

Jaana Salmi

Energiatehokkuuden arviointi konesalissa

Tietotekniikan
pro gradu -tutkielma
18. joulukuuta 2015

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Tekijä: Jaana Salmi

Yhteystiedot: jaana.salmi@hus.fi

Puhelinnumero: 050-506 6883

Ohjaaja: Ismo Hakala, Risto T. Honkanen

Työn nimi: Energiatehokkuuden arviointi konesalissa

Title in English: Energy efficiency assessment in Data Center

Työ: Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

Sivumäärä: 73+2

Tiivistelmä: Tässä työssä esitellään, kuinka konesalin energiatehokkuutta mitataan ja arvioidaan. Lisäksi pohditaan, kuinka mittaustuloksia käytetään hyväksi energiatehokkuuden parantamiseen. Työssä esitellään ensin yleisesti käytössä olevia tehokkuusmittareita ja mittaussympäristöjä. Tutkimus on kartoittava ja toimintaa selittävä. Lämpötilan nostaminen vähensi konesalin energiankulutusta. Laitemäärän kasvattaminen lisäsi IT-tehon kulutusta. Muutosten seurauksena kokonaisenergiankulutus väheni.

Avainsanat: konesali, energiatehokkuus, PUE, DCiE jatkuva mittaus

Abstract: This Master Thesis presents how the energy efficiency of the Data Center can be estimated and measured. In addition the study evaluates ways how measured result can be applied to improve the energy efficiency. The study is explorative and it describes the operations of Data Center. In the case, the number of hardware and temperature of the premise was increased. Analysis show that, the increase of hardware resulted increase of IT power. Increase of temperature that decreased total energy consumption.

Keywords: Data Center, Energy Efficiency, PUE, DCiE, Continuous Measurements

Copyright © 2015 Jaana Salmi

All rights reserved.

Sanasto

AC	Air Conditioner, ilmastointilaite
AFCOM	Association for Data Center Management
AHU	Air Handling Unit, ilmastointiyksikkö
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAN Bus	Controller Area Network Bus, automaatioväylä
Cisco Energy Manager	Energiatehokkuuden arviointisovellus
CAN Bus -unit	Controller Area Network Bus -unit, automaatioväylän yksikkö
CRAH	Computer Room Air Handler, ilmastointilaite
DCiE	Data Center Infrastructure Efficiency, konesalin talotekniikan energiatehokkuus
DCIM	Data Center Infrastructure Management, konesalin infrastruktuurin energiatehokkuus
DCeP	Data Center energy Productivity, konesalin energiantuottavuus
DCP	Data Center Productivity, konesalin tuottavuus
DCSE	Data Center Space Efficiency, konesalin tilantehokkuus
CMC PU	Computer Multi Control Processing Unit
CRAC	Computer Room Air Conditioning
EOC	Environmentally Opportunistic Computing
ERE	Energy Reuse Effectiveness, energian uudellenkäytön tehokkuus
ETSI	European Telecommunication Standards Institute

HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
HSU	Horizontal Space Utilization, horisontaalinen tilan käyttö
HUS	Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiiri
ISO	International Organization for Standardization
ITU-T	Telecommunication Standardization Sector
Konesali	Data Center
LCP	Liquid Cooling Package, rivijäähdytin
Modbus	Communications protocol originally published by Modicon
ODC	On-Demand Cooling
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
Power Density	Tehotiheys
pPUE	Partial Power Usage Effectiveness, osittainen energiankäytön tehokkuus
PDU	Power Distribution Unit, virranjakeluyksikkö
PIQ	Power IQ
PoE	Power over Ethernet
PSM	Power System Module
PUE	Power Usage Effectiveness, energiankäytön tehokkuus
RACNet	Reliable ACquisition Network for High-Fidelity Data Center
RDHx	Rear Door Heat Exchanger
RiZone	Rittal Zone, sovellus
SCOM	Microsoft System Center Operations Manager
SFS ry	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
SNMP	Simple Network Management Protocol
SPEC	Standard Performance Evaluation Corporation
U, Unit	IT-laitteiden korkeus, U on 4,45 cm
UPS	Uninterruptible Power System
TGG	The Green Grid -konsortio
VSU	Vertical Space Utilization, vertikaalinen tilan käyttö
WSN	Wireless Sensor Network
WUE	Water Usage Effectiveness, vedenkäytön tehokkuus

Sisältö

Sanasto	i
1 Johdanto	1
2 Konesalien energiatehokkuus	3
2.1 Energiatehokkuus konesaleissa	4
2.2 Konesali IT-laitetilana	5
2.3 Talotekniikka konesalissa	7
2.3.1 Konesalin virranjakelu	8
2.3.2 LVI-tekniikka ja konesalin jäähdytysjärjestelmä	9
2.4 Energiankulutustietojen kerääminen	13
2.5 Standardointi ja tehokkuusmittarit konesalitoiminnassa	14
2.5.1 Infrastruktuurin tehokkuusmittarit	17
2.5.2 Tilan tehokkuusmittarit	21
2.5.3 Tuottavuusmittarit	24
3 Konesalien energiankulutus ja energian mittaaminen konesaleissa	26
3.1 Energiatehokkuus tutkimusten näkökulmasta	27
3.2 Mittauslaitteistoja	30
3.3 Rittalin CMC III- valvontajärjestelmä	36
3.3.1 RiZone-ohjelmisto moduulit	39
3.3.2 RiZone arviointityökaluna	40
4 Kohdetutkimus	42
4.1 HUS:n konesalin talotekniikka	43
4.2 HUS:n konesalitila IT:n näkökulmasta	44
4.2.1 Rittalin mittauslaitteisto ja asennetut sensorit	45
4.3 Tutkimusongelma ja tavoitteet	47
4.4 Tutkimusmenetelmä ja käytettävä mittaristo	48

5	Tutkimustulokset kohdekonesalissa	50
5.1	Tulokset ja niiden analysointi	50
5.1.1	IT-tehon muutos	51
5.1.2	Tehotiheyden muutos	51
5.1.3	Vapaajähdytyksen merkitys tehonkulutukseen	53
5.1.4	Kokonaistehon muutoksen vaikutus energiankulutukseen . .	55
5.1.5	Muutosten vaikutus mittareihin	56
5.2	Suosituksia konesalin energiankulutuksen vähentämiseksi	58
6	Yhteenveto	60
	Lähteet	62
	Liitteet	
A	Liite	

1 Johdanto

Viime vuosien aikana on kiinnitetty huomiota ICT-alan kasvuun. Konesalien IT-laitteet kuluttavat energiaa. Konesalien energiankulutuksen arvioitiin vuonna 2008 olevan 1,2 % [14] maailman kokonaisenergiankulutuksesta. Tällöin energiankulutuksen arvioitiin kasvavan vuositasolla 18 %. Vuonna 2012 konesalien energiankulutus oli jo 1,5 % [50] maailman kokonaisenergiankulutuksesta. Forest & Sullivanin tutkimuksen mukaan maapallon konesalit kuluttavat yhteensä 100 GWh energiaa. Konesalien energiankulutuksen odotetaan kasvavan 30 % vuonna 2016 [97].

Taloudelliset ja ympäristölähtöiset syyt ohjaavat myös tietotekniikan aiheuttamaa energiankulutusta [62]. Energiankulutus lisääntyy nopeammin kuin uusia energiavaroja saadaan käyttöön. Yli 20 vuotta vanhojen konesalien hyötysuhdetta on vaikea kasvattaa, etenkin jos niiden talotekniikka alkaa olla elinkaarensa päässä. Uudet IT-laitteet ovat tulleet entistä energiatehokkaammiksi ja näin ollen konesalin käyttöaste kasvaa. Nämä tekijät vaikuttavat konesalin energiankulutukseen.

Energian käyttö jakautuu konesalissa IT-laitteiden, virranjakelun ja jäähdytyksen kesken. Konesalin kokonaisenergiasta IT-laitteet kuluttavat 45 %, virranjakelu ja jäähdytys kuluttavat yhteensä 55 % [26]. Konesalien energiankulutukseen ei ole kiinnitetty huomiota. Vasta viimeisen kymmenen vuoden aikana konesalien energiankulutusta on tutkittu eri konesaliympäristöissä.

Tutkielman tutkimusongelma on seuraava: Miten konesalin energiatehokkuus voidaan arvioida. Tutkimusongelman voi jakaa neljään osakysymykseen:

- Mitkä tekijät vaikuttavat konesalin energiatehokkuuteen?
- Mitkä ovat konesalin energiatehokkuutta kuvaavat mittarit?
- Miten energiatehokkuutta voidaan mitata?
- Miten jatkuvia mittauksia hyödyntämällä voidaan parantaa konesalin energiatehokkuutta?

Pro gradu -tutkielma koostuu käsitteellis-teoreettisesta osasta, jossa on hyödynnetty kirjallisuutta ja julkaisusarjoissa ilmestyneitä artikkeleita, ja empiirisestä osasta, jossa tietoa sovelletaan kohdekonesalin energiatehokkuuden tutkimiseen. Työ

on kartoittava tutkimus ja sen avulla annetaan selitys, miksi konesalin energiatehokkuus muuttuu olosuhteiden muuttuessa.

Empiiristä tutkimusta varten HUS:n konesaliin asennettiin vuonna 2015 kaapelointi, anturit, laitteet ja Rizone-sovellus kulutustietojen mittaamista ja keräämistä varten. Mittaukset suoritettiin kahtena erillisenä mittausjaksona touko-kesäkuussa ja elo-syyskuussa vuonna 2015. Mittausjaksojen välissä asennettiin 25 palvelinlaitetta ja konesalin lämpötilaa nostettiin yhden asteen verran. Näiden muutosten vaikutus haluttiin nähdä mittaustuloksissa. Tutkimuksessa selvitettiin, mikä vaikutus konesalin energiankulutukseen oli IT-laitteiden lisäämisellä, lämpötilan nostamisella ja vapaajäähdytyksen käyttämisellä.

IT-laitteiden lisääminen, lämpötilan nostaminen ja vapaajäähdytyksen hyödyntäminen näkyivät mittaustuloksissa jälkimmäisellä mittausjaksolla. IT-laitteiden lisäämisen seurauksena IT-kuorma kasvoi noin 14 kW (13,9 kW). Tämän seurauksena IT-teho kasvoi noin 22 % jälkimmäisellä mittausjaksolla. Konesalin lämmön nosto vähensi jäähdytyksen tehontarvetta. Tulosten ja analyysin perusteella lämmön noston vähensi kokonaistehon tarvetta noin 8 %, vaikka tutkimusten perusteella sen oletettiin olevan 4 – 5 %. Vapaajäähdytyksen käyttö vähensi jäähdytyksen energiankulutusta, mutta siitä saatua hyötyä ei pystytä tulosten perusteella tarkasti erottelemaan. Tehtyjen muutosten vaikutuksesta konesalissa säästettiin noin 1 % (1,2 %) verran energiaa. Konesalin PUE- ja DCiE-mittareiden arvot paranivat tehtyjen muutosten vaikutuksesta. PUE-arvo parani 3,2:sta 2,6:een eli 0,6-yksikköä. DCiE-arvo parani 30 %:sta 38 %:iin eli 7 %-yksikköä toisella jaksolla. Konesalin olosuhteisiin tehdyt muutokset näkyivät selkeästi käyttönotetuissa mittareissa.

Tutkielma jäsentyy johdantoon ja viiteen päälukuun. Luku 2 käsittelee konesalien energiatehokkuutta ja energiatehokkuuteen liittyviä mittareita. Luku 3 esittelee tutkimusten näkökulmasta konesalien energiatehokkuutta ja tutustutaan konesaleissa käytettäviin mittauslaitteistoihin. Luvussa 4 esitellään tapaustutkimuksen kohdekonesali, tutkimusmenetelmä ja -tapa. Luvussa 5 esitellään tutkimuksen tuloksia ja tehdään päätelmiä tulosten perusteella. Tutkielma päättyy lukuun 6, jossa on työn yhteenveto.

2 Konesalien energiatehokkuus

Kestävä kehitys on osa konesalien energiatehokkuutta. ICT-alan tuottamat päästöt ovat merkittävät, koska lähes kaikki palvelut hyödyntävät toiminnassaan tietotekniikkaa. Konesalit kuluttavat energiaa, aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä ja käyttävät vettä jäähdyttämiseen [50]. Konesalista poistetut IT-laitteet ovat jätettä, ellei niitä voida kierrättää.

Energiatehokkuus tulee olemaan merkittävä kilpailutekijä konesalien rakentamisessa ja konesalitoimintojen käyttämisessä. Energiatehokkaissa konesaleissa päästöt ja energiankulutus ovat pienemmät kuin vanhoissa konesaleissa, joissa on käytössä vanhempaa teknologiaa. Energiatehokkaissa konesaleissa kustannukset ovat pienemmät ja päätöksenteon tukena hyödynnetään energiatehokkuusmittareita.

IT-organisaatio tekee strategisia päätöksiä toiminnan kasvattamisen, konesalin sijaintipaikan tai konesalipalvelujen ulkoistamisen kuin myös energiatehokkuuden perusteella. Konesalien tuottama lämpö jää useimmiten hyödyntämättä IT-organisaatiolta. The Green Grid (TGG) tutkii yhdessä lähes kahdensadan IT-alan yrityksen kanssa, millä keinoilla vähennetään ICT-alan energiankulutusta.

Energiatehokkuutta arvioitaessa mittaaminen ei ole pääasia, vaan mittausten odotetaan tuovan hyötyä. Yritys tavoittelee hyötyä johdolle tai pääasiassa omistajille ja asiakkaille [53]. Saatuja mittaustietoja hyödynnetään toiminnan kehittämiseen, mikä voi olla esimerkiksi tarpeettomien laitteiden poistaminen konesalista tai investointien tekemättä jättämistä. Mittaamisesta saatava hyöty voidaan todentaa kustannusten alenemisena. Saatu energiasäästö siirretään toiminnan kehittämiseen tai uusiin investointeihin.

Toiminnan jatkuva kehittäminen vaatii mittareiden käyttöönottamista ja hyödyntämistä, mutta myös uusien mittareiden määrittelyä. Mittarit ja sen tulokset toimivat osana konesalitoiminnan johtamista. Mittareiden tulee olla sellaiset, että ne ohjaavat koko toimintaketjua ja muutokset havaitaan mittareiden tuloksista.

Työ- ja elinkeinoministeriö on määritellyt energiapolitiikalle kolme lähtökohtaa: energia, talous ja ympäristö. Ministeriö toteaa, että energiatehokkuus ja päästöjen vähentämiseen liittyvä toiminta ei ohjaa ICT-alaa kovinkaan voimakkaasti. Liiketoiminnan kannalta energiatehokkuuteen panostaminen parantaa yrityksen julkista

kuvaa vihreiden arvojen ja kestävän kehityksen edistäjänä.

Euroopan komissio [29] listaa sivullaan muutamia hyväksytyjä standardeja, jotka liittyvät päästöjen rajoittamiseen ICT-toiminnoissa ja -yrityksissä. ITU-T L.1420 suositus määrittelee periaatteet, konseptit, vaatimukset ja metodit hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ICT-yrityksissä [78]. EU edellyttää, että laitevalmistajat kiinnittävät huomiota laitteiden, verkkojen ja palveluiden energiatehokkuuteen.

Ensimmäisessä alaluvussa 2.1 esitellään taustaa, mitä energiatehokkuus konesalissa tarkoittaa. Konesalitalan luokittelu ja konesaliin sijoitettavat laitteet esitellään alaluvussa 2.2. Alaluku 2.3 esittelee konesaliin liittyvää talotekniikkaa ja -automaatiota. Alaluku 2.4 käsittelee konesalin energiatietojen keräämistä ja syitä tietojen keräämiselle. Alaluvussa 2.5 esitellään konesalitoimintaan liittyvien standardien syntyä ja organisaatioita, jotka valmistelevat alalle toimintaohjeita. Alaluku esittelee myös konesalin energiatehokkuusmittareita, joita hyödynnetään kohdetutkimuksessa.

2.1 Energiatehokkuus konesaleissa

Energiatehokkuus tarkoittaa energiaa vaativien toimenpiteiden tekemistä vähemmällä energialla. Konesaleihin valitaan energiatehokkaita teknologioita ja ratkaisuja toimintojen ylläpitoon. Energiatehokkuuden lisääminen edellyttää yleensä investointeja, joiden kannattavuus on arvioitava saatavaan hyötyyn nähden. Investoinnissa onkin huomioitava laitteen hankinta- ja käyttökustannukset koko elinkaaren ajalta.

Energiatehokkuusmittareilla arvioidaan konesalin nykytila ja määritellään tavoitetila. Mittauksilla saavutetaan kolme päätavoitetta, jotka ovat jatkuva näkymä konesalin tehonkulutukseen, kustannus- ja energiatehokkuuteen. Tavoitteena voi olla myös vihreiden IT-arvojen (Green IT) toteuttaminen toiminnassa. Vihreillä arvoilla tarkoitetaan mm. hukkalämmön hyödyntämistä muussa toiminnassa tai uusiutuvien energiavarojen laajempaa käyttämistä [3]. Tavoitteena on toiminnan kustannusten ja hyötyjen mittaaminen, jotka aiheutuvat investoinneista, IT-laitteista, ylläpidosta ja operatiivisesta työstä [53].

Energiatehokkuudelle on useita määritelmiä ja niiden sisällöt poikkeavat hieman toisistaan. Energiapalveludirektiivi 2006/32/EY määrittelee energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet, jotka ovat todennettavissa, mitattavissa tai arvioitavissa [28]. Direktiivi velvoittaa mm. julkista sektoria huomioimaan investoinneissa ja

hankinnoissa energiatehokkuuteen liittyvät tekijät. Energiapalveludirektiivi määrittelee energiatehokkuuden seuraavalla tavalla [28]:

”Energiatehokkuus on suoritteen, palvelun, tavaran tai energian tuotoksen ja energiapanoksen välinen suhde.”

Liikenne- ja viestintäministeriö on julkaisut vuonna 2014 TIKO-Environmental Rating for Data Center -käsikirjan [38], jonka avulla IT-organisaatio voi auditoimalla tehostaa konesalitoimintaansa. Konesalien energiankulutukseen vaikutetaan minimoimalla luonnonvarojen käyttöä, hyödyntämällä uusiutuvia energiavaroja ja käyttämällä syntyneen lämmön hyväksi muussa toiminnassa. Käyttäjän näkökulmasta konesalien tehokkuus tarkoittaa sen kykyä tuottaa käyttäjille palveluita riittävästi ja oikeaan aikaan.

Konesalin energiankulutusta arvioitaessa konesalitoiminta jaetaan kahteen luokkaan: infrastruktuurin laitteisiin ja IT-laitteisiin. Konesalin kokonaisenergiankulutus huomioi kokonaisuudessaan konesaliin tuodun energiamäärän. IT-laitteen energiankulutus huomioi vain ja ainoastaan IT-laitteiden käyttämän energian. Näiden kahden energiakomponentin erotus muuttuu lämmöksi eli energiahävikiksi. Energiatehokkuuden parantaminen konesaleissa tarkoittaa kokonaisenergiankulutuksen vähentämistä.

Optimoimalla konesalin toimintoja energiankulutuksessa voi säästää jopa 40 – 50 % vuositasolla [56]. Eniten energiaa konesaleissa kuluu IT-laitteisiin ja niiden jäähdyttämiseen. Jäähdytyksen energiankulutuksen vähentämiseen on haettu ratkaisua konesalin sisälämpötilan nostamisella. Samalla korkeampi lämpötila lisää jonkin verran IT-laitteiden energiankulutusta.

2.2 Konesali IT-laitetilana

Konesali on ympäristönä suljettu tila, jonne pääsyä on rajoitettu erillisillä kulkuoikeuksilla. Tilana voi olla turvahuone tai källion sisään rakennettu turvallinen tila. Konesalilla tarkoitetaan IT-laitteiden ja niiden varalaitteiden sijoittamiseen tarkoitettua tilaa. IT-laitteisto puolestaan muodostuu palvelimista, tallennus- ja tietoliikennelaitteistoista. Konesalissa laitekaapit eli räkit sijoitetaan yleensä siten, että tilaan muodostuu palvelinkaappien muodostamia rivejä.

Konesalit luokitellaan viiteen luokkaan, joita ovat palvelinkomero, palvelinhuone, keskitetty, keskiluokan ja enterprise-luokan konesali. Konesalien luokittelu pe-

rustuu U.S. Environmental Protection Agency ENERGY STAR Program:n käyttämään luokitteluun [85]. Esitetty luokittelu huomioi konesalin kokoon ja palvelinlaitteiden lukumäärään. Luokittelu on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1: Konesaliluokittelu U.S. Environmental Protection Agency ENERGY STAR Program:n mukaisesti [85].

Tyyppi	Koko (m ²)	IT-laitteiden määrä	Tilan infrastruktuuri
Palvelinkomero	< 20	1 – 2 palvelinta, ei ulkoisia tallennuslaitteita	Ilmastointi samoin kuin toimistotiloissa.
Palvelinhuone	< 50	3 – 20 palvelinta, ei ulkoisia tallennuslaitteita	Ilmastointi samoin kuin toimistotiloissa.
Keskitetty konesali	< 100	21 – 100 palvelinta ja muutamia tallennuslaitteita	Ilmankierto järjestetty konesalin lattian alta tai vapaana jäähdytyksenä huonetilaan. Tilassa on muutama jäähdytyslaite.
Keskiluokan konesali	< 500	101 – 900 palvelinta, useita ulkoisia tallennuslaitteita	Jäähdytys on järjestetty konesalin lattian alta tai vapaana jäähdytyksenä huonetilaan tai vesikiertoisena jäähdytyksenä. Tilassa on muutama jäähdytyslaite.
Enterprise-luokan konesali	> 500	> 901 palvelinta, useita ulkoisia tallennuslaitteita	Jäähdytys hoidetaan energiatehokkailta järjestelmillä. Lähes kaikki järjestelmät ovat redundanttisia.

IT-laitteiden ja -järjestelmien hankinnasta vastaa yleensä IT-organisaatio. Laitetilaan sijoitetaan myös asiakkaan omia IT-laitekokonaisuuksia tai -rakkeja. Konesalin IT-laitteiden tehtävä on tuottaa sovellus-, tietoliikenne-, tallennus- ja varmistuspalvelua asiakkailleen. IT-yritys voi tarjota konesalipalvelua yhdelle tai useammalle asiakkaalle. Asiakkaiden käytössä voi olla jaettuja tai asiakkaittain kohdennettuja järjestelmiä.

Palvelin (server) [21] on laitealusta, jolla tarjotaan käyttäjille verkon resursseja. Sovellus- tai tallennuspalvelua tarjotaan käyttäjille yhdeltä laitteelta. Sen tarkoitus on tarjota palveluja kaikille samaan verkkoon liitetuille laitteille. Palvelin on fyysinen laite, joka tarjoaa tarvittavan laskentakapasiteetin.

Varmistamiseen tarkoitettu varmistusjärjestelmä muodostuu palvelimista ja levyjärjestelmistä [89]. Varmistusjärjestelmä voi olla nauharobotti, jossa tiedot varmistetaan nauhoille. Varmistusjärjestelmän tehtävä on varmistaa esim. sovelluspalvelinten tiedot, jolloin varmuuskopiosta voi palauttaa tiedot uudelleen käyttöön.

Levyjärjestelmä (storage) muodostuu kytkimistä, tallennusjärjestelmistä ja NAS-järjestelmästä (Network-Attached Storage). Laitteiston kytkimet kytkevät levyjärjestelmän eri komponentit yhdeksi järjestelmäksi. Käyttäjien tallentamat tiedot tal-

lennetaan tallennusjärjestelmän kiintolevyille. NAS-järjestelmän tehtävä on jakaa tiedostoja verkossa kaikkien resurssien käytettäväksi.

Tyypillisimpiä tietoliikenneverkon laitteita ovat toistimet, kytkimet, reitittimet ja langattomat tukiasemat. Tietoliikenteen aktiivilaitteiden tehtävänä on tiedonsiirto fyysisellä tasolla. Verkkoon kytkeytyneet laitteet hyödyntävät verkon välityksellä mm. konosalissa sijaitsevia sovelluspalvelimia. Tietoliikennelaitteet muodostavat yrityksen sisäisen ja ulkoisen viestintäverkon [86]. Konesalia palvelevat tietoliikennelaitteet sijaitsevat aina konosalissa omissa räkeissään. Puhelinkeskus sijoitetaan yleensä erilliseen teletilaan, mutta puhelinkeskuksen käyttöön liittyvät palvelimet sijoitetaan konesaliin.

2.3 Talotekniikka konosalissa

IT-laitteiden lisäksi konesaliin sijoitetaan talotekniikkaan kuuluvia järjestelmiä. Tilan toimivuuden kannalta ehdoton edellytys on, että talotekniikka on kunnossa [32]. Taloautomaatioon kuuluvien järjestelmien tehtävänä on pitää konesalin olosuhteet IT-laitteistoille sopivana ilmanvaihdon, lämpötilan ja kosteuden osalta. Lämpö- ja kosteusolosuhteita säädetään ja valvotaan automaatiojärjestelmillä. Konesalin jäähdytysjärjestelmän tehtävänä on kierrättää ja jäähdyttää ilmaa IT-laitteiden käyttöön.

Konesalin olosuhteet säädetään optimaalisiksi. Sopivan ilmankosteus estää staattisen sähkön muodostumisen. Näin ollen konesalin ilmaa kostutetaan tai kuivataan tarpeen mukaan. Sallitut raja-arvot ovat suhteellisen kosteuden osalta 10 – 90 %. Tyypillisesti konesalin suhteellinen kosteus on noin 45 %. Lämpötilan avulla vaikutetaan IT-laitteiden ja akustojen kestoikään. Konesalin lämpötilamaksimi on suositusten mukaan +27 °C [4].

Talotekniikanjärjestelmiin kytketään myös turvallisuuteen liittyvät laitteistot. Konesalitullassa on palonilmaisu- ja sammutusjärjestelmät sekä erilliset palo- ja savukaasun tunnistimet. Rakkien sisällä on palonilmaisua varten savukaasun tunnistavat anturit. Sammutusjärjestelmä on palvelinrakkikohtainen ja tulipalon sattuessa sammutuskaasu purkautuu automaattisesti. Sammutuskaasu alentaa ilman happipitoisuutta paloalueella ja estää palamisen [1]. Konesalitulat rakennetaan siten, että palokaasujen ja savun kulkeutuminen osastoista toiseen on estetty.

Laitetilan kulunvalvontajärjestelmä liitetään osaksi taloautomaationjärjestelmää. IT-laitetilan fyysisen turvallisuuden määrittelee aina konesalin omistava organisaatio. Valtionvarainministeriön VAHTI-ohjeistus [87] kuvaa, mitä toimenpiteitä ja val-

vontaa konesalitulojen turvallisuus edellyttää. Kulunvalvonta tulee järjestää siten, ettei konesaliin pääse kukaan saapumaan tai poistumaan ilman rekisteröintiä [87]. Konesalin luokitus (ks. taulukko 2.1) määrittelee konesalin suojaustason. Mitä suuremmasta palvelinkeskuksesta ja -laitemääristä on kyse, sitä tarkemmin valvonta suoritetaan ja varmistetaan. Hyvä suojaus estääkin asiattoman tunkeutumisen. Konesalit varustetaan aina myös erillisellä rikosilmoitusjärjestelmällä.

Taloautomaation ja -järjestelmien yllä- ja kunnossapito kuuluvat lähes poikkeuksetta kiinteistölle tai tilan omistavalle organisaatiolle. Talotekniikkaan liittyvät investoinnit ovat osana taloautomaatio- ja talotekniikan järjestelmien kehittämistä tai toiminnan yleistä parantamista. Talotekniikan järjestelmien ylläpito vaikuttaa aina kokonaisenergiankulutukseen. Investointipäätös perustuu julkisessa organisaatiossa hinta- ja laatutekijöihin riippumatta siitä, hankitaanko IT-laitteita tai taloautomaatioon kuuluvia järjestelmiä.

Talotekniikka ja siihen liittyvät järjestelmät vaikuttavat konesalin kokonaisenergiantehokkuuteen. Konesalin olosuhteet vaikuttavat laittilan energiatehokkuuteen. Talotekniikan osalta energiatehokkuutta voidaan arvioida, mikäli konesalissa mitataan talotekniikkaan kuuluvien laitteiden tehon, energian ja veden kulutusta. Kosteus- ja lämpötilamittaukset kuuluvat energiatehokkuuden arviointiin.

Alaluku 2.3.1 käsittelee konesalin virranjakelujärjestelmän ja virranjakelun kahdentamisen merkityksestä konesaliympäristössä. Alaluku 2.3.2 esittelee jäähdytyksen tehtävät, jäähdytysjärjestelmiä ja -ratkaisuja. Jäähdytystapa ja -menetelmä vaikuttavatkin oleellisesti siihen, miten tehokkaasti konesalitila jäähtyy.

2.3.1 Konesalin virranjakelu

Konesali tarvitsee sähköä talotekniikan- ja taloautomaation, IT-laitteiden sekä valaistuksen käyttöä varten. Konesalin virransaantiin ei saa tulla hallitsemattomia katkoksia. Tärkeimpien laitteiden ja järjestelmien kahdentaminen on tehtävä sähkökeskuksilta palvelinlaitteille saakka.

IT-laitteille tuleva sähkö on kahdennettu siten, että molemmat sähkölinjat syöttävät virtaa samanaikaisesti. Tällä tavalla rakennettuna konesalin sähkönsyöttö on redundanttinen, jossa on rinnakkaisia yksiköitä ($n + 1$) enemmän kuin käyttötarve vaatii. Yhden järjestelmän vikaantuminen ei vaaranna järjestelmän toimintaa [71].

Sähköjärjestelmä on 400 voltin vaihtovirralla toimiva laitteisto [25], jolla tuotetaan 230 voltin jännite kaikille konesalin sähkölaitteille. Konesalin virranjakelujärjestelmä koostuu virranjakeluyksiköistä, joista virta johdetaan jokaiselle laitekaapil-

le (räkille). Palvelimille virranjakelu järjestetään virranjakeluyksiköillä (PDU, Power Distribution Unit). Sähkökaapelointi sijaitsee pääsääntöisesti kaappien päällä tai vaihtoehtoisesti kaapelit voi sijoittaa myös korotetun lattian alle.

IT-laitetila varustetaan keskeytymättömällä virransyöttöjärjestelmällä (UPS, Uninterruptible Power Supply). Järjestelmän tehtävänä on sähkökatkon aikana tuottaa IT-laitteille tarvittava katkeamaton virta ennen kuin varsinaiset generaattorit lähtevät käyntiin. UPS-laite tuottaa virtaa vain muutamiksi minuuteiksi. Sitä ei ole siis tarkoitettu pitkäaikaiseksi varavoimajärjestelmäksi. UPS takaa tasaisen virransyötön syöttöjännitteen vaihteluissa ja sähkökatkoissa. UPS:n käyttö vähentää siis virtapiikkejä, joiden seurauksena voi olla IT-laitteiden hajoaminen. UPS-järjestelmä muodostuu yleensä useista tehoyksiköistä eli moduuleista.

Varavoimakoneet [35] ovat generaattorin ja dieselmoottorin yhdistelmiä. Niiden avulla turvataan sähkönsaanti silloin, kun valtakunnan sähkönsyöttö katkeaa. Dieselgeneraattoreilla tuotetaan sähkökatkon aikana kriittisten järjestelmien ja palvelujen, kuten konesalin, ylläpitämiseksi tarvittava sähkö.

Konesalin valaistus toteutetaan loisteputki- tai led-valaisimilla. Jos konesalissa ei työskennellä, niin valaistus on käytännössä pois päältä. Hätäpoistumistiet valaistaan aina määräysten mukaisesti. Konesalin valaistuksen järjestämiselle ei ole määräyksiä. Valaisimien tulee kestää konesalin kosteus- ja lämpöolosuhteet, mutta yleensä olosuhteet eivät aiheuta ongelmaa valaisimille.

2.3.2 LVI-tekniikka ja konesalin jäähdytysjärjestelmä

Lämmitys-, vesijohto- ja ilmastointilaitteisto (LVI-laitteisto) säätelee konesalin kosteus- ja lämpöolosuhteita. Konesalia ei tarvitse lämmittää, mutta konesali tarvitsee laitteiston, joka poistaa tilasta tehokkaasti lämmintä ilmaa [8]. Konesalin energiatehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi jäähdytyksen tehokkuus. Motivan julkaiseman Energiatehokas konesali -oppaan [56] mukaan jäähdytyksen osuus konesalin energiakuormasta on 23 %. Eri lähteiden mukaan konesalin jäähdytystarve on kokonaisenergiankulutuksesta 20 – 25 %. Konesalin jäähdytystarpeen määrää ilmasto ja IT-laitteista johtuva jäähdytyksen tarve. Konesalissa käytettävät jäähdytyslaitteet, menetelmät ja ratkaisut vaikuttavat jäähdytyksen tehokkuuteen.

Konesalin ilmastointilaitteella on kaksi päätehtävää, jotka ovat viileän ilman tuottaminen koko konesalitalaan ja IT-laitteiden tarvitseman jäähdytyskapasiteetin varmistaminen. Konesalien jäähdytyksen järjestämiseen on useita tapoja, jotka ovat riippuvaisia konesalin laitemääristä ja tilan koosta. Pienissä laitetiloissa jäähdytys-

tarve on vähäisempi verrattuna tiloihin, joissa on satoja tai tuhansia IT-laitteita. IT-laitteiden käyttämä energia muuttuu lämmöksi ja se on poistettava konesalista. Konesalin jäähdyttämiseen on useita laitteistoja, kuten

- ilmkäsittelykone,
- ilmastointilaite,
- ilmanvaihto-ilmastointijärjestelmä ja
- lämmönvaihtimet.

Ilmkäsittelykoneen (AHU, Air Handling Unit) tehtävä on säädellä ulkoa tulevan ilman lämpötilaa, ilmkiertoa ja kosteutta sekä suodattaa pienhiukkaset [63]. Yksinkertaisimmillaan jäähdytyksen voi järjestää ilmastointilaitteella (AC, Air Conditioner) [2], mutta tällainen laite ei ole kovin tehokas. Ilmastointilaite tuottaa tilaan viileää ilmaa. AHU- ja AC-laitteistoja käytettäessä mikään ei estä lämpimän ja kylmän ilman sekoittumista konesalitulassa.

Ilmkäsittelykonetta tehokkaampia laitteistoja ovat konesalin ilmastointilaite (CRAC, Computer Room Air Conditioning) [2] ja ilmanvaihto-ilmastointi-järjestelmä (HVAC, Heating, Ventilating and Air Conditioning) [17]. Jäähdytyslaitteet voi sijoittaa konesalin seinustoille tai keskelle huonetilaa. Tämän lisäksi jäähdytystä voi tehostaa kylmä-kuuma-käytävien avulla [22].

Palvelinkaapin takaoveen asennettavalla lämmönvaihtimella (RDHx, Rear Door Heat Exchanger) jäähdytetään yksittäistä rakkia [84]. Kaikki rakit on mahdollista varustaa RDHx:lla, mutta lisäksi kosteus ja lämpöolosuhteiden säätäminen on tehtävä esimerkiksi konesalin huonekohtaisella ilmastointi -järjestelmällä (CRAC, Computer Room Air Conditioner)[24] RDHx on siis passiivinen laite, eikä siinä ole rikkoutuvia puhaltimia tai osia, kuten esimerkiksi CRAC:ssa.

Jäähdytyksen näkökulmasta katsottuna mahdollisia jäähdytysratkaisuja ovat huone-, käytävä- tai räkkiratkaisut [24]. Huonekohtaisessa jäähdytyksessä koko tilaa jäähdytetään puhaltamalla viileää ilmaa palvelinsaliin. Rivijääjäähdytyksessä viileä ilma puhalletaan räkkirivien väliin. Rakkikohtaisissa ratkaisuissa jäähdytinlaite on integroitu osaksi palvelinrakkia.

Käytettäessä huone-, käytävä- tai räkkiratkaisua jäähdytyksessä jäähdytysjärjestelmän kapasiteetin tulee olla riittävä ja mahdollisuuksien mukaan myös laajennettavissa. Jäähdytys saadaan toimimaan tehokkaammin, mikäli lämpimän ilman sekoittuminen estetään. IT-laitekuorman aiheuttama jäähdytystarve on voitava ohjata

sinne, missä sitä eniten tarvitaan [22]. Tavoiteltu jäähdytyksen tehokkuus riippuu jäähdytystarpeesta ja valitusta tavasta. Konesalin jäähdytys voidaan toteuttaa useilla menetelmillä, joita ovat:

- vapaakiertoinen,
- kylmä-kuumakäytävä,
- kohdennettu,
- suljettu,
- rakkikohtainen ja
- nestekiertoinen jäähdytys.

Vapaakiertoinen (flooding) ilmajäähdytys tarkoittaa ilman vapaata virtaamista palvelinräkeille. Jäähdytys toteutetaan silloin huonekohtaisena jäähdytyksenä. IT-laitteet hyödyntävät vapaasti kiertävää ilmaa jäähdytykseen imemällä viileää ilmaa IT-laitteen sisään. Tuuletin puhaltaa lämmenneen ilman ulos palvelimen takaa, mistä ilma virtaa takaisin jäähdytinlaitteelle jäähdytettäväksi. Vapaakiertoisen jäähdytyslaitte sijoitetaan yleensä konesalin seinustalle.

Vapaakiertoisen jäähdytyksen tehokkuus riippuu siitä, miten paljon lämpimät ja kylmät ilmavirrat sekoittuvat toisiinsa. Vapaakiertoisella jäähdytyksellä toteutetussa konesalissa saattaa esiintyä myös kohtia, joihin muodostuu ns. kuumia pisteitä (hot-spot). Neil Rasmussenin mukaan tällä tavoin saavutetaan noin 3 kW:n jäähdytysteho laitekaappia kohti [66]. Pienten konesalitulojen kohdalla tämä onkin edullinen jäähdytysratkaisu.

Kylmä-kuumakäytäväratkaisu tarkoittaa jäähdytetyn ilman tuomista räkkien etupuolelle palvelimien käytettäväksi. Ilmavirran ohjaaminen räkkien eteen on tehokkaampaa kylmä-kuumakäytäväratkaisussa kuin kohdennetussa jäähdytyksessä. Tässä ratkaisussa kylmät ja kuumat ilmamassat eivät sekoitu toisiinsa [24]. Energiankulutuksen kannalta jäähdytys on tehokkaampaa kuin vapaakiertoisessa jäähdytyksessä. Käytäväratkaisua käytetään yleensä suurissa konesaliympäristöissä.

Kohdennettu (targeted) [66] jäähdytys tarjoaa konesaliin viileää ilmaa määrättyyn paikkaan, josta se ohjautuu IT-laitteiden käytettäväksi. Jäähdytysratkaisuna käytetään räkkiratkaisua. Kohdennettu jäähdytysyksikkö on IT-laitteiden kanssa samassa rivissä. Jäähdytys toimii parhaiten maksimissaan 3 metrin etäisyydellä

jäähdytettävästä kohteesta. Kohdennettu jäähdytys sopii pieniin ja keskisuuriin konesaleihin, joissa IT-kuorma vaihtelee laitekaappien ja -rivien välillä. Rasmussenin mukaan ratkaisu on toimiva, kun keskimääräisen jäähdytystehon tarve on noin 8 kW laitekaappia kohti [66]. Jäähdytysratkaisuna voidaan silloin käyttää käytävä- tai räkkiratkaisua.

Suljetuksi (contained) ilmankierroksi [66] rakennettu järjestelmä estää täysin ilmamassojen sekoittumisen. Järjestelmä on tehokkaampi kuin vapaakiertoinen tai kohdennettu järjestelmä. Konesalin suljetun ilmakierron järjestäminen edellyttää tilan varustamista siten, etteivät IT-laitteille tuleva ja lähtevä ilma sekoitu keskenään. Laitetilassa lämmin ilmapirta ohjautuu ilmastointiputkia tai katon rakenteita pitkin jäähdytyslaitteelle. Suljettu kierto on tehokas ja se jäähdyttää IT-laitetilaa tasaisesti, eikä kuumia pisteitä (hot-spots) muodostu. Rasmussenin mukaan tällaisella menetelmällä saavutetaan jopa 30 kW:n jäähdytysteho laitekaappia kohti [66]. Uusien konesalien jäähdytyksessä suositaankin suljettuja järjestelmiä niiden hyvän jäähdytystehon vuoksi. Käytävä- tai räkkiratkaisumenetelmää käytettäessä saadaan jäähdytys rakennettua suljettuna ilmakiertona.

Räkkikohtainen jäähdytys on suljettu ilmankiertojärjestelmä. IT-kuorman suuruus määrää jäähdytystarpeen räkeissä. Jäähdytysjärjestelmä optimoi vedenvirtauksen määrän tuloilman lämpötilan mukaan. Räkkikohtainen jäähdytys voi tarjota jopa 50 kW jäähdytystehon yksittäiselle räkille [24]. Palvelinlaitteet saavat viileän ilman räkissä olevan jäähdytyslaitteen kautta. Räkkit on varustettava aina umpinaisilla etu- ja takaovilla, jolloin konesalitullassa oleva ilma ei kulkeudu räkin sisään.

Nestekiertoisena toteutettu jäähdytys on myös konesaleissa yleisesti käytetty jäähdytysmuoto. Nestejäähdytyksen rinnalla voi olla lisäksi vapaakiertoinen tai kohdennettu jäähdytys. Näitä jäähdytystapoja käytetään etenkin vanhemmissa konesaleissa, joissa jäähdytystarvetta on lisätty toiminnan laajennuttua. Nestejäähdytyksessä konesaliin pitää rakentaa putkisto, joka kierrättää jäähdytysveden IT-laitekaapeille. Laitekaappien etu- ja takaovet ovat umpinaisia, koska jäähdytysilma kiertää laitekaappien sisällä. Konesalin muun ilmantilan jäähdytys, ilmanvaihto ja kosteus ovat esimerkiksi vapaan ilmakierron varassa. Nestejäähdytyksen hyötysuhde on parempi kuin ilmajäähdytyksen. Jäähdytysteho saadaan kohdistettua niihin IT-kaappeihin, joissa on eniten lämpökuormaa.

2.4 Energiankulutustietojen kerääminen

Energiankulutustietojen keräämiseen on yleensä jokin syy. Yrityksellä voi olla tarve kehittää toimintaansa ja lisätä tehokkuutta. Näillä toimenpiteillä vaikutetaan yrityksen tulokseen. Energiankulutusmittausten avulla selvitetään kyseisen toiminnon nykytilaa. Toimintaan käytetty käyttömeno tai investointi näkyy talousraporteilla, mutta se ei kuitenkaan auta ymmärtämään, miten toimintaa pitäisi muuttaa. Toimintaan käytetty raha ei mittaa tuloksellisuutta eikä palvelun laatua.

Miten mitataan investoinnilla saatu arvo konesalitoiminnassa? Konesalitoiminnassa investoinnit ja ylläpitokustannukset jakautuvat yleensä kiinteistö- ja IT-organisaation kesken eikä organisaatioilla ole investointia tehdessä yhteistä tavoitetta. Mittausten lähtökohtana onkin yleensä toiminnan kannattavuuden arviointi ja parantaminen. Eri aloille on olemassa vakiintuneita tapoja suorittaa mittauksia [46]. Tärkeää on tunnistaa, että mittaamiseen liittyy tavoite, joka voi olla esimerkiksi palveluiden saatavuus ja laatu tai toiminnan kehittäminen. Yrityksen on tiedettävä, mitä tietoa mittaamisella saa ja mihin tarkoitukseen saatu tieto soveltuu.

Mittaustietojen keräämisen voi tehdä kahdella tavalla, joita ovat manuaalinen tai automaattinen kerääminen. Manuaalinen tietojen kerääminen tapahtuu laitteiden ja sähkökeskusten näytöiltä. Automaattinen tietojen keräys edellyttää tätä tarkoitusta varten rakennettua laitteistoa ja ohjelmiston käyttöä. Talotekniikan järjestelmien mittaustiedot ovat omissa järjestelmissään, joita hallitsee yleensä kiinteistön omistaja. IT-laitteiden ja UPS:ien energiankulutustiedot saadaan eri järjestelmästä kuin taloautomaatiojärjestelmien tiedot. Tässä työssä esitellään automaattisesti toimivia energiatietojen keräysjärjestelmiä.

Mittausjärjestelyjä suunniteltaessa on huomioitava, kuinka usein mittaustietoa halutaan saada. Energiankulutustietoja kerätessä on huomioitava, miten tietoja on tarkoitus analysoida ja hyödyntää. Mittauksia voi tehdä kertaluontoisena tai jatkuvana mittauksena. Kertaluontoinen mittaus ja siitä tehtävä analyysi ei vaadi mitalaitteiston tai ohjelmistojen asennusta. Jatkuva mittaaminen vaatii enemmän suunnittelua ja ohjelmistojen sekä mahdollisten laitteiden ja antureiden asentamista.

Automaattisella ja jatkuvalla mittauksella saavutetaan suurin hyöty. Jatkuvan mittauksen etuna on se, että sen avulla on tunnistettavissa konesalista sellaiset IT-laitteet, joita ei käytetä enää liiketoiminnassa. Mittaussovellus voidaan asettaa mittaamaan määritellyllä syklillä, joka voi olla sekunteja tai minuutteja. Operatiivisen toiminnan seuraamista varten tiedot pitää olla saatavilla reaaliaikaisesti ja syklin on oltava lyhyt. Energiankulutustietoja mitattaessa syklin voi asettaa pidemmäksi

[69].

Mittareiden laskemista varten on tiedettävä, mistä tiedot saadaan kerättyä tai mitkä järjestelmät tuottavat tiedot mittareiden laskemista varten. Jos jokin mittarin komponentti puuttuu, niin mittarille ei saada tulosta. Tiedot jaetaan kahteen ryhmään sen perusteella, kerätäänkö tiedot talotekniikan vai IT-laitteiden kulutustiedoista.

Konesalin kokonaisenergiankulutus saadaan konesaliin syöttävästä sähköpääkeskuksesta tai UPS-laitteilta. Tietojen kokoamista helpottaa se, että taloautomaatiojärjestelmät keräävät kulutustietoja automaattisesti [15]. IT-laitteiden energiakulutustieto kerätään tarkoitusta varten rakennetuilta mittauspisteiltä esimerkiksi palvelinten virranjakeluyksiköiltä (PDU). Jos jokaisen laitteen kulutustiedot ovat mitattavissa erikseen, laitteiden tehokkuus tilastoidaan laitekohtaisesti.

Palvelinlaittevalmistajien tuottamat sovellukset sopivat hyvin mittaustietojen automaattisen keräämiseen. Mittauslaite on fyysinen laite tai anturi, joka lähettää tarvittavat tiedot sovellukselle. Antureita varten rakennetaan kaapelointi, jonka rakentaminen tuo mittaamiseen hieman lisäkustannuksia. Yksinkertaisen ja edullisen mittausverkon voi rakentaa myös sensoriverkon komponenteilla [52]. Mittausanturit hyödyntävät tällöin langattomia verkkoja [70].

Palvelinlaitetoimittajat ovat aktiivisesti kehittäneet sovelluksia palvelinalustojen energiankulutustietojen mittaamiseen. Cisco tarjoaa mittaussovellukseksi Cisco Energy Management Suite -pakettia [19]. Rittalin vastaava tuote on RiZone-sovellus energiankulutustietojen keräämiseen ja katseluun [37]. CoolEmAll tarjoaa kulutustietojen keräämisen ja analysoinnin lisäksi myös päätöksentekotyökaluja [91]. Tässä on mainittu vain muutama esimerkki sovelluksista. Useimmat järjestelmät mahdollistavat myös erilaisten raporttien laatimisen ja tietojen vertailun niin reaaliaikaisesti kuin pitkälläkin aikavälillä.

2.5 Standardointi ja tehokkuusmittarit konesalitoiminnassa

Konesalitoimintaa ohjaa taloudelliset ja tekniset reunaehdot sekä yrityksen määrittelemä strategia. Tämän lisäksi toiminnassa hyödynnetään hyväksi todettuja käytäntöjä (best practices), standardeja ja mittareita. Näiden avulla konesalitoimija havaitsee muutosten vaikutukset. Jokaisella taholla on ollut tarve määritellä mittarit omista lähtökohdista. Tässä luvussa esitellään muutamia konesalitoimintaan liittyviä standardisointia ja mittareita valmistelevia organisaatioita. Useat eri tahot ovat

olleet mukana kehittämässä energiatehokkuuden mittareita ja heillä on ollut toistaan poikkeavia näkemyksiä konosalitoimintaan soveltuvista mittarista.

Mittarien käyttöönotto auttaa organisaatiota päätöksenteossa, jotka liittyvät konosalien investointeihin ja käyttömenojen hallintaan. Strategisten päätösten tekeminen helpottuu, kun toimintaa on analysoitu ja käytössä on luotettavia mittareita. [60] Yritys pystyy toiminnan muuttuessa havaitsemaan muutokset myös energiatehokkuusmittareissa. Mittareissa huomioidaan myös hukkalämmön talteenotto ja uusiutuvien energiavarojen käyttö [80]. Nämä voivat olla tulevaisuudessa yrityksen kilpailutekijöitä konesalimarkkinoilla.

Standardisoinnilla luodaan ja laaditaan yhteiset ohjeet. Ne luovat myös yhteiset toimintatavat. Standardien tehtävä on myös poistaa erilaisia teknisiä esteitä. Standardit luokitellaan perus-, tuote-, menetelmä- ja palvelustandardeiksi. [77] Perustandardit määrittelevät mittayksiköt, käsitteet, tunnuksot ja merkit. Tällä varmistetaan, että standardia käyttävä tietää, miten luotua mittaria käytetään, ja mitä tarkoitusta varten se on määritelty. Standardisointi varmistaa, että tuotteet, palvelut ja menetelmät sopivat käyttötarkoituksiinsa huomioon ottaen käyttöolosuhteet. Eri maissa tuotettujen järjestelmien yhteensopivuuteen liittyvät vaatimukset huomioidaan standardeissa.

IT-alan tekniset työryhmät julkaisevat standardeja ja teknisiä raportteja konosalitoiminnan energiatehokkuuden parantamiseksi. Voittoa tavoittelemattoman yhteisöjen tehtävä on ollut tuottaa yhtenäiset mittaus- ja laskentatavat ICT-toimijoille [43]. Mittareita käytettäessä toiminnasta saadaan luotettavaa tietoa. Tiedot ovat vertailukelpoisia käytettäessä samoja laskumenetelmiä tai standardeja. Mittareiden käyttöönotto helpottaa konesalin toimintaympäristön hallittavuutta ja konosalitoimintojen vertailua.

Konesalin energiatehokkuuteen vaikuttaa myös talotekniikan ja -automaation energiatehokkuus. IT-laitteiden tuottama lämpö vaatii talotekniikkaan kuuluvalta jäähdytysjärjestelmältä riittävää kapasiteettia. Mittareita käytettäessä ja tuloksia tulkittaessa on huomioitava, ettei pelkästään IT-laitteiden tehostaminen riitä, vaan tehostamista on tehtävä myös talotekniikan osalta. Mittareita kehittäneet tahot näkevät konesalin kokonaisuutena. Konesalin käyttäjä eli IT-organisaatio kehittää omaa toimintaansa huomioimatta talotekniikkaan liittyvää kehitystarvetta. Konesalitoiminnan tehokkuutta mittaavat mittarit on kehitetty siten, että konesali on yksi kokonaisuus. [79].

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning En-

gineers) perustettiin vuonna 1894 [7]. ASHRAE:n tehtävä on edistää maailmanlaajuisesti ihmisten hyvinvointia kestävä teknologian ja rakennetun ympäristön osalta [7]. ASHRAE valmistelee standardeja eri toimialoille oman jäsenistönsä käyttöön. Konesalin lämpötilan ja kosteuden osalta on olemassa ASHRAE:n laatimat suositukset. Suositus ohjaa muuttamaan konesalin olosuhteita ja parantamaan konesalin energiatehokkuutta.

ISO (International Organization for Standardization) [43] on perustettu vuonna 1947. ISO on maailmanlaajuinen, itsenäinen ja valtioista riippumaton järjestö. ISO:n tavoite on yhdenmukaistaa standardien avulla maailman laajuisesti tuotteita, palveluita ja järjestelmiä [43]. ISO:n standardit kattavat myös laadun, turvallisuuden ja tehokkuuden. ISO-organisaatio vastaa ISO 9000, ISO 14000, ISO 22000, ISO 27000 ja monista muista kansainvälisistä hallintastandardeista. Konesalien energiatehokkuuden arviointia varten on useita valmisteilla olevia standardeja. ISO/IEC JTC 1/SC 39 Sustainability for and by Information Technology -tekninen komitea vastaa konesalistandardien valmistelusta [44].

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry varmistaa, että Suomeen on luotu riittävä standardikokoelma. SFS:n IT-standardisointiryhmät seuraavat ja toimivat osana ISO:n standardisoinnin ryhmiä. SFS ry varmistaa standardien sopivuuden Suomeen ja Suomen olosuhteisiin seuraamalla ISO:n valmistelutyötä tai osallistumalla itse työryhmiin. SFS ry osallistuu mm. konesalistandardien valmisteluun.

Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC) [74] on perustettu vuonna 1988. SPEC:n toiminta perustuu avoimuuteen ja laiteriippumattomaan tietojen julkaisuun. SPEC:n tavoitteena on tarjota kaikille käyttäjille IT-laitteiden vertailutietoja. SPEC on standardisoinut mm. IT-laitteiden suorituskykymittauksia, jolloin eri laitevalmistajien IT-laitteiden vertailu on esimerkiksi tehotietojen osalta on mahdollista [74].

The Green Grid (TGG) on toiminut vuodesta 2006 ja sen toiminta on avointa kaikille käyttäjille. TGG:n tavoite on ollut luoda IT-organisaatiolle mittareita, joilla organisaatio voi arvioida konesalitoiminnan energiatehokkuutta. TGG:n tavoittelee mittareiden kehittämisen avulla operatiivisen toiminnan mittaamista ja parantamista [88].

Standardien ohella käytössä tulee olemaan vielä pitkään useiden toimijoiden hyväksi havaittuja käytäntöjä (best practices) esimerkiksi energiatehokkuuden parantamiseen. IT-alalla on ja tulee jatkossakin olemaan erilaisia suosituksia. IT-laitteiden toimintaympäristölle on määritelty esimerkiksi suosituslämpötilat [75], mutta niitä

ei ole ollut tarvetta standardoida.

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tarkemmin konesalitoimintaan liittyviä tehokkuusmittareita. Alaluvuissa 2.5.1 esitellään IT-laitteita ja talotekniikkaa koskevia mittareita. Alaluvussa 2.5.2 käsitellään mittareita, joilla arvioidaan konesalin tehotehokkuutta. Viimeisessä alaluvussa 2.5.3 esitellään muutamia konesaliympäristössä käytettäviä tuottavuusmittareita.

2.5.1 Infrastruktuurin tehokkuusmittarit

Infrastruktuurin tehokkuusmittareita käytetään konesalin kokonaistehokkuuden arviointiin. Infrastruktuurimittareihin on koottu ne mittarit, joiden yhteinen nimittäjä on IT-laitteen energiankulutus. Näiden mittareiden avulla arvioidaan konesalin käytön aikaista tehokkuutta. Infrastruktuurin mittarit eivät anna tietoa laitteiden valmistamisen tai hävittämisen kuluva energiasta.

Infrastruktuurin tehokkuusmittareiksi sanotaan energiankäytön (Power Usage Effectiveness), talotekniikan (Data Center infrastructure Effectiveness), vedenkäytön (Water Usage Effectiveness), osittaisen energiankäytön (Partial Power Usage Effectiveness) ja energian uudelleenkäytön (Energy Reuse Effectiveness) tehokkuusmittareita. Edellä esitellyt PUE-johdannaiset infrastruktuurimittarit ovat TGG:n kehittämiä.

PUE-arvon laskemiseksi on tiedettävä konesalin kokonaisenergia ja IT-laite-energia [8]. PUE mittaa kokonaisenergian ja IT-laitteiden energiankulutuksen suhdetta. PUE:n kaava [9] on

$$PUE = \frac{E_{Total}}{E_{IT}}. \quad (2.1)$$

Kaavassa E_{Total} (Total IT annual Energy) kuvaa konesalin kokonaisenergiankulutusta vuodessa. E_{IT} (Total IT annual Energy) kuvaa IT-laitteiden kuluttamaa energiamäärää vuodessa. Ideaalitapauksessa PUE:n arvo on 1,0.

PUE-arvon laskennassa voi käyttää nimellistehoa tai todellista tehoa. Paremmen tuloksen konesalin energiatehokkuudesta saa, kun käyttää todellisia tehonkulutuksen arvoja. PUE-kaavassa huomioidaan kaikkien IT-laitteiden energia (kWh), joka muodostuu palvelimista, levyjärjestelmistä ja verkon laitteista. Konesalin kokonaisteho muodostuu IT-laitteiden hyödyntämisestä virranjakelukomponenteista, jäähdytys- ja UPS-järjestelmistä sekä valaistuksesta konesalissa. Kokonaisenergiaan on laskettava mukaan myös IT-laitteiden energiankulutus.

PUE-arvo kuvaa, kuinka hyvin konesalin kokonaisenergia on hyödynnettävissä konesalin IT-laitteilla PUE-arvo muuttuu aina, jos IT-laitteissa tai taloautomaatiossa tapahtuu muutoksia [8]. Mittaria käytetään ohjaamaan päätöksentekoa esimerkiksi IT:n tai talotekniikan tehostamiseksi. Tietotekniikan osalta tämä tarkoittaa uusien teknologioiden käyttöönottoa. Talotekniikassa päätökset tarkoittavat ilmastointi- tai jäähdytysjärjestelmien uusimista, joilla parannetaan konesalin energiatehokkuutta. PUE-arvosta ei voida päätellä palvelinlaitteiden kuormituksen muuttumista.

The Green Gridin energiatehokkuustyöryhmä on määritellyt PUE:lle 3 luokkaa [8]. Periaatteet ovat minimissään seuraavat: konesalin kokonaisenergian mittaaminen, IT-laitteiden energiankulutus, UPS-laitteen ulostulon energian määrä ja erillisten laittilojen huomioiminen mittaamisessa. [80] Luokittelu on ollut välttämätöntä. PUE-arvoja voi vertailla keskenään, vain jos ne lasketaan samalla tavalla.

PUE-luokat eroavat toisistaan IT-laitteiden energian mittauksen ja mittausintervallin osalta. Energian kokonaiskulutus mitataan kaikissa luokissa konesalin virransyötön sisääntulosta, joka sisältää mm. IT:n virransyötön, jäähdytyksen ja valaistuksen. Ensimmäisenä on PUE-luokka 1 (L1), jossa IT-energia mitataan UPS-järjestelmän virran ulostulosta. Mittausvälinä käytetään joko viikkoa tai kuukautta. Toisena on PUE-luokka 2 (L2), jossa IT-laitteiden energiankulutus mitataan edellistä luokkaa tarkemmin. Mittaus tehdään PDU:n (Power Distribution Unit) ulostulosta. Mittausvälinä on tunti tai viikko. Viimeisenä on mittausten tarkimpaa tasoa edustava PUE-luokka 3 (L3), jossa mittausväli on vain 15 minuuttia. IT-laitteiden energiankulutus mitataan IT-laitteiden sisääntulosta. [8]

Talotekniikan suorituskyvyn tehokkuutta kuvaava Data Center infrastructure Efficiency, DCiE-arvo [88], perustuu PUE:n (kaava 2.1) käänteisarvoon. PUE kuvaa IT-laitteiston tehokkuutta ja DCiE-arvo ilmaisee konesalin talotekniikan suorituskykyä. Arvo kuvaa talotekniikassa tapahtuneet muutokset. DCiE-arvoa voi käyttää konesalien tehokkuuden vertailussa samalla tavalla kuten PUE-arvoakin. DCiE lasketaan kaavalla [88]

$$DCiE = \frac{1}{PUE} * 100 \%. \quad (2.2)$$

DCiE-arvo ilmaistaan yleensä prosentteina. DCiE:n ideaaliarvo on 100 %. Suuri DCiE-arvo tarkoittaa taloautomaation näkökulmasta tehokasta konesalia.

Konesalin vedenkulutus on yksi energiatehokkuuden arviointikriteeri. Tätä varten on kehitetty vedenkulutuksen tehokkuuden mittari WUE (Water Usage Effectiveness). Konesalin jäähdytys kuluttaa vettä, joten vedensaatavuus ja -kulutus on

huomioitava jo konesalin suunnittelussa. Konesalissa vettä kuluu ilman kosteuttamiseen, lämmön haihduttamiseen jäähdytystorneissa ja konesalin jäähdytysjärjestelmiin.

WUE määrittelee konesalissa kulutetun veden määrän litroissa (W_{Total}) IT:n kuluttamaan kokonaisenergiaan E_{IT} nähden. Sen yksiköksi saadaan l/kWh ja laskenta tehdään vuositasolla. WUE:n kaava on [58]

$$WUE = \frac{W_{Total}}{E_{IT}}. \quad (2.3)$$

WUE:n kaavassa W_{Total} (Annual water usage) tarkoittaa veden kulutusta ja E_{IT} (IT equipment energy) IT-laitteiden käyttämää energiaa vuodessa. WUE on vedenkulutuksen optimoinnin mittari, joka huomioi ilman kostutukseen ja jäähdytykseen kulutetun veden määrän konesalissa. Jos IT-kuorman aiheuttama energiamäärä vähenee, niin jäähdytykseen tarvittava vesimäärä vähenee [81]. Konesalin lämmön nostaminen näkyy myös WUE-arvossa. Jos konesalin lämpöä nostetaan, niin jäähdytystarvekin pienenee ja vedenkulutus vähenee. Tällöin WUE-arvokin pienenee. WUE:n ideaaliarvo on 0, joka osoittaa, ettei konesali kuluta vettä lainkaan. Mittaria käytetään ohjaamaan päätöksen tekoa esimerkiksi IT:n tai talotekniikan tehostamiseksi. Veden- ja energiankulutus riippuu siitä, miten konesalin jäähdytys on toteutettu.

Osittaisen energiatehokkuuden mittari pPUE (Partial Power Usage Effectiveness) [8] on johdettu myös PUE:sta (kaava 2.1 sivulla 17). Mittari on kehitetty konesaliympäristöön, jossa erillisillä IT-laitetiloilla on yhteisiä talotekniikan järjestelmiä. Osittaisen energiatehokkuuden määrittämistä voi käyttää PUE:n tapaan esimerkiksi konttikonesalin energiatehokkuuden määrittämiseen. Jos konesalitilan voi jakaa erillisiksi tiloiksi, voi osittaiset energiatehokkuusarvot laskea jokaiselle tilalle erikseen [47]. Tiloilla pitää olla erilliset IT-kuormat ja tilojen energiakuormien on oltava tiedossa.

Osittainen energiatehokkuus lasketaan tilan käyttämän energian pE (Total energy inside the boundary) ja IT-laitteiden suhteesta pE_{IT} (Total IT equipment energy inside the boundary) [8]. Kaava voidaan kirjoittaa muodossa [8]

$$pPUE = \frac{pE}{pE_{IT}}. \quad (2.4)$$

Osittaisen energiatehokkuuden laskeminen saattaa olla tarpeellista, jos IT-laitteet määrältään ja energiankulutukseltaan eri tiloissa eroavat toisistaan. Osittaisen ener-

giatehokkuuden laskeminen edesauttaa arvioimaan eri tilojen tehostamistarvetta tilakohtaisesti [8].

Konesalissa laitteiden käyttämä energia muuttuu lämmöksi. Lämpö on poistettava jäähdytysjärjestelmän avulla. Nettoenergiantehokkuuden arvo (NPUE, Net Power Usage Effectiveness) huomioi konesalissa muodostuvan hukkalämmön [56]. Yleensä hukkalämpö jää hyödyntämättä etenkin vanhoissa konesaleissa, koska se vaatii olemassa olevien talotekniikan järjestelmien uudistamista.

NPUE lasketaan saliin syötetyn ja salista poistuvan energian erotuksesta siten, että saatu erotus jaetaan palvelimien energiankulutuksella E_{IT} [56]. NPUE-arvoa kannattaa käyttää energiatehokkuuden arvioinnissa silloin, kun taloautomaatio ohjaa hukkalämmön hyötykäyttöön. Jos konesalissa hyödynnetään hukkalämpöä eli konesalista ulossyötetyn energian, NPUE-arvo kuvaa konesalin energiatehokkuutta paremmin kuin PUE-arvo.

Energian uudelleen käyttötehokkuuden mittari (ERE, Energy Reuse Effectiveness) [100] kuvaa konesalin hukkaenergian hyödyntämistä. Hukkaenergian hyödyntäminen parantaa konesalin energiatehokkuutta. Energian uudelleenkäyttökerroin (ERF, Energy Reuse Factor) avulla ilmaistaan se osa, mikä energiasta käytetään uudelleen konesalin ulkopuolella [47]. ERE lasketaan konesaliin syötetyn ja poistuvan energian erotuksesta siten, että erotus jaetaan, kuten edelläkin, IT-laitteiden käyttämällä energialla E_{IT} :lla.

ERE:n teoreettinen ideaaliarvo on 0 [47]. Tämä tarkoittaa, että kaikki konesalista poistettu hukkaenergia käytetään uudelleen. Jos ERE:n laskelmissa hyödynnetään ERF:a, se saadaan jakamalla uudelleen käytetyn energian määrä kokonaisenergian määrällä. ERE:n kaavan voi kirjoittaa myös PUE:n avulla muotoon [47]

$$ERE = \frac{E_{Total}}{E_{IT}} - \frac{E_{Reuse}}{E_{Total}} \cdot \frac{E_{Total}}{E_{IT}} = (1 - ERF) \cdot PUE. \quad (2.5)$$

ERF:n teoreettinen ideaaliarvo on 1,0, joka tarkoittaa hukkaenergian 100 % hyödyntämistä. Mikäli hukkaenergiaa ei hyödynnetä, ERF saa saman arvon kuin PUE.

Toiminnallisesti erilaiset konesalit voivat saada saman ERE-arvon, jolloin on perusteltua käyttää laskelmissa sekä PUE- että ERE-arvoa. Tällöin laskemissa näkyy, johtuuko konesalin tehokkuus esimerkiksi energian uudelleenkäytön tehokkuudesta johtuvista tekijöistä. Tulosten vertailun perusteella voi päätellä tehokkuuden tulle van joko IT:n energiatehokkuudesta tai hukkaenergian uudelleenkäytöstä [47].

Edellä esiteltyjen mittareiden avulla arvioidaan konesalin infrastruktuurin tehokkuutta. Infrastruktuurimittarit ovat skaalautuvia. Vaikka konesalin laitemäärä ja

energiankulutus kasvaisi, mittari on edelleen käyttökelpoinen. Infrastruktuurimittarit eivät ilmaise tietoja konesalin tuottavuudesta, eivätkä IT-laitteiden käyttöasteista. Konesalit tuottavat sivutuotteinaan jätevettä ja IT-romua. Infrastruktuurimittarit eivät mittaa, kuinka paljon jäteveden ja IT-romun käsittelystä aiheutuu energiakustannuksia.

Konesalitoiminnassakin esitetään hyödynnettäväksi uusiutuvia energiavaroja. Käyttökelpoisia uusiutuvia energiavaroja ovat tuuli-, vesi- tai aurinkoenergia. Jos näiden energiamuotojen käyttö halutaan mitata, niin energiamäärät on tilastoitava mittausten yhteydessä erikseen. Tulosten analyysissä uusiutuvien energiavarojen käyttö voidaan huomioida.

2.5.2 Tilan tehokkuusmittarit

Konesalin tehokkuutta voi arvioida tilan tehokkuusmittareilla. Tällaisia mittareita ovat tehotiheyden laskemiseen tarkoitettut kaavat. Tehotiheydellä tarkoitetaan konesalin ICT-laitteiden kokonaistehomäärää pinta-alayksikköä kohti. Tehotiheys ilmaiseekin tehon tarpeen pinta-alaa tai räkkiä kohti.

Tehotiheyden laskemiseksi on tiedettävä, kuinka monta laitetta ja räkkiä tilaan voi sijoittaa, ellei käytössä ole mittaustietoa tehon kulutuksesta. Rakkien koot ilmoitetaan yleensä tuumina. Palvelinrakin koko on leveydeltään noin 482 mm (19 tuumaa), syvyydeltään noin 914 – 1219 mm (36 – 48 tuumaa), ja korkeudeltaan noin 2000 mm (79 tuumaa). Palvelinlaitteiden korkeudet ilmaistaan U:n (Unit = 44,45 mm) yksikköinä, jolloin em. räkkiin mahtuu 42 kappaletta 1U:n laitteita.

Konesalit luokitellaan tehotiheyden mukaan neljään luokkaan. Taulukossa 2.2 esitellään Data Center Standards:n luokittelu [6], joka jakautuu rakkitehon mukaan matalaan, keskimääräiseen, korkeaan ja erittäin korkeaan tehotiheyteen. Konesalin tehotiheys on tyypillisesti 2 – 6 kW/m² [51]. Korkean kapasiteetin konesalissa tehotiheys voi olla 10 – 20 kW/m². Tällöin räkissä voi olla jopa 40 palvelinta. Tyypillisesti palvelimia on 10 – 20 kappaletta räkkiä kohti. Palvelinrakin tehotiheydeksi saadaan noin 6 kW/m², kun palvelimen keskimääräinen teho on noin 250 – 350 W [51]. Mitä suurempi tehotiheys on, sitä enemmän lämpöäkin on poistettava konesaleista [70].

Konesalin tehotiheyden (Power Density) voi esittää neljän eri määritelmän avulla kaavoina. Rasmussenin [65] esittämät tiheyden määritelmät ottavat huomioon IT-laitekaappien (rakkien) pituuden ja leveyden. Kapeammilla ja korkeammilla räkeillä saadaan konesalin tehotiheys suuremmaksi. Tehotiheys PD_M lasketaan kaavalla [65]

Taulukko 2.2: Konesalin tehottiheyden luokittelu Data Center Standards:n mukaan [6].

	$P/\text{r\u00e4kki}$
Matala (Low)	0 – 4 kW
Keskim\u00e4\u00e4r\u00e4inen (Medium)	5 – 8 kW
Korkea (High)	9 – 15 kW
Eritt\u00e4in korkea (Exterme)	> 16 kW

$$PD_M = \frac{P_{IT}}{A_R}, \quad (2.6)$$

jossa P_{IT} (Power consumption of IT) tarkoittaa IT-laitteiden tehoa r\u00e4kiss\u00e4 ja A_R (Area occupied by all IT rack enclosures) tarkoittaa IT-laitekaapin pohjapinta-alaa. T\u00e4ll\u00e4 tavoin laskettuna saadaan suurin tehottiheyden arvo, jota k\u00e4ytt\u00e4v\u00e4t p\u00e4\u00e4s\u00e4\u00e4nt\u00f6isesti IT-laitevalmistajat.

IT-organisaatio k\u00e4ytt\u00e4\u00e4 tehottiheyden laskemisessa pinta-alan m\u00e4\u00e4rittely\u00e4, jossa huomioidaan r\u00e4kkien edess\u00e4 ja takana oleva vapaa tila [65]. Kun vapaa tila huomioidaan, tehottiheys PD_F , lasketaan kaavalla [65]

$$PD_F = \frac{P_{IT}}{A_R + A_F}, \quad (2.7)$$

jossa A_R (Area occupied by all IT rack enclosures) tarkoittaa IT-laitekaapin ja A_F (Area occupied by all IT rack clearances) vapaan lattian pinta-alaa. T\u00e4ss\u00e4 kaavassa huomioidaan IT-laitekaapin eteen ja taakse j\u00e4\u00e4v\u00e4 m\u00e4\u00e4r\u00e4tyn suuruinen ty\u00f6skentely-alue.

Konesalien suunnittelussa tehottiheys m\u00e4\u00e4ritell\u00e4\u00e4n koko konesalin pinta-alan perusteella. T\u00e4ll\u00f6in k\u00e4ytetty tehottiheyden PD_{Arc} -arvo lasketaan seuraavasti [65]

$$PD_{Arc} = \frac{P_{IT}}{A_{DC}}, \quad (2.8)$$

jossa A_{DC} (Total Data Center floor space) tarkoittaa konesalin koko lattiapinta-alaa. Suunnittelussa on huomioitava konesalin IT-laitteiden m\u00e4\u00e4r\u00e4, kokonaistehon ja j\u00e4\u00e4hdytyksen tarve, koska laitekapasiteetti m\u00e4\u00e4r\u00e4\u00e4 konesalin j\u00e4\u00e4hdytys- ja tehontarpeen.

Tilan k\u00e4ytett\u00e4vyytt\u00e4 ja laitteistojen m\u00e4\u00e4r\u00e4n huomioimista konesalitulassa m\u00e4\u00e4ritell\u00e4\u00e4n tehottiheyden PD_U [65] kaava muotoon

$$PD_U = \frac{P_{IT} + P_{Power} + P_{Cool}}{A_{DC}}, \quad (2.9)$$

jossa P_{IT} (Total power consumption of IT equipment) tarkoittaa IT-laitteiden käyttämää tehoa, P_{Power} (Total power consumption of power equipment) muiden sähköjärjestelmien tehoa ja P_{Cool} jäähdytysjärjestelmien käyttämää tehoa.

Räkkikohtaista laskentaa käytetään silloin, kun arvioidaan konesalin kokonaistehon tarvetta. Laskentatapa yksinkertaistaa tehotarpeen määrittelyn konesalissa. Räkkikohtainen tehonkulutus P_R [65] (Power consumption of the rack) lasketaan kaavalla

$$P_{Rack} = \frac{P_{Total}}{R_Q}, \quad (2.10)$$

jossa P_{Total} tarkoittaa konesalin kokonaistehonkulutusta ja R_Q (Quantity of racks) tarkoittaa räkkien lukumäärää konesalissa. P_{Rack} -kaavaa käytetään, kun arvioidaan esim. uusien konesalitilojen jäähdytystarvetta. Kaavojen 2.6 – 2.9 tulokset ilmoitetaan watteina tai kilowatteina neliometriä kohti. Poikkeuksena on kaava 2.10, jonka tulos ilmoitetaan watteina tai kilowatteina räkkiä kohti.

Konesalista tuotetaan edellä esitellyillä kaavoilla erilaisia tehotiheyden arvoja. Arvojen laskemisen edellytys on, että IT-laitteiden kokonaistehontarve tai räkkien kuluttama teho on tiedossa. Tehotietojen perusteella lasketaan konesalin kokonaistehonkulutus. Yksittäisen rakin tehon tarpeen sallitaankin ylittyä, jos konesalin kokonaistehontarve pysyy mitoitetussa tehomäärässä.

Konesalin jäähdytys mitoitetaan tilan ja IT-laitteiden kokonaistehon mukaan. Jäähdytysjärjestelmä ja -menetelmä tulee olla kapasiteetiltaan sellainen, että räkkikohtainen jäähdytystehon vaihtelu tulee huomioitua. Tehotiheyden arvoja voi käyttää mm. konesalin jäähdytystehon arvioinnissa [47].

Tehotiheys voidaan laskea myös toisella tavalla. Tämä Gartnerin julkaisema konesalitilan tehokkuusmittari (DCSE, Data Center Space Efficiency) [13], huomioi konesalin vaaka- ja pystysuunnassa käytettävissä olevan tilan. Konesalin hukkatilan voi arvioida DCSE:tä hyödyntämällä.

DCSE ilmaisee konesalin tehokkaan tilankäytön IT-laitemäärän suhteessa pinta-alayksikköä kohti. DCSE:n laskemista varten määritellään ensin vertikaalinen (VSU, Vertical Space Utilization) ja horisontaalinen (HSU, Horizontal Space Utilization) tilankäyttö. VSU lasketaan seuraavasti [13]

$$VSU = \frac{Q_{IT}}{Q_{DC} \cdot T}. \quad (2.11)$$

VSU:n kaavassa Q_{IT} (Installed IT equipment) tarkoittaa asennettuja ja käytössä olevia IT-laitteita konesalissa. Räkeissä olevien IT-laitteiden kokonaismäärää merkitään Q_{DC} :lla (Total rack space equipment) ja T :lla (Optimum target) merkitään rakkien optimaalista määrää. Horisontaalista tilankäyttöä HSU [13] laskettaessa on tiedettävä R , joka on käytössä olevien rakkien määrä (Current number of racks) ja R_{Max} rakkien maksimimäärä (Maximum number of racks), kuten VSU:n kaavassakin. Horisontaalinen tilankäyttö [13] lasketaan kaavalla

$$HSU = \frac{R}{R_{max}}, \quad (2.12)$$

josta konesalin tuottavuus DCSE [13] lasketaan VSU:n ja HSU:n avulla kaavalla

$$DCSE = \sqrt{VSU \cdot HSU}. \quad (2.13)$$

Konesali DCSE-arvo kuvaa konesalin käyttökapasiteettia käytössä olevien laitteiden ja lattiapinta-alan suhteen. Tietoa hyödynnetään analyyseissä, joissa konesalin laitekantaa uudistetaan. Sitä käytetään myös konesalin tuottavuuden arviointiin. Tuottavuus ja kapasiteetti kasvavat, jos laitteita pystytään pakkaamaan entistä tiheämmin räkkeihin. Laiteinvestoinneilla voi lykätä kokonaisia konesalitilainvestointeja. DCSE-arvon nostaminen konesalissa edellyttää mahdollisuutta lisätä jäähdytyskapasiteettia. Palvelinkapasiteetin lisääminen lisää aina myös tehontarvetta, jolloin konesalin kokonaistehontarvekin kasvaa.

2.5.3 Tuottavuusmittarit

Tehdyt toimenpiteet vaikuttavat tuottavuuteen, jota mitataan siihen tarkoitetuilla mittareilla [94]. Terminä tehokkuus ja tuottavuus ovat lähellä toisiaan, koska tehokkuuden lisääminen vähentää muodostuvia kustannuksia. Tuottavuuden arviointia käytetään konesalien vertailussa tilanteessa, jossa tilojen laitekannat poikkeavat toisistaan. Konesalin tuottavuuteen vaikuttaa käynnissä olevien sovellusten määrä, palvelimen työkuorma, bittivirta, CPU:n käyttöaste, palvelimen laskentateho ja aikaikkuna, jona mittaukset tehdään. Tuottavuuden mittaaminen ja arviointi edellyttää laitekannan hyvää tuntemusta, kuten tietoa laitteiden hankinnan ajankohdasta, laitteiden muistien ja CPU:ien määristä.

Tuottavuusmittareita tarkasteltaessa tuottavuuden ajatellaankin kasvattavan konesalin IT-palvelujen tarjontaa. Konesalin tuottavuutta arvioidaan kahdella eri mittarilla, joita varten konesalin tuottama hyödyllinen työ (Useful Work), kokonaisenergia (Total Energy) ja resurssien määrä (Quantity of Resource) on määriteltävä ensin.

Ensimmäisenä on tuottavuuden arvioinnin mittari DCeP (Data Center energy Productivity) [92]. DCeP on kehitetty taloudellisia ja ympäristönäkökulmia ajatellen IT-sektorin energiatehokkuuden parantamiseksi [47]. Mittaria käytetään konesalien energiatehokkuuden vertailuun ja se kuvaa, kuinka paljon hyödyllistä työtä tehdään määrättyllä määrällä IT-laitteita.

Toisena tuottavuuden arviointimittarina käytetään DCP-mittaria (Data Center Productivity). Konesalin tuottavuus DCP saadaan laskettua, kun konesalin hyödyllinen työ (Useful Work produced in a Data Center) jaetaan konesalin kokonaisenergiankulutuksella (Total Data Center Energy consumed to produce that work) [47].

Hyödyllisen työn määrä (Useful work) riippuu aina laitteiston suorituskyvystä. Tuottavuusmittari DCeP mittaa, kuinka paljon hyödyllistä työtä on tehty verrattuna energiankulutukseen [5]. Mittaria käytetään niin yksittäisen IT-laitteen kuin suuren IT-klusterin tuottavuuden määrittämiseen.

Toisaalta tuottavuuden laskemisessa on mahdollista hyödyntää resursseja (Quantity of Resource), jolloin lasketaan kuinka paljon hyödyllistä työtä (Usefull Work) on tehty määrättyllä määrällä resursseja. Nämä kaksi (DCeP ja DCP) tuottavuuden mittaria eroavat toisistaan siinä, että DCeP:n laskemiseksi on määritettävä mittausjakso, mutta DCP voidaan laskea jonain määrättynä ajanhetkenä.

Konesalin tuottavuuden määrittämiseksi lasketaan tuotettu hyödyllinen työ [5], joka saadaan, jos kaikki tehtävät tunnetaan kyseisen aikaikkunan sisällä. Hyödyllinen työ saadaan laskettua konesalin sisäisten laitteiden ja ohjelmistojen osalta. Vaikka hyödyllinen työ on skaalautuva komponentti, kannattaa suuremmat työmääräkokonaisuudet jakaa ensin pienemmiksi tehtäviksi ja määrittää näille sitten erikseen hyödyllisen työn arvo [5].

3 Konesalien energiankulutus ja energian mittaaminen konesaleissa

Konesalien energiankulutusta on tutkittu maailmalla viimeisen 10 vuoden aikana yhä enemmän. Energiankulutuksen seuraamista varten otetaan käyttöön sovelluksia ja hyödynnetään optimointiin tarkoitettuja ohjelmistoja [30]. Vaikka IT-laitetasoilla ohjelmistoilla tehtävä optimointi energiankulutuksen kannalta on tärkeä, niin yhtä tärkeää on poistaa tarpeettomiksi jääneet IT-laitteet konesalista. Konesalin energiatehokkuutta on arvioitava kokonaisuutena, johon kuuluvat IT-laitteet ja talotekniikan järjestelmät. Konesali voi hyödyntää vaihtoehtoisiaakin energiamuotoja, kuten aurinko- tai tuulivoimaa.

Konesalin omistajat pyrkivät saamaan konesalin tuottamaan ja tuomaan arvoa omistajilleen. Optimoinnilla tavoitellaan konesalin tehokkuutta [26]. Tilan tuottavuus voidaan arvioida, mikäli tiedetään konesalin koko, rakkien ja palvelimien määrä, palvelimien ikä, IT-laitteiden ja koko konesalin aiheuttama tehokuorma. Mittaaminen ja mittareiden hyödyntäminen toiminnassa auttaa ymmärtämään, millaista toiminta juuri nyt on ja miten sitä täytyy kehittää. Mittaamisen on tuotava hyötyä, joka voi ilmetä koko konesalin tehokkuuden kohentumisena, laskentatehokkuutena, alempina kustannuksina, korkeampana saatavuutena tai pienempinä päästöinä [47].

Seuraavissa alaluvuissa esitellään muutamia konesalin energiatehokkuuteen liittyviä tutkimuksia ja kaupallisia laitteita sekä niiden käyttöä konesaliympäristössä. Ensimmäisessä alaluvussa 3.1 tutustutaan eri tutkimuksien näkökulmasta konesalin energiatehokkuuteen jäähdytyksen ja IT-laitteiden osalta. Tutkimuksissa esitellään mm. prototyyppisiä tai mallinnuksia. Testit on suoritettu laboratorioympäristössä, eikä niitä voi sellaisenaan ottaa vielä käyttöön tuotantoympäristöissä. Seuraava alaluku 3.2 käsittelee esimerkinomaisesti kaupallisia tuotteita energiakulutustietojen mittaamiseen. Mittauksia voidaan tehdä taloautomaation kuin yksittäisen IT-laitteen energiankulutusta tarkastelemalla. Viimeinen alaluku 3.3 käsittelee valvontajärjestelmän käyttöä mittaustyökaluna. Tässä esitellään tarkemmalla tasolla RiZone-sovellus, joka on käytössä kohdekonesalissa. Kohdetutkimuksessa esiteltävän konesalin energiatehokkuutta on haluttu arvioida mittaamalla ja etsimällä

keinoja energiankulutuksen vähentämiseksi.

3.1 Energiatehokkuus tutkimusten näkökulmasta

Talotekniikka takaa konesalin olosuhteiden säilymisen IT-laitteille sopivana lämmön ja kosteuden osalta. Konesalien energiankulutuksesta 23 % kuluu jäähdyttämiseen, 46 % palvelimien käyttöön ja loput 31 % kuluvat UPS:hin, virtalähteisiin ja tuulettimiin [56]. Etenkin konesalin jäähdyttämiseen on kiinnitettävä huomiota ja sen energiankulutusta pyrittävä vähentämään.

Jäähdyttämiseen käytetään lähes neljäsosaa konesalin kokoenergiankulutuksesta. Konesalin jäähdytys voidaan toteuttaa useammalla eri laitteistolla tai menetelmällä. Jäähdytys voi hyödyntää eri laitteistoja ja menetelmiä samanaikaisesti rinnakkain. Useissa konesaleissa on muodostettu kuumia ja kylmiä käytäviä tehostamaan jäähdytystä. [99] Tehokkaampi tapa tuottaa palvelimille riittävästi viileää ilmaa on kattaa käytävät, jolloin ilmamassat eivät sekoitu toisiinsa [34] ja lämmentynyt ilmamassa on helpompi ohjata takaisin jäähdytyslaitteelle. [95] Energiatehokkuuden näkökulmasta jäähdytykseen vaikuttaa mm. jäähdytystarve, IT-laitteiden määrä ja konesalin koko.

Erilaisten jäähdytysmenetelmien eroista ja tehokkuuksista on käyty keskustelua useissa foorumeissa [34], mutta yksikään esitetyistä ratkaisuista ei ole täysin ongelmaton. Tehokkain tapa on tuoda jäähdyttimet mahdollisimman lähelle palvelinräkkejä. Jäähdytysyksiköt sijoitetaan räkkien kanssa samoihin riveihin [73], jolloin puhutaan kohdennetusta jäähdytyksestä.

Reaaliaikaista lämpötilan hyödyntämistä on kokeiltu mm. ODC-ratkaisussa (On-Demand Cooling) [98], jossa tietoa siirretään palvelimelta jäähdytysyksiköille. Palvelimen lämpötilan perusteella ei voi ohjata jäähdytysjärjestelmää, koska palvelimen lämpötilan vaihtelut seuraavat palvelimen kuormitusta. Palvelimia ympäröivän ilman lämpötila muuttuu huomattavasti hitaammin.

Reaaliaikaisen tiedon keräämisellä seurataan konesalin toimintaa. IT-laitteista taltioidaan niiden kuluttama energia, ja samassa yhteydessä mitatetaan laitteiden tuottama lämpö. Laitteen teho muuttuu nopeammin kuin IT-laitteita ympäröivä lämpötila, jolloin molempien tietojen kerääminen on tehtävä reaaliaikaisesti. Energiankulutustietojen avulla voi tarvittaessa ohjata tehokkaammin jäähdytystä. [98]

Valvonnassa hyödynnetään palvelimelle tulevan ja palvelimesta lähtevän ilman lämpötilatietoja, ilmavirtauksen sekä virrankulutuksen tarvetta. Reaaliaikaisessa läm-

pötilaan ja jäähdytykseen perustuvissa mittauksissa lämpötilaerot eri konesalin osissa voivat olla suuria. Reaaliaikaisuus mahdollistaa jäähdytyksen tehokkaan ohjauksen, jolloin myös laitteistot toimivat energiatehokkaammin. Reaaliaikaisen tiedon keräämiseen käytetään esimerkiksi langattoman sensoriverkon ratkaisuja [72].

Konesalin jäähdyttäminen voidaan ratkaista usealla tavalla. Laitetila voidaan jäähdyttää esimerkiksi veden, kylmän ilman tai lumen avulla. [82] Pohjaveden käyttö jäähdytyksessä ei ole täysin ongelmaton, sillä pohjaveden taso muuttuu. Jos pohjavettä ei ole tarpeeksi käytettävissä, niin konesalin jäähdytys ei toimi. Ulkoilman lämpötila vaihtelee, ja kun ulkolämpötila kohoaa yli +18 °C:een jäähdytyslaitteisto ja konesali ei enää hyödy ulkoilmasta sen liiallisen lämmön vuoksi. Ulkolämpötilan hyödyntämiseen käytetty ajanjakso riippuu konesalin sijainnista. Jos jäähdyttämisessä käytetään lunta, niin lumen varastointi vaatii sopivat tilat. [82] Veden, ilman ja lumen käyttäminen jäähdytyksessä vaatii lisätutkimuksen tekemistä, jotta niitä voidaan hyödyntää tehokkaasti.

Konesalitiilan tiiveys estää ulkona olevan kosteuden ja kaasumaisten aineiden pääsyn tilaan. Liiallinen ilman kosteus konesalissa voi johtaa veden tiivistymiseen tai korroosioon ja haitata IT-laitteiden toimintaa. Yleensä tämä johtuu lämmön vaihtelusta ja suhteellisesta kosteudesta konesalissa. Korroosiota aiheuttaa myös muiden kaasumaisten aineiden pääsy konesaliin. Korroosio vaurioittaa piirilevyjä ja pintaliitoskomponentteja, mikä johtaa IT-laitteen toimintakunnon heikkenemiseen. [49]

Tiiviissä konesalitiilassa kosteus ei aiheuta ongelmaa. Tällöin laitetilän lämpötila ja ilman kosteuden vaihtelu saadaan pidettyä tavoitearvoissaan [4], joka soveltuu myös palvelinlaitteille. Konesalin jäähdyttäminen kylmällä ilmalla on mahdollista, vaikkakin ilman kosteus voi olla liian alhainen [82]. Konesalin ilmastointilaitteilla (CRAH) voidaan tarvittaessa kuivata tai kostuttaa ilmaa ja saada olosuhteet palvelinlaitteille sopiviksi.

Teknologiset ja taloudelliset trendit ohjaavat konesaleja toimimaan entistä korkeammassa lämpötiloissa ja laitetiheyksissä [39]. Konesalin lämpötilan säätäminen tai nostaminen voi säästää energiaa. Uusimmat IT-laitteet sallivat korkeampia lämpötiloja ilman laitteen käyttöiän lyhenemistä. Lämpötilaan vaikuttaa laitteiden määrä, sijoittelu räkeissä ja myös IT-laitteiden käyttöaste. Käyttöasteen nousu lisää IT-laitteiden lämmöntuottoa [48]. IT-laitetilaan ei siis tule sijoittaa laitteita, jotka vaativat alhaisempia lämpötiloja. Jos laitteita, kuten akustoja, joudutaan sijoittamaan IT-laitetilaan, niin niille on voitava järjestää alhaisempi lämpötila esimerkiksi koh-

dennetun jäähtymisen avulla.

Lämpötilaa tarkastellaan palvelinlaitteiden tai koko tilan näkökulmasta. Lämpötila pyritään pitämään konesalissa +21 – +25 °C. Laitteiden määrällä on vaikutusta jäähtymisen tehokkuuteen ja ympäröivän ilman lämpötilaan. Yleensä IT-laitteiden määrään ja sijoitteluun räkissä ei juurikaan kiinnitetä huomiota. Räkissä olevien palvelimien määrä muuttuu, kun palveluita tai sovelluksia poistuu tai uusia otetaan käyttöön.

Räkissä lämpötila on korkeimmillaan räkin yläosassa, vaikka IT-kuorma palvelimissa on sama. [31]. Palvelimen sijainti räkissä vaikuttaa jonkin verran palvelimen tuulettimen nopeuteen ja virrankulutukseen. Räkin yläosassa palvelimen energiankulutus on suurempi kuin keskellä ja alhaalla. Energiatehokkuuden kannalta palvelimien sijoittaminen räkkeihin vaikuttaa energian kulutukseen.

Laitteiden ja sovellusten tehokkuuteen liittyvä vaatimus on kasvanut ja kasvaa edelleen. Tämä on johtanut energiankulutuksen kasvamiseen viimeisen kymmenen vuoden aikana [40]. Laitteistolähtöisiä tapoja vähentää energiankulutusta ovat mm. laitteen moniytimisten prosessoreiden käyttö ja komponenttien tehokkaammat jäähtytysratkaisut [33].

Palveluja käyttävillä tahoilla on jatkuva vaatimus saada entistä nopeampia palveluita. Tämän seurauksena konesalien IT-laitteistoja on uusittava ja kapasiteettia hankittava lisää. Toteuttamalla palveluita älykkäiden ratkaisujen avulla säästetään yleensä kokonaisenergiankulutuksessa. [40] Ratkaisua etsitään IT-infrastruktuurin optimoinnista, jossa tehdään optimointia sovellus- ja sisältötasolla käyttämällä jaettuja järjestelmiä. Optimoinnilla minimoidaan laitehankintoja, jolloin säästetään kustannuksissa 15 – 20 %. [30].

Konesalin sijainti saattaa tarjota mahdollisuuden hyödyntää uusiutuvia energiavaroja energiankulutuksen vaihtoehtona. Konesalin sähkö voidaan tuottaa hyödyntämällä uusiutuvaa energiaa, kuten tuulta, vesivoimaa tai aurinkoenergiaa. Jäähtymisen vähentäminen tehdään ohjaamalla palveluja eri konesaliin silloin, kun kyseisessä konesalissa voidaan hyödyntää tehokkaimmin uusiutuvia energiavaroja [16].

Pilvipalveluja tarjoavat konesalit voivat sijaita missä päin tahansa. Yleensä ne ovat maantieteellisesti sijoittuneet eripuolille maata tai maapalloa, jolloin uusiutuvien energiavarojen hyödyntäminen on mahdollista ainakin aurinkoenergiasta [23]. Kestävä kehitys konesaleissa tarkoittaa käytettyjen laitteiden elinkaarta, mutta myös operationaalisia tekijöitä. Palveluiden näkökulmasta kestävä kehitys liitetään yleisesti pilvipalveluihin. Isoissa konesaliympäristöissä tuotetaan palveluita keski-

tetysti, jolloin laitteiden käyttöasteet kasvavat ja kustannukset alenevat [11].

IT-laitteiden tuottamaa lämpöä voi hyödyntää rakennuksissa, kasvihuoneissa, kodeissa tai arboretumeissa. Hukkalämpö on suunniteltu käytettäväksi hyödyksi lähellä ja tätä varten on lanseerattu termi Environmentally Opportunistic Computing (EOC). Lämpömallin avulla pyritään ennustamaan muodostuvaa lämpökuormaa [93]. Pilvipalveluissa [90] on hyödynnetty hukkalämpöä veden lämmitykseen, mutta tämä edellyttää mahdollisuutta syöttää hukkalämpö kaukolämpöverkkoon.

Suomessa on tutkittu IT-laitteiden lämpöenergian hyödyntämistä konesalissa niillä laitteilla, joille lämpöä on tarvittu lisää [57]. Konesalikeskukset eivät pysty ratkaisemaan hukkalämmön käyttöä yksin, vaan siinä tarvitaan eri osapuolien yhteistyötä. Pienetkin konesalit tuottavat useiden satojen omakotitalojen vuotuisen kulutuksen verran hukkalämpöä.

3.2 Mittauslaitteistoja

Konesaliympäristön energiankulutuksen ja muiden olosuhteiden arviointiin tarkoitettujen mittaussovellusten käyttö on yleistynyt. Mittaustietoa halutaan kerätä, koska konesalin tehokkuutta on mitattava. Toimintaa arvioidaan taloudellisiin ja tehokkuuteen perustuvien tekijöiden ja mittareiden avulla. Toiminnan arviointi voidaan tehdä kertaluontoisesti, jolloin mittaustiedot kerätään käsin tai ohjelmistojen avulla. Pidempiaikaisen tai jatkuvan mittauksen suorittamista varten asennetaan tarvittavat laitteet ja ohjelmistot. Konesalin hallintasoftwareja hyödynnetään energiatehokkuuden mittaamiseen, seuraamiseen ja analysointiin. Tässä alaluvussa esitellään konesaliympäristöön tarkoitettuja mittaussovelluksia.

Konesalin infrastruktuurin hallinta -ratkaisut (DCIM, Data Center Infrastructure Management) mahdollistavat konesalien olosuhteiden valvomisen, hallitsemisen ja simuloinnin, kuten myös energiatehokkuuteen liittyvien mittausten tekemisen. Konesalin energiatehokkuuden arviointiin on lukuisia kaupallisia ohjelmistoja ja toimittajia. Palvelinlaite ja konesalin infrastruktuuritoimittajat tarjoavat omia tuotteitaan energia- ja kustannustehokkuuden tarkasteluun sekä infrastruktuurin hallintaan IT-ympäristössä. Laitetoimittajien tarjoamat järjestelmät ja ohjelmistot takaavat laitteiden yhteensovittamisen olemassa olevaan infrastruktuuriin.

Konesalin tilaa voidaan arvioida lukemalla mittaustietoja eri laitteiden näytöistä tai käyttämällä hallintakonsolien näkymiä hyväksi. Tämä manuaalinen mittaustapa on hidas ja epätarkka, jolloin poikkeamat jäävät huomaamatta seurattaessa lu-

kemia määrättyinä ajanhetkenä. Käsien kerääminen sopii tuloksen selvittämiseen ko. hetkenä.

Automaattinen mittausympäristön käyttöönotto vaatii enemmän suunnittelua ja rakentamista. Mittauksia varten on rakennettava verkko, kaapeloinnit ja asennettava ohjelmisto. Tietojen keräys tehdään UPS:ilta, jäähdytynyksiköiltä ja virranjakelukiskoilta sekä sähköpääkeskukselta riippumatta siitä kerätäänkö tiedot käsin tai ohjelmiston avulla.

Mittalaitteiden tarkoitus on tuottaa tietoa automaattisesti ja jatkuvasti. Tietojen keräyksen automatisointi helpottaa tietojen keräystä ja analysointia. Tietojen automaattinen keräys mahdollistaa tietojen reaaliaikaisen saatavuuden ja historiatietojen tarkastelua. Osa sovelluksista tarjoaa mahdollisuuksia tehdä analysointia kerätyn aineiston perusteella. Toiset sovellukset ovat vain teknisiä ratkaisuja, joilla määrättyjä tietoja voi katsella. Tällöin mittareiden laskenta ja tulosten analysointi on tehtävä eri sovelluksella.

Mittaussovellukset sopivat päätöksenteon tueksi esimerkiksi konosalin optimointiratkaisuja haettaessa. Mittauslaitteistoja käytetään, koska ne keräävät tietoa automaattisesti ja luotettavasti. Ohjelmiston muodostamien raporttien avulla voidaan tarkastella mittaustietoja pidemmällä aikavälillä ja tutkia yksittäisiä mittaustietoja. Poikkeamien havaitseminen konosalitoiminnassa on mahdollista ohjelmiston tallioimasta historiatiedosta. Ohjelmistot mahdollistavat myös erilaisten hälytysrajojen asettamisen, jolloin poikkeamat näkyvät myös reaaliaikaisesti.

Cisco Energy Management Suite on Cisco Systemsin [19] kehittämä työkalu energiakustannusten hallintaan, joka soveltuu mm. konesaliympäristöön. Sovellus on verkkopohjainen ja se pystyy mittaamaan ja hallitsemaan energiankäyttöä koko konesalissa ja kaikissa verkkoon kytketyissä laitteissa. Mittauksia varten on rakennettava Ciscon EnergyWice -verkko.

Cisco Energy Management Suite -sovellus löytää automaattisesti verkkoon liitetyt laitteet, jonka jälkeen sovellus arvioi, simuloi, kontrolloi ja raportoi laitteista tietoja. Energiatietojen keräämisessä hyödynnetään Cisco EnergyWice -protokollaa, joka toimii samalla tavalla kuin IP-reititysprotokolla [19]. Asennettu sovellus mittaa verkkoon liitetyn laitteen kuluttaman energian [18]. Sovellus tarjoaa näkymän kokonaisenergiankulutukseen laite- tai sijaintitasolla.

Cisco Energy Management for Data Center -sovellus monitoroi konosalin kaikkien laitteiden energiankulutuksen toimittajasta tai järjestelemästä riippumatta. [19] Energy Management Suite tarjoaa käyttäjälleen analyysijä ja graafisia raportteja. Se

sisältää analysointiominaisuuksia, joilla voi analysoida energian käyttöä, lämpötilaa ja hiilidioksidipäästöjä määrättyihin sijainteihin tai aikaan sidottuina. Analysoinnissa käytetään yleensä ryhmittelyä, jolloin saadaan raporteille näkyviin esimerkiksi ajanjaksot, sijainti, laitteet, sovellukset ja käyttäjäorganisaatio.

Cisco Energy Management for Data Center -sovelluksen simulointityökaluilla tuotetaan malleja kustannussäästöihin tai tuottavuuden parantamiseen [19]. Energiankulutuksen automatisointi tapahtuu lisäämällä menettelysääntöjä (policy), jotka säätelevät energiankulutusta aika-, paikka- tai tapahtumapohjaisesti. Jos verkossa on laitteita, joita ei käytetä, ne voidaan sammuttaa (sleep state) [19]. Menettelysääntöjä muutetaan asetettujen virransäästö tavoitteiden mukaisiksi.

Emerson Networks Power:n ohjelmisto on tarkoitettu konesalin infrastruktuurin valvontaan ja hallintaan. Konesalin inventointiin ja hallintointiin tarvitaan erilliset sovellukset. Energiatehokkuuden tarkastelua varten käytetään Aperture Suite Advanced Infrastructure Planning and Management -sovellusta.

Emerson Networks Power:n käyttöönotto vaatii olemassa olevan laitekannan dokumentoinnin sijaintitietoineen. Monitorointia varten IT:n ja talotekniikan laitteille on luotava hallintayhteydet. Ympäristöolosuhteiden, kuten lämpötilan ja kosteuden mittaamiseksi tilaan on asennettava tarvittavat sensorit. Tällaiset Data Center Infrastructure Management -ohjelmistot (DCIM) tuottavat konesalista tietoa, jolla ennakoitaa ja hallintaan laitteiden suorituskykyä. Data Center Control and Manage Solution -ohjelmiston avulla tuotetaan tietoa päätöksentekoa varten. Ohjelmisto vaatii konesaliin verkon ja sensoreiden asennuksen. [27]

Raritanin sovellus Power IQ (PIQ) [64] tarjoaa mahdollisuuden monitoroida konesalin infrastruktuuria. Sovelluksella voi analysoida konesalin laitteiden tehoa, jäähdytystä, tehokuormaa ja kapasiteettia. Tämän lisäksi sovellus on konfiguroitavissa energiankulutustietojen esittämiseen ja erilaisten hälytystietojen näyttämiseen.

PIQ:n käyttöönotto vaatii sovelluksen ja sensorien asennuksen sekä verkon rakentamisen. Sovellus kerää automaattisesti tietoja tehon käytöstä kaikilta laitteilta samoin kuin sensoreiden lähettämät tiedot tallentuvat sovelluksen tietokantaan. Datan, trendien ja hälytysten selaaminen lyhyellä ja pitkällä aikavälillä helpottaa päätöksentekoa. [64]

Power IQ -sovelluksessa on näkymät konesalin reaaliaikaiseen tarkasteluun, energiankulutukseen ja hallintointiin sekä PUE-mittarin arvon tarkasteluun. Energiatehokkuuden arviointia helpottaa sovelluksessa olevat tehon ja energiankulutukseen liittyvät analyysit ja jäähdytyksestä muodostettavat kaaviot. Useimmat laiteoimit-

tajien laitteet ovat tuettuja, jolloin monitorointi PIQ:lla on helposti implementoitavissa. PIQ:n yhteensopivia ovat mm. HP:n laitteet, Rittalin ja Eatonin UPS:t [64].

Simulation, Visualization and Decision Support (SVD) Toolkit on kehitetty CoolEmAll-projektissa [91] ja se tarjoaa avoimen ratkaisun konesalin energiatehokkuuden simulointiin. SVD Toolkit tarjoaa työkalut ja mallit mm. energiankulutuksen vähentämiseen. Työkalu tuottaa organisaatiolle analysoitua tietoa toiminnan parantamiseen. Analysoinnin aloittamista varten konesalin laitteet ja konesalitila on mallinnettava.

CoolEmAll:ssa otetaan käyttöön Data Center Building Blocks (DEBBs), jonka avulla luodaan konesalista mallinnus. Käyttäjä voi ottaa blokkeja käyttöön oman tarpeen mukaan. SVD Toolkit:n avulla pystytään simuloimaan IT-laitteiden työkuormaa ja hyödyntämään lukuisia konfiguraatiovaihtoehtoja. [91] SVD:tä voidaan hyödyntää konesalitilan mallintamiseen, jossa arvioidaan laitteistojen työkuormaa kuin myös IT-laitteiden ja rakkien sijoittamista konesalissa.

CoolEmAll-työkalulla tehdään simulointia, mutta se ei mittaa konesalin todellisia energiankulutustietoja. SVD Toolkit:a voi käyttää olemassa olevan tai suunnitellun konesalin simulointiin. Konesalin lämmöntuottoa simuloitaessa on tunnettava laitteiden työkuormat ja laitteiden läpi virtaavan ilman määrät. Työkuormien simuloinnissa huomioidaan IT-kuorman vaihtelu, joka vaikuttaa energiatehokkuuteen ja näkyy myös PUE-arvossa [91]. Konesalin energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa, kun hyödynnetään simulaatiossa tuotettua materiaalia. Analyysin tuloksia hyödynnetään IT-laitehallinnassa, jäähdytyksessä ja työkuorman hallinnassa. Simulointiohjelmistoa kehitetään edelleen ja siihen on tulossa työkuorman tarkasteluun ja resurssien hallintaan liittyviä ominaisuuksia.

Langaton sensoriverkko -ratkaisu (Wireless Sensor Network) [70] mahdollistaa konesalin ympäristön monitoroinnin. Langaton sensoriverkko tarjoaa optimoidun ja integroidun ratkaisun datan keräämiseen, tuottamiseen ja analysointiin. Sensorit asennetaan konesalin rakkeihin ja tilan muihin kohteisiin, kuten ilman tulo- ja lähtöpaikkoihin. Sensoriverkko koostuu sensorinoodeista, interface-laitteista, virtalähteistä ja radiomoduuleista. Langaton sensoriverkko käyttää kommunikoinnissa Bluetoothia ja WiFia. Sensoriverkon tehtävä on kerätä tietoa lämpötilasta ja kosteudesta.

RiZone on Rittalin kehittämä sovellus, joka on tarkoitettu IT-infrastruktuurin mittauksiin ja monitorointiin [37]. Laitteella kerätään tietoja konesaliverkon laitteiden energiankulutuksesta, tehosta, lämpötilasta, kosteudesta, ilmavirrasta, painees-

ta, jännitteestä ja jäähdytyksestä. RiZone hyödyntää sensoriverkkopohjaisia ratkaisuja, jossa yksi laite kerää tietoja usealta anturilta. Tietoja keräävät laitteet siirtävät datan automaattisesti sovellukselle.

RiZone monitoroi ja kontrolloi kaikkia IT-infrastruktuurin komponentteja. Sovelluksessa on nähtävissä IT-laitteiden ja virransyöttöjärjestelmien kuluttama energia. Monitorointiominaisuudet sopivat hyvin konosalin olosuhteiden tarkasteluun. Sovellukseen voi rakentaa erilaisia toimintaa ohjaavia raportteja. RiZonea voi käyttää trendien analysointiin, kuten myös visualisointiominaisuuksia kokonaisenergiankulutustietojen esittämiseen konesalista. Alaluvussa 3.3 esitellään RiZonen CMC III Processing Unit tarkemmin, koska kyseinen hallintasovellus on käytössä kohdetutkimuksessa esiteltävässä Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiirin konesalisissa.

Konesalin ympäristöolosuhteiden hallintaan liittyviä ohjelmistoja on tarjolla lukuisia. Suurin osa tarjoaa mahdollisuuden monitoroida tehoa, energiankulutus, lämpöä ja kosteutta. Tämän lisäksi sovellukset sisältävät konosalin hallinnointia helpottavia näkymiä. Olosuhteiden monitoroinnin lisäksi konosalin laitteiden tilatietoja, kuten hälytyksiä, näytetään sovelluksen näkymäikkunoissa. Cisco Energy Management Suite, Aperture Suite Advanced Infrastructure Planning and Management, Power IQ ja Rizione ovat laitevalmistajien tarjoamia kaupallisia tuotteita. SVD ja WSN ovat kehitetty konosalin energiatehokkuuden arviointityökaluksi. SVD:llä tuotetaan simuloimalla tietoa konesalista. SVD:n ja WSN:llä toteutetut sovellukset eivät ole kaupallisia ratkaisuja.

Monitorointi ja simulointi vaativat yleensä konesaliin sensoreiden asennusta ja samassa yhteydessä rakennetaan myös verkko, koska sensoreillekin on saatava virtaa. Taulukossa 3.1 on edellä esitettyjen toimittajien laitteistojen vaatimuksia sovelluksen asennusympäristölle ja sovellusten tarjoamia ominaisuuksia. Asennettava ohjelmisto vaatii joko Windows- tai Linux -käyttöjärjestelmän. Palvelin voidaan rakentaa virtuaalisena. Muistin osalta vaatimus on 4 GB (RAM) ja levytilan osalta tyypillisesti 80 GB.

Mittaussovellusten käyttöympäristö on pääasiassa konesalissa, mutta Ciscon sovellukseen on mahdollista liittää myös toimistolaitteet, kuten työasemat ja tulostimet. Tutkimuksessa käytetyt Simulation, Visualization and Decision Support (SVD) Toolkit- ja langattomilla sensoriverkkoverkko -ratkaisuilla toteutetut ympäristöt voidaan laajentaa langattomia yhteyksiä käyttäen huomattavasti suuremmalle alueelle. Kaupallisissa ohjelmistoissa rakennettavan verkon käyttö rajoittuu nimenomaan

konesalitilaan tai muuhun valvottavaan tekniseen tilaan. Syy tähän on se, että mm. Rittalin laitteistojen kaapeloinnin pituus on rajoitettu. Sensoreilla toteutetut ratkaisut voivat toimia akuilla, jolloin ympäristöolosuhteiden mittaaminen onnistuu helpommin hankalimmistakin paikoista. Ilman verkkovirtaa toimivien sensoreiden sijoittaminen on helppoa.

Prototyypinä rakennettu ympäristöolosuhteiden mittaukseen tarkoitettu WSN-ratkaisu hyödyntää MATLAB-ohjelmointikieltä tiedon käsittelyssä. Kaupallisissa sovelluksissa käytetään yleensä SQL-tietokantaa ja sovelluksen tarjoamia näkymiä tiedon katseluun. CoolEmAll-projektissa kehitetty SVD toolkit:a käytetään konesalio-olosuhteiden simulointiin ja visualisointiin. Simuloinnilla tuotetaan tietoa käytettävyydestä, suorituskyvystä, ilmavirtauksista ja työkuormista. Simuloitua tietoa hyödynnetään konesalin infrastruktuurin suunnittelussa ja operoinnissa. Raritanin ohjelmisto tarjoaa myös sääpalvelujen kytkemisen DCIM-ohjelmistoon. Kaupallisten sovellusten tarjoamat ominaisuudet ovat lähes samanlaisia pieniä eroja lukuun ottamatta.

Taulukossa 3.1 on esitelty yhteenvedonomaisesti edellä esiteltyjen laitteistojen alustavaatimuksista ja käyttötarkoituksista. Monelle mittausohjelmistolle voidaan valita alustaksi virtuaalipalvelin (V), mutta myös fyysinen palvelin (F) on mahdollinen vaihtoehto. Jos ominaisuutta ei ole kerrottu valmistajan sivulla se on merkitty palvelimen kohdalle merkinnällä N/A.

Sovelluspalvelimen käyttöjärjestelmäksi voidaan valita Windows tai Linux. Tietokannan koko alkuvaiheessa voi olla pieni. Jos mittaustietoja kerätään usealta vuodelta ja mitattavia komponentteja on paljon, kannan koko voi kasvaa suureksi.

Jokaisen toimittajan tarjoamasta mittausohjelmistosta tai -sovelluksesta on esitetty myös mittauskomponentit, jos laitteessa on kyseinen ominaisuus, se on merkitty taulukkoon Kyllä-merkinnällä ja mikäli ominaisuutta ei ole, niin se on merkitty viivalla.

Raritanin tarjoama on ominaisuuksiltaan laajin. Ei kaupalliset -sovellukset (SVD ja WSN) toimivat lähes rajoittamattomassa toimintaympäristössä, koska niitä varten ei tarvitse rakentaa langallista verkkoa. Kaupallisissa tuotteissa on mittauslaitteiden sijoittelun ja kaapeloinnin pituuksien suhteen rajoituksia.

Taulukko 3.1: Mittausohjelmistojen alustan vaatimukset ja ohjelmiston tarjoamat ominaisuudet. (V= virtuaalipalvelin ja F=fyysinen palvelin).

Ominaisuus	Cisco	Emerson	Raritan	Rittal	SVD	WSN
Palvelin	N/A	N/A	V	V/F	N/A	N/A
OS	Windows	Windows	Linux	Windows	-	-
Datastore	20 GB	80 GB	80 GB	80 GB	-	-
Teho	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-	-
Kosteus	-	-	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-
Lämpötila	-	-	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-
Mittarit	-	-	PUE	PUE	-	-
Sääpalvelut	-	-	Kyllä	-	-	-
Valvonta	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-	-
Toimistolaitteet	Kyllä	-	-	-	-	-
Trenditieto		Kyllä	Kyllä	Kyllä	-	-
Analyysi	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä		Kyllä
Simulointi	Kyllä	Kyllä	-	-	Kyllä	Kyllä
Käyttöympäristö	suppea	suppea	suppea	suppea	laaja	laaja

3.3 Rittalin CMC III- valvontajärjestelmä

Rittal valmistaa konesalien tarvitsemia palvelinrakkeja, koteloita ja kokonaisia konesaleja. Kuten luvussa 3.2 mainittiin, kohdekonesalissa on käytössä Rittalin CMC III valvontajärjestelmä. Konesaliin on valittu Rittalin valmistama laitteisto, koska suurin osa laitetilan IT-infrastruktuurista on Rittalin toimittamia. Näitä ovat räkit, virranjakelujärjestelmät LCP-yksiköt ja UPS:t. Lisäksi RiZone-sovelluksen etuna on, että siihen voi liittää kohdekonesalissa käytössä olevia kolmannen osapuolen järjestelmiä.

Rittalin kehittämä hallintasovellus on modulaarisen ja skaalautuvan konesalin optimointiin tarkoitettu ohjelmisto. RiZonella voi hallinnoida, monitoroida ja kontrolloida virransyöttöjärjestelmiä, jäähdytystä, huonetilaa, konesalin turvallisuutta ja energiatehokkuutta. Järjestelmästä käytetään nimeä CMC III-valvontajärjestelmä (Computer Multi Control) [67]. Valvontajärjestelmä sisältää prosessointiyksiköt, verkon, anturit ja RiZone-sovelluksen. Se on modulaarinen järjestelmä, jota voi laajen-

taa jälkikäteen.

RiZonen etu on siinä, että valvonta tehdään verkon kautta ja se mahdollistaa myös turvallisuusprosessien automatisoinnin. Järjestelmän sanotaan tuovan organisaatiolle säästöä. RiZonea varten tarvitaan palvelin ja tietokanta. Sovellus asennetaan palvelimelle, josta RiZonea käytetään etäyhteyden avulla.

Monitoroinnin käynnistäminen konesalissa vaatii yksiköiden, kaapeleiden ja antureiden asentamisen [68]. Vaikka valvontajärjestelmään kytketyt laitteistot hyödyntävät sensoriverkkoratkaisua, niin yksiköt ja anturit tarvitsevat omat virtalähteet toimiakseen. Järjestelmän virransyöttö toteutetaan CMC Power Supply -laitteen avulla.

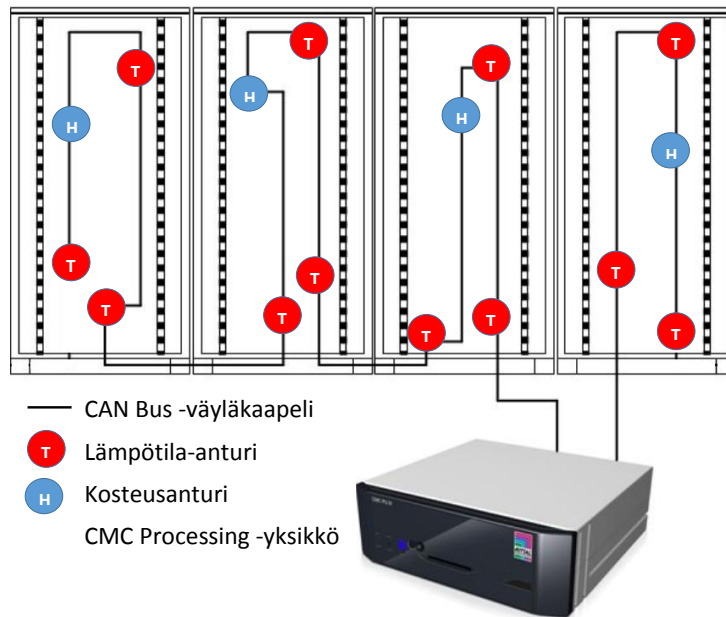
CMC III -valvontajärjestelmän toiminnassa käytetään tuettuja verkkoprotokollia. Tärkeimmät näistä ovat HTTP, SSL/HTTPS, SNMPv1/2c, SNMPv3, TCP/IPv4 ja TCP/IPv6. Tuetut tiedonsiirtoprotokollat ovat IT:n puolella SNMP ja teollisuudessa OPC-UA ja Modbus. Varsinainen tiedonsiirto tapahtuu Processing Unit:n ja antureiden välillä CAN Bus -väylän avulla. Valvontajärjestelmän laitteistot kiinnitetään 19 tuuman palvelinräkkiin 1U:n korkuisella kehikolla.

Rittalin laitteisto koostuu CMC III prosessointiyksiköstä (CMC III Processing Unit) [67], jossa on 240 V redundanttinen virransyöttöyksikkö. Prosessointiyksikkö liitetään konesalin lähiverkkoon. Prosessointiyksikköön liitetään I/O-ohjaus- ja Power -yksiköt. I/O-yksikön tehtävänä on laitteiden ohjaus ja tietojen siirto. Power-yksikkö mittaa virran, jännitteen, tehon ja energian PSM-virtakiskoilta.

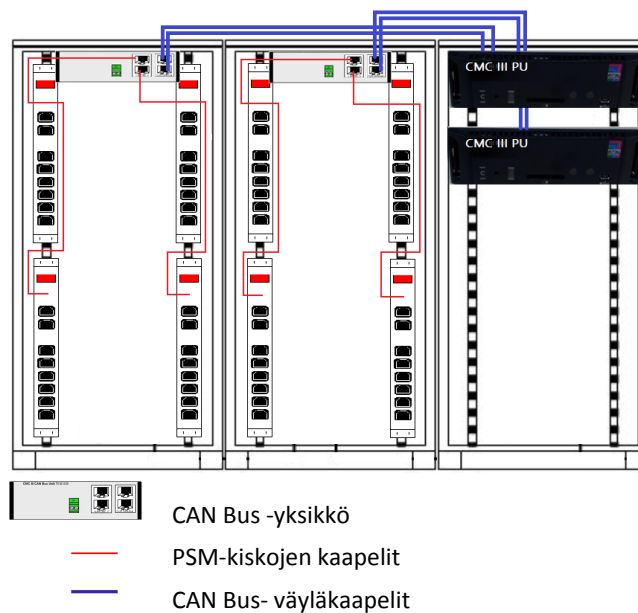
Laitteistoa varten rakennetaan CAN Bus -väyläverkko, johon voi liittää maksimissaan 16 laitetta. CAN Bus -väylään asennettavia antureita ovat ilkeilvalta-, infrapuna-ovi-, lämpötila- ja kosteusanturit sekä analogiset ilmavirta- ja paine-eroanturit.

Valvontajärjestelmään voi liittää CAN Bus -liitäntäkaapeleilla oviantureita, savuilmaisimia, liiketunnistimia, vuotoantureita, palonilmaisua- ja sammutusjärjestelmät ja automaattisen ovenavausjärjestelmän sekä kulunvalvontalaitteiston [69]. Kuva 3.1 esittelee lämpötila- ja kosteusantureiden sijainnit palvelinräkissä. Kaapelointi tehdään CAN Bus -väyläkaapeleilla. Kuvan kokoonpanoon voi liittää kaiken kaikkiaan 32 anturia ketjuttamalla.

PSM-virtakiskot eli mittaat virtakiskot sijoitetaan rakin sivustoille. Palvelimien virtalähteet kytketään mittaaviin virtakiskoihin, jolloin IT-laitteiden energiankulutus saadaan mitattua. Yhteen CMC II PU:n voi liittää neljä CAN Bus -yksikköä, joita tarvitaan vanhan mallisten PSM-virtakiskojen energianmittauksiin. Kuvassa 3.2 on esitetty prosessointi- ja CAN BUS-yksikön sekä virtakiskojen sijainti räkissä.



Kuva 3.1: CMC III -valvontajärjestelmän lämpötila- ja kosteusantureiden muodostama verkko. Kuva mukailtu lähteestä [69].



Kuva 3.2: CMC III -valvontajärjestelmän lämpötila- ja kosteusantureiden muodostama verkko. Kuva mukailtu lähteestä [68].

CMC PU:t hyödyntävät Ethernet IEEE 802.3 -standardia fyysiseen kommunikointiin lähiverkossa (Local Area Network). CMC III Processing unit:n verkkoliitännä toteutetaan RJ45-liittimellä 10/100BaseT LAN-verkkoon. Verkkostandardi mahdollistaa tiedon siirron 100 Mbps (megabits per second). IEEE 802.3 -standardi mahdollistaa PoE:n (Power over Ethernet) syötön CAN Bus -yksiköille. Laitteistoja kytkettäessä on kuitenkin huomioitava, että anturiketjun maksimipituus on 2×50 m.

Valvontajärjestelmä tarjoaa näkymän verkossa oleviin IT-laitteisiin ja UPS:hin. RiZone näyttää ja tallentaa reaaliaikaisesti konesalin tehotiedot saatavilla olevasta ja vaaditusta jäähdytyskapasiteetista. Valvontajärjestelmässä on nähtävissä todellinen ja käytetty IT-kuorma kilowatteina. RiZone-sovellus näyttää järjestelmään liitetyt jäähdytysyksiköiden ja UPS:n tehotiedot reaaliaikaisesti, mutta myös kertyneen historiatiedon.

Raportointia varten käyttöliittymässä valitaan raportoitavat muuttujat, joista luodaan säännöllisesti päivittyvät raportit. Käyttöliittymässä asetetaan muuttujille päivityssykli, joka voi olla 1, 5, 10, 60, 360 tai 1800 s [69]. Raportilta voi tarkastella jokaisen muuttujan arvoa sen mukaisesti, miten muuttujan päivityssykli on asetettu. Raportit luodaan automaattisesti ja raporttien päivityssykli voi olla päivä, viikko, kuukausi tai vuosi.

Käyttöliittymän laskentaosiossa hyödynnetään RiZonen keräämää mittaustietoa. Kun halutaan laskea muuttujien avulla esimerkiksi energiatehokkuuteen liittyviä arvoja, niin se tehdään laskentaosiossa. Tätä ennen jokainen uusi muuttuja on määriteltävä ennen kuin sen arvo saadaan tuotua näkyviin laitteen komponenttilistään [69].

Seuraavissa alaluvuissa kuvataan tarkemmin RiZone-ohjelmiston käyttöä kohdekonesaliympäristössä. Alaluvussa 3.3.1 tarkastellaan RiZone-ohjelmiston moduuleita. Moduulien avulla ohjelmiston käyttöä voi laajentaa. Jälkimmäisessä alaluvussa 3.3.2 esitellään RiZonen käyttöä konesalin energiatehokkuuden arviointityökaluna. Hallintaohjelmiston avulla tehtyjä analyysejä voi käyttää toiminnan muutosten arviointiin.

3.3.1 RiZone-ohjelmisto moduulit

Valvontajärjestelmä näyttää tietoja konesalin kokonaistilanteesta, palvelusta, jäähdytyskapasiteetista, käytettävistä ja käytetyistä laitepaikoista ja laitteiden kokonaispainoista räkeissä. Statustiedot näytetään IT-kuormasta, monitoroinnin tilanteesta, jäähdytyksestä, turvallisuudesta, saatavuustiedoista, tehosta ja räkeistä. Statuksessa

näytetään kolme tilatietoa: Ok, Warning ja Alarm. [69]

Rizone-valvontajärjestelmään voi ottaa käyttöön moduuleita, jotka mahdollistavat automaattisen laitteiden liittämisen (Discovery), kommunikoinnin (Communication), työjonojen tekemisen (Workflow), visualisoinnin (Vizualiation), palvelinlaitteiden hallinnoinnin (Set-Up) ja laitetilän hallinnoinnin (Administration) käyttöliittymän kautta [37]. Set-Up-moduulin avulla voi nähdä räkkitasolla käytetyt laitepaikat. Sovelluksessa räkki on mitoitettu siten, että räkissä on käytettävissä 42 U:a IT-laitteiden sijoittamista varten. Visualisointimoduulin avulla tyhjät laitepaikat ja kapasiteetti näytetään käyttöliittymästä rakkikohtaisesti. Moduulin tuottamaa tietoa hyödynnetään konesalin vapaan kapasiteetin esittämisessä.

RiZone voi kommunikoida useiden laitteiden kanssa ja se kommunikoi myös kolmannen osapuolen valmistamien laitteiden kanssa. Eri laitevalmistajien laitteita, kuten UPS:ejä voidaan liittää RiZonen monitoroinnin piiriin. Tämä tekee RiZonen käyttöönnotosta joustavaa, koska jokaiselle eri toimittajan laitteelle ei tarvitse hankkia omaa monitorointisovellusta. RiZonen puutteena on, ettei se toimi esimerkiksi yleisesti käytetyn palvelimien valvontaohjelmiston Microsoft System Center Operations Managerin (SCOM) kanssa. Hälytykset ja ilmoitukset ovat luettava suoraan RiZonesta.

3.3.2 RiZone arviointityökaluna

Konesalin tehokkuuden arvioimiseksi sovellukseen voi rakentaa alaluvussa 2.5.1 esitetyt PUE- ja DCiE -mittarit. Kun mittarit on rakennettu käyttöliittymään, niin PUE:n ja DCiE:n arvoja voidaan seurata reaaliaikaisesti. Sovelluksen käyttöliittymä on rakennettu siten, että IT:n kuluttama teho ja konesalin kokonaisteho näkyvät automaattisesti sovelluksessa [69]. PUE:n ja DCiE:n mittarit näkyvät muuttujina (Variables) kyseisen tilan komponenttiluettelossa. Kohdekonesalin osalta nämä kaksi mittaria valittiin analyysin kohteeksi.

IT-laitteiden ja UPS:n tehotietoja ei tarvitse määrittellä, sillä ne ovat automaattisesti saatavilla käyttöliittymän kautta [69]. IT-laitteiden kuluttama kokonaisenergia E_{IT} ja E_{Total} päivittyvät valitun syklin mukaisesti. Sovellukseen ei tuoda eikä anturit mittaa konesalissa kulutetun veden määrää ja tästä syystä sovelluksesta ei saada informaatiota WUE:n määrittelyyn (kaava 2.3). RiZoneen ei voi syöttää manuaalisesti muiden laitteiden tietoja, sillä tiedot tulevat RiZoneen antureiden lähettämistä tiedoista.

RiZonen rajoitteita ovat pinta-alaan perustuvien tilantehokkuuden mittarien las-

keminen, jotka on kuvattu alaluvussa 2.5.2. Näitä ei ole automaattisesti saatavilla, mutta mittareita varten tarvittavat tehotiedot saa käyttöliittymästä. Tehotiheyden kaavoissa 2.6 – 2.9 tarvittavat pinta-alatiedot voi laskea etukäteen. Tietojen analysointi on tehtävä jossain muussa sovelluksessa esimerkiksi Excelissä. Kaavan 2.10 osoittama energiankulutus tai -tarve räkkiä kohti voidaan tuottaa kuten muutkin tehotiheyden arvot. Tehotiheyden 2.6 – 2.10 arvoja voidaan pitää luotettavana, sillä kokonaisia räkkeitä vaihdetaan harvoin ja kaavoissa käytetyt pinta-alat eivät muutu.

Alaluvussa 2.5.3 esiteltyjä tuottavuusmittareita ei pystytä määrittelemään RiZoneissa. RiZone ei mittaa yksittäisen palvelimen hyödyllistä työtä, palvelimen käyttöasetusta eikä kuormitusta. RiZonea voi käyttää vapaakapasiteetin arvioimiseen, jolloin käytettävissä oleva kapasiteetti saadaan näkyviin ja konesalin käyttöastetta nostaa, mikä taas puolestaan lisää konesalin tuottavuutta. Tämä kuitenkin edellyttää, että alaluvussa 3.3.1 esitelty visualisointimoduuli on otettu käyttöön.

4 Kohdetutkimus

Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiirissä (HUS) työskentelee lähes 22 000 terveydenhuollon ammattilaista ja tytäryhtiöissä noin 600 työntekijää. HUS:illa on yli 16 000 työasemaa, noin 10 300 tulostinta ja lähes 800 sovellus- ja tietokantapalvelinta. Hoitotyössä käytetään yli 500 eri sovellusta. HUS:n tietohallinto tuottaa tietojärjestelmä- ja tietotekniikkapalveluita koko sairaanhoitopiirin sairaaloille. Tietohallinnon palveluita ovat mm. tietotekniikka-, asiantuntija-, käyttö-, ylläpito ja tukipalvelut, joihin kuuluvat konesali-, tietoliikenne-, päätelaite- ja tietojärjestelmäpalvelut.

HUS:n oma ympäristökeskus valvoo ja ohjaa ympäristöarvojen toteuttamista kaikissa yhtymän toiminnoissa. HUS:n ympäristökeskus pyrkii vaikuttamaan sairaalan yksiköiden energia- ja materiaalitehokkuuteen toiminnan koko elinkaaren ajan. HUS:n tietohallinnossa tämä on tarkoittanut mm. palvelinlaitteiden virtuaalisointeja ja energiatehokkaiden tietokoneiden hankkimista yksiköiden käyttöön. Energiatehokkuus huomioidaan jo hankintojen kilpailutuksissa.

Sairaanhoitopiirillä on sairaaloita Meilahdessa, Jorvissa, Peijaksessa, Porvoossa, Hyvinkäällä ja Tammisaarella. Jokaisessa sairaalassa on ollut oma IT-laitetila tai pieni konesalitala. Toiminnan keskittäminen Meilahteen vaatii konesalitaloilta entistä enemmän käytettävyyttä ja samalla Meilahden konesalien käyttöaste on kasvanut. HUS on rakennuttamassa vuonna 2016 kolmannen konesalin Helsinkiin, koska lisätilan tarve on olemassa tulevaisuudessa. Nykyinen laitetila on käytännössä yksi tila ja uudella konesalilla luodaan kahdennettu konesaliympäristö olemassa olevan rinnalle.

Konesalin toiminnassa on tunnistettu ongelmia, kuten liian pieni vedenkierto, joka on aiheuttanut konesaliin jäähdytysongelmia. Nykyisen konesalin jäähdytysjärjestelmän kapasiteetti ei ole riittävä. Konesalin jäähdytyksen kanssa on ollut ongelmia kesäisin ja alkusyksyisin. Käytössä olevan konesalin talotekniikan korjaaminen on yleensä hankalaa, koska toiminnan on oltava käynnissä vuorokauden ympäri (24/7/365).

Meilahden kampuksen konesalissa käynnistettiin energiatehokkuuden monitorointi vuonna 2015, koska käytössä ei ollut riittävän tarkkaa tietoa konesalin energiankulutuksesta. Monitoroinnilla saadaan ajantasaista, jatkuvaa ja tarvittaessa his-

toriatieto konesalin energiankulutuksesta. Monitoroinnin avulla analysoidaan konesalin nykytilaa. Toiminnan kriittisyyden vuoksi päädyttiin ohjelmistopohjaiseen järjestelmään manuaalisen tietojen keräämisen sijasta.

Kerätyn datan perusteella analysoidaan konesalin energiatehokkuus ja laaditaan toimenpideohjelma energiatehokkuuden parantamiseksi. Tavoitteena on tuottaa konesalipalveluita energiatehokkaasti koko sairaanhoitopiirille. Tässä tutkielmassa hyödynnettiin asennettua Rittalin RiZone-ohjelmistoa, rakennettiin verkko datan siirtoa varten, asennettiin tarvittavat anturit ja luotiin valmisraportteja konesalin olosuhteiden jatkuvaan seuraamiseen.

Alaluvussa 4.1 esitellään olemassa olevan konesalitalon talotekniikka. Mittauksia tehtäessä on tunnettava olemassa olevat laitteet ja niiden energiankulutus. Toisessa alaluvussa 4.2 tutustutaan tarkemmin konesalin IT-laitekantaan ja konesalista kerätyihin perustietoihin sekä tehotiheyden arvoihin. Tutkimusongelma ja tavoitteet kuvataan alaluvussa 4.3. Tutkimusongelma kiteytyy toimenpiteisiin, jolla vaikutetaan energiankulutukseen. Pääluvun viimeisessä alaluvussa 4.4 kerrotaan tutkimusmenetelmästä ja käytettävästä mittaristosta.

4.1 HUS:n konesalin talotekniikka

HUS:n konesalitalat sijaitsevat Meilahden kampusalueella, ja ne on rakennettu konesaliksi 2000-luvun alkupuolella. HUS:n konesali luokitellaan laitemäärän perusteella keskiluokan konesaliksi [85], vaikka pinta-alan (163 m²) mukaan sitä voisi kutsua keskietäiseksi konesaliksi. Konesalitalon seinät ovat betonirakenteiset, ja tila sijaitsee maan alla. Valaistuksena on käytetty tavallisia loisteputkia eikä konesalissa ole muuta valaistusta.

Konesalin lattiarakenteena on teräspalkkirakenne, jonka päällä oleva lattiamateriaali on 5 cm paksuinen lastulevytyyppinen laatta. Lattia muodostuu 60 × 60 cm² laatoista, joista osa on rei'itetty. IT-laitteiden kaapelit kuljetetaan räkeistä räkkien päällä sijaitseville kaapelihyllyille. Vesiputket sijaitsevat korotetun lattian alla. Konesalitala muodostuu kahdesta erillisestä IT-laitetilasta. Niistä käytetään jatkossa nimiä konesali T1 ja T2.

HUS:n konesalin sähkönsyöttö on toteutettu modulaarisella virransyöttöjärjestelmällä eli UPS-laitteilla. Konesalin keskeytymätön virransyöttöjärjestelmä muodostuu neljästä erillisestä UPS-laitteesta. Käytössä olevat laitteet ovat Rittalin PMC 200, jossa moduulikoko on 20 kW ja Powerware PW9340, jonka moduulikoko on

104 kW.

HUS:n konesalin UPS:ien tehtävä on eristää sähköverkon häiriöiden pääsy IT-laitteille saakka. UPS:n toinen tehtävä kohdekonesalissa on taata sähkönsyöttö IT-laitteille, jos valtakunnanverkon sähkönsyöttö katkeaa ennen kuin HUS:n omat dieselgeneraattorit syöttävät sähköä konesaliin. Konesalitulojen T1 ja T2 UPS:t ovat teholtaan 3×20 kW (3×25 kVA) ja UPS-huoneessa olevat UPS:t ovat 2×104 kW (2×130 kVA).

Jäähdytys on toteutettu vapaakiertoisella jäähdytysjärjestelmällä ja rivijäähdyttimillä. Konesalien sisällä on vakioilmastointikoneet CRAC:it, joilla saadaan tarvittava ilmanvaihto ja -kosteus. Jäähdytykseen liittyvä tekniikka- ja automaatio sijaitsevat rakennuksen muissa tiloissa. Umpiovisten rakkien jäähdytyksessä käytetään rivijäähdyttimiä LCP:ta.

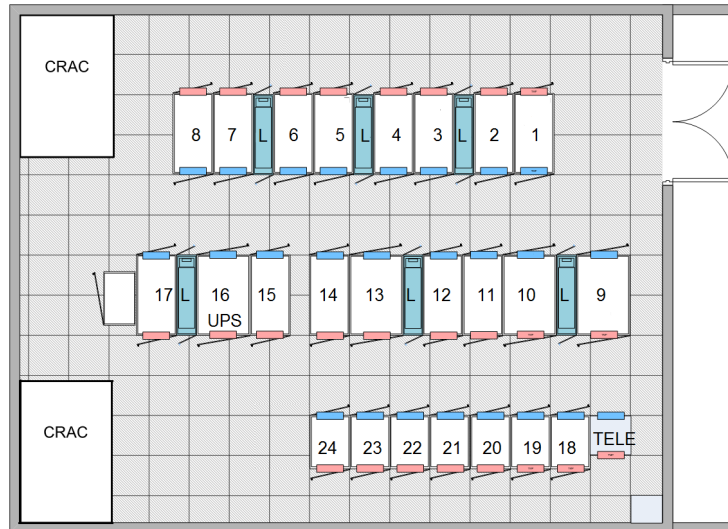
Ensimmäisessä konesalissa T1 on 13 rakkia, jotka hyödyntävät rivijäähdyttimiä. Loppujen 7 rakin jäähdytys tapahtuu konesalin vapaakiertoisella ilmajäähdytyksellä. Toisessa konesalissa (T2) 17 rakkia hyödyntää LCP-rivijäähdyttimiä ja vapaakiertoinen jäähdytys viilentää 8 rakkia. Kuvassa 4.1 on esitetty rakkien ja huonekohtaisten jäähdyttimien CRAC:ien ja rivijäähdyttimien eli LCP:iden sijoittelu.

Palvelin ja tietoliikenteen laitteet ovat sijoitettu räkkeihin 1 – 15 ja 17 – 24. Jäähdytysyksiköt ovat merkitty kuvaan symbolilla L. Kuvasta nähdään konesalin CRAC:ien sijoittelu. Niiden avulla kosteutetaan konesalin huoneilmaa ja samalla jäähdytetään räkkeitä 18 – 24, joissa ei ole vesikiertoisia jäähdytysyksiköitä.

Rivijäähdyttimissä (LCP) on tällä hetkellä kolme puhallinta ja ne tuottavat maksimissaan 30 kW:n jäähdytystehon. Puhallin puhaltaa räkkeihin maksimissaan 4 800 m³ ilmaa tunnissa. LCP:ille tulevan veden lämpötila on asetettu +15 °C :seen. Rivijäähdytin puhaltaa ulos +21 °C ilmaa, jota palvelimet hyödyntävät jäähdytykseen.

4.2 HUS:n konesalitila IT:n näkökulmasta

IT-laitekaapit muodostavat konesaleissa kolme rakkiriviä. Palvelimet, tallennus- ja tietoliikennelaitteet sekä UPS:t akkuineen ovat sijoitettu räkkeihin. Palvelinräkit ovat kooltaan 800 mm × 1200 mm ja tietoliikennelaitteet ovat kooltaan 600 mm × 800 mm. Kaappien korkeus on 2000 mm, koska nykyiseen tilaan ei mahdu korkeampia räkkeitä. Rakkien päälle jätetään vähintään 500 mm asennustilaa kaapelointia varten. Yhteen rakkiiin voi sijoittaa teoreettisesti 42 laitetta, joiden korkeus on 1U eli 44,45 mm.



Kuva 4.1: Kohdekonesalin T2:n pohjakuvassa on esitetty laitteiden sijainnit. Kuvaan on merkitty räkkit numeroituna 1-24, huonejäähdyttimet eli CRAC:t ja rivijäähdyttimet eli LCP-yksiköt, jotka on merkitty kirjaimella L. Lämpötila-anturit on merkitty kuvaan punaisella ja lämpötila-kosteusanturit sinisellä jokaisen räkkin kohdalle.

Konesalin nykytilan tarkastelussa on hyödynnetty olemassa olevaa tietoa. Taulukossa 4.1 ovat konesalin energiankulutustiedot vuosilta 2009 – 2014. Vuosi 2012 on vertailuvuosi, koska silloin otettiin käyttöön rivijäähdyttimet ja käynnistettiin konesalin IT-laitteiden virtuaalisointi. Virtuaalisoinnin myötä Meilahteen on keskitetty vuodesta 2013 lähtien kaikki sairaanhoitoon liittyvät potilassovellukset.

IT-laitteiden keskittäminen jatkuu vuoden 2015 loppuun saakka. HUS:n muihin sairaaloihin jää vain sellaisia sovelluspalvelimia, jotka palvelevat ainoastaan kyseistä sairaalaa. Tietoteknisten laitteiden keskittäminen Meilahden konesaliin selittää sen, että energiankulutuksen kasvu näkyy IT-laitteiden energian mittaustuloksissa.

4.2.1 Rittalin mittauslaitteisto ja asennetut sensorit

HUS:n konesaleihin on rakennettu Rittalin CMC III-valvontajärjestelmä vuoden 2014 alussa. Valvontajärjestelmä muodostuu CMC-prosessointiyksiköistä, verkoista ja antureista sekä RiZone-sovelluksesta. Valvontajärjestelmällä on tehty kohdekonesalissa mittauksia energiankulutuksen osalta jo 1.5.2014 lähtien. Lämpötila- ja kosteusanturit on asennettu ja otettu käyttöön vasta maaliskuussa 2015. Näiden osalta tietojen keräys on käynnistynyt 15.3.2015.

Taulukko 4.1: HUS:n konesalitilan energiankulutustietoja vuosilta 2009 – 2014. Virtualisointi on aloitettu vuonna 2012, joka on ns. vertailuvuosi.

	Kulutettu kWh	Kulutuksen muutos % vertailuvuoteen
2014	1 557 760	+5,8 %
2013	1 563 860	+6,2 %
2012	1 472 980	0 %
2011	1 453 460	-1,3 %
2010	1 375 160	-6,6 %
2009	1 312 540	-10,9 %

HUS:ssa päädyttiin Rittalin CMC -valvontajärjestelmään, koska konesalin räkit ja rivijäähdyttimet (LCP:t) sekä keskeytymättömän virransyötön järjestelmät (UPS:t) on hankittu Rittalilta, ja koska se tuottaa reaaliaikaista dataa konesalista. Etuna voidaan mainita tietojen keskitetty saanti yhden sovelluksen kautta.

CMC Valvontajärjestelmää varten konesaleihin on sijoitettu Rittalin CMC PU -prosessointiyksiköitä ja antureita. Konesalissa T1 on 6 kpl valvontajärjestelmän prosessointiyksikköä eli CMC Processing Unitia, joista neljää käytetään PSM-virtakiskojen energiakulutustietojen mittaukseen ja kahta yksikköä käytetään kosteus- ja lämpötila-antureita varten. Prosessointiyksiköt sijaitsevat konesalissa omassa erillisessä kaapissa.

Valvontajärjestelmän käyttöönotto on edellyttänyt HUS:ssa erillisen sensoriverkon rakentamista. Verkko muodostuu Rittalin prosessointi- (CMC III Processing Unit) ja väyläautomaatioyksiköistä (CAN Bus) sekä CAN Bus -kaapeloinnista. Verkon kautta tiedot siirtyvät RiZone-sovelluksen tietokantaan. Väylälaitteet sijoitetaan palvelinräkin yläosaan, jolloin ne eivät vie juurikaan tilaa varsinaisilta palvelinlaitteilta.

Käytössä on kahdenlaisia antureita, joista räkin etupuolelle on sijoitettu lämpötila-kosteusanturi ja takapuolelle lämpötila-anturi. Antureita on käytössä yhteensä 85 kpl ja ne kattavat molempien konesalien kaikki räkit. Rittalin mukaan lämpötila-anturien mittausalue on -40 – +80 °C. Lämpötila-kosteusantureiden mittausalue on lämpötilan osalta +0 – +55 °C ja suhteellisen kosteuden (RH) osalta 5 – 95 % .

RiZonea käytetään HUS:ssa konesalitoimintojen seurantaan ja valvontaan. Re-

aaliaikaista monitorointia tehdään RiZonen sovelluksen kautta. RiZone täydentää kiinteistön käyttämää taloautomaatiojärjestelmää siten, että taloautomaatio valvoo koko konesaltilaa ja RiZone yksittäisiä räkkeitä.

Sovellusta käytetään energiankulutustietojen keräämiseen, rakkien lämpö- ja kosteustietojen valvontaan. HUS:n konesalin kokonaisenergiankulutustiedot saadaan UPS-laitteilta. Kokonaiskulutuksessa on mukana talotekniikan laitteiden ja IT-laitteiden kuluttama energia. Sovelluksen keräämä historiatietoa on nähtävissä RiZone-sovelluksessa. Raakadata on siirrettävissä eri tilasto-ohjelmiin analysoitavaksi. Tutkimusta varten tietoja kerättiin, summattiin, luentasyklejä asetettiin ja tehokkuusmittareita määriteltiin analysoinnin helpottamiseksi. Ohjelmiston keräämiä tietoja analysoitiin siten, että niiden pohjalta voitiin tehdä johtopäätöksiä toiminnan ohjaimiseen.

Räkeissä on käytössä Rittalin paloilmaisu- ja sammutusjärjestelmä sekä automaattinen ovenavausjärjestelmä. Nämä on liitetty osaksi valvontajärjestelmää. Paloilmaisu- ja sammutusjärjestelmän tehtävänä on havaita räkissä esiintyvä tulipalo ja laukaista sammutuskaasu palokohteeseen automaattisesti. Oviin on kytketty automaattinen ovenavaustoiminto, jonka seurauksena ovet avautuvat, jos lämpötila räkin sisällä on yli +28 °C. Tämä varotoimi vähentää palvelimiin kohdistuvaa lämpökuormaa, mutta lisää kapasiteettipainetta vapaan ilmankierron jäähdytysjärjestelmälle.

Valvontajärjestelmään voi liittää myös muita komponentteja ja antureita, jotka on lueteltu luvussa 3.3. Rittalin CMC III -laitteeseen on integroitu myös ovien valvonta-anturit. HUS on ottamassa käyttöön vuoden 2016 aikana kulunvalvonnan seurantaan tarkoitettut ovianturit. Lisävarusteiden käyttöönotto vaatii prosessointiyksiköiden ja verkon laajentamista edellä esiteltyjen laitteiden ja kaapeleiden avulla.

4.3 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Kohdetutkimuksessa selvitettiin Rittalin mittausjärjestelmää hyödyntäen, miten konesalin energiatehokkuutta voidaan parantaa. Tutkimuksella haluttiin tuottaa käytännön tietoa konesalin energiankulutuksesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä.

Tutkimuksessa pyrittiin löytämään konesalitoimintaan liittyviä konkreettisia tuloksia, joiden perusteella konesalin toimintaa kehitetään energia- ja kustannustehokkaammaksi. Konesalitoiminnan osalta tavoitteena oli tunnistaa eri asioiden vai-

kutukset ja niihin liittyvät syy-seuraussuhteet.

Teoriaosassa esitetyistä mittareista valittiin konesalin energiatehokkuutta kuvaavat mittarit. Näitä mittareita varten konesalista kerättiin tietoa kahden mittausjakson ajan. Tavoitteeseen pääseminen edellytti, että konesalin nykytila kartoitettiin energiatehokkuuden näkökulmasta. Konesalin infrastruktuuri oli kuvattava IT-laitteistojen ja taloautomaation osalta riittävän tarkasti tietojen kartoitusvaiheessa. Konesaliympäristön mittauksia varten asennettiin alaluvussa 3.3 esitetty RiZone-ohjelmisto, tarvittavat kaapeloinnit ja mittausyksiköt.

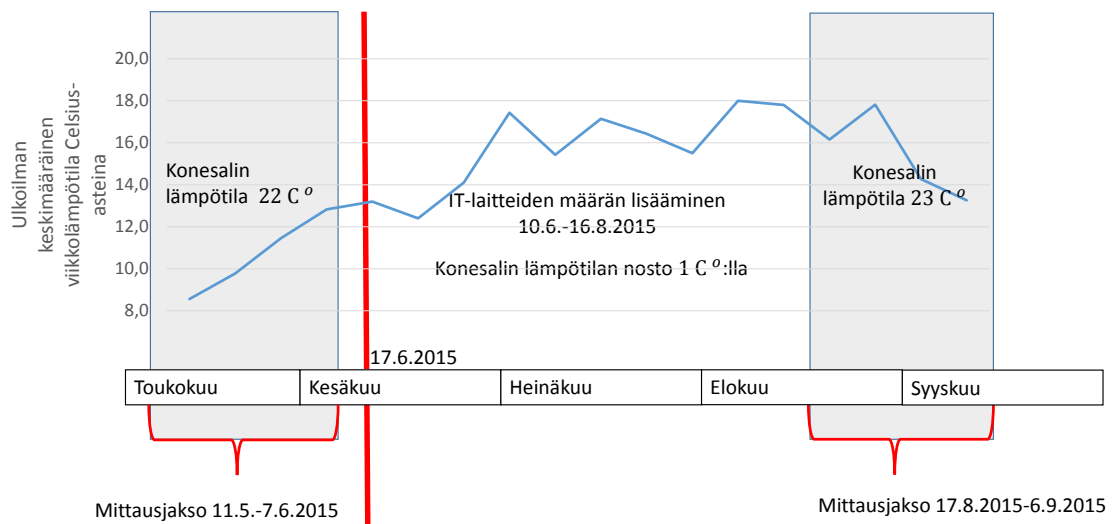
4.4 Tutkimusmenetelmä ja käytettävä mittaristo

Tutkimus on luonteeltaan kartoittava, toimintaa selittävä ja rajatussa ympäristössä toteutettu kokeellinen tutkimus. Tarkoituksena on kuvata toiminnan nykytilaa ja esittää kehittämistoimenpiteitä ja suosituksia energiatehokkuuden parantamiseksi. Tutkimusongelmaa käsitellään tapaustutkimuksen eli case-tutkimuksen kautta [41]. Työssä hyödynnetään Rittalin laitteistoja ja RiZone-ohjelmistoa, joiden avulla saadut mittaustulokset muodostavat tutkimuksen aineiston. Konesalissa on tehty muutoksia ja näiden muutosten vaikutus halutaan nähdä tutkimuksessa.

Kuvassa 4.2 on esitetty muutokset, jotka vaikuttavat konesalin energiatehokkuuteen. Ensimmäisellä mittausjaksolla konesaliympäristö laitteineen on lähes muuttumaton. Mittausjaksojen välissä konesalin lämpötilaa on nostettu yhdellä asteella ja laitemäärää kasvatettu 25 palvelimella (500 W per palvelin). Laitemäärän lisäyksestä arvioitiin energiankulutuksen kasvun olevan noin 12,5 kW. Myös toisen mittausjakson aikana laitemäärät on pyritty pitämään lähes muuttumattomina. Konesalitallassa tapahtuu aina laitteiden käyttöönottoja ja poistoja, mutta muutokset olivat niin pieniä, ettei niillä ollut vaikutusta mittaustuloksiin. Mittausjaksot on valittu siten, että ensimmäinen jakso on ennen konesalin lämpötilan nostoa ja toinen jakso lämpötilan noston ja laitemäärän lisäyksen jälkeen. Lämpötilan ja laitemäärän muutoksen vaikutus pyritään osoittamaan mittareiden avulla.

Ulkoilman keskimääräinen viikkolämpötila on esitetty kuvan 4.2 yläalaidassa. Ulkoilman lämpötila vaikuttaa vapaajähdytykseen, joka käynnistyy lämpötilaeron ollessa 8 Celsius-astetta.

Tutkimuksen haluttiin vastaavan johdannossa (luku 1) esitettyihin kysymyksiin. Kohdetutkimuksen osalta tärkein kysymys onkin, miten jatkuvia mittauksia hyödyntäen voidaan parantaa konesalin energiatehokkuutta. Tästä syystä mittareiksi



Kuva 4.2: Konesaliympäristöön liittyvät muutokset tutkimusjaksojen aikana.

valittiin infrastruktuurin mittareita, koska ne kuvaavat parhaiten konesalin energiatehokkuutta ja niiden perusteella voidaan osoittaa IT-laitteisiin ja taloautomaatioon tehtyjen muutosten vaikutuksia.

PUE (Power Usage Effectiveness) ilmaisee IT-järjestelmien energiatehokkuutta. Kohdekonesalissa mittaukset ovat PUE-luokan 3 mukaiset, mikä onkin tarkin mahdollinen mittaustaso. Toiseksi mittariksi on valittu DCiE (Data Center infrastructure Effectiveness), jolla kuvataan talotekniikan eli muun konesalin infrastruktuurin tehokkuutta. Mittausohjelmistossa on mittareiden määrittämiseksi valmiit komponentit.

5 Tutkimustulokset kohdekonesalissa

Tämä luku rakentuu kahdesta alaluvusta. Ensimmäisessä alaluvussa 5.1 esitellään tulokset ja niiden analyysi. Tulokset esitetään taulukkomuodossa viikkotasoisina aineistoina. Päiväkohtaiset tiedot on lisätty liitteeseen A. Tuloksien perusteella arvioidaan, mikä vaikutus konesalin lämpötilan nostolla ja laitemäärän kasvattamisella on konesalin kokonaisenergiatehokkuuteen. Analyysissä vertaillaan saatuja tuloksia olemassa oleviin tutkimuksiin ja tehdään niiden perustella johtopäätöksiä. Alaluvussa 5.2 pohditaan toimenpiteitä, joiden avulla konesalin energiatehokkuutta voidaan parantaa edellä saatujen tulosten perusteella.

5.1 Tulokset ja niiden analysointi

Mittausjaksoiksi valittiin kaksi erillistä jaksoa. Ensimmäinen jakso on touko-kesäkuulta ja toinen elo-syyskuulta. Konesalin laitemäärät pysyivät lähes muuttumattomina mittausjaksojen aikana. Mittausjaksojen välissä konesalin lämpötilaa nostettiin asteen verran ja IT-laitemäärää kasvatettiin 25 palvelimella. Konesalitoimintaan liittyvään talotekniikkaan ei tehty tässä yhteydessä muutoksia, jotka vaikuttaisivat mittaustuloksiin ja hankaloittaisivat tulosten analysointia. Tässä alaluvussa pyritään antamaan selitys siihen, mikä vaikutus tehdyillä toimenpiteillä oli konesalin energiatehokkuuteen.

Konesalin energiatehokkuuden arvioimiseksi tarkastellaan UPS- ja IT-laitteilta saatuja tehotietoja. Konesalin UPS:t ovat merkiltään Rittalin PMC 200 ja Eatonin Powerware PW9340. Mittauksissa hyödynnetään todellisia kulutustietoja nimellistehotietojen sijaan.

Rittalin UPS-laitteet mittaavat IT-laitteiden ja LCP-yksiköiden energiankulutusta ja Eatonin UPS:t mittaavat IT-laitteiden ja kaikkien muiden laitteiden kuluttaman energian konesalissa. Konesalin kokonaisenergiankulutuksen määrittämiseen tarvitaan molempien UPS-laitteiden tehotiedot. Rittalin Rizione-ohjelmisto kerää räkki-kohtaista tietoa mm. IT-laitteiden energiankulutuksesta kuin myös konesalin energian kokonaiskulutustiedot. HUS:n konesalien UPS:n nimellistehot on esitelty taulukossa 5.1, josta sen voidaan todeta olevan yhteensä 328 kW.

Taulukko 5.1: Konesalien UPS-laitteiden nimellistehot eriteltynä konesali- ja valmistajakohtaisesti.

	P_{UPS} (Rittal)	P_{UPS} (Eaton)
Konesali T1	60 kW	104 kW
Konesali T2	60 kW	104 kW

5.1.1 IT-tehon muutos

Konesalin IT-laitemäärää kasvatettiin mittausjaksojen välissä siten, että laitemäärä kasvoi 25 laitteella. Näiden laitteiden laskettiin aiheuttavan noin 12,5 kW tehon kasvun. IT-tehon viikkotasoinen tarkastelu ensimmäisestä ja toisesta jaksosta on esitetty taulukossa 5.2. Mittaustuloksista nähdään, että IT-teho oli ensimmäisellä jaksolla 62,5 kW ja toisella 76,4 kW. IT-teho oli jälkimmäisellä jaksolla siis 13,9 kW suurempi kuin ensimmäisellä jaksolla. Mittausjaksojen pituudet olivat molemmilla jaksoilla 28 vuorokautta. Laitteiden lisääminen näkyi siis odotetusti IT-tehon arvossa kasvuna. IT-teho kasvoi siis noin 22% (22,2 %). Vuositasolla IT-tehon lisäys aiheuttaa energiankulutukseen kasvua noin 122 kWh.

Lisättyjen palvelimien laskettiin aiheuttavan 12,5 kW tehon lisäyksen. Mittausten perusteella IT-teho kasvoi kuitenkin 13,9 kW:iin eli 1,4 kW enemmän. Tämän oletetaan johtuneen konesalin lämpötilan nostamisesta. Konesalin lämpötilan nostamisen seurauksena palvelinten virtalähteet ja tuulettimet kuluttivatkin arvioitua enemmän tehoa [97].

Laitemäärän kasvattaminen lisää myös konesalin lämpökuormaa [31]. HUS:n konesalissa laitemäärän lisäämisen seurauksena IT-teho kasvoi ja aiheutti jonkin verran myös lämpökuorman kasvua. Ghosh et al. tutkivat koejärjestelyn [31] avulla laitemäärän lisäämisen aiheuttamaa lämpökuormaa. Tutkimuksessa todettiin, että kyseisessä koejärjestelyssä laitteet aiheuttivat jopa 3 °C:een lämpötilan nousun. HUS:n konesaliin lisätyt 25 palvelinlaitetta aiheuttivat myös lämpökuormaa, mutta sen vaikutusta ei pystytty kuitenkaan erottelemaan.

5.1.2 Tehotiheyden muutos

Konesalin tehotiheys vaikuttaa IT-laitteiden jäähdytystarpeeseen kuin myös konesalin tuottavuuteen. Tehotiheyden arvot on laskettu 7.5.2015 ja 17.6.2015 konesalissa

Taulukko 5.2: Konesalien IT-kuorman teho viikkotasoinen tarkastelu viikoilta 20 – 23 ja 34 – 37.

Viikko	\bar{x}_P (kW)	σ_P (kW)	ΔP (kW)	$ \Delta_P $ (kW)
20	61,6	0,6	(60,7; 62,4)	1,7
21	62,4	0,6	(61,3; 62,0)	1,7
22	62,8	0,6	(62,2; 63,9)	1,7
23	63,1	0,2	(62,1; 63,6)	1,5
ka	62,5	0,5	(61,6; 63,2)	1,7
34	76,0	0,7	(74,8; 76,8)	2,0
35	75,9	0,5	(75,3; 76,7)	1,4
36	77,0	0,7	(75,9; 77,9)	2,0
37	76,6	0,8	(76,0; 77,7)	1,7
ka	76,4	0,7	(75,5; 77,3)	1,8

olleen laitekannan mukaan ja tulokset on esitetty taulukossa 5.3.

PD_M :lla tarkoitetaan tehotiheyttä, jolla lasketaan räkin tehokulutuksen suhde räkin pohjapinta-alaan. PD_F -tehotiheyden arvo ilmaisee IT-laitteiden tehon suhdetta pinta-alaan, joka muodostuu laitekaapin pohjan pinta-alasta, räkin edessä ja takana olevasta vapaan lattian pinta-alasta. PD_{Arc} -arvo kuvaa IT-laitteiden tehon suhdetta koko konesalin lattiapinta-alaan nähden. PD_U -tehotiheyden arvo huomioi IT:n, sähköjärjestelmien ja jäähdytyksen kuluttaman tehon koko konesalin lattiapinta-alaa kohti. Konesalin tehotiheyden laskemiseen tarvittavat kaavat on esitelty alaluvussa 2.5.2 sivuilla 21 – 24. Räkikohtainen kulutus P_R laskettiin kaavalla 2.10, josta arvoksi saatiin jälkimmäisellä jaksolla 4,8 kW.

Laitemäärän lisääminen nosti odotetusti myös konesalin tehotiheyden arvoja, jotka on laskettu mittaustiedoista ennen ensimmäistä mittaussjaksoa ja uudelleen konesalin lämpötilan noston jälkeen. Taulukon 5.3 tulokset osoittavatkin, että konesalin käyttöaste jää alhaiseksi kaikkien tiheysmittareiden osalta myös jälkimmäisellä mittaussjaksolla. Taulukon 5.3 käyttöaste on saatu arvioimalla nykyisiä arvoja rakkien maksimikapasiteettiin, mikä on laskettu 500 W laitekannan perusteella.

Räkikohtainen teho oli pienempi kuin asetettu tavoitearvo. Kohdekonesalissa P_R -arvon tavoitteeksi oli asetettu 10 kW. Näin ollen käyttöaste oli vain 48 % asete-

Taulukko 5.3: Konesalin tehotiheyden arvot HUS:n konesalissa 7.5.2015 ja 17.6.2015 olleen laitekannan mukaan laskettuna.

	kW/m ² 7.5.2015	kW/m ² 17.6.2015	max kW/m ²	käyttöaste % 7.5.2015	käyttöaste % 17.6.2015
PD_M	5,0	5,3	8,1	62	65
PD_F	1,9	2,0	3,0	62	66
PD_{Arc}	0,9	1,0	1,5	61	64
PD_U	1,2	1,3	3,2	32	35

tusta tavoitteesta. Tehotiheyden arvo on riippuvainen siitä, miten tehokkaita laitteita ja kuinka monta laitteita konesalissa ylipäätään mittaushetkellä oli. Arvojen perusteella voitiin tarkastella jäähdytykseen ja konesalin suunnitteluun ja operointiin vaikuttavia tekijöitä etenkin, jos tehotiheyden arvot muuttuisivat oleellisesti [12]. HUS:n konesalissa 25 palvelinlaitteen lisääminen ei aiheuttanut tehotiheyden arvoihin merkittäviä muutoksia.

Kohdekonesalissa laitteiden määrää voidaan edelleen kasvattaa, jolloin räkki-kohtainen tehotiheyskin kasvaa. Tämä voidaan tehdä sillä ehdolla, että jäähdytysjärjestelmä pystyy pitämään konesalin lämpötilan määritellyllä tasolla. IT-laitteiden lisäämistä rajoittava tekijä on UPS-laitteiden teho, joka on kohdekonesalissa 328 kW. Huomioimalla jäähdytys- ja UPS-kapasiteetti konesalin käyttöastetta voidaan nostaa taulukossa 5.3 esitettyihin maksimiarvoihin ilman, että jäähdytys- tai UPS-kapasiteetti olisivat riittämättömät. Tavoitteeksi asetettu 10 kW:n räkki-kohtainen kuorma on nykyisellä jäähdytys- ja UPS-kapasiteetilla mahdollista saavuttaa, mutta yli 10 kW:n tehotiheys edellyttäisi jäähdytys- ja UPS-järjestelmän kapasiteetin kasvattamista.

5.1.3 Vapaa jäähdytyksen merkitys tehonkulutukseen

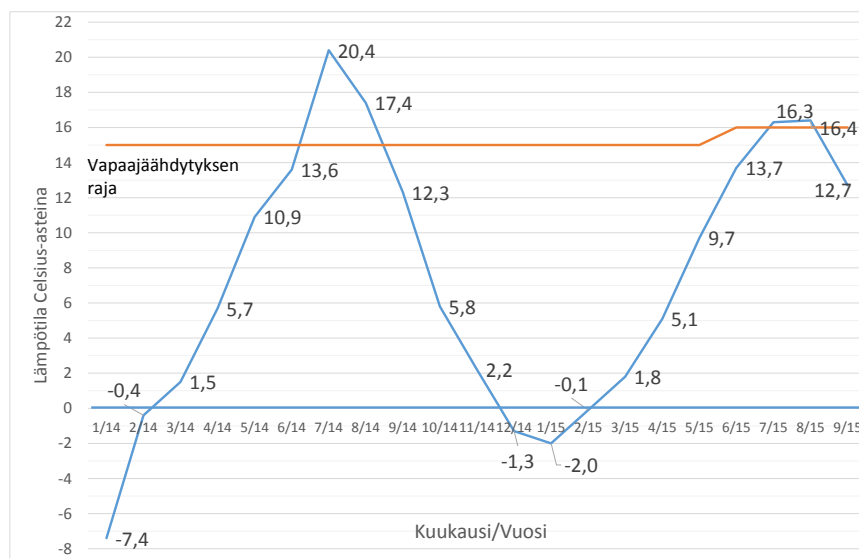
Jäähdytys kuluttaa konesaleissa eniten energiaa [45]. Jäähdytysjärjestelmän energiankulutus riippuu konesalin laitteiden tuottamasta lämmöstä ja lämpötilan vaikutuksesta laitteiden energiankulutukseen [55] sekä siitä hyödynnetäänkö vapaa jäähdytystä. Ulkoilman lämpötilan vaikutus energiatehokkuuteen näkyy siinä tapauksessa, että konesalin jäähdytysjärjestelmä hyödyntää vapaa jäähdytystä.

Ilmatieteenlaitoksen lämpötilatietojen [42] perusteella voidaan arvioida, milloin

vapaajäähdytystä on ollut mahdollista hyödyntää kohdekonesalissa. Kuvassa 5.1 on esitetty Helsingin keskilämpötiloja [42] vuoden 2014 tammikuusta lähtien syyskuuhun 2015 saakka. Vuosina 2014 – 2015 keskilämpötilaero konesalin ja ulkoilman välillä on ollut sellainen, että vapaajäähdytystä ei voitu hyödyntää heinä- ja elokuussa.

Ensimmäisellä mittausjaksolla vapaajäähdytystä hyödynnettiin lähes koko ajan eli 28 päivänä, mutta toisella jaksolla vapaajäähdytystä voitiin hyödyntää vain 19 päivänä. Päivät, joina hyödynnettiin vapaajäähdytystä, ovat nähtävissä liitteessä A. Vapaajäähdytys kytkeytyy päälle aina, kun ulkoilman ja konesalin välillä on vähintään 8 °C lämpötilaero. Kohdekonesalin osalta vapaajäähdytyksestä saatavaa hyötyä ei voida tulosten perusteella tarkasti erotella. Jäähdytykseen käytetty tehon määrä on jälkimmäisellä jaksolla kuitenkin ollut ensimmäistä jaksoa suurempi.

Vapaajäähdytystä voitiin hyödyntää toisella jaksolla hieman korkeammassa lämpötilassa, koska konesalin lämpötilaa nostettiin. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksen myötä konesalin energiankulutus väheni jälkimmäisellä jaksolla. Tästä voidaan päätellä, että konesalin lämpötilan noston vaikutus kokonaiskulutukseen on suurempi kuin laitemäärän lisäyksen ja vapaajäähdytyksen pienemmän käytön aiheuttama yhteisvaikutus.



Kuva 5.1: Helsingin keskilämpötilat kuukausitasolla esitettynä tammikuulta 2014 syyskuulle 2015. Kuvaajan tiedot on koostettu Ilmatieteenlaitokselta saatujen tietojen perusteella [42].

Tutkimuksessa [76] todettiin, että vapaajäähdytystä hyödyntävä vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä on perinteistä vapaakiertoista ja ilmajäähdytteistä järjestelmää energiatehokkaampi ratkaisu. Kohdekonesalissa oleva jäähdytysjärjestelmä on vesikiertoinen vapaajäähdytystä hyödyntävä järjestelmä, joka lisäksi hyödyntää ulkoilman kylmää ilmaa.

Saadut säästöt riippuvatkin kylmän ilman hyväksi käyttämisen mahdollisuudesta jäähdyttämisessä. Jos vapaajäähdytystä voidaan käyttää kuusi kuukautta vuodesta, niin sen lasketaan säästävän jopa 50 % jäähdytyskustannuksista [61]. Vapaajäähdytyksen käytön nostaminen 100 %:iin lisää laitteiden vikaantumisriskiä, koska konosalin lämpötilakin on tällöin korkeampi.

Lasketut säästöt pätevätkin vesikiertoiseen vapaajäähdytykseen, jos kyseessä on niin sanottu perinteinen jäähdytysjärjestelmä [83]. Vapaajäähdytyksen käyttö vähentää kohdekonesalissa jäähdytynyksiköiden käyttöä, jonka seurauksena myös niiden operointi- ja energiakustannukset vähenevät [20].

Lisäksi konosalin energiankulutukseen vaikuttaakin jäähdytyslaitteistojen kunto ja huolto sekä tehdyt toimenpiteet [36]. Kohdekonesalissakin tehdään säännöllisiä huoltotoimenpiteitä, joilla on vaikutus konosalin energiankulutukseen. Näiden toimenpiteiden vaikutusta kokonaistehon kulutukseen ei pystytä kohdetutkimusta koskevista tuloksista erottelemaan.

5.1.4 Kokonaistehon muutoksen vaikutus energiankulutukseen

Kokonaistehon muutos näkyy jaksojen mittaustuloksissa. Viikkotasoista tarkastelua varten UPS- ja IT-laitteiden päiväkohtaisista liitteen A mukaisista tuloksista on koostettu taulukko 5.4. Viikkotasoista tiedoista voitiin havaita, että konosalissa keskimääräinen teho on hieman pienentynyt (2,4 kW) jälkimmäisellä jaksolla.

Konesalin noin 1 % (1,2 %) kokonaistehon muutos on seurausta IT-kuorman kasvusta ja jäähdytystehon pienenemisestä. Laitemäärän lisäystä, lämpötilan nostamista ja ulkoilman lämpötilan vaikutusta konosalin energiankulutukseen arvioitiin myös kokonaisuutena. IT-laitteiden lisäys nosti selkeästi (13,9 kW) IT-kuorman tehonkulutusta. Myös lämpötilan nosto lisää jonkin verran IT-laitteiden energiankulutusta [59]. Toisaalta konetilan lämpötilan nosto vähensi jäähdytystehon tarvetta.

Lämpötilan noston vaikutusta konosalin kokonaistehoon voidaan arvioida poistamalla IT-kuorman lisäyksen aiheuttama tehon muutos (13,9 kW) jälkimmäisen jakson kokonaistehosta (199,0 kW). Tällöin saadaan, että kokonaisteho väheni toi-

Taulukko 5.4: Konesalien UPS:ien tehotietojen tulokset viikoilta 20 – 23 ja 34 – 37.

Viikko	\bar{x}_P (kW)	σ_P (kW)	ΔP (kW)	$ \Delta P $ (kW)
20	200,5	1,14	(199,1; 202,1)	3,0
21	200,5	0,93	(199,2; 201,4)	2,2
22	202,0	0,50	(201,3; 202,6)	1,3
23	202,6	0,59	(203,1; 203,1)	1,3
ka	201,4	0,8	(200,4;202,3)	2,0
34	199,9	0,77	(199,0; 201,1)	2,1
35	198,4	0,89	(197,5; 200,0)	2,5
36	198,5	0,48	(197,9; 199,1)	1,2
37	199,4	0,58	(198,4; 200,0)	1,6
ka	199,0	0,7	(198,2;200,1)	1,9

sella jaksolla 16,3 kW. Tämä tarkoittaa noin 8 % vähennystä. Breen et al. toteaa tutkimuksessaan [10], että jokaisen lämpötila-asteen lämmön nosto säästää energiaa 4 – 5 %, koska jäähdyttämisen tarve vähenee.

5.1.5 Muutosten vaikutus mittareihin

Taulukossa 5.5 on esitetty PUE- ja DCiE-arvot viikkotasolla. PUE-arvolla ei ole yksikköä ja DCiE-arvo ilmoitetaan prosentteina. Aikaisemmin todettiin, että DCiE on PUE:n käänteisarvo. DCiE-arvon kasvaessa konesalin talotekniikan laitteiden energiatehokkuus paranee. Arvojen kehityssuunta on nähtävissä näiden kahden erillisen mittausjakson välillä. Kokonaisteho ensimmäisellä mittausjaksolla oli 201,4 kW: ja IT-kuorma 62,5 kW:a, josta saatiin PUE-arvoksi

$$PUE = \frac{201,4 \text{ kW}}{62,5 \text{ kW}} = 3,2.$$

Kokonaisteho väheni toisella mittausjaksolla 199,0 kW:iin, mutta IT-kuorma kasvoi 76,4 kW:iin. PUE-arvoksi saatiin jälkimmäisellä jaksolla

$$PUE = \frac{199,0 \text{ kW}}{76,4 \text{ kW}} = 2,6.$$

Jälkimmäisellä mittausjaksolla PUE:n arvo pieneni selkeästi arvosta 3,2 arvoon 2,6. DCiE:n arvo kasvoi huomattavasti ensimmäiseen jaksoon verrattuna arvosta 31

Taulukko 5.5: Konesalien PUE- ja DCiE-arvot viikkotasolla ensimmäiseltä ja toiselta mittausjaksoilta.

Viikko	PUE	DCiE (%)
20	3,3	31
21	3,2	31
22	3,2	31
23	3,2	31
ka	3,2	31
34	2,6	38
35	2,6	38
36	2,6	39
37	2,6	38
ka	2,6	38

% arvoon 38 %. PUE-arvon pieneneminen ja DCiE-arvon kasvaminen kertoivat konesalin energiantehokkuuden paranemisesta, johon vaikuttivat IT-kuorman kasvu ja jäähdytystarpeen väheneminen [54]. Tuloksista voitiin todeta, että vaihtelu viikkotasosten PUE- ja DCiE-arvojen välillä oli erittäin vähäistä.

Toisen mittausjakson tulokset osoittivat, että PUE-arvo parani 0,6 yksikköä ja DCiE 7 %-yksikköä. Arvojen paranemisesta huolimatta ne ovat korkeampia kuin tyypilliset konesalista mitatut PUE- ja DCiE-arvot [15]. HUS:n konesalin energiakulutuksessa on parannettavaa edelleenkin, kun verrataan Stanfordin yliopistossa tehtyyn tutkimukseen [96]. Tutkimuksen mukaan konesalin PUE-arvo voidaan saada alle 2,0:n hyödyntämällä mm. vapaajäähdytystä. Tutkimuksessa [96] arvioidaan, että PUE:n keskimääräiset arvot ovat konesaleissa 1,8 – 1,9.

HUS:n konesalissa DCiE-arvo kasvoi, koska kokonaisenergiankulutus pieneni hieman ja IT-kuorma kasvoi huomattavasti jälkimmäisellä mittausjaksolla. Kun jäähdytystarve on vähentynyt, niin sen oletettiin vaikuttaneen myös mittareiden arvoihin [98]. Kohdekonesalista laskettuja PUE- ja DCiE-arvoja voitiin pitää suuntaa antavina.

5.2 Suosituksia konesalin energiankulutuksen vähentämiseksi

Energiansäästöä tavoitellaan ohjelmistojen, IT-laitealustojen, konesalin sijainnin ja laitteistojen kautta [39]. Konesalissa energiaa kuluttavat IT-laitteet, jäähdytys ja muut konesaliin kuuluvat laitteet. Optimoimalla konesalia siitä saadaan energiatehokkaampi tila. Energiankulutukseen vaikuttavat myös talotekniikan järjestelmät, johon kuuluvat mm. jäähdytysjärjestelmät. Konesalin olosuhteen, kuten lämpötila ja kosteus, vaikuttavat konesalin energiankulutukseen. Lämpötilalla on merkittävä vaikutus vaikuttaa jäähdytyksen energiankulutukseen.

Edellisen analyysin perusteella konesalin sisälämpötilan nostaminen vaikuttaa eniten konesalin energiankulutuksen vähenemiseen. Jos konesalin lämpötilaa voidaan edelleen nostaa, niin jokaisen nostetun lämpöasteen seurauksena säästetään energiaa n. 4–5 % [10]. Lämpötilan nosto vähentää entisestään lämpökuorman poistamista konesalista. Laitemäärän kasvattaminen lisää myös konesalin energiankulutusta. Lisätty laitekanta tuottaa konesalitalaan myös enemmän lämpökuormaa ja, jos se joudutaan poistamaan, niin konesalin energiankulutus kasvaa. Koska konesalin lämpötilan nostamisella on merkittävä vaikutus energiankulutuksen vähenemiseen, niin suositeltavaa onkin tutkia mahdollisuudet nostaa konesalitalan lämpötilaa.

Jos konesalin lämpötilan nostaminen on mahdollista, niin silloin myös vapaajäähdytyksen käyttäminen korkeammassa ulkolämpötiloissa on mahdollista. Vapaajäähdytys kytkeytyy jäähdytinjärjestelmässä päälle, kun sille asetettu lämpötila-arvo saavutetaan. Jos vapaajäähdytystä voidaan käyttää vielä enemmän, se parantaa konesalin energiatehokkuutta [61].

Hukkalämmön hyödyntäminen muussa toiminnassa vähentää energiankulutusta. Kohdekonesalissa ei ole lämmöntalteenottojärjestelmää, vaan se vaatii olemassa olevan järjestelmän uusimisen. Warc et al. on tutkimuksessaan [93] kokeellisesti osoittanut, miten hukkalämpöä voi hyödyntää konesalin lähellä olevissa tiloissa. Tätä mahdollisuutta on hyvä tutkia kohdekonesalin hukkalämmön osalta.

Edellä esitetyt toimenpiteet saattavat aiheuttaa konesalitoiminnalle riskejä, joita tulee hallita erilaisten varajärjestelmien ja suunnitelmien avulla. Muutosten vaikutukset kannattaakin arvioida etukäteen. Lämmön vuoksi vikaantuneiden laitteiden korjauskustannukset saattavat olla suurempia kuin saatava hyöty. Konesalin laitekanta voi olla hyvinkin eri-ikäistä, jolloin korkeampi lämpötila saattaa aiheuttaa ongelmia palvelimen suorituskykyyn tai vaikuttaa laitteen käyttöikänsä. Konesalin korkea sisälämpötila on huomioitava konesalin operoinnissakin. Jäähdytysjärjestel-

män vikaantuessa konesalin lämpötilan nouseminen tasolle, jolloin laitteet hajoavat, tapahtuu entistä lyhemmällä ajalla [10].

Konesaliympäristö vaatii jatkuvaa seuranta ja se voidaan toteuttaa mittausten avulla. HUS:ssa RiZonen käyttöönoton on todettu tehostaneen päivittäistä konesali-toimintaa. Taloautomaation laitteet kytketään osaksi mittausverkkoa lisäämällä tarvittavat anturit. Tällöin IT-laitteiden ja taloautomaatiojärjestelmien energiankulutus on saatavissa yhdestä sovelluksesta. Pientenkin muutosten vaikutukset ovat tällöin helpommin havaittavissa.

Laitekannan uusiminen virtualisoinnin ja konsolidoinnin avulla [30] on yhtä tärkeää kuin konesalin olosuhteiden muuttaminen. Jatkuvia mittauksia hyödyntäen konesalin energiatehokkuuden tilaa voidaan arvioida säännöllisesti. Tehtyjen muutosten vaikutukset näkyvät konesaliympäristöön valituissa mittareissa, joita voivat olla infrastruktuurin, tilan tai tehokkuuden mittarit.

6 Yhteenveto

Työ käsitteli energiatehokkuudenarviointia konesalissa ja miten konesalitila voidaan muuttaa energiatehokkaaksi tilaksi. HUS:n konesalissa hyödynnettiin Rittalin ohjelmistoja ja laitteita. RiZone-mittausohjelmiston käyttöönotto energiatehokkuuden maaliskuussa 2015 mahdollisti reaaliaikaisen tietojen keräämisen ja tallentamisen.

Kohdetutkimuksessa hyödynnettiin RiZone-ohjelmistoa, joka keräsi tarvittavat mittaustiedot konesalin laitteilta analyysia varten. Mittaukset suoritettiin kahtena erillisenä jaksone. Ensimmäinen mittausjakso oli touko-kesäkuussa, jolloin voitiin hyödyntää vapaajäähdytystä koko mittausjakson ajan. Toinen mittausjakso oli elosyyskuussa, jolloin vapaa jäähdytystä hyödynnettiin vähemmän. Mittausjaksojen välissä konesalin lämpötilaa nostettiin asteen verran ja IT-laitteita lisättiin 25 palvelimella. Mittausjaksojen aikana hyödynnettiin vapaajäähdytystä. Tutkimuksessa haluttiin nähdä tehtyjen toimenpiteiden vaikutus tuloksiin ja mittareihin.

Tutkimusongelmassa keskityttiin konesalin energiatehokkuuden arviointiin teorian ja käytännön kautta. Arvioinnissa hyödynnettiin mittauksia, olemassa olevia mittareita ja etsittiin syy-seuraussuhteita siihen, mitkä tekijät vaikuttavat konesalin energiatehokkuuteen. Jatkuvat mittaukset ovatkin yksi keino selvittää konesalin tilaa ja parantaa energiatehokkuutta. Rajatussa ympäristössä toteutettu tutkimus on luonteeltaan kartoittava tutkimus ja sen avulla pyritään selittämään toimintaa.

Laitemäärän lisäämisen, vapaajäähdytyksen käytön ja lämpötilan noston vaikutukset näkyivät mittaustuloksissa. IT-teho kasvoi laitemäärän lisäämisen jälkeen noin 22 %. Laitteiden lisääminen kohensi myös hieman konesalin tehotiheyttä ja räkkikohtaiseksi tehotiheydeksi saatiin 4,8 kW. Lämpötilan noston arvioitiin säättävän noin 4 – 5 %:a energiankulutuksessa ja tässä tutkimuksessa tulokseksi saatiin noin 8 %. Ensimmäisellä mittausjaksolla PUE-arvo oli 3,2 ja DCiE-arvo 31 %. PUE-arvo parani 0,6 yksikköä ja DCiE 7 %-yksikköä. Toisella mittausjaksolla tulokset olivat siis PUE:n osalta 2,6 ja DCiE:n osalta 38 %.

Analyysin avulla voitiinkin antaa selitys siihen, mitkä tekijät vaikuttivat konesalin energiatehokkuuteen. Tämä voitiin myös todentaa tuloksista, jossa tutkittiin IT-laitteiden lisäämisen, vapaajäähdytyksen ja konesalin lämpötilan noston vaiku-

tusta konosalin energiatehokkuuteen. Tuloksista todettiin, että IT-laitteiden lisääminen lisäsi konosalin energiankulutusta, mutta vapaajäähdytyksen käyttö ja konosalin lämpötilan nosto puolestaan vähensivät energiankulutusta. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta konosalin kokonaistehon kulutus väheni noin 1 % jälkimmäisellä mittausjaksolla. Yhden lämpötila-asteen noston vaikutus energiankulutukseen oli noin 8 %. Työssä esiteltyjen lähteidenkin mukaan tehdyt toimenpiteet vaikuttavat esitelyllä tavalla konosalin energiankulutukseen.

Tehtyjen muutosten perusteella voitiin tunnistaa eri asioiden vaikutukset ja niihin liittyvät syy-seuraussuhteet. Tulosten perusteella konosalissa voidaan saada merkittäviä kustannussäästöjä, jopa ilman investointeja. Asetettu tavoite etsiä keinoja energiankulutuksen vähentämiseksi täyttyi odotusten mukaisesti. Voidaan olettaa, että vastaavien toimenpiteiden tekeminen, missä tahansa konosalissa tulee säästämään energiaa. Tässä työssä esitettyjä tuloksia ja analyysejä voin hyödyntää myös omassa työssäni. Kohdekonosalissa oleva jatkuvatoimisen mittausjärjestelmän hyötynä onkin se, että muutosten vaikutusta voidaan seurata myös reaaliaikaisesti.

Jatkotutkimuksessa voitaisiin tutkia mahdollisuutta hukkalämmön hyödyntämiseen muussa toiminnassa. Tällöin voidaan ottaa käyttöön myös uusia mittareita, tehtyjen muutosten vaikutus saadaan näkymään myös mittareiden tuloksissa. Tämän lisäksi nykyistä mittausympäristöä laajennetaan koskemaan myös taloautomaation järjestelmiä. Tällöin myös niihin tehdyt muutokset nähdään tuloksissa. Energiatehokkuuden arviointi ja mittausten tekeminen konesaleissa ei ole Suomessa vielä yleistynyt.

Lähteet

- [1] AGIS FIRE AND SECURITY. Kaasusammutusjärjestelmät, 2012. URL: <http://www.agisfs.fi/kaasusammutusjaerjestelmaet>, viitattu 14.1.2015.
- [2] AIREDALE APPLIED THERMAL INNOVATION. Precision air conditioning, 2015. URL: <http://www.airedale.com/web/Products/Precision-Air-Conditioning.htm>, viitattu 18.1.2015.
- [3] AL-HAZEMI, F. A polymorphic green service approach for data center energy consumption management. Julkaisusarjassa *Proceedings of IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, Green Computing and Communication* (2013), pp. 110–117.
- [4] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. 2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments - Expanded Data Center Classes and Usage Guidance. Tekninen raportti, ASHRAE, 2011. URL: http://ecoinfo.cnrs.fr/IMG/pdf/ashrae_2011_thermal_guidelines_data_center.pdf, viitattu 11.1.2015.
- [5] ANDERSON, D., CADER, T., DARBY, T., GRUENDLER, N., HARIHARAN, R., HOLLER, A., LINDBERGA, C., JA LONG, C. A Framework for Data Center Energy Productivity. Tekninen raportti, The Green Grid, 2008. URL: <http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WhitePaper13FrameworkforDataCenterEnergyProductivity5908.ashx?lang=en>, viitattu 14.12.2014.
- [6] ANDREA, M. Data Center Standards, Data Center Size and Density, White Paper. Tekninen raportti, 2014. URL <http://www.afcom.com/wp-content/uploads/2014/10/Strategic-Directions-DCISE-Size-Density-Standards-v3.01.pdf>, viitattu 12.4.2015.
- [7] ASHRAE. About ASHRAE, 2014. URL: <https://www.ashrae.org/about-ashrae>, viitattu 18.1.2015.

- [8] AVELAR, V., AZEVEDO, D., JA FRENCH, A. PUE: A Comprehensive Examination of the metric. Tekninen raportti, The Green Grid, 2012. URL: http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf?lang=en, viitattu 3.12.2014.
- [9] BELADY, C. The Green Grid data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE. Tekninen raportti, The Green Grid, 2007. URL: http://www.premiersolutionsco.com/wp-content/uploads/TGG_Data_Center_Power_Efficiency_Metrics_PUE_and_DCiE.pdf, viitattu 6.12.2014.
- [10] BREEN, T. J., WALSH, E. J., PUNCH, J., SHAH, A. J., JA BASH, C. E. From chip cooling tower data center modelling: Part I Influence of server inlet temperature and temperature rise across cabinet. Julkaisusarjassa *Proceedings of 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2012), pp. 1–10.
- [11] BRENNER, P., JANSEN, R., GO, D., JA THAIN, D. Environmentally Opportunistic Computing Transforming the Data Center for Economic and Environmental Sustainability. Julkaisusarjassa *Proceedings of International Green Computing Conference* (2010), pp. 383–388.
- [12] BRILL, K. G. 2005-2010 Heat Density Trends in Data Processing, Computer systems, and Telecommunications Equipment. Tekninen raportti, The Uptime Institute, Inc., 2006. URL http://www.lamdahellix.com/assets/contents/files/2005_2010_HeatDensity.pdf, viitattu 28.10.2015.
- [13] CAPPUCCIO, D. J., JA CECCI, H. Cost Containment and a Data Center Space Efficiency Metric. Tekninen raportti, Gartner Inc., 2012. URL: http://www.gartner.com/resources/235200/235289/cost_containment_and_a_data__235289.pdf, viitattu 10.12.2014.
- [14] CHOI, J., GOVINDAN, S., URGAONKOR, B., JA SIVASUBRAMANIAM, A. Profiling, prediction, and capping of power consumption in consolidated environments. Julkaisusarjassa *Proceedings of IEEE International Symposium on Modelling, Analysis and Simulation of Computers and Telecommunications Systems* (2008), pp. 1–10.

- [15] CHOO, K., GALANTE, R. M., OHADI, M., JA COOPER, D. Measured and simulated energy consumption analysis of data center on an academic campus. *Julkaisusarjassa Proceedings of 29th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (2013)*, pp. 231–237.
- [16] CIOARA, T., ANGHEL, I., ANTAL, M., CRISAN, S., JA SALOMIE, I. Data Center Optimization Methodology to Maximize the Usage of Locally Produced Renewable Energy. *Julkaisusarjassa Proceedings of Sustainable Internet and ICT for Sustainability (2015)*, pp. 1–8.
- [17] CISCO SYSTEM, INC. Data Center Power and Cooling, White Paper. Tekninen raportti, Cisco, 2011. URL: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-computing/white_paper_c11-680202.pdf, viitattu 18.1.2015.
- [18] CISCO SYSTEMS INC. Cisco EnergyWise IOS Configuration Guide, EnergyWise Version 2.8. Tekninen raportti, 2014. URL http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/energywise/version2_8/ios/configuration/guide/b_ew_cg_2_8.pdf, viitattu 20.8.2015.
- [19] CISCO SYSTEMS INC. Cisco Energy Management Suite. Tekninen raportti, 2015. URL <http://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/switches/energymanagement-technology/at-a-glance-c45-729541.pdf>, viitattu 17.11.2015.
- [20] DAVID, M. P., JA SCHMIDT, R. R. Impact of ASHRAE Environmental Classes on Data Center. *Julkaisusarjassa Proceedings of IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (2014)*, pp. 1092–1099.
- [21] DELL INC. What is a server?, 2009. URL: http://www.dell.com/downloads/us/bsd/What_Is_a_Server.pdf, viitattu 7.12.2014.
- [22] DEMETRIOU, D. W., JA KHALIFA, H. E. Effect of Virtualization on the Cooling Infrastructure’s Power Consumption in Enclosed Aisle Data Centers. *Julkaisusarjassa Proceedings of 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (2012)*, pp. 358–366.

- [23] DENG, W., LIU, F., JIN, H., LI, B., JA LI, D. Harnessing Renewable Energy in Cloud Datacenters: Opportunities and Challenges. *Journal of IEEE Network* 28, 1 (2014), 48–55.
- [24] DUNLAP, K., JA RASMUSSEN, N. Choosing Between Room, Row and Rack-based Cooling for Data Centers, White Paper 130. Tekninen raportti, 2012. URL http://www.apcmedia.com/salestools/VAVR-6J5VYJ/VAVR-6J5VYJ_R2_EN.pdf, viitattu 26.11.2014.
- [25] EATON CORPORATION. Alternative data center power, White Paper 09-08. Tekninen raportti, 2009. URL http://lit.powerware.com/11_download_bylitcode.asp?doc_id=11669, viitattu 21.12.2014.
- [26] EBBERS, M., ARCHIBALD, M., DA FONSECA, C. F. F., GRIFFEL, M., PARA, V., JA SEARCY, M. *Smarter Data Centers: Arcieving Greater Efficiency*. International Business Corporation, New York, 2011.
- [27] EMERSON NETWORK POWER. Data Center Infrastructure Management, Managing the Physical Infrastructure for Greater Efficiency, 2012. URL: <http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/en-us/products/monitoring/documents/sl-32005.pdf>, viitattu 20.8.2015.
- [28] EUROOPAN UNIONIN VIRALLINEN LEHTI. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/32/EY, annettu 5 päivänä huhtikuuta 2006, energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalveluista sekä neuvoston direktiivin 93/76/ETY kumoamisesta, 2006. URL: http://www.buildup.eu/sites/default/files/2006032fi_p2822.pdf, viitattu 7.1.2015.
- [29] EUROPEAN COMMISSION INFORMATION SOCIETY. Energy Efficiency of the ICT Sector, 2014. URL: http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/ict_sector/index_en.htm, viitattu 3.12.2014.
- [30] FRANCALANCI, C., GIACOMAZZI, P., JA POLI, A. Cost-Performance Optimization of Application and Context-Aware Distributed Infrastructure. *Journal of IEEE Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans* 39, 6 (2009), 1200–1213.

- [31] GHOSH, R., SUNDARALINGAM, V., JA JOSHI, Y. Effect of Rack Server Population on Temperatures in Data Centers. Julkaisusarjassa *Proceedings of 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2012), pp. 30–37.
- [32] GLOBAL ACTION PLAN. Green ict handbook. Tekninen raportti, 2009. URL: <http://greenict.org.uk/sites/default/files/Green%20ICT%20Handbook.pdf>, viitattu 17.11.2015.
- [33] GODBOLE, N. S., JA LAMB, J. Calculating a Hospital’s IT Energy Efficiency and Determining Cost Effective Ways for Improvement. Julkaisusarjassa *Proceedings of 11th International Conference and Expo on Emerging Technologies for a Smarter World* (2014), pp. 1–6.
- [34] HACKENBERG, D. The Plenum Concept Improving Scalability, Security, and Efficiency for Data Centers. Julkaisusarjassa *Proceedings of IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2014), pp. 1137–1144.
- [35] HAKANEN, P., HAKALA, P., JA KARPPINEN, E. *Varavoimallaitokset, ST-käsikirja 31*. Sähkötieto Oy, Espoo, 2013.
- [36] HANNAFORD, P. Ten Steps to Solving Cooling Problems Cause by High-Density Server Deployment. Julkaisusarjassa *Proceedings of 27th International Telecommunications Conference* (2005), pp. 609–616.
- [37] HANSTEIN, B., SCHMIDT, M., JA WELLER, T. RiZone - The Rittal Management Software for IT infrastructures. Tekninen raportti, Rittal GmbH Company, 2010. URL: <http://www.rittal.de/downloads/rimatrix5/RiZoneWhitePaper-V2.5-e.pdf>, viitattu 15.3.2015.
- [38] HAVERINEN, N., HYYPPÄ, P., JA KÄNKÄNEN, R. TIKO-Environmental rating for Data Center. Tekninen raportti, Liikenne- ja Viestintäministeriö, 2014. URL https://www.lvm.fi/docs/en/3082174_DLFE-24890.pdf, viitattu 17.11.2015.
- [39] HAYWOOD, A., SHERBECK, J., PHELAN, P., VARSAMOPOULOS, G., JA GUPTA, S. K. S. A sustainable data center with heat-activated cooling. Julkaisusarjassa *Proceedings of 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2010), pp. 1–7.

- [40] HILTY, L. M., AEBISCHER, B., JA RIZZOLI, A. E. Modeling and evaluating the sustainability of smart solutions. *Environmental Modelling and Software* 56 (2014), 1–5.
- [41] HIRSJÄRVI, S., REMES, P., JA SAJAVAARA, P. *Tutki ja kirjoita*. Tammi, Helsinki, 2014.
- [42] ILMATIETEEN LAITOS. Ilmasto, Viimeisen 30 vuorokauden sää. URL <http://ilmatieteenlaitos.fi/viimeisen-30-vrk-saa>, viitattu 25.9.2015.
- [43] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Energy efficiency and renewables, 2014. URL: http://www.iso.org/iso/home/news_index/iso-in-action/energy.htm, viitattu 12.12.2014.
- [44] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC JTC 1/SC 39 Sustainability for and by Information Technology, 2015. URL: http://www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/other_bodies/iso_technical_committee.htm?commid=654019, viitattu 5.12.2015.
- [45] IYENGAR, M., DAVID, M., PARIDA, P., KAMATH, V., KOCHUPARAMBIL, B., GRAYBILL, D., SCHULTZ, M., GAYNES, M., SIMONS, R., SCHMIDT, R., JA CHAINER, T. Extreme Energy Efficiency using Water Cooled Servers Inside a Chiller-less Data Center. Julkaisusarjassa *Proceedings of 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2012), pp. 176–186.
- [46] JÄÄSKELAINEN, A., LAIHONEN, H., LÖNQVIST, A., PEKKOLA, S., SILLANPÄÄ, V., JA UKKOLA, J. *Arvoa palvelutuotannon mittareista*. Juvenes Print, Tampere, 2013.
- [47] JOSHI, Y., JA KUMAR, P. *Energy Efficient Thermal Management of Data Centers*. Springer-Verlag, New York, 2012.
- [48] KIM, Y., GURUMURTHI, S., JA SIVASUBRAMANIAM, A. Understanding the Performance-Temperature Interactions in Disk I/O of Server Workloads. Julkaisusarjassa *Proceedings of 12th International Symposium on High-Performance Computer Architecture* (2006), pp. 176–186.

- [49] KLEIN, L. J., SCHAPPERT, M., JA HAMANN, H. F. Corrosion Risk Management in IT Facilities. *Julkaisusarjassa Proceedings of 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (2012)*, pp. 353–357.
- [50] KLINGERT, S., BERL, A., BECK, M., SERBAN, R., DI GIROLAMO, M., GIULIANI, G., DE MEER, H., JA SALDEN, A. Sustainable energy management in data center through collaboration. *Julkaisusarjassa Lecture notes in Computer Science, 7396*.
- [51] LAAN, S. *IT Infrastructure Architecture: Infrastructure Building Blocks and Concepts*. Lulu Press Inc. North Carolina, 2011.
- [52] LIU, J., ZHAO, F., O'REILLY, J., SOUAREZ, A., MANOS, M., LIANG, C.-J. M., JA TERZIS, A. Project Genome: Wireless Sensor Network for data Center Cooling. *The Architecture Journal 18 (2008)*, 30–36.
- [53] LIU, W., CUI, Y., ZHAO, D., JA LONG, Y. Research on reliability cost-benefit analysis and optimization for distribution network planning based on multi-measures decomposition. *Julkaisusarjassa Proceedings of China International Electricity Distribution (2014)*, pp. 57–60.
- [54] LU, T., LÜ, X., REMES, M., JA VILJANEN, M. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. *Energy and Buildings 43 (2011)*, 3360–3372.
- [55] MALKAMÄKI, T., JA OVASKA, S. J. Data centers and energy balance in Finland. *Julkaisusarjassa Proceedings of International Green Computing Conference (2012)*, pp. 1–6.
- [56] MOTIVA. *Energiatehokas konesali*. Motiva, 2011.
- [57] NURMINEN, J. K., STRANDMAN, J., KOSKELA, K., JA NIEMI, T. Computing Heaters - An Energy-efficient Way to Provide Computing Services. *Julkaisusarjassa Proceedings of 15th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (2015)*, pp. 935–942.
- [58] PATTERSON, M. Water Usage Effectiveness (WUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric. *Tekninen raportti, The Green Grid, 2011*. URL: <http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WUE>, viitattu 16.12.2014.

- [59] PATTERSON, M. K. The Effect of Data Center Temperature on Energy Efficiency. *Julkaisusarjassa Proceedings of 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2008), pp. 1167–1174.
- [60] PAUL, D., YEATES, D., JA CADLE, J. *Business Analysis*. British Computer Society, Swindon, 2010.
- [61] PAWLISH, M., JA VARDE, A. S. Free Cooling: A Paradigm Shift in Data Centers. *Julkaisusarjassa Proceedings of 5th International Conference on Information and Automation for Sustainability* (2010), pp. 347–352.
- [62] PAWLISH, M., VARDE, A. S., ROBILA, S. A., JA RANGANATHAN, A. A Call for Energy Efficiency in Data Centers. *ACM SIGMOD Record* 43, 1 (2014), 45–51.
- [63] QIAN, W., JA QINGLIN, M. A New Energy-Saving Air handling Unit for Clean Operating Room. *Julkaisusarjassa Proceedings of IEEE International Conference on Digital Manufacturing* (2010), pp. 58–62.
- [64] RARITAN INTERNATIONAL. Power IQ - DCIM Monitoring Software, 2015. URL: http://ram.raritanassets.com/resources/data_sheets/raritan-ds-poweriq-low-res.pdf, viitattu 20.8.2015.
- [65] RASMUSSEN, N. Guideline for Specification of Data Center Power Density, White Paper 120. Tekninen raportti, 2005. URL <http://www.apcdistributors.com/white-papers/Cooling/WP-120%20Guidelines%20for%20Specification%20of%20Data%20Center%20Power%20Density.pdf>, viitattu 18.11.2014.
- [66] RASMUSSEN, N. The Different Types of Air Distribution for IT Environments, White Paper 55, rev. 3. Tekninen raportti, 2012. URL http://www.apcmedia.com/salestools/NRAN-5TN9QM/NRAN-5TN9QM_R3_EN.pdf, viitattu 18.11.2014.
- [67] RITTAL. CMC III - valvontajärjestelmä. Tekninen raportti, 2014. URL <http://www.rittal.fi>, viitattu 22.4.2015.
- [68] RITTAL GMBH COMPANY. CMC-TC Master DK 7320.000, Installation and Operating Instructions. Tekninen raportti, Rittal, 2006. URL: http://www.rittal.de/downloads/Software/en/CMC_TC/11_CMC_TC_Master/7320000V11e.pdf, viitattu 23.03.2015.

- [69] RITTAL GMBH COMPANY. RiZone The Rittal management software for IT Infrastructure, Operating Manual. Tekninen raportti, 2011. URL http://www.rittal.de/downloads/rimatrix5/software/Manual_Rizone_V05_en.pdf, viitattu 22.4.2015.
- [70] RODRIGUEZ, M. G., URIARTE, L. E. O., JIA, Y., YOSHII, K., ROSS, R., JA BECKMAN, P. H. Wireless Sensor Network for Data-Center Environmental Monitoring. Julkaisusarjassa *Proceedings of 5th International Conference on Sensing Technology* (2011), pp. 533–537.
- [71] SÄHKÖTIETO OY. *Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät, ST-käsikirja 20*. Sähkötieto Oy, Espoo, 2005.
- [72] SAIFULLAH, A., SANKAR, S., LIU, J., LU, C., CHANDRA, R., JA PRIYANTHA, B. CapNet A Real-Time Wireless Management Network for Data Center Power Capping. Julkaisusarjassa *Proceedings of IEEE Real-Time Systems Symposium* (2014), pp. 334–345.
- [73] SCOFIELD, B., JA HAYDEN, P. Keeping Cool In the Data Center: A High - Efficiency Modular Solution. Julkaisusarjassa *Proceedings of 32nd International Telecommunications Energy Conference* (2010), pp. 1–5.
- [74] SPEC. Standard Performance Evaluation Corporation, 2014. URL: <https://www.spec.org>, viitattu 7.12.2014.
- [75] STRUTT, S. Data Center Efficiency and IT Equipment Reliability at Wider operating Temperature and Humidity Ranges. Tekninen raportti, The Green Grid, 2011. URL: <http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP50-Data%20Center%20Efficiency%20and%20IT%20Equipment%20Reliability%20at%20Wider%20Operating%20Temperature%20and%20Humidity%20Ranges.pdf?lang=en>, viitattu 7.12.2014.
- [76] SUJATHA, C., JA ABIMANNAN, S. Energy Efficient Free Cooling System for data Centers. Julkaisusarjassa *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science* (2011), pp. 646–651.
- [77] SUOMEN STANDADISOIMISLIITTO SFS RY. *SFS-käsikirja 1*. Suomen standardimisliitto, Helsinki, 2013.

- [78] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. Methodology for energy consumption and greenhouse gas emissions impact assessment of information and communication technologies in organizations. Tekninen raportti, ITU-T, 2012. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-L.1420-201202-I/en/>, viitattu 3.12.2014.
- [79] THE GREEN GRID. Green grid Metrics, Describing Datacenter Power Efficiency, White paper, 2007. URL: http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/Green_Grid_Metrics_WP.ashx?lang=en, viitattu 6.12.2014.
- [80] THE GREEN GRID. Recommendations for Measuring and Reporting Overall Data Center Efficiency. Tekninen raportti, The Green Grid, 2010. URL: http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/downloads/Data_Center_Metrics_Task_Force_Recommendations_V2.pdf?6107-55e3, viitattu 7.12.2014.
- [81] THE GREEN GRID. Using CUE and WUE to Improve Operations in Your Data Center, 2012. URL: <https://www.thegreengrid.org/~media/Forum2012/TGGForum2012-Using%20CUE%20and%20PUE%20to%20Improve%20Operations%20in%20Your%20Data%20Center.pdf?lang=en>, viitattu 28.11.2014.
- [82] TSUDA, K., TANO, S., JA ICHINO, J. Using Naturally Cold Air and Snow for Data Center Air-Conditioning and Humidity Control. *Electrical Engineering in Japan* 190, 1 (2015), 45–58.
- [83] UDAGAVA, Y., WARAGAI, S., YANAGI, M., JA FUKUMITSU, W. Study on Free Cooling Systems for Data Centers in Japan. Julkaisusarjassa *Proceedings of 32nd IEEE International Telecommunications Energy Conference* (2010), pp. 1–5.
- [84] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Data Center Rack Cooling with Rear-door Heat Exchanger, 2010. URL: <https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/rdhx-doe-femp.pdf>, viitattu 21.12.2014.
- [85] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY ENERGY STAR PROGRAM. Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency Public Law 109-431. Tekninen raportti, 2007. URL <https://escholarship.org/uc/item/74g2r0vg#page-1>, viitattu 18.11.2014.

- [86] VALTIONVARAINMINISTERIÖ. *Sisäverkko-ohje 3/2010*. Juvenes Print Tampereen yliopistopaino Oy, 2010.
- [87] VALTIONVARAINMINISTERIÖ. *Toimitilojen tietoturvaohje 2/2013*. Juvenes Print Tampereen yliopistopaino Oy, 2013.
- [88] VERDUN, G. Data Center Infrastructure Efficiency (DCIE) Detailed Analysis, White Paper 14. Tekninen raportti, The Green Grid, 2008. URL: http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/White_Paper_14_-_DCiE_Detailed_Analysis_072208.pdf, viitattu 7.12.2014.
- [89] VERITAS TECHNOLOGIES LLC. Veritas NetBackup 7.7, 2014. URL: https://www.veritas.com/content/dam/Veritas/docs/data-sheets/21349381_GA_ENT_DS-Top-reasons-to-upgrade-to-netbackup-7.7-EN.pdf, viitattu 7.12.2014.
- [90] VIRKI, T. Cloud computing goes green underground in Finland. *Reuters* (2009). URL: <http://www.reuters.com/article/2009/11/30/idUSGEE5AS01D20091130#tXM9Bz3EVilqrIfX.97>.
- [91] VOR DEM BERGE, M., CHRISTMANN, W., VOLK, E., WESNER, S., OLEKSIK, A., PIONTEK, T., DA COSTA, G., JA MARCK PIERSON, J. CoolEmAll - Models and Tools for Optimization of data Center Energy- Efficiency. Julkaisusarjassa *Proceedings of Sustainable Internet ICT for Sustainability* (2012), pp. 1–5.
- [92] WANG, L., JA KHAN, S. U. Review of performance metrics for green data centers: a taxonomy study. *Springer-Verlag* 63 (2013), 639–656.
- [93] WARC, E. M., GOEDKE, M. L., BRENNER, P., JA GO, D. B. A simplified thermodynamic model for waste heat utilization from a containerized data center experimental platform. Julkaisusarjassa *Proceedings of 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (2012), pp. 521–529.
- [94] WILBANKS, L. IT Productivity. *IEEE IT Professional* 11, 6 (2009), 64–64.
- [95] XU, Y., GAO, Z., JA DENG, Y. Analyzing the Cooling Behavior of Hot and Cold Aisle Containment in Data Centers. Julkaisusarjassa *Proceedings of 4th International Conference on Emerging Intelligent data and Web Technologies* (2013), pp. 685–689.

- [96] YUVENTI, J., JA MEHDIZADEH, R. A Critical Analysis of Power Usage Effectiveness and Its Use as data Center Energy Sustainability Metrics. *Energy and Buildings* 64 (2013), 90–94.
- [97] ZHANG, S., AHUJA, N., HAN, Y., REN, H., CHEN, Y., JA GUO, G. Key considerations to implement high ambient data center. *Julkaisusarjassa Proceedings of 31st Thermal Measurement and Management Symposium* (2012), vol. 28, pp. 98–103.
- [98] ZHANG, S., LIU, X., AHUJA, N., HAN, Y., LIU, L., LIU, S., JA SHEN, Y. On Demand Cooling with Real Time Thermal Information. *Julkaisusarjassa Proceedings of 31st Thermal Measurement, Modelling and Management Symposium* (2015), pp. 138–146.
- [99] ZHOU, R., WANG, Z., JA MCREYNOLDS, A. Data center cooling management anad analysis - a model based approach. *Julkaisusarjassa Proceedings of 28th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium* (2012), vol. 28, pp. 98–103.
- [100] ZIMMERMANN, S., MEIJER, I., TIWARI, M. K., PAREDES, S., MICHEL, B., JA POULIKAKOS, D. A hot water cooled dta center with direct energy reuse. *Energy* 43, 1 (2012), 237–245.

A Liite

Taulukko A.1: UPS:ien ulostulon mittaustiedot ensimmäiseltä mittausjaksolta.

Pvm	P_{Eaton} (kW)	P_{Rittal} (kW)	$P_{Yht.}$ (kW)	$P_{IT-kuorma}$ (kW)	vuorokauden lämpötila °C	keski- PUE	DCiE (%)
11.5.2015	148,1	53,6	201,7	62,4	8,6	3,2	31
12.5.2015	149,4	52,7	202,1	61,3	9,5	3,3	30
13.5.2015	147,8	52,9	200,7	61,7	8,1	3,3	31
14.5.2015	146,7	52,9	199,6	61,4	9,8	3,3	31
15.5.2015	148,0	52,7	200,7	61,9	6,4	3,2	31
16.5.2015	146,7	52,4	199,1	60,7	8,5	3,3	30
17.5.2015	147,3	52,2	199,5	62,0	9,0	3,2	31
18.5.2015	148,2	52,3	200,5	62,3	7,6	3,2	31
19.5.2015	148,3	52,9	201,2	62,9	9,8	3,2	31
20.5.2015	148,6	52,8	201,4	62,4	10,7	3,2	31
21.5.2015	148,4	52,9	201,3	62,1	9,5	3,2	31
22.5.2015	148,3	52,6	200,9	62,6	11,2	3,2	31
23.5.2015	146,5	52,7	199,2	63,0	9,6	3,2	32
24.5.2015	147,2	52,1	199,3	61,3	10,0	3,3	31
25.5.2015	148,8	53,7	202,5	62,5	9,7	3,2	31
26.5.2015	148,6	53,6	202,2	62,9	11,9	3,2	31
27.5.2015	148,2	53,4	201,6	62,6	12,8	3,2	31
28.5.2015	147,6	54,1	201,7	62,2	12,9	3,2	31
29.5.2015	148,4	54,2	202,6	63,9	10,7	3,2	32
30.5.2015	148,5	53,8	202,3	62,8	11,3	3,2	31
31.5.2015	147,9	53,4	201,3	62,4	10,9	3,2	31
1.6.2015	148,4	53,3	201,8	63,6	11,6	3,2	32
2.6.2015	149,4	53,7	203,1	63,5	12,7	3,2	31
3.6.2015	149,4	53,7	203,1	63,4	12,6	3,2	31
4.6.2015	149,0	54,1	203,1	63,3	13,5	3,2	31
5.6.2015	149,1	53,8	202,9	62,1	13,8	3,3	31
6.6.2015	148,3	53,8	202,1	62,9	12,6	3,2	31
7.6.2015	148,0	54,0	202,0	63,0	13,0	3,2	31
\bar{x}_P	148,2	53,2	201,4	62,5	10,7	3,2	31
σ_P	0,8	0,6	1,2	0,8	1,9	0,0	0,0

Taulukko A.2: UPS:ien ulostulon mittauksien tiedot toiselta mittausjaksolta.

Pvm	P_{Eaton} (kW)	P_{Rittal} (kW)	$P_{Yht.}$ (kW)	$P_{IT-kuorma}$ (kW)	vuorokauden lämpötila °C	keski- PUE	DCiE (%)
17.8.2015	146,8	53,2	200,0	76,0	15,8	2,6	38
18.8.2015	147,8	53,3	201,1	75,9	15,0	2,7	38
19.8.2015	147,3	53,1	200,4	76,0	15,6	2,6	38
20.8.2015	146,7	53,4	200,1	76,8	15,0	2,6	38
21.8.2015	146,4	53,1	199,5	75,7	16,4	2,6	38
22.8.2015	145,8	53,2	199,0	76,7	17,2	2,6	39
23.8.2015	146,2	52,8	199,0	74,8	18,1	2,7	38
24.8.2015	146,9	53,1	200,0	76,7	18,4	2,6	38
25.8.2015	146,3	52,7	199,0	76,3	18,9	2,6	38
26.8.2015	145,7	52,6	198,3	76,1	19,9	2,6	38
27.8.2015	145,6	52,8	198,4	76,1	18,4	2,6	38
28.8.2015	145,3	52,6	197,9	75,5	17,6	2,6	38
29.8.2015	145,4	52,1	197,5	75,6	16,9	2,6	38
30.8.2015	144,8	52,7	197,5	75,3	14,6	2,6	38
31.8.2015	145,8	52,7	198,5	75,9	15,1	2,6	38
1.9.2015	145,8	52,9	198,7	76,6	15,3	2,6	39
2.9.2015	145,5	52,9	198,4	76,5	13,8	2,6	39
3.9.2015	146,5	52,6	199,1	77,1	13,9	2,6	39
4.9.2015	145,8	53,3	199,1	77,9	14,9	2,6	39
5.9.2015	145,2	52,7	197,9	77,7	13,6	2,6	39
6.9.2015	145,5	52,5	198,0	77,2	13,3	2,6	39
7.9.2015	146,1	52,9	199,0	76,3	11,9	2,6	38
8.9.2015	147,0	52,8	199,8	77,7	12,5	2,6	39
9.9.2015	146,2	53,5	199,2	76,0	11,6	2,6	38
10.9.2015	146,9	53,1	200,0	76,4	13,3	2,6	38
11.9.2015	146,7	53,2	199,9	76,0	13,6	2,6	38
12.9.2015	147,0	52,6	198,4	76,0	15,0	2,6	38
13.9.2015	145,6	52,8	198,4	77,7	14,9	2,6	39
\bar{x}_P	146,2	52,9	199,0	76,4	15,4	2,6	38
σ_P	0,7	0,3	0,9	0,8	2,2	0,0	0,0