

Mirva Kupiainen

LÄMPÖPUMPPU KONESALIN
JÄÄHDYTYKSESSÄ JA
LÄMMÖNTALTEENOTOSSA

Opinnäytetyö
Talotekniikka


Joulukuu 2014




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

		Opinnäytetyön päivämäärä 8.12.2014
Tekijä(t) Mirva Kupiainen		Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka
Nimeke Lämpöpumppu konosalin jäähdytyksessä ja lämmöntalteenotossa		
Tiivistelmä Opinnäytetyössä tutkitaan Itä-Suomen Yliopiston Futura-opetusrakennuksen energiankäyttöä. Poikkeuksellista energian käytöstä tekee rakennuksessa sijaitsevan konosalin palvelinlaitteisto, joka vaatii suurta jäähdytystehoa ympäri vuoden. Tutkimuksessa selvitettiin ero elinkaarikustannuksissa kahden jäähdytyksen tuotantojärjestelmän tapauksessa; joko jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytyksellä ja jäähdytyskoneella, jolloin tavoitteena on tuottaa jäähdytys mahdollisimman vähäisellä sähkön kulutuksella, tai vaihtoehtoisesti jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytyksen ja jäähdytyskoneen lisäksi lämpöpumpulla aina kun lämmitystarvetta ilmenee ja korvataan lauhdutuslämmöllä osa rakennuksen lämmityskuluista. Vertailutapausten energiakustannukset muodostuvat lämmityskustannuksista ja jäähdytyksen tuotannon energiakustannuksista. Rakennuksen vuotuisen lämmitystarpeen selvittämiseen käytettiin RIUSKA TM -energiasimulointiohjelmaa, jolla saatiin tuntikohtainen lämmitystarpeen määrittäminen säätiöihin perustuen. Säätiöitä käytettiin myös taulukkolaskennassa, jolla jäähdytyksen tuotannon vuotuisen energiankulutus laskettiin. Energiakustannusten lisäksi työssä selvitettiin ero järjestelmien vaatimissa investoinneissa ja huoltokustannuksissa. Lauhdutuslämmön käyttö yli kaksinkertaistaa vuotuisen sähkön kulutuksen, mutta tekee energian kokonaiskustannuksista noin 20 % edullisemmat. Lämmöntalteenoton vaatimat lisäinvestoinnit maksavat itsensä takaisin jo kahdessa vuodessa. Koko elinkaaren aikana kahdessakymmenessä vuodessa ovat järjestelmän kustannukset nykyarvoltaan liki 280 000 € edullisemmat. Elinkaarikustannusten laskennan ja energiasimuloinnin yhteydessä saatujen energiankulutustietojen perusteella työssä laskettiin konosalin energiatehokkuutta mittaavat PUE- ja NPUE-arvot. Tulosten perusteella lämmöntalteenotto ei heikennä konosalin energiatehokkuutta, kun käytetään tapauskohtaisesti parhaiten soveltuvaa mitta-arvoa.		
Asiasanat (avainsanat) Palvelinlaitteisto, jäähdytys, lämpöpumput, lämmön talteenotto, energiatehokkuus		
Sivumäärä 65	Kieli Suomi	URN
Huomautus (huomautukset liitteistä)		
Ohjaavan opettajan nimi Marianna Luoma Heikki Salomaa		Opinnäytetyön toimeksiantaja Granlund Kuopio Oy

DESCRIPTION

		Date of the bachelor's thesis 8.12.2014
Author(s) Mirva Kupiainen	Degree programme and option Building Services Engineering	
Name of the bachelor's thesis Data centre cooling and heat recovery with a heat pump		
Abstract This study examined the use of energy in the campus building Futura at the University of Eastern Finland. The building contained a data center which demanded continuous and significant cooling power, and therefore made energy usage exceptional. The purpose was to declare the difference in life cycle costs between two cooling applications. Whether the cooling could be produced using free cooling and refrigeration when the target is to minimize usage of electricity in cooling production, or in addition to free cooling and refrigeration, heat pump could be used when heating load is needed in the building. Using a heat pump increased electricity consumption, but decreased the need of heating load at the same time. In the comparison, energy costs consisted of heating costs and costs of cooling production. The RIUSKA™ energy simulation program, where hourly data was obtained according to the weather conditions, was used to estimate the annual demand of heating load in the building. Weather conditions were also used in spreadsheet calculations of cooling production's energy consumption. The difference in investments and maintenance costs was also defined. The use of electricity in the production of cooling more than doubled when heat of the heat pump's high side was used. However, the total energy cost was reduced almost by 20%. The additional investment of the heat recovery earned itself back in two years. In twenty years the benefit of heating recovery as a present value of life cycle cost was calculated to be close to 280,000 €.		
Subject headings, (keywords) Data center, cooling, heat pump, heat recovery, energy efficiency		
Pages 65	Language Finnish	URN
Remarks, notes on appendices		
Tutor Marianna Luoma Heikki Salomaa	Bachelor's thesis assigned by Granlund Kuopio Oy	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	KONESALI.....	2
2.1	Laitteet	3
2.2	Rakenne	7
2.2.1	Rivijäähdytin "Row Cooler"	9
2.2.2	Kuuma- ja kylmäkäytävä "Hot/Cold Aisle Containment"	10
2.3	Vaatimukset ja määräykset	11
2.4	Energiatehokkuus	13
2.4.1	PUE (Power Usage Effectiveness).....	14
2.4.2	NPUE (Net Power Usage Effectiveness).....	16
3	JÄÄHDYTYS JA LÄMMÖNTALTEENOTTO.....	17
3.1	Kompressorin käyttöön perustuva jäähdytysprosessi.....	17
3.2	Lämpöpumppu.....	20
3.3	Vapaajäähdytys.....	22
4	ELINKAARIKUSTANNUSTENLASKENTA.....	23
5	TAVOITTEET	25
6	AINEISTO JA MENETELMÄT	28
6.1	Kohderakennus	28
6.1.1	Jäähdytysenergian kulutus	28
6.1.2	Lämmitysenergian kulutus.....	29
6.2	Vertailtavien järjestelmien energiankulutuksen laskenta	31
6.3	Huoltokustannusten laskenta	40
6.4	Elinkaarikustannusten eron laskenta.....	41
6.5	Energiatehokkuuden arviointi.....	42
7	TULOKSET	42
7.1	Jäähdytyksestä saatavan lämmön säästöpotentiaali.....	42
7.2	Vertailtavien järjestelmien energian kulutus	44
7.2.1	Kompressorin perustuva jäähdytys vapaajäähdytyksellä	44
7.2.2	Lämpöpumppu vapaajäähdytyksellä.....	47
7.3	Käyttökustannukset.....	51
7.3.1	Energia	51

7.3.2	Huollot ja korjaukset.....	53
7.4	Investoinnit	55
7.5	Elinkaarikustannus.....	56
7.6	Energiätehokkuuden mittarit	58
8	POHDINTA	60
	LÄHTEET	63

1 JOHDANTO

Konesalien määrä ja koko ovat kasvaneet reippaalla tahdilla niin maailmalla, kuten myös Suomessa. Liiketoiminnan kasvua Suomessa vauhdittavat erityisesti edullinen sähkön hintataso, vakaat poliittiset olosuhteet ja kylmä ilmasto. Voidaan puhua myös suuresta muutoksesta IT-alalla. Big data-tekniikan ja pilvipalveluiden suosio jatkaa nopeaa kasvua. Lisäksi yritykset hakevat joustavuutta ja kustannussäästöjä ulkoistamalla tietohallintonsa konesalitoimintoja tarjoaville yrityksille. Näiden muutosten myötä voidaan olettaa lähitulevaisuudessa konesalitoimintojen kysynnän olevan pysyvää, ja näin ollen myös uusien konesalien rakentamisen ja vanhojen saneeraamisen tekniikan kehittyessä.

Konesalin ylläpito kuluttaa runsaasti energiaa, sillä palvelinten laskennan kuluttaman sähkön lisäksi tarvitaan suurta jäähdytystehoa vuodenaikasta riippumatta. Suomen kylmässä ilmastossa voidaan jäähdytystä tuottaa edullisesti vapaajäähdytyksellä, jolloin jäähdytystä ei tarvitse tuottaa kompressorikäyttöisellä jäähdytyskoneella. Tällöin kuitenkin käytännössä talviaikana hukataan suuri määrä lämpöenergiaa, jolla voidaan mahdollisesti kattaa osa kiinteistön talviaikaisesta lämmitystarpeesta.

Konesalin jäähdytyksen paluuvien lämpötila on normaalisti enintään 20 °C, jolloin sitä on vaikea käyttää lämmityksessä sellaisenaan. Lämpötilatasoa on mahdollista nostaa käyttämällä jäähdytysjärjestelmän jäähdytyskoneistoa lämpöpumpuna, jolloin lämmön käyttömahdollisuuksia saadaan lisättyä. Tämä nostaa rakennuksen sähkön kulutusta, mutta voi olla edullista kokonaisenergian käytön kannalta, kun lämmitys- ja jäähdytystarvetta ilmenee samanaikaisesti.

Tässä työssä tutkitaan kuinka suuri vaikutus konesalin lauhdutuslämmön käytöllä on tutkimuskohteena olevan rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Esimerkkitapauksena tutkimuksessa käytetään Itä-Suomen Yliopiston Joensuun kampuksen Futurarakennusta, jonka saneerauksessa on muun muassa uusittu palvelimien, tutkimuslaitteiden ja opetustilojen jäähdytys. Tutkimuksessa rakennuksen lämmitystarvelaskentaan käytetään Granlund Oy:n RiuskaTM-energiasimulointiohjelmaa, jolla luodaan tuntikohtainen datatieto rakennuksen lämmitystarpeesta.

Työssä tutkitaan kahta jäähdytysjärjestelmää, joista toisessa talviaikana jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytyksellä ja lämpimänä vuodenaikana jäähdytyskoneella. Toisessa vaihtoehdossa jäähdytys tuotetaan lämmityskaudella ensisijaisesti lämpöpumpulla, jolla osa rakennuksen lämmitystarpeesta voidaan korvata. Kun lämmitystarvetta ei ilmene voidaan jäähdytys tuottaa, kuten toisessakin järjestelmässä, vapaajäähdytyksellä ja jäähdytyskoneella.

Tavoitteena tutkimuksessa on laskea ero jäähdytysjärjestelmien elinkaarikustannusten välillä. Lisäksi tutkitaan lauhdutuslämmön käytön vaikutusta energiatehokkuusmittareihin, joita käytetään konesalin energiatehokkuutta arvioitaessa.

2 KONESALI

Konesali tarkoittaa ATK-laitteita varten rakennettua tilaa. Konesalien juuret löytyvät Yhdysvalloista, missä monet suurimmista tietotekniikan yrityksistä, kuten Intel ja IBM on perustettu /1/. Englanninkielisestä käsitteestä "data center" on suomennettuja nimityksiä käytössä useita eri variaatioita. Yksi käytetyimmistä on konesali, jota myös tässä työssä käytetään. Muita useasti käytettyjä nimityksiä ovat muun muassa palvelinkeskus, datakeskus ja palvelinsali. Suurimpia tekijöitä konesalien lisääntymiselle ja kokoluokan paisumiselle on yritysten ja yhteisöjen halu tuottaa palveluita, joihin pöytä tietokoneiden tehot ovat riittämättömiä. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi pilvipalveluiden ja big data-tekniikan hyödyntämistä. Kummankin ominaisuuksiin kuuluu tietovarantojen käyttö, joka tarkoittaa tiedon kasaamista ja varastointia yhteen paikkaan. Tietovarantoa voidaan internet-yhteyden avulla käydä muokkaamassa, lisäämässä tai vaikka videopalvelun tapauksessa toistamassa omalla päätelaitteella. Myös sähköisen viestiliikenteen, kuten sähköpostin ja puhelinkeskusten toimintaa ylläpidetään palvelimilla. Palvelinkeskusta voidaan käyttää myös eräänlaisena supertietokoneena suuren tietomäärän analysoimiseksi käyttäen kaikkia prosessoreja samanaikaisessa laskennassa. Suurta laskentatehoa tarvitaan monesti tieteellisten mallien ja simulaatioiden laskemiseen. Esimerkiksi Yhdysvaltojen armeijan ydinaseisiin liittyvien simulaatioiden laskentaan käytettävän supertietokoneen, "Roadrunnerin" sähköteho on 3 MW, joka vastaa yhden nykyaikaisen tuulivoimalan sähkötehoa /2/.

Konesaleja on hyvin monen kokoisia. Kuvassa 1 on näkymä CERNin hiukkastutkimuslaitoksen konesalista /3/.



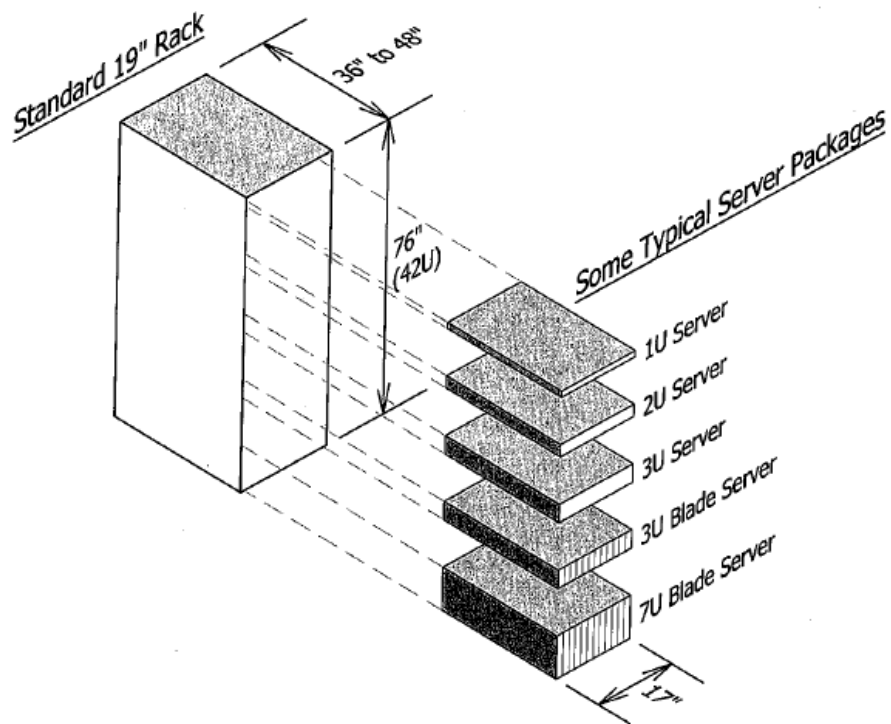
KUVA 1. CERN hiukkastutkimuslaitoksen konesali /3/

Pienimmillään konesaliksi riittää parikymmentä neliöinen huone, kun taas suurimmat ovat tehdashallien kokoisia. Kaikissa yleisnäkymä on kuitenkin pitkälti sama.

2.1 Laitteet

Pääasiassa konesalin palvelinten komponentit ovat samoja kuin pöytätietokoneissakin, mutta luokkaa isommassa koossa ja järeämmillä suoritusnopeuksilla varustettuna. Palvelinyksikön sisältä löytyy muun muassa prosessoreja, verkkokortteja, muisteja ja tuulettimeja. Virtalähteitä on monesti useampia jatkuvan toiminnan takaamiseksi. Komponentit ovat myös vaihdettavissa ja laajennettavissa pöytäkoneiden tapaan. Laitteiston kokoonpano onkin aina tapauskohtaista, koska konesalin laitteistovalinnat perustuvat palvelimilla tuotettavien palveluiden ja toimintojen edellytyksiin.

Palvelinyksiköt kasataan 19”-n moduulirakenteisiin kehikoihin tai kaappeihin, niin sanottuihin räkkeihin. Kuvassa 2 on esitetty palvelinkaapin perusrakenne ja palvelinyksiköt, joiden koko voi leveyttä lukuun ottamatta vaihdella mallista riippuen /4, s. 91/.



KUVA 2. Palvelinkaappi eli server rack /4, s. 91/

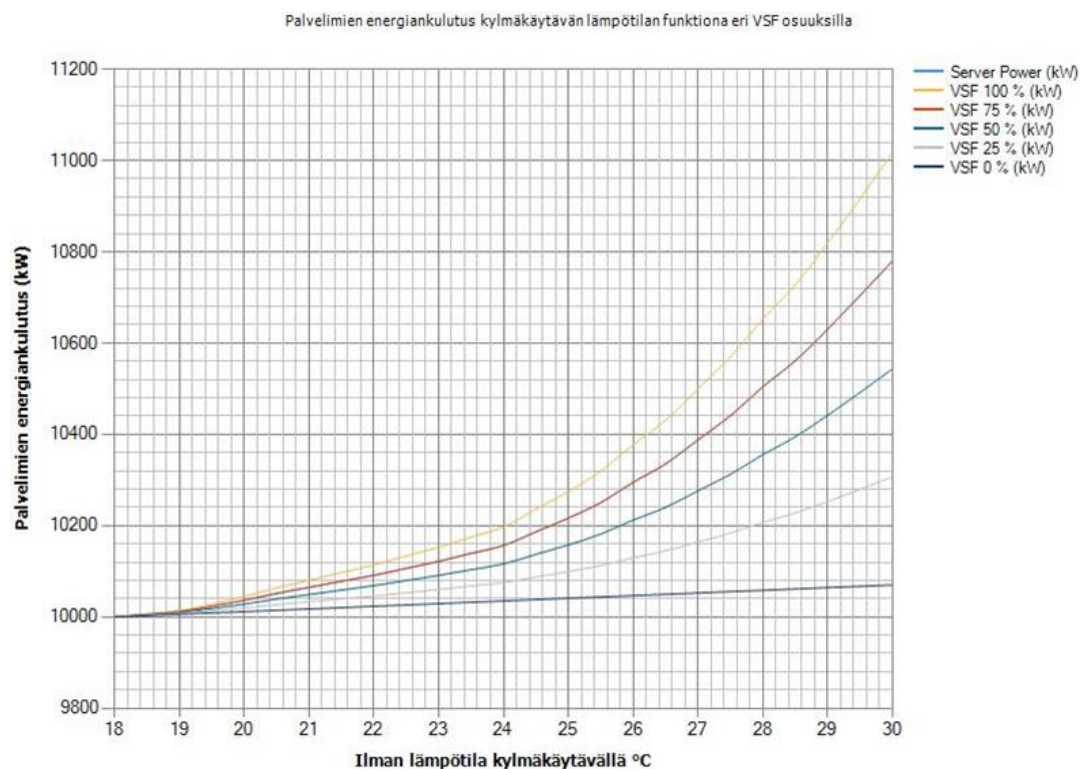
Kuten pöytäkoneet ja kannettavat tietokoneet, lämpenevät samalla tavoin myös konesalin palvelimet suhteessa suoritustehoihin nähden. Huoneilma ei riitä palvelinten jäähdytykseen, vaan palvelimille on aina rakennettava jäähdytysjärjestelmä. Palvelimet tuottavat vain lämpöä ja tarvitsevat näin ollen jäähdytystä, eivät ilmanvaihtoa. Konesalin ilmanvaihdon tarpeellisuus perustuu muihin tilassa mahdollisesti oleviin emissiolähteisiin, kuten ihmiset tai rakennusmateriaalit. Palvelinten tyypillisimmät jäähdytysratkaisut on esitelty luvuissa 2.2.1 ja 2.2.2. Palvelinten jäähdytysilman kosteudelle voidaan tapauskohtaisesti asettaa raja-arvot, jolloin jäähdytysilmalle on järjestettävä kostutus ja kuivaus. Liian kuiva tai kostea jäähdytysilma voi haitata palvelimen toimintaa, kostea aiheuttaen palvelimissa korroosiota ja kuiva sähköstaattisia purkauksia /5, s. 15/. Tämän työn kohderakennuksen palvelimiin ei kuitenkaan sovelleta olosuhdevaatimuksia jäähdytysilman kosteudelle, koska jäähdytysjärjestelmän lämmönsiirtonesteen lämpötila pidetään mahdollisimman korkeana tasolla, jossa jäähdytysilmassa ei esiinny kondenssia eli kuivausta. Aihetta ei sivuta tämä työn puitteissa enempää. Tarkempaa tietoa jäähdytysilman olosuhdevaatimuksista löytyy ASHRAE:n "Datacom Series"-julkaisuista /6/.

Käytännössä palvelimet pidetään toiminnassa jatkuvasti huoltotoimet pois lukien. Toisin kuin tietokone, palvelin voi samanaikaisesti palvella montaa käyttäjää, jolloin palvelimen joutokäyntiä on hyvin hankala ennakoida ja poistaa. Palvelimien annetaan käydä jatkuvasti myös sen vuoksi, etteivät käyttäjät yleensä vastaa palvelimien ylläpidosta. Palvelimia ei siis voida sulkea kuten tietokonetta käytön jälkeen, vaan niiden on oltava jatkuvassa toimintavalmiudessa käyttäjiä varten. Palvelimen tuottaman lämpötehon voidaan katsoa vastaavan suoraan palvelimelle syötettyä sähkötehoa. Palvelimen käyttöasteella ei ole hyvin paljon vaikutusta palvelimen toimintaan, sillä kuormittamaton palvelin voi kuluttaa sähköä jopa 70 % verrattuna täydellä kuormalla toimivaan palvelimeen /5, s. 17/. Tietotekniikan suorituskehityksessä ovat lämpökuormat nousseet ja nykyisellään keskikokoisen konesalin sähköteho on sadan kilowatin luokkaa. Käytännössä tämä tarkoittaa liki kymmentä päällä olevaa sähkökiuasta, joita yritetään jäähdytyksellä estää kuumenemasta. Pinta-alaan suhteutettuna laitteiden sähkötehot yleisesti ottaen ovat yli tuhat wattia per neliömetri /5, s. 21/.

Konesali kuluttaa poikkeuksellisen paljon sähköä ja jäähditysenergiaa, joka tekee myös koko rakennuksen energiankulutuksesta normaalitapauksiin verrattuna poikkeuksellista. Runsaan ja tasaisen energiankulutuksen takia konesalin jäähdytyksestä saatavaa lämpöä voidaan harkita käytettäväksi lämmönlähteenä. Jäähdytyksestä saatava lämpöenergia on sellaisenaan ilmaista. Mikäli jäähdytyksestä saatavaa lämpöä voidaan käyttää konesalin sisältävän rakennuksen lämmitykseen, pienenevät rakennuksen elinkaarikustannukset alhaisempien lämmityskustannusten ansiosta. Hyödyntämisen ongelmana on kuitenkin konesalissa ylläpidettävä suhteellisen alhainen lämpötilataso sekä järjestelmien toimintavarmuudelle asetetut edellytykset. Jäähdytysjärjestelmän suunnittelu on aina tapauskohtaista, koska palvelinten määrä ja tehot sekä jäähdytysjärjestelmän varmistuksien taso ovat rakennuttajasta riippuvia. Yleispäteviä ratkaisuja ei juuri ole.

Käyttölämpötila vaikuttaa oleellisesti tietoteknisten komponenttien toimintaan. Liian lämmin käyttölämpötila nostaa palvelimen komponenttien resistanssia, joka lisää palvelimen sähkön kulutusta, lyhentää palvelimen käyttöikää, ja voi jopa tuhota osan kuumalle alttiista komponenteista. Käyttölämpötiloja ei voida myöskään edes hetkellisesti päästää nousemaan palvelinlaitteiden tuotetakuuden raukeamisen vuoksi. ASHRAE suosittaa tällä hetkellä jäähdytyksen lämpötilatasoksi +18–27 °C /7, s. 6/.

Suosittelulla lämpötila-alueella on hyvä pitäytyä, vaikka jäähdytyksen lämpötilatasoa nostamalla saataisiin säästettyä energiaa tuottamalla suurempi osa jäähdytyksestä vuodessa vapaajäähdytyksellä sekä tuottamalla kompressorin avulla jäähdytystä paremmalla kylmäkertoimella. Korkeampi palvelinten käyttölämpötila lisää palvelinten sähkön kulutusta ja voi näin ollen syödä jäähdytyksen tuotannossa kertyneet säästöt. Palvelinlaitteiden sähkönkulutusta on tutkinut Petteri Hajanti diplomityössään ”Palvelin keskuksen jäähdytysjärjestelmän teknistaloudellinen optimointi” /8/. Tutkimuksessa etsittiin muun muassa palvelinlaitteiden optimaalista jäähdytyslämpötilaa. Kuvassa 3 on esitetty tutkimuksen tuloksia jäähdytyslämpötilan vaikutuksesta palvelinten sähkönkulutukseen palvelimen käyttöasteesta riippuen.

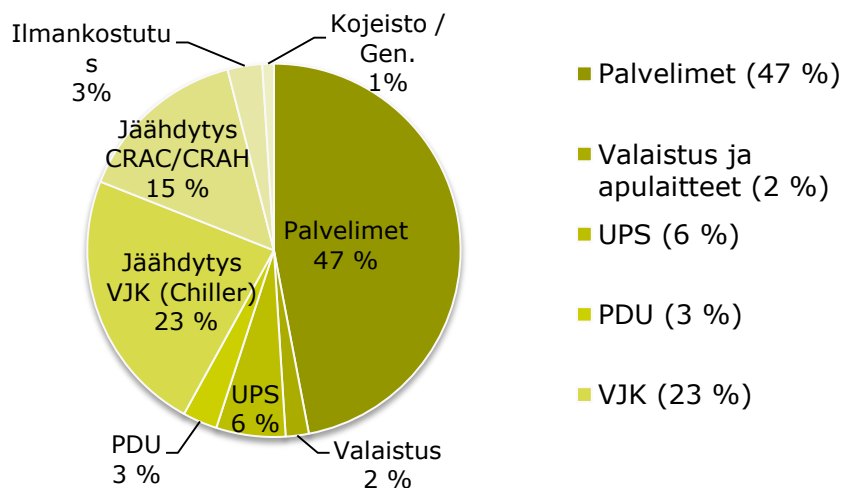


KUVA 3. Palvelimen sähkönkulutus jäähdytysilman lämpötilasta ja palvelimen käyttöasteesta riippuen /8/

Palvelinlaitteiden lisäksi häviöitä, eli toisin sanoen lämpökuormaa syntyy konesalin UPS-laitteista. UPS, ”Uninterruptible Power Supply” on sähkönjakelua varmistava laite /5, s. 11/. Tapauskohtaisesti UPS-laitteet ovat virtalähteiden tavoin varmennettuja. UPS varmistaa tasalaatuisen sähkönsyötön poistaen sähköverkosta mahdollisesti saapuvat virtapiikit, jotka voivat vahingoittaa IT-laitteiden herkkiä komponentteja. UPS-laitteistot voivat sisältää myös akustoja lyhyiden, minuuttiluokan sähkökatkosten

varalta. Pitempiin sähkökatkoksiin on varauduttava varavoimalla. Palvelinlaitteiden lisäksi jäähdytyksen sähkönsyöttö on hyvä suojata UPS-laitteilla. Uusien UPS-laitteiden hyötysuhteet ovat noin 90–97 %, jolloin 3–10 % laitteelle syötetystä energiasta muuttuu lämmöksi. Verrattuna palvelimiin, joissa kaikki syötetty sähkö muuttuu lämmöksi, UPS-laitteiden lämmönmuodostus on hyvin vähäistä. Lisäksi toisin kuin palvelinlaitteet, ei UPS ole lämmölle herkkä. UPS-laitteiden mahdollinen jäähdytystarve perustuu akustolle suositeltuihin käyttölämpötiloihin.

Muita konesalin energiankulutuksen piiriin kuuluvia laitteita ovat jäähdytyslaitteet, ilmanvaihto, varavoima ja valaistus. Kuvassa 4 on esitetty energiankäytön jakautuminen tavanomaisessa konesalissa.



KUVA 4. Energian käytön jakautuminen tavanomaisessa konesalissa /8/

Kuten kuvasta 4 nähdään, yleensä noin puolet konesalitoimintoihin käytetystä energiasta kuluu palvelinten laskennan suorittamiseen. Kuvan 4 osa-alue PDU on lyhenne nimityksestä ”Power Distribution Unit”, jolla tarkoitetaan palvelinten virtalähteissä tapahtuvia häviöitä. VJK puolestaan tarkoittaa vedenjäähdytyskoneistoa. CRAC/CRAH-jäähdytys kuvaa vakioilmastointikoneiden energiankulutusta.

2.2 Rakenne

Paras konesalin sijoituspaikka on ikkunaton, palamaton ja lukittu tila. Yleensä konesali toteutetaan omana palo-osastonaan. Toimintavarmuuden lisäämiseksi kaikkia ylimääräisiä lämpökuormia, kuten auringonpaiste ja valaistus tulisi välttää. Monesti ko-

nesaleissa käytetään erilaisia valvonta- ja ilmoitinjärjestelmiä, kuten automaattisia paloilmoittimia ja kulunvalvontaa. Lisäksi niin sähkö- kuin jäähdytysjärjestelmiä voidaan varmentaa tuplakomponenteilla tai N+1 -varmistuksilla, jossa on yksi varalaite N määrälle toiminnassa olevia laitteita. Suurin osa toimintahäiriöistä tapahtuu kuitenkin nimenomaan inhimillisistä tekijöistä. Turvallisuutta voidaan parantaa merkittävästi vähentämällä ihmisten kulkua konesaliin. Tämä voidaan ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa, kun kaikki huoltoa vaativat kohteet pyritään sijoittamaan konesalin ulkopuolelle.

Jäähdytysenergian lähteinä voidaan käyttää lähes mitä tahansa jäähdytysenergian tuotantomuotoa. Ainoita rajoittavia tekijöitä ovat toimintavarmuuden takaamiseen liittyvät seikat. Lähes poikkeuksetta jäähdytyksen tuotantolaitteiden tulee olla varmistettu ja, jolloin kaukojäähdytyksen tapauksessa kohteeseen voidaan joutua varalle rakentamaan vaihtoehtoinen jäähdytyksen tuotantolaitteisto.

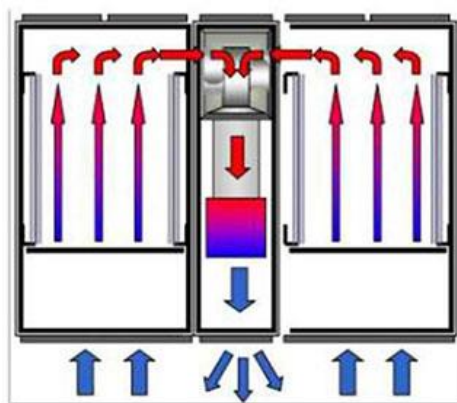
Kompressorikäyttöiseen jäähdytyksen tuotantoon perustuvissa järjestelmissä välimatkat vedenjäähdytyskoneen ja konesalin jäähdytyslaitteiden välillä muodostuvat yleensä niin pitkiksi, että suunniteltavat järjestelmät perustuvat välilliseen jäähdytykseen, jolloin jäähdytysenergian siirtoon jäähdytyslaitteen ja vedenjäähdytyskoneen välillä käytetään vettä tai muuta lämmönsiirtonestettä. Suorahöyrystyksellä toimivan järjestelmän tapauksessa jäähdytyslaitteen patterina käytetään vedenjäähdytyskoneen höyrystintä. Suorahöyrystysjärjestelmän käyttö edellyttää lyhyttä välimatkaa höyrystimen ja vedenjäähdytyskoneen välisen kylmäainetäytön takia.

Tavanomaisesti palvelinräkit kootaan yhtä korkeisiin riveihin korotetun asennuslattian päälle. Palvelinten johdotukset tehdään lattian alla, jonne myös jäähdytysputkistot ja kanavistot voidaan sijoittaa. Johdot, putket ja kanavat voidaan harkinnan mukaan sijoittaa myös palvelinten yläpuolelle, johon kuitenkin liittyy joitakin riskejä, kuten putkistovuodot. Jäähdytysmuodosta riippumatta palvelinräkin jäähdytys tapahtuu ohjaamalla viilennettyä ilmaa palvelinyksiköiden läpi. Jotta jäähdytetty ja lämmennyt ilma eivät sekoittuisi keskenään, rakennetaan räkkien ympärille tarpeen mukaan seiniä ja yläpuolelle katto. Ilmavirrat erottavia rakenteita tarvitaan, koska energiatehokkuuden kannalta on tärkeää saada kohdistettua jäähdytysteho sinne missä lämpöä muodostuu, palvelimen sisälle. Esimerkiksi ohivirtaukset räkkien sisällä ja kanaviston vuodot hei-

kentävät energiatehokkuutta. Jäähdytysenergia voidaan siirtää palvelinten jäähdytysilmaan esimerkiksi rivijäähdyttimellä tai vakioilmastointikoneella. Tyypillisimmät jäähdytysratkaisut on esitelty seuraavissa luvuissa.

2.2.1 Rivijäähdytin "Row Cooler"

Rivijäähdytin on laite, joka sisältää koteloitun nestekiertoisen jäähdytyspatterin, puhaltimia, tarvittavat putkitukset, sähköistyksen sekä automatiikan. Rivijäähdyttimet sijoitetaan kiinni palvelinräkkeihin, tyypillisesti niiden väliin. Rivijäähdyttimen jäähdytyspatteri kytketään vesikiertoiseen jäähdytysverkostoon, johon jäähdytysenergia tuotetaan esimerkiksi kompressorikäyttöisellä vedenjäähdytyskoneella tai vapaajäähdytyksellä. Rivijäähdyttimen puhaltimet puhaltavat jäähdytetyn ilma palvelinten imu- puolelle, josta palvelinten omat tuulettimet imevät ilman palvelinten läpi. Räkien ympärillä käytetään seinä- ja kattorakenteita, jotta jäähdytysilma ja huoneilma eivät sekoitu keskenään. Kuvassa 5 on esitetty, kuinka jäähdytysilma kiertää rivijäähdyttimen ja räkien läpi /9/.



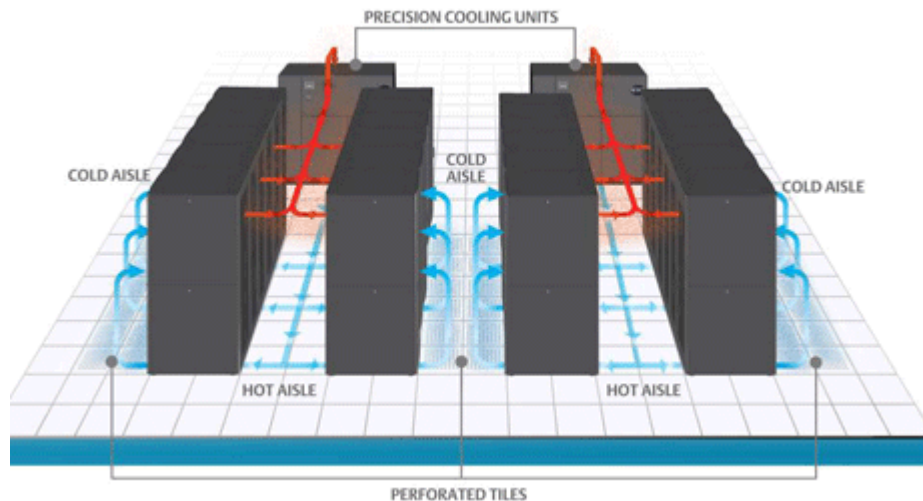
The airflow around and through the Rittal LCP and adjoining enclosures is efficient and effective.

KUVA 5. Ilmavirtauksen periaatepiirros rivijäähdyttimellä varustetuissa räkissä /9/

Kuvassa 5 periaatepiirros on kuvattu ylhäältä katsoen. Molemmilla sivuilla on palvelinräkki, joiden välissä, keskellä on rivijäähdytin. Palvelinten lämmittämä ilma imeetään puhaltimilla suoraan jäähdytyspatterille, jolloin ilman ohjaus on mahdollisimman tehokasta ja patterille palaavan ilman lämpötila voidaan pitää mahdollisimman korkeana.

2.2.2 Kuuma- ja kylmäkäytävä "Hot/Cold Aisle Containment"

Mikäli rivijäähdytintä ei voida sijoittaa palvelinlaitteiden välittömään yhteyteen, vaan rakkien ja vesikiertoisten jäähdytyslaitteiden tulee sijaita fyysisesti erillään toisistaan, jopa eri tiloissa, täytyy jäähdytysteho kuljettaa palvelimille ilman avulla vakioilmastointikonetta käyttäen. Tällaisten järjestelmien yhteydessä käytetään niin sanottua kuumaa ja kylmää käytävää periaatetta, joka on esitetty kuvassa 6. Vakioilmastointikoneen jäähdytyspatteri kytketään vesikiertoiseen jäähdytysverkostoon rivijäähdyttimen tavoin.



KUVA 6. Jäähdytysilman virtaus kuuma- ja kylmäkäytävän periaatteella /9/

Palvelinrakit järjestetään korotetun lattian päälle riveihin, joiden väliin muodostuu käytäviä. Joka toinen käytävä on kuuma "Hot Aisle" ja joka toinen kylmä "Cold Aisle". Vakio- tai tarkkuusilmastointikoneella jäähdytetty ilma tuodaan korotetun lattian alle, josta se puhalletaan joka toiselle käytävälle, kylmäkäytävälle. Tämän jälkeen palvelimien tuulettimet siirtävät ilman vaakasuorassa palvelinlaitteiden lävitse, samalla jäähdyttäen niitä. Kylmäkäytävän päällä on katto ja rivistöjen päissä seinät, jotta jäähdytysilma ei karkaa palvelinten ohitse. Palvelinten tuulettimet puhaltavat lämmenneen ilman kuumakäytävälle, josta se ohjataan huoneen yläosassa takaisin vakioilmastointikoneelle. Ilmanjako tapahtuu lattian kautta, alhaalta ylöspäin, koska matkalla ilma lämpenee ja kohoaa ylöspäin. Päinvastainen järjestely vaatisi tehokkaampia puhaltimia.

2.3 Vaatimukset ja määräykset

Turvallisuus ja käyttövarmuus ovat erityisasemassa konesalin ylläpidossa. Sen lisäksi, että palvelimet ovat investointina hinnakkaita, on niissä säilytettävä tieto ja niillä tuotettavat palvelut yritysten liiketoiminnan kannalta kriittisiä. Palvelinten sisältö voi olla yritysten arvokkainta omaisuutta. Konesalin toiminnasta riippuen sen vikasietoisuudelle voidaan asettaa vaatimuksia. Vaatimukset tulevat yleensä rakennuttajalta, mutta myös vakuutusyhtiö ja valtion viranomaiset voivat tulla kysymykseen. Vaatimustasolla määritellään muun muassa laitteistojen redundanttia, eli varajärjestelmien laajuutta, sekä palvelin- että jäähdytysjärjestelmien osalta. Vaatimuksia voidaan esittää myös konesalin rakenteelliselle ja toiminnalliselle turvallisuudelle. Esimerkiksi viestintäpalveluja tuottavien yritysten laitteistojen voidaan katsoa olevan niin merkityksellisiä, ettei niiden toimintaan sallita minkäänlaisia katkoja. Muun muassa viranomaisverkkojen ja joukkoviestintäkanavien on toimittava myös poikkeusoloissa. Varajärjestelmien ylläpidolla on kuitenkin aina energiatehokkuutta heikentävä vaikutus, koska valmiustilassa olevat varalaitteet lisäävät kulutusta. Varajärjestelmien rakentaminen lisää myös investointikustannuksia. Tämä tulee ottaa huomioon, jottei varajärjestelmiä rakennettaisi tarpeettomasti tai puutteellisin perustein.

Turvallisuusohjeista maailman laajuisesti on käytössä muun muassa Uptime Instituten kehittämä Tier-luokitus. Tier-luokkia on neljä, joista 1-luokassa vaatimukset ovat vähäisimmät ja 4-luokassa tiukimmat. Mikäli vaatimuksia sovelletaan useammasta eri luokasta, luetaan konesali heikoimpaan vaatimukset täyttävään luokkaan. Tier-luokituksen käyttäminen on vapaaehtoista, eikä yhtään virallista Tier-luokiteltua konesalia ole Suomessa. Luokitus on kuitenkin muodostunut eräänlaiseksi standardiksi ja yleensä konesalit noudattelevat Tier 3- ja Tier 4-luokkien vaatimuksia.

Tier 1-luokka on nimetty perusluokaksi, jossa ei laitteistoilla, eikä syöttö- ja jakoväylillä ole varmistuksia. IT-laitteille vaaditaan kuitenkin vain niitä varten tarkoitettu tila. Sähkönjakelun häiriöiden varalta konesalin laitteet tulee suojata UPS-laitteilla ja generaattorikäyttöisellä varavoimalla. Varavoimaa tulee olla saatavilla kahdentoista tunnin ajaksi. Varavoiman tehoa ei kuitenkaan ole vaatimuksissa määritelty, joten sen ei tarvitse riittää kuin osalle laitteista. Konesalin jäähdytysjärjestelmän tulee palvella vain ja ainoastaan konesalin tarpeita. /7, s. 1./

2-luokassa järjestelmät ovat suorituskyvyltään varmennettuja. Minkään järjestelmän syöttö- tai jakoväylille ei kuitenkaan vaadita vaihtoehtoisia reittejä. Varalaitteet tulee olla varavoiman generaattoreille, UPS-laitteille, energiavarastoille säiliöineen, jäähdytyslaitteille sekä pumpuille. Kuten ensimmäisessä luokassa, varavoimaa tulee olla saatavilla kahdentoista tunnin ajaksi. Varavoiman tulee kuitenkin teholtaan kattaa kaikkien laitteiden toiminnan. Konesalin vikasietoisuus on oleellisesti parempi kuin ensimmäisessä luokassa, mutta konesali ei kuitenkaan ole huollettavissa käytön aikana. /7, s. 2./

3-luokan järjestelmiin ei ole tarvetta tehdä huoltokatkoja, vaan kaikkien järjestelmien mikä tahansa komponentti on huollettavissa käytön aikana. Tämän takia järjestelmien kaikki komponentit ovat varmistettuja. Järjestelmillä tulee myös olla useampi vaihtoehtoinen jako- tai syöttökanava, joista vain yhden kerrallaan on oltava toiminnassa. Järjestelmä ei siis ole vikasietoinen, vaan huoltojen suorittaminen vaatii ennalta suunniteltujen toimenpiteiden toteuttamista. /7./

Korkeimman, eli 4-luokan järjestelmät ovat vikasietoisia. Minkä tahansa komponentin vikaantuminen ei saa vaikuttaa konesalin toimintaan. Toimintavarmuuden takaamiseksi, toisiaan varmistavien järjestelmien tulee olla toisistaan riippumattomia ja fyysisesti hajautettuja. Kaikkien laitteiden ja reittien tulee olla myös kaiken aikaa toimintavalmiudessa. /7./

Laitteisto- ja rakennevaatimusten lisäksi Tier-luokkiin kuuluu vaatimuksia toiminnalliseen turvallisuuteen ja ylläpitoon liittyen. Tällaisia vaatimuksia ovat esimerkiksi huoltohenkilökunnan tavoitettavuus ja koulutus sekä toiminnan suunnitelmallisuus. Kyseiset vaatimukset on esitelty taulukoituna julkaisussa ”Tier Standard: Operational Sustainability” /8/.

Suunniteltaessa konesalia Suomeen tulee ottaa huomioon Viestintäviraston laatima määräys 54/2012M ”Viestintäverkkojen ja -palvelujen varmistamisesta” sekä Valtiovarainministeriön julkiselle hallinnolle asettama ”VAHTI”-tietoturvaohjeistus, joita voidaan joutua soveltamaan. Viestintäministeriön määräystä sovelletaan yleisiin viestintäverkkoihin ja -palveluihin, sekä viranomaisverkkoihin. Määräyksessä konesalille määritellään tärkeysluokka tärkeimmäksi luokitellun komponenttinsa mukaan. Yritys-

ten on dokumentoitava ja ylläpidettävä tietoja tärkeysluokittelamistaan laitteista ja laitetoista. /9./

Tärkeysluokan perusteella konosalin laitteistolle esitetään eritasoisia varmennus- ja turvallisuusvaatimuksia. Esimerkiksi luokissa 4 ja 5 kulunvalvonnalta edellytetään avaimin lukittavaa laitetilaa ja palvelinkaappia, joka sekin on avaimin lukittavissa. 1. luokassa puolestaan vaaditaan kulunvalvontajärjestelmää, jossa kulkuoikeudet voidaan määrittellä yksilöllisiin sähköisiin avauslaitteisiin. Jokainen kulkutapahtuma tulee myös rekisteröidä. Henkilökunta ja alihankkijat on tunnistettava kuvallisin henkilökortein. Vierailijat tulee rekisteröidä ja heidän kulkunsa tulee olla valvottua. Lisäksi tilassa on oltava kameravalvonta ja automaattinen rikosilmoitusjärjestelmä.

2.4 Energiatehokkuus

Konesalit kuluttavat poikkeuksellisen runsaasti energiaa. Konesalit kuluttavat arviolta 0,5-1,5 % Suomessa käytetystä sähköstä, joka vastaa jopa puolta koko sähköverkon vuosittaisista siirto- ja jakeluhäviöistä. Huolellisella hallinnoinnilla ja ylläpidolla onkin suuri vaikutus konosalin energiankulutukseen. On arvioitu, että lähtötilanteesta riippuen voidaan olemassa olevissa konesaleissa energiategokkuutta parantamalla päästä jopa 40–50 % vuosisäästöihin /5, s. 4-5/.

Energiansäästötoimenpiteiden ei välttämättä tarvitse olla suuria ja kalliita. Monesti pienilläkin teoilla ja säädöillä saadaan huomattavia vaikutuksia. Halvimpia keinoja ovat muun muassa nollakuormalla toimivien palvelinten poistaminen käytöstä, ilman ohjauksen tehostaminen palvelinten läpi ja tarpeettoman alhaisen jäähdytyslämpötilan nosto.

Konesalien energiategokkuuden arvioimiseen on kehitetty myös erilaisia laskennallisia mittareita. Näistä talotekniikan kannalta hyödyllisimpiä ovat PUE ja NPUE, jotka ilmoittavat konosalin palvelin- ja verkkolaitteiden kuluttaman energian suhteessa kokonaiskulutukseen, johon kuuluu muun muassa jäähdytys ja valaistus. On kuitenkin muistettava, etteivät nämä mittarit kerro mitään palvelinten käyttöasteesta tai tehokkuudesta, vaan näitä voidaan käyttää vain talotekniikan tehokkuutta arvioitaessa.

2.4.1 PUE (Power Usage Effectiveness)

PUE -arvo on The Green Gridin alun perin vuonna 2007 julkaisema energiatehokkuuden mittari. The Green Grid on voittoa tavoittelematon kansainvälinen yhdistys, jonka tavoitteena on edistää IT-alan energiatehokkuutta. Sittemmin laskentaohjetta on uudistettu vuonna 2012. /14./

PUE perustuu energiamuotokertoimin painotettuun energialaskentaan, jolloin sen käyttö soveltuu lähes kaikkiin mahdollisiin ratkaisuihin, mukaan lukien kaukojäähdytyksellä ja varavoimalla tuotetun jäähdytysenergian.

PUE voidaan laskea kaavalla 1. /5, s. 18./

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

missä

E_{tot} on konesalin kokonaisenergiankulutus, kWh

E_{it} on IT-laitteiden energiankulutus, kWh

Mikäli kohteessa ei kuluteta muuta kuin sähköä, ei energiamuotoja tarvitse huomioida, sillä kokonaisenergian kulutuksen ja palvelinten kuluttaman energian suhde ei muutu. Laskennassa voidaan käyttää PUE-laskentaohjeen kansainvälisiä energiamuotojen kertoimia tai kansallisten säädösten, kuten rakennusmääräyskokoelma D3-osan mukaisia kertoimia /14, s. 32; 15, s. 8/. Laskennassa tarkastellaan vain konesalin toimintaa, ei koko kiinteistön. Tällöin ei myöskään voida ottaa huomioon jäähdytyksessä syntyvän lämmön mahdollista käyttöä rakennuksen lämmityskulujen pienentämiseksi.

Konesalin kokonaisenergiankulutukseen lasketaan kaikki konesalin toimintoja tukevien laitteiden energiankulutus. Rakennuksessa voi ilmetä muutakin kulutusta, jota ei kuitenkaan laskennassa oteta huomioon, mikäli se ei liity konesalin ylläpitoon. IT-laitteiden energiankulutus käsittää ainoastaan palvelinlaitteiden suoritustehoon kulutetun energian, jota ovat muun muassa verkkolaitteiden, prosessoreiden ja muistiasemien energian kulutus. Energiankulutuksen jako perustuu laitteiden toiminnan tarkoitukseen, ei fyysiseen sijaintiin. IT-laitteiden kulutukseen ei näin ollen lasketa esimerkiksi

UPS-laitteiden tai rivijäähdyttimien tapauksessa puhaltimien energiankulutusta, vaikka laitteet sijaitsevat palvelinten yhteydessä.

Teoriassa paras mahdollinen PUE on 1. Todellisuudessa tähän ei ole mahdollista päästä, sillä muuhunkin kuin IT-laitteiden käyttöön kuluu poikkeuksetta energiaa. Tehokaimmissa ratkaisuissa voidaan päästä jopa alle 1,2:n, mutta tyypillisesti konesalissa puolet energiasta kuluu IT-laitteiden käytössä ja puolet muussa kiinteistön ylläpidossa, jolloin PUE -arvo on noin 2.

PUE:n tarkoituksena on antaa luotettava kuva talotekniikan tehokkuudesta erilaisissa toimintaolosuhteissa. Vuodenaikojen vaihtelun vaikutuksien huomioimiseksi suositellaan PUE laskemaan vuosittaisen kulutuksen perusteella. Lisäksi PUE -laskennan tulisi aina perustua jatkuvaan mittaukseen perustuviin kulutustietoihin. Laskennallisia kulutuksia kannattaa käyttää vain suunnitteluvaiheessa arvioitaessa tulevan laitteiston tehokkuutta.

PUE -arvoa ilmoitettaessa tulisi myös lukeman perässä ilmoittaa PUE -arvon luokitus, mittauksen intervalli ja mittausjakson pituus. Taulukossa 1 on esitetty PUE -luokkien vaatimukset energiamittausten ja mittausintervallin osalta.

TAULUKKO 1. PUE-luokitus /14, s. 14/

	Taso 1 (L1) Perus	Taso 2 (L2) Keskitaso	Taso 3 (L3) Edistynyt
IT-laitteiden energian kulutus	UPS-laitteen lähtö	Virtalähteen lähtö	IT-laitteiden tulo
Kokonaisenergian kulutus	Sähköverkosta otettu sähkö	Sähköverkosta otettu sähkö	Sähköverkosta otettu sähkö
Mittausväli	Kuukausittainen/ Viikoittainen	Päivittäinen/ Tunnittainen	Jatkuva (15 min tai vähemmän)

Esimerkiksi PUE- arvo 1,5 perusmittaus-kategorialla (L1), viikoittaisella intervallilla (W) ja vuoden pituisella mittausjaksolla (Y), ilmoitettaisiin muodossa PUE: 1,5_{LIYW}.

PUE -arvoa voidaan käyttää myös markkinoinnissa, mutta konesalien PUE -arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään, sillä tulos riippuu vahvasti laitteiston kokoonpanosta ja varmistusten laajuudesta. PUE -arvo kannatta ennemminkin mieltää johtamisen ja hallinnon työkaluksi konesalin toiminnan seurannassa ja kehittämisessä.

2.4.2 NPUE (Net Power Usage Effectiveness)

NPUE on Kungliga Tekniska Högskolanissa vuonna 2010 PUE:sta edelleen kehitetty energiatehokkuusmittari kohteisiin, joissa jäähdytysjärjestelmästä saatava lämpö otetaan talteen ja hyödynnetään lämmityksessä /16/.

Kuten PUE:n laskennassa myös NPUE lasketaan vuotuisen energiankulutuksen perusteella. PUE:sta poiketen NPUE:n laskenta perustuu jäähdytyslaitteiden osalta sähköenergian laskentaan, jolloin esimerkiksi jäähdytyksessä käytetty kaukojäähdytys muunnetaan sähköenergiaksi jäähdytysenergian tuottajan ilmoittaman hyötysuhteen perusteella. Samoin muunnetaan lämpöpumpun avulla tuotettu lämpö sähköksi lämpöpumpun lämpökertoimella.

Perustapauksessa, jossa jäähdytyksen paluuvettä käytetään suoraan lämmitykseen, NPUE lasketaan kaavalla 2 /5, s. 19/.

$$NPUE = \frac{E_{net}}{E_{it}} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{it}} \quad (2)$$

missä

E_{net} on konesalin nettoenergiankulutus, kWh

E_{it} on IT-laitteiden energiankulutus, kWh

E_{in} on konesalin energiankulutus, kWh

E_{out} on hyötykäytetty energia, kWh

NPUE voidaan laskea kaavalla 3 tapauksessa, jossa jäähdytysjärjestelmästä saatavan lämmön käyttämiseksi tarvitaan lämpötilan korotusta. Lämpötilaa voidaan korottaa lämpöpumpulla. Laskennassa lämpöpumpun kuluttama sähköenergia voidaan vähentää kokonaisenergian kulutuksesta. /16, s. 22–23/

$$NPUE = \frac{E_{net}}{E_{it}} = \frac{E_{tot} - \frac{E_{LP}}{COP_1}}{E_{it}} \quad (3)$$

missä

E_{tot} on konesalin kokonaisenergiankulutus, kWh

E_{it} on IT-laitteiden energiankulutus, kWh

E_{LP} on lämpöpumpun tuottama lämpö, kWh

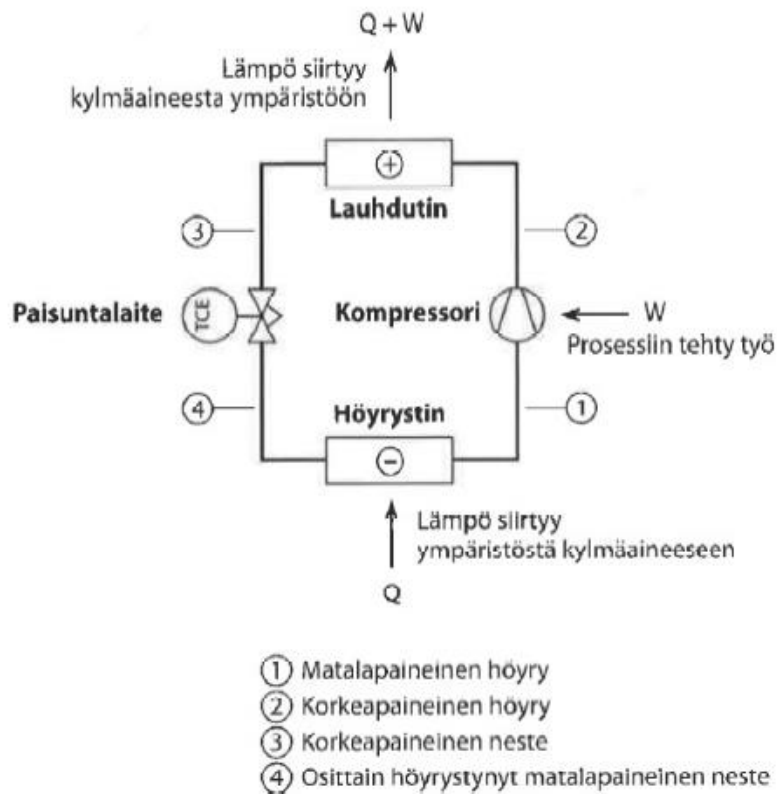
COP_1 on lämpöpumpun lämpökerroin

3 JÄÄHDYTYS JA LÄMMÖNTALTEENOTTO

Jäähdytyksen tuotantomuotoja on monia erilaisia, joista tälle työlle oleellimmat esitellään seuraavissa luvuissa. Suurinta osaa jäähdytyksen tuotantomuodoista voidaan käyttää jokaista yksinään, mutta niitä voidaan käyttää myös yhdessä. Varsinkin energiatehokkuuden kannalta parhaaseen ratkaisuun päästään usein eri jäähdytystapoja yhdistelemällä, jolloin jäähdytystä tuotetaan tavalla joka kulloinkin on edullisinta. Jäähdytyksen tuotanto on samalla lämmön tuotantoa. Käytännössä jäähdytystä tuotetaan siirtämällä lämpöenergiaa tapauskohtaisesti riippuvilla apulaitteilla paikasta toiseen. Jäähdytyksessä syntyvän lämpöenergian yleensä katsotaan olevan arvotonta, jolloin siitä halutaan päästä eroon mahdollisimman pienellä vaivalla, eli kuluilla. Varsinkin jos jäähdytystarve on vähäistä ja satunnaista. Sopivan käyttökohteen löytyessä, lämpö voidaan nähdä myös hyödyllisenä ja arvokkaana, koska se on prosessin sivutuote ja sellaisenaan ilmaista.

3.1 Kompressorin käyttöön perustuva jäähdytysprosessi

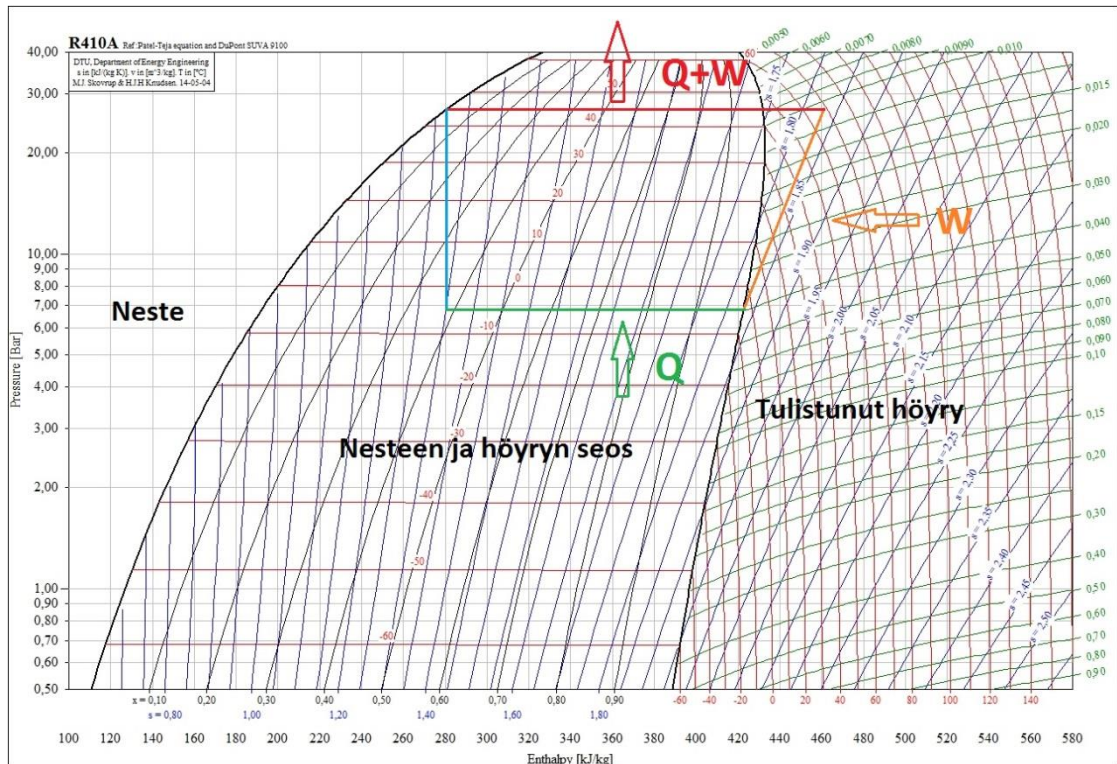
Kompressorikäyttöinen jäähdytysprosessi, jota joissain yhteyksissä myös kylmäprosessiksi kutsutaan, on jäähdytyksen tuotantomuoto, joka perustuu kylmäaineen olomuodon muutokseen ja kompressorin tekemään työhön. Väliainetta, kuten jäähdytysverkoston kiertovettä, jäähdytettäessä kutsutaan tällaista laitetta vedenjäähdytyskoneeksi. Prosessin pääkomponentit, olosuhteet ja vaiheet on esitetty kuvassa 7 /17/.



KUVA 7. Kylmäaineen kiertoprosessi ja pääkomponentit /17/

Jäähdytysprosessissa lämpöä siirtyy jäähdytettävästä ympäristöstä kylmäaineeseen höyrystimessä, jossa nestemäinen kylmäaine muuttuu höyryksi vakiopaineessa, tuottaen jäähdytysenergiaa Q . Lämpöenergian siirtymiseksi, höyrystimen ja ympäristön välillä on oltava lämpötilaero, koska lämpö siirtyy ilman työtä vain korkeammasta lämpötilasta matalampaan päin. Jotta lämpö saadaan siirtymään lauhduttimesta haluttuun ympäristöön, joudutaan höyrystyneen kylmäaineen lämpötila nostamaan kompressorilla ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Lämpötila saadaan nostettua, kun kompressori tekee työn W ja puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen. Lauhduttimessa korkeapaineinen höyry tiivistyy nesteeksi ja luovuttaa ympäristöön lämpöenergiaa $Q + W$, joka saadaan höyrystimeltä ja kompressorista. Tiivistynyt kylmäaine paisutetaan alempaan painetasoon ja palautetaan takaisin höyrystimelle, josta prosessi alkaa alusta uudelleen.

Prosessi voidaan esittää myös kylmäaineiden log p,h-piirroksessa, josta esimerkki kuvassa 8.



KUVA 8. Kylmäaineen kiertoprosessi log p,h-piirroksessa

Kuvassa on esitetty teoreettinen prosessi, jossa ei ole tulistusta, alijäähtymistä eikä häviöitä. Vihreä osuus kuvaa kylmäaineen höyrystymistä, oranssi kompressorin teemää työtä, punainen kylmäaineen lauhtumista ja sininen kylmäaineen paisuntaa. Todellisuudessa laitteissa kuitenkin aina esiintyy häviöitä, joiden määrä riippuu laitteiston laadusta. Häviöllisessä prosessissa muun muassa höyrystintä ja lauhtutinta kuvaavat viivat esitettäisiin vaakasuorien viivojen sijaan kaltevina ja kompressorin viiva kallistuisi jyrkemmin oikealle.

Höyrystimen ja lauhtuttimen energioiden erottamiseksi toisistaan voidaan käyttää esimerkiksi alaindeksijä Q_h ja Q_l . Höyrystimen tuottamalle jäähditysenergialle käytetään merkintää Q_h . Lauhtuttimen energialle puolestaan merkintää Q_l .

Jäähdityskoneen tehokkuutta voidaan ilmaista kylmäkerroimella, jossa hyödyksi saatu energiaa verrataan prosessissa tehtyyn työhön. Kylmäkerroin voidaan laskea kaavalla 4 tai jäähdityskoneen tehoihin perustuen kaavalla 5 /18, s. 10/.

$$\varepsilon = \frac{Q_h}{W} \quad (4)$$

missä

ε on jäädytyskoneen kylmäkerroin
 Q_h on höyrystimen jäädytysenergia, kWh
 W on kompressorin tekemä työ, kWh

$$\varepsilon = \frac{\phi_h}{P_k} \quad (5)$$

missä

ε on jäädytyskoneen kylmäkerroin
 ϕ_h on höyrystimen jäädytysteho, kW
 P_k on kompressorin teho, kW

Laitteiston häviöiden lisäksi kylmäprosessin tehokkuuteen vaikuttaa olennaisesti höyrystymis- ja lauhtuslämpötilojen välinen ero. Mahdollisimman pienellä lämpötilaerolla saavutetaan alhaisimmat käyttökustannukset. Jäädytyskoneen vuotuinen energian kulutus voidaan laskea, kun tiedetään tuntikohtainen jäädytystarve ja kylmäkerroin höyrystymisympäristön lämpötilan mukaan.

3.2 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu ja vedenjäädytyskone ovat samanlaisia laitteita, joita vain ohjataan eri tavalla. Komponentit ja prosessin vaiheet ovat samat kummassakin tapauksessa. Laitteiden ohjaus eroaa ylläpidettävien höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen osalta, koska lauhtumis- ja höyrystymisympäristö riippuu laitteen käyttötarkoituksesta. Jäädytyslaitteena toimivan koneen lauhtumislämpötilaa ohjataan lauhtusympäristön lämpötilan mukaan, joka yleensä on ulkoilma. Lämpöpumppuna toimivan laitteen lauhtutus tapahtuu lämmitysjärjestelmään, jolloin lauhtumislämpötilaa ohjataan lämmitysjärjestelmän lämpötilan perusteella. Myös höyrystymislämpötilan ohjaus on poikkeavaa. Jäädytyskäytössä höyrystymislämpötila perustuu jäädytysjärjestelmässä vakiona ylläpidettävään lämpötilatasoon. Lämpöpumppukäytössä höyrystymislämpötila ei tyypillisesti ole vakio, vaan sitä ohjataan höyrystymisympäristön mukaan. Jäädytettävä ympäristö voi olla esimerkiksi ulkoilma tai maaperä.

Lämpöpumpun tapauksessa hyödyksi saatavan energian osuus on suurempi, koska höyrystimen tuottaman energian lisäksi kompressorin työ voidaan käyttää hyödyksi. Jäähdytysprosessissa höydyksi käytetään vain jäähdytysenergia, joka vastaa höyrystimessä poistettavaa lämpöenergiaa.

Tavanomaisesti lämpöpumppua käytetään siirtämään lämpöä rakennukseen maaperästä tai ulkoilmasta. Rakennuksen ulkopuolisen lämmönlähteen lisäksi lämpöpumpulla voidaan hyödyntää sisäisiä lämpökuormia ja kierrättää rakennuksen sisäisiä energia-
virtoja, jos lämmitys- ja jäähdytystarvetta ilmenee samanaikaisesti ja jäähdytysjärjestelmään syntyvän lämpökuorman muodostuminen on tasaista.

Jäähdytysprosessin tavoin lämpöpumpun tehokkuutta voidaan arvioida tehokertoimella, jota kutsutaan lämpökertoimeksi. Lämpökerroin voidaan laskea kaavoilla 6 ja 7 /18, s. 10/.

$$\varphi = \frac{Q_l}{W} \quad (6)$$

missä

φ on lämpöpumpun lämpökerroin
 Q_l on lauhduttimen lämpöenergia, kWh
 W on kompressorin tekemä työ, kWh

$$\varphi = \frac{\phi_l}{P_k} \quad (7)$$

missä

φ on lämpöpumpun lämpökerroin
 ϕ_l on lauhduttimen lämpöteho, kW
 P_k on kompressorin teho, kW

Teoreettisessa prosessissa lämpökerroin voidaan laskea myös kaavalla 8 /18, s. 10/.

$$\varphi = \varepsilon + 1 \quad (8)$$

missä

φ on lämpöpumpun lämpökerroin
 ε on jäähdytyskoneen kylmäkerroin

3.3 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytyksellä tarkoitetaan jäähdytyksen tuotannossa hyödynnettävää alhaisemman lämpötilatason ympäristöä, jonne lämpöenergia siirtyy luonnostaan. Käyttökustannuksia syntyy ainoastaan jäähdytyksen keruun kiertonesteeseen pumppauksesta ja ulkoilman tapauksessa mahdollisista puhaltimista. Vapaajäähdytys onkin kompressorikäyttöiseen jäähdytysenergiantuotantoon nähden hyvin energiatehokas jäähdytysmuoto. Vapaajäähdytyksen hyötysuhde riippuu ympäristön lämpötilasta ja on siihen nähden suoraan verrannollinen. Vapaajäähdytyksen sähkönkulutus voidaan laskea kaavalla 9.

$$P = \frac{\phi}{\varepsilon} \quad (9)$$

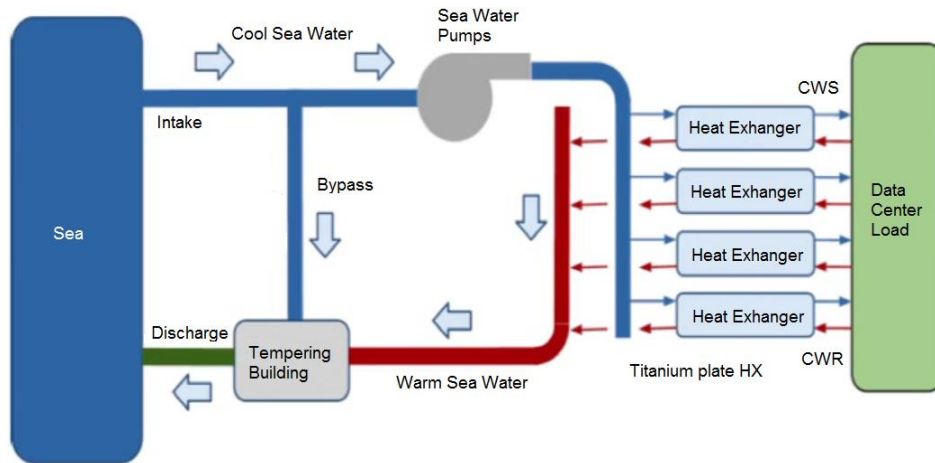
missä

P on vapaajäähdytyksen sähköteho, kW

ϕ on jäähdytysteho, kW

ε on vapaajäähdytyksen hyötysuhde

Ympäristön viileyttä voidaan käyttää perinteisissä jäähdytysratkaisuissa, kun ympäristön lämpötila alittaa +10 °C. Jos jäähdytystä käytetään vain konesalin jäähdytykseen voi lämpötila olla korkeampi, jolloin vapaajäähdytyksen osuutta vuotuisesta jäähdytysenergian kulutuksesta saadaan kasvatettua. Vapaajäähdytyksen lähteenä voidaan ulkoilman lisäksi käyttää myös vesistöjä tai maaperää. Esimerkiksi Googlen Haminassa sijaitsevan konesalin jäähdytys perustuu täysin meriveden käyttöön, jonka periaatekaavio on esitetty kuvassa 9 /19/.



KUVA 9. Google Haminan jäähdytysjärjestelmä /19/

Kylmää merivettä pumpataan lämmönsiirtimiin, joista se palautetaan lämmenneenä takaisin mereen. Haminan tapauksessa jäähdytysvettä ei kuitenkaan voida palauttaa suoraan mereen, vaan mukaan on sekoitettava kylmää merivettä lämpötilan tasaamiseksi ja haitallisten ympäristövaikutusten minimoimiseksi.

4 ELINKAARIKUSTANNUSTENLASKENTA

Elinkaarikustannusten laskenta perustuu ”EN 15643-4 Framework for the assessment of economic performance” -standardiin, jossa otetaan huomioon rakennuksen tai tietyn järjestelmän koko elinkaaren aikana syntyvät kustannukset. Rakennusten elinkaarikustannusten laskentaohjeet löytyvät myös Green Building Council Finlandin julkaisusta ”Rakennusten elinkaarimittarit (2013)” /20/. Elinkaarikustannusten laskennalla pyritään löytämään kustannustehokkain ratkaisu ja optimoimaan pääoman käyttöä investointien ja käyttökustannusten välillä. Kuvassa 10 on esitetty elinkaarilaskennassa huomioon otettavat vaiheet.

VAIHE	VAIHEEN KESKEINEN SISÄLTÖ
A0 ENNEN RAKENTAMISTA	Tontin hankinta veroineen, hankevaiheen suunnitelmat ja kustannukset. Jos tontti vuokrataan, vuokratkustannukset kohdistetaan tälle vaiheelle. Jos rakennus hankitaan käyttöön olemassa olevana, kohdistetaan hankintahinta ja -kulut tähän vaiheeseen.
A1-A5 ENNEN KÄYTTÖVAIHETTA	Vaiheet A1-A5 voidaan käsitellä yhtenä kokonaisuutena, joka voi perustua urakkatarjoksiin tai muuhun kustannusarvioon. Myös muut hankkeen projektinjohto-, tarkastus- ja valvontakulut kuuluvat tähän vaiheeseen. Kunnallistekniikan liittymiskustannukset kuuluvat tähän vaiheeseen.
B1 KÄYTTÖ	Kiinteistövero, isännöinti, vakuutukset ja turvallisuuspalvelut. Taloushallintoon (esim. asunto-osakeyhtiön kirjanpito ja tilintarkastus) liittyviä kustannuksia ei huomioida.
B2 KUNNOSSAPITO	Huolto- ja ylläpitopalvelut, mm. siivous, pintojen ja teknisten järjestelmien huolto. Tarkastukset ja muut toistuvat toimenpiteet (esim. nuohous).
B3 KORJAUS	Ennakoimattomista rikkoutumisista johtuvat korjauskustannukset.
B4 OSIEN VAIHTO	Suunnitelluista rakennuksen osien vaihdoista johtuvat korjauskustannukset ja tähän liittyvien suunnittelu- ja valvontatehtävien kustannukset.
B5 LAAJAMITTAISET KORJAUKSET	Rakennuksen käyttötarkoituksen muuntamisesta johtuvat kustannukset.
B6 ENERGIAN KÄYTTÖ	Rakennukseen ostettava energia- ja polttoaineet siirtomaksuineen. Kulutuksesta tulee poistaa kuluttajalaitteiden osuus (tai mainittava jos se on huomioitu), mutta tontilla kulutettava energia huomioidaan. Periaate on sama kuin hiilijalanjäljen osalta (kts. 6.3).
B7 VEDEN KÄYTTÖ	Puhtaan veden ostosta ja jäteveden käsittelystä syntyvät kustannukset. Kulutuksesta tulee poistaa kuluttajalaitteiden osuus kulutuksesta (tai mainittava jos se on huomioitu).
C1-C4 PURKUVAIHE	Rakennuksen purkaminen ja purkujätteen käsittely ja kuljetus. Maaperän tai tontin ennallistaminen hanketta edeltävälle tasolle ja valmiiksi seuraavaa käyttäjää varten. Kohta voidaan käsitellä urakkasummana purku-, siivous- ja ennallistamistöistä, josta poistetaan materiaalien hyötykäytön hyvitykset. Jos näitä ei tunneta, niitä ei huomioida.
D ELINKAAREN ULKO-PUOLISET LISÄTIEDOT	Lisätiedot kattavat rakennuksen elinkaaren ulkopuoliset vaiheet, jotka koostuvat energian myynnistä ja rakennuksen materiaalien tai osien uudelleen- tai hyötykäytöstä. Uudelleen- ja hyötykäyttö huomioidaan ensisijaisesti syntyneitä kustannuksia vähentävänä alennuksena, ja kustannukset ylittävät tulot raportoidaan lisätiedoissa. Lisäksi lisätietomodulissa todetaan rakennushankkeen saamat mahdolliset subventiot.

KUVA 10. Elinkaarilaskennan vaiheet /20, s. 42/

Kustannustasona elinkaarilaskennassa pidetään nykyhetken hintoja, eikä tuotteiden hinnan nousua huomioida muun kuin energian osalta. Elinkaaren aikana syntyvien kustannuksien nykyarvoon on laskettava diskonttauskorko, jolla hinnat yhteismitallistetaan ja otetaan huomioon tulevaisuudessa syntyvä rahan arvon aleneminen. Diskonttaus voidaan laskea kaavalla 10 /21, s. 140/.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (10)$$

missä

n on projektin kesto vuosina

C_t on kustannus vuodessa t

i on diskonttauskorko

Elinkaarikustannusten laskennassa lasketaan ainoastaan elinkaaren aikana syntyvät kokonaiskustannukset, joista ei vähennetä elinkaaren aikana mahdollisesti syntyviä hyötyjä, kuten vuokratuloja tai energian myyntiä.

Energiatuotteille voidaan käyttää todellisuudessa maksettavia hintoja tai laskentaohjeessa esitettyjä vähimmäishintoja. Diskonttauskoron lisäksi energiatuotteille lasketaan myös hinnan nousu. Energiatuotteiden vähimmäishinnat ja hinnan nousua, sekä diskonttauskorko on esitetty kuvassa 11.

MUUTTUJA	ARVO	LÄHDE
DISKONTTAUSKORKO	3,00 %	Direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta laskentaohjeistuksen mukainen peruskorko
SÄHKÖENERGIAN VÄHIMMÄISHINTA	5,2 snt / kWh	Energiamarkkinavirasto, sähköenergian hinta, veroton, tyyppikäyttäjä L1, keskiarvo jaksolta 1.11.2007 - 1.11.2012
KEVYEN POLTTOÖLJYN VÄHIMMÄISHINTA	65 snt / litra	Tilastokeskus, Energian hinnat, verollinen kuluttajahinta 2007-2011 vuosien keskiarvot, josta poistettu arvonlisäveron osuus.
ENERGIAN HINNAN NOUSU VUOSITASOLLA	4,60 %	EU Energy trends to 2030: reference scenarion perusteella laskettu keskiarvo energiatuotteiden hintojen kehityksestä 2025-2030 aikajänteellä, jota korjattu inflaatiolla

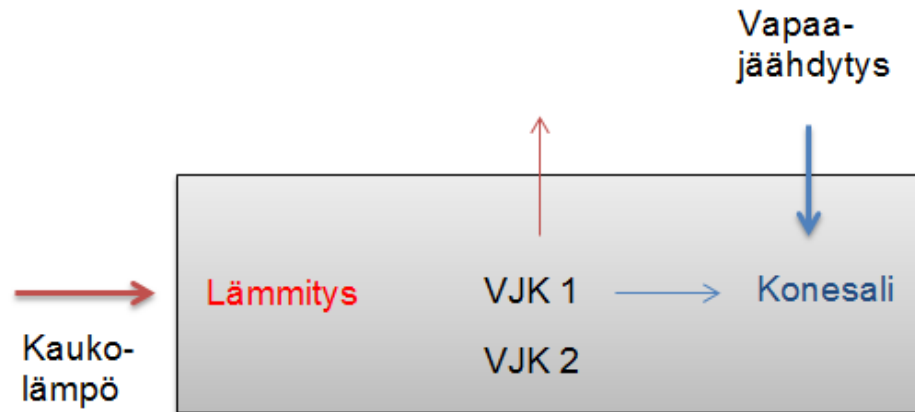
KUVA 11. Elinkaarilaskennassa käytettäviä arvoja /20, s. 58/

Laskettavan elinkaaren pituus, eli rakennuksen tai järjestelmän käyttöikä on harkinanvarainen ja perustuu aina ensisijaisesti rakennuttajan esittämään käyttöikävaatimukseen. Mikäli konesalin jäähdytysjärjestelmän käyttöikää ei ole määritelty rakennuttajan puolesta, voidaan käyttöikänä käyttää esimerkiksi kahtakymmentä vuotta, joka on esitetty The Green Grid:n julkaisussa ”Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines” /22, s. 14/. Kompressorin käyttöön perustuvan jäähdytysjärjestelmän tapauksessa käyttöiän pituus voidaan perustaa myös jäähdytyskoneen kylmäaineen käyttörajoituksiin, joita pitkälti ohjaavat sekä kansalliset että yhteiseurooppalaiset ympäristö- ja energiatehokkuustavoitteet.

5 TAVOITTEET

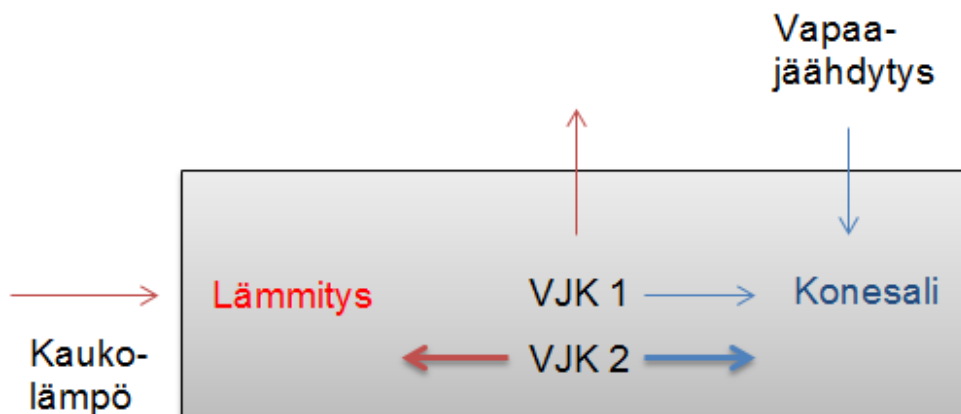
Tämän työn tavoitteena on laskea elinkaarikustannusten ero esimerkkikohteeseen vertailtaviksi valittujen kahden jäähdytysenergian tuotantojärjestelmän välillä. Työssä selvitetään, onko elinkaarikustannusten näkökulmasta kannattavampaa tuottaa jäähdytys kesäaikana jäähdytyskoneella ja talviaikana vapaajäähdytyksellä, jolloin rakennuksen lämmitys tuotetaan kokonaisuudessaan kaukolämmöllä. Rakennuksen energiavir-

toja kyseisessä tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 12, jossa vedenjäähdytyskoneet on merkitty lyhenteillä VJK 1 ja VJK 2.



KUVA 12. Energiavirrat rakennuksessa ilman jäähdytyksen lämmöntalteenottoa

Vai onko edullisempaa käyttää talviaikana toista, varalaitteeksi hankittavaa jäähdytyskoneetta lämpöpumpuna ja tuottaa jäähdytys vapaajäähdetyksen sijaan lämpöpumpulla, jolloin osa lämmityskuluista saadaan korvattua? Jäähdytysjärjestelmän lämmöntalteenotolla varustetun järjestelmän tapauksessa rakennuksen energiavirtoja on havainnollistettu kuvassa 13. Kuvassa 13 vedenjäähdytyskone on merkitty lyhenteellä VJK 1 ja lämpöpumppu lyhenteellä VJK 2.



KUVA 13. Energiavirrat rakennuksessa, jossa jäähdytyksen lauhdutuslämpöä käytetään rakennuksen lämmityksessä

Työssä ei lasketa koko jäähdytysjärjestelmän energian kulutusta, koska muun kuin jäähdytyksen tuotannon energian kulutuksen oletetaan olevan kummassakin tapauksessa yhtä suurta, tästä esimerkkinä vesikiertoisten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien pumppauskustannukset. Työssä ei myöskään pyritä laskemaan järjestelmien elinkaaren kokonaiskustannuksia, vaan elinkaarikustannuksien ero, kustannustehokkaan järjestelmän selvittämiseksi. Vertailuun valituissa järjestelmissä on otettu huomioon konesaliympäristön asettamat erityisvaatimukset järjestelmien rakenteelle, jonka takia jäähdytysjärjestelmässä on kaksi vedenjäähdytyskoneyksikköä.

Elinkaarikustannusten eron selvittäminen edellyttää esimerkkitapahtumana olevan rakennuksen energiatalouden tutkimista ja käyttökustannusten laskemista vertailtaviksi valituilla jäähdytyksen tuotantojärjestelmillä. Jäähdytyksentuotannon energian kulutuksen lisäksi rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen arvioiminen kuuluu käyttökulujen laskennan piiriin, sillä toinen järjestelmävaihtoehdoista sisältää lämpöpumpputoiminnolla varustetun jäähdytyskoneen. Lämpöpumpulla siirretään lämpöä jäähdytysjärjestelmästä rakennuksen lämmitykseen ja korvataan osa lämmityskuluista. Kohteena olevan rakennuksen vuotuinen lämmitysenergian tarve arvioidaan käyttäen energiasimulointiohjelmisto RIUSKATM:a. Järjestelmävaihtoehtojen sähkönkulutuksen laskentaan käytetään Excel-taulukkolaskentaohjelmaa, jossa jäähdytyksentuotannon sähkön kulutus lasketaan vuoden jokaisena tuntina, tuntikohtaiseen säädädataan sekä rakennuksen jäähdytys- ja lämmitystarpeeseen perustuen.

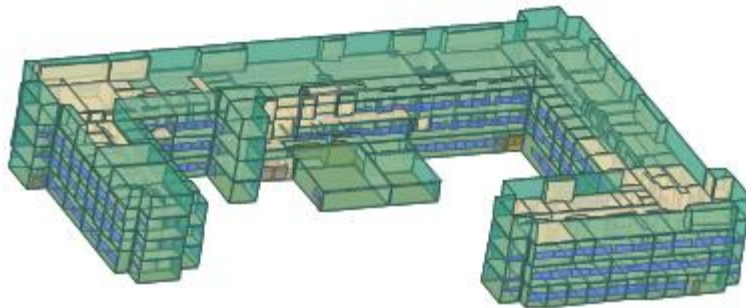
Energiakustannusten selvittämisen lisäksi taulukkolaskentaa käytetään elinkaarilaskennassa järjestelmien huoltokustannusten selvittämiseen, jotka ovat osa käyttökustannuksia. Järjestelmien huoltokustannukset perustuvat pääasiassa jäähdytyskoneiden kompressoreiden käyntiaikoihin. Jäähdytyskoneiden käyntiajat poikkeavat vertailtavissa järjestelmävaihtoehdoissa, jonka takia ne lasketaan osana tätä työtä. Elinkaaren aikana syntyviä käyttötunteja verrataan kompressoreiden käytettävissä oleviin käyttötunteihin varaosakustannusten selvittämiseksi.

Elinkaarikustannusten ohella työssä lasketaan odotettavissa olevat energiatehokkuusluvut PUE ja NPUE sekä tarkastellaan vertailuun valittujen järjestelmävaihtoehtojen vaikutusta kyseisiin energiatehokkuuden laskennallisiin mittareihin.

6 AINEISTO JA MENETELMÄT

6.1 Kohderakennus

Tässä työssä tutkitaan Itä-Suomen Yliopiston opetusrakennusta, joka sijaitsee Joensuu-kampuksella. Kohteena olevassa Futura-rakennuksessa toimii kemian laitos. Yhteensä rakennuksessa on lämmitettyä pinta-alaa noin 9200 m². Rakennuksen kolmessa kerroksessa on luokka- ja työhuoneita, laboratoriotiloja, muutama luentosali ja ruokala. Neljäs kerros käsittää tekniset tilat, jotka on varattu kokonaisuudessaan talotekniikan tarpeisiin. Rakennuksesta löytyy myös tutkimustarkoitukseen käytettävä konesali. Kuvassa 14 on rakennuksen 3D-tietomalli, jota käytetään rakennuksen energiasimuloinnissa.



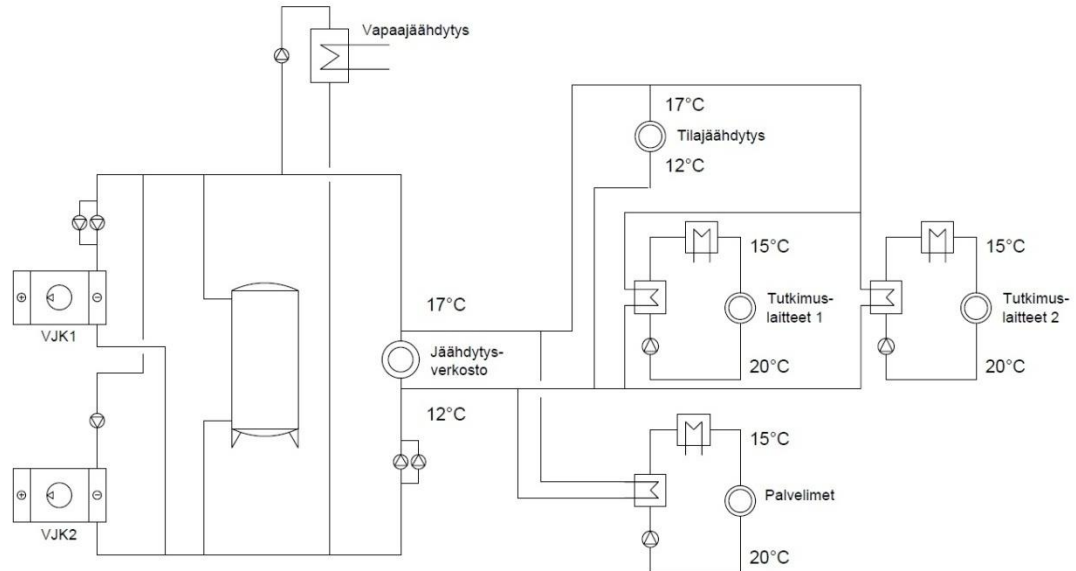
KUVA 14. Futura-rakennuksen tietomalli

Futura-rakennuksen käyttöikä on tullut materiaalien ja talotekniikan osalta peruskorjausvaiheeseen. Vuosina 2013–2015 rakennusta korjataan 13 miljoonalla eurolla /18/. Tilamuutosten lisäksi peruskorjauksessa muun muassa parannetaan energiatehokkuutta ulkoseiniä lisäeristämällä ja uusimalla jäähdytysjärjestelmät.

6.1.1 Jäähdytysenergian kulutus

Futura-rakennuksen jäähdytystarve koostuu tilajäähdytyksestä, tutkimuslaitteiden jäähdytyksestä ja konesalin palvelinten jäähdytyksestä. Jäähdytysteho tuotetaan kaikille kulutusasteille yhteisellä jäähdytysjärjestelmällä. Tutkimuslaitteilla ja palvelimilla on omat, toisistaan erilliset jäähdytyspiirinsä, joista kaikkiin on kytketty hätäjäähdytys käyttövedellä. Jäähdytyspiirit ovat vedenjäähdytyskoneeseen nähden lämmönsiirrinten

”takana”. Jäähdytysjärjestelmän periaate on esitetty vedenjäähdytyskoneelta eteenpäin kuvassa 15.



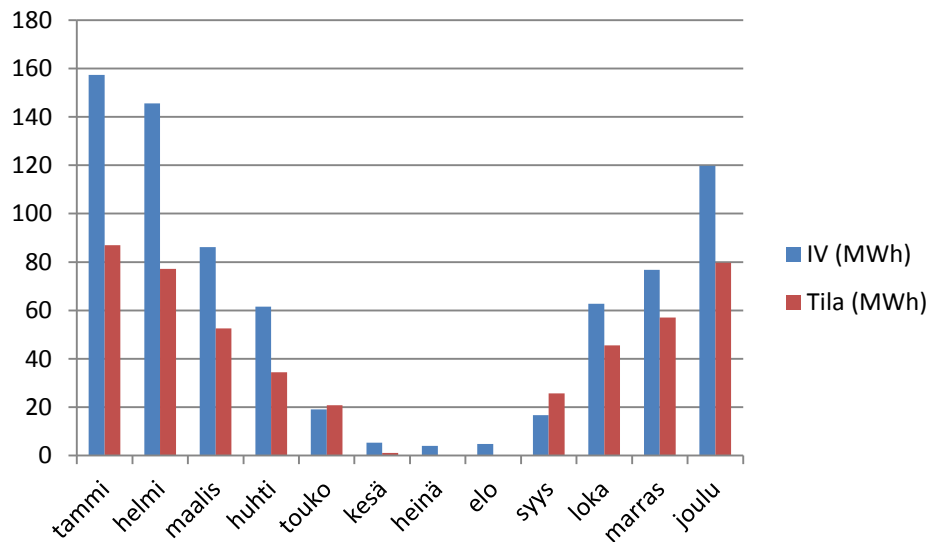
KUVA 15. Periaatekaavio Futura-rakennuksen jäähdytysverkostosta

Saneerauksen yhteydessä palvelinlaitteistoa on laajennettu neljällä palvelinräkillä. Nykyisellään räkkeitä on yhteensä kahdeksan ja kaikkien palvelinten käyttötehoksi on laskettu yhteensä 100 kW. Palvelinten jäähdytys tapahtuu räkkeihin asennetuilla rivi-jäähdyttimillä. Palvelinlaitteistolla suoritetaan simulaatioita kemiallisista reaktioista atomitasolla. Simulaatioiden suorittaminen on aikaa vievää ja käytännössä palvelimet ovat käytössä jatkuvasti. Näin ollen palvelinlaitteisto tuottaa jäähdytysjärjestelmään tasaisesti lämpöä 100 kW ympäri vuorokauden ja läpi vuoden. Kuukausitasolla lämpöenergiaa kertyy vähintään 67,1–74,3 MWh. Tässä työssä muun kuin palvelinlaitteiston tuottamaa lämpöä ei voida huomioida lämmön talteenotossa, sillä tutkimuslaitteiden jäähdytystarve on satunnaista ja tilojen jäähdytystarvetta ei esiinny lämmityskauden aikana.

6.1.2 Lämmitysenergian kulutus

Kiinteistö on kytketty kaukolämpöön, ja sen lämmitystarve muodostuu lämpimästä käyttövedestä, ilmanvaihdon lämmityksestä ja tilalämmityksen patteriverkostosta.

Peruskorjauksen yhteydessä rakennuksen rakenteita muutetaan energiatehokkaammiksi, jolloin tilojen lämmitystarve tulee olemaan kulutushistoriaan nähden vähäisempi, eikä kulutushistoriaa voida käyttää muun kuin lämpimän käyttöveden kulutuksen arvioimiseen. Energiankulutuksen arvioimiseksi rakennuksesta on tehty simulaatiomalli dynaamisella energialaskentaohjelmistolla, RIUSKATM:lla, joka sisältää uudet, energiatehokkaammat rakenteet. Energiasimuloinnissa on mallinnettu myös ilmanvaihtojärjestelmät ja niiden käyttö mahdollisimman pitkälle sellaisena, kuin se myös todellisuudessa on. Säädatana energiasimuloinnissa käytetään Jyväskylän säätietoja testivuonna 1979. Ohjelmistolla saadaan säädataan perustuva tuntikohtainen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeen määrittäminen, joka on esitetty kuukausikohtaisena kuvassa 16.



KUVA 16. Futuran ilmanvaihdon ja tilojen vuotuinen lämmitysergiantarve

Arvio lämpimän käyttöveden kulutuksesta perustuu kulutushistoriaan. Lämpimän käyttöveden kulutusta esiintyy vain rakennuksen käyttöaikana. Kello seitsemän ja viiden välillä kulutusta on keskimäärin 15 kW tunnissa. Kello viiden ja yhdentoista välillä puolestaan 5 kW tunnissa. Kuukausitasolla kulutus vaihtelee 3,6 ja 4,1 MWh:n välillä.

Kiinteistön vuotuinen lämmityksen osajärjestelmien energiankulutus sekä kokonaisenergiankulutus on esitetty kuukausittain taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Futuran vuotuinen lämmitysenergiatarve

	IV, MWh	Tila, MWh	LV, MWh	Kok.kulutus, MWh
Tammi	157,38	86,89	4,14	248,41
Helmi	145,54	77,19	3,60	226,33
Maalis	86,10	52,53	3,96	142,59
Huhti	61,52	34,43	3,78	99,73
Touko	19,16	20,86	4,14	44,15
Kesä	5,39	1,17	3,78	10,33
Heinä	3,96	0,06	3,96	7,98
Elo	4,77	0,05	4,14	8,96
Syys	16,78	25,68	3,60	46,06
Loka	62,69	45,50	4,14	112,34
Marras	76,81	57,01	3,96	137,78
Joulu	119,77	79,67	3,78	203,23
Yhteensä	759,87	481,02	46,98	1287,88

6.2 Vertailtavien järjestelmien energiankulutuksen laskenta

Kohteeseen ei ole saatavilla kaukojäähdytystä, eikä välittömässä läheisyydessä ole vesistöä jota voitaisiin käyttää vapaajäähdytyksessä. Näin ollen kohteeseen on valittu jäähdytysenergian tuotantomuodoksi kompressorikäyttöinen jäähdytys, joka varustetaan vapaajäähdytyksellä. Vapaajäähdytyksen teho otetaan ulkoilmasta rakennuksen katolla olevalla nestejäähdyttimellä. Kohteessa olevaan konesaliin ei kohdisteta standardeihin tai määräyksiin perustuvia toimintavaatimuksia, mutta arvokasta laitteistoa halutaan suojella ylikuumenemiselta jäähdytyskoneen vikaantuessa, jonka takia jäähdytysjärjestelmään asennetaan kaksi vedenjäähdytyskonetta.

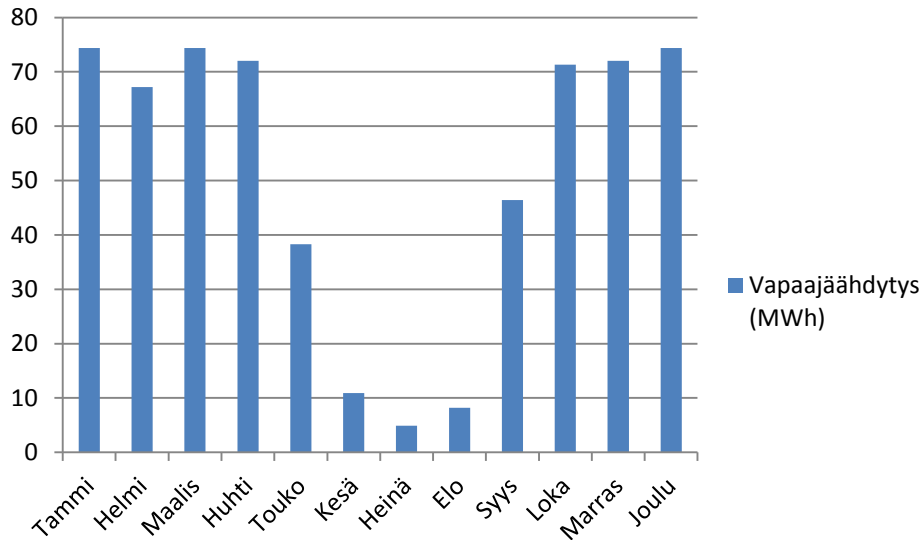
Tapauksessa, jossa rakennuksessa ei palvelimia olisi, käytettäisiin todennäköisesti vain yhtä jäähdytyskonetta, sillä jäähdytyskone on yksi merkittävimmistä kustannuseristä. Kahden jäähdytyskoneen etuina saavutetaan kuitenkin parempi tehonsäätö. Lisäksi jäähdytyksen tapauksessa, jossa edellytetään kahta jäähdytyskonetta, on mahdollista toista konetta käyttää lämpöpumpuna, jos jäähdytys- ja lämmitystarvetta esiin-

tyy samanaikaisesti. Lämpöpumppukäytön lisäyksestä järjestelmän rakenteelle aiheutuvien lisäinvestointien oletetaan olevan järjestelmän kokonaishintaan nähden vähäisiä. Lämpöpumpun käytöllä saadaan korvattua osa lämmitystarpeesta lämpöpumpun tuottamalla lauhdutuslämmöllä. Lämpöpumpun käytöllä voidaan pienentää lämmityskustannuksia, mutta samalla rakennuksen sähkönkulutus kasvaa, kun talviajan jäähdytykseen ei käytetä vapaajäähdytystä.

Jäähdytysjärjestelmän lämmön talteenottoa suunniteltaessa voidaan huomioida ainoastaan jatkuvasti syntyvät lämpökuormat. Tässä tapauksessa konesalin palvelinten tuottama lämpökuorma. Muiden jäähdytyskohteiden käyttö on satunnaista, eikä niiden lämpökuormia voida ottaa huomioon. Muiden laitteiden lämpökuormat voidaan jättää huomioimatta myös sen takia, että nämä muodostuvat pääasiassa kesäaikana, jolloin lämpöä ei oteta talteen, vaan molempien järjestelmien tapauksessa jäähdytys tuotetaan jäähdytyskoneella. Tällä ei ole vaikutusta elinkaarikustannusten eron muodostumiseen.

Molemmissa järjestelmävaihtoehdoissa on kaksi Aermecin valmistamaa NXW-mallin vedenjäähdytyskoneita, jotka ovat neljällä scroll-kompressorilla porrastettuja /22/. Kylmäaineena niissä käytetään R410A:ta. Vedenjäähdytyskoneilla tuotetaan jäähdytysverkostoon +12 °C menovettä, jotta lämmönsiirtimin erotettuihin jäähdytyspiireihin saadaan +15 °C menovettä.

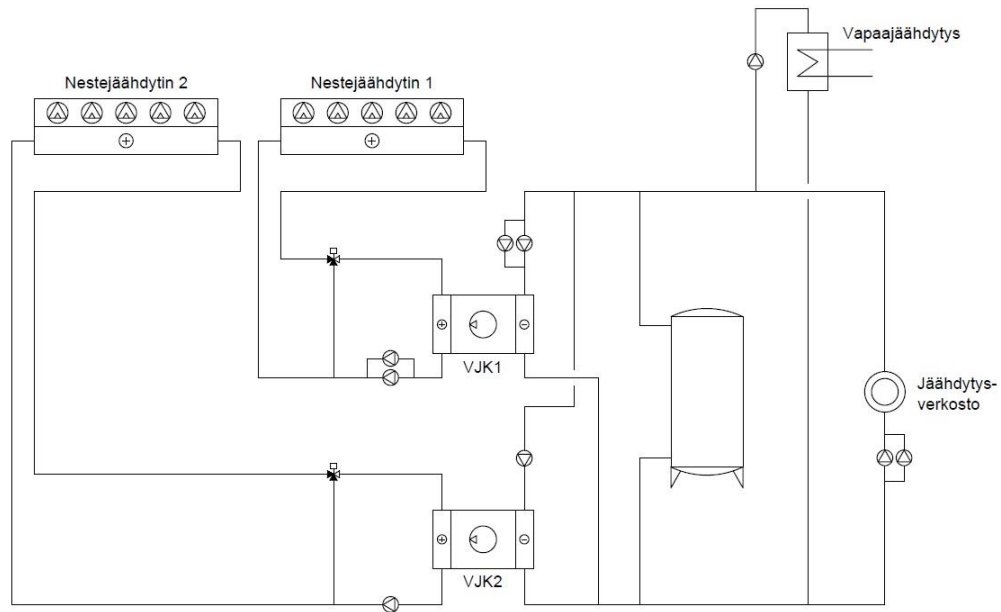
Vapaaäähdystystehoa kummassakin järjestelmässä on käytettävissä 100 kW. Vapaaäähdytyksen tehon mitoitus perustuu tavoitteeseen, jonka mukaan vapaaäähdytyksellä pystytään kattamaan konesalin koko jäähdystarve aina, kun vapaaäähdytystä on saatavilla. Ulkolämpötilan +10 °C raja-arvoa käytettäessä vapaaäähdytyksen käyttötunteja kertyy vuodessa 6144 tuntia. Jos järjestelmän raja-arvoa voitaisiin korottaa viidellä asteella, saataisiin käyttötunteja 1294 tuntia lisää, jolloin päästäisiin 7438 tuntiin vuodessa. Vuoden aikana saatavilla olevan vapaaäähdytyksellä tuotetun jäähdytysenergian jakautuminen vuoden aikana on esitetty kuukausittain kuvassa 17.



KUVA 17. Vuoden aikana käytettävissä oleva vapaaäähditys

Jäähdytysjärjestelmän valinta vaikuttaa myös toteutettavaan lämmitysjärjestelmään. Joko lämmityksessä käytetään ainoastaan kaukolämpöä, joka löytyy rakennuksesta jo entuudestaan, tai vain osittain, jolloin osa lämmitystehosta saadaan konosalin lauhdutusslämmöstä ja loput otetaan kaukolämmöstä, jos tarvetta ilmenee. Jäljempänä mainitussa vaihtoehdossa on kiinnitettävä huomiota kaukolämmön kytkentään, joka ei saa heikentää kaukolämpöverkoston jäähtymistä.

Kuvassa 18 on esitetty periaatekaavio jäähdytysvaihtoehdosta, jossa on kaksi perinteisesti toimivaa vedenjäähdytyskoneetta ja vapaaäähditys. Ensisijaisesti jäähdytyksen tuotantoon käytetään vapaaäähdytystä. Jos vapaaäähdytystä ei ole saatavilla, tuotetaan jäähdytysenergia vedenjäähdytyskoneilla, joiden lauhdutusslämpö siirretään ulkoilmaan.



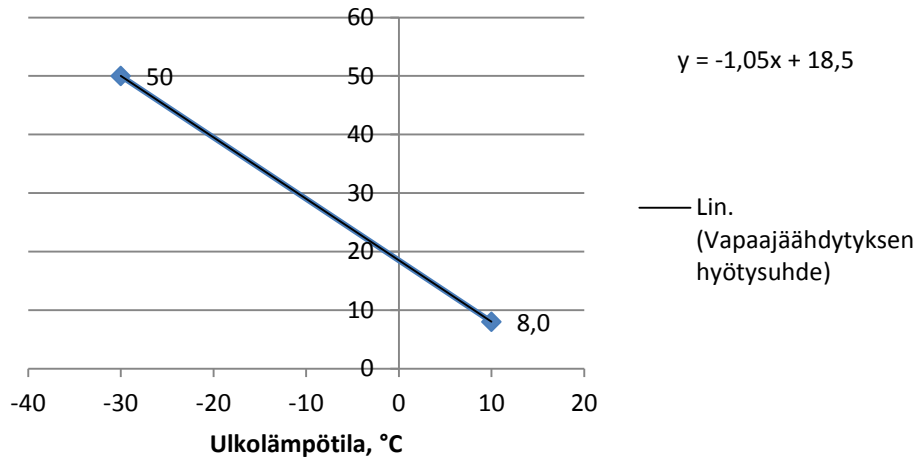
KUVA 18. Periaatekaavio jäähdytysjärjestelmästä, jossa on kaksi vedenjäähdytyskonetta ja vapaajäähdytys

Jäähdytysjärjestelmän energiakustannukset muodostuvat vapaajäähdytyksen ja vedenjäähdytyskoneiden sähkönkulutuksesta sekä kaukolämmöllä tuotettavasta lämmitysenergiasta.

Vapaajäähdytyksen sähkönkulutus vuoden jokaiselle tunnille lasketaan kaavalla 9, jäähdytystehon ja vapaajäähdytyksen hyötysuhteen avulla.

$$P = \frac{\phi}{\varepsilon} \quad (9)$$

Laskennassa jäähdytysteho on vuoden jokaisena tuntina vakio, 100 kW. Vapaajäähdytyksen hyötysuhde on ulkolämpötilasta riippuva. Vapaajäähdytystä käytetään aina, kun ulkolämpötila on alle +10 °C. Laittevalmistajan tietojen perusteella vapaajäähdytysjärjestelmän hyötysuhteelle pätee arvo 8,0 ulkolämpötilassa +10 °C ja 50,0 ulkolämpötilan ollessa -30 °C. Toimintapisteiden perusteella voidaan muodostaa sovite, jolla vapaajäähdytyksen hyötysuhde lasketaan vuoden jokaiselle tunnille vuotuisen säädäntä perusteella. Hyötysuhteen riippuvuus ulkolämpötilasta on esitetty kuvassa 19.

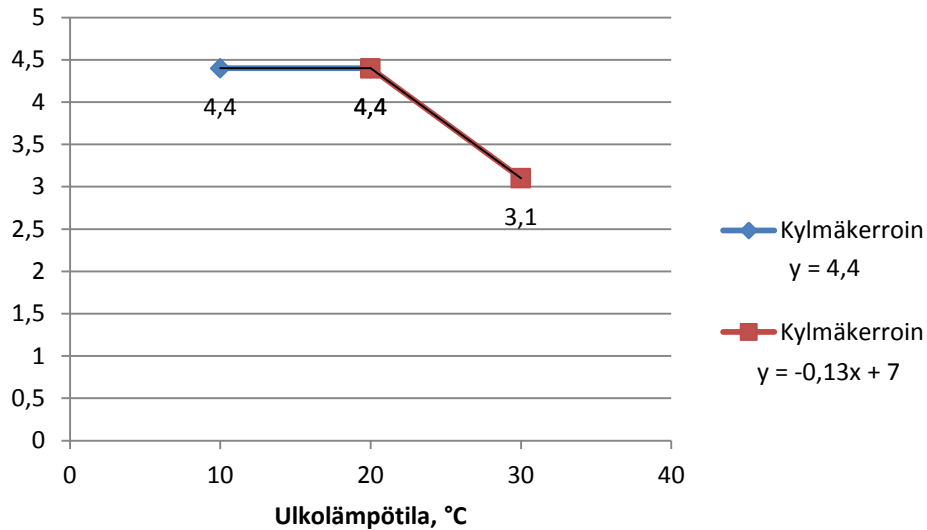


KUVA 19. Vapaajäähdetyksen hyötysuhde ulkolämpötilan funktiona

Kun vapaajäähdetystä ei ole saatavilla, tuotetaan jäähditysenergia vedenjäähdetykskoneella, jonka sähkönkulutus voidaan laskea kaavan 5 perusteella, kun laitteiston kylmäkerroin ja jäähditystehontarve tunnetaan.

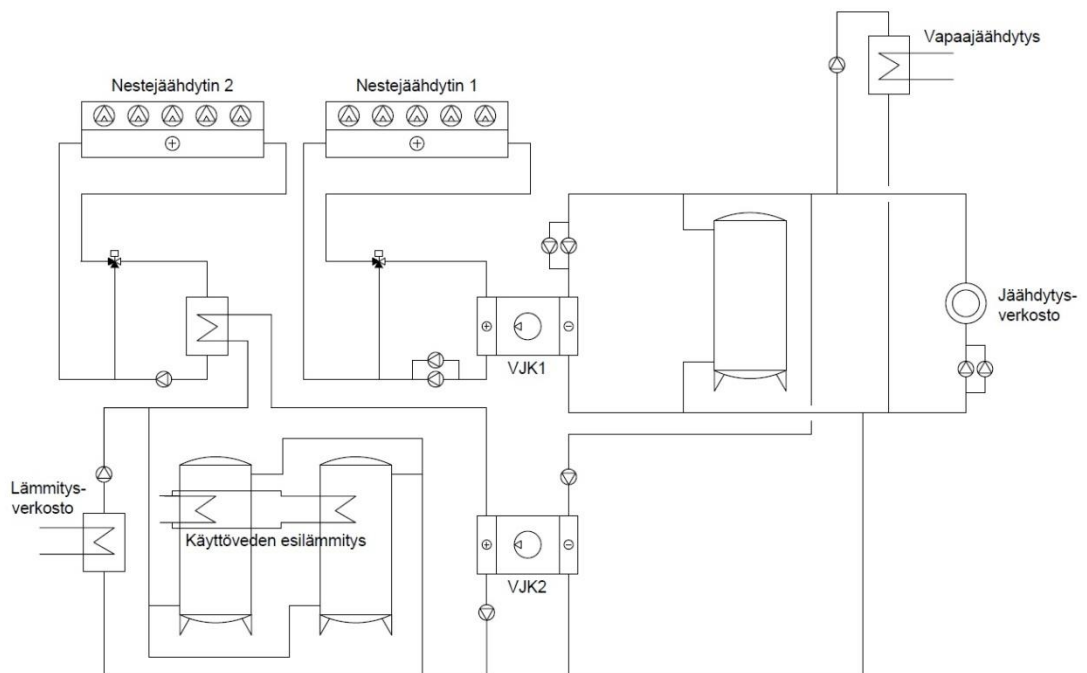
$$\varepsilon = \frac{\phi_h}{P_k} \rightarrow P_k = \frac{\phi_h}{\varepsilon} \quad (5)$$

Jäähdityskoneen tuottama lauhtuslämpö siirretään katolla olevan nestejäädyttimen kautta ulkoilmaan, jolloin lauhtumista ohjataan ulkolämpötilasta riippuen. Laitetoimitajalta saatujen tietojen perusteella ulkolämpötilan ollessa +20 °C tai alle, laitteiston kylmäkerroin on vakio, 4,40. Yli +20 °C ulkolämpötila vaikuttaa heikentävästi kylmäkertoimeen, jolloin laitevalmistajan mukaan +30 °C:ssa kylmäkerroin on 3,10. Jäähdityskoneen kylmäkerroin heikkenee ulkolämpötilan noustessa, koska samalla jäähdityskoneen lauhtumislämpötilaa joudutaan korottamaan, jotta lauhtumislämpö saadaan siirtymään ulkoilmaan. Vaikkei laitteiston hyötysuhde kompressorien tehoportaiden takia ole täysin lineaarisesti verrannollinen ulkolämpötilaan nähden, voidaan oletusta käyttää pitkän aikavälin tarkastelussa. Kuvassa 20 on esitetty jäähdityskoneen kylmäkerroin ulkolämpötilanfunktiona.



KUVA 20. Jäähdytyskoneen kylmäkerroin ulkolämpötilan funktiona

Toisena vaihtoehtona on lämmön talteenotolla varustettu jäähdytysjärjestelmä, jonka periaatekaavio on esitetty kuvassa 21.



KUVA 21. Periaatekaavio jäähdytysjärjestelmästä, jossa toinen vedenjäähdytyskoneista on varustettu lämpöpumpputoiminnolla, lisänä vapaajäähdytys

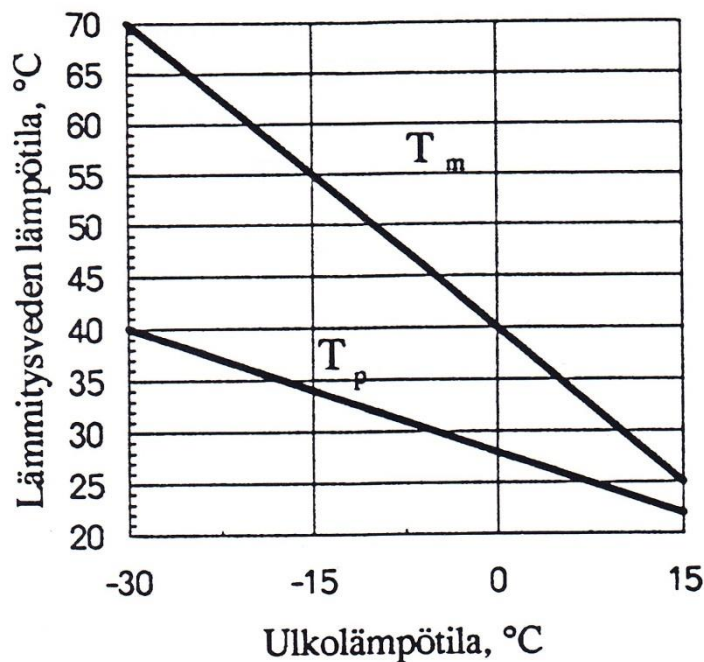
Toinen järjestelmän jäähdytyskoneista toimii tavanomaisesti, kuten molemmat kuvan 17 jäähdytyskoneet. Toinen jäähdytyskoneista on kytketty lämmitysjärjestelmään, jonne jäähdytysjärjestelmästä saatava lämpö voidaan lauhduttaa. Lauhdutuslämpö

voidaan siirtää myös ulkoilmaan lämmönsiirtimen kautta, jos lämmitystarvetta ei ole. Näin ollen toisella jäähdytyskoneella on kaksi toimintatilaa, lämpöpumppu- ja jäähdytyskäyttö.

Jäähdytyksen tuotanto riippuu, esiintyykö rakennuksessa lämmitystarvetta vai ei. Tapauksessa, jossa lämmitystarvetta ei esiinny, tuotetaan jäähdytys vapaajäähdytyksellä, mikäli sitä on saatavilla. Jos vapaajäähdytystä ei ole saatavilla, tehdään jäähdytys jäähdytyskoneella, jossa ei ole lämpöpumpputoimintoa. Tämän jälkeen lisää jäähdytystä voidaan tehdä myös toisen jäähdytyskoneen jäähdytystoiminnolla. Pelkällä jäähdytystoiminnolla toimiva jäähdytyskone on mitoitettu yli konesalin jäähdytystarpeen, joten lämpöpumpputoiminnolla varustetun jäähdytyskoneen jäähdytyskäyttöä ei ilmene tämän työn laskennassa. Kun rakennuksessa ei esiinny lämmitystarvetta, voidaan jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutus laskea, kuten on edellä, toisen järjestelmävaihtoehdon yhteydessä selostettu, sillä samat jäähdytyskoneen kylmäkertoimet ja vapaajäähdytyksen hyötysuhteet pätevät molemmissa järjestelmissä.

Kun rakennuksessa esiintyy lämmitystarvetta, tuotetaan joko osa tai kaikki jäähdytysenergiasta lämpöpumpulla riippuen siitä, kuinka suuressa määrin rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarve kohtaavat. Lämpöpumpun lämpökerroin ja samalla sähkönkulutus riippuu lämmitysjärjestelmän säätökäyrästä, jonka mukaan lämpöpumpun lauhtumislämpötilaa ohjataan. Futura-rakennuksen lämmitysjärjestelmä on mitoitettu $70\text{ °C} - 40\text{ °C}$ meno- ja paluulämpötiloille. Jäähdytysjärjestelmästä saatava lämpö saadaan siirrettyä lämmitysjärjestelmään aina, sillä lämpöpumpulla voidaan lämmitysveden lämpötila korottaa 57 °C :n asti, jolloin paluueden lämpötila myös mitoitusolosuhteissa alittaa lämpöpumpun lämpötilankorotuksen.

Lämpöpumpulla ei tarvitse päästä lämpötilan korotuksessa mitoitusolosuhteiden menoveden lämpötilaan, koska oikea menoveden lämpötila voidaan saavuttaa sekoittamalla lämpöpumpulla ja kaukolämmöllä tuotettua lämmitysvettä. Kuvassa 21 on esitetty lämmitysverkoston menoveden lämpötila T_m ja paluueden lämpötila T_p ulkoilma-olosuhteiden suhteen /25, s. 186/.



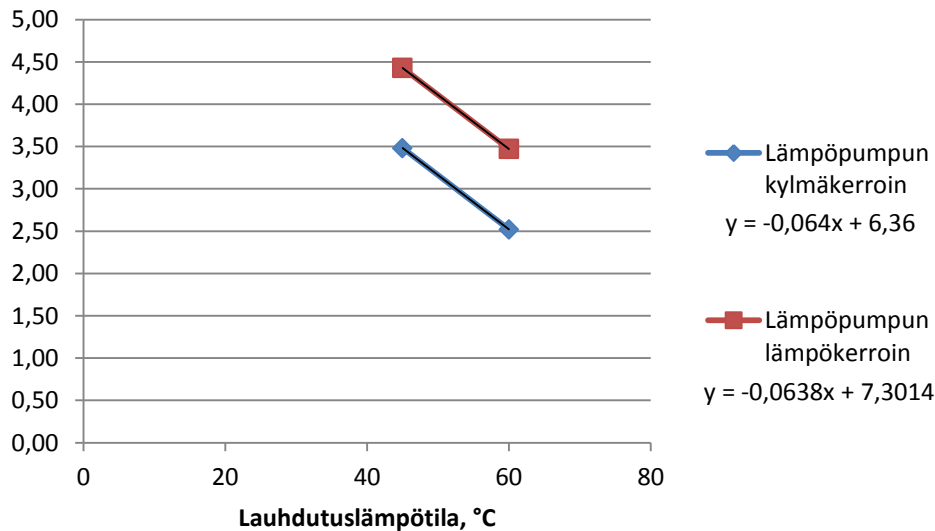
KUVA 22. Lämmityksen säätökäyrä 70–40-mitoituksella /25, s. 186/

Kuten kuvasta 22 voidaan nähdä, sekoitusta oikean menoveden lämpötilan saavuttamiseksi tarvitaan vasta, kun ulkolämpötila alittaa -20 °C . Kun tarkastellaan lämmöntarvelukuja mitoitusolosuhteissa, voidaan huomata lämpöpumpulla tuotetun lämmön olevan murto-osa kokonaislämmitystarpeesta, noin 10–20 %. Voidaan olettaa, ettei menoveden lämpötilan saavuttamisessa ilmene ongelmia.

Käytännössä järjestelmän sähkönkulutus kasvaa ulkolämpötilan laskiessa. Lauhdutuslämpötilalla $+60\text{ °C}$ lämpöpumppu toimii kylmäkertoimella 2,52 ja lauhdutuslämpötilalla $+45\text{ °C}$ kylmäkerroin on 3,48. Laskennassa tarvitaan myös lämpöpumpun lämpökertoimia kyseisillä lauhtumislämpötiloilla. Teoreettisen prosessin tapauksessa lämpökerroin voitaisiin laskea kaavalla 8, mutta todellisuudessa lämpöpumpun käytössä ilmenee häviöitä. Lämpökerroin eri lauhtumislämpötiloille on laskettava valitun toimintapisteen höyrystymis- ja lauhtumistehojen sekä kylmäkertoimen perusteella. Laittevalmistajan tietojen mukaan käytettäessä lauhtumislämpötilana $+60\text{ °C}$, jäähdytysteholla 215 kW on lauhdutustehon tarve 296 kW. Kun taas käytettäessä lauhtumislämpötilana $+45\text{ °C}$, jäähdytysteholla 212 kW on lauhdutustehon tarve 270 kW. Lämpökerroin lasketaan yhdistämällä kaavat 5 ja 7.

$$\varphi = \frac{\phi_l}{P_k} = \frac{\phi_l}{\frac{\phi_h}{\varepsilon}} \quad (5,7)$$

Edellä mainituilla arvoilla lämpökertoimeksi saadaan 3,47 lauhtumislämpötilan ollessa +60 °C ja +45 °C:ssa 4,43. Lämpöpumpun kylmä- ja lämpökertoimet on esitetty lauhtuslämpötilan funktiona kuvassa 23.



KUVA 23. Lämpöpumpun kylmä- ja lämpökerroin lauhtuslämpötilan funktiona

Tässä työssä laskentaa on yksinkertaistettu ja lämmitysjärjestelmän säätökäyrän arvojen sijaan lämpöpumpun lauhtumislämpötilaksi oletetaan +45 °C aina, kun ulkolämpötila on yli +15 °C. Kun ulkolämpötila on +15 °C tai vähemmän, käytetään lauhtumislämpötilana +60 °C. Tällöin laskennassa käytetään lämpöpumpun kylmäkerrointa arvoa 3,48 ja lämpökerrointa 4,43, kun ulkolämpötila ylittää +15 °C. Ulkolämpötilan ollessa +15 °C tai alle kylmäkerroin on 2,52 ja lämpökerroin 3,47.

Lämpöpumpun sähkön kulutus riippuu siitä, kuinka paljon lämpöpumpusta saatavaa lauhtuslämpöä voidaan käyttää. Lämpöpumpusta saatavilla oleva lauhtusteho koostuu jäähdytystehosta ja jäähdytystehon tuottavasta kompressoritehosta. Laskennassa jäähdytysteho on vakio 100 kW, mutta lämpöpumpun kylmä- ja lämpökertoimet vaihtelevat ulkolämpötilasta riippuen, jonka takia myös lauhtustehoon vaikuttava kompressorin vaatima teho vaihtelee vuoden aikana. Saatavissa oleva lauhtusteho lasketaan vuoden jokaiselle tunnille kaavojen 5 ja 7 perusteella.

$$\phi_l = \varphi * P_k = \varphi * \frac{\phi_h}{\varepsilon} \quad (5,7)$$

Lauhdutustehosta ei voida käyttää aina kaikkea, jonka takia saatavilla olevaa lauhdutustehoa on verrattava tunneittain rakennuksen lämmitystehontarpeeseen, jolloin saadaan käytettävissä oleva lauhdutusteho. Käytettävissä olevan lauhdutustehon perusteella voidaan laskea lämpöpumpulla tuotettava jäähdytysteho. Jäähdytysteho laskeaan yhdistämällä kaavat 5 ja 7.

$$\phi_h = \varepsilon * P_k = \varepsilon * \frac{\phi_l}{\varphi} \quad (5,7)$$

Mikäli kaikkea saatavilla olevaa lauhdutuslämpöä ei voida käyttää, ei lämpöpumpulla voida tuottaa kuin osa konesalin jäähdytystehontarpeesta. Puuttuva osa jäähdytystehosta tuotetaan joko vapaajäähdytyksellä tai toisella vedenjäähdytyskoneella, joiden sähkön kulutuksen laskenta on kuvattu aiemmin tässä työssä. Lämpöpumpun sähkön kulutus voidaan laskea joko jäähdytystehon ja kylmäkertoimen tai lauhdutustehon ja lämpökertoimen perusteella, kaavoilla 5 ja 7.

$$P_k = \frac{\phi_l}{\varphi} \text{ tai } \frac{\phi_h}{\varepsilon} \quad (5,7)$$

Kun lämpöpumpun tuottama lauhdutuslämpö ei riitä kattamaan koko lämmitystarvetta, tuotetaan loput lämmitystarpeesta kaukolämmöllä, jonka määrä lasketaan vertaamalla tunneittain lämmitystarvetta lämpöpumpun tuottamaan lauhdutuslämpöön.

6.3 Huoltokustannusten laskenta

Vertailtavina olevissa jäähdytyksen tuotantojärjestelmissä huoltokustannusten ero muodostuu lähinnä poikkeavista jäähdytyksen tuotannon käyttöajoista, joka vaikuttaa käytössä kuluvien osien, kuten kompressoreiden menekkiin elinkaaren aikana. Jäähdytysjärjestelmän muiden osien, kuten pumppujen oletetaan kestävän toimintakuntoisena koko laitteistolle suunnitellun elinkaaren. Jäähdytyslaitteiden muut huoltotoimenpiteet ovat kummassakin vertailutapauksessa samat, jotka käsittävät määräaikaisten kylmälaitteiden tiiveystarkastukset.

Lämpöpumpun tapauksessa kompressoreiden käyntiajat ovat huomattavasti suuremmat, sillä niitä käytetään ympäri vuoden. Kahden perinteisen vedenjäähdytyskoneen tapauksessa kompressorit käyvät vain kesällä, kun lämmityskauden aikana jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytyksellä. Elinkaaren aikana korvattavien kompressorien määrä voidaan määrittää laskemalla elinkaaren aikana syntyvät käyttötunnit ja vertaamalla niitä kompressorivalmistajan antamaan tietoon keskimääräisestä kompressorin käytöstä.

Kompressoreiden vuotuinen käyntiaika voidaan laskea kaavalla 11, kun tiedetään vedenjäähdytyskoneella tai lämpöpumpulla tuotettava jäähdytysteho vuoden jokaisena tuntina ja yhden kompressorin tuottama jäähdytysteho.

$$t_k = \frac{\phi_h}{\phi_k} \quad (11)$$

missä

t_k on kompressorin käyntiaika, h

ϕ_h on jäähdytystehontarve, kW

ϕ_k on kompressorin jäähdytysteho, kW

Kompressorin jäähdytysteho saadaan jakamalla lämpöpumpun tai vedenjäähdytyskoneen kokonaisjäähdytysteho koneen kompressoreiden lukumäärällä.

6.4 Elinkaarikustannusten eron laskenta

Elinkaarikustannusten laskentaa varten on valittava elinkaaren pituus vuosina. Tässä työssä elinkaarena käytetään kahtakymmentä vuotta, jota suositellaan jäähdytysjärjestelmille The Green Gridin julkaisussa ”Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines” /22, s. 14/. Lisäksi elinkaarikustannusten laskentaa varten on valittava energiatuotteiden hinnannousu, sekä korkokanta, jolla tulevaisuudessa syntyvät kustannukset muunnetaan nykyarvoon. Molempien arvojen on oltava prosentteina. Hinnannousuna voidaan käyttää 4,6 % ja diskonttauskorkona 3 %, jotka on esitetty elinkaarikustannusten laskentaohjeessa /20, s. 58/.

Elinkaarikustannusten ero voidaan laskea, kun elinkaaren aikana syntyvät kulut on selvitetty. Kulut tulee olla jaoteltuna elinkaaren jokaiselle vuodelle erikseen, sillä ny-

kyarvolistaminen eli diskonttaus toimitetaan vuositasolla. Tämän jälkeen kulut voidaan laskea yhteen, kuten kaavassa 10 on esitetty.

6.5 Energiatehokkuuden arviointi

Energiatehokkuuden arvioimiseksi lasketaan molempien järjestelmien PUE-arvo vuoden aikana syntyvän energiankulutuksen perusteella. Lämmöntalteenotolla varustetulle järjestelmälle lasketaan PUE:n lisäksi NPUE, jossa lämpöpumpun kuluttama sähkö voidaan vähentää jäähdytyksen tuotantoon kuluvasta energiasta.

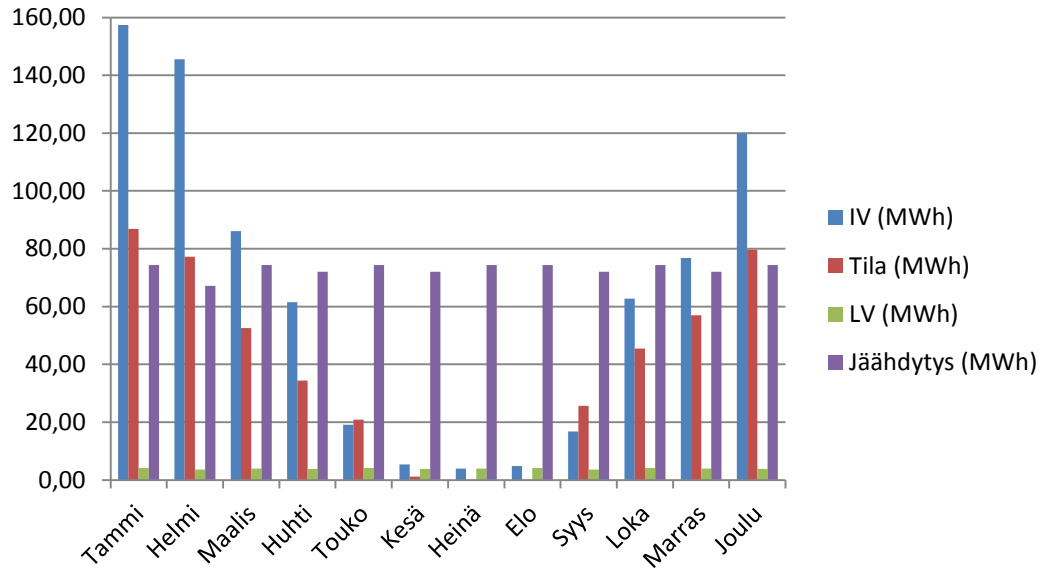
PUE- ja NPUE-arvot lasketaan energiasimulaation ja jäähdytyksen tuotannon energialaskennan tuloksena saatujen energian kulutustietojen pohjalta. Energiasimuloinnista saadaan tiedot ilmanvaihtoon ja valaistukseen käytetystä energiasta. Jäähdytyksen tuotannon taulukkolaskennasta saadaan vedenjäähdytyskoneiden, lämpöpumpun ja vapaajäähdytyksen sähkönkulutus. Näiden tietojen lisäksi lasketaan jäähdytyksen pumppujen ja puhaltimien energian kulutus hyötysuhteiden ja tehojen perusteella.

Palvelinten energiankulutusta laskettaessa on otettava huomioon, että tutkimuskohteen esittelyssä ilmoitettu palvelinten teho sisältää virtalähteet, joiden energiankulutusta ei voida sisällyttää IT-laitteiden energiankulutukseen. Virtalähteiden osuus palvelinten kokonaistehosta on noin 6 %. IT-laitteiden teho on näin ollen 94 kW, jolloin sähköä vuodessa kuluu vähintäänkin 823,4 MWh. PUE- ja NPUE saadaan, kun konesalin kokonaisenergian kulutus jaetaan IT-laitteiden energiankulutuksella.

7 TULOKSET

7.1 Jäähdytyksestä saatavan lämmön säästöpotentiaali

Säästöpotentiaali perustuu lämmityksen ja jäähdytyksen yhtäaikaiseen tarpeeseen tun-
tiasolla. Ilmaista lämpöenergiaa on tarjolla tasaisesti 100 kW per tunti. Kaikkea tästä
lämpöenergiasta ei aina voida käyttää, sillä lämmöntarve on vähäistä etenkin kesällä.
Jäähdytyksestä saatavan lämmön ja lämmitystarpeiden kohtaamista voidaan tarkastel-
la karkeasti kuukausitasolla, joka on esitetty kuvassa 24.

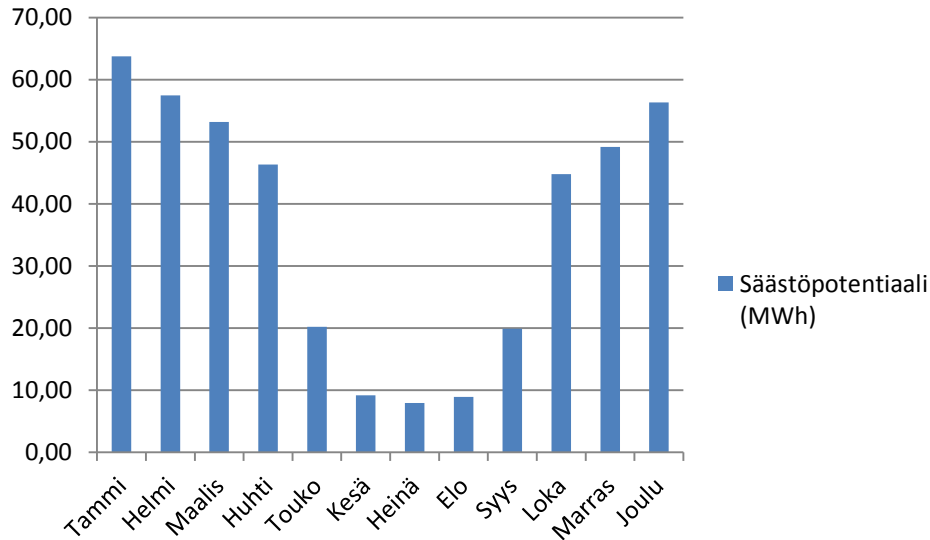


KUVA 24. Futuran vuosittainen lämmitys- ja jäähdytysenergiatarve

Kuukausikohtaisen tarkastelun perusteella voidaan todeta, että merkittävä osa lämmitysenergiankulutuksesta voidaan kattaa jäähdytyksestä saatavalla lämmöllä, mikäli lämpötilataso saadaan korotettua lämmityksen menoveden tasolle, jolloin jäähdytysjärjestelmästä saatavalla lämmöllä voidaan korvata lämmitystarvetta vastaava osuus kokonaisuudessaan.

Kuten kuvasta 22 voidaan nähdä, jo pelkällä jäähdytysjärjestelmästä saatavalla lämmöllä voidaan kattaa tilojen lämmitystarve. Hukkalämmön lämpötilankorottamisen yhteydessä syntyy lisää lämpöä, joka voidaan käyttää lämmityksessä. Jotta kaikki mahdollinen lämpöenergia tulisi käytetyksi, syöttökohteeksi on parempi valita ilmanvaihdon lämmitys. Näin ollen lauhdutuslämpö on suunniteltu käytettäväksi sekä ilmanvaihdon, että käyttöveden lämmitykseen. Tilalämmityksen järjestelmään on jätetty varaukset, mikäli lämmön talteenottoa halutaan laajentaa.

Tuntikohtaisen tarkastelun perusteella saadaan säästöpotentiaali, joka on mahdollista säästää ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmityksessä. Säästöpotentiaali on esitetty kuukausittain kuvassa 25.



KUVA 25. Lämmitys- ja jäähdytystarpeen kohtaaminen

Jäähdytysjärjestelmästä saatavalla lämpöenergialla on vuoden aikana mahdollista korvata 437,1 MWh lämmitysenergiaa, joka on 34 % koko rakennuksen lämmitystarpeesta.

Paikallisen kaukolämpöyhtiön vuoden 2013 hinnoittelun mukaan kaukolämmön energiamaksu on 44,80 €/MWh. Näiden yleisten hintojen perusteella kaukolämpökuluissa voitaisiin säästää jopa 19 600 € vuodessa. /26./

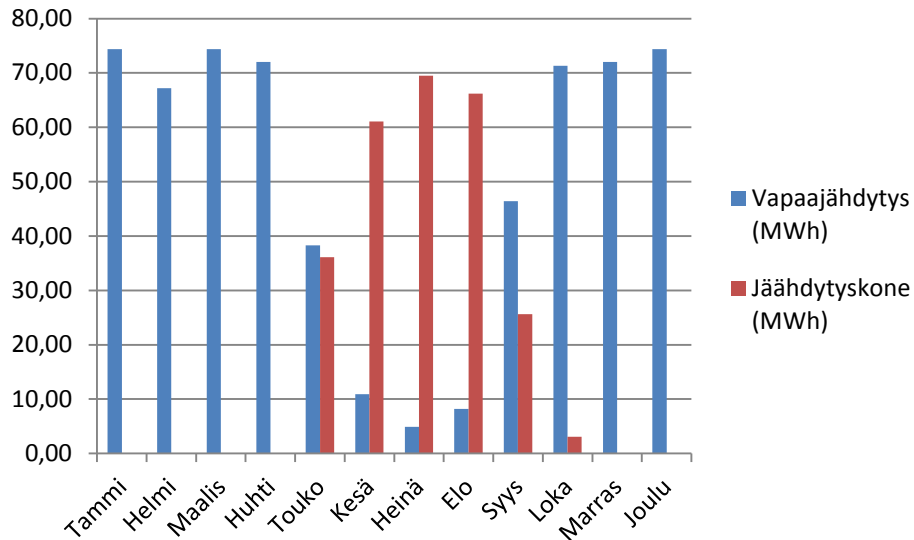
7.2 Vertailtavien järjestelmien energian kulutus

Jäähdytyksen osalta vaihtoehtoisia järjestelmiä ovat vapaajäähdytyksellä varustettu kompressorikäyttöinen jäähdytys sekä vapaajäähdytyksellä ja lämpöpumpputoiminnolla varustettu kompressorikäyttöinen jäähdytys.

7.2.1 Kompressoriin perustuva jäähdytys vapaajäähdytyksellä

Mikäli vapaajäähdytystä ei ole käytettävissä, jäähdytysteho tuotetaan kokonaisuudessaan jäähdytyskoneella. Jäähdytyskoneiden lauhdutuslämpö siirretään katolla olevien nestejäähdyttimien kautta ulkoilman.

Jäähdytysenergian vuotuinen tuotanto vapaajäähdytyksellä ja jäähdytyskoneella on esitetty kuukausittain kuvassa 26.



KUVA 26. Jäähdytysenergian tuotanto jäähdytyskoneella ja vapaajäähdytyksellä

Vapaajäähdytyksellä voidaan tuottaa vuodessa 614,4 MWh jäähdytysenergiaa, jäähdytyskoneella tuotettavaksi jää 261,6 MWh jäähdytysenergiaa. Vapaajäähdytyksellä voidaan tuottaa suurin osa, 70,1 % vuotuisesta jäähdytystarpeesta, jolloin jäähdytyskoneen osuus on 29,9 % jäähdytyksen tuotannosta.

Kylmäkerrointen ja ulkolämpötilan perusteella voidaan laskea järjestelmän jäähdytyksen tuotannon vuotuinen sähkönkulutus, joka on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Jäähdytysentuotannon sähkönkulutus

	Vapaajähdytys, MWh	Jäähdytyskone, MWh	Sähkön kokonaiskulutus, MWh
Tammi	2,66	0,00	2,66
Helmi	2,34	0,00	2,34
Maalis	3,73	0,00	3,73
Huhti	4,13	0,00	4,13
Touko	2,97	8,34	11,31
Kesä	1,08	14,14	15,22
Heinä	0,50	15,84	16,34
Elo	0,82	15,16	15,98
Syys	3,97	5,82	9,78
Loka	4,52	0,70	5,23
Marras	3,85	0,00	3,85
Joulu	3,16	0,00	3,16
Yhteensä	33,74	60,00	93,74

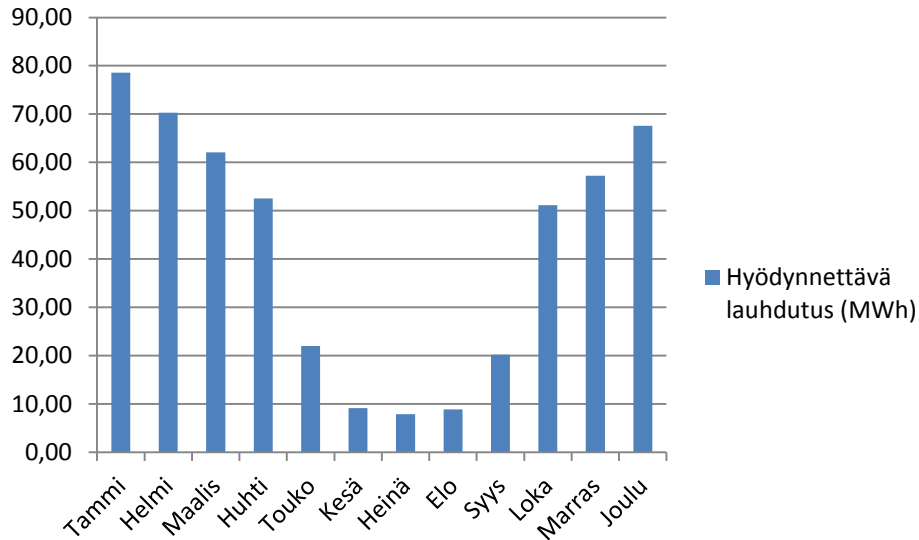
Jäähdytysjärjestelmän kuluttaman sähkön lisäksi vuotuisiin energiakuluihin lasketaan lämmitysenergian kulutus, joka kokonaisuudessaan tuotetaan kaukolämmöllä. Kaukolämmityksen energiankulutus on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Lämmitystarve kaukolämmöllä

	IV, MWh	Tila, MWh	LV, MWh	Kaukolämpö yhteensä, MWh
Tammi	157,38	86,89	4,14	248,41
Helmi	145,54	77,19	3,60	226,33
Maalis	86,10	52,53	3,96	142,59
Huhti	61,52	34,43	3,78	99,73
Touko	19,16	20,86	4,14	44,15
Kesä	5,39	1,17	3,78	10,33
Heinä	3,96	0,06	3,96	7,98
Elo	4,77	0,05	4,14	8,96
Syys	16,78	25,68	3,60	46,06
Loka	62,69	45,50	4,14	112,34
Marras	76,81	57,01	3,96	137,78
Joulu	119,77	79,67	3,78	203,23
Yhteensä	759,87	481,02	46,98	1287,88

7.2.2 Lämpöpumppu vapaajähdytyksellä

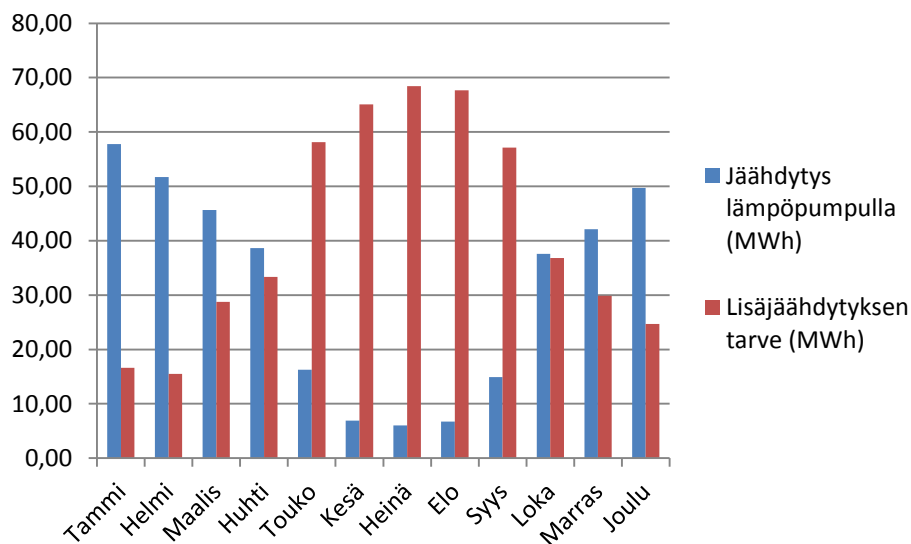
Lämpöpumpulla varustetun järjestelmän energiankulutusta laskettaessa on ensimmäisenä tarkasteltava rakennuksen lämmitystarvetta ja verrattava sitä jäähdytystarpeesta riippuvaan lauhdutuslämmön määrään. Saatavilla olevan lauhdutuslämmön ja lämmitystarpeen perusteella saadaan hyödynnettävissä olevan lauhdutuslämmön määrä, joka on esitetty kuvassa 27.



KUVA 27. Futuran vuosittainen lämmitys- ja jäähdytystarve

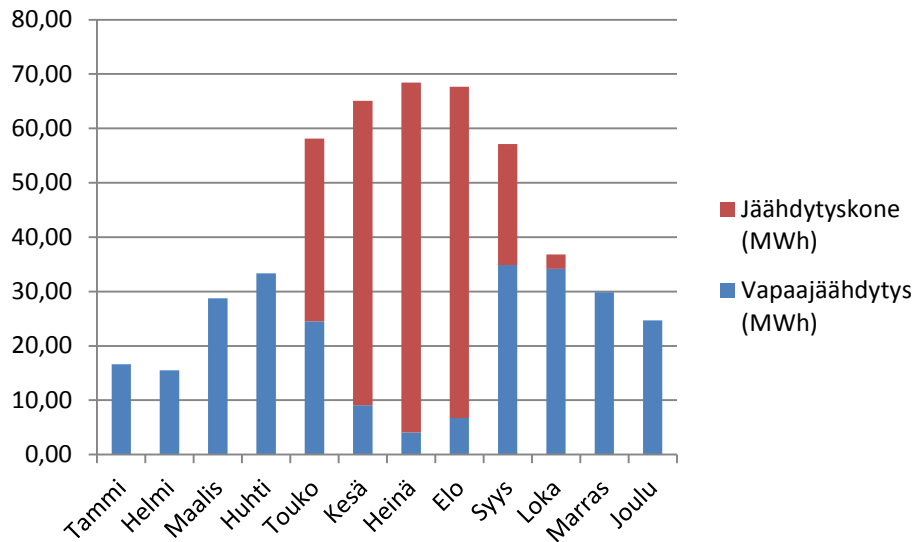
Lauhdutuslämpöä voidaan käyttää yhteensä 507,7 MWh vuodessa, joka on 39,4 % koko rakennuksen vuotuisesta lämmitystarpeesta.

Lämpöpumpun jäähdytysteho määräytyy hyödynnettävän lauhdutuksen perusteella. Lämpöpumpulla tuotettu jäähdytysenergia ja lisjäähdytyksen tarve on esitetty kuvassa 28.



KUVA 28. Jäähdytys lämpöpumpulla ja lisjäähdytyksen tarve

Lämpöpumpulla saadaan tuotettua 374,0 MWh jäähdytysenergiaa vuodessa, joka on 42,7 % konesalin jäähdytystarpeesta. Lisäjäähdytys tuotetaan vapaajäähdytyksellä ja jäähdytyskoneella. Kuvassa 29 on esitetty jäähdytysenergian tuotannon jakautuminen vapaajäähdytyksen ja jäähdytyskoneen välillä.



KUVA 29. Jäähdytys vapaajäähdytyksellä ja jäähdytyskoneella

Vapaajäähdytyksellä saadaan tuotettua jäähdytysenergiaa 262,2 MWh ja jäähdytyskoneella 239,8 MWh. Vapaajäähdytyksen osuus vuodessa tuotetusta jäähdytyksestä on 30,0 % ja jäähdytyskoneen 27,4 %.

Järjestelmän käyttökulujen laskemiseksi lasketaan järjestelmän sähkön kulutus. Järjestelmän sähköenergian kulutus koostuu lämpöpumpun, vapaajäähdytyksen ja jäähdytyskoneen kuluttamasta sähköstä. Sähkön kulutus voidaan laskea kunkin tuotantotavan tuntikohtaisen jäähdytystehon ja hyötysuhteen tai kylmäkertoimen perusteella. Jäähdytysmuotojen vuotuinen sähkönkulutus on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Jäähdytyksen tuotannon sähkönkulutus

	Lämpöpumppu, MWh	Vapaajäähdytys, MWh	Jäähdytyskone, MWh	Sähkön kokonaiskulutus, MWh
Tammi	23,11	0,68	0,00	23,79
Helmi	20,68	0,60	0,00	21,28
Maalis	18,26	1,50	0,00	19,76
Huhti	15,46	1,94	0,00	17,40
Touko	6,34	1,97	7,77	16,08
Kesä	2,52	0,90	12,97	16,39
Heinä	2,14	0,42	14,65	17,21
Elo	2,43	0,67	13,96	17,07
Syys	5,94	3,00	5,05	13,99
Loka	15,04	2,33	0,60	17,96
Marras	16,85	1,63	0,00	18,47
Joulu	19,88	1,14	0,00	21,02
Yhteensä	148,63	16,80	55,01	220,44

Sähkön lisäksi rakennuksessa tarvitaan kaukolämpöä, koska lauhdutuslämmöllä ei voida kattaa koko lämmitystarvetta, vaan loput ilmanvaihdon ja lämpimänkäyttöveden vaatimasta lämmitystehosta on tuotettava kaukolämmöllä. Myös koko tilalämmityksen lämmitystarve tuotetaan kaukolämmöllä. Lauhdutuslämmön lisänä käytettävän kaukolämmön tarve on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Lämmitystarve kaukolämmöllä

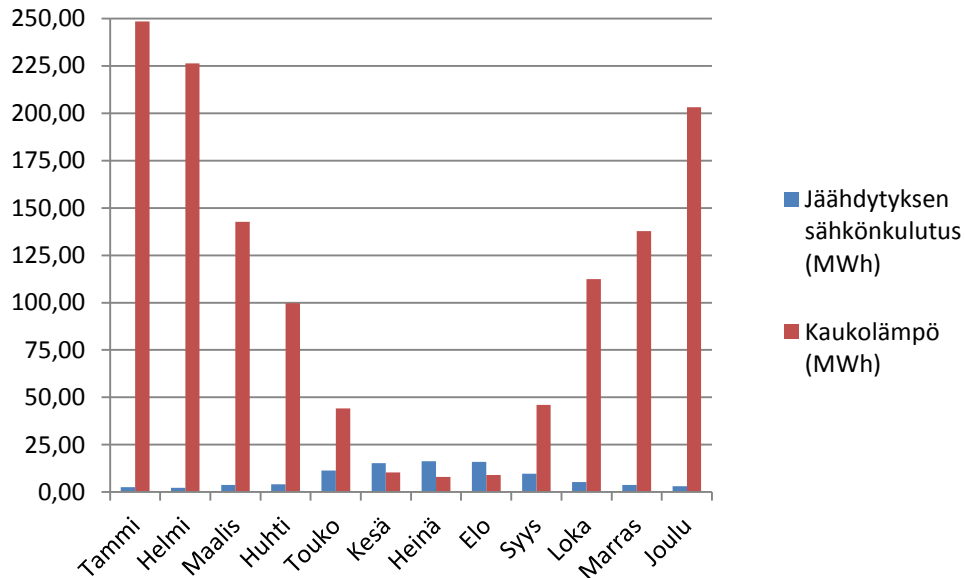
	IV ja LV lisälämmitys- tarve, MWh	Tilalämmitys, MWh	Kaukolämpö yhteensä, MWh
Tammi	82,96	86,89	169,85
Helmi	78,83	77,19	156,02
Maalis	27,98	52,53	80,51
Huhti	12,74	34,43	47,16
Touko	1,32	20,86	22,18
Kesä	0,00	1,17	1,17
Heinä	0,00	0,06	0,06
Elo	0,00	0,05	0,05
Syys	0,15	25,68	25,83
Loka	15,71	45,50	61,21
Marras	23,49	57,01	80,50
Joulu	55,94	79,67	135,62
Yhteensä	299,13	481,02	780,15

7.3 Käyttökustannukset

Energiakustannukset muodostuvat kaukolämmön ja sähkön kulutuksesta. Laskennassa otetaan huomioon vain energiamaksut, jotka lasketaan arvonlisäverottomina. Perus- ja tehomaksuja ei huomioida. Energiakustannusten laskennassa käytetään kaukolämmön hintana paikallisen kaukolämpöyhtiön vuoden 2013 hinnoittelua. Kaukolämmön veroton energiamaksu on 44,80 €/MWh /26/. Sähkön hintana käytetään kuvassa 13 esitettyä sähköenergian vähimmäishintaa 52,00 €/MWh. Sähkön energiahintaan lisätään kulutukseen perustuvat energiavero ja huoltovarmuusmaksu, jotka ovat 1. luokassa yhteensä 19,03 €/MWh. Sähkönenergian hinnaksi saadaan 71,00 €/MWh.

7.3.1 Energia

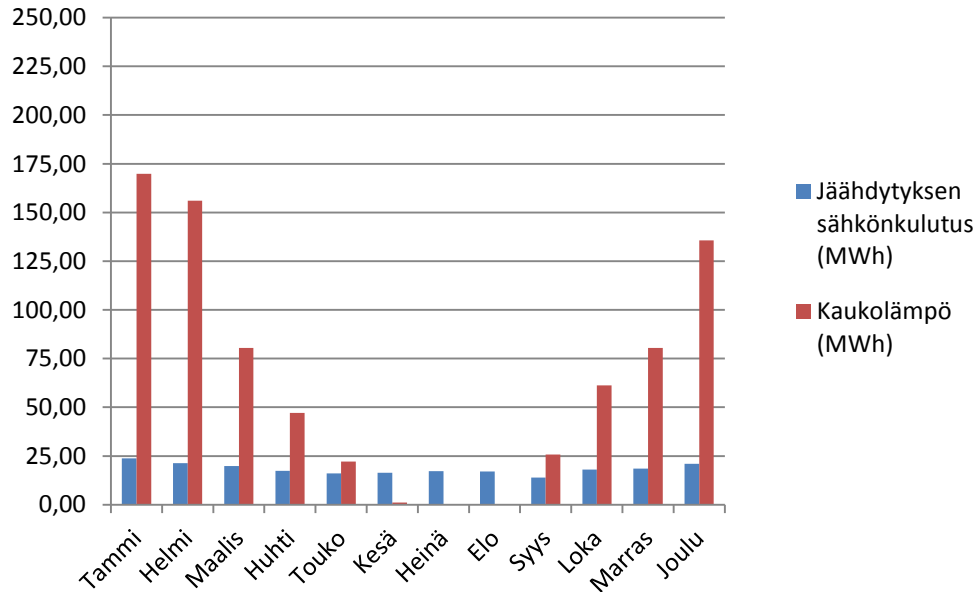
Perinteisellä jäähdytysratkaisulla rakennuksen käyttökustannukset muodostuvat jäähdytyksen tuotannon sähkönkulutuksesta ja lämmitysjärjestelmän kaukolämmön kulutuksesta, jotka on esitetty kuvassa 30.



KUVA 30. Sähkön ja kaukolämmön kulutus kahden jäähdytyskoneen tapauksessa

Kaukolämmön kokonaiskulutus on noin 1 287,88 MWh per vuosi. Kun kaukolämmön hintana käytetään paikallisen kaukolämpöyhtiön hinnoittelua vuovuodelta 2013, vuotuisesti kaukolämmön kustannukseksi saadaan 57 700 €. Sähköä jäähdytyksen tuotantoon kuluu vuodessa 93,74 MWh, jolloin sähköenergian hinnaksi saadaan 6 700 €. Perinteisellä jäähdytysjärjestelmällä rakennuksen lämmityksen ja jäähdytyksen energian kokonaiskustannuksiksi saadaan 64 400 € vuodessa.

Perinteiseen jäähdytysjärjestelmään verrattuna lämpöpumpulla varustetun järjestelmän sähkön kulutus on suurempi, kun taas kaukolämmön kulutus on huomattavasti pienempi. Lämpöpumpulla varustetun jäähdytyksen tuotantojärjestelmän tapauksessa vuotuinen sähkön ja kaukolämmön kulutuksen jakauma on esitetty kuvassa 31.



KUVA 31. Lämpöpumpulla varustetun järjestelmän sähkön ja kaukolämmön kulutus

Lämpöpumppujärjestelmällä rakennuksen kaukolämmön kulutus on noin 780,15 MWh vuodessa, joka tekee kaukolämmön kustannuksiksi 35 000 € vuodessa. Sähköä vuodessa puolestaan kuluu 249,07 MWh, joka maksaa 17 700 €. Järjestelmän energia-kustannuksiksi saadaan yhteensä 52 700 € vuodessa.

Rahallisesti mitattuna lämpöpumpputoiminnolla varustettu järjestelmä on nykyhinnoilla energiakustannuksiltaan vuodessa 11 700 € edullisempi.

7.3.2 Huollot ja korjaukset

Kompressorin käyttöikä on visainen kysymys, johon on hankala saada vastausta niin kirjallisuudesta kuin laitevalmistajiltakaan. Käyttöolosuhteilla on suuri vaikutus kompressorin käyttöikään. Esimerkiksi väärin mitoitettut kompressorit ja riittämätön tehonsäätö voivat johtaa kompressoreiden toistuviin käynnistykseen. Jatkuvat käynnistykset taas rasittavat kompressoreita ja johtavat keskimääräistä lyhempään käyttöikään. Jäähdytyskoneiden ja lämpöpumppujen valmistajat eivät yleisesti ottaen halua ottaa mitään kantaa kompressoreiden kestävyteen, sillä kompressorit laitteisiin tulevat alihankintana. Näin ollen heillä ei ole tekemistä kompressoreiden tuotekehityksen ja -testauksen kanssa. Kompressorivalmistajan puolestaan on vaikea taata mi-

tään keskimääräistä käyttöikä, koska laitteiden kirjo ja käyttöolosuhteet, joissa kompressorit toimivat on hyvin laaja.

Lämpöpumpuissa käytettävien kompressoreiden käyttöikä on todennäköisesti lyhyempi, kuin pelkässä jäähdytyskäytössä olevien. Lyhyemmän käyttöiän oletus johtuu teknisistä ongelmista ja rajoituksista, joita korkean lauhdutuslämpötilan saavuttamiseen liittyy. Vaativampien olosuhteiden vaikutusta ei kuitenkaan voida tässä työssä huomioida, koska ei löydy tutkittua tietoa siitä, kuinka paljon korkeamman lauhdutuslämpötilan käyttö lyhentää kompressorin käyttöikä.

Kompressorivalmistaja Bitzerin mukaan keskimääräinen scroll-kompressorin käyttöikä on kokemusten perusteella keskimäärin 40 000–45 000 tuntia /27/. Tämä tarkoittaa noin viittä vuotta yhtäjaksoisessa käytössä. Useamman kompressorin sisältävissä lämmitys- ja lämmityslaitteissa automatiikka tasaa käyttötunnit kompressoreiden kesken ja käynnistää aina vähiten tunteja kerryttäneen kompressorin. Kompressoreiden suurempi määrä paitsi lisää lämmitys- ja jäähdytysteho, lisää myös laitteen käyttöikä.

Futura-rakennuksen vedenjäähdytyskoneet sisältävät neljä scroll-kompressoria, jolloin kunkin laitteen käyttöikä on 160 000 – 180 000 tuntia. Jäähdytysteho jäähdytyskoneissa on 224,35 kW per laite, jolloin yhden kompressorin tuottama jäähdytysteho on 56,09 kW.

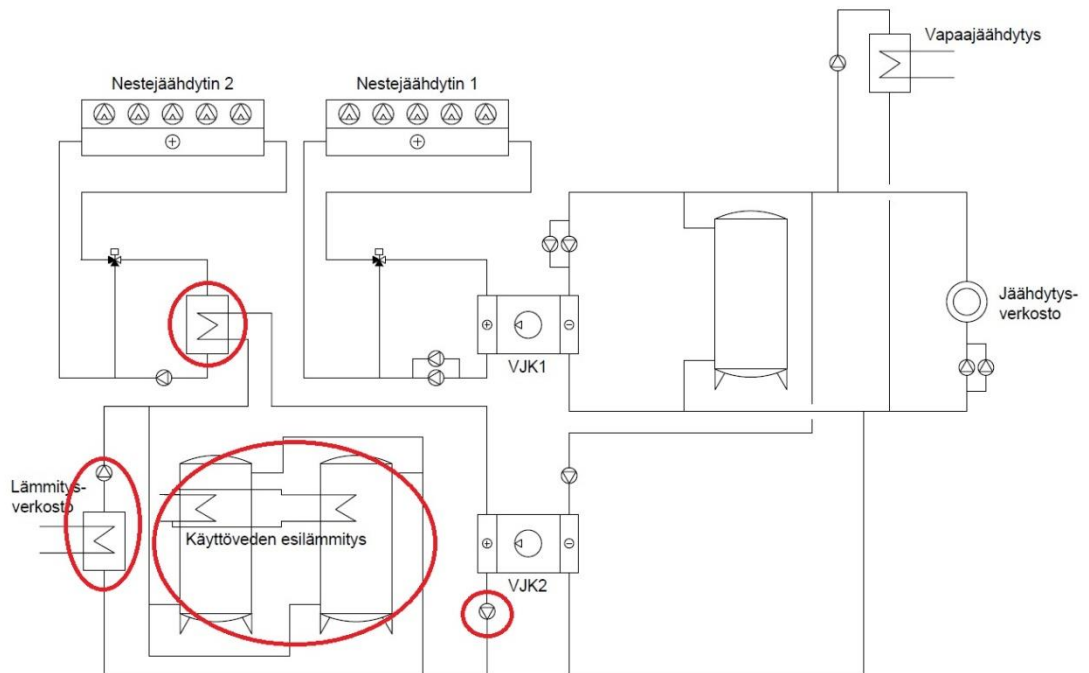
Järjestelmälle, jossa on kaksi vedenjäähdytyskonetta, saadaan kompressoreiden käyttötunneiksi vuodessa 4 664 tuntia. Kahdessakymmenessä vuodessa käyttötunteja kompressoreille kertyy 93 300.

Järjestelmässä, jossa jäähdytystä tuotetaan vedenjäähdytyskoneella ja lämpöpumpulla, kertyy vedenjäähdytyskoneen kompressoreille vuodessa käyttötunteja 4 276 ja lämpöpumpun kompressoreille 6 667. Kahdessakymmenessä vuodessa käyttötunteja tulee vedenjäähdytyskoneen kompressoreille 85 500 ja lämpöpumpulle 133 300.

Kun elinkaaren aikana oletettavasti syntyviä käyttötunteja verrataan laitteiden käyttöikänsä, voidaan olettaa molempien järjestelmävaihtoehtojen jäähdytyksentuotantolaitteiden kestävä toimintakuntoisina laitteille suunnitellun elinkaaren ajan.

7.4 Investoinnit

Investointikustannusten ero järjestelmien välillä on kokonaisuudessaan vähäinen. Eroa syntyy lämpöpumpputoiminnon lisäyksestä, jolloin toisen vedenjäähdytyskoneen lauhdutus kytketään lämmitysjärjestelmään. Lämmöntalteenoton lisäyksen vaatimat lisävarusteet on rengastettu punaisella kuvassa 32. Muilta osin järjestelmien rakenteet ovat samat.



KUVA 32. Lämmöntalteenoton vaatimat lisävarusteet

Lisävarusteiden hinnat perustuvat arvioon ja sisältävät hankinnan lisäksi asennuksen. Lisävarusteiden hinta-arvio on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Lämmöntalteenoton lisävarusteiden hinta-arvio

	Hinta, €
Lämmönsiirrin, 2 kpl	8 000
Varaaja, 2 kpl	8 000
Pumppu taajuusmuuttajalla, 2 kpl	4 000
Putkisto ja varusteet	2 000
Varusteet yhteensä	22 000

Lämmöntalteenoton arvioidaan vaativan 22 000 euron lisäinvestoinnin varusteiden muodossa. Muita investointieroja ei järjestelmien välillä oleteta olevan. Esimerkiksi hankintahinnan kannalta ei ole merkitystä, onko kyseessä perinteinen vedenjäähdytyskone vai vedenjäähdytyskone, jota voidaan käyttää myös lämpöpumppuna. Molemmat laitteet rakennetaan pitkälti samoista osista. Laitteet sisältävät muun muassa samanlaisen ohjausyksikön, jonka säädöistä valitaan, mikä kulloinkin on tarpeenmukainen. Ainoana erona lämpöpumpuissa joudutaan käyttämään suorituskykyisempiä kompressoreita kuin perinteisissä vedenjäähdytyskoneissa. Käytännössä kompressorien laadulla ei kuitenkaan ole merkitystä laitteen kokonaishintaan.

7.5 Elinkaarikustannus

Ero elinkaarikustannuksissa jäähdytyksentuotantojärjestelmien välillä muodostuu ainoastaan eriävistä investointi- ja energiakustannuksista. Tämän työn perusteella kunnossapito-, korjaus- ja huoltokustannukset ovat elinkaaren aikana molempien järjestelmävaihtoehtojen kohdalla yhtä suuret.

Ilman lämmöntalteenottoa tuotetun jäähdytyksen elinkaarikustannuksiksi lasketaan energiakustannukset, sähkö ja kaukolämpö. Nykyhinnoilla kustannukset ovat yhteensä 64 400 € vuodessa. Kun tulevaisuudessa syntyvissä energiakustannuksissa otetaan huomioon energian hinnan nousu ja rahan arvon aleneminen, saadaan järjestelmän elinkaarikustannuksiksi 1 462 300 €.

Lämmöntalteenotolla varustetun järjestelmän tapauksessa energiakustannusten lisäksi huomioidaan poikkeava rakenne, joka on investoinneiltaan 22 000 euroa kalliimpi. Energian osalta lämmöntalteenotolla varustetun järjestelmän vuosikustannukset, sähkö

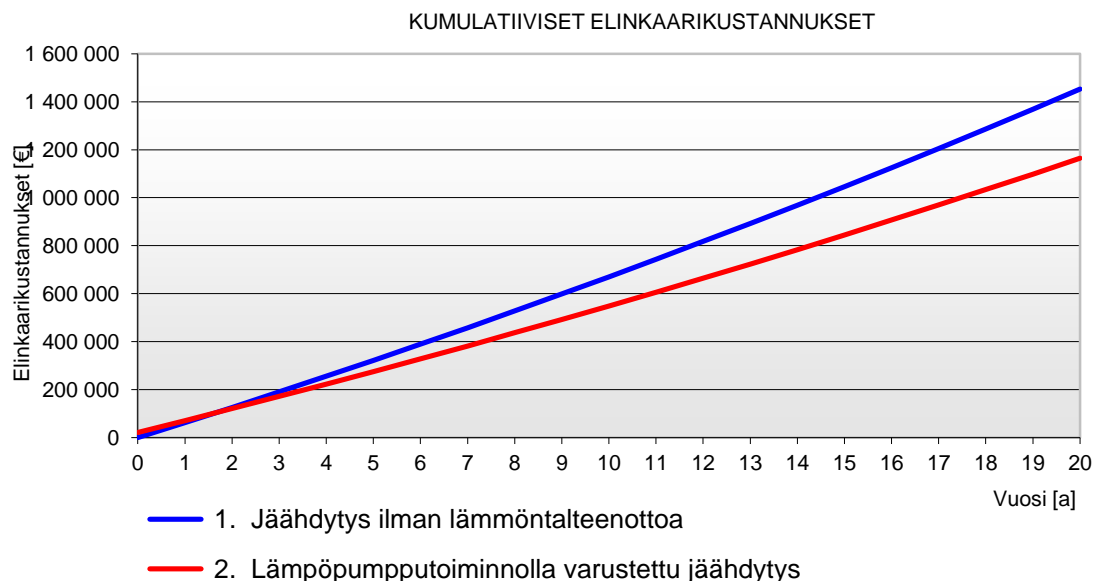
ja kaukolämpö maksavat yhteensä 52 700 €. Kun energiakustannuksissa otetaan huomioon energiatuotteiden hinnan nousu ja rahan arvon aleneminen, on elinkaaren aikana syntyvien energiakustannusten nykyarvo 1 142 000 €. Elinkaarikustannuksiksi saadaan yhteensä 1 184 000.

Elinkaarikustannusten perusteella lämmön talteenotto jäähdytysjärjestelmästä lämpöpumpulla on kannattavaa. Lämmön talteenotolla varustetun järjestelmän elinkaarikustannukset ovat 278 300 € edullisemmat. Järjestelmävaihtoehtojen elinkaarikustannukset on esitetty myös taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Elinkaarikustannukset

	Elinkaarikustannukset, nykyarvo [€]						
	Yhteensä	Investointi	PTS - kunnossapi- to	Korjaukset	Määräai- kaishuollot	Energia	Muu
1. Jäähdytys ilman lämmöntalteenottoa	1 452 300	0	0	0	0	1 452 346	0
2. Lämpöpumpputoiminnolla varustettu jäähdytys	1 164 000	22 000	0	0	0	1 142 015	0

Elinkaarikustannusten kertyminen elinkaaren aikana voidaan esittää graafisesti. Kuvassa 33 on esitetty järjestelmävaihtoehtojen elinkaarikustannus ajan suhteen.



KUVA 33. Elinkaarikustannukset ajan funktiona

Kuvasta 30 voidaan nähdä, että jo kahdessa vuodessa lämmöntalteenoton kalliimpi investointi on maksanut itsensä takaisin edullisimpina energiakustannuksina.

7.6 Energiatehokkuuden mittarit

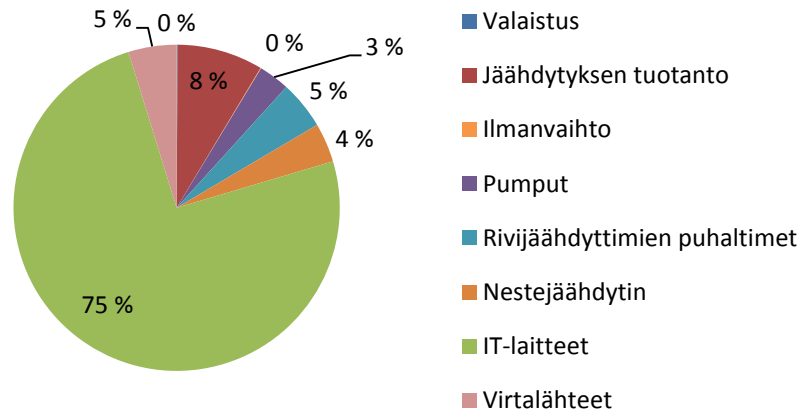
Konesalin energiategokkuutta mitattaessa verrataan konesalin kokonaisenergian kulu- tusta IT-laitteiden energian kulutukseen, joka tarkoittaa palvelinten laskennan kulut- tamaa energiamäärää. Futura-rakennuksen IT-laitteet kuluttavat sähköä 823,4 MWh vuodessa.

Konesalin vuotuisen kokonaisenergian kulutuksen muodostuminen tapauksessa, jossa konesalin lauhdutuslämpöä ei käytetä rakennuksen lämmittämiseen, on esitetty taulu- kossa 9.

TAULUKKO 9. Konesalin vuotuinen energiankulutus

	MWh
Valaistus	1,0
Ilmanvaihto	0,7
Rivijäähdyttimien puhaltimet	52,6
Palvelimet	876,0
Jäähdytyksen tuotanto	93,7
Pumput	33,7
Nestejäähdytin	42,8
Yhteensä	1100,5

Energiankulutuksen jakautumista kulutuspiesteiden on havainnollistettu prosentuaalisin osuuksin kuvassa 34.



KUVA 34. Konesalin energiankulutus prosentteina

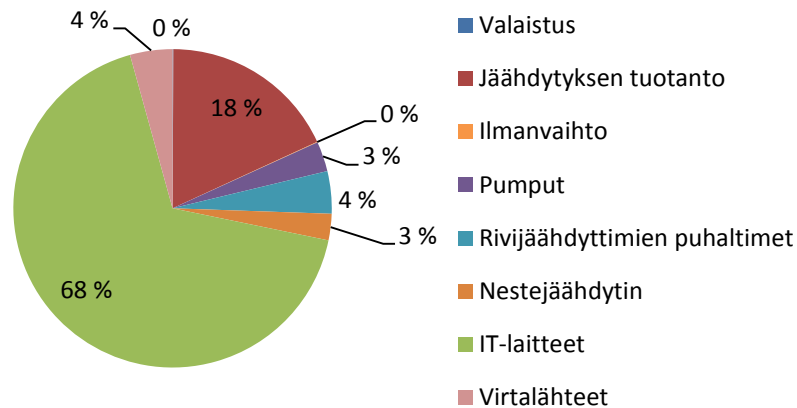
Jakamalla konesalin kokonaisenergian kulutus IT-laitteiden energian kulutuksella saadaan PUE-arvoksi 1,34.

Tapauksessa, jossa jäähdytyksen lauhdutuslämpöä käytetään lämmitykseen, konesalin vuotuisen kokonaisenergian kulutuksen muodostuminen on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Konesalin vuotuinen energiankulutus

	MWh
Valaistus	1,0
Ilmanvaihto	0,7
Rivijäähdyttimien puhaltimet	52,6
Palvelimet	876,0
Jäähdytyksen tuotanto	220,4
Pumput	37,1
Nestejäähdytin	32,8
Yhteensä	1220,6

Prosentteina tarkasteltuna konesalin energiankulutuksen jakautuminen on esitetty kuvassa 35, jossa voidaan nähdä lämpöpumpun käytön lisäävän jäähdytyksen tuotannon osuutta kymmenen prosenttiyksikköä.



KUVA 35. Konesalin energiankulutus prosentteina

Järjestelmän PUE-arvoksi saadaan 1,48. Laskettuja PUE-arvoja keskenään vertaamalla lämmön talteenotolla varustettu järjestelmä vaikuttaa epäedullisemmältä ratkaisulta. Järjestelmälle lasketaan myös NPUE-arvo, jossa lämpöpumpun kuluttama sähkön kulutus voidaan vähentää jäähdytyksen tuotannon kokonaisenergian kulutuksesta. Lämpöpumpun sähkön kulutukseksi on laskettu 148,6 MWh vuodessa, joka vähennettäessä saadaan jäähdytyksen tuotannon energian kulutukseksi 71,8 MWh vuodessa. Järjestelmän NPUE-arvoksi saadaan 1,30. Kun NPUE-arvoa verrataan verrokkijärjestelmän PUE-arvoon, ovat järjestelmät hyvin tasaväkisiä.

8 POHDINTA

Tutkimuksen tulosten perusteella palvelinlaitteiston jäähdytys muuttaa oleellisesti rakennuksen energian käyttöä, jota on aina syytä tutkia. Jotta lauhdutuslämmön käyttöä rakennuksen lämmityksessä voidaan tutkia, on kuitenkin toteutettavien jäähdytys- ja lämmitysratkaisujen oltava tarkasti tiedossa, sillä laskenta edellyttää yksityiskohtaista tietoa muun muassa jäähdytyksen tuotannon hyötysuhteista ja rakennuksen energiankulutuksesta tuntitasolla.

Tutkimustapauksessa lämmön talteenotolla varustettu järjestelmä tulee edullisemmaksi jo parissa vuodessa, koska tarvittavat lisäinvestoinnit ovat vähäiset. Kun tarkastellaan elinkaaren aikana syntyvää kustannuseroa, lämmön talteenoton vaatimiin investointeihin voitaisiin panostaa rakennusvaiheessa huomattavasti enemmän. Rakennusten tapauksessa investoinneille hyväksytään pitkiä takaisinmaksuaikoja. Yleisesti ottaen alle kymmen vuoden takaisinmaksuajalla energiansäästötoimenpiteitä voidaan pi-

tää kannattavina. Kymmenen vuoden aikana kustannuseroa järjestelmien välille kertyy jo 121 200 €. Voidaan olettaa, että tällä summalla pystyttäisiin rahoittamaan toisen vedenjäähdytysyksikön hankinta ja elinkaarikustannukset huomioiden myös käytön jälkeinen hävittäminen, jolloin lämmön talteenotolla tuotettu jäähdytys on edullisempi vaihtoehto myös tapauksessa, jossa vedenjäähdytyskoneen varalaite ei ole välttämätön.

Elinkaarilaskennan tuloksia ei kuitenkaan voida pitää absoluuttisena totuutena, vaan niitä on tulkittava suuntaa antavina. Elinkaarilaskennan luotettavuutta heikentää pitkä aikaväli, jonka ennustaminen vaatii varsin valistunutta arvausta. Elinkaarilaskenta perustuu oletukseen jatkuvasti kallistuvasta energian hinnasta ja pysyvästä talouden inflaatiosta, joka ei välttämättä vastaa todellisuutta. Varsinkaan nykyisessä taloustilanteessa, jossa on väläytetty pitkään jatkuneen talouden laskusuhdanteen painumista deflaatioon /28/. Päinvastoin kuin inflaatiossa, deflaatiossa kuluttajahinnat laskevat, joka painaa myös energian hintoja tai vähintäänkin pitää ne entisellään. Tutkimustapauksessa lämmön talteenotolla saavutettu säästö on kuitenkin niin merkittävät, ettei taloustilanteella ole vaikutusta järjestelmän toteutumiseen.

Elinkaarilaskennan tuloksilla olisi suurempi painoarvo, jos muissakin elinkaaren aikana syntyvissä kustannuksissa, kuin energiankäytössä olisi järjestelmien välillä ollut eroa. Ennakkoluulottomasti ajatellen vertailuun olisi voinut nostaa HFC-laitteiston rinnalle esimerkiksi ammoniakkia kylmäaineena käyttävän jäähdytyskoneen. Ammoniakki on luonnollinen, tosin myrkyllinen ja palavakin kylmäaine, joka ei kuulu F-kaasusetuksen piiriin, eikä sille tarvitse näin ollen tehdä määräaikaista tiiveystarkastuksia. Ammoniakin käyttö muuttaisi jäähdytyskoneiston kokoonpanoa oleellisesti, sillä käämitysten eristemateriaalit eivät kestä ammoniakki, eikä normaaleja hermeettisiä ja puolihhermeettisiä kompressoreja tällöin voida käyttää. Erikoiskäyttöön räätälöityjen laitteiden hankintahinta on monesti vaihtoehdoista arvokkaimpien joukossa. Kalliimpi hankintahinta ei välttämättä ole este, sillä elinkaarilaskennassa ammoniakkia puoltavat lisäksi tavallista korkeammat kylmä- ja lämpökertoimet, joita ammoniakilla voidaan HFC-kaasuihin verrattuna saavuttaa. Ammoniakin käyttöä jäähdytyskoneissa rajoittaa ruuvikompressoreilla saavutettava paine-ero, joka on luokkaa 20 bar /29, s. 149/. Paine-ero voisi riittää tutkimuskohteen tapauksessa, jos jäähdytysjärjestelmään

voitaisiin tehdä pieniä muutoksia korkeamman höyrystymislämpötilan saavuttamiseksi.

Taloudellisten näkökohtien lisäksi jäähdytyksen tuottaminen sisältää myös ilmasto- ja ympäristöpoliittisia kysymyksiä. On todennäköistä, että HFC-kaasujen käyttö lähitulevaisuudessa kielletään. Osana ilmaston lämpenemisen vastaista taistelua Euroopan komission tavoitteena on kieltää F-kaasujen käyttö lähes kokonaan uusissa laitteissa vuoteen 2025 mennessä /30/. Muutostahti on kuitenkin pitkälti tuotekehityksen vallassa. Käytössä olevia kylmäaineita on vaikea kieltää ennen kuin korvaavia tuotteita on saatu kehitettyä. Vaikka kiello koskee uusia laitteita, eikä sillä todennäköisesti ole vaikutusta tutkimuskohteen jäähdytyskoneiden käyttöön, olisi elinkaaritarkastelussa ehkä relevanttia käyttää lyhyempää ajan jaksoa kuin kahtakymmentä vuotta. Tutkimuksessa laskettujen kompressorien käyttötuntien perusteella Futura-rakennuksen jäähdytyskoneet ovat vielä varsin käyttökelpoisia elinkaarensa päätepisteessä. Pelkkään jäähdytykseen käytettyjen laitteiden kompressoreja voitaisiin käyttää toiset kaksikymmentä vuotta ja ilman lauhdutuslämmön talteenottoa, toista vedenjäähdytyskoneetta ei elinkaarensa aikana välttämättä käytetä koskaan. Materiaalien tehokkaamman käytön puolesta lämmön talteenotto vaikuttaa paremmalta ratkaisulta.

Lauhdutuslämmön talteenotto vähentää tutkimuskohteena olevan rakennuksen kokonaisenergian käyttöä ja näin ollen sitä voidaan selvästi pitää energiaa säästävänä. Energian säästäminen on yleensä myös ympäristöä säästävää. Säästön ympäristövaikutus riippuu kuitenkin pitkälti kulutettavan energian laadusta ja tuotantotavoista. Ympäristön kannalta merkityksellistä on pyrkiä rajoittamaan fossiililla polttoaineilla tuotetun sähkön ja lämmön kulutusta. Tutkimuskohteen tapauksessa kokonaisenergian kulutuksen vähentäminen edellyttää suurempaa sähkön kulutusta, jolla kaukolämmön kulutusta pienennetään. Kaukolämmön käytön vähentämistä ei voida pitää ympäristölle suotuisana tapauksessa, jossa kaukolämpö tuotetaan sähköntuotannon sivutuotteena. Jos ympäristövaikutukset eivät ole tutkimuksen kohdalla selkeät, ovat lauhdutuslämmön käytön positiiviset kustannusvaikutukset tutkimuskohteessa kiistattomat.

LÄHTEET

1. Woods, Jack 2014. The evolution of the data center: Timeline from the Mainframe to the Cloud. SiliconANGLE. WWW-julkaisu. <http://siliconangle.com/blog/2014/03/05/the-evolution-of-the-data-center-timeline-from-the-mainframe-to-the-cloud-tc0114/>?. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.
2. Nokso-Koivisto, Hannu 2008. Maantiekittäjä ohitti petaflopoin rajapaalun: Supertietokoneiden tehoennätys konsolitekniiikan avulla. Digitoday. WWW-julkaisu. <http://www.digitoday.fi/tiede-ja-teknologia/2008/06/09/supertietokoneiden-tehoennatys-konsolitekniiikan-avulla/200815544/66>. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.
3. Jammot, Juliet; Hammond, Ed 2008. Slideshow: Cern's Large Hydron Collider goes live. Financial Times. WWW-dokumentti. <http://www.ft.com/cms/s/0/d8251004-7e86-11dd-b1af-000077b07658.html#slide5>. Päivitetty 10.9.2008. Luettu 25.6.2014.
4. ASHRAE 2005. Datacom Equipment Power Trends and Cooling Applications.
5. Motiva Oy 2011. Energiatehokas konesali. PDF-dokumentti. http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf. Päivitetty 29.11.2011. Luettu 25.6.2014.
6. ASHRAE 2014. Datacom Series. WWW-dokumentti. <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/datacom-series>. Päivitetty 23.11.2014. Luettu 23.11.2014.
7. Puroviita, Timo 2014. Konesalien jäähdytysratkaisut. Julkaisu nro 75; Kylmätekniiikan koulutuspäivät. Suomen kylmähdistys Ry.
8. Hajanti, Petteri 2012. Palvelinkeskuksen jäähdytysjärjestelmän teknis-taloudellinen optimointi. Diplomityö. Aalto-yliopisto.
9. Ramtek 2012. Rittal's Inline Cooling Technology is a "Game Changer" for Licking Memorial's New Data Center. WWW-julkaisu. <http://www.ram-tek.com/news/rittals-inline-cooling-technology-is-a-game-changer-for-licking-memorials-new-data-center>. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.
10. Kelley, Dave 2012. Smart Data Center Design for More Effective Cooling. Data Center Knowledge. WWW-julkaisu. <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2012/03/27/smart-data-center-design-for-more-effective-cooling/>. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.
11. Uptime Institute 2012. Data Center Site Infrastructure Tier Standard: Topology. PDF-dokumentti. http://uptimeinstitute.com/component/docman/doc_download/5-tiers-standard-topology. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.
12. Uptime Institute 2013. Data Center Site Infrastructure Tier Standard: Operational Sustainability. PDF-dokumentti. http://uptimeinstitute.com/component/docman/doc_download/52-tier-

standardoperational-sustainability1-april-2013. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.

13. Viestintävirasto 2012. Määräys 54 viestintäverkkojen ja -palvelujen varmistamisesta. PDF-dokumentti.

<https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maatarkat/Viestintavirasto54A2012M.pdf>
f. Päivitetty 8.3.2013. Luettu 25.6.2014.

14. Avelar, Victor; Azevedo, Dan; French, Alan 2012. PUETM: A Comprehensive Examination of the Metric. The Green Grid. PDF-dokumentti.

http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf?lang=en. Päivitetty 4.2.2013. Luettu 25.6.2014.

15. Ympäristöministeriö 2012. D3 Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet. PDF-dokumentti. http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.

16. Greijer, Anders 2010. Energieffektivitet i datahallar. Kungliga Tekniska Högskolan. Tuotantotalous. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. <http://www.ekofysiskdatormiljo.se/ovrigt/NPUE.pdf>. Päivitetty 27.1.2011. Luettu 25.6.2014.

17. Hirvelä, Aulis; Jokela, Matti; Kaappola, Esko; Kianta, Jani 2011. Kylmätekniikan perusteet. Opetushallitus.

18. Hakala, Pertti; Kaappola, Esko 2005. Kylmälaitoksen suunnittelu. Opetushallitus.

19. Doyle, Eric 2011. Green Google's Sea Change In Data Centre Design. TechWeekEurope. WWW-julkaisu. <http://www.techweekeurope.co.uk/news/green-googles-sea-change-in-data-centre-design-31202>. Päivitetty 25.6.2014. Luettu 25.6.2014.

20. Green Building Council Finland 2013. Rakennusten elinkaarimittarit (2013). PDF-dokumentti.

http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/Rakennusten_elinkaarimittarit_2013.pdf. Päivitetty 17.1.2013. Luettu 25.6.2014.

21. Boardman, Anthony; Greenberg, David; Vining, Aidan; Weimer, David 2011. Cost-benefit Analysis: Concepts and Practice. 4th edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

22. Garnier, Christophe 2012. Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines. The Green Grid. PDF-dokumentti.

<http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP45v2DataCentreLifeCycleAssessmentGuidelines.pdf>. Päivitetty 20.11.2012. Luettu 25.6.2014.

23. Heikkilä, Riikka 2013. Yliopistokampuksella alkaa 13 miljoonan remontti. YLE. WWW-julkaisu.

http://yle.fi/uutiset/yliopistokampuksella_alkaa_13_miljoonan_euron_remontti/6611586. Päivitetty 29.4.2013. Luettu 25.6.2014.

24. AERMEC 2014. NXW 0500/1400, Water cooled internal chiller and heat pump units with scroll compressors. PDF-dokumentti.
http://download.aermec.com/support/docs/schede/nxw_en.pdf. Päivitetty 19.3.2014.
Luettu 23.11.2014.
25. Seppänen, Olli 2001. Rakennusten lämmitys. 2. painos. Suomen LVI-liitto ry.
26. Energiateollisuus Ry 2014. Kaukolämmön hinnat 1.7.2013. PDF-dokumentti.
http://energia.fi/sites/default/files/hinta_010713_päivitetty_020414.pdf. Päivitetty 2.4.2014. Luettu 25.6.2014.
27. Venturi, Roberto 2014. Sähköpostiviesti 18.8.2014. Insinööri. Bitzer Kühlmachinenbau GmbH.
28. Tamminen, Maija 2014. Nordea: Deflaatio uhkaa myös Suomea – ”Emme ole missään kunnossa ottamaan sitä saunaa”. Talouselämä. WWW-julkaisu.
<http://www.talouselama.fi/uutiset/nordea+deflaatio+uhkaa+myos+suomea++emme+ole+misaan+kunnossa+ottamaan+vastaa+sit+saunaa/a2264066>. Päivitetty 4.9.2014.
Luettu 23.11.2014.
29. Aittomäki, Antero 2012. Kylmätekniikka. 4. painos. Suomen kylmäyhdistys ry.
30. Hannula, Petri 2013. F-kaasuasetuksen valmistelu etenee. KYLMÄextra 2/2013. Suomen kylmäliikkeiden liitto. <http://www.skll.fi/www/att.php?type=2&id=238>. Ei päivitystietoa. Luettu 23.11.2014.