Teemu Tirkkonen

JÄÄHDYTYKSEN TARVE JA TOTEUTTAMINEN ASUINKERROSTALOSSA

Opinnäytetyö
Talotekniikka YAMK

2019

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Teemu Tirkkonen	Insinööri (YAMK)	Helmikuu 2019

Opinnäytetyön nimi

Jäähdytyksen tarve ja toteuttaminen asuinkerrostalossa

54 sivua
4 liitesivua

Toimeksiantaja

Kuopion Energia Oy

Ohjaaja

Jarmo Tuunanen, Kuopion Energia Oy Ari Ikonen

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tutkimuskohteena oli selvittää, miten asuinkerrostalojen jäähdytystarve kehittyy, miten jäähdytys olisi tehokkainta toteuttaa ja millainen on jäähdytystarpeen kehittymisen vaikutus hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa selvitettiin myös asuinkerrostalojen rakenteiden U-arvojen parantumisen sekä rakenteiden massan ja laadun vaikutusta jäähdytyksen tarpeeseen.

Tarkoituksena oli tarkastella Kuopion Savilahden alueelle parhaiten sopivia järjestelmiä pääasiassa jäähdytyksen kannalta mutta myöskin jäähdytyksen ja lämmityksen synergioiden perusteella. Tarkastelussa oli mukana myös eri järjestelmien kustannukset niin investoinnin, käytön kuin huollonkin näkökulmasta sekä hiilijalanjäljen laskenta.

Kerrostalon simulointi tehtiin IDA ICE -energiasimulointiohjelmalla. Simulointien avulla pyrittiin havainnollistamaan rakenteiden muutoksien vaikutuksia jäähdytyksen tarpeeseen ja jäähdytystehoon.

Järjestelmien tekninen vertailu toteutettiin tutustumalla jo muualla Suomessa toteutettuihin järjestelmäratkaisuihin sekä keskusteluilla eri järjestelmiä toteuttaneiden laitetoimittajien kanssa. Kustannuslaskelmat tehtiin laitetoimittajilta saatujen tietojen perusteella ja energianhintoina käytettiin Kuopion alueella toteutuneita hintoja.

Tutkimuksen tuloksena voitiin todeta, että rakenteiden U-arvojen parantamisella nykyisestä sekä massalla ja laadulla ei ole suurta merkitystä rakennuksen jäähdytystarpeeseen. Kaikki vertailtavista järjestelmistä ovat erittäin käyttökelpoisia Savilahden alueella, kunhan huomioi mahdollisen rakennuksen sijainnin kaukoenergiaverkkoihin nähden ja maalämmön osalta tontin geoenergiapotentiaalin. Suurimman vaikutuksen hiilijalanjälkeen voi tehdä järjestelmän sijaan energiatuotteiden valinnalla.

Asiasanat

kaukojäähdytys, kaukolämmitys, maalämmitys, maaviilennys, kerrostalo

South-Eastern Finland University of Applied Sciences

Author (authors)	Degree	Time
Teemu Tirkkonen	Bachelor of Engineering	February 2019

Thesis title

Cooling demand and implementation in apartment building

54 pages
4 pages of appendices

Commissioned by

Kuopion Energia Oy

Supervisor

Jarmo Tuunanen, Kuopion Energia Oy Ari Ikonen

Abstract

The aim of the thesis was to find out how the cooling demand of apartment buildings had developed, how to make cooling more efficient and what the effect of cooling demand development on carbon footprint was. The study also investigated the effect of improving the U-values of apartment building structures and the impact of the mass and quality of structures on the demand for cooling.

The aim was to look at the best systems in the Savilahti area of Kuopio, mainly in terms of cooling, but also in terms of the synergies between cooling and heating. The cost of the various systems was also included in the review from the point of view of investment, use and maintenance as well as the calculation of the carbon footprint.

The apartment building simulation was done using the IDA ICE energy simulation program. Simulations were used to illustrate the effects of structural changes on cooling demand and cooling performance.

The technical comparison of the systems was carried out through familiarization with the system solutions already implemented elsewhere in Finland and by discussing the systems with the equipment suppliers who had implemented different systems. Cost calculations were made on the basis of the information received from the equipment suppliers, and the prices realized in the Kuopio region were used as energy prices.

As a result of the study, the improvement of the U-values of the structures from the present as well as the mass and quality could not be of great importance for the cooling demands of the building. All the systems compared are very suitable in the Savilahti area, as long as the potential location of the building relative to the grid and the geo-energy potential of the plot is taken into account. The biggest impact on the carbon footprint can be made by choosing energy products instead of the system.

Keywords

district cooling, district heating, geothermal heating, geothermal cooling, apartment building

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 6

2 RAKENNUSKOHTAISET LÄMMITYS- JA JÄÄHDYTYSTEKNIIKAT 7

2.1 Kaukolämmitys ja -jäähdytys 7

2.2 Kaukolämmitys ja CHC 10

2.3 Maalämmitys ja -viilennys 13

2.4 Kaukolämmitys ja vedenjäähdytyskone 17

3 JÄÄHDYTYSHANKKEEN TAUSTA 18

3.1 Ilmastosopimukset 19

3.2 Valittujen järjestelmäratkaisujen tausta 20

3.3 Savilahti-projekti 21

3.4 SaVE -hanke 22

3.5 SmaRa – Savilahden smarteimmat ratkaisut -hanke 24

3.6 Asemakaavoituksen vaikutukset rakennusten energiajärjestelmiin 25

3.7 FInZEB-hanke 26

3.7.1 Lämpötilatarkastelu tulevaisuudessa 27

4 TUTKIMUSMENETELMÄT 28

5 SIMULOITAVA RAKENNUS 29

6 SIMULOINNIN JA VERTAILUN RAJAUKSET 30

7 ASUINKERROSTALON SIMULOINNIT JA NIIDEN VAIHEET 31

7.1 Simuloinnin vaiheet 31

7.2 Simuloinnin tulokset 34

7.3 Simulointitulosten tarkastelu 35

8 JÄÄHDYTYKSEN VAIKUTUS ASUINVIIHTYVYYTEEN 38

9 TEKNIIKOIDEN SYNERGIAEDUT JA KUSTANNUKSET 40

9.1 Järjestelmäkokonaisuudet 40

9.2 Järjestelmien investointikustannukset 44

9.3 Järjestelmien käyttökustannukset 44

9.4 Järjestelmien huoltokustannukset 46
9.5 Kustannuskehitys 20 vuoden ajanjaksolla 47
10 HIILIJALANJÄLJEN VERTAILU 20 VUODEN AJANJAKSOLLA 48
11 JOHTOPÄÄTÖKSET 49
LÄHTEET 52

LIITTEET

Liite 1. Kuvaluettelo
Liite 2. Taulukkoluettelo

1 JOHDANTO

Energiatehokkuuden parantaminen sekä rakentamismääräysten kiristyminen ovat vähentäneet jatkuvasti rakennusten lämmitysenergian kulutusta ja lisänneet ylilämmön esiintymistä sekä jäähdytystarpeen lisääntymistä /1, s. 7/. Asuinkerrostaloille tehdään kesäajan huonelämpötilan tarkastelu jo suunnitteluvaiheessa, jotta mahdolliset ylilämpöiset tilat tulevat selville jo varhain ja näin pystytään vielä vaikuttamaan niihin valittavilla kiinteistön ratkaisuilla /1, s. 8/. Rakennuttajan tulee myöskin tehdä valinta rakennuskustannusten ja asumisviihtyvyyden painoarvosta, sillä varsinaisen jäähdytysjärjestelmän rakentaminen on rakentamismääräysten mukaiseen rakentamiseen nähden arvokkaampaa.

Rakennusten todellinen jäähdytystarve nykyaikaisessa rakennuksessa muodostuu merkittäviltä osin rakennuksen sisäisistä lämpökuormista: auringon säteilystä, rakennuksen käyttötarkoituksesta, ihmisistä, sähkölaitteista ja valaistuksesta. Suunnitteluvaiheessa jäähdytystarvetta laskettaessa suunnittelijan tulisi tuntea rakennuksen lämpökuormat mahdollisimman tarkasti unohtamatta niiden jakautumista rakennuksen sisällä ja esiintymistiheyttä. /1, s. 9./ Rakennuksen suunnittelusta tuleva omistaja saa myös lisäarvoa, mikäli jo suunnitteluvaiheessa osataan arvioida kiinteistön monikäyttöisyyttä ja tehdä ratkaisut monikäyttöisyyttä tukien. Rakennuksen käyttötarkoituksen muuttaminen voi radikaalisti muuttaa esimerkiksi ylilämmön esiintymistä, ja jäähdytyksen tarve voikin muuttua todella merkittävästi alkuperäiseen käyttötarkoitukseen verrattuna.

Opinnäytetyön tilaaja on Kuopion Energia Oy, joka on aloittanut kaukojäähdytysliiketoiminnan Kuopion Savilahden alueelle ja rakennuttaa 30 MW jäähdytyslaitoksen vuosina 2018–2020. Jäähdytyslaitos hyödyntää Kuopion Savilahdesta saatavaa järven syvänteen viileää vettä alueen jäähdytyksessä. Vapaajäähdytyksessä viileän veden tuottamiseen ei tarvita kompressoreita niin kuin koneellisessa jäähdytyksessä. Vapaajäähdytystä pystytään tuottamaan esimerkiksi talvella kylmän ilman avulla tai esimerkiksi syvänteessä olevalla viileällä vedellä. Vapaajäähdytyksellä pystytään tuottamaan noin 70 % vuotuisesta jäähdytysenergiasta. Kun jäähdytystä tehdään lämpöpumpuilla, jäähdytyksen

avulla rakennuksista talteenotettu energia käytetään hyödyksi kaukolämpöverkkoon. /2./ Tällöin kaukolämpöverkkoonkin liitetyt rakennukset pääsevät nauttimaan Savilahden alueen energiatehokkuudesta ja rakennusten ylijäämälämpö tulee hyötykäyttöön muissa rakennuksissa. Tämäntyyppisiä energiaverkkoja on mahdollisuus käyttää tulevaisuudessa laajemmallakin mittakaavalla ylijäämäenergioiden siirtämiseen eri rakennusten välillä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, miten asuinkerrostalojen jäähdytystarve kehittyy, miten jäähdytys olisi tehokkainta toteuttaa ja millainen on jäähdytystarpeen kehittymisen vaikutus hiilijalanjälkeen. Työssä selvitetään myös asuinkerrostalojen rakenteiden U-arvojen parantumisen sekä rakenteiden massan ja laadun vaikutusta jäähdytyksen tarpeeseen.

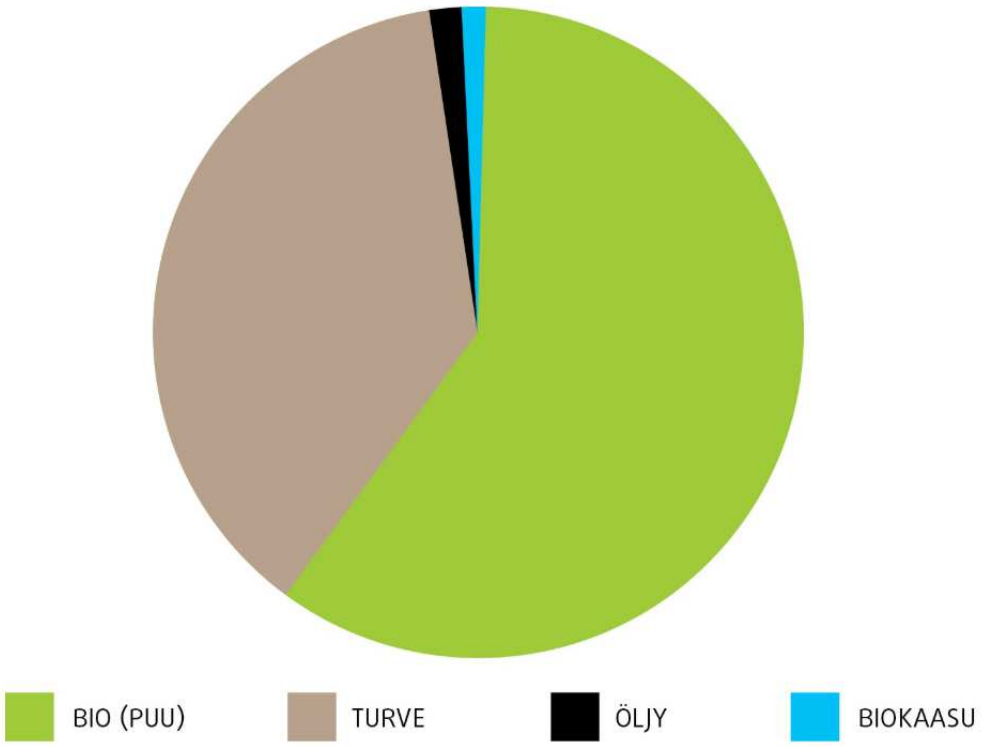
2 RAKENNUSKOHTAISET LÄMMITYS- JA JÄÄHDYTYSTEKNIIKAT

Rakennusten jäähdytykseen ja lämmitykseen on nykyään tarjolla monenlaisia ratkaisuja, ja jokaisella niistä riittää omat puolesta ja vastaan puhujansa. Jäähdytyksen avulla koko rakennuksen lämpötila saadaan pidettyä halutulla sisälämpötilatasolla, kun taas viilennys on enemmänkin paikallinen ratkaisu ja sen avulla sisälämpötilaa ei välttämättä aina saada juuri halutulle tasolle. Valitsin vertailtaviksi tekniikoiksi yleisimmin käytetyt vaihtoehdot, jotta tutkimus palvelisi mahdollisimman suurta kohderyhmää. Kaikkien eri järjestelmien tulee myöskin olla mahdollisia toteuttaa Kuopion Savilahdessa, jotta työn tuloksia voidaan hyödyntää mahdollisimman monipuolisesti alueen rakentamisessa.

2.1 Kaukolämmitys ja -jäähdytys

Kaukolämmitys on Suomen kaupunkien selkeästi suosituin lämmitysmuoto. Kuopiossa kaukolämpöverkon alueella asuvista kaupunkilaisista yhdeksän kymmenestä lämmittää rakennuksensa kaukolämmöllä. Kuopion kaukolämmön tuotanto perustuu pääsääntöisesti yhteistuotantoon, jolloin polttoaineista saatava energia pystytään hyödyntämään jopa yli 90 prosentin hyötysuhteella. Kuopiossa lämmön- ja sähköntuotannossa käytettiin vuonna 2017 polttoaineena puuta, turvetta, biokaasua sekä öljyä. Puu ja turve hyödynnetään CHP-voimalaitoksissa ja biokaasu Kuopion Pitkälahdessa moottorivoimalaitok-

sessa. Kevyttä polttoöljyä käytetään lämpökeskuksissa lähinnä huippupakkasten aikaan sekä hetkellisissä häiriötilanteissa. /3./ Kuvassa 1 on esitetty Kuopion Energian käyttämä polttoainejakauma vuonna 2017. Siitä selviää, että biopolttoaineiden osuus on selvästi suurin verrattuna muihin polttoaineisiin. Melkein kaikki Kuopion Energian käyttämät biopolttoaineet tulevat Pohjois-Savosta ja näin ollen edesauttavat paikallista työllisyyttä.

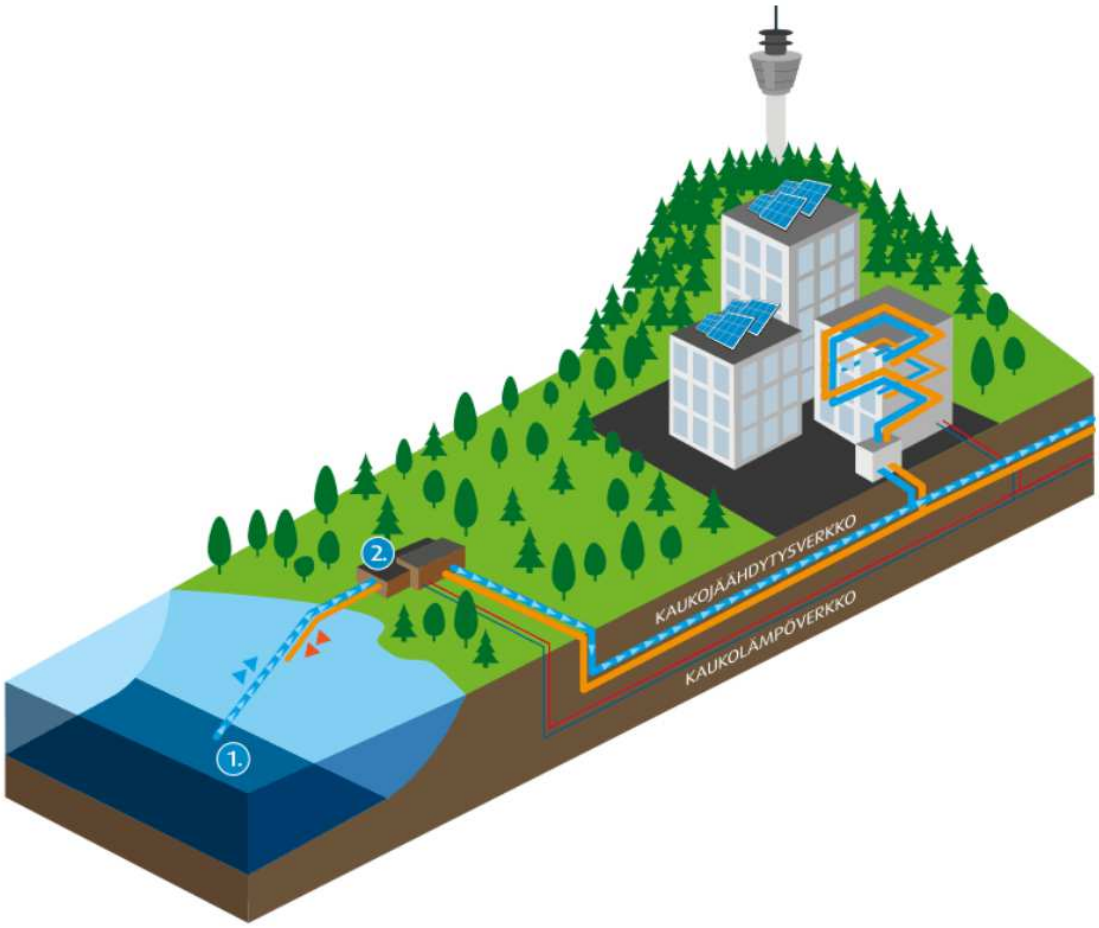


Kuva 1. Kuopion Energian käyttämien polttoaineiden jakauma vuonna 2017 /3/

Kaukolämmitys perustuu lämpimän veden kierrättämiseen kaukolämpöasiakkaiden rakennuksissa kaukolämpöverkon avulla. Rakennuksissa asiakas hyödyntää lämmintä kaukolämpövettä lämmönjakokeskuksessa tuottamaan lämmitystä sekä lämmintä käyttövettä. Asiakkaan hyödyntämä lämmin kaukolämpövesi palautetaan kaukolämpöverkon paluuputkea pitkin takaisin voimalaitoksille tai lämpökeskuksille uudestaan lämmitettäväksi. /3./

Kaukojäähdytys perustuu hyvin pitkälti samaan tekniikkaan asiakkaan puolella kuin kaukolämmityskin. Suurena erona on, että kaukolämmityksessä kaukolämpöverkon avulla viedään lämpöä asiakkaille, kun taas kaukojäähdytyksessä kaukojäähdytysverkon avulla lämpöä noudetaan pois asiakkaalta. Rakennuksessa asiakas hyödyntää viileää vettä kaukojäähdytyskeskuksessa viilentämään rakennuksen jäähdytysverkoston vettä. Kuopion Savilahteen on

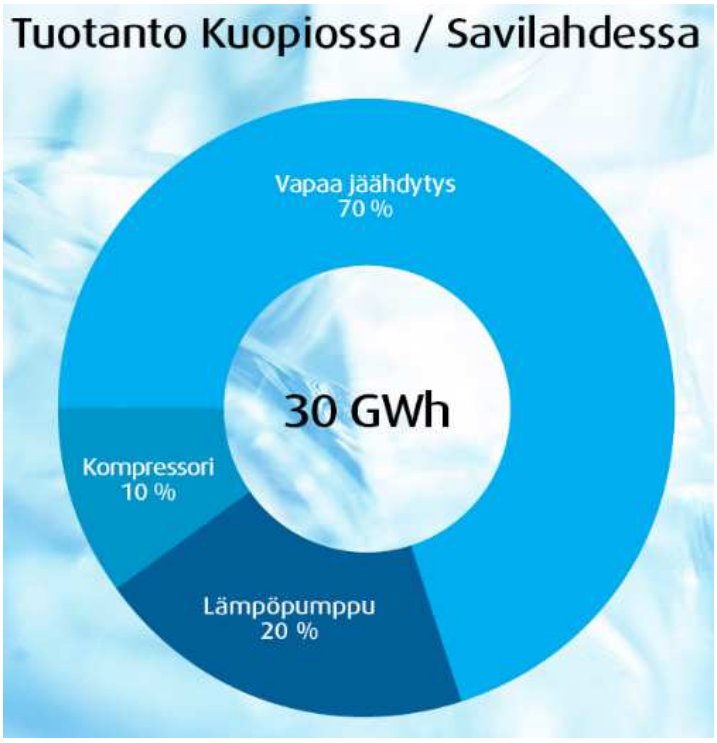
aloitettu rakentamaan kaukojäähdytyslaitosta, jonka on tarkoitus alkaa toimittamaan energiatehokasta ja ympäristöystävällistä kaukojäähdytystä rakennuksille vuoden 2020 aikana. /3./ Savilahden alueen kaukojäähdytysverkon meno- ja paluulämpötiloina käytetään 8°C/16 °C, joka riittää lähes poikkeuksetta kaikkien rakennusten jäähdytystarpeeseen. Rakennuksen suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota riittävään kaukojäähdytysveden lämpenemään, jotta virtaamat kaukojäähdytysverkossa eivät kasva kohtuuttomasti ja samalla aiheuta häiriötä muiden asiakkaiden kaukojäähdytyksen toimitukseen. Kuvassa 2 on esitetty Savilahden alueen kaukojäähdytyksen tuotanto pienoismuodossa. Rantaan sijoitettuun kaukojäähdytyksen tuotantolaitokseen on sijoitettu muun muassa kaukojäähdytys- sekä järvivesiverkoston pumppaukset, lämpöpumppu, järvivesiverkoston suodattimet sekä vedenjäähdytyskoneet.



Kuva 2. Kuopion Savilahteen suunnitellun kaukojäähdytyksen toimintaperiaate /3/

Kuopion Savilahteen suunnitellun ja toteutettavan kaukojäähdytyksen tuotanto perustuu suurimmalta osin Neulalahden syvänteessä 35 metrin syvyydestä saatavaan viileään veteen. Suurimman osan vuodesta syvänteestä saatavalla vapaajäähdytyksellä pystytään kattamaan koko jäähdytystarve, jonka ansiosta

järjestelmän COP on noin 20. /4./ COP tarkoittaa hyötysuhdetta, eli montako MWh energiaa voidaan tuottaa käyttämällä 1 MWh sähköä. Laitoksen mitoitustilanteessa vapaajäähdytystä tuetaan lämpöpumpuilla ja vedenjäähdytyskoneilla. Lämpöpumpuilla pystytään myöskin tuottamaan lämmitystä kaukolämpöverkkoon, jolloin Savilahden alueen rakennukset pystyvät hyödyntämään lämpöpumpulla tuotetun resurssiviisaan lämmön rakennuksen lämmitykseen. Kuvassa 3 on esitetty Savilahden alueelle suunniteltu kaukojäähdytyksen tuotantorakenne. Savilahden tuotantorakenne eroaa muun Suomen kaukojäähdytyksen tuotannosta merkittävästi, sillä vapaajäähdytyksen osuus on selvästi yli puolet.

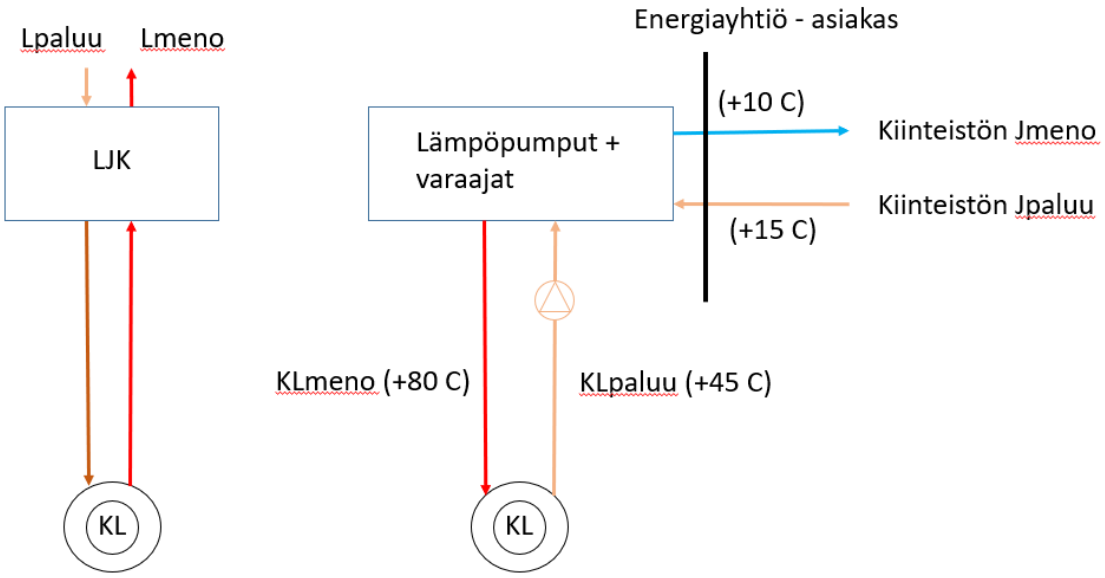


Kuva 3. Kuopion Savilahteen suunnitellun kaukojäähdytyksen energiantuotanto /3/

2.2 Kaukolämmitys ja CHC

Kuopion alueilla, joihin toimitetaan kaukolämpöä muttei kaukojäähdytystä, rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysratkaisuksi voi valita CHC:n (combined heating and cooling). Rakennuksen lämmitys hoituu perinteisen kaukolämmityksen tapaan, mutta rakennuksen jäähdytys tuotetaan rakennukseen sijoitetulla lämpöpumpulla, josta saatava lämpö kierrätetään takaisin uusiutuvana lämpönä kaukolämpöverkkoon. Tämän jäähdytysratkaisun etuna rakennukselle on se, että kaukolämmön tapaan siinä toimitetaan sovittua jäähdytyksen läm-

pötilaa, jolloin rakennuksen omistaja ei tarvitse vastata varsinaisesta jäähdytyslaitteesta eikä sen huoltokustannuksista. /4./ Kuvassa 4 on esitetty rakennuksen lämmityksen ja jäähdytyksen toiminta, kun jäähdytys tuotetaan CHC-järjestelmällä. Kuvassa esitetyt lämpötilatasot ovat rakennuksen ja asiakkaan mukaan sopimuskohtaisia.



Kuva 4. Rakennuksen energiaratkaisuna kaukolämmitys ja CHC /4/

Lämpöpumpulla toteutettavan jäähdytysjärjestelmän suurimpana etuna on se, että jäähdytyksen lämpötilataso voidaan sopia asiakkaan kanssa huomattavasti joustavammin kuin tapauksissa, joissa yksi keskitetty jäähdytyslaitos palvelee useita rakennuksia. Rakennuskohtaisella lämpöpumpputekniikalla voidaan toimittaa asiakkaalle jopa alle 0 °C lämpötilaa, joka mahdollistaa kylmän tuottamisen esimerkiksi kauppoihin. Tällöin kaupasta talteenotettu ylijäämälämpö on mahdollista kierrättää kaukolämpöverkon avulla alueen muihin rakennuksiin lämmitysenergiaksi.

CHC-järjestelmä ottaa tarvitsemansa sähkön rakennuksen sähköjen kautta, joten suunnitteluvaiheessa järjestelmän tarvitsema sähköteho tulee huomioida rakennuksen sähköliittymää mitoitettaessa. Energiayhtiö maksaa CHC-laitoksen käytöstä aiheutuneen sähköenergian hinnan ja siirtomaksun asiakkaalle. Suunnitteluvaiheessa kannattaa kiinnittää erityistä huomiota todellisiin tarvittaviin tehoihin ja toisaalta tulevaisuuden mahdollisiin tarpeisiin, jotta ylimääräisiltä kustannuksilta vältytään tulevaisuudessa. /4./ Kuvassa 5 on esitetty Hel-

singissä toteutetussa CHC-järjestelmässä käytetty lämpöpumppu. Lämpöpumpun molempiin päihin tulee jäädä riittävästi huoltotilaa, jotta tulevaisuuden huoltokäynnit voi tehdä sujuvasti. Varsinkin sähkökeskuksen edessä tulee olla riittävästi tilaa, jotta oven saa avattua ja siitä huolimatta ohi mahtuu kulkemaan.

Kuva 5. Lämpöpumppu ja jäähdytyspiirin kiertopumppu /5/

Lämpöpumppujen lämmityspuoli on nykyään mahdollista mitoittaa jopa suoraan kaukolämmön maksimilämpötilaan 115 °C, jolloin tuotettu lämpötila olisi suoraan kaukolämpökäyrän mukaista ilman jatkojalostamista. Selkeästi suurimman osan vuotta kuitenkin jo 70 °C täyttää kaukolämmön ensiöpuolen vaatimuksen, joten lämpöpumpun hyötysuhteen kannalta kannattaa tuottaa kaukolämpöverkon kannalta alinta mahdollista lämpötilatasoa. Tapauskohtaisesti asiakas ja energian toimittaja sopivat kokonaistaloudellisimman lämpötilan tason niin asiakkaan kuin energian toimittajankin kannalta. Mikäli rakennuksen

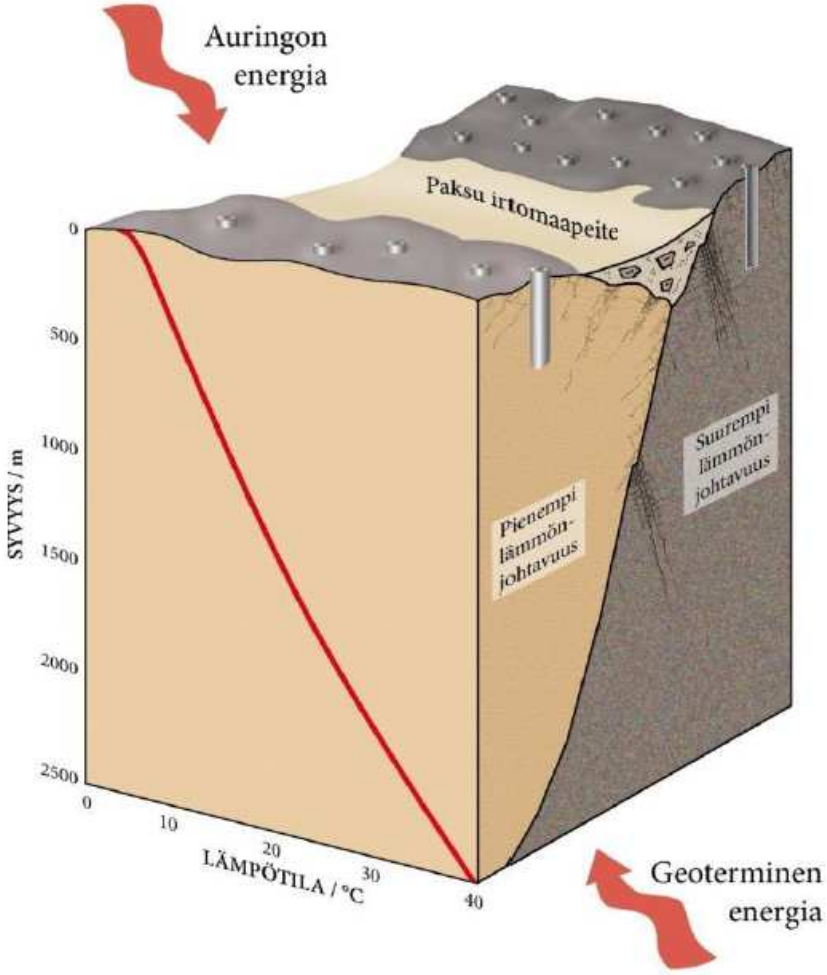
ympärillä on kaukolämmön rengasverkko ja toisaalta isoja runkoputkia, on tällöin mahdollista mitoittaa lämpöpumpun lämmityspuoli esimerkiksi 80 °C menoveden lämpötilan mukaan ja toimittaa tuotettu lämpö isoon kaukolämmön runkoputkeen. Matalammalla lämpötilalla myöskin jäähdytysenergian hinta on huokeampi, johtuen lämpöpumpun hyötysuhteesta sekä edullisemmasta hankintahinnasta. /4./ Kuvassa 6 on esitetty lämpöpumpun ensiöpuolen kytkentä kaukolämpöverkkoon. Kuvassa näkyvällä 2-tieventtiilillä säädetään lämpöpumpun virtaamaa, jotta sen toiminta saadaan mahdollisimman optimaaliseksi jokaisessa käyntitilanteessa.

Kuva 6. Lämpöpumpun kaukolämpöpiirin kiertopumppu /5/

2.3 Maalämmitys ja -viilennys

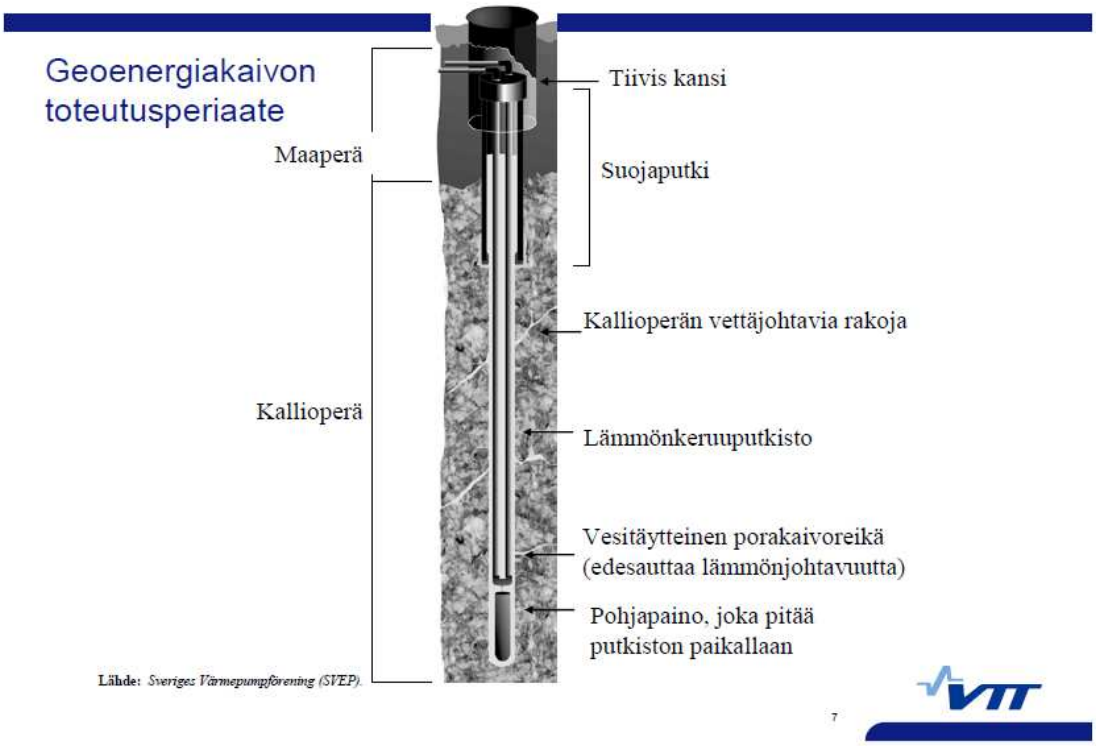
Lämmitys- ja jäähdytysenergiaa hyödynnettäessä joko maaperästä tai vesistöstä, voidaan yleisesti puhua geoenergiasta. Geoenergiaksi nimitettävä lämpöenergia on maan pintakerroksissa peräisin auringosta, ja yhä syvemmälle

maaperään mentäessä se on peräisin joko maansisäosista johtuvasta lämmöstä tai esimerkiksi radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Energiakaivoksi kutsutaan maahan porattavaa syvää kaivoa, johon asennetaan keruuputkisto geoenergian hyödyntämiseksi. Keruuputkiston liuosta pumppaamalla sieltä voidaan hyödyntää joko maassa lämmennyttä tai viilentynyttä liuosta käyttötarkoituksesta riippuen. Energiakaivon aktiivisyvyydellä tarkoitetaan kaivossa olevaa vesipatsaan korkeutta. Suomessa maaperän lämpötila vaihtelee keskimäärin kahden ja seitsemän asteen välillä. Etelä-Suomessa maaperän lämpötila on pääsääntöisesti korkeampi kuin Pohjois-Suomessa, sillä auringon säteilyn teho ja talvikauden pituus ovat erilaisia. Paikallisestikin maaperän lämpötilavaihtelut voivat olla yllättävän suuria riippuen siitä, sijaitseeko energiakaivo hyvin aurinkoisessa paikassa asfalttikentällä vai metsän varjostamalla alueella. Tästä johtuen maalämpöpumpun lämmönlähteeksi suunniteltu energiakaivo tulee suunnitella ja mitoittaa huolella, jotta kaivon jäätymiseltä vältytään. /6./ Kuvassa 7 on esitetty maaperään sitoutuvia energioita ja eri maalajien lämmönjohtavuuksien eroja. Kallio ja kostea savipohjainen maa-aines ovat erittäin hyviä lämmönjohtavuudeltaan, mutta karkearakeisemmat ja hiekkaiset maa-ainekset ovat huonompia. On erittäin tärkeää kiinnittää myöskin huomiota irtomaapeitteen paksuuteen, jolla on vaikutusta poraamiskustannuksiin sekä energiakaivon aktiivisyvyyteen.



Kuva 7. Geoenergiaan vaikuttavat tekijät maaperässä /6/

Kuvassa 8 on esitetty havainnekuva energiakaivosta. Kaivon yläosaan tulee metallinen suojaputki irtomaa-aineksen matkalle, jonka tarkoitus on estää maan valuminen energiakaivoon. Lämmönkeruuputkiston alapäähän tulee pohjapaino, joka pitää putket kaivon pohjassa veden nosteesta huolimatta.



Kuva 8. Energiakaivon periaate /7/

Energiakaivoa voidaan hyödyntää myös rakennuksen viilennykseen, jolloin kaivosta pumpataan kiertopumpun avulla viileää hyödynnettäväksi rakennuksen jäähdytykseen ja samalla ladataan rakennuksesta kerättyä lämpöenergiaa kaivoon talven lämmityskäyttöä varten. Viilennysajanjakson pituus on keskimääräisesti suhteellisen lyhyt verrattuna talven lämmityskauteen. Tästä johtuen energiakaivojen lämpötila laskee pitkällä aikavälillä ja varsinkin useiden energiakaivojen kentissä tämä tulee huomioida sieltä saatavissa olevassa energiamäärässä. /6./ Mikäli rakennuksen jäähdytystarve on poikkeuksellisen suuri, energiakaivokenttä saatetaankin mitoittaa tarvittavan jäähdytystehon mukaan, jolloin lämmitystehon riittävyyttä ei tarvitse arvailla. Energiakaivojen kannalta asiaa tarkasteltuna on jopa suotavaa käyttää kaivoja myöskin rakennuksen viilennykseen, joka edesauttaa kaivokentän palautumista talven aiheuttamasta viilenemisestä sekä myöskin parantaa järjestelmän hyötysuhdetta. Suurempi vaikutus hyötysuhteeseen kuitenkin on maaperän pohjavesien virtauksilla, sillä varsinkin voimakkaiden virtausten alueella kaivoissa oleva vesi voi vaihtua nopeastikin.

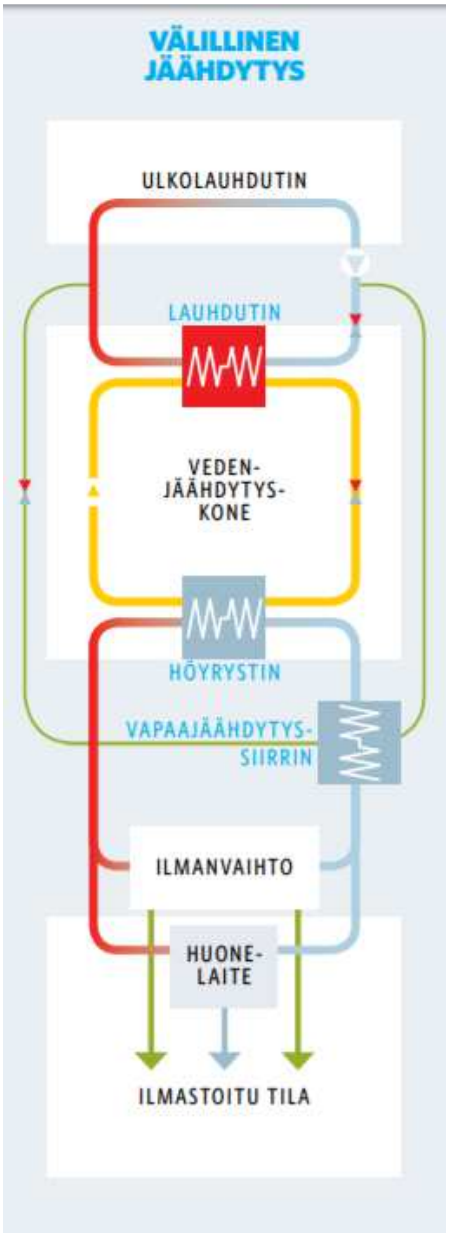
Maalämmöstä puhuttaessa monesti nousee esille osateho- vai täystehomitoitus. Täystehomitoituksesta on kyse silloin, kun maalämpöjärjestelmä mitoite-

taan teholtaan sen suuruiseksi, että sen lämmitysteho kattaa kokonaisuudessaan tilalämmityksen sekä käyttöveden lämmityksen. Osatehoratkaisussa taasen lämmitystehosta katetaan maalämmöllä esimerkiksi 70 % ja lopputehontarve tehdään muulla lämmitystavalla, esimerkiksi varaajiin sijoitetuilla sähkövastuksilla. /7./ Osatehoratkaisun etuna on saatavat säästöt lämpöpumpun hankinnassa, mutta energiakaivoihin sillä ei juurikaan ole vaikutusta, sillä osatehoratkaisukin kattaa melkein kokonaan lämmityksen vuosienergian. Lopputehontarpeen toteutuksessa sähköllä on esimerkiksi haittana, että sillä voi olla vaikutusta rakennuksen sähköliittymän kokoon ja sitä kautta kustannuksiin. Monissa tapauksissa kuitenkin voidaan erilaisilla ohjauksilla rajoittaa muiden laitteiden tarvitsemaa sähkötehoa mitoituspakkasilla. Tällaisia helposti rajoitettavia laitteita ovat esimerkiksi sähkökiukaat ja autojen lämmityspistokkeet.

2.4 Kaukolämmitys ja vedenjäähdytyskone

Nykyään ja tulevaisuudessakin asuinrakennusten yleisin rakennuskohtainen jäähdytysratkaisu perustuu kompressoritekniikalla tuotettuun jäähdytysenergiaan. Kompressoritekniikka voi olla myöskin osana niin sanottua hybridijärjestelmää, jossa jäähdytystä tuotetaan myös jollakin toisella tekniikalla, esimerkiksi energiakaivoista tai ulkoilmasta vapaajäähdytyksellä. Rakennuskohtaiset jäähdytysratkaisut ovat useimmiten niin sanottuja välillisiä järjestelmiä, joissa lämpö poistetaan jäähdytystä tarvitsevista kohteissa lämmönsiirtonesteen avulla. Lämmönsiirtonesteenä käytetään useimmiten vettä. Lämmennyt lämmönsiirtoneste viilennetään keskitetysti esimerkiksi vedenjäähdytyskoneessa. /8./

Vedenjäähdytyskoneen lauhdutus on useimmiten myös toteutettu välillisesti ulkoilmaan liuosjäähdyttimellä. Lauhdutuksen kylmäkierto on yleisesti pakkasen kestävää liuosta, esimerkiksi glykolia. Kompressoreiden käyntiaikojen tasaamiseksi järjestelmään kytketään usein jäähdytysvaraaja, joka toimii pienenä puskurina. /8./ Kuvassa 9 on esitetty välillisen jäähdytysjärjestelmän kytkennän periaate. Välillisessä jäähdytysjärjestelmässä kylmäaineella jäähdytetään höyrystimen läpi virtaavaa väliainetta esimerkiksi vettä. Tällaisen järjestelmän etuna on suhteellisen pieni kylmäaineen määrä.



Kuva 9. Välillisen jäähdytysjärjestelmän periaate /9/

3 JÄÄHDYTYSHANKKEEN TAUSTA

Opinnäytetyön taustalla ovat lähtökohtaisesti kiristyvät rakentamismääräykset sekä niitä ohjaavat erilaiset kansainväliset ilmastosopimukset. Opinnäytetyön tarkoitus on luoda käsitys tilaajayritykselle asuinkerrostalojen jäähdytystarpeesta nyt ja tulevaisuudessa, jotta kaukojäähdytysverkkoa voidaan rakentaa mahdollisimman kustannustehokkaasti juuri oikeille alueille. Tulevaisuuden kannalta opinnäytetyö antaa myöskin viitteitä siitä, kuinka suuri markkinapotentiaali on muunlaisilla jäähdytysjärjestelmillä asuinkerrostaloalueilla kuin kaukojäähdytyksellä. Tämä auttaa yritystä kehittämään toimintaansa tarjottavien palveluiden osalta mahdollisimman potentiaaliseen suuntaan.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi hankkeen tausta sen toteutumisjärjestyksessä. Alkuun kerrotaan kevyesti taustalla vaikuttajina olleista ilmastosopimuksista ja niiden vaikutuksista rakentamismääräyksiin. Juuri nämä ilmastosopimukset ovat saaneet aikaan rakentamismääräysten vaiheittaisen tiukentumisen, mikä puolestaan edesauttaa ylijäämälämpöjen syntymistä ja sen myötä jäähdytystarpeen lisääntymistä. Hankkeen taustan esittely jatkuu Savilahti-projektin läpikäymisellä alusta alkaen sen eri vaiheisiin saakka sekä erillisen SaVE-hankkeen (Savilahden vähähiilinen energiamalli) esittelyllä. Molemmat näistä ovat vaikuttaneet tarpeellisuuteen tutkia myöskin jäähdytystarpeen kehittymisen vaikutuksia hiilijalanjälkeen, sillä Savilahdesta puhutaan yleisesti vähähiilisenä toiminta-alueena. Hankkeen taustaa -osion lopuksi opinnäytetyössä käsitellään FInZEB-hanketta ja sen tuloksia. FInZEB-hanke perustettiin luomaan suomalainen määritelmä lähes nollaenergiarakentamiselle, joka määritellään nZEB-rakentamiseksi /10, s. 5/.

3.1 Ilmastosopimukset

Merkittävimpänä kansainvälisenä ilmastotoimia koskevana sopimuksena pidetään jo vuonna 1992 allekirjoitettua Yhdistyneiden kansakuntien ilmastonsuojelun puitesopimusta (United Convention on Climate Change, UNFCCC). Puitesopimus ei sinällään vielä sitouttanut allekirjoittaneita sitoviin päästövähennysmääriin, vaan sen tarkoituksena oli saada osakkaat tarkkailemaan päästöjään ja sitoutumaan niiden vähennyksiin. Puitesopimus tuli voimaan vuonna 1994. Sopimuksella tavoiteltiin ilmakehään sellaista kasvihuonekaasujen tasoa, jotta ihmiskunnan vaikutus ilmastoon ei ole vaaraksi. Kasvihuonekaasuille määrätty taso tuli saavuttaa ajanjaksona, jolloin ekosysteemillä on mahdollisuus luonnolliseen sopeutumiseen ilmastonmuutokseen. /11./

Vuonna 1997 neuvotellulla ja vuonna 2005 voimaan astuneella Kioton sopimuksella saatiin teollisuusmaille sitovat päästövähennysmäärät sitoumuskaudelle 2008–2012. UNFCCC sai täydennystä vuonna 2015 solmitusta Pariisin sopimuksesta, joka sitoutti lähes kaikki maailman maat ilmastosopimukseen. Sopimus rikkoi totutun linjauksen kehittyneistä teollisuusmaista ja kehitysmaista. Sopimuksen ansiosta kaikki maat valmistelevat viiden vuoden välein

poliittiset toimenpiteet, joilla pyritään saavuttamaan kansalliset päästötavoitteet. Sopimuksen määränpäänä on rajoittaa ilmaston lämpeneminen alle kahden celsiusasteen. /12./

3.2 Valittujen järjestelmäratkaisujen tausta

VTT:n tekemässä tutkimuksessa maalämmön ja -viilennyksen käyttämisestä asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä on tutkittu hiilijalanjälkeä sekä elinkaarikustannuksia eri järjestelmien välillä. Kaukolämmityksen tunnuslukuina on käytetty Espoon alueen lukuja mutta kaukojäähdytyksen korvaavana ratkaisuna on ollut kompressorilla tuotettu jäähdytys. Tutkimuksessa on perehdytty myöskin sähköntuotannon alkuperään sekä maalämmön lisänä käytettävän sähkön hiilijalanjälkeen. Hiilijalanjäljen laskennan tuloksista eri skenaarioilla voi todeta, että laskennan tulokset vaihtelevat todella suuresti sähkön alkuperän vaikutuksen takia, sillä esimerkiksi osa sähköstä on tuotettu yhteistuotannolla ja osa lauhdetuotannolla. Elinkaarikustannusvertailu on tehty erilaisilla maalämpöjärjestelmän mitoitusvaihtoehdoilla sekä erilaisilla energianhinnan nousuilla. Elinkaarikustannusvertailuissa ei ole kovinkaan suuria eroja eri laskentatapojen välillä. /7./

Kaukolämmitys ja -jäähdytys ovat tehokkaita energian tuotannon muotoja asemakaavoitetuilla taajama-alueilla, joissa asukastiheys on suurempi kuin hajaasutusalueilla. Varsinkin alueilla, joissa kaukolämpö ja -jäähdytys tukevat toisiaan, niiden avulla pystytään vähentämään primäärienergian tarvetta ja sen seurauksena tuottamaan kiinteistöjen tarvitsemat energiat entistä ympäristöystävällisemmin. Kaukojäähdytykselle potentiaalisimpia asiakkaita ovat tiheästi rakennetulle alueelle sijoittuvat toimistorakennukset, julkiset rakennukset ja korkealaatuiset asuinkerrostalot. Tämän tyyppisiin kaupunkiympäristöihin on luontevaa sijoittaa sen tyyppisiä hybridiratkaisuja, joissa lämmitys ja jäähdytys tukevat toisiaan joko rakennuskohtaisesti tai jopa alueellisesti. Alueellisesti voidaan jopa ajatella kaukojäähdytysverkkoon liitettyjen rakennusten oleva suuria aurinkokeräimiä. /13./

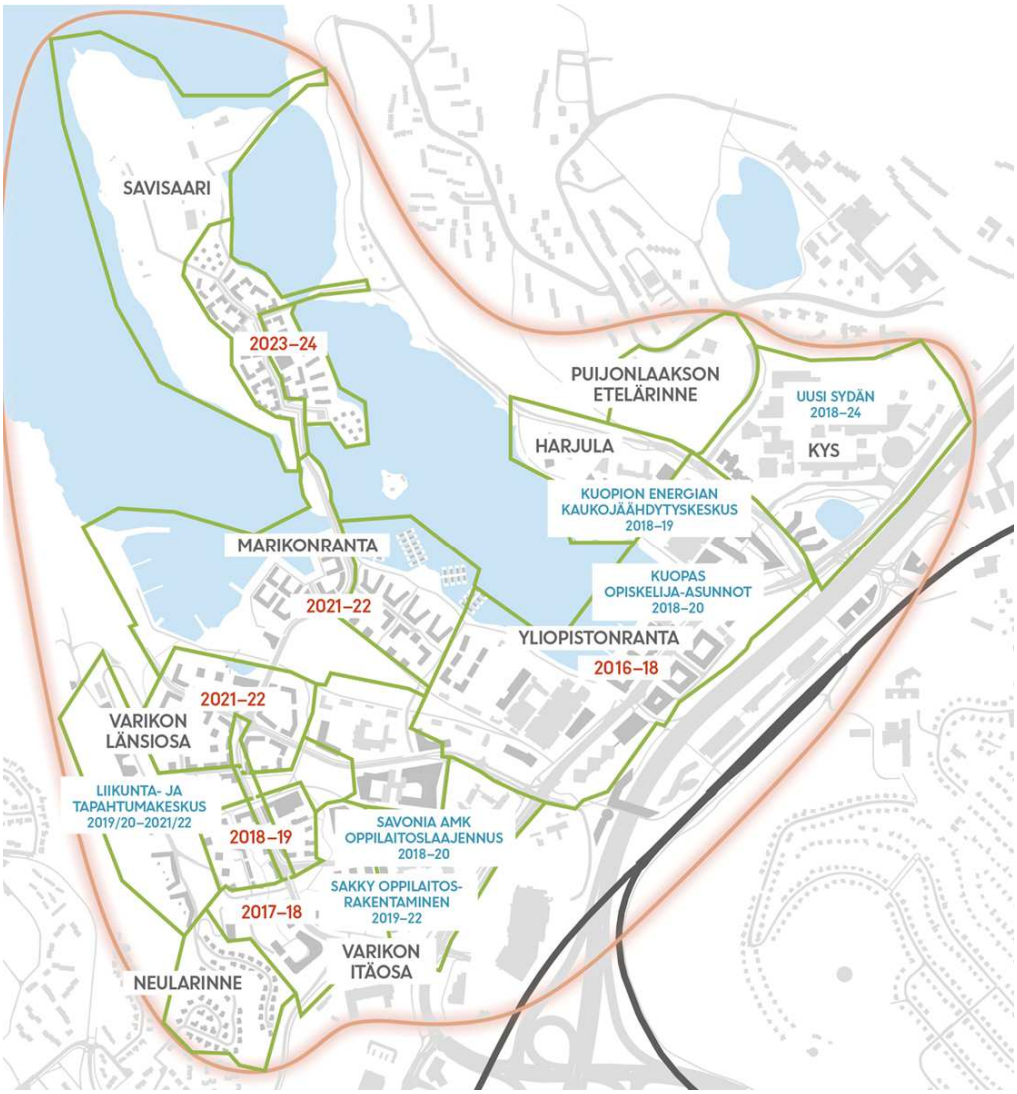
Vierailu Helen Oy:n toteuttamilla CHC-järjestelmillä vakuutti niin toiminnallisuudellaan kuin ympäristöystävällisyydelläänkin. Järjestelmäkonsepti on teho-

kas niin rakennuksen, rakennuksen omistajan ja kaupunginkin kannalta tarkasteltuna. Tarjoamalla jäähdytystä CHC-järjestelmällä pystyy energiayhtiö tarjoamaan asiakkailleen kokonaisvaltaisemman energiaratkaisun. Etuna asiakkaalle on myöskin lauhduttimilta vapautuva tila rakennuksen katolta. /5./

3.3 Savilahti-projekti

Kuopion Savilahden alue on ensi vuosikymmenen tärkein Kuopion asuntotuotantoalue. Alueelle on suunniteltu rakennettavan noin 3 000 uutta asuntoa, ja valmistuttuaan se on noin 34 000 toimijan muodostama kokonaisuus. /14./ Savilahdesta on tarkoitus rakentaa kansainvälisen tason kaupunginosa, ja sen ekologisen kestävyyden vetonauloina ovat energiatehokkuus ja vähähiilisyys.

Savilahden tiiveys, sijainti ja geologia luovat otollisen mahdollisuuden hyödyntää monipuolisesti erilaisia uusiutuvia energialähteitä. Alueella tullaan hyödyntämään kaukojäähdytykseen energiatehokasta Neulalahden syvänteestä saatavaa viileää järvivettä, yhteistuotannolla Haapaniemellä tuotettua kaukolämpöä unohtamatta aurinko- ja geoenergiaakaan. Energiatehokkuus ja uudet innovatiiviset ratkaisut ovat esillä myös mietittäessä alueen liikennettä, toimitiloja, valaistusta ja vesihuoltoa. /15./ Kuvassa 10 on esitetty alueraja kartalla, johon Savilahti-projekti ylettyy. Kuvasta huomaa, että alueella on jonkin verran jo rakennettua rakennusmassaa, mutta siitä huolimatta alueen rakennusten yhteenlaskettu tilavuus noin kaksinkertaistuu. Kuvassa on myöskin esitetty alueen eri rakennusvaiheet ja niiden aikatauluarviot.



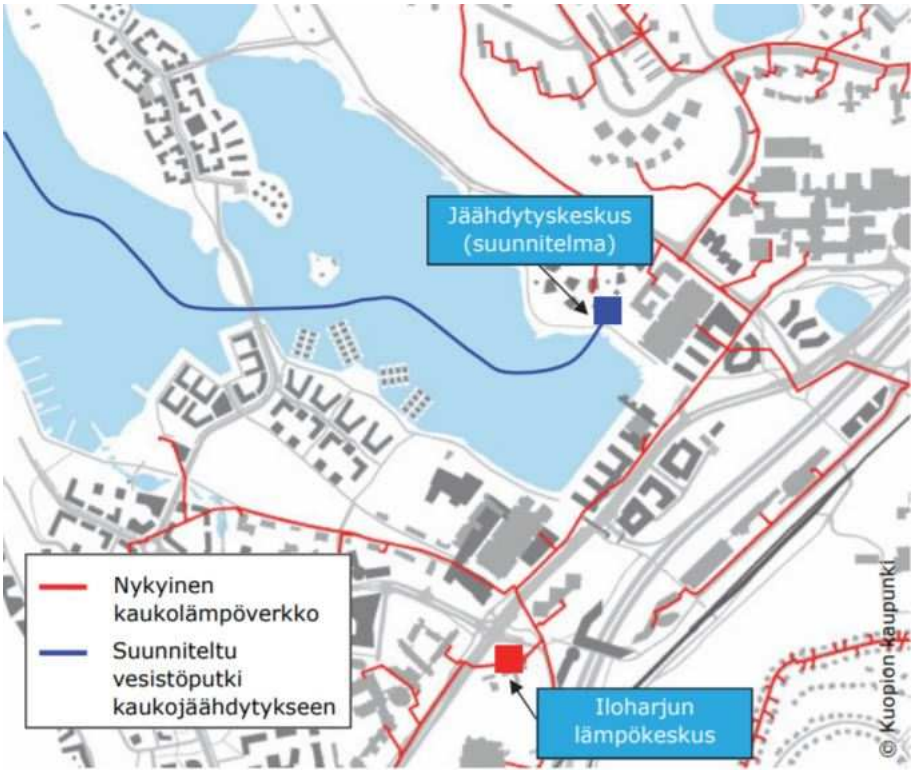
Kuva 10. Savilahti-projektin aluerajat /15/

3.4 SaVE -hanke

Vuonna 2016 SaVE-hanke toteutettiin osana Savilahti-projektia. Euroopan aluekehittämisrahasto tuki hanketta 75 % osuudella. Hankkeen tarkoituksena oli selvittää Savilahden alueen keinot vähähiilisen alueen kehittämisessä ja energiankäytön tehostamisessa. Hanke on osaltaan vastaus Kuopion ilmasto-poliittisen ohjelman 2009–2020 toteuttamista yrityskenttään ja aluesuunnitteluun. /16./

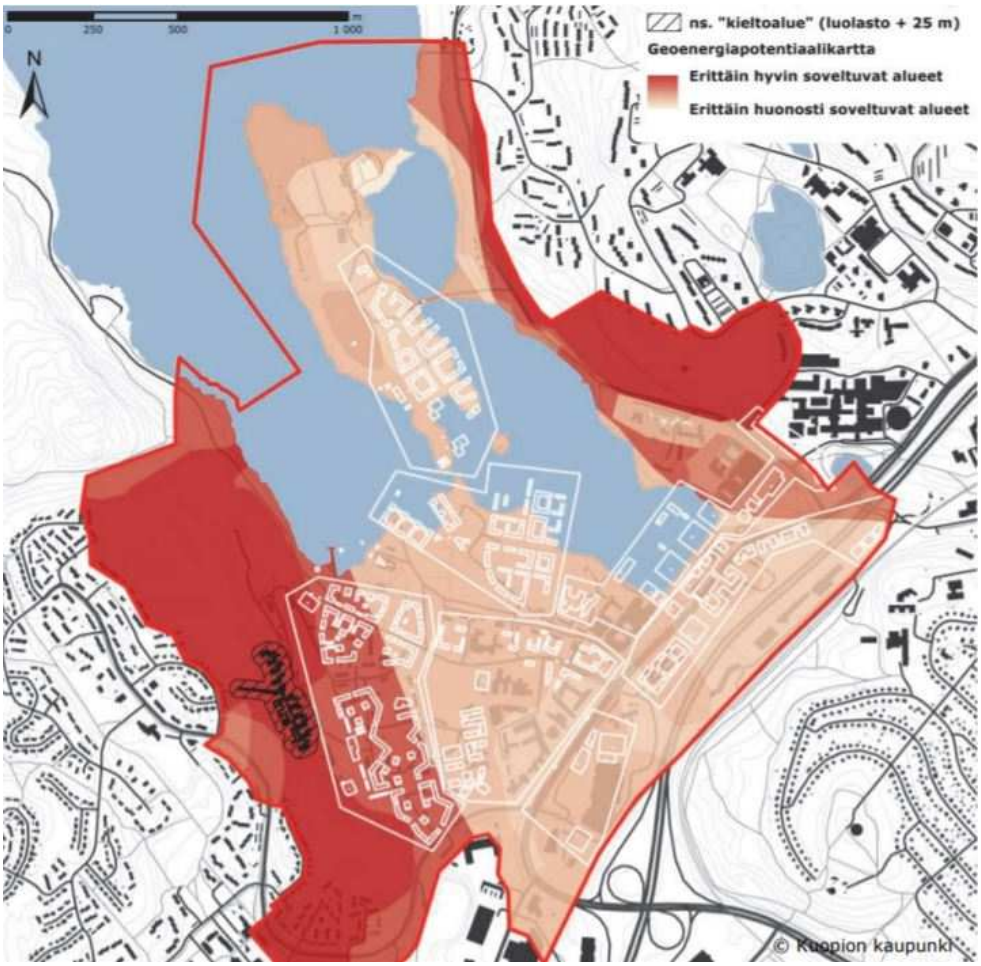
Hanke keskittyi muutaman suuremman kokonaisuuden tutkimiseen: kaukolämmitys ja -jäähdytys sekä erillislämmitys, aurinkoenergian sekä geoenergian hyödyntäminen. Kuvassa 11 on esitetty alueelle jo rakennettu hyvin kattava kaukolämmitysverkosto. Kaukojäähdytysverkoston sekä vesistöputkiston rakentaminen alueelle alkoi vuonna 2018. Tällä hetkellä alueella on kiinteistö-

kohtaisia sähköllä toteutettuja jäähdytysratkaisuja toimisto-, sairaala- ja liikerakennuksissa. Liittämällä olemassa olevat kiinteistöt kaukojäähdytysverkkoon saadaan alueen rakennusten jäähdytykseen käyttämän sähkön määrää huomattavasti pienennettyä. /16./



Kuva 11. Kaukolämpö ja –jäähdytys /16/

Aurinkoenergian osalta alueelta löytyi olemassa olevista kiinteistöistä paljon potentiaalisia varjostamattomia kattopintoja varsinkin aurinkosähköjärjestelmille. Jatkuvasti kehittyvä teknologia ja sitä kautta järjestelmien halpeneminen on tehnyt aurinkoenergiasta varteenotettavan lisäyksen osaksi kiinteistön energiajärjestelmää. Niiden avulla voidaan myöskin edesauttaa merkittävästi yhä tiukentuvien rakennusten energiamääräysten täyttymistä. Geoenergiaselvityksessä tuli ilmi, ettei alue ole kovinkaan potentiaalinen geoenergian kannalta tarkasteltuna. Tärkeimpiä tähän vaikuttavia tekijöitä ovat maanpeitteen paksuus sekä kallion laatu alueella. Alueen äärilaidoilta löytyy kahdesta kohtaa potentiaaliset alueet, jossa geonergian hyödynnettävyys on kiitettävällä tasolla. /16./ Kuvassa 12 on esitetty Savilahden alueen geoenergiapotentiaali.



Kuva 12. Geoenergiapotentiaali /16/

3.5 SmaRa – Savilahden smarteimmat ratkaisut -hanke

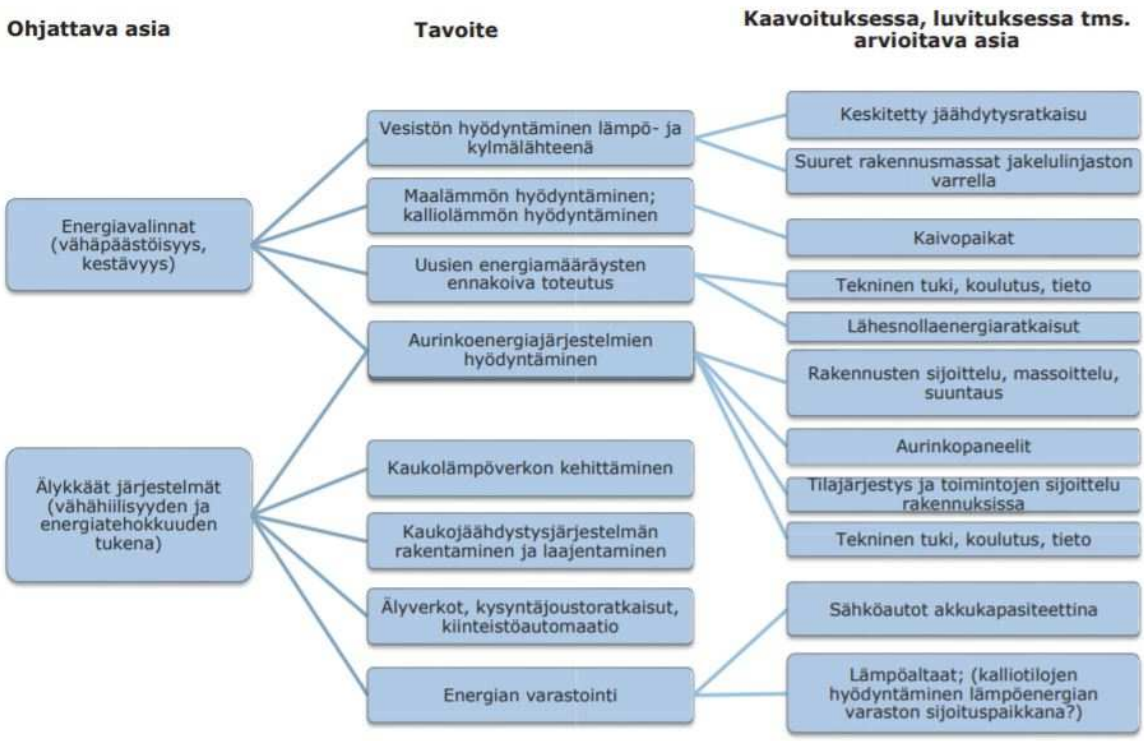
SaVE-hanke sai jatkoa SmaRa-hankkeesta (Savilahden smarteimmat ratkaisut), joka toteutetaan vuosina 2017–2019. Hankkeen tarkoituksena on selvittää sellaiset vähähiilisyyttä edistävät energiaratkaisut, jotka ovat parhaiten toteutettavissa Savilahden alueella. Hanke jakautuu kahdeksaan erilaiseen osa-alueeseen, joista tämän työn kannalta oleellisimmat ovat elinkaariviisaat infrastruktuuriratkaisut sekä vähähiiliset energiaratkaisut. /17./ Hankkeessa nostetaan esille yhtenä tärkeimpänä asiana paikallisen uusiutuvan energiantuotannon hyödyntäminen toteutettaessa älykästä ja monipuolista kaupunginosaa. Hankkeessa nähdään tärkeänä jo nyt tehtynä askeleena Kuopion yliopistollisen sairaalan päätös alkaa hyödyntämään Kallaveden Neulalahden syvänteen viileää järvivettä kiinteistön jäähdytyksessä yhteistyössä Kuopion Energia Oy:n kanssa. /18./

3.6 Asemakaavoituksen vaikutukset rakennusten energiajärjestelmiin

Kaavoituksella on tarkoitus ohjata alueellisesti maankäyttöä ja siihen liittyviä ratkaisuja sekä rakentamista. Asemakaavoitus pyrkii ohjaamaan rakentamista muun muassa olemassa olevien rakennusten käyttöä edistämällä ja kaavan muun ohjaustavoitteen pyrkimysten mukaisesti. Uusien rakennusten rakentamistapaohjeet tehdään myöskin osana asemakaavoitusta. /19./

Savilahden alueelle tehty Savilahti-ohje ohjaa suosituksilla ja ohjeilla alueen suunnittelua ja rakentamista. Rakennusten energiaratkaisuille on ohjeessa asetettu muutama erilainen tavoite: vähäpäästöisten ja kestävien energiamuotojen suosiminen, uusiutuvien energiamääräysten ennakoiva käyttö, lähellä olevan vesistön hyödyntäminen lämmityksessä ja jäähdytyksessä sekä rakennusten varautuminen aurinkoenergiajärjestelmien käyttöön. Savilahti-ohje ottaa myös kantaa ohjaamalla energiaratkaisuja. Ohjaaminen pyrkii edesauttamaan kaukolämpöverkon kehittämistä, kaukojäähdytysjärjestelmän rakentamista, aurinkoenergiajärjestelmien käyttöä sekä erilaisia älykkäitä ratkaisuja ja kysyntäjoustoa. /20./

Rakennuttajan kannattaa siis jo suunnitteluvaiheessa miettiä, miten hän voi toteuttaa ohjetta ja näin ollen edesauttaa omalla panoksellaan vähähiilisen Savilahden rakentamisessa. Savilahti-ohjeessa ei ole suositusta asuinkerrostalon jäähdytykseen, mutta tulevaisuudessa ainakin viilennykseen liittyvät merkinnät tullee yleistymään useilla alueilla. Asemakaavoituksen lisäksi mahdollisen viilennyksen rakentamisen miettimiseen vaikuttaa monta muutakin asiaa: kohteen sijainti, tuleva käyttäjäkunta, rakentaminen omaan käyttöön vai vuokratai myyntitarkoituksessa ja esimerkiksi alueen muiden rakennusten toteutus. Kuvassa 13 on tarkemmin eritelty asioita, joihin Savilahtiohjeella pyritään vaikuttamaan. Useimmat asioista linkittyvät toisiinsa kyseisen rakennuksen osalta mutta osa myöskin alueellisesti, jolloin se kattaa suurta osaa alueen rakennuksista.



Kuva 13. Savilahtiohjeistus /20/

3.7 FInZEB-hanke

Edellisissä opinnäytetyön taustaa läpikäyvissä alaluvuissa on käsitelty muun muassa kansainvälisiä toimenpiteitä globaalin kasvihuoneilmiön hillitsemiseksi sekä Kuopion alueellisia toimenpiteitä. Työ paremman ilmaston puolesta on saatu hyvin liikkeelle, mutta se vaatii vielä enemmän sitoutumista jokaiselta maalta, jotta asetetut tavoitteet saavutetaan ja mieluumminkin ylitetään, jotta pystymme turvaamaan mahdollisimman hyvät olosuhteet tuleville sukupolville.

Ympäristöministeriö perusti yhteistyössä Rakennusteollisuus RT ry:n ja Talotekniikkateollisuus ry:n kanssa FInZEB-työryhmän, jonka tehtävänä on implementoida nollaenergiarakentamiseen liittyvät direktiivit kansallisiin rakentamisohjeisiin ja -asetuksiin. Suomen pohjoinen sijainti maapallolla aiheuttaa lisähaastetta kansalliseen nzeb-määrittelyyn, joten energioiden ominaiskulutusten vertailu ei ole suoraan mahdollista muihin Euroopan maihin nähden. Nzeb-määrittelyllä tarkoitetaan kansainvälisen tason nollaenergiarakentamisen määritelmää /10, s.5/.

FInZEB-hanke koostuu loppuraportista ja useista eri taustaraporteista, jotka ovat valmistuneet maaliskuussa 2015. Tässä opinnäytetyössä hyödynnetään

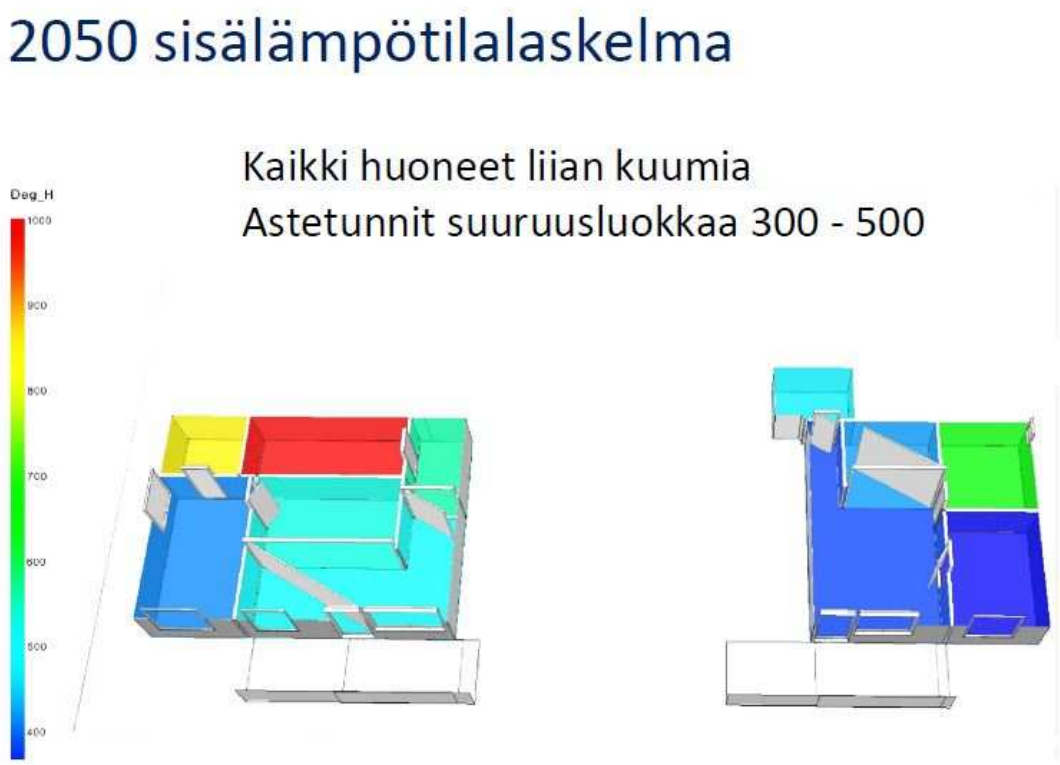
seuraavia taustaraportteja: 1 Kustannuslaskenta - asuinkerrostalo ja toimisto, 4 Energiaa säästävät tekniset ratkaisut, 7 Tulevaisuuden sää ja sisälämpötilatarkastelut sekä 8 Pilottikohteiden kokemuksia. /10./

3.7.1 Lämpötilatarkastelu tulevaisuudessa

Voimassa oleva ympäristöministeriön asetus määrää, että kesäajan huonelämpötila asuinkerrostalossa ei saa ylittää jäähdytyksen arvoa 27 °C enemmän kuin 150 astetuntia 1.6–31.8. välisenä aikana suunnitteluratkaisun mukaisella ilmavirralla /21/. Lämpötilatarkasteluissa kannattaa kiinnittää huomioita erityisesti operatiiviseen lämpötilaan, jolla tarkoitetaan ihmisen kokonaislämpöaistimuksen mukaista lämpötilaa /22/.

FInZEB-hankkeessa merkittävin näkökulma koskee asuinkerrostalojen sisälämpötilan nousua. Niissä sisälämpötilan nouseminen koetaan huomattavasti haitallisempana kuin pientaloissa, joissa käyttäjällä on enemmän mahdollisuuksia omalla toiminnallaan vaikuttaa sisäolosuhteisiin. Muissa kuin asuinkäyttöön suunnitelluissa rakennuksissa on jo nykyäänkin pääsääntöisesti koneellinen jäähdytys, joten pahimmalta ylilämpenemisen ongelmalta vältytään.

FInZEB-hankkeen taustaraportissa 7 Tulevaisuuden sää ja sisälämpötilatarkastelut on simuloitu oletetuilla vuoden 2050 lämpötiloilla kerrostalohuoneisto. Simuloinnin tuloksena huoneiston kaikki huoneet ovat liian kuumia nykyisiin rakentamismääräyksiin verraten. Astetunneissa tämä tarkoittaa noin kaksinkertaisia ylityksiä sallittuihin raja-arvoihin. Astetunneissa mitattuna lämpötilat ovat kuitenkin mahdollista pitää halutuissa rajoissa käyttämällä simuloinnissa ikkunan ulkopuolisia sälekaihtimia. /23./ Kuvassa 14 on esitetty arvio vuoden 2050 sisälämpötilojen simuloinnista.



Kuva 14. Kerrostalohuoneiston lämpötilat /23/

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Opinnäytetyössä tehtävän tutkimuksen tutkimusvaiheet sekä niihin liittyvät tutkimusmenetelmät on lueteltu alla toteuttamisjärjestyksessä:

1. Asuinkerrostalon geometriamallin luominen
    - Rakennuksen geometriamalli luodaan IDA ICE -ohjelmalla
2. Rakennuksen energiasimulointi
    - Tehdään kesäajan huonelämpötila tarkastelu IDA ICE -ohjelmalla kerrostalon suunniteltujen rakenteiden mukaisesti
    - Tutkitaan U-arvojen sekä rakenteiden laadun ja massan vaikutuksia jäähdytystarpeeseen ja sisälämpötilaan
3. Jäähdytyksen merkitys asuinviihtyvyyteen
    - Sisälämpötilojen tutkiminen simuloinneista ja niiden vertaaminen kirjallisuuteen
4. Jäähdytyksen eri toteuttamistapojen sekä ominaisuuksien tutkiminen
    - Maalämmitys ja -viilennys
    - Kaukolämmitys ja -jäähdytys
    - Vedenjäähdytyskone ja kaukolämmitys
    - CHC ja kaukolämmitys
5. Ominaisuuksien ja kustannusten vertailu
    - Synergiaetu lämmityksen ja jäähdytyksen välillä
    - Hankinta-, käyttö- ja huoltokustannusten selvitys
    - Ei huomioida toisiopuolen kustannuksia
    - Ei huomioida mahdollista sähköliittymän suurenemista

6. Hiilijalanjäljen vertailu
    - Verrataan valittujen järjestelmien lämmitys- ja jäähdytysenergian ominaispäästöjä 20 vuoden ajanjaksolla
7. Alueelliset mahdollisuudet lämmityksessä ja jäähdytyksessä
    - Järjestelmän yhteensovittaminen kaukolämpö tai -jäähdytysverkkoon tai energioiden myyminen kiinteistöjen välillä.
    - Ei huomioida mahdollista verotusta

Ida Indoor and Energy on dynaaminen simulointiohjelmisto monivyöhykemallinnukseen, jolla luodaan DWG-kuvien pohjalta 3D-tilamalli. 3D-mallia hyödynnetään rakennuksen lämpötaseen ja energiakulutuksen tutkimiseen.

Valmiiden DWG-piirustusten pohjalta, joihin ovet, ikkunat, väliseinät, väliovet sekä välipohjat on valmiiksi piirretty, on luotu yksi koko kerrostalon sisältävä IFC-malli (Industry Foundation Classes). IFC-malli on totuuden mukainen malli rakennuksesta, jonka avulla on mahdollista siirtää tuotetietoa sisältävä rakennusmalli tietokoneohjelmasta toiseen. Luodulle mallille tehdään energiasimulointi rakennuksen suunniteltujen rakenteiden mukaisesti. Mallin rakenteita sekä esimerkiksi ilmansuuntaa muuttamalla tutkitaan muutoksien vaikutusta kohteen jäähdytyksen tarpeeseen sekä sisälämpötiloihin.

5 SIMULOITAVA RAKENNUS

Opinnäytetyön tutkimuksessa asuinkerrostalon jäähdytystarpeista ja ostoenergiankäytöstä on saatava mahdollisimman totuudenmukainen ja luotettava tulos. Alkuun on valikoitava kohde, joka edustaa mahdollisimman hyvin nykyään rakennettavia asuinkerrostaloja. Tällöin tutkimuksen pohjalta on helpompi tehdä yleistettäviä johtopäätöksiä vastaavista kiinteistöistä. Simuloitavaksi asuinkerrostaloksi valikoitui Kuopioon rakennettu viisikerroksinen kohde, jossa on 25 asuntoa. Pienimmät asunnot ovat kooltaan 48,5 m^2 kaksioita ja suurimmat ovat 87 m^2 neliöitä. Rakennuksen rakennustilavuus on 7860 m^3, kokonaisala 2465 m^2, kerrosala 2090 m^2 ja asuinhuoneistoala 1670 m^2. Kuvassa 15 on esitetty simuloitavan kohteen 3D-malli, josta on helppoa huomata kuinka ylemmän kerroksen parvekkeen lattia varjostaa alempien kerroksien ikkunoita. Tällä on huomattava vähentävä merkitys sisään pääsevään auringonsäteilyyn.

Kuva 15. Geometriamalli IDA ICE -simuloinnista

Kohde edustaa erittäin hyvin tyypillistä suomalaista kerrostaloarkkitehtuuria ilman arkkitehtonisia muutoksia, joilla olisi merkittävää vaikutusta ostoenergiantarpeeseen niin jäähdytyksen kuin lämmityksenkään osalta. Tilavuudeltaan ja pinta-alaltaan kohde on myöskin keskimääräistä tasoa, jolloin ulkovaipan ja tilavuuden suhde ei myöskään vääristä tuloksia merkittävästi.

6 SIMULOINNIN JA VERTAILUN RAJAUKSET

Simuloinnissa otetaan huomioon rakennuksesta itsestään muodostuvat varjostukset, mutta rakennuksen ulkopuoliset varjostukset jätetään huomioimatta. Ulkopuolisten varjostusten merkitys kasvaa huomattavasti silloin, kun varjostukset ovat isojen ikkunapinta-alojen kohdalla.

Rakennuksen ilmanvaihtomäärät on mitoitettu ympäristöministeriön asetuksen mukaisella ilmanvaihtomäärällä asuinkerrostalolle noin 0,5 l/m^2, jolloin työssä ei ole huomioitu mahdollisia muutoksia ilmamääriä muutettaessa /21/.

Simuloinnissa on käytetty jäähdytystehotarpeita laskettaessa ideaalista jäähdytyslaitetta asuintilojen kaikissa huoneissa sekä ilmanvaihtokoneessa on

myöskin jäähdytys. Ideaalinen jäähdytyslaite on jätetty pois kellarikerroksen tiloista.

Huoneiden lämpötilojen tuloksia tutkittaessa otettiin huomioon ainoastaan oloja makuuhuoneiden lämpötilat, sillä muissa huoneissa käyttäjät eivät juurikaan oleile, jolloin sisälämpötila ei ole niin suuressa merkityksessä. Simuloinnin eri vaiheissa ei huomioida ulkoseinän rakenteellista oikeellisuutta muutettaessa rakenteen paksuutta ja massaa.

Lämmitys- ja jäähdytystekniikoita vertailtaessa ei oteta huomioon niin sanottuja asiakkaan toisiopuolen laitteita, sillä kaikilla vertailtavilla tekniikoilla ne ovat kutakuinkin samanlaisia. Kustannuslaskelma ei ota huomioon erilaisia rahoitus- ja korkokuluja tai energianhinnan muutoksia. Savilahden alueelle valittavissa ratkaisuissa painotetaan elinkaariviisautta sekä mahdollisimman hyvää alueellista energiakäytön tehostamista. Tästä johtuen kustannusvertailun ulkopuolelle jätetään ilmalauhdutteinen vedenjäähdytyskone.

7 ASUINKERROSTALON SIMULOINNIT JA NIIDEN VAIHEET

Työssä simuloitiin asuinkerrostalon lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiantarpeita sekä lämmitys- ja jäähdytystehoa 14 toisistaan hieman eroavalla simulaatiolla. Niiden avulla pyrittiin luomaan kokonaiskuva siitä, miten tulevaisuudessa kiristyvät rakentamismääräykset vaikuttavat kiinteistöjen energiankulutukseen ja lämpimimpien huoneiden sisälämpötiloihin. Sisälämpötilojen osalta olennainen asia on myös, kuinka monta tuntia vuositasolla sisälämpötila ylittää arvon +27 °C.

7.1 Simuloinnin vaiheet

Simulointien eri vaiheiden välillä tehtiin pieniä muutoksia esimerkiksi U-arvoihin, g-arvoihin tai jäähdytyksen asetusarvoon, jolloin pystytään paremmin arvioimaan kyseisen muutoksen vaikutusta tutkittaviin asioihin. U-arvo tarkoittaa rakennusosan lämmönläpäisykerrointa eli sen avulla lasketaan lämmön vuotoa sen läpi /21/. Ikkunoiden g-arvo tarkoittaa auringonsäteilyn kokonaisläpäisysuhdetta. Kokonaisläpäisysuhde on se suhteellinen osuus ikkunaraken-

teen ulkopinnalle osuvasta auringon säteilyn tehosta, mikä läpäisee ikkunarakenteen. G-arvon yksikkönä käytetään joko osuutta 0-1 tai prosenttiarvoa. /24./

1. Asuinkerrostalo simuloidaan suunnitelluilla U-arvoilla:

Ulko-seinä	Ovi	Ikkuna	g-arvo	Ylä-pohja	Ala-pohja	Kellarin seinä
0,17	1,01	1,1	0,55	0,09	0,12	0,13

2. Rakennuksen suuntausta muutetaan 90 astetta.

3. Rakennus simuloidaan suunnitelluilla U-arvoilla ja ilmanvaihtoon lisätään jäähdytys.

4. Vaiheen kolme lisäksi rakennuksen jokaiseen tilaan asennetaan ideaalinen jäähdytyslaite ja jäähdytyksen asetusarvoksi asetetaan +27 °C.

5. Vaihetta neljä muokataan siten, että jäähdytyksen asetusarvoksi asetetaan +24 °C.

6. Ulkoseinän rakennetta muutetaan siten, että ulkoseinän U-arvo pysyy muuttumattomana, mutta betonia tulee 30 senttimetrin paksuudelta lisää rakenteeseen.

7. Ulkoseinän U-arvo pysyy muuttumattomana ja betonirakenne muutetaan puurakenteeksi.

8. Ulkoseinän rakennetta muutetaan siten, että ulkoseinän U-arvo pysyy muuttumattomana, mutta puuta tulee 11 senttimetrin paksuudelta lisää rakenteeseen.

9. Ulkoseinän rakenteena on alkuperäinen betonirakenne. Osa kiinteistön U-arvoista sekä ikkunoiden g-arvo muutetaan seuraavasti, muutokset lihavoituna:

Ulko-seinä	**Ovi**	**Ikkuna**	**g-arvo**	Ylä-pohja	Ala-pohja	Kellarin seinä
0,17	**0,6**	**0,74**	**0,49**	0,09	0,12	0,13

10. Vaihetta yhdeksän muokataan siten, että ulkoseinän U-arvoa parannetaan, muutos lihavoituna:

Ulkoseinä	Ovi	Ikkuna	g-arvo	Yläpohja	Alapohja	Kellarin seinä
0,14	0,6	0,74	0,49	0,09	0,12	0,13

11. Vaihetta kymmenen muokataan siten, että ulkoseinän U-arvoa parannetaan, muutos lihavoituna:

Ulkoseinä	Ovi	Ikkuna	g-arvo	Yläpohja	Alapohja	Kellarin seinä
0,11	0,6	0,74	0,49	0,09	0,12	0,13

Vaiheissa 12–14 ei ole ollenkaan jäähdytystä vaan simuloinnin muutokset tehdään ensimmäisen vaiheen simulointimalliin.

12. Vaihetta yksi muokataan siten, että ikkunoiden U – ja g-arvoa parannetaan, muutokset lihavoituna:

Ulkoseinä	Ovi	**Ikkuna**	**g-arvo**	Yläpohja	Alapohja	Kellarin seinä
0,17	1,01	**1,05**	**0,12**	0,09	0,12	0,13

13. Vaihetta 12 muokataan siten, että ulkoseinän U-arvoa parannetaan seuraavasti, muutos lihavoituna:

Ulkoseinä	Ovi	Ikkuna	g-arvo	Yläpohja	Alapohja	Kellarin seinä
0,14	1,01	1,05	0,12	0,09	0,12	0,13

14. Vaihetta 13 muokataan siten, että ulkoseinän U-arvoa parannetaan seuraavasti, muutos lihavoituna:

Ulkoseinä	Ovi	Ikkuna	g-arvo	Yläpohja	Alapohja	Kellarin seinä
0,11	1,01	1,05	0,12	0,09	0,12	0,13

7.2 Simuloinnin tulokset

Alla on esitetty kahdessa eri taulukossa IDA ICE -simulointien tulokset. Tuloksiin on kirjattu tämän työn kannalta tärkeimmät tulokset simulointivaiheittain. Taulukosta 1 nähdään simuloinnin eri vaiheiden vaikutus maksimi lämmitystehoon, ostoenergian määrään, kuiva- sekä operatiiviseen lämpötilaan ja tuntien määrään, jolloin sisälämpötila on yli +27 °C.

Taulukko 1. Eri simulointivaiheiden lämmityksen tulokset

Vaihe	Lämmitysteho, max	Ostoenergia, lämmitys	Kuivalämpötila, max	Operatiivinen lämpötila, max	Aika, lämpötila yli +27 °C
yksikkö	kW	MWh	°C	°C	h
1	62,0	204,1	34,4	34,5	2150
2	62,5	205,3	33,0	33,0	2157
3	62,1	204,1	32,9	33,0	2062
4	62,1	204,2	27,0	27,9	1566
5	62,1	204,5	24,0	24,9	0
6	61,4	204,2	24,0	24,9	0
7	63,1	204,9	24,0	25,1	0
8	62,6	204,7	24,0	25,0	0
9	56,5	191,6	24,0	24,9	0
10	55,3	188,2	24,0	24,9	0
11	54,1	184,9	24,0	24,9	0
12	62,2	212,8	29,4	29,3	413
13	61,0	209,1	29,4	29,3	433
14	59,8	205,2	29,4	29,4	452

Taulukosta 2 nähdään simuloinnin eri vaiheiden vaikutus maksimi jäähdytystehoon, ostoenergian määrään, kuiva- sekä operatiiviseen lämpötilaan ja tuntien määrään, jolloin sisälämpötila on yli +27 °C.

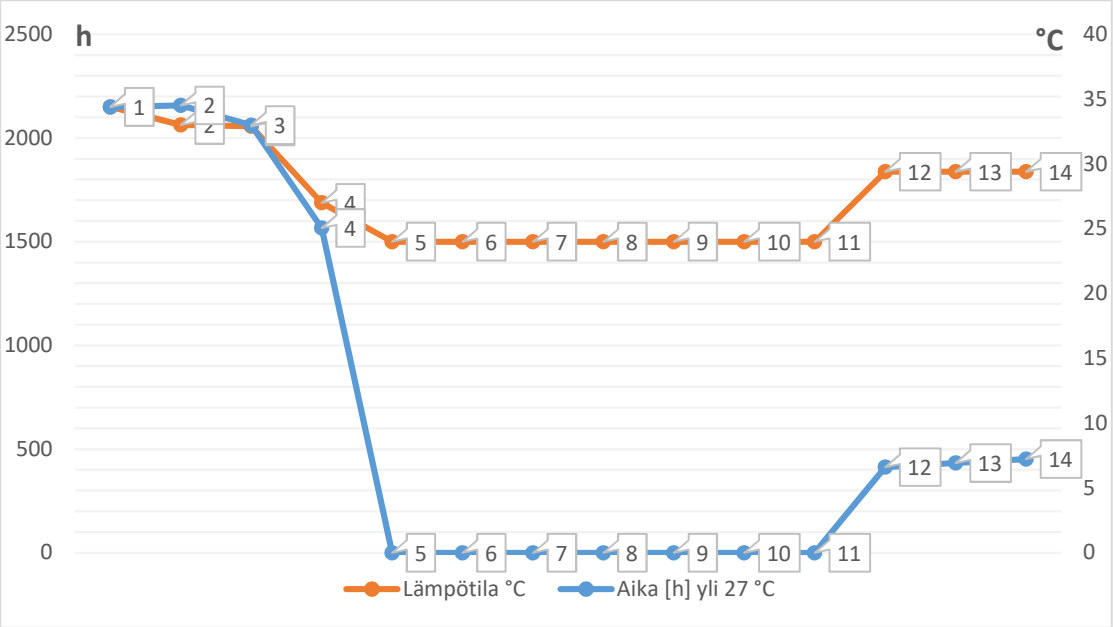
Taulukko 2. Eri simulointivaiheiden jäähdytyksen tulokset

Vaihe	Jäähdytys-teho, max	Ostoenergia, jäähdytys	Kuiva-lämpö-tila, max	Opera-tiivinen lämpö-tila, max	Aika, läm-pötila yli +27 °C
yksikkö	kW	MWh	°C	°C	h
1	0	0	34,4	34,5	2150
2	0	0	33,0	33,0	2157
3	9,4	5,4	32,9	33,0	2062
4	11,3	7,5	27,0	27,9	1566
5	13,0	18,1	24,0	24,9	0
6	13,1	18,4	24,0	24,9	0
7	14,0	17,9	24,0	25,1	0
8	13,5	17,9	24,0	25,0	0
9	12,8	18,8	24,0	24,9	0
10	12,6	19,4	24,0	24,9	0
11	12,7	20,0	24,0	24,9	0
12	0	0	29,4	29,3	413
13	0	0	29,4	29,3	433
14	0	0	29,4	29,4	452

7.3 Simulointitulosten tarkastelu

Alla on esitetty kolmessa eri taulukossa IDA ICE -simulointien eri vaiheiden tuloksia niiden havainnollistamiseksi. Tuloksiin on kirjattu tämän työn kannalta tärkeimmät tulokset ja havainnot tutkimuksen suhteen.

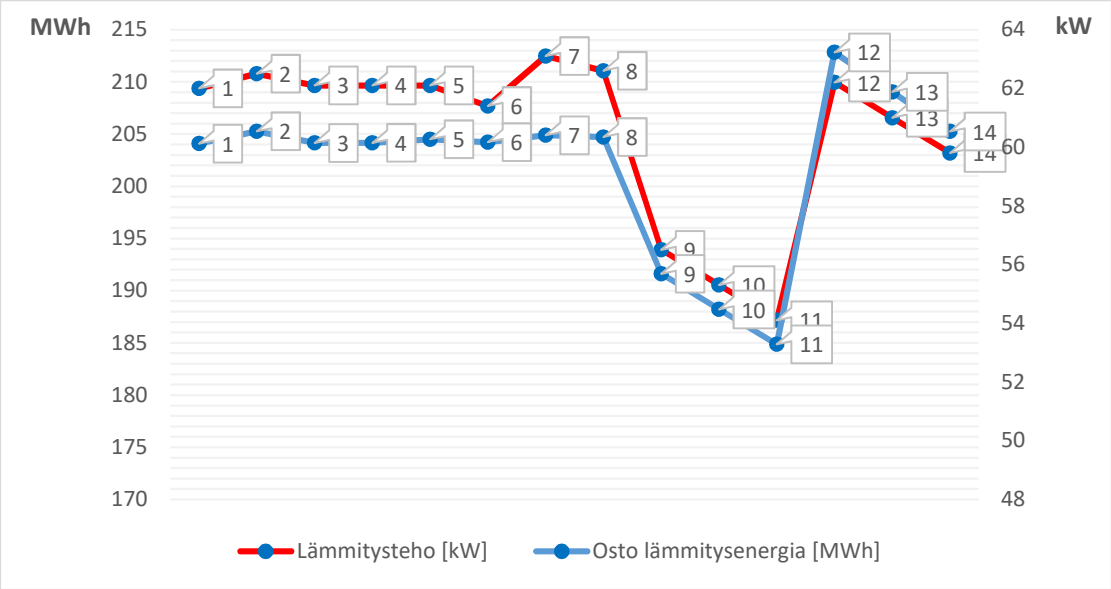
Kuvassa 16 on esitetty kerrostalon kuumimman asuinhuoneen maksimi lämpötila ja operatiivisen lämpötilan 27 °C ylittävien tuntien määrä. Lämpötilarajaksi ilman jäähdytystä valikoitui 27 °C, sillä se on asuinkerrostalojen lämpötilan raja-arvona ympäristöministeriön asetuksessa.



Kuva 16. Eri simulointien lämpötilat ja 27 °C ylittävien tuntien määrät

Simuloinnin vaiheissa neljästä yhteentoista on jäähdytys mukana, jolloin sisälämpötilat pysyvät hallussa asetetuissa rajoissa. Vaiheessa neljä jäähdytyksen rajana on 27 °C ja vaiheissa viidestä yhteentoista rajana on 24 °C.

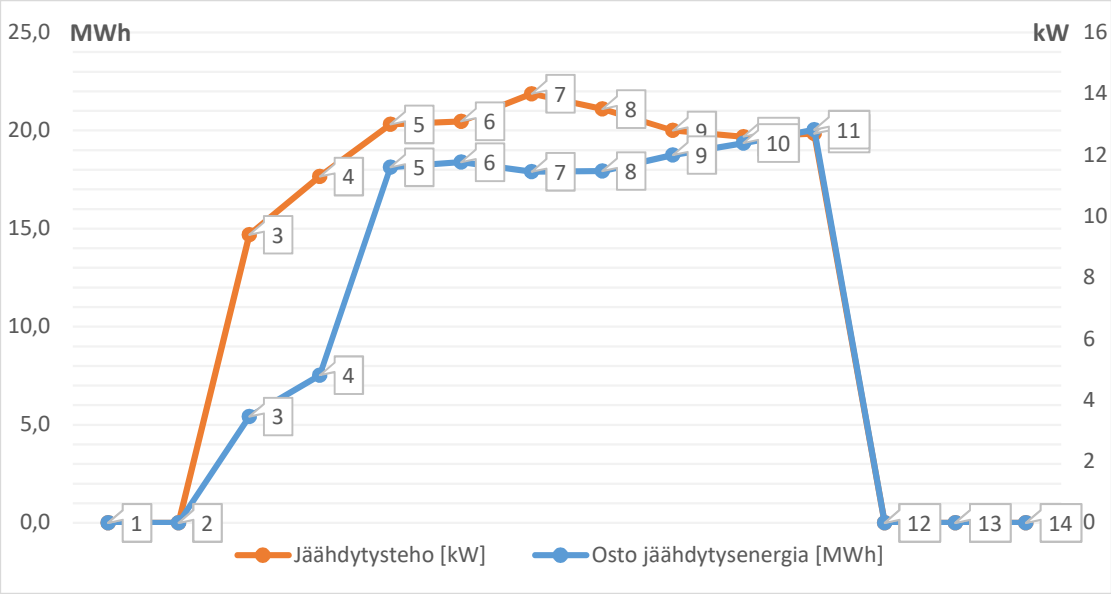
Rakennuksen yksinkertaisilla rakenteellisilla valinnoilla voi olla yllättävän suuri vaikutus lopputuloksiin. Rakennukseen sisään pääsevän auringon säteilyn kannalta ikkunoiden g-arvolla on erittäin suuri merkitys. Simuloinnin vaiheissa 12–14 kiinteistöön on valittu ikkunat, joissa g-arvo on 0,12. Tämä vaikuttaa kuumimman huoneen lämpötilaan neljä astetta pienentävästi, jolloin kuumin lämpötila tippuu jo alle 30 °C. Tuntien määrä, jolloin lämpötila on yli 27 °C, tippuu noin viidesosaan alkuperäisestä määrästä eli hieman yli 400 tuntiin.



Kuva 17. Eri vaiheiden lämmitystehot ja lämmityksen ostoenergiamäärät

Kuvassa 17 on esitetty kunkin simulointivaiheen maksimi lämmitystehontarve sekä ostettavan lämmitysenergiantarve. Vaiheissa yhdestä kahdeksaan lämmitysenergian tarve pysyy kutakuinkin muuttumattomana, mutta lämmitystehontarpeen maksimiarvossa tapahtuu hyvin pientä vaihtelua. Varsinkin seitsemännen ja kahdeksannen simulointivaiheen lämmitystehontarve on noin yhdestä kahteen kilowattia suurempi kuin aiemmissa vaiheissa. Verrattuna muihin vaiheisiin niissä muutettiin ainoastaan ulkoseinän betonirakenne puurakenteiseksi siten, että U-arvo pysyi muuttumattomana.

Kuvassa 18 on esitetty kunkin simulointivaiheen maksimi jäähdytysteho sekä jäähdytyksen ostoenergian määrä. Simuloinnin vaiheissa kolmesta yhteentoista on kerrostalossa jäähdytys. Eri vaiheiden suurin jäähdytyksen teho on 14 kW ja suurin jäähdytyksen ostoenergia on 20 MWh vuodessa. Kerrostalon rakenteellisilla muutoksilla ei ole merkittävää vaikutusta jäähdytystehoon eikä myöskään jäähdytyksen ostoenergiaan. Sen sijaan jäähdytyksen asetusarvon muutos 27 °C:sta 24°C:een vaikuttaa yli kaksinkertaisesti jäähdytyksen ostoenergiaan.



Kuva 18. Simuloinnin eri vaiheiden jäähdytystehot ja -ostoenergiat

8 JÄÄHDYTYKSEN VAIKUTUS ASUINVIIHTYVYYTEEN

Asuinkiinteistöiden sisäilman lämpötila tunnistetaan yleisesti voimakkaana keskustelun aihealueena, josta jokaisella on selkeä mielipide. Osa on tottunut asumaan +25 °C:n lämpötilassa ja osa tuntee olonsa tukalaksi, mikäli asuinhuoneissa lämpötila kohoaa yli +21 °C. Eroavaisuudet optimaalisessa lämpötilassa yksilöiden välillä ovat yllättävänkin suuria, enimmillään jopa 6 °C /25, s.115/. Yksilön optimaalisella lämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, jossa yksilö viihtyy, eikä hän koe tarvetta muuttaa lämpötilaa. Asuinviihtyvyyden merkitys on hiljalleen kasvanut vuosi vuodelta, jolloin tulevaisuudessa jäähdytyksestä ollaan yhä valmiimpia maksamaan ja sen olemassaoloa osataan arvostaa kiinteistöjä hankittaessa.

Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen osassa yksi otetaan kantaa huoneilman lämpötilaan ja operatiiviseen lämpötilaan. Soveltamisohjeessa todetaan operatiivisen lämpötilan olevan sisäympäristöissä todella lähellä huoneilman lämpötilaa, joten tutkimuksissa voidaan keskittyä tutkimaan pelkästään sisälämpötiloja. Operatiivinen lämpötila on lämmityskaudella lähellä sisälämpötilaa, kun se on lämmityskaudella soveltamisohjeen mukaan toimenpiderajojen +18 °C - +26 °C välillä. Lämpötilan merkityksen asuinviihtyvyyteen meistä jokainen voi itse todeta, mutta sillä on myöskin yhteys suoriin ja välillisiin terveyshaittoihin. /22./

Simulointien perusteella pystytään toteamaan, että varsinkin huoneissa, joissa on etelään päin suuntautuvia isoja varjostamattomia ikkunoita, lämpötilat nousevat kesäkaudella varsin korkealle. Työterveyslaitoksen laboratoriotutkimuksen mukaan +23 °C:tta verrattuna +29 °C:een on selkeästi viihtyisämpi. Korkea lämpötila koetaan myöskin usein fyysisesti kuormittavaksi ja sillä on yhteys somaattiseen oireiluun, mikä voi ilmetä esimerkiksi päänsärkynä tai nenäoireiluna. Korkeammassa lämpötilassa ihminen voi kokea olonsa myöskin hieman väsyneemmäksi. /26./ Näillä perusteilla tulevaisuudessa rakennettavat asuinkerrostalot saanee hiljalleen yleistyen jäähdytyksen ainakin osaan kiinteistön huoneistoja, kunhan rakennusliikkeet vaan uskaltavat valita rakennettavakseen kalliimman vaihtoehdon.

Simulointituloksista pystyy tekemään johtopäätöksen, että osassa tiloista on haasteita sisälämpötilojen hallinnassa ja niihin tulee kiinnittää huomiota aina suunnitteluvaiheessa ja tarvittaessa kannattaa kysyä mielipidettä myös rakennuttajalta. Ympäristöministeriön asetus voidaan vielä nykyisellään täyttää ilman varsinaista kiinteistön jäähdytysjärjestelmää, mutta jonkinasteisia rakenteellisia ratkaisuja joutuu jo tekemään asetuksen täyttämiseksi. Mikäli asuinkerrostalon asumisviihtyvyyteen halutaan panostaa, niin silloin jäähdytysjärjestelmä on erittäin suositeltavaa asentaa.

Kuvan 17 perusteella voidaan todeta, että asuinkerrostalon seinärakenteella tai sen massalla ei ole juurikaan merkitystä lämmitystehoon tai ostoenergian tarpeeseen vaan U-arvoja pienentämällä niihin voidaan vaikuttaa. U-arvot ovat kuitenkin jo nykyään niin korkealla tasolla, että niitäkään parantamalla ei enää pystytä kovinkaan kustannustehokkaisiin ratkaisuihin kiinteistön kannalta. Kuvasta 18 voidaan tulkita, että laitteisto kannattaa mitoittaa jäähdytysteholtaan suurimman tehon mukaan, sillä muutokset ovat pienehköjä. Tällöin kiinteistön käyttäjä pystyy halutessaan jäähdyttämään kiinteistön haluamaansa sisälämpötilaan ulkoilmaolosuhteista riippumatta.

Tarkasteltaessa asuinkerrostalon lämmitystä tai jäähdytystä maksimitehon ja ostoenergian kannalta, huomataan, että osa muutoksista on merkittävän suuruisia tarkasteltaessa niitä prosentuaalisesti. Kun tulokset muutetaan euromääräiseksi energiakustannuksen kautta, huomataan, ettei kyse ole suuresta muutoksesta käyttökustannuksessa. Isoilla muutoksilla rakenteissa ei saada

enää juurikaan kustannushyötyä loppukäyttäjälle ja näin ollen ei myöskään rakennuttajalle myyntihinnassa.

9 TEKNIIKOIDEN SYNERGIAEDUT JA KUSTANNUKSET

Kuopion Savilahteen sijoittuvalle kerrostalolle lopullisiksi lämmitysjärjestelmän ja jäähdytysjärjestelmän vertailtaviksi vaihtoehdoiksi valikoitui seuraavat järjestelmäkokonaisuudet: maalämpö + maaviilennys, kaukolämpö + kaukojäähdytys ja kaukolämpö + CHC. Järjestelmäkokonaisuuksien tilantarve rakennuksen sisäpuolella on hyvin samaa luokkaa, jolloin tilavaatimuksia ei tarvitse enempää huomioida. Näille järjestelmille on yhteistä se, että ne edustavat tehokkaasti elinkaariviisautta sekä alueellista tehokasta ja ympäristöystävällistä energiankäyttöä. Myöskin lämmitys- sekä jäähdytysjärjestelmä tukevat toisiaan järjestelmäkokonaisuuden näkökulmasta katsottaessa.

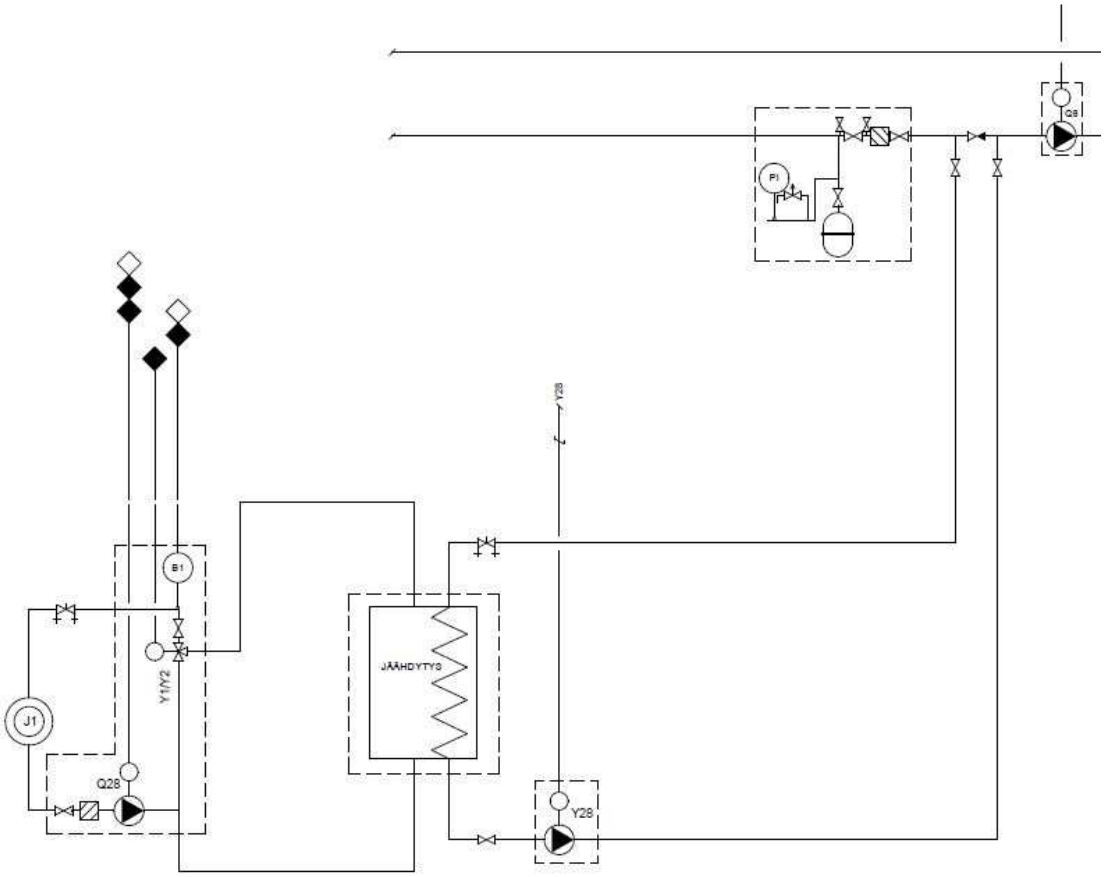
9.1 Järjestelmäkokonaisuudet

Maalämpöjärjestelmä mitoitettiin 87 % osatehomitoituksella, sillä se sopi parhaiten järjestelmätoimittajan laitekokonaisuuteen ja näin ollen tällä vältettiin vääristymä investointikustannuksia vertailtaessa eri järjestelmien välillä. Maalämpöjärjestelmän tarvitsema lisälämmitystarve sähköllä on 0,75 MWh vuodessa. Maalämpöjärjestelmän lämminvesivaraajaan sijoitettiin 30 kW:n tehosta sähkövastuksia, jotta lämmitys voidaan turvata kompressorin vikatilanteessa. Lämmitysteholtaan 65 kW:n maalämpöpumpun lämmönlähteeksi mitoitettiin kahdeksan kappaletta aktiivisyvyydeltään 238 m energiakaivoa, joiden keskimääräinen etäisyys toisistaan on oltava vähintään 20 m. Lämmitysjärjestelmään valikoitui tilavuudeltaan 1000 l varaaja ja käyttövesijärjestelmään 2000 l sekä lisäksi 300 l varaaja lämpimän käyttöveden riittävyyden takaamiseksi. Järjestelmän tarvitsema sähköliittymä on 3x125A. Mahdollista rakennuksen sähköliittymän suurenemaa ei oteta huomioon laskennan yksinkertaistamiseksi ja toisaalta se voidaan useasti välttää uudiskohteissa huolellisella suunnittelulla ja sähköteknisillä järjestelmäratkaisuilla. /27./

Kuopion Savilahdessa on paikoitellen haastavat olosuhteet energiakaivojen poraamiselle, mutta sieltä löytyy myös alueita, joissa olosuhteet ovat ihanteelliset. Haastavissa paikoissa maakerrosta on paksulti huonolaatuisen kallion

päällä ja taasen ihanteellisissa paikoissa kallio on hyvälaatuista, ja se ulottuu maanpinnalle saakka. /15./

Kuvassa 19 esitetään maaviilennyksen kytkentämalli, jossa rakennuksen jäähdytysjärjestelmä kytketään lämmönsiirtimellä maapiirin tuloputkeen. Kytkentä takaa mahdollisimman alhaisen tulevan lämpötilan lämmönsiirtimelle ja toisaalta lämpöpumpulle tuleva maapiirin liuos on lämpimämpää kuin suoraan kaivokentästä tullessa, jolloin maalämpöpumpun hyötysuhde paranee. Maapiirin liuospumpun ohjaus toteutetaan jäähdytyksen automaation kautta. /27./



Kuva 19. Jäähdytyksen kytkentä maapiiriin /27/

Kaukolämpöliittymä mitoitettiin 75 kW:n sopimustehon mukaan. Lämmönjakokeskukseksi valikoitui 3-piirinen lämmönjakokeskus, jossa on käyttövesi, ilmanvaihto- sekä lattialämmitys. Kaukojäähdytysliittymä mitoitettiin 30 kW:n sopimustehon mukaan. Kaukojäähdytyskeskus on 2-piirinen, jossa on ilmanvaihto- sekä säteilijäjäähdytys. Kuvassa 20 on esitetty 1-piirinen kaukojäähdytyskeskus. Kuvan jäähdytyskeskuksesta puuttuu kondenssivesiallas lämmön-

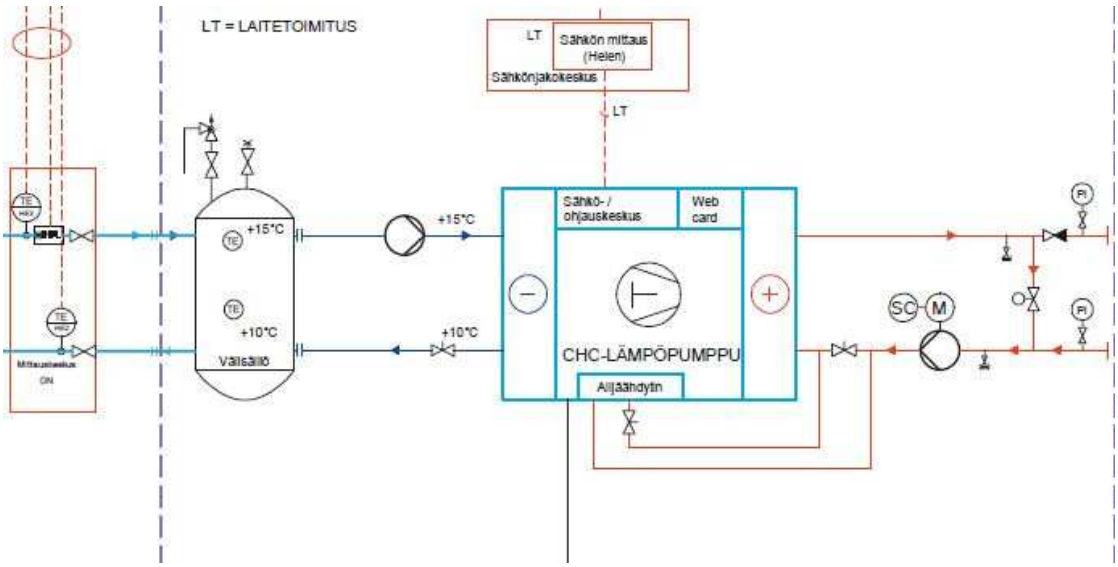
siirtimen alapuolelta sekä kondenssieristykset putkista. Lämmönjakokeskuksiin verraten jäähdytyskeskuksessa käytettävät lämmönsiirtimet ovat suurempi kokoisia mitoituslämpötiloista johtuen.

Kuva 20. 1-piirinen kaukojäähdytyskeskus /28/

Alueellisesti ajateltuna kaukolämmitys ja -jäähdytys tukevat toisiaan merkittävästi, sillä jäähdytyksen avulla talteenotettu ylijäämälämpö voidaan mitoitustilanteessa hyödyntää kaukojäähdytyslaitoksessa lämpöpumpulla Savilahden alueen kaukolämmitykseen. Tässä tilanteessa Savilahden energiatalous toteutuu optimaalisesti, sillä toisen rakennuksen ylijäämälämpö hyödynnetään esimerkiksi toisessa rakennuksessa käyttöveden lämmitykseen. Lyhyellä aikavälillä ajateltuna pienet talteenotetut ylijäämälämmöt eivät varsinaisesti vähennä voimalaitoksen käyttötarvetta, sillä joka tapauksessa se joutuu turvaamaan kaupungin lämmönsaannin. Tulevaisuuden visiona kuitenkin on, että ylijäämälämpöjen sekä lämpöpumppujen avulla suuria voimalaitoksia pystyttäisiin pitämään ainakin osittain kesäaikana poissa käytöstä.

Kaukolämpö + CHC-järjestelmäkokonaisuudessa kaukolämpöjärjestelmä on samanlainen kuin kaukojäähdytyksenkin kanssa. Tässä ratkaisussa on etuna se, että se ei vaadi kaukojäähdytysverkkoa alueelle, vaan se voidaan toteuttaa pelkästään kaukolämpöverkon avulla. Mahdollista rakennuksen sähköliittymän suurenemaa ei oteta huomioon, jotta järjestelmien vertailu on reilua kaikkien järjestelmien kannalta tarkasteltuna.

CHC-järjestelmässä jäähdytys toteutetaan lämpöpumpulla, jonka tuottama lämpö pumpataan kaukolämpöverkkoon uusiutuvana elinkaariviisaana kaukolämpönä. Teknisesti olisi mahdollista toteuttaa sekä lämmitys että jäähdytys saman kaukolämpöliittymän kautta, mutta se voi aiheuttaa haasteita rakennuksen lämmityksen säädössä. Varsinkin tilanteet, jolloin kaukolämpöverkkoon syötettävä lämpötila poikkeaa merkittävästi kaukolämpöverkon vallitsevasta lämpötilatasosta. Kaukolämmitys tunnetaan yleisesti luotettavana ja vakaana lämmitysmuotona. Kahdella kaukolämpöliittymällä toteuttaminen edustaa juurikin tätä luotettavuus ja vakaus näkökulmaa. Kuvassa 21 on esitetty pelkistetty CHC-järjestelmän kytkentä kaukolämpöverkosta toisiopuolen jäähdytysjärjestelmään. Kuvassa esitetyn järjestelmän tilantarve on suoraan verrattavissa muihin lämpöpumppujärjestelmiin.

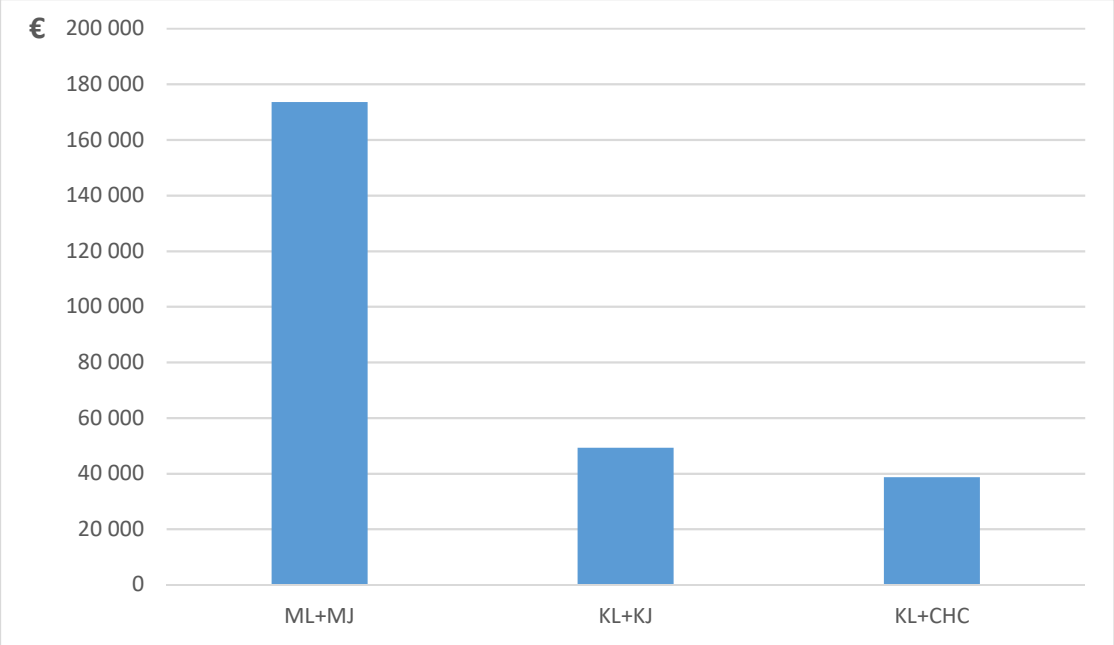


Kuva 21. CHC-järjestelmän kytkennän periaate /29/

Järjestelmään on suositeltavaa asentaa esimerkiksi 3000 l jäähdytysvesivaraaja, jolla pystytään takaamaan mahdollisimman pitkät käyntiajat kompressoreille. Varaaja myös tasoittaa jäähdytysverkkoon menevää lämpötilaa ja näin ollen vähentää toisiopuolen säätölaitteiden kuormitusta. /29./

9.2 Järjestelmien investointikustannukset

Arviot järjestelmien investointikustannuksista on saatu laitetoimittajilta, jotka ovat toteuttaneet useita vastaavia järjestelmiä samantyyppisiin kohteisiin. Investointikustannus sisältää kaikkien järjestelmien osalta laitteet sekä asennuksen käyttökuntoon. Kuvassa 22 on esitetty alkuinvestoinnin suuruus, jossa ei ole huomioitu jäähdytyksen jakojärjestelmän kustannuksia.

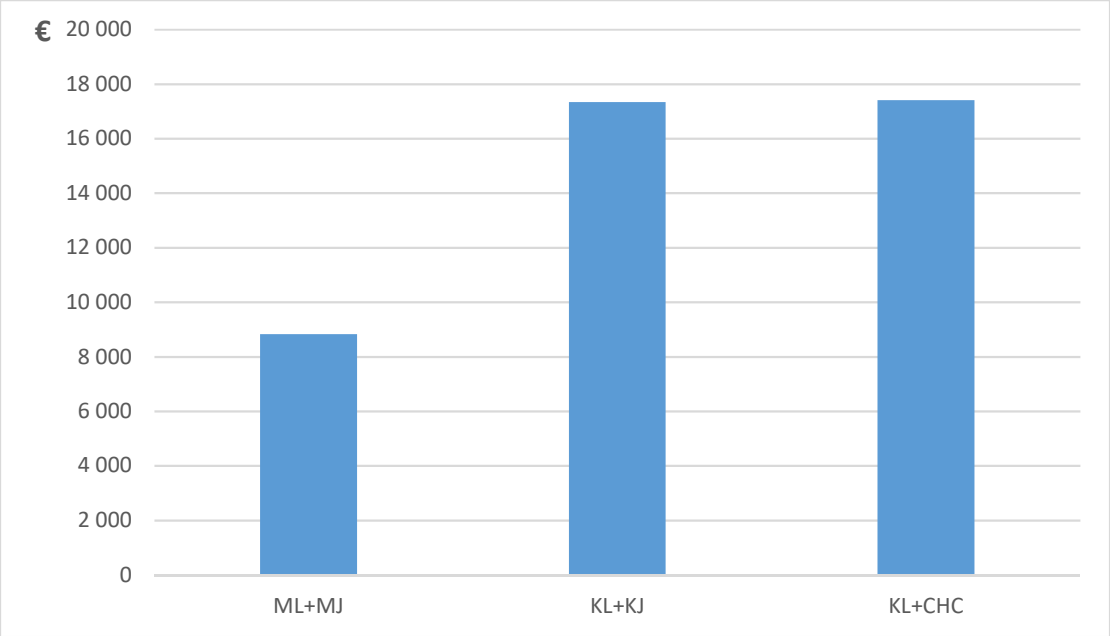


Kuva 22. Kuva järjestelmän alkuinvestoinnin suuruudesta, hinta alv 24 %

Kaukolämmön ja -jäähdytyksen osalta investointi sisältää liittymismaksut Kuopion Energia Oy:n verkkoihin. Alkuinvestoinnin suuruutta tarkasteltaessa voidaan todeta maalämpöjärjestelmän alkuinvestoinnin olevan noin neljä kertaa suurempi verrattaessa muihin valittuihin järjestelmiin. Teknisiin tiloihin tarvittavan pinta-alan kannalta ajateltuna järjestelmät vaativat kutakuinkin samanlaiset tilat, joten teknisten tilojen investointikustannusta ei ole huomioitu.

9.3 Järjestelmien käyttökustannukset

Seuraavassa kuvassa on esitetty eri järjestelmien käyttökustannukset vuositasolla.



Kuva 23. Kuva järjestelmän käyttökuluista € vuodessa, hinta alv 24 %

Järjestelmien käyttökustannusten vertailuun on otettu huomioon 204 MWh lämmitysenergia sekä 20 MWh jäähdytysenergia. Energiamäärät on saatu IDA ICE -simulointituloksista. Jäähdytysenergian määrässä tulee huomioida, että huoneistojen maksimilämpötilaksi oli asetettu +24 °C.

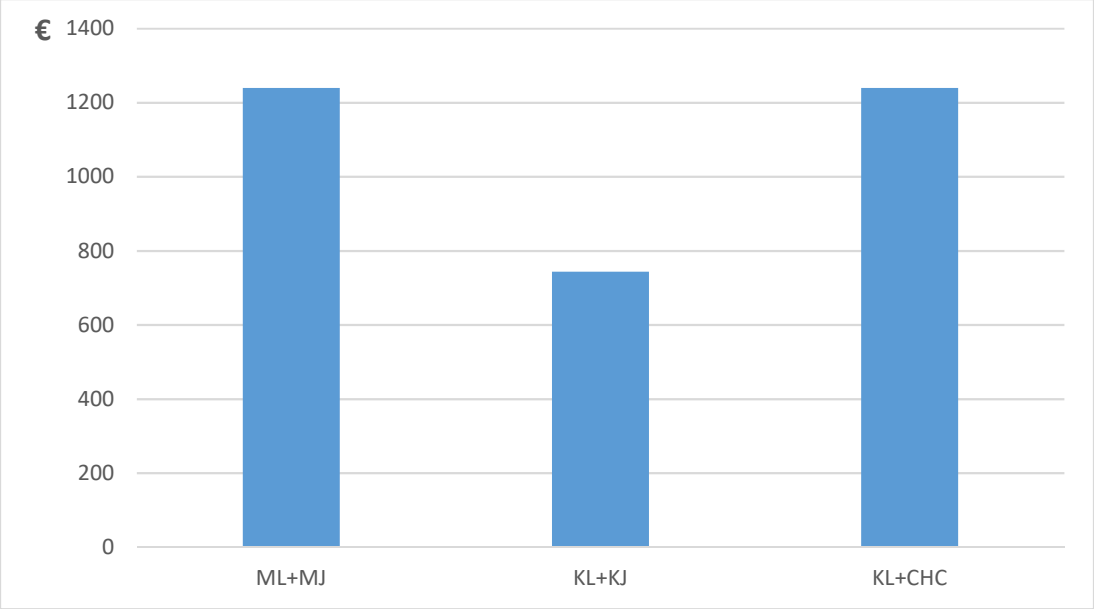
Laitetoimittaja ilmoitti maalämpöjärjestelmän hyötysuhteeksi (COP) 4 eli yhdellä MWh sähköenergiaa voidaan tuottaa 4 MWh lämpöenergiaa. Maaviilennyksen hyötysuhteeksi laitevalmistaja ilmoitti 20. Sähköenergian kokonaishintana, sisältäen kaikki verot, on käytetty 135 €/MWh, joka vastaa keskimäärin toteutunutta kiinteistön sähköenergian kustannusta Kuopion kaupunkialueella. Maalämpöjärjestelmän käyttökustannukset ovat noin puolet verrattuna muihin valittuihin järjestelmiin. Järjestelmien kuluttamaa sähköenergiaa ei ole muuten huomioitu, kuin maaviilennyksen pumppauksen osalta, sillä niissä ei ole merkittävää eroa järjestelmien välillä.

Kaukolämmön energiakustannuksena on käytetty Energiateollisuus ry:n hintatilaston mukaista Kuopion Energia Oy:n hintaa kerrostalolle 75,29 €/MWh /29/. Energiateollisuuden tilastoima hinta sisältää kaukolämmön perusmaksun. Kaukojäähdytyksen energiamaksuna laskennassa on käytetty 39,68 €/MWh ja perusmaksuna 39,68 €/kW/a. Laitetoimittaja ilmoitti CHC-järjestelmän jäähdy-

tyksen hyötysuhteeksi (COP) 1,9 ja lämmityksen 2,9. CHC-järjestelmän energiamaksuna on käytetty 37,2 €/MWh ja perusmaksuna 43,4 €/kW/a. Hinnat on ilmoitettu sisältäen alv 24 %.

9.4 Järjestelmien huoltokustannukset

Kuvassa 24 on esitetty eri järjestelmien huoltokustannukset vuositasolla.



Kuva 24. Kuva järjestelmän huoltokuluista € vuodessa, hinta alv 24 %

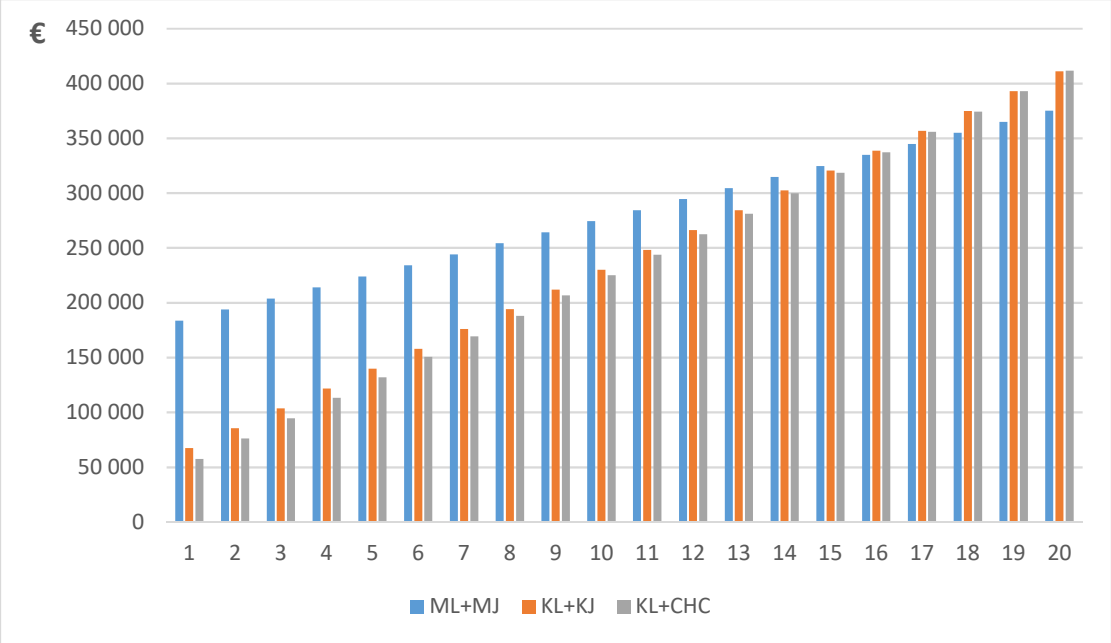
Kaukolämmön ja -jäähdytyksen osalta huoltokustannuksiin on laskettu jokavuotinen tarkistus, jossa tarkastetaan laitteiston toiminta, tarkastuksen hinnaksi on arvioitu 372 € sisältäen alv 24 % järjestelmää kohden. Saman laajuinen tarkastus on myös huomioitu muihinkin järjestelmiin häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi. Tarkastus sisältää seuraavat toimenpiteet: paisunta-astioiden tarkastukset, pumppujen toiminnan tarkastukset, varoventtiilien ja putkistojen tarkastus vuotojen varalta, säätölaitteiden toiminnan tarkastus, säätökäyrien tarkastus sekä eristeiden tarkastus.

Maalämpö- sekä CHC-järjestelmään on lisäksi huomioitu jokaiselle vuodelle lisäkustannus 496 € sisältäen alv 24 % kompressorien uusimisen varalle, sillä 20 vuoden ajanjaksoa tarkasteltaessa on hyvin todennäköistä, että ainakin yksi kompressori joudutaan vaihtamaan uuteen, mahdollisesti jopa kaksi. Todennäköisesti järjestelmiin joudutaan 20 vuoden ajanjaksolla uusimaan jotain

muutakin, mutta kaikissa järjestelmissä on mahdollisia rikkoutuvia laitteita kutakuinkin saman verran, joten niiden vaihtokustannuksia ei ole huomioitu.

9.5 Kustannuskehitys 20 vuoden ajanjaksolla

Seuraavassa kuvassa on esitetty eri järjestelmien kustannuskehitys 20 vuoden ajanjakson aikana.



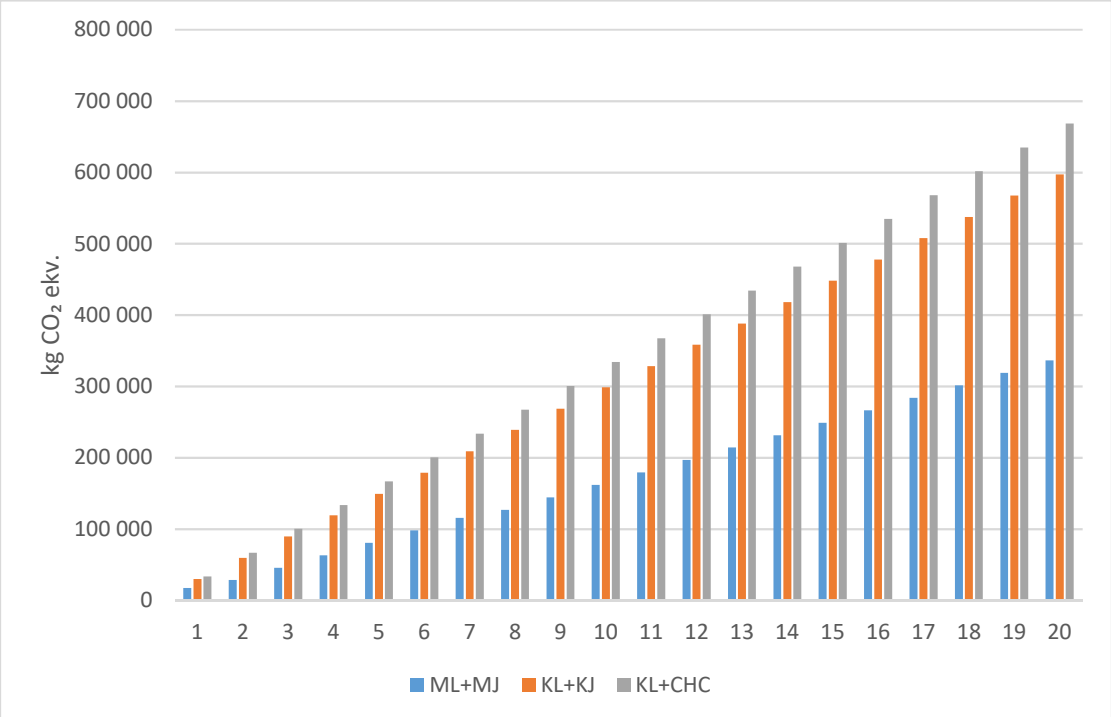
Kuva 25. Kuva eri järjestelmien kuluista 20 vuoden aikana, hinta alv 24%

Järjestelmien kokonaiskustannuksiin on laskettu yhteen investointi sekä käyttö- ja huoltokustannukset. 20 vuoden ajanjaksoa tarkasteltaessa järjestelmät saavuttavat saman kustannustason 16 vuoden kohdalla. Ajanjakson päätteeksi kustannuseroa on 35 000 € maalämpöjärjestelmän eduksi. Kaukolämmitys + kaukojäähdytys on kutakuinkin saman hintainen verrattaessa kaukolämmitykseen + CHC-järjestelmään.

Maalämpöjärjestelmä saavuttaa pitkän ajanjakson tarkastelussa hieman kustannusetua, mutta taasen kaukoenergiajärjestelmien kustannukset sisältävät energiayhtiön tarjoaman varallaolopalvelun, joka lisää huolettomuutta ja toimitusvarmuutta. Vastaavasti maalämpöjärjestelmän toiminta on yksistään asunto-osakeyhtiön hallinnassa tai heidän kustannuksellaan huoltoyhtiöllä.

10 HIILIJALANJÄLJEN VERTAILU 20 VUODEN AJANJAKSOLLA

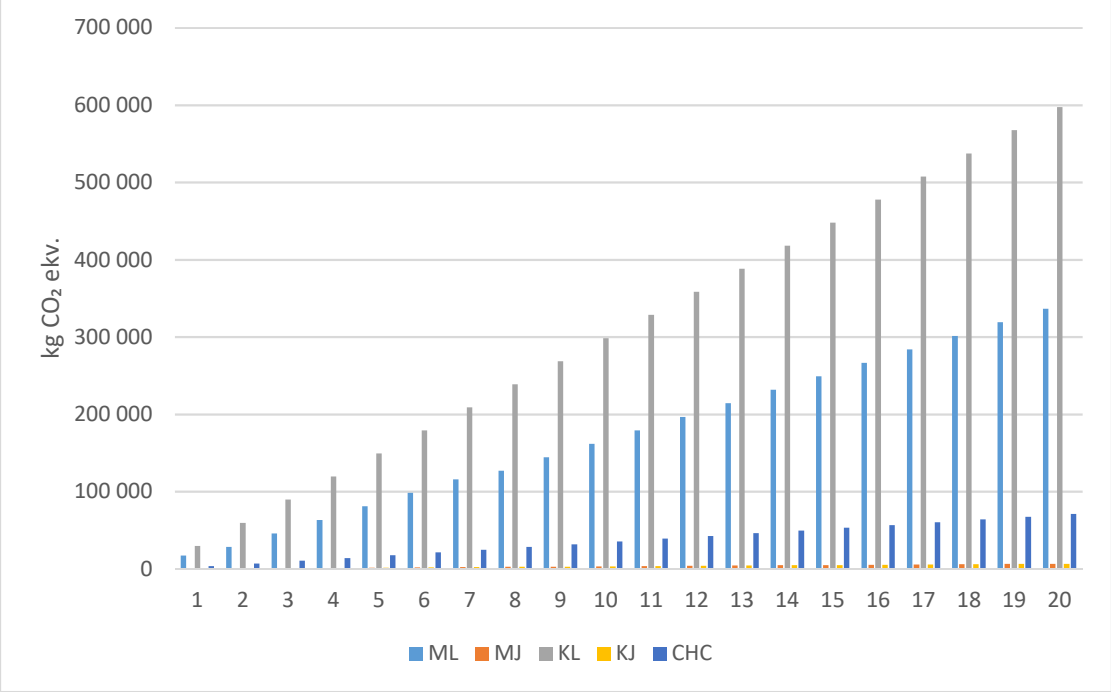
Hiilijalanjäljen laskenta on merkityksellinen osa energiajärjestelmien valintaa sekä alueen kiertotaloutta Kuopion Savilahdessa. Ominaispäästöjä laskettaessa järjestelmävalintaa suurempi merkitys on kuitenkin sähköön ja lämmitykseen valituilla tuotteilla, sillä nykyään on tarjolla yleistuotteiden sijaan esimerkiksi erilaisia puu- ja vesituotteita. Laskennassa käytettiin vuoden 2016 arvoja yleistuotteiden osalta ja CO_2-ominaispäästö on määritetty hyödynjakomenetelmän mukaan. Sähkön CO_2-ominaispäästön arvo on 337,6 kg/MWh ja kaukolämmön 146,4 kg/MWh /31/. Maaviilennykselle ja kaukojäähdytykselle ei laskettu CO_2-ominaispäästöä, sillä niillä olisi ollut kokonaispäästövaikutuksen kannalta lähes olematon vaikutus ja toisaalta kaukojäähdytysliiketoiminta on vasta alkamassa, joten sille ei ole tiedossa päästöarvoa. Tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia edeltävän valinnan ansiosta. Kuvassa 26 on esitetty lämmityksen ja jäähdytyksen yhteenlaskettu ominaispäästö 20 vuoden ajanjaksolla.



Kuva 26. Kuva eri järjestelmien ominaispäästöistä 20 vuoden aikana

Tarkastelujakson aikana maalämpöjärjestelmän CO_2-ominaispäästökertymä on hieman yli puolet verrattuna kaukoenergiaratkaisuihin. Tarkasteluun ei ole otettu huomioon CHC-järjestelmän hyödyksi kaukolämpöverkkoon tuotettavaa lämpöenergiaa, sillä tarkastelu on tehty rakennusta tarkastellen. Kuvassa 27

on esitetty lämmityksen ja jäähdytyksen ominaispäätöt 20 vuoden ajanjaksolla eriytettynä ja maaviilennyksen sekä kaukojäähdytyksen hyötysuhteena on käytetty arvoa 20. Kaukojäähdytys sekä maaviilennys ovat merkittävän ympäristöystävällisiä ratkaisuja ja aiheuttavat murto-osan koko rakennuksen ominaispäästöistä.



Kuva 27. Kuva eri järjestelmien ominaispäästöistä 20 vuoden aikana jäähdytys eriytettynä

Mikäli kiinteistö haluaa todella kiinnittää huomiota tuottamaansa CO_2-ominaispäästöön kuluttamansa energian suhteen, niin sen kannattaa valita uusiutuviin polttoaineisiin pohjautuvat tuotteet. Tällä merkittävällä valinnalla kiinteistön voidaan sanoa oleva lähes neutraali CO_2 päästöjen suhteen.

11 JOHTOPÄÄTÖKSET

Asuinkerrostaloihin ei tarvitse vielä rakentaa jäähdytysjärjestelmää rakentamismääräyksistä johtuen. Muutaman yksittäisen huoneen lämpötilat saa määräysten mukaiseksi pienillä rakenteellisilla ratkaisuilla, mutta ne eivät kuitenkaan riitä takaamaan huoneiston omistajalle ihanteellisia olosuhteita säästä riippumatta varsinkaan pitkään jatkuvien hellejaksojen aikana.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten asuinkerrostalojen jäähdytystarve kehittyy ja miten jäähdytys olisi tehokkainta toteuttaa sekä millainen on jäähdytystarpeen kehittymisen vaikutus hiilijalanjälkeen. Tavoitteena oli myöskin selvittää U-arvojen parantumisen sekä rakenteiden massan ja laadun vaikutusta jäähdytyksen tarpeeseen.

Asuinkerrostalojen jäähdytystarve kasvaa tulevaisuudessa siitä johtuen, että rakennettavien kerrostalojen rakenteet ovat jo hyvin lähellä tilannetta, jossa pienet rakenteelliset ratkaisut eivät enää riitäkään täyttämään rakentamismääräysten kohtaa, jonka mukaan huonelämpötila ei saa ylittää 1.6–31.8. välisenä aikana arvoa 27 °C enemmän kuin 150 astetuntia suunnitteluratkaisun mukaisella ilmavirralla. Asuinkerrostalojen osalta ei kuitenkaan puhuta suurista jäähdytyksen ostoenergiamääristä eikä myöskään jäähdytystehoista. Kaukojäähdytyksen kannalta tarkasteltuna kerrostalo kannattaa liittää kaukojäähdytysverkkoon, mikäli rakennus sijaitsee kaukojäähdytysverkon läheisyydessä. Kaukojäähdytysverkosta kauempana sijaitsevat kohteet taasen kannattaa toteuttaa CHC-järjestelmän avulla, jolloin sama palvelu asiakkaalle saadaan tarjottua pelkän kaukolämpöverkon avulla ja rakentamiskustannuksella.

Asiakkaan kannalta asiaa tarkasteltuna maalämmitys ja -viilennys on varteen otettava vaihtoehto Savilahden alueilla, joissa on hyvä geoenergiapotentiaali. Muilla alueilla kaukojäähdytys tai CHC-järjestelmä on kustannuksiltaan vastaava kuin muutkin tarkastellut järjestelmävaihtoehdot, mutta ne ovat kokonaisvaltaisempia ratkaisuja toimitusrajasta ja varallaolopalvelusta johtuen. Kaukoenergiajärjestelmän häiriöön saa aina hätäapua energiayhtiön päivystäjiltä. Mikäli asiakas huonosta geoenergiapotentiaalista huolimatta haluaa toteuttaa lämmityksen lämpöpumpun avulla, kaukojäähdytysverkon käyttäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä on ehdottomasti erinomainen selvitettävä vaihtoehto, sillä tällöin jäähdytys pystytään toteuttamaan myöskin kaukojäähdytysverkosta.

Hiilijalanjäljen kannalta järjestelmiä vertailtaessa perinteisiä sähkön ja lämmön tuotteita käyttäen maalämpö on hiilineutraalein ratkaisu tarkasteltaessa päästöjä rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergioiden osalta. Pelkästään jäähdytyksen kannalta tarkasteltuna maaviilennys ja kaukojäähdytys ovat yhtä ym-

päristöystävällisiä ratkaisuja. Kuitenkin asiakas voi valinnoillaan myötävaikuttaa CO_2 päästöihin valitsemalla ympäristöystävälliset tuotteet niin sähköön kuin kaukolämpöönkin. Tällöin kaukoenergiaratkaisut ovat hiilineutraalimpia kuin maalämmitys, sillä primäärienergian kulutus per MWh on selkeästi pienempi järjestelmien hyötysuhteista ja polttoaineista johtuen. Lähtökohtaisesti jäähdytys aina kuitenkin lisää rakennuksen hiilijalanjälkeä toteuttamistavasta huolimatta.

Tutkimuksesta selvisi, että U-arvojen parantumisella sekä rakenteiden massalla ja laadulla ei ole merkittävää vaikutusta rakennuksen jäähdytystarpeeseen. Suurempi vaikutus jäähdytystarpeeseen on arkkitehtonisella suunnittelulla ja rakennuksen ulkopuolisilla varjostuksilla.

Tutkimus oli kattava kokonaiskatsaus Savilahden alueen lämmitys- ja jäähdytysratkaisuihin ja se auttaa työn tilaajaa rakennettavan kaukojäähdytysverkon ja myöskin palvelutarjonnan suunnittelussa. Asuinkerrostalojen rakentajien kannalta tutkimus auttaa heitä tekemään ratkaisuja jäähdytysjärjestelmän rakentamisen sekä myös valittavan tekniikan suhteen.

LÄHTEET

1. Airaksinen, M, Vainio, T, Vesanen, T, Ala-Kotila, P. Rakennusten jäähdytysmarkkinat. VTT. 2015. Saatavissa: https://energia.fi/files/399/Rakennusten_jaahdytysmarkkinat_18-12-2015.pdf [viitattu 2.12.2018].

2. Kuopion Energia Oy. 2018. Savilahden alueen energiatehokas kaukojäähdytys. Yrityksen intra. PowerPoint –esitys. [viitattu 2.12.2018]

3. Kuopion Energia Oy. 2018. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/ [viitattu 2.12.2018].

4. Kuopion Energia Oy. 2018. Yrityksen intra. WWW-sivut. [viitattu 2.12.2018]

5. Vierailu CHC-laitoksella Helsingissä. 2018.

6. Breilin, O, Huusko, A, Martinkauppi, A, Putkinen, N, Wik, H. Oulun geoenergiapotentiaalin kartoitus. Geologian tutkimuskeskus. 2013. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.gtk.fi/export/sites/fi/asiantuntijapalvelut/energia/geoenergia/liitteet/Oulun_geoenergiapotentiaalin_kartoitus_GTK2013.pdf [viitattu 8.12.2018].

7. Holopainen, R, Vares, S, Ritola, J, Pulakka, S. Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä. VTT. 2010. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2546.pdf [viitattu 7.12.2018].

8. Laitinen, A, Rämä, M, Airaksinen, M. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. VTT. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf [viitattu 9.12.2018].

9. Viihtyisä työympäristö ilmastointi ja jäähdytys. Motiva. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/11023/Viihtyisa_tyoymparisto_Ilmastointi_ja_jaahdytys_2016.pdf [viitattu 9.12.2018].

10. FInZEB-hankkeen loppuraportti. Ympäristöministeriö. 2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2735615/FInZEB_loppuraportti.pdf/6527928a-809b-4870-9e3e-425fe26c15d1 [viitattu 17.9.2018].

11. EU Submits its Climate Action Plan. UNFCCC. 2015. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://unfccc.int/news/eu-submits-its-climate-action-plan [viitattu 15.9.2018].

12. Ajankohtaiset teemat. Yhdistyneet kansakunnat. 2016. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.yk.fi/node/254 [viitattu 15.9.2018].

13. Vainio, T, Lindroos, T, Pursiheimo, E, Vesanen, T, Sipilä, K, Airaksinen, M, Rehunen, A. Tehokas CHP, kaukolämpö ja -jäähdytys Suomessa 2010-2025. VTT. 2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://energia.fi/files/412/Raportti_Kaukolampo_ja_CHP_VTT_20151218.pdf [viitattu 2.2.2019].

14. Kuopion kaupunki. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: https://www.kuopio.fi/savilahti1 [viitattu 15.9.2018].

15. Savilahti Kuopio. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: http://www.savilahti.com/ [viitattu 15.9.2018].

16. Savilahden vähähiilinen energiamalli. Kuopion kaupunki. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.savilahti.com/sites/www.savilahti.fi/files/PDF/SaVE_hanke/save-tiivistelma_pieni.pdf [viitattu 16.9.2018].

17. SmaRa. Kuopion kaupunki. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: http://www.savilahti.com/smara [viitattu 16.9.2018].

18. Savilahden toimijaprofiilit 2030 & 2050. Demos Helsinki. 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.savilahti.com/sites/www.savilahti.fi/files/PDF/SmaRa/savilahdentoimijaprofiilit20302050-loppuraportti_demoshelsinki_11072017.pdf [viitattu 16.9.2018].

19. Tietoa kaavoituksesta. Kuopion kaupunki. 2017. WWW-sivut. Saatavissa: https://www.kuopio.fi/tietoa-asemakaavoituksesta [viitattu 16.9.2018].

20. Savilahti -ohje. Ramboll. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://publish.kuopio.fi/Kuopio/kokous/2018508455-14-10.PDF [viitattu 16.9.2019].

21. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Finlex. 2017. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010#Pidp446934272 [viitattu 17.9.2018].

22. Asumisterveys asetuksen soveltamisohje. Osa 1. Valvira. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.valvira.fi/documents/14444/261239/Asumisterveysasetuksen+soveltamisohje/ac8d5e16-97be-456c-9c9c-ce8560f2092e [viitattu 24.11.2018].

23. FInZEB-hankkeen taustaraportti 7 Tulevaisuuden sää ja sisälämpötilatarkastelut. Ympäristöministeriö 2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://docplayer.fi/1193043-Taustaraportti-7-tulevaisuuden-saa-ja-sisalampotilatarkastelut.html [viitattu 17.9.2018].

24. Hemmilä, K, Heimonen, I. Ikkunoiden energialuokituksen pilotointi. VTT. 2006. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2356.pdf [viitattu 11.11.2018].

25. Sisäilmastoseminaari. Sisäilmayhdistys ry. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://sisailmayhdistys.fi/SISAILMASTO_seminaarijulkaisu2018.pdf [viitattu 24.11.2018].

26. Östman, L, Haapakangas, A, Häggblom, H, Hongisto, V, Koskinen, V, Oliva, D, Koskela, H, Hyönä, J. Korkean lämpötilan vaikutus työsuoriutumiseen ja viihtyvyyteen toimistoympäristössä – laboratoriotutkimus. Työterveyslaitos. 2012. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/134837/Korkean%20l%C3%A4mp%C3%B6tilan%20vaikutus%20ty%C3%B6suoriutumiseen%20ja%20viihtyvyyteen%20toimistoymp%C3%A4rist%C3%B6ss%C3%A4.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 25.11.2018].

27. Sähköpostikeskustelu maalämpötoimittajan kanssa 12.11.2018. Juha Liukkonen.

28. Gebwell Oy. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: https://www.gebwell.fi/wp-content/uploads/2017/11/G-Power-cooling-substation.png [viitattu 28.12.2018].

29. Sähköpostikeskustelu CHC-järjestelmätoimittajan kanssa 28.12.2018. Jussi Alpua.

30. Energiateollisuus ry. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon_hintatilasto.html [viitattu 29.12.2018].

31. Javanainen, M. Kuopion Energian lämmön- ja sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt. 2017. Oulun yliopisto. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/wp-content/uploads/2018/05/diplomityo_marijavanainen.pdf [viitattu 22.1.2019].

Liite 1

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kuopion Energia Oy. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/lammonalkupera/ [viitattu 2.12.2018]

Kuva 2. Kuopion Energia Oy. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/kaukolampo/kaukojaahdytyksentoiminta/ [viitattu 2.12.2018]

Kuva 3. Kuopion Energia Oy. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/kaukolampo/kaukojaahdytys/ [viitattu 2.12.2018]

Kuva 4. Kuopion Energia Oy. 2018. Yrityksen intra. WWW-sivut. [viitattu 7.12.2018]

Kuva 5. Vierailu CHC-laitoksella Helsingissä. 2018. [viitattu 8.12.2018]

Kuva 6. Vierailu CHC-laitoksella Helsingissä. 2018. [viitattu 8.12.2018]

Kuva 7. Breilin, O, Huusko, A, Martinkauppi, A, Putkinen, N, Wik, H. Oulun geoenergiapotentiaalin kartoitus. Geologian tutkimuskeskus. 2013. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.gtk.fi/export/sites/fi/asiantuntijapalvelut/energia/geoenergia/liitteet/Oulun_geoenergiapotentiaalin_kartoitus_GTK2013.pdf [viitattu 9.12.2018]

Kuva 8. Holopainen, R, Vares, S, Ritola, J, Pulakka, S. Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä. VTT. 2010. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2546.pdf [viitattu 8.12.2018]

Kuva 9. Viihtyisä työympäristö ilmastointi ja jäähdytys. Motiva. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/11023/Viihtyisa_tyoymparisto_Ilmastointi_ja_jaahdytys_2016.pdf [viitattu 9.12.2018]

Kuva 10. Savilahti Kuopio. 2018. WWW-sivut. Saatavissa: http://www.savilahti.com/kuopion-kasvun-karkihanke [viitattu 15.9.2018].

Kuva 11. Savilahden vähähiilinen energiamalli. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.savilahti.com/sites/www.savilahti.fi/files/PDF/SaVE_hanke/save-tiivistelma_pieni.pdf [viitattu 16.9.2018].

Kuva 12. Savilahden vähähiilinen energiamalli. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.savilahti.com/sites/www.savilahti.fi/files/PDF/SaVE_hanke/save-tiivistelma_pieni.pdf [viitattu 16.9.2018].

Kuva 13. Savilahti -ohje. Ramboll. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://publish.kuopio.fi/Kuopio/kokous/2018508455-14-10.PDF [viitattu 17.9.2018].

Kuva 14. FInZEB –hankkeen taustaraportti 7 Tulevaisuuden sää ja sisälämpötilatarkastelut. Ympäristöministeriö 2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://docplayer.fi/1193043-Taustaraportti-7-tulevaisuuden-saa-ja-sisalampotilatarkastelut.html [viitattu 17.9.2018]

Kuva 15. Opinnäytetyön IDA ICE simulointi. 2018.

Kuva 16. Keskustelu maalämpötoimittajan kanssa 12.11.2018. [viitattu 28.12.2018]

Kuva 17. Gebwell Oy:n valmistama kaukojäähdytyskeskus. Saatavissa: https://www.gebwell.fi/wp-content/uploads/2017/11/G-Power-cooling-substation.png [viitattu 28.12.2018]

Kuva 18. Kuva eri IDA ICE simulointivaiheiden lämpötiloista ja tuntien määrästä yli 27 °C.

Kuva 19. Kuva eri IDA ICE simulointivaiheiden lämmitystehoista ja lämmityksen ostoenergiasta.

Kuva 20. Kuva eri IDA ICE simulointivaiheiden lämpötiloista ja tuntien määrästä yli 27 °C.

Kuva 21. Kiinteistöjäähdytyksen suunnitteluohje. Helen Oy. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.helen.fi/globalassets/jaahdytys/ammattilaiset/kaukojaahdytys-2017/kiinteisto-jaahdytyksen_suunnitteluohje_2017.pdf [viitattu 28.12.2018]

Kuva 22. Kuva rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän investoinnista. [viitattu 28.12.2018]

Kuva 23. Kuva rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän käyttökustannuksista vuodessa. [viitattu 28.12.2018]

Kuva 24. Kuva rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän huoltokustannuksista vuodessa. [viitattu 28.12.2018]

Kuva 25. Kuva eri järjestelmävaihtoehtojen kulukehityksestä 20 vuoden ajanjaksolla. [viitattu 28.12.2018]

Kuva 26. Kuva vertailtavien järjestelmien ominaispäästöistä 20 vuoden ajanjaksolla. [viitattu 28.12.2018]

Kuva 27. Kuva vertailtavien järjestelmien ominaispäästöistä 20 vuoden ajanjaksolla jäähdytys eriytettynä [viitattu 2.2.2019]

Liite 2

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. IDA ICE simuloinnin lämmityksen ostoenergioiden tulokset.

Taulukko 2. IDA ICE simuloinnin jäähdytyksen ostoenergioiden tulokset.