimiin (0,5 €/MWh) vuoden 2021 alusta lähtien. Kaukolämpöä tuottavien konesalien siirto teollisuuden sähköveroluokkaan on tarkoitus tehdä mahdollisimman pikaisesti vuoden 2021 aikana. Parhailtaan erityinen työryhmä selvittää millä ehdoilla sähköveron alennus konesaleille voidaan tarjota, jotta eri toimijoita kohdellaan neutraalisti. Lopuksi kyseinen tukitoimenpide pitää vielä hyväksyttää EU-prosessissa (Parkkonen, 2021).

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella, millaisia mahdollisuuksia konesalin hukkalämmöstä on tuottaa kaukolämpöverkostokelpoista kuumaa vettä sekä mitä vaikutuksia tuollaisella toiminnalla on niin konesalitoimijalle kuin kaukolämpöyhtiöllekin.

1.2 Tutkimusongelma

Tämän opinnäytetyön tärkein tutkimusongelma on selvittää yleistasolla, millainen vaikutus sähköveron alennuksella on konesalin käyttökustannuksiin sekä millainen takaisinmaksuaika kaukolämmöntuotantoon tarvittavalla investoinnilla olisi datakeskusoperaattorille. Kaukolämpöä tuottavien konesalien mahdollisuus

saada halvempaa sähköä ei ole astunut vielä voimaan tätä opinnäytetyötä kirjoitettaessa eikä näytä todennäköiseltä, että muutos astuu voimaan ennen syksyä 2021. Toisaalta valmistumiseni talo- ja energiatekniikan insinööriksi ei voi odottaa loputtomiin virkakoneistojen hitaita käännteitä. Alun perin konesalien piti siirtyä edullisemman sähkön piiriin jo vuodenvaihteessa, sitten aikaa lykättiin maaliskuuhun 2021 ja tätä kirjoitettaessa on menossa huhtikuu 2021. En voi lykätä valmistumistani tämän pidempään, kirjoitan opinnäytetyöni tämänhetkisen tiedon perusteella.

1.3 Tutkimusongelman rajauksia

Jokainen datakeskus on aina hieman myös yksilöllinen yksikkönsä, jossa pyörii omanlaisensa tuotantoprosessi, joka tuottaa eriasteisia ylijäämälämpöjä. Tämän opinnäytetyön tutkimusongelmaan liittyy kiinteästi myös kaukolämmön tuotanto. Koska energiaverotuksen muutos ei ole astunut vielä voimaan eivätkä aivan kaikki detaljitkaan siitä ole välttämättä selvillä, ei ole ollut mahdollista löytää asiakasta, jolle tämän insinöörityön olisi voinut kohdistaa. Ideaalista olisi ollut, jos yhtenä osana tutkimusta olisi ollut sen kohdentaminen todelliseen datakeskukseen, jonka ylijäämän hyödyntämismahdollisuudet peilataan todellista kaukolämpötoimijaa vasten.

Tämä opinnäytetyö on em. seikkojen vuoksi tehty geneerisellä tasolla laskemalla skenaarioita kahdelle eri suuruiselle datakeskukselle, jotta saadaan tuntumaa, miten lämmöntalteenottoinvestointien kannattavuus muodostuu. Tästä opinnäytetyöstä saadut tulokset ovat suuntaa antavia, mutta minään investointiperusteena tuloksia ei voi yhdenkään todellisen konesalin kaukolämpötuotannolle pitää. Tarkat laskelmat on syytä tehdä jokaiselle datakeskukselle erikseen.

1.4 Tutkimusmenetelmä ja aineisto

Tutkimus toteutetaan konstruktiivisena tutkimuksena. Kasanen et al. (1991, s. 316 – 318) määrittelee konstruktiivisen tutkimuksen tuottavan ratkaisun ole-massa olevaan käytännön ongelmaan, testaa ratkaisun toimivuuden ja osoittaa sen mahdollisesti yleistettävyyden laajemminkin ratkaisuksi. Tutkimus tehdään keräämällä ensin kirjallisuuskatsauksen avulla lähtötietoa vastaavista aiemmista

selvityksistä Suomessa ja maailmalla. Tämän jälkeen kirjallisuuskatsauksen tuottama aineisto yhdistetään kirjoittajan laajaan käytännön kokemukseen lämpöpumpputekniikasta, sen sovellutuksista, kaukolämpötuotannosta ja insinööritöimistö Granlundin konesalit-liiketoimintayksikössä kertyneeseen asiantuntijatietoon todellisen maailman konesaliprojekteista, joissa on tehty myös pilottiratkaisuja kaukolämpötuotantoon.

1.5 Opinnäytetyöideoita muille jalostettavaksi

Hallitusohjelman tavoitekirjauksessa on myös mielenkiintoinen kohta kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppujen siirtämisestä edullisempaan sähköveroluokkaan. Mitä tuo kirjaus tarkkaan ottaen pitää sisällään? Voisivatko esimerkiksi suuret kauppakeskukset päästä edullisempaan sähköveroluokkaan kaukolämpöä lämpöpumpulla tuottamalla? Jo tällä hetkellä monissa uusissa kauppakeskuksissa tuotetaan kaupan kylmä CO₂-perustaisella lämpöpumppuprosessilla, jossa on varsin korkeat lauhdelämpötilat. CO₂-kylmälaitteiden lauhde saattaa kelvata jopa sellaisenaan kaukolämpöverkkoon eli välttämättä osa moderneista kaupoista ei tarvitse edes merkittäviä investointeja. Heillä saattaa olla tarvittavat laitteistot jo valmiiksi, tarvitaan vain pieniä kytkentämuutoksia ja automaatio-ohjausten uudelleenohjelmointeja.

Luonnollisesti myös maasta, ilmasta ja vedestä kaukolämpöä suoraan tuottavien suurten teollisen kokoluokan lämpöpumppujen kannattavuus muuttuu, jos sähkönenergian hinta sentyypisille laitoksille laskee.

Koska itse työskentelen tällä hetkellä Granlund Oy:n palveluksessa konesalitekniikan ja -jäähdytyksen asiantuntijana ja työnantajani osaltaan rahoittaa tämän opinnäytetyön tekemistä, rajaan opinnäytetyöni koskemaan vain kaukolämmön tuotantoa pienistä ja keskisuurista konesaleista. Kauppakeskusten tai lämpöpumppu-kaukolämpölaitosten tutkimisen jätän muille opinnäytetyön tekijöille kiinnostavaksi aiheeksi.

Olen tässä opinnäytetyössä valinnut varsin suoraviivaisen lähestymistavan, jottei tämä paisuisi kovin laajaksi. Konesalitekniikasta selitän keskeiset osat, jotta ymmärtää mitkä ovat konesalijäähdytyksen hukkalämmön tekniset ominaisuudet.

Opinnäytetyöni tekniikkaesittelyissä keskityn valtavirran ratkaisuihin, koska uskon datakeskusoperaattoreiden enemmistön pitäytyvän jatkossakin tutuissa ja turvallisissa tekniikoissa. Vain nestejäähdytyksen kohdalla poikkean hetkeksi kirjoittamaan ei-koetellusta tekniikasta, joka ei ole vielä valtavirtaa vaan tulevaisuutta. Sivupolku on siinä mielessä perusteltu, että kaukolämmön tuottamisen kannalta se realisoituessaan avaisi uusia mielenkiintoisia mahdollisuuksia, joten päätin käsitellä sen asiana sen uutuusarvon vuoksi. Kovin monessa muussa suomalaisessa opinnäytetyössä ei näytetä vielä käsitellyn upotusnestejäähdytyksen avaamia mahdollisuuksia.

Tämän opinnäytetyön narratiivi, kerronnan näkökulma on selostaa asioita datakeskuksen henkilökunnalle kansantajuisesti. Liian syvällistä uppoutumista tekniikkaan tai kaavoihin pyrin välttämään pitääkseni tekstin suhteellisen helppolukuisena. Konesalioperaattori on konesaliliiketoiminnan ammattilainen mutta hän ei välttämättä tunne energiatekniikkaa tai konesalin jäähdytystekniikkaa kovin syvällisesti.

2 DATAKESKUS

2.1 21. vuosisadan tärkein infrastruktuurirakenne

Microsoftin Brad Smith on luonnehtinut datakeskuksia 21. vuosisadan tärkeimmäksi infrastruktuuriksi samaan tapaan kuin rautatiet ja lennätinlinjat olivat 19. vuosisadan ikonista infrastruktuuria (CNET, CES 2021). Nykyisenkaltaisia datakeskuksia ei oikeastaan ollut vielä olemassa ennen vuosituhannen vaihdetta. Datakeskuskiinteistöjä nousee tasaiseen tahtiin ympäri maailmaa, tällä hetkellä arvioitu vuotuinen kasvuvauhti on 6 % (Grand View Research, 2020). Datakeskusten perustehtävä on tarjota luotettava infrastruktuuri nopeaan verkkoon kytkettyjen tietokoneohjelmien pyörittämiseksi. Kyseinen infrastruktuuri on monella tapaa kallista luoda ja hallinnoida, joten kalliiseen tilaan pyritään keskittämään paljon tietotekniikkaa.

2.2 Sähkönkulutus

Datakeskuksissa on pienellä alalla valtava määrä tietojenkäsittelyelektroniikkaa. Keskimääräinen sähköteho ylittää koko rakennuksen alalla helposti vaatimattomissakin datakeskuksissa 1000 W/m^2 . Ei ole mitenkään tavatonta, että esimerkiksi 2000 neliön bruttoalan kokoinen datakeskuskiinteistö saattaa haukata 2 megawatin edestä sähköä valtakunnanverkosta. Datakeskukset kuluttavat tällä hetkellä jo merkittävän määrän maailman sähköntuotannosta ja sähkönkulutuksen kasvulle ei näy loppua.

Vuonna 2019 uutisoitiin, että maailman datakeskukset käyttivät sähköä arviolta 420 terawattitunnin edestä. Se on noin 3 % maailman koko sähköntuotannosta ja melkein yhtä paljon kuin mitä koko Ranskan valtio kansalaisineen ja teollisuuksineen kulutti sähköä (TIEKE, 2020). Alustava tieto Uptime Institutesta vuodelta 2020 on, että sähkönkulutus on kasvanut jälleen, ollen nyt 4 % maailman kaikesta tuotetusta sähköstä (Grundström, 2021).

2.3 Datakeskuksien tyypeistä

Datakeskuksia voidaan luokitella monellakin tapaa eikä mitään virallista luokittelutapaa ole. Tässä on amerikkalaisen Ciscon näkemys (Cisco 2009), millaisia datakeskustyypppejä on olemassa:

- suuryritysten datakeskukset
- co-location datakeskukset
- pilvipalvelun tarjoajat
- hyperskaalan palvelukeskukset

Suuryritysten datakeskukset ovat helpompia ymmärtää. Niitä on ollut Suomessakin jo 1950-luvulta lähtien. Tässä yhteydessä myös suuret organisaatiot kuten veroviranomainen, väestörekisteri tai puolustusvoimat täytyy ymmärtää suuryritykseksi. Suuryrityksen datakeskus on yksittäisen organisaation perustama ja operoima konesali, joka yleensä palvelee lähinnä organisaation omia tarpeita. Suomessa tyypillisiä omien datakeskusten pyörittäjiä ovat valtionhallinnon organisaatioiden ohella olleet pankit ja vakuutusyhtiöt.

Co-location eli "colo" datakeskukset ovat varsin uusi ilmiö maailmassa. Vuosituhannen vaihteesta lähtien tämä ilmiö on amerikkalaislähtöisesti valloittanut maailmaa. Co-location datakeskuksen rakennuttaa usein datakeskuksiin erikoistunut palveluyritys, joka vuokraa datakeskuksestaan tilaa muille yrityksille ja asiakkaille. Jotkut colo-toimijat tarjoavat tilaa vuokrattavaksi, vaikka räkillisen kerrallaan. Palvelintila voi myös olla jaettu pienempiin saleihin tai salin sisällä voi olla fyysisesti häkillä eristettyjä palvelintiloja. Konseptiin liittyy olennaisesti se, että palvelinkeskuksen asiakkailta on pääsy omille servereilleen kulkukortilla (Upsite 2021). Suomessa colo-datakeskustilaa tarjoavat mm. amerikkalainen Equinix, saksalainen Hetzner ja suomalaisomisteinen Ficolo.

Pilvipalveluita tarjoavat datakeskusoperaattorit ovat hyvin sekalainen joukko. Joukossa on hyvin pieniäkin toimijoita, joiden palvelimien fyysinen sijaintipaikka ei ehkä datakeskuksen nimitystä ansaitse. Kyseessä saattaa enemmänkin olla palvelinhuone. Mutta pilvipalvelutarjoajien joukossa on myös maailman suurimmat konesalioperaatioita pyörittäviä yrityksiä kuten Google, Amazon, Facebook

ja Microsoft. Yleensä noista kaikkein suurimpien operaattoreiden palvelinkeskuksista käytetään nimitystä hyperskaalan palvelinkeskukset (engl. hyperscale data centers). Hyperskaalan palvelinkeskuksia ei ole kovin selvästi oikein määritelty missään, ja käsite lipsuu kuin saippua kun siihen yrittää tarttua. Paljon termiä käytetään, mutta missä loppuu ”tavanomainen pilvipalvelukeskus” ja missä alkaa hyperskaalan palvelinkeskus, sitä ei ole kunnollisesti määritelty. Hyperskaalan datakeskuksista on suomeksi käytetty myös nimeä megadatakeskus. Paremman nimen puutteessa käytän jatkossa hyperskaalan datakeskuksista kyseistä nimeä megadatakeskus sen lyhyden vuoksi.

Megapalvelinkeskuksista voitaisiin todeta, että siitä voidaan havaita jotain tunnusomaisia seikkoja, jotka erottavat sen usein tavanomaisemmista datakeskuksista. Hyperskaalan keskuksia pyörittävät yritykset ovat niin suuria toimijoita, että ne voivat käytännössä määritellä, millaista rautaa heidän konesaleissaan käyttävät. Hyperskaalan palvelinkeskuksissa onkin pääsääntöisesti kyseisten teknologiayritysten omien määritysten mukaan tehtyjä servereitä.

Megapalvelinkeskuksille tyypillistä on, ettei yksittäisen serverin rikkoutuminen vaikuta keskuksen tarjoamaan palveluun mitään. Serverimoduuli on kyseisissä hyperskaalan keskuksissa tehty nopeasti vaihdettavaksi yksiköksi. Rikkinäinen serverimoduuli vaihtuu uuteen keskimäärin 2 minuutissa ammattimaisesti hoidettussa hyperskaalan palvelinkeskuksessa. Megapalvelinkeskukset myös koostuvat useista toisiin verkottuneista yksiköistä, joita on usein siroteltu maantieteellisesti laajalle alueelle ympäri maapalloa. Periaatteessa edes yhden megapalvelinkeskuksen alasajo ei pitäisi rampauttaa tarjottavaa palvelua. Todellisuus todennäköisesti on toinen, mutta megapalvelinkeskukset ovat niin hyvin varmistettuja häiriöitä vastaan, että harvoin tilannetta on päästy todentamaan käytännössä.

Eräs hyperskaalan tunnusmerkki joidenkin mukaan on datakeskuksen käyttämä teho. Hyperskaalan palvelinkeskukset olisivat hyvin suuria yksiköitä energiankulutukseltaan, vähintään 30 - 50 MW. Tuo voikin olla varsin hyvä määritelmä, koska noin suuria datakeskuksia eivät oikein saa aikaiseksi muut kuin hyvin suuret ja ammattimaiset toimijat. Käytännössä kymmenien tai satojen megawattien IT-keskus lienee silloin aina myös megadatakeskus.

2.4 Datakeskuksien kokoluokista

Aiemmassa kappaleessa eriteltiin datakeskuksia niiden hallinnointityypin ja tarjoaman palvelun perusteella. Energiaverotuksen uudistamista pohtinut työryhmä ryhmitteli datakeskukset suuruusluokkiin niiden käyttämän IT-sähkötehon perusteella:

1. suuret datakeskukset, IT-sähköteho yli 5 MW
2. keskisuuret datakeskukset, IT-sähköteho 0,5 – 5 MW
3. pienet datakeskukset, IT-sähköteho alle 0,5 MW

IT-sähköteholtaan suuriksi luokitellut datakeskukset ovat olleet oikeutettuja ostamaan sähköä teollisuussähkön alhaisella veroasteella jo vuodesta 2014 lähtien. Kyseisille datakeskuksille nyt suunnitteilla oleva sähköveron huojennus ei merkitse muutosta.

2.5 Datakeskusten hukkalämmön potentiaali

Insinööritoimisto AFRY teki työ- ja elinkeinoministeriölle selvityksen syksyllä 2020 erilaisten hukkalämpölähteiden hyödyntämispotentiaalista Suomessa. AFRY:n mukaan suuria yli 5 MW konesaleja on Suomessa alle kymmenen. Keskisuuria 0,5 – 5 MW konesaleja olisi noin 50 kpl Suomessa. Pienten konesalien määrästä AFRY ei lausunut arvioita. Oma arvioni on, että niitä lienee muutama sata, riippuen siitä, kuinka pieni konesali määritellään. Osa pienistä konesaleista kutistuu käytännössä laitehuoneiksi tai ns. EDGE-tyyppisiä datakeskuksia. EDGE-tyyppinen datakeskus on jälleen esimerkki termistä, joka on löyhästi määritelty jopa lähtökielelessään englannissa. Kun siitä yritetään ottaa otetta, käsite on hieman saippuamainen. Lyhyesti käsitteellä tarkoitetaan lähelle käyttäjää tai kulutuskohdetta vietyä palvelinrypystä, jolla saadaan tietoliikenteen latenssi-aikoja ja kuormituksia vähennettyä. Tyypillisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi erilaiset striimatut datapalvelut.

AFRY:n arvio konesalien hyödynnettävissä olevasta hukkalämmöstä on 2 TWh. Tulevaisuudessa konesalien sähkönkulutus Suomessakin lisääntyy ja saattaa kasvaa 5 %:iin Suomen koko sähkönkulutuksesta. Tällöin AFRY arvioi noin 5

TWh suuruisen hukkalämpöpotentiaalin olevan olemassa, valtaosa siitä hyödynnettävissä kaukolämpönä.

2.6 Räkki – tietokonesalin peruskaluste

Kun tämän opinnäytetyöni valmisteluvaiheessa kävin läpi Suomessa ja muualla konesaleista kirjoitettuja opinnäytetöitä ja muita kirjallisia esityksiä, panin merkille, ettei oikein missään opinnäytetyössä selitetty räkin käsitettä kunnollisesti. Räkki on konesalissa muutakin kuin vain teline, jossa on jotain tietoteknisiä laitteita. Konesalin jäähdytyksen suunnittelija tekee räkeistä myös muutamia oletuksia, joista räkin käyttäjä ei ole ehkä tietoinen.

Konesaleissa on ollut korotettuja asennuslattioita ja ilmajäähdytystä pidempään kuin räkkejä. Alun perin mitään räkkejä ei käytetty vaan tietokoneet olivat itsessään kaapin kokoisia ja valmistaja toimitti koneet valmiina peltikaappeina. Tietokoneissa oli myös usein vesijäähdytys 1980-luvulle asti. CMOS-tekniikan, integroitujen piirien miniatyrisaation ja mikrotietokoneiden vallankumousten myötä tietokoneiden koko alkoi pienentyä. Lopulta kohtuullisen tehokaskin serveritietokone saattoi olla reilun urheilukassin kokoinen. Mikrotietokoneet tulivat silti useimmiten omissa peltikuorissaan ja konesaleissa niitä pidettiin lähinnä vapaasti metallirakenteisilla avohyllyillä. Räkkitekniikka tuli ensin tietoliikennehuoneisiin ja ensimmäiset räkkeihin kiinnitettävät modulaariset serverit ilmaantuivat muistaakseni joskus 1990-luvun alkupuolella.

Tietokonekäytössä olevat räkkit on standardoitu ensimmäisen kerran 1992 amerikkalaisen Electronic Industries Associationin toimesta (EIA, 1992). Tällöin perusräkin leveydeksi standardoitui 19 tuuman levyinen etupaneeli, jota käytetään yleisesti edelleen audiovisuaalisella alalla tai tietoliikenne-räkeissä. Konesalien räkkit eivät nykyään useinkaan ole enää 19 tuumaisia. Tavanomaisia kokoja ovat esimerkiksi 24” tai 30”, jotka ovat todellisuudessa 600 ja 750 millimetriä leveitä. Noilla leveyksillä pyritään saamaan räkki sopimaan konesalin tavanomaiseen asennuslattialaattajakoon, joka on useimmiten 600 x 600 millimetriä.

Räkki voi olla joko avomallinen tai ovellinen. Ovia voi olla takana ja edessä ja ne saattavat olla lukollisia. Ovet eivät estä jäähdytysilman sisäänpääsyä räkkiin,

mutta haitata ne sitä kyllä saattavat. Kuvassa 1 on esimerkki 600 mm leveästä räkistä, jossa on pariovet räkin ns. takaosassa.



Kuva 1. Räkkiteline - tietokonesalin peruskaluste

Räkkistandardi määritteli alun perin kolmenlaisia erilaisia kiinnitysreikiä räkin laidoille, joihin voi kiinnittää hakasilla, ruuveilla ja muilla systeemeillä erilaisia kiskoja, liukuja tai hyllytasoja. Kolmen kiinnitysreiän varaama keskimitta on $1\frac{3}{4}$ tuumaa ja muodostaa niin sanotun räkkiyksikön (ks. Kuva 1). Räkkiyksikön (engl. rack unit eli U) ajatellaan olevan pienin mahdollinen tilavaraus räkistä, minkä jokin tietotekninen laite räkistä tarvitsee, laite voi toki ottaa tilaa enemmänkin räkkiyksiköitä, niin paljon kuin räkistä vain korkeutta ja vapaata tilaa löytyy.

Kuva 2 on räkkejä kalustettuina erilaisilla tarvikkeilla. Käyttötექnikko on parhailaan vaihtamassa ns. blade-tyyppistä serveriyksikköä räkkiin. Blade-yksiköiden yläpuolella on perinteisempiä ns. räkkiservereitä, jotka ovat koko räkkin levyisiä tasoja. Huoltohenkilön selän yli, takana olevassa räkissä näkyy perinteinen irrallinen laatikkoserverikin seisomassa vapaasti räkkiin kiinnitettyyn tasohyllyyn.

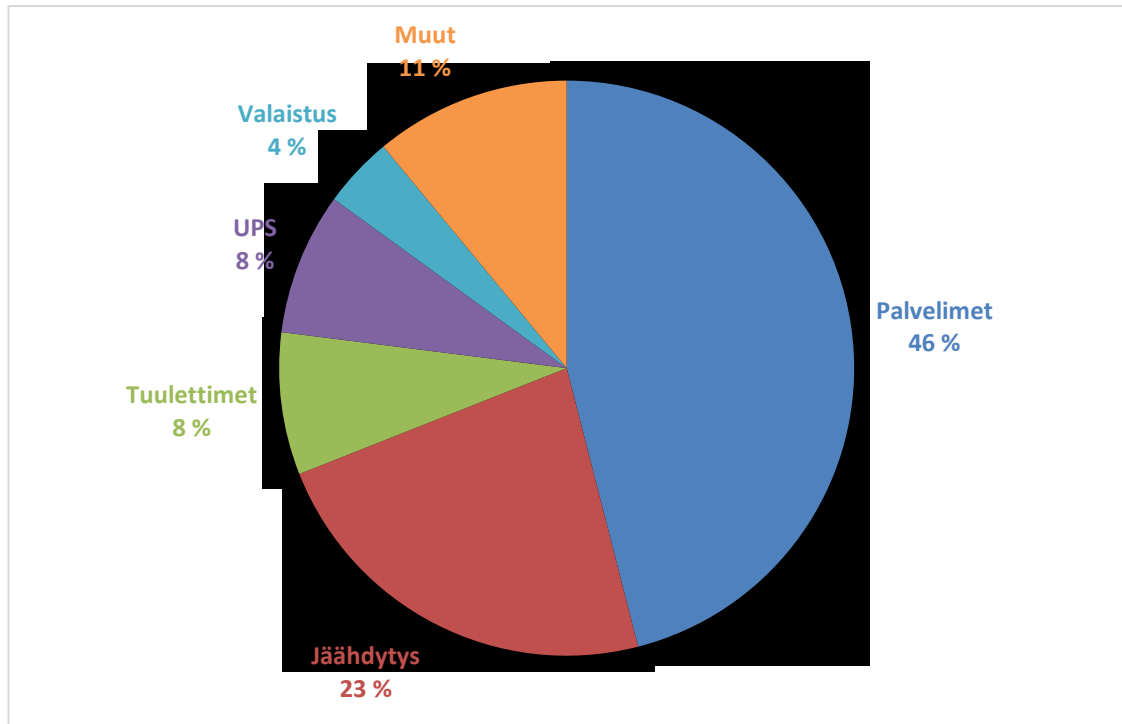


Kuva 2. Räkkiteline, jossa on sekä blade- että rakkiservereitä (Kolbjornsrud)

Itse rakkikehikon kokonaiskorkeus ilmoitetaan usein räkkiyksikköinä, esim. 42U on tavanomainen rakin korkeus. SI-yksikköinä ilmoitettuna tuollaisen räkkitelineen korkeus on siis $42 \times 1,75'' = 73,5''$, joka on 1866,9 millimetriä. Tuo on vasta sisäkalusteille räkkitelineessä varattu tila. Jonkin verran itse kehikko ja mahdolliset lattiaa vasten olevat säätötassut tarvitsevat tilaa, tyypillinen todellinen korkeus voikin olla esim. 2000 millimetriä eli 2 metriä. Rakin syvyys voi vaihdella, konesaleissa tavanomaisia ovat esimerkiksi 24 tuumaa tai 48 tuumaa syvät. Todellisuudessa ne ovat 600 tai 1200 millimetriä eli tuumamitat ovat suurpiirteisiä. Kuormankantavuutta yhdessä räkissä on usein 2000 - 3000 kg.

2.7 Mikä datakeskuksissa käyttää sähköä?

Suurin sähköenergian kuluttaja datakeskuksessa ovat IT-laitteistot, niiden sisältämät prosessorit, oheiselektronikat ja laitetuulettimet. Sen jälkeen suurin sähkötehon kuluttaja on datakeskuksen jäähdytys. Datakeskuksissa voi esiintyä paikoitellen hyvin suuria lämpökuormia pienellä alueella. Jäähdytyksen tehtävänä on joko jäähdytetyn ilman tai nesteen avulla hallitusti jäähdyttää nuo lämpökuormat pois ja siirtää rakennuksen ulkopuolelle. Ellei hukkalämmön talteenottoa ole järjestetty – kuten sitä yleensä ei ole – niin tuo lämpö pukataan joko taivaalle ilmakehään tai vaikkapa mereen.



Kuva 3. Konesalin sähkönkäyttö (Motiva Oy 2011)

Riippuen siitä mistä lähteestä tietoja hakee, saa hieman poikkeavia vastauksia siitä, mihin datakeskuksen käyttämä sähkö menee. Kuva 3 on Motivan Energia-
tehokas konesali -oppaasta napattu jakauma konesalin sähkönkulutuksesta.

Jäähdytyksen tarvitsema sähkön määrä riippuu merkittävästi siitä, joudutaanko datakeskuksen tarvitsema kylmä tekemään koneellisesti kompressoreilla vai voidaan viileän ilmaston vuoksi saada riittävä jäähdytys pelkkää ulkoilmaa (tai viileää luonnonvettä) käyttämällä. Kompressoreilla tai vastaavilla tuotettua kylmää sanotaan mekaaniseksi jäähdytykseksi. Viileästä ilmastosta saatu kylmä on vapaajäähdytystä. Suomi on konesalien sijoituksen kannalta edullinen paikka viileän ilmastonsa vuoksi. Suomessa on runsain mitoin viileää ilmaa ja viileitä vesistöjä.

Jäähdytyksen jälkeen merkittävä lämpöhäviöiden tuottaja on sähkönsiirto. Datakeskusten sähkö on yleensä UPS-laitteistolla varmistettua "online"-sähköä. Tuolaisessa sähkössä UPS-laitteisto tekee työtä kaiken aikaa ja "syö kuormasta". Valtakunnan verkosta tuleva sähkö muunnetaan tasavirraksi ja sen jälkeen vielä uudestaan vaihtosuunnataan. Tehdään ns. tuplamuunto. Kaikki UPS-laitteen

muuntohäviöt muuttuvat nekin lämmöksi. Tyypillisesti tuo arvo on noin 6-8 % luokkaa. Siten esimerkiksi 500 kVA UPS-laitteisto tuottaa 35 kW lämpökuorman täydellä teholla toimiessaan.

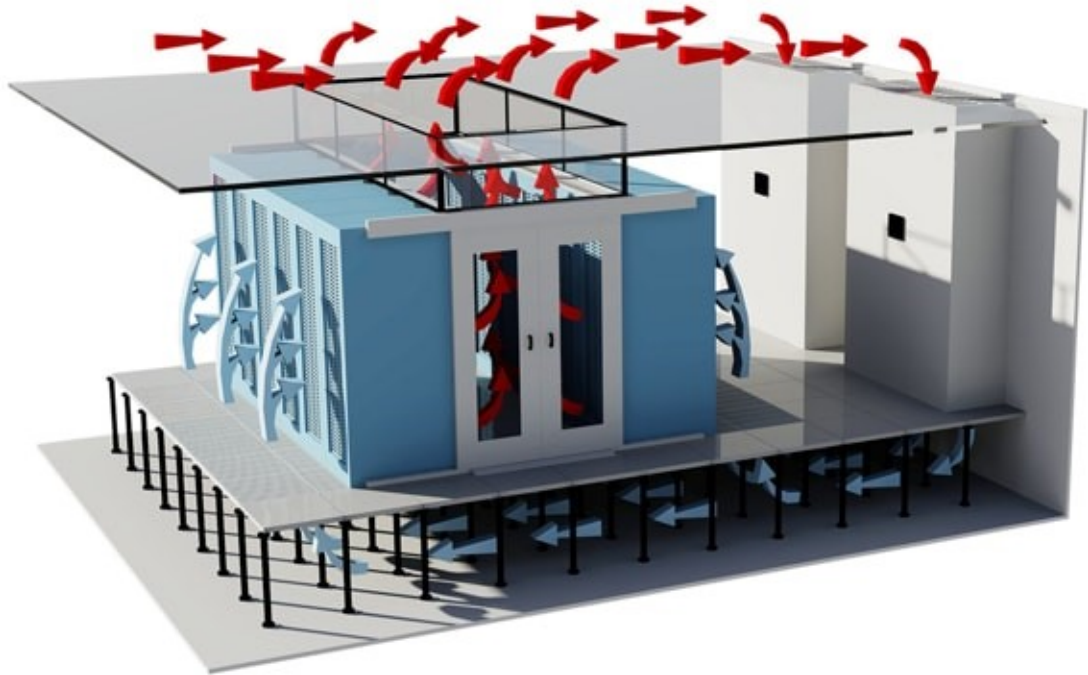
Loput datakeskuksen sähkönkäytöstä on valaistusta, ilmanvaihtoa ja muuta tavomaista toimitilarakennuksen sähkönkäyttöä. Datakeskuksen yhteydessä voi olla myös jonkin verran toimistotilaa työskentelytilaksi. Tyypillisesti noiden tilojen määrä ja sähkönkulutus on mitätön verrattuna varsinaisen IT-keskuksen käyttämiin energiamääriin. Ne kannattaa näissä tarkasteluissa sivuuttaa asioiden yksinkertaistamiseksi. Datasaleissakin on usein pimeää ja valot toimivat liiketunnistimilla. Datasaleissa, joista englanniksi käytetään usein nimitystä white space, työskentelee ihmisiä sängen harvakseltaan.

2.8 Millaista lämpöä datakeskuksissa syntyy?

Käytännössä kaikki datakeskukseen viety sähköenergia muuttuu energian häviämättömyyden lain mukaisesti viime kädessä lämmöksi. Edellisessä kappaleessa käsiteltiin sähköenergian käytön jakaumaa datakeskuksessa. Kappale vastasi kysymykseen missä kohtaa datakeskusta lämpöä syntyy ja kuinka paljon suhteessa kokonaisenergiankäyttöön. Sen sijaan se ei sisällä tietoa syntyvän hukkalämmön laadusta (lämpötilatasoista).

2.9 Konesalin perinteinen ilmajäähdytys

IT-tekniikan tuottama lämpö syntyy sähkön kulkiessa palvelinten ja oheislaitteiden elektroniikassa. Palvelimissa olevat sähköiset materiaalit kukin vastustavat sähkön kulkua, mikä enemmän, mikä vähemmän. Tuosta sähkön kitkasta, resistanssista, syntyvät sähköhäviöt muuttuvat lämmöksi.



Kuva 4. Perinteinen ilmankierto konesalissa (Colocation America 2014)

Yliämpö konesalien elektroniikasta kerätään pois yleensä ilmajäähdytteisesti. Kuva 4 esittää kuinka konesalien jäähdytys on perinteisesti järjestetty jo 40 - 50 vuoden ajan. Siinä jäähdytyskoneiden tuottama kylmä ilma puhalletaan korotetun asennuslattian alle, josta se kulkeutuu rakkien edessä lattiassa oleviin reikä- tai venttiililaattoihin. Jäähdytyskoneiden puhaltimien tuottaman paineen pakottamana jäähdytetty ilma puhaltuu rakkien eteen, josta se edelleen paine-eron voimasta jatkaa matkaansa rakkien sisään. Tarvittaessa rakkien elektroniikassa olevat laitetuulettimet tehostavat ilmavirran liikettä. Rakkien sisällä viileä ilma kohtaa kuumen elektroniikan, jäähdyttää sitä ja samalla ilma lämpenee itse.

Lämmennyt ilma poistuu rakkien taakse niin sanottuun kuumakäytävään. Kuumakäytävästä on joko kanavistot jäähdytyskoneille tai tyypillisesti alaslasketun katon ylätila toimii kuumen ilman paluureittinä klassisessa konesalissa. Kuvan 4 järjestelyssä on käytetty alaslaskettua kattoa kuumenneen ilman paluureittinä salin seinustalla oleville jäähdytyskoneille. Kannattaa myös huomata, että kuumakäytävä on huolellisesti erotettu muusta konetilasta käyttämällä ovia ja pleksilasia erottamaan ilmassojen sekoittuminen. Jäähdytyskoneilla kuumennut ilma kohtaa kylmät jäähdytyspatterit, joissa se lämmittää pattereissa sisällä kiertävää

nestettä tai kylmäainetta, jäähtyen samalla itse uutta kierrosta varten. Moderneissa konesaleissa ei välttämättä käytetä korotettua asennuslattiaa kustannussyistä. Viileä ilma saatetaan vain puhaltaa suoraan tilaan. Myös muunlaisia ilmankierron konfiguraatioita on olemassa kuin edellä kuvattu klassinen konesalin ilmankierto. Ne eivät tuota olennaisesti erilämpöistä hukkalämpöä jäähdytysilmaan, joten niiden käsitteleminen ei ole tarpeellista tässä esityksessä.

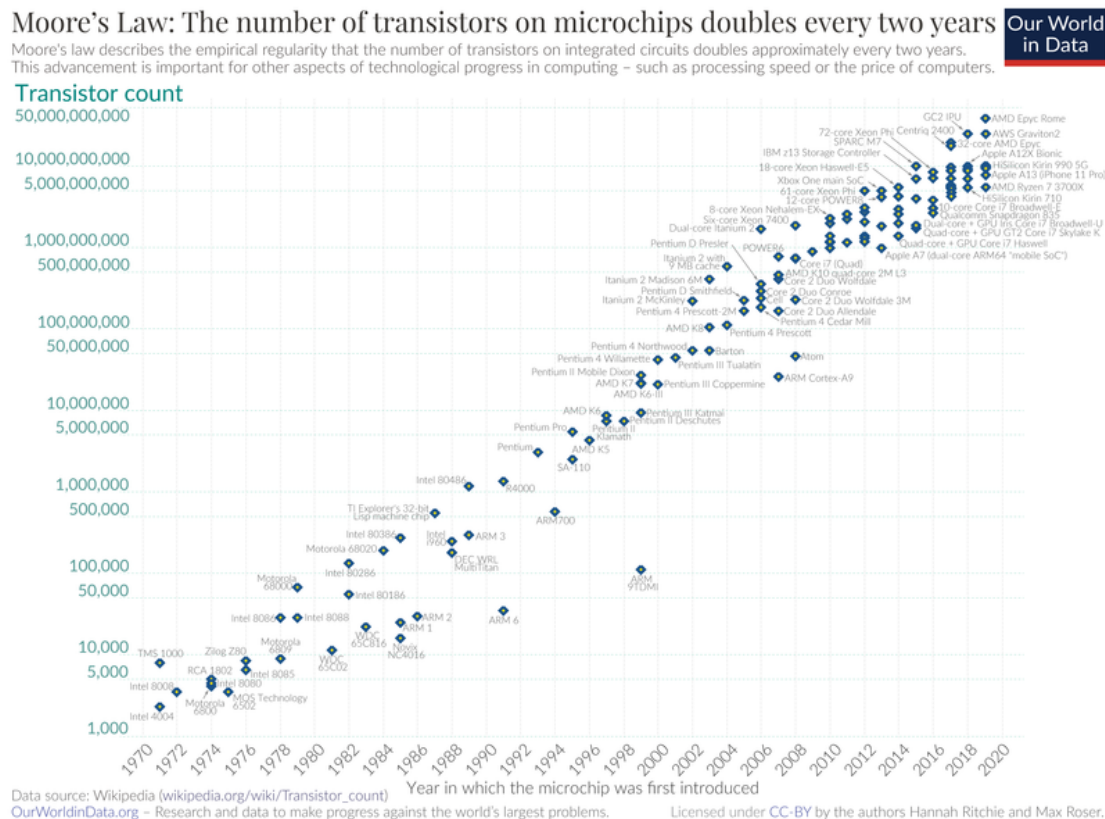
Konesalien jäähdytysilman lämpötilan suunnittelukriteereinä käytetään Yhdysvaltalaisen LVI-insinöörien yhdistyksen, ASHRAE:n laatimaa ohjeistusta, jonka suosittelemat olosuhteet konesaleille ovat lämpötilan osalta 18 – 27 °C (ASHRAE Technical Committee 9.9, 2021, s. 9). Tämä johtaa käytännössä siihen, että konesalista poistettu ilma on tyypillisesti 25 – 35 °C lämpötilaltaan. Hukkalämpö ei siis laadullisesti ole kovin korkeatasoista, mutta sitä on paljon, tyypillisesti liki koko datakeskuskiinteistön sähkötehon verran.

Parhaimmillaankin vain noin 32 °C hukkalämmölle, jota voi olla tarjolla megawattimäärin, on vaikea keksiä käyttökohteita. Kiinteistöjen lämmitykseen se kelpaa suoraan, jos kiinteistön tilat lämpiävät lattialämmityksellä tai nykyään harvinaisella ilmalämmityksellä. Lämmintä käyttövedtä sen sijaan tuon lämpöisellä hukkalämmöllä ei kyetä valmistamaan. Korkeintaan käyttövedtä voidaan kaivokylmästä hieman esilämmittää. Käyttöveden lopullinen priimaus turvallisiin lämpötiloihin on tehtävä muilla keinoin. Kaukolämpöverkkoon syötettäväksi alle 40 astainen vesi ei kelpaa ollenkaan. Laadullisesti huonon hukkalämmön lämpötilatasoa kyetään lämpöpumpputekniikalla korottamaan, josta myöhemmin tässä opinäytetyössä.

2.10 IT-tekniikan tuottaman hukkalämmön potentiaali

Merkittävin tehokeskittymä IT-laitteiden tekniikassa ovat prosessoripiirit, jotka sisältävät hyvin tiukkaan pakattua puolijohdetekniikkaa. Nykyaikainen mikroprosessori sisältää suorastaan ällistyttävän määrän piikiekolle etsattuja pienen pieniä kytkimiä, jotka voivat tilanteen mukaan olla joko päällä tai pois. Noita kytkimiä kutsutaan myös transistoreiksi ja ne rakennetaan piiatomeista, joista on tehty puolijohteita saostamalla piiatomien väliin sopivasti toisia alkuaineita epäpuh-
tauksiksi. Vuosi vuodelta elektroniikkateollisuus pyrkii pakkamaan aina vain

enemmän transistoreita pinta-alaa kohden. Tuo ilmiö pantiin merkille jo varhain puolijohdeteollisuuden alkuaikoina ja eräs alan pioneereista kehitti ilmiötä kuvaamaan määritelmän, jota sanotaan Mooren laiksi.



Kuva 5. Mooren lain toteutuminen 50 vuoden aikana (Ritchie & Roser)

Mooren laki tarkoittaa sellaista eksponentiaalista kehitystä, jossa transistoreiden lukumäärä kaksinkertaistuu joka toinen vuosi tiettyä piikiekon pinta-alaa kohden. Kuvassa 5 on Mooren lain mukainen transistoritiheyden kasvu 50 vuoden ajalta. Kasvu on ollut eksponentiaalista, y-akselin asteikko on logaritminen.

Aivan viime aikoina on alkanut esiintyä arveluja, että Mooren lain mukainen kehitys on hidastumaan päin. Piirilevyjen pakkaustiheyden kasvattaminen on nojanut fotolitografiaan, jossa ultravioletilla on kyetty etsaamaan piikiekolle sähkölle kulkutiet transistoriverkostoiin. Parhaimmat prosessit menevät nykyään 5 nanometrin erottelukyvissä, joka saattaa olla päätepysäkki pakkaustiheyden kasvattamiselle fotolitografian keinoin. Viisi nanometriä leveä sähkön kulkutie integroidulla piirillä on vain 10 piiatomin levyinen. Intelin uusimpiin prosessoreihin

kuuluva, vuodenvaiheessa 2020/21 esitelty Intel i7-11375H kuluttaa sähköä aikaisempiin sukupolviin nähden vähän, 35 Wattia. Tuo sähkö johdetaan piinpalaselle, joka on pienempi kooltaan kuin 46,5 x 25 millimetriä.

Luvuista on vaikea saada käsitystä, ovatko ne paljon vaiko vähän. Jos lasketaan Intelin 11375H-prosessorin huipputeho neliometriä kohden, saadaan yli 30 kilowattia sähkötehoa neliometrillä alalla. Normaali kotitaloussähkökuus on 6-9 kilowattia sähköteholtaan. Nyt on jo hieman helpompi mieltää, että piisirulle johdetaan varsin paljon sähköä pienelle alalle. Piistä tehty prosessori voi kuumentua korkeisiin lämpötiloihin. Tyypillinen suunnittelulämpötila prosessoreiden operatiiviselle maksimilämpötilalle on 100-105 celsius-astetta (Intel Corporation, 2009). Kovissa kuormitusjaksoissa prosessori helposti ottaa enemmän sähköä kuin mitä ilmajäähdytys ehtii sitä jäähdyttämään. Lämpötilan lähestyessä operatiivista maksimilämpötilaa, prosessorin suojaelektronikka ryhtyy hidastamaan suorittimen toimintaa ja vähentää siten sekä suorituskykyä että sähkönkulutusta. Mikäli jäähdytys olisi tehokkaampaa, saataisiin monesta nykyajan prosessorista enemmän laskentatehoa irti pitkäkestoisessa kuormituksessa. (Ellsworth & Iyengar, 2009)

Edellisessä kappaleessa todettu konesalin jäähdytysilmasta saatu vaatimaton lämpötilataso ei johdukaan ainakaan prosessoreista. Mikäli hukkalämpö kerättäisiin suoraan prosessoreilta talteen esimerkiksi nestejäähdytyksellä, voidaan saada laadullisesti parempaa hukkalämpöä, jonka lämpötilatason voi olla esimerkiksi 50 – 80 °C astetta. Noin 65 °C hukkalämmöllä voitaisiin suoraan valmistaa lämmintä käyttövettä ja se kävisi kaikkiin uudenaikaisiin lämmitysjärjestelmiin, ei vain lattialämmitykseen. Yli 70 °C hukkalämpö kelpaisi sitten jo kesäaikaan suoraan kaukolämpöverkon menovedeksi. Yhteistyöhalukkaimmat lämpölaitokset hyväksyvät tuollaisen veden talvikaudella paluupuolen kaukolämpövettänsä lämmittämään ja suostuvat joihin siitä energiasta myös hyvittämään.

Sveitsissä tutkijaryhmä modifioi IBM:n supertietokoneen vuonna 2011 nestejäähdytykselle. Sveitsiläisten supertietokoneesta saadaan suoraan ulos 50 °C asteista vettä, jota käytetään yliopistocampuksella muiden rakennusten lämmittämiseen (Severin Zimmermann, 2012)

Taulukko 1 on Intelin dataan (Intel Corporation, 2009) perustuen listattu konesalissa olevan tekniikan tuottamia tyypillisiä yllämpötasoja sekä niiden arvioitu osuus syntyneestä ylijäämälämmöstä.

Taulukko 1. Datakeskuselektroniikan tuottamia lämpötilatasoja

komponentti	osuus jäähdytyskuormasta	lämpötila
mikroprosessorit	30 %	85 °C
muistipiirit	11 %	70 °C
kiintolevyt	6 %	45 °C
laitetuulettimet	9 %	30 °C
emolevyt	3 %	40 °C
AC/DC muunto	25 %	55 °C
DC/DC hakkurit	50 %	50 °C

2.11 Datakeskuksen muut hukkalämmön lähteet

Kuten Motivan tiedoista (Kuva 3) ilmeni, konesalissa on itse salijäähdytyksen ja IT-tekniikan lisäksi vielä jäähdytystekniikkaa, UPS-koneikkoja, valaistusta, tuulettimia sekä muuta tekniikkaa, jotka kehittävät hukkalämpöä.

Jäähdytystekniikan pumppujen ja tuulettimien hukkalämpö sitoutuu käytännössä laitoksen tuottamaan jäähdytysvedeen eikä lämpötilatasoiltaan poikkea konesalin tuottamasta 30 - 40 °C hukkalämmöstä.

UPS-laitteistosta olisi saatavilla 40 astetta korkeampia lämpötiloja, mutta käytännössä laitteet lauhduttavat yllämpönsä suoraan huonetilaan puhaltamalla. Niissä ei yleensä ole jäähdytysilmakierron tarkalle järjestämiselle sopivia kanavayhteitä, joilla saisi termistä laipointia parannettua ja estettyä kuumen ilman sotkeentuminen huoneilmaan.

Loput datakeskuksen lämmönlähteistä kuten valaistus ja muut tekniikka hukkuu yleiseen tilajäähdytykseen eikä yleensä varsinaisesti erotu lämpötilatasoiltaan muusta tekniikasta. Niiden merkitys on myös vähäinen koko datakeskuksen lämpökuormasta.

Lopuksi voidaan todeta, että datakeskuksissa on yleensä vain yksi jäähdytysvesikierto, johon lauhdutetaan kaikki mahdolliset hukkalämmöt, niin konesaleista kuin aputiloistakin. Viimeistään siinä vaiheessa konesalin erilaatuiset lämmönlähteet sekoittuvat toisiinsa ja datakeskus tuottaa tyypillisesti noin 32 - 40 °C lämpöistä lauhdevettä. Jos lämmöntalteenottoa ei ole järjestetty, niin tuo lämpö lauhdutetaan ympäristöön esimerkiksi liuosjäähdyttimillä (engl. dry coolers).

2.12 Tulevaisuuden konesalien jäähdytyksen kehityssuuntia

Konesaleja vuosikymmeniä hyvin palvellut ilmajäähdytys vaikuttaa olevan tulossa tiensä päähän. Kaikkein tehokkaimmissa laskentaan keskittyvissä tietokoneissa ilmajäähdytystä ei enää käytetä. Kajaaniin valmistuu syksyksi 10 EU-maan yhteistyönä LUMI-supertietokone, jonka prosessoreita jäähdytetään kiertävällä vedellä. LUMI-supertietokoneesta saatu hukkalämpö korotetaan kaukolämpöverkkokelpoiseksi kolmella 3,2 MW turbokompressorilla varustetulla lämpöpumpulla. Lumin jäähdytyksen kokonaisteho on 10 MW. Paikallinen energiayhtiö laskee, että huipputehollaan käydessään LUMI tuottaa 20 % Kajaanin kaupungin kaukolämmön tarpeesta. (Loiste, 2020)

Jatkossa pakkaustiheyttä luultavasti pyritään kasvattamaan puolijohderakenteita kolmanteen ulottuvuuteen ns. 3D-kerrostekniikoilla. Tämä tulee johtamaan siihen, ettei ilmajäähdytys enää riitä jäähdyttämään piirejä riittävästi. Marcinichen (Marcinichen;Olivier;& Thome, 2012) päätteli tutkimusraportissaan, että ilmajäähdytyksen yläraja hukkatohon poistossa olisi 37 W/cm². Kyseinen tehotaso on uusimmissa prosessoreissa saavutettu. Jos piirien integrointiasetusta ja tehosiheyttä halutaan edelleen nostaa, on jäähdytyksessä siirryttävä pois ilmajäähdytyksestä.

On siirryttävä jonkinlaiseen nestejäähdytykseen, johon saattaa liittyä myös kakfasijäähdytystä eli nesteen kiehumista kaasuksi. Tutkimusraporttien ja lehti uutisten perusteella pääteltävissä, että aihetta tutkitaan parhaillaan intensiivisesti. Wangin (Wang;Yin;& Rezai, 2018) koostama katsaus on tuore ja summaa yhteen tämänhetkisen tutkimustilanteen 3D-integroitujen piirien mikrofluidi-perustaisesta jäähdytyksestä.

2.13 Upotusnestejäähdytyksen haasteita

Viime aikoina sekä verkkokauppayhtiö Alibaba että ohjelmistojätti Microsoft ovat tehneet datakeskuksissaan kokeita nestejäähdytyksellä, jossa perinteisiä prosessorikomponentteja upotetaan jäähdytysnestettä sisältäviin altaisiin.

Sinänsä elektroniikan upotusjäähdytys nesteellä ei ole uutta. Varsin pitkään on ollut dielektrisiä jäähdytysnesteitä, joilla on voinut suoraan upotusjäähdyttää elektronisia komponentteja. Jäähdytysnesteinä on käytetty mineraaliöljyjä tai erilaisia ihmisen tekemiä fluorohiiliyhdisteitä (esim. Fluorinert), jotka ovat olleet nestemäisiä ainakin huoneenlämmössä. Osassa näistä nesteistä höyrystymispiste on osunut alueelle 50 – 80 °C, jolloin niihin upotettu elektroniikka kiehuttaa jäähdytysnestettä.

Osa fluorohiiliyhdisteistä on ilmeisen ihmiselle turvallisia, koska niillä on sovelluksia lääketieteessäkin. Sen sijaan osa niistä ei ole kovin ympäristöystävällisiä. Esimerkiksi Fluorinertin GWP-arvo on yli 9000. Kylmälaitepuolella meillä ei ole yhtään kylmäainetta käytössä, jossa olisi noin korkea kasvihuonevaikutus.

Jäähdytysaltaiden saaminen täysin tiiviiksi on haastavaa sinne menevien sähköjohtojen vuoksi. Alibaba raportoi, että nestejäähdytysaltaista katoaa jäähdytysnestettä haihtumatappioiden vuoksi noin 0,5 % vuosittain. Mikäli jäähdytysnesteellä on merkittävästi nollasta poikkeava GWP-arvo, ei niiden käyttöä luultavasti tulla sallimaan ympäristösyistä datakeskuksissa.

Datakeskusalalle edessä on melkoinen murros totutuista pystyräkkiin ja ilmajäähdytykseen perustuvista konesaleista. Upotusjäähdytyksen allasrivistöt saattavat tuoda enemmänkin mieleen jonkinlaisen biologisen viljelylaitoksen kuin tietokonekeskuksen. Tulevaisuuden konesali voi näyttää varsin scifi-mäiseltä pitkin allasriveineen, jossa kumikäsineisiin ja mahdollisesti muihin suojarusteisiin sonustautuneet operaattorit nostavat altaista nestettä tiputtavia elektronisia komponentteja.



Kuva 6. Kokeellisen konesalin upotusjäähdytysallas (Microsoft)

Toimintaympäristö on aivan toisenlainen kuin turvallinen ilma ja kuivat räkkikaapit, joista voi ilman suurempia suojauksia irrottaa pikaliittimellä kiinniolevia komponentteja ja vaihtaa lennossa toisiin. Tulevaisuuden konesalista ei ole edes taitelijan visiota esitellä, mutta Microsoftin kokeilukonesalista hankin kuvan 6, joka toivottavasti antaa hieman vinkkiä siitä, kuinka erilainen toimintaympäristö nesteupotusjäähdytys tulee olemaan ilmajäähdytykseen verrattuna. Mielenkiintoista on erityisesti nähdä, kuinka colo-liiketoiminta tulee sopeutumaan tähän muutokseen. Colo-konesaleissa touhuaa muitakin kuin datakeskusoperaattorin omaa koulutettua henkilökuntaa.

2.14 Upotusnestejäähdytyksen päälajit ja niiden erot

Upotusnestejäähdytystä on tarjolla kahta pääasiallista lajia: yksifaasi ja kaksifaasiupotusta. Yksifaasiupotuksessa neste ei kiehu vaan sitä kierrätetään aivan kuten vettä kierrätetään jäähdytysverkostossa. Kaksifaasiupotusjäähdytyksessä käytetty neste kiehuu eli muuttuu kaasumaiseksi. Kaasu lauhdutetaan takaisin nesteeksi lauhduttimessa ja palautetaan altaaseen.

Jos näistä kahdesta päälajista pitäisi arvata, kumpi yleistyy tulevaisuuden valta-tekniikaksi, niin arvelisin että kaksifaasijäähdytys. Sillä päästään suurempiin jäähdytystehoihin ilman pumppuja. Lisäksi lauhdutus takaisin nesteeksi voidaan

haluttaessa tehdä keskitetysti. Kaksifaasijäähdytyksen neste ei myöskään ole niin ”sottaista” nestettä kuin yksifaasijäähdytyksen nesteet, jotka tупpaavat olemaan öljymäisiä ja sotkevat paikkoja. Yksifaasijäähdytyksen nesteen ongelmia ovat myös, että sen lämmönsiirto-ominaisuudet ovat heikkoja. Nestettä on kierätettävä voimakkaalla pumpulla altaassa, jotta saadaan riittävää jäähdytystä aikaiseksi. Kaksifaasijäähdytyksen haittoja on suuremmat haihtumatappiot sekä se, että höyrystymisessä syntyvä kaasu – vaikka ei olisikaan terveydelle suoraan vaarallista – on happea syrjäyttävää ja muodostaa siten oman vaaramomenttinsa konesalissa oleskeleville ihmisille.

Kaksifaasijäähdytys avaa myös mielenkiintoisempia hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia kuin yksifaasijäähdytys. Koska jäähdytyksessä käytettävä väliaine muuttaa olomuotoaan nesteestä kaasuksi ja takaisin, on mahdollista korottaa höyrystymisessä syntynyttä kaasua suoraan kompressorilla korkeampaan lämpötilaan. Jos altaista tulevan höyrystyneen kaasun lämpötila olisi vaikkapa 65 °C, saataisiin siitä tehtyä erittäin hyvällä hyötysuhteella suoraan noin 100 °C kaukolämpöä. Toinen vaihtoehto kaasun käytölle on orgaaninen rankine-kierto (ORC). Rankine-kiertoa käytetään esimerkiksi höyryturbiinivoimalaitoksissa sähköntuotantoon. Datakeskus, joka tekisi hukkalämmöstään osan takaisin sähköksi nesteupotusjäähdytyksestä peräisin olevasta höyrystä olisikin vinkeä uutuuus.

2.15 Datakeskuksen energiatehokkuuden mittareita

2.15.1 PUE – Power Usage Effectiveness

Tämän datakeskusten energiatehokkuuden mittarin lanseerasi Green Grid niminen IT-teollisuuden yhteistyöryhmittymä vuonna 2007. Kuten nimikin vihjaa, mittaluku esitettiin alun perin hetkelliseksi suhdeluvuksi, joka mittasi paljonko datakeskuksen käyttämästä kokonaistehosta käytettiin varsinaisessa IT-laitteistossa. Tuollainen hetkellinen hyötysuhteen mittari muuttuu mm. sen mukaan millainen säätila ulkona vallitsee tai mikä on esimerkiksi UPS-laitteistojen kuorma.

Joissakin lähteissä kuten Motivan ”Energiatehokkaat konesalit” esitteessä PUE-arvon mittaukselle esitetään eri luokkia, nollasta neljään. PUE-kategoria 0 mitaus Motivan esitteessä on hetkellistä PUE-arvon mittaamista (Motiva Oy, 2011).

Hetkellistä PUE-arvon mittaamista voi datakeskuksen operatiivinen johto käyttää yhtenä mittarina siitä, kuinka hyvin datakeskus kulloisenakin hetkenä toimii. Yleinen mittaus on esimerkiksi määrittää hetkellinen PUE-arvo minuutin välein ja esittää se valvomon näytöllä.

Vain kaksi vuotta PUE-mittarin määrittelyn jälkeen Green Grid linjasi, että PUE pitääkin laskea käytetyn kokonaisenergian mukaan esimerkiksi vuoden aikana. Mittarin nimeä ei kuitenkaan korjattu vaan siellä on edelleen sana 'teho' vaikka lasketaankin energiankulutusta. Yuventi ja Mehdizadeh (2013) ehdottivat, että PUE mittarin nimi korjattaisiin ja nimeksi vaihdettaisiin Energy Usage Effectiveness (EUE). PUE-mittaluvun määritelmä siirtyi Green Gridiltä vuonna 2016 ISO-standardointiorganisaatiolle eikä standardointiorganisaatiokaan näytä tehneen nimeen tarpeellista korjausta. Valitettavasti datakeskusteollisuus on ihastunut nimeään myöten rikkiinäiseen energiatehokkuuden mittariin siinä määrin, että siitä on tullut käytetyin mittari ja markkinointiargumentti alalla. Sitä käytetään myös datakeskusten väliseen "paremmuuden" arvuuttamiseen, vaikkei sitä alun perin ole siihen tarkoitettu alkuunkaan eikä se siihen kovin hyvin sovellu.

Teoreettisessa ideaalitulanteessa kaikki datakeskuksen käyttämä energia menisi IT-laitteille ja muuta energiankäyttöä ei olisi. Tällöin PUE-luku olisi 1 kuten kaavaa 1 tarkastelemalla voidaan todeta. Mitä suurempi PUE-arvo on, sitä enemmän energiaa kuluu muihin toimintoihin kuten jäähdytykseen, UPS-laitteistojen häviöihin, ilmanvaihtoon, valaistukseen ja muuhun, mikä ei palvele IT-laitteiden prosessoreiden pyörittämistä.

$$PUE = \frac{E_{tot}}{E_{it}} \quad (1)$$

missä

PUE on power usage effectiveness, IT-toimintaan käytetty energia kokonaiskäytöstä

E_{tot} on kaikki datakeskuksen 12-kuukauden periodin aikana käyttämä energia [MWh]

E_{it} on datakeskuksen IT-laitteiden energiankulutus samalla tarkasteluajanjaksolla [MWh]

PUE-mittari ei huomioi mitenkään datakeskuksen ahmiman energian hiilitasetta. Likaisen hiilivoimalan sähköä käyttävä datakeskus saa tismalleen saman PUE-

arvon kuin vaikkapa tuulisähköllä toimiva datakeskus, mikäli datakeskukset muutoin ovat samanlaisia.

Datakeskusten tuottama hukkalämpö ei kelpaa suoraan kaukolämmöksi. Hukkalämmön laatua on parannettava kompressorikierrolla. Kompressorit tarvitsevat kohtalaisen paljon sähköenergiaa, mikä huonontaa datakeskuksen PUE-lukua. Siten PUE-luku on kaukolämpöä tuottaville datakeskuksille huono energiatehokkuuden mittari.

Kenties huvittavin yksityiskohta PUE-luvun ongelmista on esimerkki, jossa datakeskuksen jäähdytysilman lämpötilaa nostetaan energiatehokkuuden tavoittelun nimissä liian korkeaksi. Tällöin servereille johdetaan liian lämmintä jäähdytysilmaa, mikä johtaa siihen, että jokaisessa serverissä sijaitseva pieni laitetuuletin nostaa kierroslukuaan tehostaakseen jäähdytystä. Datakeskuksen sähkönkulutus lisääntyy, mutta tällä kertaa lisääntynyt energiankulutus lasketaan IT-laitteiden käyttämäksi. PUE-luku siis laskee, vaikka datakeskuksessa ei välttämättä tehty järkevää muutosta ja konesalin sähkölaskukin vain kasvoi.

2.15.2 PUE-arvoja käytännön datakeskuksissa

Operaattoreille suunnatuin kyselytutkimuksin on selvitetty, millaisia PUE-arvoja käytännön datakeskuksissa esiintyy. Datakeskusalan keskiarvo on Van Geetin mukaan noin 2. Hyvä laitos saavuttaa arvon 1,4 ja parhaimmat 1,1. Kaikkein pienimmät PUE-arvot ovat yleensä mitattu megadatakeskuksissa, joita operoivat Googlen ja Facebookin tapaiset jättiläiset. Jättiläisten muita paremmat resurssit näkyvät alhaisina PUE-arvoina: vaihteluväli on 1,08 – 1,31. (VanGeet, 2011)

2.15.3 ERE – Energy Reuse Effectiveness

Varsin pian PUE-energiatehokkuusluvun lanseeraamisen jälkeen Green Grid huomasi, että PUE-tunnusluvussa oli yksi ilmeinen heikkous: hukkalämmön hyötykäyttöön pyrkiviä datakeskuksia PUE-tunnusluku ei mitenkään palkinnut ponnisteluistaan vaan päinvastoin saattoi jopa rangaista niitä.

Green Grid lanseerasi 2010 uuden parannetun PUE-luvun, jolle annettiin nimeksi Energy Reuse Effectiveness, ERE (The Green Grid, 2010).

$$ERE = \frac{E_{tot} - E_{reused}}{E_{it}} \quad (2)$$

missä

ERE	on	energy reuse effectiveness, energian hyötykäytön tehokkuus
E_{tot}	on	kaikki datakeskuksen 12-kuukauden periodin aikana käyttämä energia [MWh]
E_{reused}	on	datakeskuksesta hyötykäyttöön saatu hukkalämpö [MWh]
E_{it}		datakeskuksen IT-laitteiden energiankulutus samalla tarkasteluajanjaksolla [MWh]

Kaavaa 2 tarkastelemalla huomataan, että ERE on käytännössä sama tunnusluku kuin PUE silloin kun $E_{reused} = 0$. ERE-luvun tapauksessa kannattaa huomata, että hyötykäytettyyn energiaan ei voida laskea mukaan datakeskuksen sisäistä hyötykäyttöä, koska sen katsotaan olevan jo mukana PUE-arvon laskennassa. (The Green Grid, 2010, s. 6)

Motivan "Energiatehokas konesali"-oppaassa mainittu NPUE-tunnusluku (Motiva Oy, 2011, s. 19), Net Power Usage Effectiveness näyttäisi olevan täysin sama tunnusluku kuin ERE. NPUE-tunnusluvun esitteli diplomityössään Anders Greijer samana vuonna, kun Green Grid julkaisi ERE-tunnusluvun laskentaperusteet. (Greijer, 2010)

3 KAUKOLÄMMITYS

3.1 Yleistä kaukolämmöstä

Tämän opinnäytetyön toinen osapuoli on kaukolämmitys. Kaukolämmitystä ei ole virallisesti Suomessa määritelty. Ruotsissa kaukolämpöliiketoimintaa säätelee laki ja kyseisen lain ensimmäinen pykälä kuuluu seuraavasti:

Med fjärrvärmeverksamhet avses i denna lag distribution i rörledningar av hetvatten eller annan värmebärare för uppvärmning, om en obestämd grupp inom ett visst geografiskt område får anslutas till verksamheten.

En fjärrvärmeverksamhet omfattar även produktion och försäljning av den värme som distribueras i rörledningarna, om den som bedriver distributionen även bedriver produktionen och försäljningen av värmen.
(Fjärrvärmelag, 2008:263, Sveriges riksdag)

Kaukolämpö on ruotsalaismääritelmän mukaan siis lämmön jakelua putkiverkostossa, johon liittyminen lämmön kuluttajaksi on avointa. Ruotsalaismäärittely rajaa pois suljettujen alueiden kaukolämpöverkostot esimerkiksi tehdasalueilla tai esimerkiksi maatilojen pienet paikalliset, useampaa kiinteistöä palvelevat lämpölaitokset.

Tässä opinnäytetyössä rajataan kaukolämmön tarkastelu koskemaan ammattimaisia kaukolämmön tuottajia, jotka usein operoivat kaukolämpöverkkoaan Energiateollisuus ry:n ”K1 Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet” standardin (Energiateollisuus ry, 2020) mukaisin periaattein. Kyseisestä standardista käytetään usein kaukolämpöalalla nimitystä ”K1” ja sitä minäkin käytän sen vaikiintuneen kätevyyden vuoksi.

Käytännön kaukolämpöverkko koostuu suljetusta kiertävän veden piiristä, jossa on meno- ja paluuputkistot. Muunkinlaisia ratkaisuja ja topologioita on olemassa, mutta niiden käsitteleminen ei tuottaisi lisäarvoa tähän esitykseen, jossa pyritään yksinkertaiseen ja ymmärrettävään ydinasian esittämiseen maallikoille. Suoma-

laisessa kaukolämpöverkostossa kulkee menopuolella paineistettua vettä ulkolämpötilasta riippuen 70 - 115 °C lämpötilassa ja paluupuolella noin 40 – 60 °C lämpötilassa.

3.2 Kaukolämmön historiasta

Maailman tiettävästi ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin Yhdysvalloissa Lockportiin 1877. Lämmönsiirtoon käytettiin höyryä. Ensimmäinen puhtaasti vesikiertoinen kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin Saksan Dresdeniin. Ruotsiin rakennettiin ensimmäinen kaukolämpöverkosto 1903. Suomen ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä näki päivänvalon Helsingin Olympiakylässä 1940. Kansainvälisesti katsottuna myöhäisen ja vaatimattoman alun jälkeen kaukolämmöstä on tullut hyvin suosittu lämmitysmuoto Suomessa ja kansainvälisesikin katsottuna Suomessa on korkea kaukolämmityksen penetraatioaste.

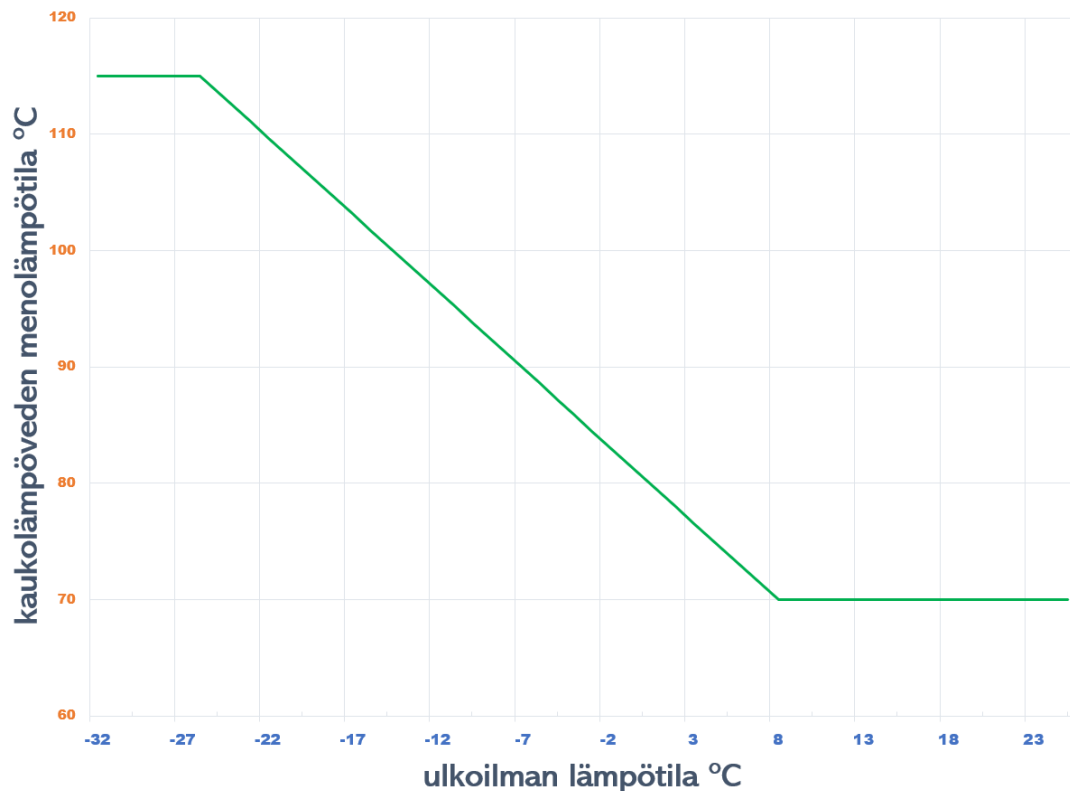
Suomessa oli vuonna 2013 kaukolämmön tuotantokapasiteettia 22 GW ja asiakkaiden liittymisteho oli 18 GW. Kaukolämpöverkostojen kokonaispituus on noin 14000 km. Suomessa 53 % väestöstä asuu kaukolämmitetyissä kiinteistöissä. Kolme neljännestä (75 %) lämpöenergiasta tuotetaan lämmön ja sähkön yhteistuotantona (CHP). Vuonna 2014 Suomessa tuotettiin kaukolämpöä 34.5 TWh josta CHP:llä tuotettua lämpöä oli 25.6 TWh (Energiateollisuus, 2020). Kaukolämpö on siis hyvin merkittävä lämmitysmuoto Suomessa ja siten kaikki siihen kohdistetut toimenpiteet, jotka vähentävät hiilijalanjälkeä tai tehostavat energian hyötykäyttöä, omaavat merkittävän potentiaalin suurinumeroisiin säästöihin.

3.3 Kaukolämpöveden lämmitysvaatimukset olemassa olevissa verkostoissa

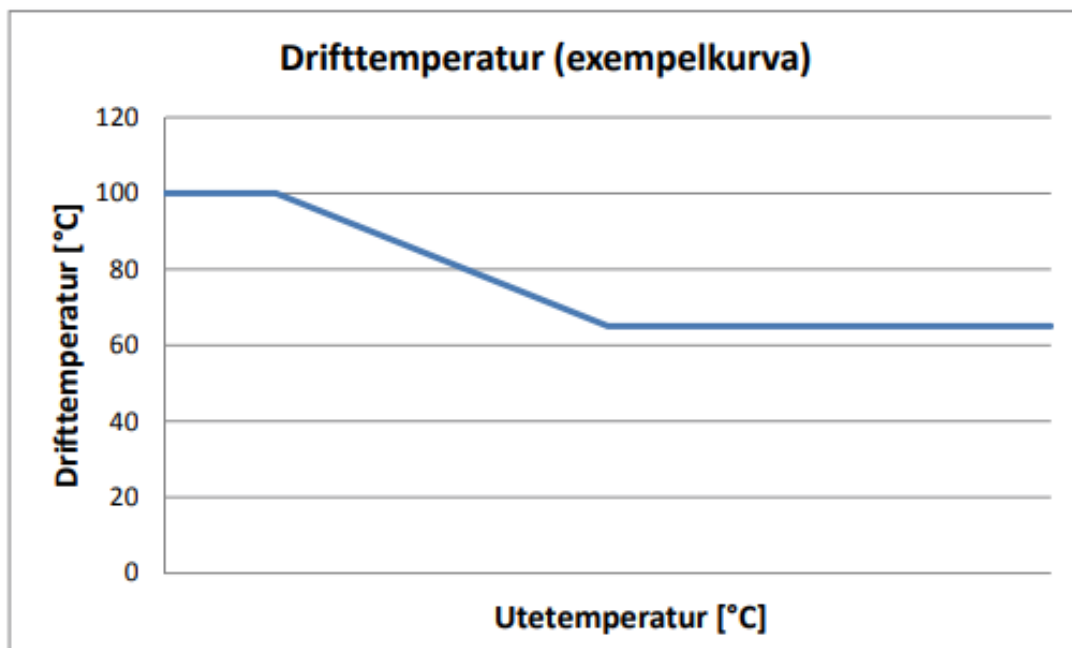
Suomessa oli vuonna 2015 14600 km rakennettua kaukolämpöverkosta. Vuosittain verkosta rakennetaan 200-500 km lisää (Energiateollisuus, 2020). Suurin osa Suomen KL-verkostoista on rakennettu K1-standardin mukaisesti mitoituslämpötiloja myöten. K1:n mukaisesti toteutetuissa verkostoissa menoveden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Silloin kun ulkolämpötila on +8 °C tai enemmän, kaukolämpömenon lämpötila on +70 °C. Ulkoilman lämpötilan pudotua alle +8 °C, kaukolämpölaitos ryhtyy nostamaan lähtevän veden lämpötilaa

aina +115 °C asti, kunnes saavutetaan paikkakunnan ns. mitoituslämpötila. (Energiateollisuus ry, 2020, s. 9)

Esimerkiksi eteläisimmässä Suomessa kuten pääkaupunkiseudulla mitoituslämpötila on -26 astetta ja Lapissa -38 astetta celsiusta. Kuva 7 olen piirtänyt K1-määräyksissä esiintyvän menolämpötilaa ohjaavan kaavan graafiseksi esitykseksi pääkaupunkiseudulla käytetyn mitoittavan ulkolämpötilan mukaan (Energiateollisuus ry, 2020, s. 9). Kuva 7 inspiraationa minulle oli itseasiassa Ruotsin kaukolämpöohjeissa esiintyvä Kuva 8, joka havainnollistaa millaisilla lämpötilatasoilla naapurissa toimitaan



Kuva 7. KL-menoveden säätökäyrä Helsingissä



Kuva 8. KL-Menoveden säätökäyrä Ruotsissa (Energiföretagen, 2014)

Kaukolämpöverkostojen paluueden lämpötilaa ei ole mitenkään erityisemmin määritelty, mutta yleensä lämpölaitokset haluavat, että se olisi mahdollisimman alhainen. Kaukolämmön tulo- ja paluulämpötilojen erotusta kutsutaan jäähtymäksi. Korkea jäähtymä kertoo siitä, että verkostoon liitettyjen asiakaskiinteistöjen laitteet ovat kunnossa ja ottavat tehokkaasti käyttöön verkostossa kiertävää lämpöä. Verkostossa tarvitsee pumppujen voimin kierrättää mahdollisimman vähän vettä, jolloin säästyy myös sähköä pumppausenergian muodossa. Käytännössä kiinteistössä sijaitsevat kaukolämmön mittauslaitteistot rekisteröivät jäähtymän, joka saatetaan välittää kaukolämpölaitokselle jopa miltei reaaliajassa. Esimerkiksi viallisesti toimivan toimilaitteen havaitsee siitä, että kiinteistössä tapahtuva jäähtymä laskee poikkeuksellisen pieneksi. CHP-voimalaitoksissa KL-jäähtymällä on myös vaikutusta koko laitoksen hyötysuhteeseen. Huono jäähtymä huonontaa myös CHP-laitoksen kokonaishyötysuhdetta.

Kun kiinteistöön suunnitellaan kaukolämmön vastaanottamiseen soveltuvia laitteistoja, mitoittaa LVI-suunnittelija lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimen kaukolämpöverkon kesätilanteen (70 °C) mukaan. Vastaavasti kiinteistöä lämmittävät siirtimet mitoitetaan kaukolämpöverkon huippulämpötilan (115 °C) mukaan. Suomalaisten kaukolämpöverkkojen huippulämpötila on eurooppalaisittain katsottuna korkea ja aiheuttaa ongelmia lämpöpumpuilla tuotetulle kaukolämmölle.

Esimerkiksi Ruotsissa kaukolämpöverkoissa yläraja on yleensä 100 °C ja Ruotsissa on ilmastollisesti aivan yhtä kylmiä alueita kuin Suomessakin.

Datakeskuksesta saadaan hyvällä hyötysuhteella 70 – 85 asteista vettä lämpöpumpuilla korotettuna. Se kelpaa Suomessa kaukolämpöverkoston tulovedeksi vain keväästä syksyyn ulottuvalla ajanjaksolla. Jakson tarkka pituus riippuu sijaintipaikkakunnan sääoloista. Etelässä jakso on pidempi ja kylmänä vuotena jakso jää kaikkialla lyhyemmäksi kuin normaalivuonna.

Joskus on esitetty, että olemassa olevia verkostoja yritettäisiin muuttaa huomattavan matalille lämpötilatasoille. Itse en usko, että minun elinaikanani tullaan näkemään merkittävämpää vanhojen kaukolämpöverkoston muuntumista kunnon matalalämpötilaverkostoiksi (maksimissaan 70 – 80 °C menolämpötila). Vanhoissa verkostoissa ei nimittäin riitä, että mitoitetaan ja vaihdetaan asiakaspäässä lämmönsiirtimet lämmityspuolella suuremmiksi eli mahdollistamaan huippulämpötilan lasku. Asiakaspäässä on usein myös kiinteistöä lämmittävä järjestelmä, kaukolämpötermien ilmaistuna ns. toisiopuoli mitoitettu korkeille lämpötiloille. Vanhoissa kiinteistöissä on vielä hyvin paljon 80/60-mitoituksella tehtyjä lämmityspatteriverkostoja. Helsingin kaukolämpöverkossa on jopa joitakin kiinteistöjä, joissa on 90 °C radiaattoreita käytössä.

Niinkin myöhään kuin vuoteen 2013 asti toisiopuolen patteriverkosto saatettiin mitoittaa 70/40-lämpötiloille, joka tarkoittaa, että talon lämmityspattereissa pitää kiertää 70 °C vettä huippupakkasilla tai on vaarana, että talo on kylmä. Käytännössä KL-tuloveden lämpötilan täytyisi olla noin 80 - 90 °C, jotta kohtuullisen kompakteilla lämmönsiirtimillä saadaan tehtyä toisiopuolelle patteriverkoston vaatimaa 80 tai 70 °C vettä. Noin 90 - 100 °C asteeseen KL-verkoston menolämpötila voitaisiin laskea, jos käydään verkoston jokaisen asiakkaan KL-alajakokeskus läpi, tarkistetaan mitoitus ja tarvittaessa vaihdetaan lämmönsiirrin suurempaan, jotta lämpöä riittäisi pakkasillakin. Aivan kaikissa asiakaskiinteistöissä ei välttämättä tarvitse vieraila, jos ottaa käyttöön fiksun analytiikan mahdollisuudet. Automaattisesti kerätyistä etämittaroiduista kaukolämmön kulutustietoista saadaan haluttaessa luotua Big Data-tyyppinen tietokanta, josta erilaisin tietojenkäsittelyn keinoin voidaan tunnistaa, mitkä asiakaskiinteistöt vaativat tarkempaa tut-

kimusta ja mitkä kiinteistöt voidaan jättää vähemmälle tutkimiselle. Tuollaisen selvityksen tekeminen antaisi kaukolämpöyhtiölle nopeasti ja kohtuukustannuksin arvion siitä, millainen urakka kaukolämmön huippulämpötilan laskeminen esim. 100 °C heidän verkossaan olisi asiakaspäässä. Huippulämpötilan lasku puolestaan avaisi kaukolämpöyhtiölle mahdollisuuksia tuottaa palamisreaktioista riippumattonta, hiilineutraalia kaukolämpöä. Vaikkei 100 °C vielä mikään matalalämpötilaverkko olekaan, olisi se merkittävä parannus nykytilanteeseen.

Todettakoon vielä, että alle 80 °C KL-menolämpötiloihin ei vanhoissa verkostoissa päästä edes asiakaspään lämmönsiirtimiä uusimalla, koska se edellyttäisi monissa kiinteistöissä koko toisiopuolen lämmönjakojärjestelmän uusimista eli melkoista täysremonttia koko kiinteistöön. Lisäksi kaukolämpöoperaattorin on tehtävä verkostoonsa myös painehäviöiden kapasiteettitarkastelu, koska alennetulla huippulämpötilalla virtaamat kasvavat verkostossa. Verkostosuunnittelu on yleensä kaukolämpöoperaattoreilla hyvin hallussa ja tuon tarkastelun tekeminen ei ole iso asia. Verkoston väljentäminen pullonkaulakohdissa on tietysti sitten maanrakennusoperaatio ja maksaa rahaa. Se saattaa kuitenkin yhdessä kaukolämmöntuotannon uudistamisen kanssa maksaa itsensä nopeastikin takaisin, koska huippulämpötilojen alentaminen laskee tehokkaasti myös verkoston lämpöhäviöitä siirtomatkalla asiakkaille.

3.4 Kaukolämpö mitoitetaan uusissakin kiinteistöissä 1970-luvun ohjeilla

Kaukolämmön siirtimien elinikä on noin 20 vuotta, joten ne uusiutuvat kohtuullisen nopeassa syklissä. Tosin juuri yksikään energialaitos Suomessa ei tunnu edellyttävän asiakkailtaan loppuun kuluneiden siirtimien uusimista tiukemmalla mitoituksella, joka mahdollistaisi tulevaisuudessa menolämpötilan laskun noin 90 C asteeseen. Tässä mielessä asiakaspään laitteet eivät uusiudu modernimpaan suuntaan eikä tilanne parane ainakaan lähimpään 20 vuoteen kun jatkuvasti investoidaan lisää vanhojen mitoitusperiaatteiden mukaisiin laitteisiin. Toisiopuolen lämmönjakojärjestelmissä kuten patteriverkostoissa taas tilanne on se, että ne ovat usein hyvin pitkäikäisiä. Suomessa on tänäkin päivänä käytössä kiinteistöissä patteriverkostoja, jotka on rakennettu 1900-luvun alkupuolella eli ne ovat olleet käytössä jo yli 100 vuotta. Nuo satavuotiaatkin patteriverkostot saattavat aivan hyvin kestää vielä toiset sata vuotta lisää.

Kaukolämpöyhtiöt eivät edellytä myöskään täysin uusilta kiinteistöasiakkailtaan mitoitusta, joka helpottaisi siirtymistä matalampiin lämpötiloihin joskus tulevaisuudessa. Taulukkoon 2 on listattu suunnitteluohjeiden mukaiset mitoituslämpötilat eri vaihtoehdoille ja kuten siitä ilmenee, myös uusissa lattialämmityskiinteistöissä siirtimet mitoitetaan 115 °C mukaisesti, mikä lukitsee verkoston pitkäksi aikaa eteenpäin kyseiseen korkeaan lämpötilaan. Kyseinen suunnitteluohje on ollut tuon kohdan osalta voimassa 1970-luvulta lähtien. Suunnitteluohjetta on päivitetty viimeksi syksyllä 2020, mutta mitoitusohjeen tulolämpötiloihin ei edes uusien kiinteistöjen kohdalla ole koskettu, vaikka se olisi todella helppo päätös tehdä eikä vaatisi suurempia selvittelyitä. Kaukolämpöyhtiöillä on sitä paitsi aina ollut oikeus soveltaa verkostossaan yksilöllisiä lämpötilatasoja, jos niin parhaaksi katsovat. Se todetaan K1 ohjeissakin, mutta se näyttää jääneen lähinnä kuolleeksi kirjaimeksi muutamaa kokeiluverkkoa lukuun ottamatta. Siksi olisi tärkeää, että valtakunnantasolla, alalle keskeisessä K1-ohjeessa annettaisiin kaikille energia-alan ihmisille myös numeraalisesti uusi, parempi "visio" kuin nykyinen "115 °C". Se olisi konkreettinen herätys alalle, että jatkossa pitää päästä alempiin lämpötilatasoihin. Lämpötilatasojen alentamisesta on puhuttu paljon, on tehty kannattavuus- ja kustannus selvityksiä sekä opinnäytetöitä. Mitään konkreettista liikettä puheen suuntaan ei ole tapahtunut. Kaukolämpöalalla mitoitetaan asiakaspään laitteet pitkälti samoilla mitoituslämpötiloilla kuin 1970-luvulla tehtiin.

Lämmönsiirtimien suurentaminen asiakaspäässä maksaa hieman lisää rahaa ja lisää hieman painehäviöitä. Jesper Laitinen (Laitinen, 2020) selvitteli diplomityössään lisäkustannuksia, joita koituisi mitoituslämpötilan laskusta 115 °C:sta 90 °C:een: pientaloissa kustannuslisä oli 30 euroa ja kerrostalokohteissa keskimäärin 180 euroa per lämmityssiirrin. Kustannuslisää voi pitää mitättömänä verrattuna siihen, mitä talotekniikka muuten kohteissa maksaa. Kaukolämpöyhtiön kannattaisi itseasiassa tarjoutua maksamaan kyseinen lisäkustannus asiakkailleen, koska Laitinen toteaa diplomityössään peukalosääntönä, että yhden asteen pudotus KL-menolämpötilassa pudottaa prosenttiyksikön verran lämpöhäviöitä. Esimerkitapauksessa tulisi Laitisen laskutavalla yli 20 % säästö verkon lämpöhäviöiden pienentymisenä.

Lähinnä KL-verkoston kauimmaisissa perukoissa painehäviön marginaalisella kasvulla saattaisi olla merkitystä ja KL-operaattoreilla on kyllä tieto, missä ne kohdat heidän verkostoissaan ovat, jotka vaativat tarkempaa tarkastelua. Verkoston painetasoa voidaan kriittisissä kohtaa korottaa esimerkiksi paineenkorotuspumpulla. Tärkeitä olisi saada muutos edes tätä kautta pikkuhiljaa kautta käyntiin, muuten vielä 2040-luvullakin päivitellään saman asian kanssa, miksi Suomessa on läntisen Euroopan korkeimmat lämpötilatasot KL-verkostossa. Huippulämpötilat, jotka estävät lämpöpumppujen täyden potentiaalin hyödyntämisen.

Taulukko 2. Kaukolämpöasiakkaan lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat

Kaukolämmön K1 ohjeet ja määräykset	Lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat °C			
	Ensiöpuoli		Toisiopuoli	
	alkulämpötila TULO	loppulämpötila PALUU	alkulämpötila PALUU	loppulämpötila MENO
Lämmin käyttövesituotanto	70	20	10	58
Patterilämmitys, uudisrakennukset	115	33	30	45
Patterilämmitys, vuosien 1983-2013 mitoitus	115	43	30	70
Patterilämmitys, vanhat rakennukset	115	63	60	80
Ilmanvaihdon lämmönsiirtimet	115	33	30	60
Lattialämmitys, vanhat rakennukset	115	33	30	40
Lattialämmitys, uudisrakennukset	115	33	30	35

Täysin uusissa KL-verkostoissa tilanne on tietysti toinen, ne voidaan mitoittaa matalille lämpötiloille, esim. 65/30 °C tulo/paluu -lämpötiloille ja kannattaakin mitoittaa. Täysin neitseellisiä KL-verkostoja vain syntyy kovin vähän Suomeen nykyään eli Suomi on siinä mielessä valmiiksi rakennettu.

3.5 Onko puun lisääntyvä poltto ratkaisu kaukolämmön ilmastokriisiin?

Moni kaukolämpöyhtiö varsinkin pääkaupunkiseudun ulkopuolella on siirtymässä kiireen vilkkaa turpeen ja muiden fossiilisten polttoaineiden poltosta erilaisten puuperäisten jakeiden polttamiseen. Kaukolämmön tekeminen puumateriaalilla perustuu sekin palamisreaktioon, joka vapauttaa aina hiilidioksidia ilmakehään. On esiintynyt näkemyksiä, että puun polttamisen vapauttama hiilidioksidikin pitäisi nähdä ainakin osittain sakotettavana päästönä ja ei-kestävänä kehityksenä. Kestää nimittäin oman aikansa, ennen kuin polton vapauttama hiilidioksidi sitoutuu takaisin biomassaan. Lisäksi puun kerääminen metsistä ja kuljetus kulutuspaikoille aiheuttaa itsessään merkittäviä fossiilisen polttoaineen käytön päästöjä. Jos puu joka tapauksessa kerätään metsistä ja kuljetetaan jalostettavaksi esimerkiksi sahoille tai sellutehtaille, olisi aika luontevaa ajatella, että sellaisen biomateriaalin hyötykäyttö lämmöksi ainakin on vapaata. Mutta riittääkö sellaista materiaalia kaikkiin lämpölaitoksiin? Suomessa on lisäksi rakenteilla merkittävästi puuta käyttäviä sellutehtaita. Riittääkö puuta sekä isoille tehtaille että lisääntyvälle puun poltolle? Eurokansanedustaja Heidi Hautala kirjoitti vastikään blogissaan: *”Suomi on hyväuskoinen metsäpohjaisen bioenergian edistämisinnossaan. Kasvava joukko tutkijoita katsoo, että puun poltto energiaksi ei ole kestävää eikä edes ilmastoneutraalia. Olisi viisasta varautua siihen tosissaan.”*

En tiedä näihin vastauksia kuten ei tiedä varmasti moni muukaan. Mutta luettuani MEP Hautalan selväsanaisen varoituksen, en kaukolämpöyhtiönä uskaltaisi perustaa hiilineutraalia strategiaa pelkästään puunpolton varaan. Turpeen voimalaitoskäytön kanssakin kävi lopulta niin, että se käyttö väännettiin väkisin alasajoon. Voiko tässäkin asiassa käydä vastaavalla tavalla, jos puun poltto hurjasti lisääntyy lämpölaitoksissa? Voiko lisääntyvälle kilpailulle metsien käytöstä tulla kestävyteen perustuvia käyttömäärien rajoituksia? Lämpöpumppeihin perustuva kaukolämmöntuotanto tarjoaa polttoreaktiosta vapaan ulospääsyn tuosta kaikesta. Kaukolämpöyhtiöiden kannattaa vähintään varasuunnitelmaksi rakentaa myös lämpöpumpppuperustaista lämmöntuotantoa, niin on ainakin teknologia tuttua, jos tarvitsee puunpoltolle vaihtoehtoa nopealla aikataululla etsiä.

3.6 Kaksisuuntainen kaukolämpö

Kaukolämpöliiketoiminta on perinteisesti järjestetty niin, että kaukolämpöverkon omistaja sekä tuottaa että myy lämmön asiakkailleen. Tuollainen järjestely on nimeltään yksisuuntainen kaukolämpö. Lämpöä liikkuu vain lämmön myyjältä asiakkaalle päin.

Kaksisuuntainen kaukolämpö onkin käsitteenä nyt helppo arvata. Siinä kaukolämpöyhtiö lupautuu myös ostamaan lämpöä asiakkailtaan ja toimittamaan sitä eteenpäin verkostossaan muille asiakkailleen. Tilanne on samanlainen kuin sähköverkoissa, joissa sähköyhtiöt saattavat ostaa asiakkaidensa esim. aurinkosähköpaneelilla tuottamaa sähköä. Kaksisuuntaisesta kaukolämmöstä käytetään myös termiä avoin kaukolämpö.

3.7 Yhteistyöstä kaukolämpöyhtiön kanssa

Suomessa ei ole lainsäädäntöä, joka reguloisi kaukolämpöverkkojen omistajien liiketoimintaa. Kaukolämpöverkostot ovat yleensä luonnollisia monopoleja toimialueellaan. Kaukolämpöverkostoilla ei ole mitään lainsäädännöllistä veloitetta liittää verkostoonsa ulkopuolisia lämmöntuottajia tai ostaa asiakkaidensa tuottamaa kaukolämpöä toisin kuin sähköverkoissa on tilanne. Siten datakeskuksen hukkalämmön myyminen kaukolämpölaitokselle edellyttää, että yhteistyökumppaniksi ajateltu lämpölaitos on yhteistyöhaluinen. Ensimmäinen asia datakeskuksen ylijäämälämmön kaukolämpökäyttöä suunniteltaessa onkin selvittää paikkakunnan lämpölaitoksen yhteistyöhalukkuus avoimen kaukolämmön sallimiseen verkostossaan. Mikäli halukkuutta ei ole, ei asiaa kannata selvittää sen pidemmälle.

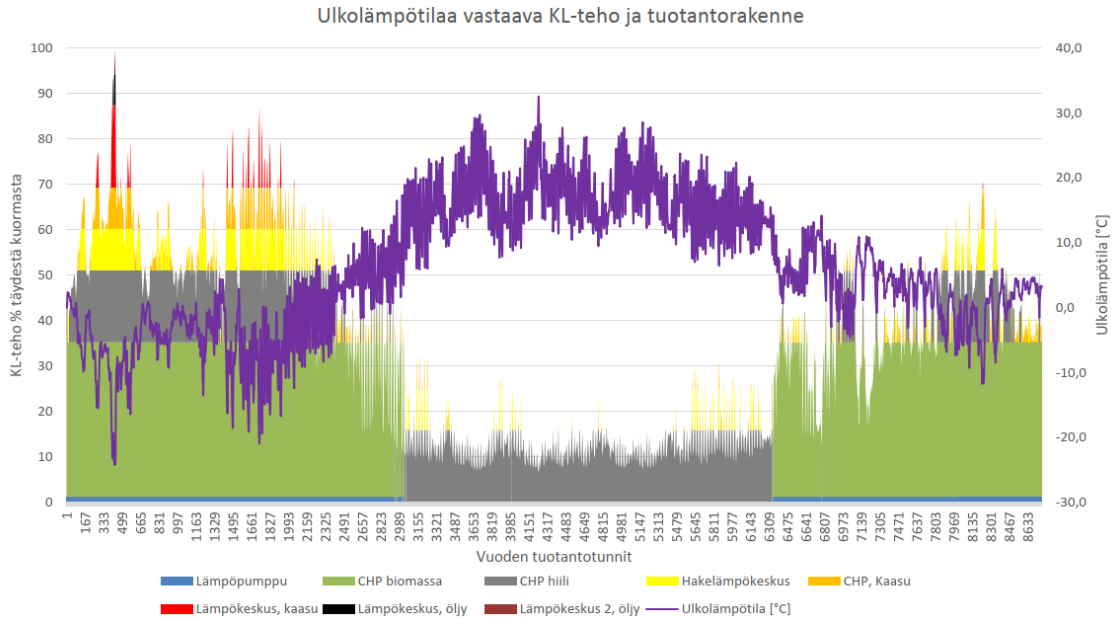
Erityisesti on tähdennettävä sitä seikkaa, että lämpölaitoksen ja konesalioperaattorin tarpeet ja tekniset vaatimukset eivät välttämättä ole kaikilta osin yhteneviä. Olosuhteet hukkalämmön vastaanottamiselle vaihtelevat jopa yhden kaukolämpöoperaattorin toimialueen sisällä merkittävästi verkoston eri haaroissa. Datakeskuksensa hukkalämmön myymistä harkitsevan kiinteistönomistajan on syytä varata selvitystyöhön riittävästi aikaa ja asiantuntevia resursseja. Datakeskuksen

hukkalämmön myyntiin ei ole olemassa vakiintuneita sopimuskäytäntöjä tai hinnoittelumalleja. Sopijaosapuolten on myös syytä syventyä riittävästi sopimusteknisiin asioihin (Bröckl, Immonen & Vanhanen, 2014).

3.8 Mitä kaukolämpölaitos odottaa lämmöntoimittajaltaan?

Bröckl et al. selvittivät kaukolämpöyhtiöiden edustajia haastattelemalla, millaisia teknisiä odotuksia heillä on ylijäämälämmön toimittajille. Tärkeänä pidettiin yhteensopivuutta kaukolämpölaitoksen olemassa olevan tuotannon kanssa. Varsinkin CHP-laitoksia operoivilla lämmönmyyjillä tämä seikka korostuu. Selvityksen mukaan Suomessa on useitakin paikkakuntia, joissa hukkalämpöä jätetään hyödyntämättä, koska CHP-lämpölaitosta operoiva taho katsoo, että CHP-laitoksen sähköntuotantokyky alenee liikaa ja tekee hukkalämmön hyödyntämisestä kannattamatonta. (Bröckl, Immonen & Vanhanen, 2014)

Lämmön kulloinenkin hetkittäinen tuotantokustannus oli myös tärkeä seikka. Ylijäämälämmön hinnan täytyy jäädä edullisemmaksi kuin lämpölaitoksen oma tuotanto kulloisenakin ajankohtana olisi. Tässä kannattaa huomata, että suuressa kaukolämpöverkostossa lämpöä tuotetaan hyvin erilaisilla tavoilla ja eri tuotantotavoilla on eri kustannus kaukolämpöoperaattorille. Kuvassa 9 on Juho Luorasen opinnäytetyössä käytetty esimerkki kuinka suuren kaukolämpötoimijan lämmön tuotanto voi koostua vuoden aikana (Luoranen, 2017, s. 57). Lämpöä tuotetaan hyvin erilaisin tavoin ja eri kustannuksin. Pääosa energiasta toki syntyy biomassaa polttavalla CHP-lämpölaitoksella, joka on operaattorille kannattavin tuotantomuoto. Kuvasta kannattaa huomata CHP-tuotannon tippuminen pois jo varsin varhaisessa vaiheessa kesävuodenajan lähestyessä.



Kuva 9. Esimerkki kaukolämmön tuotantorakenteesta vuoden aikana

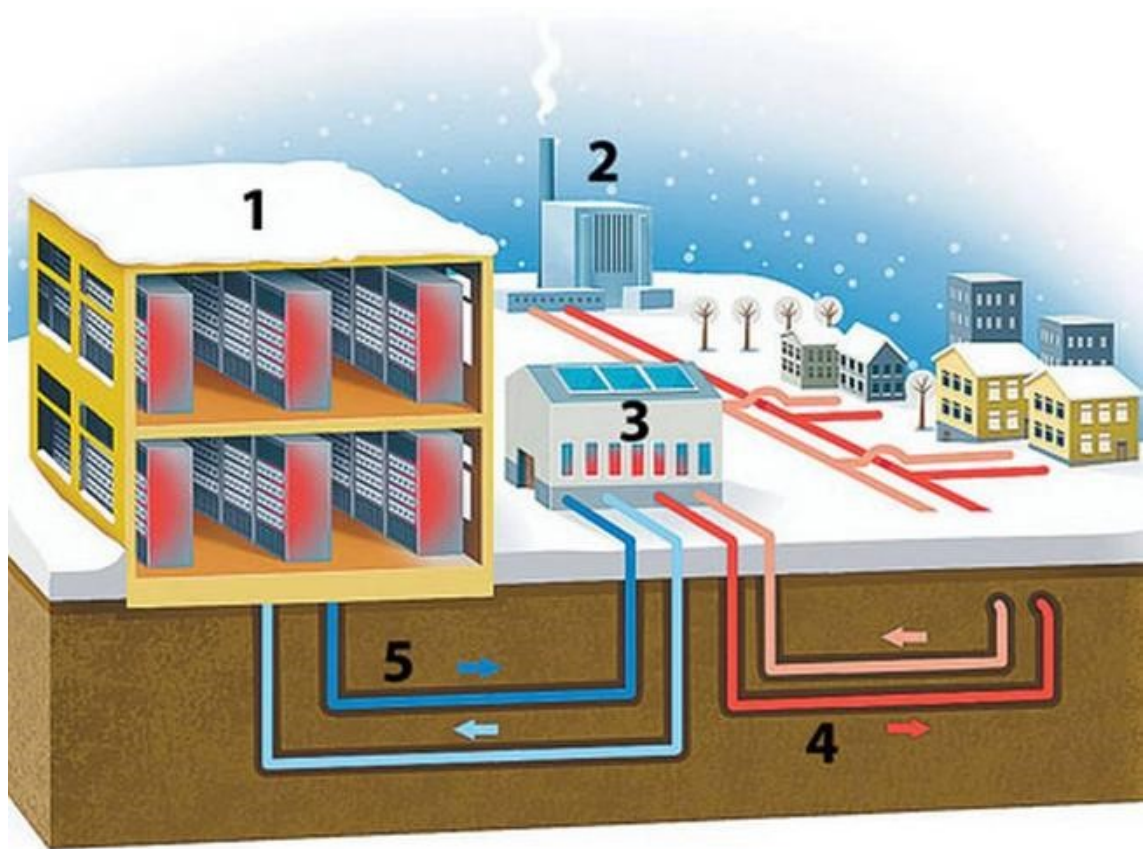
Luonnollisesti tärkeänä pidettiin sitä, että KL-verkoston tekniset ominaisuudet kuden lämpötila ja paine säilyvät tasolla, jota kaukolämpöoperaattori on sitoutunut asiakkailleen toimittamaan. Tärkeä seikka oli myös se, että lämpöä tulisi olla ennakoitavasti tarjolla silloin kun sille on olemassa tarvetta. Teollisuuden ylijäämlämmön tapauksissa kaukolämpölaitos saattaa nähdä riskiä siinä muodossa, että yritys pysyy jatkossakin paikkakunnalla tai toiminta pysyy samantyyppisenä. Tehävien sopimusten olisi syytä olla riittävän pitkiä, jotka ylijäämlämmön ostamiseen tehdyt investoinnit saataisiin kuoletettua ennen sopimusajan loppumista. (Bröckl, Immonen & Vanhanen, 2014)

Oman kokemuksen mukaan lämpölaitoksia saattaisi kiinnostaa myös luotettava ja varma ulkopuolinen lämmöntoimittaja kesäaikaan. Suurin osa kattilatekniikkaan nojaavista lämpölaitoksista pitää isossa kattilassaan taukoa kesäaikaan, jolloin tehdään kattilaan tarvittavat vuosihuollot eli revisio. Kaukolämpötekniikka on sellaista, että edes kuumimpaan kesäaikaan verkoston vesiä ei voi päästää jäähtymään koska asiakaskiinteistöjen lämpimän käyttöveden tuotanto on riippuvaista kaukolämpövedestä. Kesäaikaan moni kaukolämpöoperaattori sammuttaa suuren CHP-kattilansa ja käyttää muita lämmönlähteitä, esimerkiksi pienempiä varavoimalaitoksia.

Lisäksi polttoon perustuva kattilatekniikka on sellaista, ettei isoa kattilaa voi säätää kovin alas. Riippuen siitä kuinka laitos on mitoitettu, saattaa kesärevision ulkopuolellakin esiintyä tilanteita, ettei isoa kattilaa haluta käynnistää, koska se tuottaisi liikaa lämpöä minimitehollakin käydessään. Tuollaisia epäjatkuvuuskoh-
tia täydentävä luotettava lämmöntoimittaja on luonnollisesti hyvin kiinnostava lämpölaitoksen kannalta.

3.9 Datakeskuksen kytkeytyminen kaukolämpöön

Kuvassa 10 on esitetty periaatekuva, kuinka datakeskus liittyy kaukolämpöön. Numerolla 1 esitetty rakennus on itse konesali. Tässä datakeskuksessa lämpöpumput ja muu jäähdytystekniikka on omassa erillisessä rakennuksessaan, joka on numero 3. Kaukolämpövoimalaitos polttokattiloineen on numero 2. Verkoston nro 5 on konesaliin menevä jäähdytysvesiverkosto ja numero 4 on varsinainen kaukolämpöputkiverkosto.



Kuva 10. Datakeskuksen kytkeytyminen kaukolämpöön (TIVI)

Datakeskuksen yllämmöllä on kaksi mahdollisuutta kytkeytyä tuotantoon. Joko lämpöpumput tuottavat suoraan asiakaskiinteistölle sopivaa vettä kuten kuvassa 10 tapahtuu. Käytännössä kaikki hukkalämmöstä yllämpöä tekevät lämpöpumput kykenevät tähän, tyypillinen lämpötilataso on 70 – 85 °C, joka riittää Suomessa kaukolämpöverkossa keväästä syksyyn asiakkaille toimitetuksi vedeksi. Kytkentää kutsutaan myös KL-menokytkenäksi, koska kyseessä on kaukolämpöasiakkaille kuumaa vettä syöttävä putkihaara.

Talviaikaan kytkeytyminen kaukolämpöön on vaihdettava sellaiseksi, että asiakaskiinteistö kiertänyt jäähtynyt vesi esilämmitetään datakeskuksessa, jonka jälkeen se toimitetaan kaukolämpövoimalaan lopullista priimausta varten. Jälkimmäisessä järjestelyssä datakeskuksen on maantieteellisesti sijaittava varsin lähellä kaukolämpövoimalaitosta. Kytkentää sanotaan KL-paluukytkennäksi, koska siinä lämmitetään asiakaskiinteistöissä jäähtynyttä vettä ennen kattilalaitosta. Asiakaskiinteistöitä palaavan veden lämpötilataso on 40 – 60 °C asteen välillä suomalaisissa kaukolämpöverkoissa. Järjestely vähentää kattilalaitoksen polttoaineen kulutusta mutta aivan ei poista sitä. Kaukolämpölaitos saattaa hyvittää datakeskusta vähemmän paluuvesikytkentään syötetystä lämmöstä.

Kehitys lämpöpumpuissa käy kiivaana kohti jopa 100 °C lämpöistä vettä tuottamaan pystyviä laitteistoja. Datakeskusten KL-kytkennöissä olisi syytä pyrkiä tekemään vain KL-menokytkejä niiden paremman hyödyn ja yksinkertaisuuden vuoksi. Vaikka datakeskuksen lämpöpumput eivät kykenisikään tuottamaan kaukolämmön huippulämpötiloja, riittää 85 °C vesi kattamaan useimmissa kaukolämpöverkoissa suurimman osan vuotta. Uusia lämpöpumppulaitoksia datakeskuksiin rakennettaessa kannattaa pyrkiä tuottamaan 90 – 100 °C vettä suoraan. Vaikka paikkakunnan kaukolämpöverkoston huippulämpötilaa ei olisikaan alennettu 115 °C asteesta esimerkiksi 100 °C, on vuodessa varsin vähän sellaisia tunteja, jolloin 100 °C tuottavan lämpöpumpun vettä joudutaan priimaamaan. Priimaaminen voidaan aivan hyvin tehdä myös datakeskuksen yhteyteen rakennettavalla pienellä lämpökattilalla, vaikka niitä ei ole tiettävästi tehty vielä ainuttakaan. Luultavasti seikka johtuu datakeskuksen alisteisesta ”rengin” asemasta suhteessa KL-verkosto-operaattoriin ja toisaalta siitä, että datakeskusoperaatto-

reiden palveluksessa ei ole lämmöntuotantoon perehtyneitä ammattilaisia. Datakeskukset eivät yleensä näe lämmöntuotannossa bisnesmahdollisuutta, mikä on tämän opinnäytetyön tulosten perusteella virheellinen ajatus.

Myöskään sähkövastusten käyttäminen ei ole taloudellisesti kannattamatonta, vaikka yleensä suomalainen insinööri kavahtaa ajatusta sähkölämmitteisestä kaukolämpövedestä. Mikäli datakeskukselle avataan mahdollisuus päästä tuottamaan KL-menovettä ympärivuotisesti eli se saa KL-energiasta koko vuoden myyntituotot, pystyy sillä kattamaan lyhyen sähkölämmityskauden tappiot. Kokonaisedullisin ratkaisu on siis pyrkiä pelkkään KL-menokytkentään eikä rakentaa monimutkaisia vaihtokytkentöjä, jotka asettavat myös monenlaisia vaatimuksia datakeskuksen sijainnille verrattuna KL-verkoston topologiaan.

Uudelle rakennettavalle datakeskukselle on omasta paikallisesta pienestä lämmönlähteestä myös se hyöty, että sitä voidaan hyödyntää datakeskuksen käyttöönottovaiheen ns. lämpökuormitustestissä. Testiä varten ei tarvitse vuokrata paikalle erikseen kalustoa.

3.10 Datakeskushukkalämmön vahvuudet ja heikkoudet

Jos datakeskuksen tuottamaa lämpöä peilataan aiemmin kerrottuihin lämmön ostajan odotuksiin, niin datakeskus on vahvoilla lämmön pysyvyyden suhteen. Datakeskukset ovat siinä mielessä erikoisia teollisia tuotantolaitoksia, että kun ne on kerran käynnistetty, niitä ei sammuteta käytännössä koskaan (ennen kuin vuosikymmenten kuluttua, kun keskus korvataan uudella). Datakeskuksissa ei ole vuosiseisokkeja tai revisioita samalla tavalla kuin monessa muussa teollisuudessa. Monissa datakeskuksissa pysyy myös kuorma sangen tasaisena ympärivuotisesti, toisin sanoen yllämpöä syntyy suhteellisen tasaisesti ja ennustettavasti. Tämä on luonnollisesti datakeskuskohtainen asia. Osa datakeskusoperaattoreista kykenee kertomaan paremmin kuin toiset miltä heidän vuosituotantonsa pysyvyyssä näyttä. Mikäli datakeskus pystyy lupautumaan kesäaikaisen lämmön toimittajaksi, jolla korvataan lämpölaitoksen mahdollisesti käyttämää fossiilista polttoa, on se merkittävä vahvuus moniin muihin teollisiin toimijoihin verrattuna. Datakeskusten hukkalämpö saadaan nykyisellä lämpöpumpputekniikalla

korotettua KL-verkoston kesälämpötiloihin, joten teknisesti on mahdollista syötää ylijäämälämpö suoraan KL-verkoston menopuolelle.

Ehkä hankalimmassa asemassa ovat colo-operaattorit, jotka eivät välttämättä tiedä millaista tuotantoa heidän asiakkaansa suunnittelevat ajavansa servereillä tai millaisia kuormituskausivaihteluita mahdollisesti heidän asiakkaidensa omistamilla servereillä esiintyy. Colo-operaattoreiden on myös hyvin vaikea mennä yksin takuuseen, että heidän omistamansa datakeskus-infrastruktuuri pystyy tuottamaan jonkin tietyn määrän hukkalämpöä kaikkina aikoina tai edes ennustettavan määrän lämpöä jonain sovittuna ajankohtana. Mahdotonta se ei toki ole ja vaatii sopivien asiakkaiden löytämistä ja sopimusteknisiäkin yksityiskohtia. Niitä ei käsittäkseni ole yksikään colo-toimija vain huomionnut nykypäivän liiketoiminnassaan, joten tuossa on selvästi kehittämisen paikka tulevaisuudessa.

Toinen datakeskusten ilmeinen vahvuus on niiden sijainti. Suuren yleisön mielikuvissa datakeskukset saattavat olla Googlen Summan vanhaan sellutehdas-kompleksiin sijoitettuja jättimäisiä megadatakeskuksia. Todellisuudessa suomalaisten datakeskusten lukumääräinen enemmistö on pieniä ja keskisuuria yksiköjä. Toisin kuin muun tyyppiset teollisuustoiminnot, datakeskukset voivat sijaita jopa kaupunkien keskustoissa tai tiheästi rakennetuilla alueilla. Datakeskus voidaan perustaa vaikka tavanomaiseen entiseen toimistotaloon eikä sitä välttämättä erota kadulta katsoen datakeskukseksi, jos omistaja näkee hieman vaivaa naamioidakseen toiminnan (lähinnä suuret nestelauhduksimet piiloon katseilta sermin taakse). Telia rakensi muutama vuosi sitten Pitäjänmäkeen keskelle toimistorakennuskortteleita Helsinki Data Centerinsä, joka toimii colo-periaatteella (Telia, 2021). Telian datakeskusta ei äkkiseltään erota muista alueen rakennuksista, se näyttää lähinnä varastolta. Helsingissä toimii ydinkeskustassa, Uspenskin katedraalin alla kallioluolassa colo-datakeskus (Iltalehti, 2017).

Datakeskusten ehdoton valtti muuhun teollisuuteen verrattuna on, että ne voivat sijaita siellä missä ihmiset ja rakennuksetkin ovat. Asemakaavoitetuilla alueilla, joissa voi odottaa olevan kysyntää datakeskuksen ylijäämälämmölle myös kesäisin. Alueella on todennäköisesti myös valmiina kohtuullisen hyväkapasiteettinen kaukolämpöverkko.

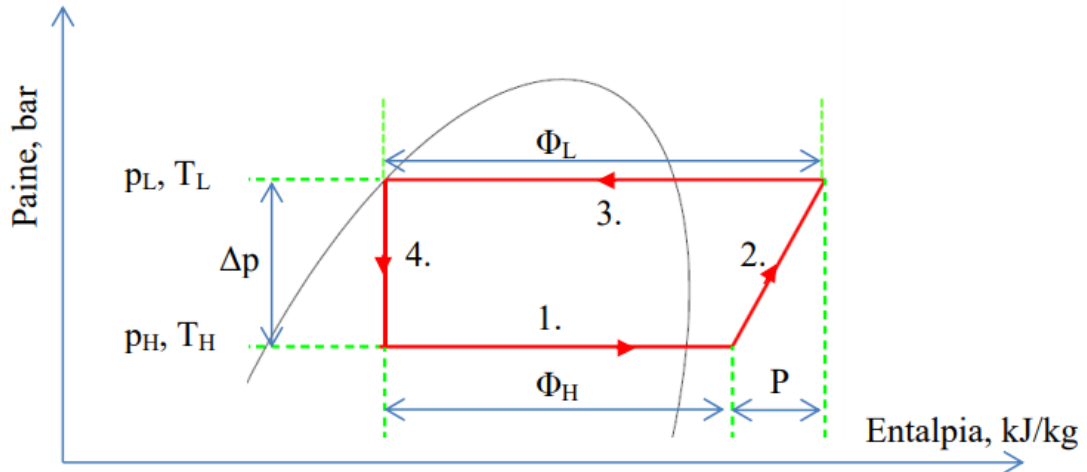
4 LÄMPÖPUMPPU

4.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumpun toiminnan ymmärtämiseksi pitää tietää kaksi fysikaalista periaatetta. Ensimmäinen niistä on, että lämpötila, missä jonkin aine ryhtyy kiehumaan nesteestä kaasuksi, riippuu ympärillä vallitsevasta paineesta. Esimerkiksi kotitaloudestakin löytyvä painekattila perustuu tähän periaatteeseen. Painekattila korottaa painetasoa niin, että vesi kiehuu vasta korkeammassa lämpötilassa. Ruoka kypsyy nopeammin kuumemmassa vedessä. Itseasiassa suomalaisen kaukolämpöverkon toiminta talvella perustuu tähän samaan fysikaaliseen faktaan. Kun tuloveden lämpötila KL-verkostossa huippupakkasella on 115 °C, on putkistossa merkittävää ylipainetta, joka pakottaa veden pysymään nesteenä.

Toinen tiedettävä fysikaalinen periaate on se, että kaasumaisen aineen lämpötila nousee, kun sitä puristetaan kasaan. Tämäkin ilmiö on tuttu arkipäiväisistä ilmiöistä. Jokainen polkupyörän rengasta käsipumpulla täyttänyt on varmasti huomannut, että pumpun kuori kuumenee kovasti pumpattaessa.

Käytännön lämpöpumpussa on yksinkertaisimmillaan neljä komponenttia. Laitteen suljetussa piirissä kiertävä kylmäaine kaasuuntuu eli kiehuu höyrystin nimisessä lämmönsiirtimessä. Lämmönsiirtimen metalliseinämän yhdellä puolella liikkuu esimerkiksi konesalista tuleva lämmin jäähdytysvesi. Metallisen levyn toisella puolella on nestemäistä kylmäainetta. Metallin johtaa hyvin lämpöä ja kylmäaine kiehuu kaasuksi. Kylmäaineen olomuodon muutos sitoo samalla lämpöä, joka on otettu metalliseinän toisella puolella olevasta konesalin jäähdytysvedestä. Kuvassa 11 on mallinnettu lämpöpumpun prosessin kierto ns. log-pH-diagrammiin. Diagrammin x-akselilla on kylmäaineen entalpia (lyh. H), Y-akselilla on absoluuttinen paine, usein bar-yksiköin ilmaistuna. Ensimmäisessä vaiheessa kuvattu kylmäaineen kiehuminen kaasuksi on nuoli, jonka tunnus on numero 1 (Kuva 11).



Kuva 11. Lämpöpumppuprosessi (Ympäristöministeriö)

Nyt kylmäaine on kaasumaisessa olotilassa. Lämpötilataso on edelleen matala. Johdannosta muistamme, että kaasua piti runtata kasaan, jotta lämpötila nousisi. Sen runttaamisen eli paineenkorotuksen suorittaa kompressori. Kompressorissa tapahtuvaa tilamuutosta edustaa Kuva 11 diagrammissa kohta 2. Kompressorista tiiviimmäksi pakotettu kaasu poistuu kuumana. Asiaan liittyy usein kaikenlaisia hienouksia kuten kylmäainehöyryn tulistumista. Niihin ei tässä kannata käyttää tilaa, jotta esitys pysyisi kompaktina. Maallikon tietotasoksi riittää ymmärrys, että kompressorin puristustyöllä kaasu on saatu merkittävän kuumaksi. Nyt tätä tiiviiksi pakattua kaasua voikin ruveta jäähdyttämään. Jäähdyttäminen tapahtuu lämmönsiirtimessä, jota kutsutaan lauhduttimeksi. Mikäli kyseessä olisi kaukolämpöön liitetty datakeskuksen lämpöpumppu, niin lauhduttimen metalliseinämän toisella puolella virtaisi kaukolämpövesi. Tulikuuma kaasu luovuttaisi lämpöään metalliseinämän läpi kaukolämpövedeen. Kuva 11 diagrammissa kyseinen tilamuutos on merkitty numerolla 3. Kohdassa, jossa muutosnuoli kohtaa mustan kaarevan viivan, kylmäainehöyry saavuttaa höyrystymislämpötilan. Alun johdannosta lukija muistaa, että korkeammassa paineessa aineella oli myös korkeampi kiehumislämpötila. Nyt ollaan lämpöpumpun korkeapainepuolella, joten jos kylmäainetta jäähdytetään lisää kaasuun nähden kaukolämpövedellä, niin kylmäainekaasu rupeaa nesteytymään. Nesteytyessä tapahtuu olosuhdemuutos, joka vapauttaa höyrystymisvaiheessa sidotun lämpöenergian. Kaukolämpövesi lämpiää merkittävästi. Lauhduttimen jälkeen nestemäinen kylmäaine kerääntyy paisuntaventtiilin taakse odottamaan kierron alkamista jälleen alusta höyrystimessä.

Paisuntaventtiili on laite, joka annostelee nestemäistä kylmäainetta sopivassa tahdissa höyrystimelle. Paisuntaventtiilin ylitettyään nestemäinen kylmäaine puutoa merkittävästi alempaan painetasoon. Kuva 11 diagrammissa tilamuutosnuoli numero 4 osoittaa uuden alemman painetasoon. Kuten johdannosta muistetaan, alemmassa painetasossa kylmäaine kiehuu helpommin. Nestemäinen kylmäaine voi siten jälleen kiehua höyrystimessä ja lähteä uudelle kierrokselle.

4.2 Lämpöpumpun hyötysuhdekerroin eli ns. COP-arvo

Kuva 11 on myös muutamia muita merkintöjä. Numerolla 3. merkityn muutosnuolen kanssa yhdensuuntainen, samanpituinen jana on merkitty tunnuksella Φ_L , joka kuvaa höyrystintehoa. Vastaavasti tilamuutosnuolien 1. ja 2. alla on merkinnät Φ_H ja P . Φ_H on höyrystinteho ja P on kompressorin ottama sähköteho. Merkinnät voi mieltää myös energioiksi, samat suhteet säilyvät myös energiatasolla. Kuvaa tutkimalla voidaan todeta, että $\Phi_H + P = \Phi_L$ eli höyrystimellä sitoutunut lämpö ja kompressorin ottama sähköenergia on yhtä kuin lauhduttimella vapautuva energiamäärä. Ainoa ostettu energia Kuva 11 systeemissä on kompressorille annettu sähköenergia, muu on systeemin ympäristöstään ottamaa ja luovutettavaa. Kannattaa samalla huomata seikka, että myös lämpöpumppuun laitettu ostoenergiapanos saadaan hyödyksi eli muuttuu lämmöksi, joka otetaan talteen kaukolämpöveden.

Lämpöpumpun yhteydessä on kiinnostavaa, paljonko lauhduttimelta saadaan irti lämpöä rahalla ostettua energiapanosta kohti. Hyötysuhdekerroin on yksinkertaisesti määritelty niin, että hyödyksi saatu lämpöenergia jaetaan käytetyllä tuotantopanoksella eli sähköenergialla:

$$COP = \frac{\Phi_L}{P} \quad (3)$$

missä

COP on hyötysuhde
(Co-efficient of Performance)

Φ_L on lauhduttimen teho [W]

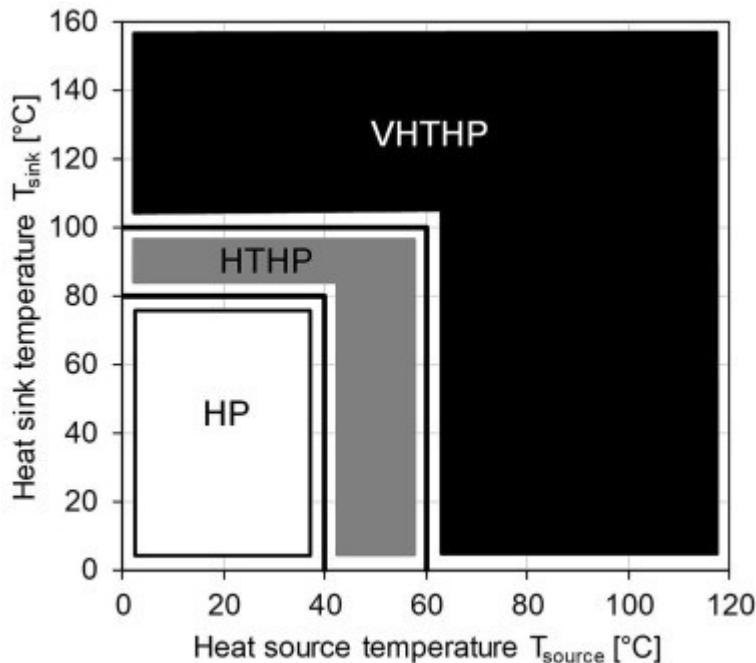
P on kompressorin teho [W]

Tutkimalla Kuva 11 voidaan myös havaita, että mikäli lauhtumislämpötilaa nostetaan (tilamuutosnuoli 3. siirtyy kuvaajassa ylemmäs), pienenee lauhduttimelta hyödyksi saatava teho ja vastaavasti kompressorin tekemä työ eli kuluttama sähkö kasvaa. COP-luku laskee eli suurempi osuus lämpöpumpun tuottamasta lämpöenergiasta on peräisin kompressorin kuluttamasta sähköstä. Tämä on se syy, miksi lämpöpumpuilla pyritään tekemään niin pientä paineenkorotusta eli niin matalaa lauhdutuslämpötilaa kuin se kulloisessa tilanteessa on vain mahdollista.

Kuvaajaa tutkimalla voidaan myös todeta, että jossain vaiheessa lauhduttimelta saatava hyöty kutistuu varsin olemattomaksi ja kompressoriteho tekee valtavasti työtä. Puristusta ei voi lisätä loputtomasti kompressorillakaan vaan vastaan tulevat mm. kompressorin voiteluongelmat, jos yritetään puristaa kaasua liian kuumaksi kerralla. Liian korkealle lämpötilatasolle pakotettu puristustyö lyhentää kompressorin elinikää ja tapahtuu huonolla hyötysuhteella. Asiaa voidaan helpottaa tekemällä puristustyö kahdessa vaiheessa. Vaiheiden välissä jäähdytetään tulistunutta kaasua pienellä kylmäaineannoksella. Myös muunlaisia erikoisjärjestelyjä on olemassa puristustyön lämpötilatasojen hallintaan, mutta niiden käsittely ei ole mielekäästä tämän opinnäytetyön yhteydessä. Jonkinlaisena käytännön rajana yksivaiheiselle kompressoripuristukselle voidaan pitää noin 60-70 K lämpötilan nostoa perinteisillä kylmäaineilla. Jos meillä on käytettävissämme 30 °C lauhdetta, noin 90 – 100 °C asteeseen korotettu lämpötilataso on siis mahdollista tuottaa kohtuullisella hyötysuhteella ja niin, ettei kompressorin kestoikä aivan tavattomasti lyhene. Monelle nykypäivän kompressorille noin 100 °C asteen lauhdutuslämpötila on liikaa. Korkealämpötilakompressoreiden tekniikkaa kehitetään koko ajan ja tällä hetkellä on jo saatavilla ensimmäiset kompressorit, joissa valmistaja sallii 130 °C lauhdutuslämpötilan ja vielä ollaan juuri ja juuri kompressorivalmistajan ilmoittaman sallitun toiminta-alueen sisällä. Menossa on myös vilkas tutkimustoiminta aiheen parissa.

Arpagaus et al. listasivat peräti 17 tutkimusprojektia ympäri maailmaa, joissa tutkittiin yli 100 °C lauhdutuslämpötilaa tuottavia korkealämpötilalämpöpumppuja. Arpagaus luokitteli lämpöpumput lauhdutuslämpötilan mukaan tavanomaisiin lämpöpumppuihin (HP), korkean lämpötilan lämpöpumppuihin (HTHP) ja hyvin korkean lämpötilan lämpöpumppuihin (VHTHP). Yli 100 asteessa tapahtuva lauh-

dutus on Arpagauksen luokittelussa hyvin korkean lämpötilan lämpöpumpun toimintaa. Kuva 12 esittää Arpagauksen käyttämän luokittelun ja lämpötila-alueet. (Arpagaus, Bless, Uhlmann, Schiffmann & Bertsch, 2018)



Kuva 12. Lämpöpumpppujen luokittelu lauhdutustemperatuurin mukaan

Arpagauksen mukaan tavanomaisissa lämpöpumpuissa saavutetaan COP-hyötysuhteita 2,4 – 5,8 väliltä kun lämpötilan korotus on välillä 40 – 95 K. Laboratorio-oloissa on saavutettu 2,2 – 2,8 väliltä olevia COP-arvoja, kun lauhdutustemperatura on ollut 120 astetta ja korotuksen määrä 70 Kelviniä. (Arpagaus ym. 2018)

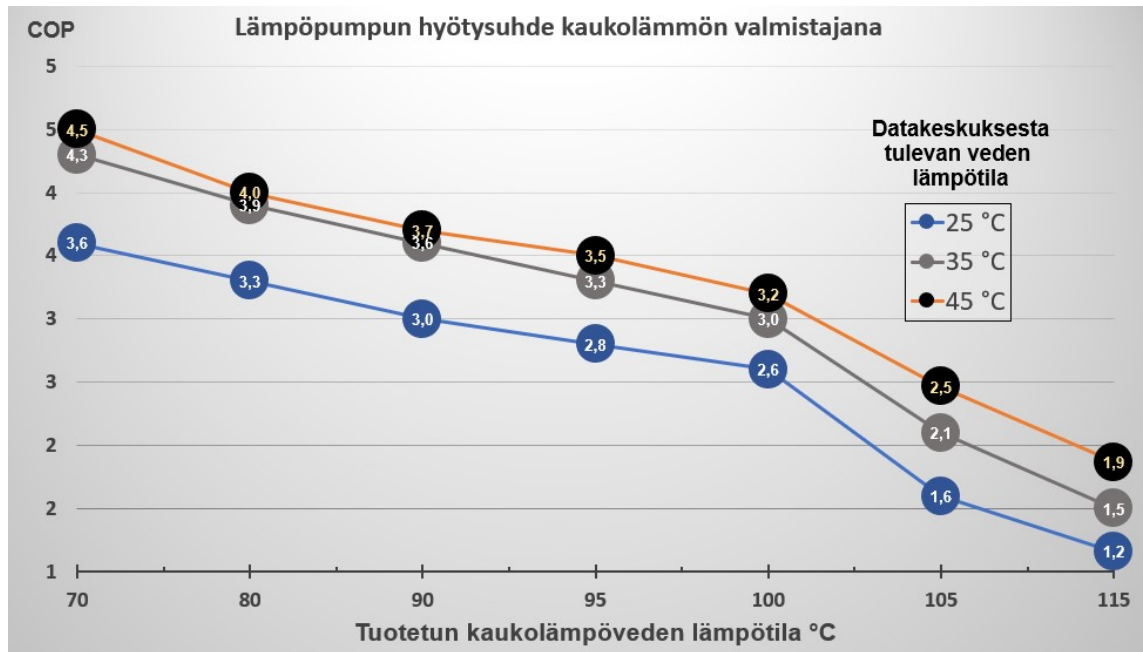
Tarjolle on tullut myös uuden sukupolven kylmäaineita, jotka soveltuvat aiempia kylmäaineita paremmin korkeampien lämpötilojen tuottamiseen kuin mitä edellisen sukupolven lämpöpumpuilla on totuttu näkemään. Kylmäaineet ovat yleensä myös hyvin ympäristöystävällisiä, esimerkkinä tällaisesta uuden sukupolven kylmäaineesta, jota on Granlundin datakeskusprojekteissa usein käytetty vedenjäähdyttimissäkin, on Honeywellin kehittämä HFO-kylmäaineisiin kuuluva R-1234ze. Oikeasti pitäisi puhua kahdesta eri kylmäaineesta. Kirjaimet z ja e kertovat, että kyseinen kylmäainemolekyyli esiintyy kahtena isomeerinä: Z ja E. Ne ovat atomitasolla samoja molekyyliä, mutta atomit kytkeytyvät toisiinsa eri tavalla. Fysikaaliset ominaisuudetkin voivat tällöin muuttua ja tämän molekyylin kohdalla ne muuttuvat varsin radikaalisti. Z-variantin kiehumislämpötila normaali-

ilmanpaineessa on varsin korkea: 9,8 °C ja kriittinen lämpötila 153,7 °C. Z-variantti soveltuukin ominaisuuksiensa puolesta käytettäväksi korkean lämpötilan lämpöpumpuissa. E-variantin höyrystymislämpötila on -19 °C ja kriittinen lämpötila 109 °C. E-variantti onkin lähempänä perinteistä R-134a kylmäainetta ja käy samoihin matalamman lämpötilan sovelluksiin kuin se.

Yhdysvaltain ympäristövirasto EPA:n raportin mukaan kyseisen kylmäaineen GWP olisi 6 (EPA 2017). Arvo on hyvin alhainen kuin verrataan nykyisiin yleisesti käytettyihin kylmäaineisiin kuten R-134a, jonka GWP-arvo on yli 130-kertainen, 1300.

Olen kuvassa 13 esittänyt Coolplus-ohjelmistolla laskemani COP-hyötysuhdearvot R-1234ze(E)-kylmäainetta käyttävälle yksivaiheiselle lämpöpumpulle. Nesteneste lämmönsiirtimien asteisuudeksi on oletettu 3 Kelviniä. Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on ollut 70 % ja imukaasussa on käytetty jäähdyttävää lämmönsiirintä (SGHX, suction gas heat exchanger). Yli sadan asteen lämpötilojen COP-arvoihin käytetty kylmäaine ei ole sopivin valinta. Toisaalta yli sadan asteen lämpötiloja tuottavia lämpöpumppuja on vain vähän maailmassa eikä varsinkaan sellaisia, jotka tekevät yli 70 Kelvinasteen korotuksen yhdessä työvaiheessa. Hyvin korkeita lämpötiloja tuottavia VHTHP-lämpöpumppuja ei ole maailmalla paljoa tuotantokäytössä vaan tekniikka on vasta kokeellista. Korkeita lämpötiloja tuottaviin lämpöpumppuihin liittyy monenlaisia epävarmuustekijöitä mm. voitelun ja kestävyuden suhteen. Ei ole olemassa dataa, kuinka kestäviä hyvin korkeita lämpötiloja tuottavat lämpöpumput ovat teollisessa kaukolämmöntuotannossa.

Toimivampi strategia tuottaa kaukolämpöä voikin olla, että lämpöpumpuilla tehdään lämpötilankorotus alle 90 °C lämpötiloihin ja mikäli on tarpeen vielä priimata lämpöä, tehdään se sähköllä tai jollakin muulla lämmönlähteellä, vaikkapa biopolttoainetta polttavalla kattilalla. Näin saadaan laitteet kestäväksi pitkään ja täydentämään toisiaan siinä missä ne ovat parhaimmillaan.



Kuva 13. R-1234ze(E) kylmäaineella laskettu KL-lämpöpumpun COP

Kuva 13 ydinviesti lukijalle on, että yli 100 asteisen kaukolämpöveden tekeminen on tuskallista nykypäivän lämpöpumpuille. Hyötysuhde jää huonoksi varsinkin, jos hukkalämmön lämpötilataso on alle 30 astetta. Jos kaukolämpöveden yläraja Suomessa tiputettaisiin Ruotsin mallin mukaiseen 100 °C asteeseen, lämpöpumput voisivat korvata palamiseen perustuvaa kaukolämmöntuotantoa paljon nykyistä merkittävämmässä määrin.

5 TEHDYT SIMULAATIOT JA SAATUJEN TULOSTEN ANALYYSI

5.1 Simulaatioon valitut datakeskustyypit

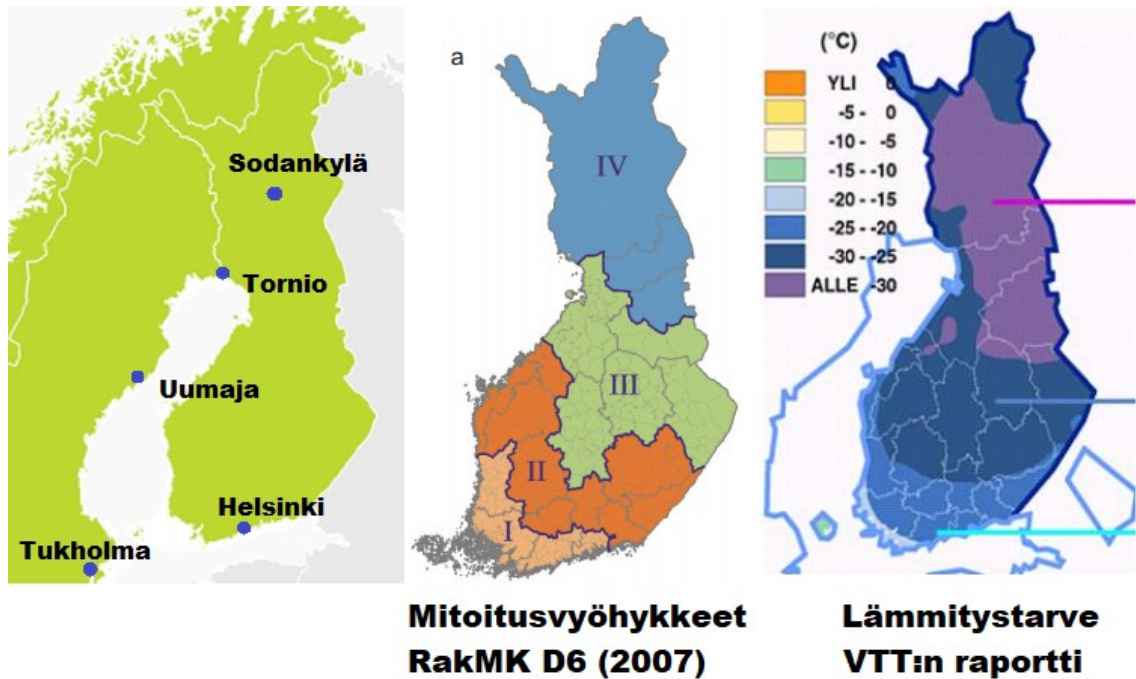
Valitsin skenaarioiksi kaksi IT-teholtaan erikokoista datakeskusta: 200 kW-laitos ja 2,5 MW laitos. Molempiin laitoksiin tehdään tarpeelliset lämpöpumppuinvestoinnit, joilla laitokset saadaan kaukolämpölaitoksen piiriin. Datakeskusten IT-tehon kuormitusasteeksi oletan 100 % eli ne kävisivät täydellä IT-tehollaan koko ajan. Oletus on tietenkin todellisen elämän datakeskuksille vieras. Harva datakeskus käy täydellä kuormalla koko ajan, vuoden ympäri. Mutta koska tämä on fiktiivinen laskuharjoitus geneeriselle laitokselle ilman tietoja todellisen datakeskuksen käytetyn IT-tehon pysyvyykäyrästä, on sinänsä samantekevää minkä kuormitusasteen valitsen. Aivan yhtä hyvin olisin voinut valita 3,3 MW laitoksen, jonka kerron käyvän 75 % kuormitusasteella. Se tuottaa saman lopputuloksen kuin 2,5 MW 100 % kuormitusasteella.

Olen simulaatiossa olettanut laitosten olevan moderneja ilmajäähdytteisiä datakeskuksia, jotka tuottavat noin 30 °C hukkalämpöä jäähdytysveteensä. Hukkalämmön lämpötilatasoa on nostettu kaukolämpökelpoiseksi R1234ze-kylmäainetta käyttävällä lämpöpumpulla, jolle määrittelin COP-arvot erillisellä simulointiohjelmistolla kuten kerroin kappaleessa 4.2. Jos datakeskuksen tuottama lämpö on ollut kytkettynä paluuveteen, on lämpöpumppu tuottanut tasaista 70 °C lämpöistä vettä vuoden ympäri. Jos skenaariona on ollut tuottaa lämpöä menoveeteen, tällöin tuotettu lämpötila on muuttunut ulkolämpötilan mukaan kuten se tekisi KL-voimalaitoksenkin tuottamana. Lämpöpumpulla tuotettu lämpötilataso on ollut 70 – 100 °C. Niissä harvoissa tilanteissa, kun datakeskuksen on pitänyt tuottaa yli 100 °C kaukolämpöväettä, on loppupriimaus tehty sähkövastuksilla. Sähkö on kallis tapa tehdä kaukolämpöä, mutta kyse on niin pienestä määrästä lämmitystunteja vuodessa, ettei se juurikaan taloudellisessa lopputuloksessa näy.

5.2 Datakeskusten KL-tuotannon simuloinnissa käytetty sijoituspaikkakunta

Datakeskusten fiktiiviseksi sijoituspaikaksi valitsin Tornion. Tornio valikoitui sijoituspaikaksi monestakin syystä, merkittävimmät syyt kuitenkin ovat, että Tornio omaa maantieteellisesti yhden parhaimmista sijaintipaikoista datakeskukselle

(potentiaali, jota yksikään datakeskusoperaattori ei ole vielä hoksannut lunastaa, pohdintoja kyllä on ollut). Toinen seikka ilmastollinen. Tornion alueella toimivat LVI-suunnittelijat tietävät vanhastaan, että Tornio on sijoitettu väärään ilmastovyöhykkeeseen LVI-alan ohjeessa, jolla tehdään lämmitystarpeen mitoituksia. Tämä johtaa mielenkiintoiseen anomaliaan itse kaukolämpökäytössä.



Kuva 14. Mitoitusvyöhykkeet Suomessa. Lämmitystarve VTT:n mukaan

Kuva 14 selventää mistä anomaliassa on kysymys. Keskimäinen Suomen kartta piirtää rajat Suomen sisällä kuinka neljää eri lämmitysmitoitukseen käytettävää vyöhykettä Suomessa sovelletaan. Oikeanpuolimmaisina kartta on VTT:n raportista, jossa on piirretty lämmitystarpeen vyöhykerajat todelliseen, toteutuneeseen lämmitystarpeeseen perustuen (Tuomaala, 2021). Vertaamalla keskimäistä Suomen karttaa oikeanpuolimmaiseen, huomataan, että jostain merkittävästä syystä lämmitysmitoitukseen käytettävässä kartassa kolmosvyöhykkeen raja on Lapin läänin rajalla vedettykin yhtä-äkkiä läänin rajaa pitkin Perämereen. Tornio on siten päätynyt samalle ilmastovyöhykkeelle kuin Sodankylä.

Torniolaisten rakennusten lämmitykset mitoitetaan ja kaukolämpölaitokset pyöri-
vät Sodankylän mitoituslämpötilalla (-38 °C), vaikka ilmastollisesti Torniossa on

suurin piirtein samanlainen ilmasto kuin 100 kilometriä linnuntietä kaakkoon olevassa Oulussa, joka on saman meren rannalla. Oulussa mitoituslämpötilana käytetään kolmosvyöhykkeen lämpötilaa, joka on -33 °C .

Jopa talonpoikaisjärkeä käyttämällä on helppo päätellä, että tuskinpa ilmasto suomalaisten karttaan vetelempiä lääninrajoja kunnioittaa. Tornio on päätenyt vyöhykkeen piirtäjän kynän laiskuudesta tai jostain muusta syystä johtuen väärälle mitoitusvyöhykkeelle. Kaukolämpökäytössä tämä johtaa siihen, kuten kappaleesta 3.3 muistamme, että kaukolämmön kuumin vesi 115 °C syötetään verkostoon vasta kun mitoituslämpötila -38 °C saavutetaan. Torniossa sellainen tilanne tapahtuu hyvin harvoin, jos koskaan. Käyttämässäni 8 vuoden tuntidatassa vuosilta 2013 – 2020 (Tornion energian mittausdata) kylmin mitattu lämpötila oli -31 °C . Tämän mitoitusanomalian vuoksi Tornion kaukolämpöverkko käyttäytyy kuten ruotsalainen kaukolämpöverkko: laitokselta lähtevän KL-veden lämpötila on harvoin yli 100 °C . Toisaalta torniolaiset asiakaskiinteistöt on myös mitoitettu lämmitystarpeensa puolesta väärän ilmastovyöhykkeen mukaisesti eli niissä on luultavasti systemaattisesti pientä ylikapasiteettia toisiopuolen lämmönjakojärjestelmissäkin.

5.3 Perämeren laitosten potentiaali KL-lämpöpumppujen pilottikohteina

Vuosikymmeniä sovellettu suunnittelu-anomalia on johtanut asiakaslaitteiden ylimitoitukseen todelliseen tarpeeseen nähden. Sama koskee tietysti muitakin ns. Perämeren kaaren kuntien lämpölaitoksia, jotka osuvat saman kartanpiirtovirheen piiriin. Paikkakuntina kyseeseen tulisivat Keminmaa, Kemi, Simo ja mahdollisesti myös Tervola. Torniossa tai Kemissä olisi mahdollista lähteä pilottimielessä kokeilemaan nopeastikin alempia kaukolämpöverkon menolämpötiloja (esim. $100 - 105\text{ °C}$). Meri-Lapin alue on lisäksi eräs Suomen teollistuneimpia alueita. Alueella on paljon teollisia hukkalämmön lähteitä (tosin kohtuullisen kokoinen datakeskus tietävästi puuttuu alueelta). Edellä mainitut seikat yhdessä antavat otolliset olosuhteet pilotoida nopeastikin ei-palamiseen-perustuvaa kaukolämmön tuotantoa teollisen mittakaavan lämpöpumpuilla.

Kuvan 14 kolmas eli vasemmanpuolimmaisoin kartta on mukana lähinnä siksi, jotta lukija, jonka maantiedon tunneista on jo aikaa, saisi äkkiä hahmotettua mitenkä tekstissä mainitut paikkakunnat kartalle sijoittuvat. Uumaja liittyy asiaan, sillä tavalla, että Tornioon kiinni kasvanut sisarkaupunki, Haaparanta, mitoitetaan ruotsalaisen LVI-insinöörin toimesta Uumajan ilmastodatalla pienellä korjausker-toimella korjattuna. Tornio-Haaparannan kaupunkialueella onkin täysin mahdollista, että kahdesta kiinteistöstä, jotka sijaitsevat alle kilometrin päässä toisistaan, toinen on mitoitettu Uumajan kiinteällä kertoimella muutetuilla säätiedoilla (Uumaja on noin Vaasan korkeudella Suomesta katsoen) ja toinen Sodankylän ilmastodatalla. Uumaja ja Sodankylä ovat linnuntietä katsoen suunnilleen yhtä kaukana Tornioista, mutta täysin vastakkaisissa ilmansuunnissa.

5.4 Käytetty sähkönhinta

Sähkönhintana käytin pohjoismaisen sähköpörssin Nordpoolin hintahistoriapalvelusta noudettuja toteutuneita tuntitason todellisia markkinahintoja vuosina 2013 – 2020 (markkina-alueena Suomi). Tuohon hintaan lisäsin vielä sähkön siirtokustannukset, jotka paikallinen sähköverkon omistaja perii teolliselta toimijalta. Sähkön siirtohinnoitteluun kuuluvat mm. siirtomaksu, pätothemaksu ja sähkövero. Lisäsin kulloiseenkin tuntikohtaiseen sähkön markkinahintaan 51,9 €/MWh sähkön siirtokuluja. Sähkön kiinteitä kuukausikohtaisia kuluja tai ns. tehomaksuja ei ole arvioitu eikä huomioitu. Sähkön kustannuksissa ei ole myöskään pohdittu mahdollisia sähköliittymän ns. sulakekoon muutoksen aiheuttamia kustannuksia, koska se on vaikea arvioida ilman todellista laitosta taustalla. Sähkön keskihinnaksi käyttämästäni tuntidatasta vuosina 2003 – 2011 muodostui 36,4 €/MWh. Siirtomaksu huomioiden keskihinta oli 88,3 €/MWh. Mediaanihinta oli 35,0 €/MWh (86,9 €/MWh). Kaikki hinnat tässä esityksessä ovat arvonlisäverottomia.

5.5 Kannattavuussimulaation yleinen toteutusperiaate

Kannattavuussimulaation yleinen toteutusperiaate oli laskea tunti tunnilta KL-lämpöä tuottavalle datakeskukselle kannattavuus kahdeksan tarkasteluvuoden ajalta, vuosina 2013 – 2020. Sähkön hintana jokaiselle laskentatunnille käytettiin tarkkaa todellista sähköpörssin sähkön hintaa. Lämpötiladatana käytettiin Tornion Energian mittaamaa tuntikohtaista ulkolämpötilaa vuosina 2013 – 2020.

Niissä skenaariossa, joissa datakeskuksen oletettiin olevan kytkettynä kaukolämmön menoveteen, määrittelin lisäksi jokaiselle tunnille kuinka lämmintä kaukolämpöä datakeskuksen lämpöpumppujen pitää tuottaa. Tuon lämpötilavaateen perusteella hain lämpöpumpulle COP-arvon, koska se muuttuu tuotettavan lämpötilan mukaan kuten kuvasta Kuva 13 muistamme. Näin päästään kiinni datakeskuksen tuottaman kaukolämmön omakustannushintaan, jossa ainoa muuttuva tuotantokustannus eli sähkönhinta on mahdollisimman tarkasti mukana. Datakeskuksen lämmöntuotannon kiinteät kustannukset tai lämmöntuotannon ope-
 rointikustannukset on arvioitu kiinteinä erinä investointikustannuksiin. Näin päästään varsin helposti käsitettävään malliin, joka antaa hyvän ja tarkan arvion datakeskuksen lämmöntuotannon kannattavuudesta.

Tuntikohtaisesta simulaatiosta tuli tietysti varsin raskas malli, mutta katsoin, että tässä kohtaa voin tehdä hieman enemmän kuin aikaisemmat asiaa tutkineet opin-
 näytetöiden tekijät enkä lähde käyttämään kuukausikohtaisia keskiarvodataja, koska se saattaa viedä harhaan. Samalla pystyin hyödyntämään aikaisemmin hankkimaani kokemusta ja osaamista tietojenkäsittelyn ja data-analytiikan alalla, joka näin yhdistyi mukavalla tavalla energia-alan oppinäytetyöhöni.

5.6 Simulaatioissa käyttämäni kaukolämmön myyntihinnat

Viimeinen mutta tärkein puuttuva osa kannattavuussimulaatiostani oli määrittellä, paljonko datakeskus voisi saada ulosmyydystä lämpöenergiasta rahaa. Tähän ei tietenkään yksiselitteistä vastausta ole, koska asia on kaukolämpölaitoskohtainen neuvottelukysymys. Jotkut kaukolämpölaitokset hyvittävät energiasta paremmin kuin toiset. Jotkut energiayhtiöt ovat tässä myös hyvin avoimia ja ovat jopa julkaisseet kaksisuuntaisen kaukolämmön hinnaston verkkosivuillaan. Siis hinnaston, millä hinnalla he lupautuvat ostamaan asiakkaidensa tuottamaa kaukolämpöä. Pisimmällä tässä avoimuudessa näyttää olevan Fortum, jolla onkin mm. Ruotsista pitkä kokemus kaksisuuntaisen kaukolämmön ostotoiminnasta. Fortumille tässä kohtaa erityiskiitos avoimuudesta energia-alan kehittämiseksi, se avoimuus auttoi tätä oppinäytetyötä paljon.

Silläkin on lämmönmyyntihintaan merkitystä, tuottaako datakeskus lämpöä kaukolämmön meno- vaiko paluuveteen. Menoveteen lämpöä tuottamalla on lupa

odottaa parempaa korvausta kuin paluuveteen tuottamalla. Jotkut kaukolämpölaitokset kuten Fortum ovat asian huomioineet hinnastossaan ja julkaisevat hinnoittelun erot avoimesti.

Viimeisin ja merkittävin tekijä kaukolämmön hinnoittelussa on kaukolämpöyhtiön oman lämmöntuotannon hinta. Perinteisesti edullisin lämpöenergia on syntynyt kaukolämpöyhtiöiden suurissa CHP-voimalaitoksissa, joissa energiasta on saatu hyödyksi jopa yli 90 % teoreettisesta energiasisällöstä. CHP-voimalaitokset tuottavat sekä lämpöä että sähköä käyttämästään energiasta. CHP-yksiköt ovat teholtaan usein varsin suuria eikä niitä voi ajaa pienillä osakuormilla. Käytännössä CHP-yksiköt ovat käynnissä talvivuodenaikaan, kun sähköstä saadaan hyvä hinta ja lämmöllekin on tarvetta. Kesäaikaan, kun sähkön hinta on matala, suuria CHP-yksiköitä ei pidetä käynnissä. Kuumimpaan kesäaikaan lisäksi kattilalämpölaitoksille tehdään usein myös vuosihuoltoa. Lämpöä tarvitaan vain ehkä kymmenesosa siitä mitä talviaikaan. Lämpö saatetaan tehdä varavoimalalla, jotka usein käyttävät fossiilienergiaa kuten polttoöljyä tai hiiltä. Nurinkurista onkin, että kaukolämpöyhtiöt vaikuttavat haluavan kesällä korvata huonosti muille kaukolämmöntuottajille energiastaan, vaikka niiden oma lämmöntuotanto kesäisin saattaa olla kalleinta tuotettua energiaa koko vuodenkierron ajalta ja lisäksi aiheuttaa CO₂-päästöjä.

Olen Taulukko 3 listannut kolmen suomalaisen energiayhtiön verkkosivuillaan julkaisemat kaukolämmön ostohinnat asiakkailleen. Yhtiöt ovat Fortum, Helen (ent. Helsingin energia) ja Tampereen sähkölaitos. Reiluin kaukolämmöstä maksaja on Fortum. Fortumilla on lisäksi ainoana yhtiönä erikseen kerrottu hinnat menoveteen vs. paluuveteen tuotetulle kaukolämmölle. Simulaatioissa käytin Fortumin hinnastoa, koska se mielestäni lähempänä sitä, mitä kaukolämmön myyjän sopii odottaa tuotteestaan eri vuodenaikoina. Muiden yhtiöiden hinnoittelu on mielestäni alakanttiin, vaikka huomioitaisiin verkostokustannuksetkin.

Hinta, mitä kaukolämpöyhtiöt hyvittävät asiakkailleen lämmöstä, ei tietysti ole sama kuin mitä ne perivät, kun ne myyvät lämpöä asiakkailleen. Tätä kaukolämpöoperaattorit perustelevat sillä, että lämmönsiirtoverkosto eli kaukolämpöputkisto on suuri investointi ja sen kuoletus ylläpitokuluineen maksaa rahaa. Lisäksi energian siirto eli veden pumppaaminen verkostossa maksaa jotakin.

Taulukko 3. Tuotetun kaukolämmön hyvityshinnastoja

kuukausi	Helen (€/MWh)	Fortum (€/MWh)		Tre SL (€/MWh)	markkinaeht. myyntihinta (€/MWh)
		meno	paluu		
tammi	38,0	50	35	30	60
helmi	38,0	45	32	30	60
maalis	28,6	45	32	20	55
huhti	28,6	30	21	20	48
touko	14,1	20	18	20	37
kesä	14,1	20	10	10	25
heinä	14,1	20	10	10	22
elo	14,1	20	10	10	22
syys	14,1	20	10	20	36
loka	28,2	30	21	20	45
marras	28,2	30	21	20	55
joulu	28,2	42	30	30	60
keskiarvo	24,0	31,0	20,8	20,0	43,7
mediaani	28,2	30,0	21,0	20,0	46,5

Kuinka paljon energiansiirtäminen oikeasti maksaa kaukolämpöyhtiöille, sitä yhtiöt eivät avaa julkisesti. Kaukolämmön energiamarkkinoiden kehittymisen kannalta olisi edullista, että aivan kuten sähköverkoissakin, energian siirtohintana olisi eritelty erilleen energian myyntihinnasta. Koska kaukolämmön siirtoverkot muodostavat samanlaisia luonnollisia monopoleja alueillaan kuin mitä sähkönsiirtoverkot ovat, olisi hyvä, jos Suomessakin olisi hieman enemmän veloitteita kaukolämpölle avata tietoja verkostostaan. Veloitteisiin pitäisi kuulua vähintään avoin kustannus- ja lämmönsiirtodata. Ehkä pitäisi myös lainsäädännön tasolla säädellä, että lämmönmyyjäksi alueelliseen monopoliin on myös subjektiivinen oikeus päästä sisään kuten Ruotsissa on toimittu (Fjärrvärmelag, 2008:263 37 §). Jos datakeskuksilla ja muilla merkittävillä hukkalämmön haltijoilla olisi avoimempi pääsy kaukolämmön dataan, muodostuu paremmin näkemys siitä, että muun toiminnan ohessa syntyvä hukkalämpö on arvokas resurssi. Hyödyke, josta on mahdollista saada myyntituloja datakeskuksen korkeita kustannuksia kattamaan.

Ruotsissa energiamarkkinoita valvova viranomainen valvoo myös kaukolämpöyhtiöiden verkostokuluja aivan kuten Suomessa Energiavirasto valvoo sähköverkojen omistajien verkostonhoitokulujen ja tuottojen kohtuullisuutta. Ruotsa-

lainen Energimarknadsinspektionen on tuottanut mielenkiintoista dataa ruotsalaisten kaukolämpöverkkojen ylläpitokuluista (DoUH – drift- och underhållskostnader). **Virhe. Viitteen lähde ei löytnyt.** on kyseisen viranomaisen raportista, jossa on vuosille 2009 – 2013 tilastoitu keskimääräinen verkostokustannus per siirretty megawattitunti. Koska Ruotsi on niin infrastruktuuriltaan, ilmastoltaan kuin kustannustasoltaan hyvin paljon samantyyppinen maa kuin Suomi, avaa ruotsalaisen viranomaisen keräämä data mahdollisuuden tehdä arvioita lämmön myyntihinnan ns. fair market valuesta Suomessakin.

Specifika tal	2013	2012	2011	2010	2009
DoUH kr/MWh	20,1	20,8	21,6	18,3	18,0
DoUH kr/km nät	55,5	55,5	55,7	59,4	72,4

Kuva 15. Kaukolämpöverkon ylläpitokustannuksia Ruotsissa 2009 - 2013

Karkean arvion kaukolämmön myyntiarvosta aidosti avoimilla kaukolämpömarkkinoilla saa vähentämällä suuren kaukolämpöyhtiön myyntihinnaston hinnoista pois verkostokustannuksen, joka ruotsalaislähteen mukaan olisi noin 2 euron luokkaa per megawattitunti. Taulukko 3 viides sarake (markkinaehtoinen myyntihinta) onkin tällainen spekulatio, jossa olen Fortumin kaukolämmön myyntihinnastosta vähentänyt verkostokorvausta 2 euroa/MWh. Sarakkeessa neljä on jäljellä se hinta, mitä datakeskus voisi ajatella saavansa, jos se olisi lämpömarkkinoilla yhdenvertainen toimija muiden KL-voimalaitosten kanssa. Ajattelutapa edellyttää, että datakeskus voisi toimia itsenäisenä lämmönmyyjänä verkostoon suoraan lämmön loppukuluttajalle. Muutos edellyttäisi myös lakimuutoksia. On huomattava, että ajattelumallissa ei enää korvata itse KL-verkosto-omistajalle ”kapasiteettimaksua” esimerkiksi lämpövoimalan olemassaolosta, koska datakeskus toimii nyt itsenäisenä lämmönmyyjänä, oman ”voimalaitoksen” omistajana kaikkine siihen liittyvine velvoitteineen ja etuineen.

5.7 Ajetut KL-tuotantosimulaatiot

Ajoin geneeriselle 1 MW datakeskukselle seuraavat KL-tuotantosimulaatiot:

- A. Lämpöä tuotetaan ympärivuotisesti KL-paluujohtoon. Lämmöstä hyvitetään datakeskusta Fortumin paluulämpöhinnaston mukaisesti. Lämpöpumpun sähkön veroluokka I.
- B. Lämpöä tuotetaan ympärivuotisesti KL-menojohtoon. Lämmöstä hyvitetään datakeskusta Fortumin menolämpöhinnaston mukaisesti. Lämpöpumpun sähkön veroluokka I.
- C. Lämpöä tuotetaan ympärivuotisesti KL-menojohtoon. Lämmöstä hyvitetään datakeskusta Fortumin menolämpöhinnaston mukaisesti. Lämpöpumpun sähkön veroluokka II.
- D. Lämpöä tuotetaan ympärivuotisesti KL-menojohtoon. Lämmöstä hyvitetään tTaulukko 3 sarakkeen 'markkinaehtoinen myyntihinta' mukaisesti. Lämpöpumpun sähkön veroluokka I.
- E. Lämpöä tuotetaan ympärivuotisesti KL-menolämpöjohtoon 1 MW teholla. Lämpö kerätään meren syvänteestä ja korotetaan lämpöpumpulla korkeintaan 90 °C lämpötilaan. Jos tarvitaan lisäpriimausta, se tehdään sähköllä. Lämpöpumpun sähkön veroluokka II.

Skenaario E ei oikeastaan liity tämän opinnäytetyön aiheisiin. Mutta koska olin koodannut simulaatiomallin, jossa oli valmiina markkinahintainen sähkö ja Tornion ilmastodata, tarvitsi vain laskea analyysin lähtötietoihin uudet COP-arvot merivesilämpöpumpulle. Meriveden lämpötilaksi oletin +4 °C, koska sen on syvänteissä tavanomainen veden lämpötila varsinkin talvivuodenaikaan. Todennäköisesti hieman vaivaa näkemällä löytää merivesivaihtimeen lämpimämpääkin vettä vuodenaikojen mukaan eli lämpöpumpun kannattavuus paranee. Vesi on raskaimmillaan ollessaan neljä asteista. Sitä kylmempi tai lämpimämpi vesi nousee pintaa kohti. Merivettä jäähdytetään 3 astetta, joten vesi poistuu takaisin mereen +1 °C lämpötilassa. Lämpöpumpun tuottaman lämpötilan ylärajaksi laitoin +85 °C, jottei tule liian suurta lämpötilakorotusta pumpun työvaiheeseen. Koska

lämpöpumppu tekee kaukolämpövedä menoveteen, pitää kaukolämpövedä priimata korkeampiin lämpötiloihin kylmimpinä lämmitystunteina. Toteutin sen yksinkertaisesti sähköllä nähdäkseni, tappaako hyvin kalliilla energialla tuotettu loppupriimaus systeemin kassavirrat negatiivisiksi. Kannattavuuslaskelmia en lähtenyt skenaariolle E tässä laskemaan, koska merivesilämpöpumppu on opinnäytetyöni ydinkysymyksen ulkopuolella ja olisi edellyttänyt, että olisin laatinut kustannusarvion merivesilämpöpumppulaitoksen rakentamiskustannuksista. Sähköveroluokien I ja II ero on noin 37 % ero sähkön siirtohinnessa sähköveroluokan II hyväksi.

PUE-luvuksi datakeskuksille oletin hyvän modernin arvon 1,4. Kuten luvussa 2.15.1 esittelystä laskukaavasta voi päätellä, pääsee datakeskuksen kokonais-sähkötehoon kiinni, kun kertoo IT-tehon PUE-arvolla. Siten valitsemani datakeskustyytit tuottavat lämpöä KL-verkostoon 280 kW ja 3,5 MW teholla, koska kaikki rakennuksiin syötetty sähkö muuttuu ennen pitkää lämmöksi. Ilmanvaihdon pientä poistovirtaa lukuun ottamatta kaikki muu lämpö kertyy datakeskuksen jäähdytysveteen.

5.8 KL-tuotantosimulaatioiden tulokset

Simulaatiot tuottivat seuraavanlaiset diskonttaamattomat myyntikatekassavirrat 8 vuoden tarkastelujaksolla 2013 – 2020. Luvut ovat tuhansia euroja.

Taulukko 4. Lämmön myynnistä saadut myyntikatteet

Case	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	Yht (x10 ³ €)
A	-3	-37	-43	-14	-13	-7	-20	-31	-170
B	77	36	31	62	62	72	57	44	441
C	125	86	81	111	112	121	106	93	835
D	206	166	160	191	192	202	186	173	1476
E	193	132	125	171	171	186	163	144	1284

Suuremman tai pienemmän datakeskuksen lämmönmyynnin kahdeksan vuoden diskonttaamattomat nettokassavirrat saa taulukosta skaalaamalla. Jos datakeskus tuottaa lämpöä esim. 0,4 MW teholla, on skenaario C:n mukaisella tuotantotavalla 8 vuoden diskonttaamaton myyntikate $835 \times 0,4$ (x 1000 euroa). Kassavirrat ovat nykyarvoon diskonttaamattomia. Diskonttaus on luontevinta tehdä vasta investointilaskelmassa, koska siellä käsitellään muitakin eriä diskonttokoolla.

Lämmöntuotannosta saatavista rahavirroista voidaan tehdä seuraavanlaisia karkeita päätelmiä jo ennen investointilaskelmavaihetta:

- Skenaario A eli lämmöntuottaminen KL-paluuseen ei ole kannattavaa toimintaa puhtaana lämmönmyyntinä ilman sähköveroalennuksia.
- Skenaario B eli lämmöntuottaminen KL-menoon tuottaa kyllä positiivisen kassavirran, mutta ei mitenkään suuren sellaisen. Skenaario B ei todennäköisesti ole niin kannattava, että se kiinnostaisi investointina pelkkien lämmönmyyntitulojen avulla.
- Skenaario on sama kuin B, mutta sähkövero on laskenut uuden asetuksen myötä kaukolämpöä tuottaville lämpöpumpuille teollisuussähköluokkaan. Positiivinen myyntikate on noin kaksinkertainen B skenaarioon nähden. Skenaario saattaa jo kiinnostaa joitakin sijoittajia investointimielessä, mutta kannattaa muistaa, että tulos on saatu anomalian takia erikoisesti käyttäytyvässä kaukolämpöverkossa, joka on lämpöpumppuystävällisempi kuin monet muut verkot. Kaukolämmön huippulämpötilaan tarvittaisiin valtakunnallinen ”lämpöpumppuremontti”, jotta skenaariosta uskaltaa sanoa, että se kantaa yksinään.
- Skenaariossa D datakeskus saa voimalaitoksen katteen myymästään lämmöstä. Myyntikate on kaikista lasketuista skenaariosta paras, vaikka sähköveroluokkakin on I. Skenaario ei ole nykytilanteessa mahdollinen, koska hukkalämmön myyjien neuvotteluasema ei ole riittävän vahva verkostonomistajiin nähden.

- Skenaario E ei ole datakeskusskenaario vaan ylimääräinen laskentatapaus. Se osoittaa kuitenkin, että jos ja kun uuden asetuksen myötä sähkövero laskee veroluokka II:een KL-lämpöpumpuille, lämmönlähteitä kannattaa etsiä muualtakin kuin vain datakeskuksista. Jopa varsin viileästä lämmönlähteestä kuten +4 °C merivesi saattaa pystyä saamaan kannattavan kaukolämmön tuotantotavan, kunhan sitä vettä vain on riittävästi. Yhteiskunnassa on viileää merivettä paljon lämpimämpiä lämmönlähteitä runsaasti tarjolla kuten jätevedenpuhdistamoiden jätevedet, kauppojen kylmäkoneiden lauhdelämpö jne. Helsingissä jätevesistä otetaankin lämpöä talteen kaukolämpöverkkoon ja se investointi tiedetään kannattavaksi. Myös muualla Suomessa kannattaa harkita samaa sekä etsiä muitakin lämmönlähteitä kuin jätevesi.

5.9 Sähköveron alennuksesta saatava säästö

Normaalisti alle 5 MW datakeskukset maksavat sähköstään veroluokka I mukaisesti veroa 22,4 €/MWh. Uudessa suunnitteilla olevassa energiaverotuksen mallissa datakeskuksen IT-sähköstään maksama sähkövero muuttuisi veroluokkaan II verotettavaksi. Energialuokassa II sähkövero on ollut 1.1.2021 lähtien 0,5 €/MWh. Datakeskus säästää siten sähkölaskussaan 21,9 euroa megawattitunnilta. Investointilaskelmat teen kahdelle kokoluokalle: 200 kW ja 2,5 MW IT-tehoisille datakeskuksille. Taulukko 5 olen laskenut laskentatapausten mukaisten datakeskusten säästämät eurot sähkölaskussa aikayksikköä kohden. Investointilaskelmissa käytän vuodessa kertyvää säästöä, vaikka toki oikein tarkassa investointilaskelmassa kassavirrat kannattaisi jyvittää kuukausitasolle. Suurten sähkökuluttajien laskut tulevat tiheämpään kuin kerran vuodessa.

Taulukko 5. Datakeskuksen säästö sähkölaskussa

IT-teho	vuodessa	kuukaudessa	päivässä
200 kW	38369 €	3154 €	105 €
2,5 MW	479610 €	39420 €	1314 €

Veroalennukselle voi laskea taulukon 5 luvuista myös kätevän nyrkkisäännön: se on noin 530 euroa päivässä IT-megawattituntia kohden.

5.10 KL-lämmöntuotantokyvyn vaatimat investoinnit

Hukkalämmön jalostamiseksi kaukolämmöksi datakeskuksen täytyy investoida tietenkin lämpöpumppuun. Pienempi datakeskustyypeistä tarvitsee 280 kW jäähdytystehoon pystyvän lämpöpumpun. Suurempi datakeskustyypeistä tarvitsee todennäköisesti kaksi lämpöpumpua, mahdollisesti toisen pienemmän ja toisen isomman, jotta lämmöntuotantoon saadaan säädettävyyttä. Jäähdyttävää tehoa lämpöpumpuista pitäisi löytyä 3,5 MW edestä. Lämpöpumput tarvitsevat ympärilleen putkikytkentöjä, lämpötiloja tasoittavia varaajia, automatiikkaa, sähkötekniikkaa ja monenlaista muuta. Kannattaa huomata, että laskentaskenaarioissani ei käytetä vaihtokytkentää. Lämpöä tehdään koko vuosi joko menoon tai paluun. Mielestäni vaihtokytkennät eivät yleensä ole niiden aiheuttaman ohjauksen mutkistamisen värtejä. Molemmissa laitoksissa KL-menoon lämpöä tehtäessä kylmällä säällä kaukolämpöä on priimattava yli 100 °C lämpötiloilla. Näissä laitoksissa se tehdään sähköllä. Tarvittavien virtauslämmittimien hinta on mukana investointikustannuksissa. Myös datakeskusten sähköliittymän tehon oletetaan riittävän priimaukseen ilman lisäinvestointeja. Keskus- ja muuntajainvestointien hintaa en ole lähtenyt tässä laskuharjoituksessa arvioimaan. Todellisen elämän investointilaskelmassa tuokin seikka pitää muistaa tarkistaa, jos priimaus tehdään sähköllä.

Laskentatapaus A:ssa priimausta ei tarvitse tehdä, koska tuotetaan ympärivuotisesti 70 °C vettä KL-paluujohtoon. A-tapauksen investointikustannus onkin hie-man muita tapauksia pienempi, koska sähköllä toimivia läpivirtauslämmittimiä ei tarvitse hankkia.

Pienemmän datakeskuksen lämmönmyynnin tuottamista kassavirroista voi jo suoriltaan nähdä, ettei se kestä kovin suuria investointeja. Niinpä olen olettanut, että pieni datakeskus sattuu sijaitsemaan onnekaassa paikassa eikä kaukolämpöjohtoa tarvitse rakentaa lisää. Isompi datakeskus sen sijaan työntää lämpöä sen verran paljon, että olen laskenut investointikustannuksiin mukaan kilometrin verran kiinnivaahdotettua 2Mpuk DN 250 kaukolämpöputkiparin rakennuskustannuksia. KL-putkijohtoparin rakennuskustannusarvion olen ottanut J Peron diplomityöstä Mäntsälän energian kaukolämpötoiminnan kehittämiseksi. (Pero, 2016)

Pienemmän 200 kW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon mahdollistavan laitteiston investointikustannukseksi olen laskenut 240000 euroa rakennuttamiseksi ja käyttöönottoestauksineen. Suuremman, 2,5 MW datakeskuksen kaukolämmön tuotantolaitteiston olen arvioinut olevan niin tilaa vievä, että sille rakennetaan oma 200 m² uudisrakennus datakeskuksen viereen "voimalaitokseksi". Investointikustannukseksi tulee rakennuksineen kaikkineen käyttöönottoestatuna liki 2 miljoonaa euroa. Hinta-arviot perustuvat omaan työkokemukseeni rakennusliikkeessä, lämpöpumppualalla sekä Granlundin datakeskus- ja energiatehokkuuskonsultointi liiketoiminnassa kertyneeseen projektikustannustietoon. Investoinnista saattaa selvitä halvemmallakin, mutta sehän vain parantaa kannattavuutta, jos niin sattuisi käymään.

Tämäntyyppiset kohteet voivat täyttää energiatehokkuusinvestointien kriteerit. Investointilaskelmissani ei ole huomioitu mahdollisia yhteiskunnalta saatavia investointitukia eikä arvioitu niiden saamisen mahdollisuuksia. Todennäköisesti niitä saa hyvin perustellulla hankkeella.

Lopuksi, molempiin laitostyyppeihin on kassavirtoihin laskettu mukaan myös arvio vuosittaisista hoitokuluista, joilla katetaan mm. lämpöpumppujen huollot, lämmönsiirtimien huollot ja muu laitosten käytönaikainen operointi. Isomman datakeskuksen tapauksessa kassavirta antaa mahdollisuuden palkata vaikka oma huoltomies varta vasten lämmöntuotannosta huolehtimaan. Pienen konesalin tapauksessa sellaiseen ei ole varaa vaan se on ratkaistava edullisemmin.

5.11 Investointien kannattavuus valituille laskentatapauksille

Olen laskenut molemmille datakeskustyypeille vuotuisen keskimääräisen tuoton. Takaisinmaksuajoista olen laskenut ns. yksinkertaisen takaisinmaksuajan ja korollisen takaisinmaksuajan. Korollisen takaisinmaksuajan korkona olen käyttänyt kahdeksaa prosenttia. Lisäksi olen laskenut ns. sisäisen korkokannan investoinnille.

Sisäinen korkotuotto (IRR, internal rate of return) on mielestäni parempi tapa esittää investoinnin kannattavuus geneerisessä tarkastelussa, jossa asiakasta ei ole määriteltä. Sisäisestä korkotuotosta jokainen lukija voi nopeasti tarkistaa, täyttääkö investoinnin tuotto hänen vaatimustasonsa. Sisäisen korkokannan kaava

saadaan johdettua nykyarvon laskukaavasta siten, että ratkaistaan korko tilanteessa, jossa investoinnin nykyarvo on nolla eli juuri kannattavuusrajalta. Jos saatu sisäinen korko ylittää datakeskusyhtiön talouspäällikön investoinneille asettaman yleisen tuottovaatimuksen (käytetyn korkokannan), pitäisi investoinnin olla kiinnostava kyseiselle toimijalle. Sisäisen korkotuoton laskin varsin lyhyelle ajanjaksolle, pitoaika oli vain 8 vuotta.

5.11.1 200 kW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus

Olen

Taulukko 6 kerännyt tulokset eri lämmönmyynnin skenaariolle. Lämmön myyminen kaukolämmön paluujohtoon ei ole kannattavaa (tapaus A). Sen sijaan skenaario C tarjoaa pienillekin datakeskuksille jo kiinnostavaa tuottoa. Skenaariossa C myydään lämpöä ympärivuotisesti kaukolämmön menojohtoon ja lisäksi sähköveroalennuksen saa sekä IT-tila että kaukolämpöä tuottava lämpöpumppu. Tilanne, jossa sähköveroalennuksen saa vain IT-tila mutta ei lämpöpumppu, on laskentatapaus B.

Taulukko 6. 200 kW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus

Skenaario:	A	B	C	D
Investointi (tuhatta euroa)	177	240	240	240
Vuotuinen keskim. tuotto + säästö (t. euroa)	22	44	58	80
Takaisinmaksuaika (vuosia)	7,9	5,5	4,2	3,0
Korollinen takaisinmaksuaika (8 %, vuosia)	12,9	7,5	5,3	3,6
Investoinnin sisäinen korkotuotto (IRR), 8 a	0 %	9%	17%	29%

5.11.2 2,5 MW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus

Taulukko 7 on esiteltynä 2,5 MW IT-tehoisen datakeskuksen kannattavuus eri lämmönmyyntiskenaariolla. Suuruuden skaalaedut alkavat tulla näkyviin, vaikka kustannuspuolella on alkuinvestointi liki 2 miljoonaa euroa sisältäen uudisrakennuksen lämmönmyyntituotannolle ja kilometrin verran uutta kaukolämpöputkistoa. Silti investoinnin kannattavuus on erinomaisen hyvä, vaikka tehtäisiin pelk-

kää KL-paluuveettä. Investoinnin kannattavuus on sitä luokkaa, että sen pitäisi kelvata kansainvälisille pörssiyhtiöillekin investointikohteeksi. Harva yritys saa sijoit- tamalleen pääomalleen yli 30 % tuottoja. Laskentaskenaariossa C datakes- kusoperaattori saa kuoletettua KL-tuotantoinvestointinsa parissa vuodessa.

Taulukko 7. 2,5 MW datakeskuksen KL-lämmöntuotannon kannattavuus

Skenaario:	A	B	C	D
Investointi (tuhatta euroa)	1760	1960	1960	1960
Vuotuinen keskim. tuotto + säästö (t. euroa)	558	824	997	1277
Takaisinmaksuaika (vuosia)	3,2	2,4	2,0	1,5
Korollinen takaisinmaksuaika (8 %, vuosia)	3,8	2,7	2,2	1,7
Investoinnin sisäinen korkotuotto (IRR), 8 a	27%	39%	49%	64%

Säästöjen suuruutta voisi havainnollistaa seuraavasti: 2,5 megawatin suuruinen datakeskus on tyypillisesti noin 3000 m² suuruinen rakennus, jossa on noin 360 räkkipaikkaa. Vuodessa saataisiin tuolle kiinteistölle yli 300 €/ m² lisätuottoa – tai 2800 euroa enemmän katetta per räkkipaikka.

6 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyöni keskeisin tulos on, että sekä pienten että keskisuurten datakeskusten omistajien kannattaa hankkia energia-alan konsulteilta selvitys, millaisin edellytyksin ja millaisella kannattavuudella heidän omistamansa datakeskus voisi liittyä kaukolämpöön lämmön myyjäksi. Suunnitteilla oleva energiaverotuksen muutos muuttaa datakeskuksen hukkalämmön rahanarvoiseksi hyödykkeeksi, josta saa investoinnilleen asiallisen tuoton.

Toimeksiantajalleni Granlund Oy:lle opinnäytetyöni keskeinen hyöty on, että nyt meillä on kohtuullisen hyvä käsitys siitä, mitä suunnitteilla oleva energiaverotuksen muutos datakeskusasiakkaillemme merkitsee. Laskentamallistakin on runko, jonka perusteella on hyvä kehittää tarkkoja asiakaskohtaisia kannattavuuslaskelmia. Meillä datakeskusliiketoiminnassa mukana olevilla on tietysti ollut aavistus siitä, että IT-sähkön hinnan lasku saattaa muuttaa lämpöpumppuinvestointien kannattavuutta ratkaisevasti. Enää ei tarvitse aavistaa tai arvailla. Minulle yllättävä uusi tieto oli, että varsinkin keskisuurten datakeskusomistajien kannattaa aloittaa selvitystyö pikaisesti. Heille lämmönmyynti saattaa olla taloudellisesti kannattavaa jopa nykytilanteessa, ennen sähköveron alennuksiakin. Jokainen päivä, minkä he hukkaavat selvittämättä asiaa, saattaa merkitä, että he jäävät ilman energianmyynnistä saatua tulovirtaa.

Opinnäytetyöni tulosten luotettavuuden arvioisin olevan hyvä. Lämmön tuotannon myyntilaskelmat on tehty todellisilla kahdeksan viime vuoden toteutuneilla sähkön markkinahinnoilla. Lämmön myyntihintana on käytetty yhden suuren toimijan julkista hinnastoa, joten lämmöstä saatava hintakaan ei pitäisi olla epärealistinen. Kahdeksan vuoden jaksolta laskin lämmönmyynnin kannattavuuden jokaiselle tunnille erikseen. Datakeskuksen myymän lämmön kate määriteltiin yli 70000 tunnille. Laskin ehkä liiankin tarkasti, voisi joku moittia. Puolustaudun sillä, että automaattinen tietojenkäsittely laskee yhtä helposti niin 100 kuin 100000 tapaustakin kun sen vain osaa oikein tehdä ja ohjelmoida. Tarkka tuntikohtainen laskeminen ei tuottanut minulle kovin paljoa ylimääräistä työtä.

Investointikustannukset tuotantokapasiteettiin on arvioitu mieluummin hieman yläkanttiin kuin alas. Laskentakorkokin on kohtuullisen kovaa tasoa nykyisten nol-lakorkojen maailmassa. Tietysti jokaisen datakeskuksen kohdalla kannattavuus on selvitettävä erikseen, koska jokainen laitos on uniikki. Lopullisen kannattavuuslaskelman ja positiivisen investointipäätöksen tekeminen edellyttää onnistuneita neuvotteluja paikallisen kaukolämpölaitoksen kanssa.

Kaukolämpöliiketoimintaa harjoittavan energia-alan on syytä ryhtyä nopeammin edistämään Suomessa kaukolämpötuotantoa lämpöpumpuilla. Fossiilisista polttoaineista poissiirtymistä ei pidä liiallisesti ja yksinomaan perustaa puun polton lisäämiseen perustuvaan strategiaan. MEP Hautalan varoitus oli selväsanainen: puun lisääntyvää polttoa ei välttämättä nähdä kestäväenä ja vastuullisena tapana ratkoa ilmastokriisiä niissä pöydissä, missä Suomenkin ilmastokiintiöistä pääte-tään.

Kaukolämpöalan suunnittelijaohjeistus on edelleen huippulämpötilan osalta sama kuin 50 vuotta sitten. Kyseinen lämpötila haittaa lämpöpumppujen yleisty-mistä kaukolämpötuotannossa suuresti. Merkillisintä on, että jopa uudiskohteissa suunnittelijoita ohjataan mitoittamaan lämmönsiirtimet 115 °C asteen mukaan. Eikö sentään uudisrakennuksissa voisi käskää ostamaan siirtimet pikkasen isom-pina? Rahallisesti hieman isomman siirtimen hintavaikutus on pyöristysvirhe uu-den rakennuksen rakennuskustannuksissa. Hieman suurempien siirtimien vaiku-tus verkoston painehäviöihin ei myöskään liene ratkaiseva – tai jos sitä epäillään, niin asian voisi tutkituttaa. Samoin rakennuksissa, joissa lämmönsiirtimiä sanee-rataan niiden käyttöiän päätyttyä, voisi siirtimet ohjata mitoittamaan alemmalle lämpötilalle, vaikka huomisesta lähtien. Olisi tulevaisuudessa se siirtyminen alempaan huippulämpötilaan vaivattomampaa, jos asian valmisteleminen aloitet-taisiin heti tänään suunnittelijaohjeistuksia muuttamalla. Jokainen vanhoilla oh-jeilla uusittu lämmönsiirrin nimittäin lykkää uudistuksia taas 20 vuodella eteen-päin.

Suurempia esteitä suositella huippulämpötilan laskua K1-ohjeistuksessa ei myöskään ole ja se olisi tärkeä signaali koko alalle ja myös suunnittelijoille, että jatkossa huippulämpötilojen on tultava alas kaukolämpöverkostoissa. Jokainen kaukolämpöyhtiö tutkikoon verkostossaan, voidaanko heidän toimialueellaan

ryhtyä paikallisesti soveltamaan välittömästi uutta suositusta vai pitääkö ylimenokautena vielä soveltaa vanhaa. Suosituksen muuttaminen siirtäisi koko alan katseet kuitenkin tulevaan maaliin ja muistuttaisi, minne meidän pitää olla matkalla. Tässäkin paras on hyvän pahin vihollinen. Takavuosina on mm. opinnäytetöissä selvitetty kunnianhimoisesti huippulämpötilan laskemista 90, 85 tai jopa 65 asteeseen. Olisihan se hieno tavoite, mutta olemassa olevissa verkostoissa matka noin alhaisiin lämpötilatasoihin on pitkä tie. Tähtäin kannattaisi asettaa vähän vähemmän kunnianhimoiseksi. Noin 100 °C asteeseen laskettu huippulämpötila tänään on parempi ehdotus kuin 65 °C astetta vuonna 2060. Kuten opinnäytetyöni osoittaa, ruotsalaismallinen maksimi, noin 100 astetta riittää avaamaan kannattavuuden portit monenlaisille lämpöpumppusovellutuksille kaukolämpötuotannossa.

LVI-alan insinöörikouluissa pitäisi myös asia huomioida pikimmiten. Asiakaspään laitteiden mitoittaminen vanhanaikaisille lämpötiloille pitäisi lopettaa, tai ainakin lasketuttaa myös sellaisia vaihtoehtoja, joissa mitoituslämpötila lämmityskäytön siirtimen ensiön tulolle on muutakin kuin 115 °C. Teollisen kokoluokan lämpöpumppujen käyttöä kaukolämmön tuotantoon pitäisi tutkia osana kylmä- ja lämpöpumpputekniikan kursseja.

Lainsäätäjän ja kilpailuviraston kannattaa tarkastella tarkemmin kaukolämpöverkkojen muodostamien luonnollisten monopolien asemaa, jotta arvokkaiden hukkalämpölähteiden hyötykäyttöön ja KL-lämpöpumppuvoimaloiden rakentamiseen saadaan enemmän vauhtia ja kilpailua aikaiseksi. Tarvittaisiinko Suomeen Ruotsin mallin mukainen lainsäädäntö avoimen kaukolämmön pelisäännöistä? Pitäisikö lämmöntuottajalla olla laissa vahvistettu oikeus liittyä alueellaan olevaan kaukolämpöverkoston aivan kuten sähköntuottajalle on annettu tuollainen oikeus sähkömarkkinalaissa?

Uusia opinnäytetyöaiheitakin tämä opinnäyte tuotti. Kauppojen ja elintarvikeyritysten kylmälaitteiden lauhdelämpö saattaisi soveltua samalla tavalla kaukolämmön teolliseen tuotantoon kuin mitä tässä opinnäytetyössä osoitettiin datakeskuksen hukkalämmöstä. Varsinkin, jos veroalennus toteutuu kaikenlaisille kaukolämpöä tuottaville lämpöpumpuille.

Datakeskuksiin on ilmiselvästi tulossa myös täysin uudenlaisia jäähdytysratkaisuja lähitulevaisuudessa. Se poikii paljon tutkittavaa ja pohdittavaa alalle. Esimerkiksi, kuinka ja millaisin edellytyksin co-location-liiketoimintaa voisi harjoittaa nesteupotusjäähdytysasiakkaiden kanssa? Myös nestejäähdytyksen teknisten ratkaisujen kehittämisessä on iso työsaika edessä. Sopisi hyvin konetekniikan alan opinnäytetyöksi ja voisi jopa avata uusia suomalaisia tuoteinnovaatioita.

Datakeskusalan pragmaattinen tutkimus näyttää Suomessa jääneen kovin vähäiseksi. Maassamme kyllä on tehty datakeskuksiin liittyviä opinnäytetöitä kohtalaisen paljon, mutta ne ovat olleet pääasiassa kirjallisuuskatsauksia, joissa hyödynnetään toisten kansakuntien tekemiä pragmaattisia tutkimuksia tai simuloidaan asioita tietokonemallinnuksella. Kaikkea ei voida kuitenkaan koneella mallintaa. Joskus on hyvä mennä kentälle mittamaan ja todentamaan asioita ja sekä tuottaa uutta tietoa suoraan tutkittavista kohteesta. Suomalaisista datakeskuksista sellaista dataa on hyvin vähän. Datakeskukset ovat toki oma suljettu salaperäinen maailmansa, mutta toisaalta datakeskustoimijoidenkaan etu ei ole, jos ala ei kehity, kun kaikki akateeminen tutkiminen on salaamisen nimissä estetty.

LÄHTEET

Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J. & Bertsch, S. S. 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy* vol. 152, 985 - 110.

ASHRAE Technical Committee. 2021. Thermal guidelines for data processing environments. ASHRAE.

Bröckl, M., Immonen, I. & Vanhanen, J. 2014. Lämmön pientuotannon ja pienimuotoisen ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpötoiminnassa. Gaia Consulting Oy.

Cisco. 2009. What is Data Center? Viitattu 1.6.2021 <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html>

CNET CES 2021. What does Microsoft's largest datacenter look like? Viitattu 24.5.2021 <https://opensistemas.com/en/what-does-microsofts-largest-datacenter-look-like-find-out-whats-inside-with-this-video-tour>

Colocation America. 2014. Viitattu 24.5.2021 <https://www.colocationamerica.com/blog/hot-vs-cold-aisle-containment>.

EIA. 1992. Cabinets, Racks, Panels, and Associated Equipment, Revision D. Electronic Industries Alliance.

EPA. 2010. Transitioning to low-GWP. Alternatives in domestic refrigeration. Viitattu 1.1.2021. http://www.epa.gov/ozone/downloads/EPA_HFC_DomRef.pdf

Ellsworth, M. J. & Iyengar, M. K. 2009. Energy Efficiency Analyses and Comparison of Air and Water Cooled High Performance Servers. ASME 2009 InterPACK Conference collocated with the ASME 2009 Summer Heat Transfer Conference and the ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability. 907 - 912. San Francisco, California, USA. ASME.

Energiateollisuus ry. 2020. Kaukolämpötilasto 2019.

Energiateollisuus ry. 2020. K1 Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet.

Energiföretagen. 2014. Fjärrvärmecentralen utförande och installation, tekniska bestämmelser. Viitattu 24.5.2021 <https://www.energiforetagen.se/forlag/fjarrvarme/f101-fjarrvarmecentralen-utforande-och-installation/>.

Fjärrvärmelag. 2008. Sveriges riksdag. Dokument & lagar. Viitattu 24.5.2021 https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/fjarrvarmelag-2008263_sfs-2008-263

Grand View Research. 2020. Data Center Construction Market Size, Share & Trends Analysis Report By IT Infrastructure, By Power Distribution & Cooling Infrastructure, By Miscellaneous Expenses, By Tier Type, By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027. Grand View Research.

Greijer, A. 2010. Energieffektivitet I datahallar. Diplomityö. Kungliga Tekniska Högskolan.

Grundström, S. helmikuu 2021. The Climate. BBC.

Hautala, H. 21.4.2021. Blogi. Viitattu 24.5.2021. <https://heidihautala.fi/fi/suomi-hamartaa-kestavan-rahoituksen-tavoitteita/>

Iltalehti. 24.3.2017. Uspenskin katedraalin alla sijaitsee salainen luola, josta lähtee maailmalle dataa ja lämpöä. Viitattu 24.5.2021. <https://www.iltalehti.fi/digi/a/201703232200090724>

Intel Corporation. 2009. Power Management in Intel Architecture Servers. White paper.

Kasanen E., Lukka K. & Siitonen A. 1991. Konstruktiivinen tutkimusote liiketaloustieteessä. Liiketaloudellinen aikakauskirja.

Kolbjornsrud, K. Datacenter royalty free stock photos. Viitattu 24.5.2021. <https://photodune.net/search/datacenter>.

Laitinen, J. 2020. Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen. Diplomityö. Aalto yliopisto.

Loiste. 20.05.2020. LUMI-supertietokoneen hukkalämmöllä tuotetaan 20 prosenttia Kajaanin kaukolämmöstä. Viitattu 24.5.2021. <https://www.loiste.fi/uutiset/lumi-supertietokoneen-hukkalammolla-tuotetaan-20-prosenttia-kajaanin-kaukolammosta>

Luoranen, J. 2017. Teollisen kokoluokan lämpöpumppukoneikon tekniikka ja talous. Diplomityö. Aalto yliopisto.

Marcinichen, J., Olivier, J. A. & Thome, J. R. 2012. On-chip two-phase cooling of datacenters: Cooling system and energy recovery evaluation. Teoksessa Applied Thermal Engineering 41, 36 - 51.

Motiva Oy. 2011. Energiatehokas konesali.

Parkkonen, L. valtionvarainministeriön valmisteleva virkamies. Haastattelu huhtikuu 2021.

Pero, J. 2016. Kaukolämpöliiketoiminnan kehittäminen Mäntsälän sähköosakeyhtiössä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Pääministeri Rinteen hallitusohjelma 6.6.2019. Valtioneuvosto Viitattu 24.5.2021 https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161662/Osallistava_ja_osaava_Suomi_2019_WEB.pdf

Ritchie, H., & Roser, M. Moore's Law, OurWorldInData.Org.

Severin Zimmermann, I. M. 2012. Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse. Energy.

Telia. 2021. Telia Helsinki Data Center. Viitattu 24.5.2021. <https://www.telia.fi/business/data-center-services/data-centers/helsinki-data-center>

The Green Grid. 2010. ERE: A metric for measuring the benefit of reuse energy from a data center.

TIEKE. Dataliikenteen energiankulutus on ilmastohaasteen ydinkysymys. Viitattu 24.5.2021. <https://tieke.fi/dataliikenteen-energiankulutus-on-ilmastohaasteen-ydinkysymys/>

Tuomaala, P. 2021. Suomen rakennuskannan energiankulutuksen laskentamalli. VTT.

Upsite. 2021. The evolution of Colocation Data Centers. Viitattu 1.6.2021. <https://www.upsite.com/blog/the-evolution-of-colocation-data-centers/>

Van Geet, O. 2011. Best Practices for Energy-Efficient Data Center Design. US. Department of Energy.

Wang, S., Yin, Y. & Rezai, P. 2018. 3D Integrated Circuit Cooling with Microfluidics. Teoksessa Micromachines.

Ympäristöministeriö. 2018. PILP-opas 2018.

Yuventi, J. & Mehdizadeh, R. 2013. A critical analysis of Power Usage Effectiveness and its use in communicating data center energy consumption. Teoksessa Energy and Buildings. 64; 90.