

Henri Rosenström

Hybridi CO₂ -lämpöpumppujärjestelmän vertailu toimitilakiinteistössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

29.11.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Henri Rosenström Hybridi CO ₂ -lämpöpumppujärjestelmän vertailu toimitilakiinteistössä 31 sivua + 1 liite 29.11.2016
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI, tuotantopainotteinen
Ohjaajat	osastopäällikkö Mika Kovanen kylmäsuunnittelija Onni Ojala yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena selvittää, onko hiilidioksidia kylmäaineena käyttävää lämpöpumppua kannattavaa käyttää toimitilan lämmitys- ja jäähdytystuotantojärjestelmänä. Vertailtavana energiantuotantojärjestelmänä käytettiin kaukoenergiaa, joka sisältää kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen. Kaupan kylmä on alettu viimeaikoina tuottamaan enenevästi hiilidioksidikylmäkoneella ja energiatehokkuuden parantamiseksi kaupan kylmä on yleensä varustettu lämmön talteenotolla. Toimitilan tilalämmityksessä ja -jäähdytyksessä hiilidioksidilämpöpumppu ei ole yleistynyt.</p> <p>Hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta arvioitiin kahdella menetelmällä. Ensimmäiseksi laskettiin standardin SFS-EN 14825 mukaisesti hiilidioksidilämpöpumpun kylmä- ja lämpökertoimet osatehoilla. Toisena menetelmänä kannattavuutta vertailtiin kaukoenergiaan elinkaarilaskujen avulla. Elinkaarilaskuissa menetelmänä käytettiin takaisinmaksuaikamenetelmää, investoinnin nykyaikamenetelmää ja maksimi-investoinnin menetelmää. Vertailussa hiilidioksidilämpöpumpun toimintalämpötilojen valitsemisen apuna käytettiin Ilmatieteen laitoksen laatiman energialaskennan testivuodet nykyilmastossa -tuntiaineistoa, sekä tanskalaisen IPU A/S -yhtiön laatimaa transkriittisen hiilidioksidijärjestelmän mitoitusohjelmaa. Tuloksena saatiin referenssihiilidioksidilämpöpumpun SCOP-luvuksi 4,46 ja SEER-luvuksi 2,83. SCOP- ja SEER-luvuilla on mahdollista verrata luotettavasti samassa ilmastossa toimivia kylmäkoneita ja lämpöpumppuja. Elinkaarilaskennan tuloksista havaittiin, että hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuus riippuu merkittävästi kaukoenergian investointikustannuksista, joihin kaukoenergian tuottaja voi vaikuttaa.</p> <p>Hiilidioksidilämpöpumppua ei ole juurikaan käytetty pääasiallisena lämmöntuotantotapana tilalämmityksessä. Tämän insinööriyön tuloksista on kuitenkin havaittavissa, että hiilidioksidilämpöpumppu on mahdollisesti kannattava myös rakennuksen pääasiallisena lämmöntuotantotapana. Hiilidioksidilämpöpumpun käyttämisessä rakennuksen pääasiallisena lämmöntuotantotapana tarvitaan kuitenkin lisää tutkimus- ja kehittämistyötä, jotta hiilidioksidilämpöpumppu voidaan optimoida toimimaan parhaalla mahdollisella hyötysuhteella mahdollisimman pitkän ajan.</p>	
Avainsanat	lämpöpumppu, hiilidioksidi, lämmitys, jäähdytys

Author Title Number of Pages Date	Henri Rosenström Hybrid CO ₂ heat pump system versus district energy in a business premise 31 pages + 1 appendice 29 November 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Production Orientation
Instructors	Mika Kovanen, Head of department Onni Ojala, Refrigeration designer Aki Valkeapää, Principal lecturer
<p>The purpose of this bachelor's thesis was to compare the cost-effectiveness of a carbon dioxide heat pump system with that of the widely used district energy.</p> <p>First, calculations of the seasonal coefficient of performance and seasonal energy efficiency ratio under the terms of standard SFS-EN 14825 were made. Secondly, life-cycle-cost calculation were done with three separate methods. The methods were repayment period method, current value method and maximum investment method.</p> <p>According to the standard SFS-EN 14825 calculations, the seasonal coefficient of performance was 4.46 and the seasonal energy efficiency ratio was 2.83. The life-cycle-cost calculations showed that the investment price of district cooling is critical to the results. If the price is very low, the payback time of the carbon dioxide heat pump is longer than its life time. On the other hand, when the district energy investment is greater, the payback time of the carbon dioxide heat pump is relatively short.</p> <p>In conclusion, it can be said that further research and development is needed in order to provide space heating and space cooling with a carbon dioxide heat pump. However, this thesis showed that a carbon dioxide heat pump is a potential primary heating and cooling source on a business premise.</p>	
Keywords	carbon dioxide, heat pump, heating, cooling

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Insinööriyön tilaajan esittely	1
1.2	Tarve insinööriyölle	2
2	Hiilidioksidi kylmäaineena	3
3	Transkriittinen hiilidioksidilämpöpumppu	4
4	Laskennan lähtötiedot	5
4.1	Kohderakennus	5
4.2	Lämpöpumpun toimintalämpötilat	6
4.3	Kaasujäähdyttimen mitoituslämpötilat	7
4.4	Höyrystyslämpötila ja lämmönlähde	7
4.4.1	Suorahöyrystys ulkoilmaan (ilmalämpöpumppu)	8
4.4.2	Höyrystys energiakaivoissa	9
4.4.3	Höyrystyslämpötila ja jäähdytysjärjestelmä	9
4.5	Helsingin ilmasto ja vaikutus lämpöenergiankulutukseen	10
4.6	Referenssi-CO ₂ -lämpöpumpun järjestelmäkuvaus	11
5	SCOP ja SEER	12
5.1	SCOP	13
5.2	SEER	16
6	CO ₂ -lämpöpumpun vertailu kaukoenergiaan	18
6.1	Hiilidioksidilämpöpumpun elinkaarikustannukset	18
6.2	Kaukoenergian elinkaarikustannukset	19
6.3	Investointikustannukset	19
6.4	Muuttuvat kustannukset	20
6.5	Takaisinmaksuaika	22
6.6	Nykyarvo	24
6.7	Maksimi-investointi	27
6.8	Elinkaarilaskennan tulokset	28
7	Yhteenveto	28

Lyhenteet

COP	Coefficiency of performance. Lämpöpumpun lämpökerroin.
GWP	Global warming potential. Kylmäaineen ilmastolle aiheuttama lämmitys-vaikutus verrattuna hiilidioksidiin.
EER	Energy efficiency ratio. Kylmäkoneen kylmäkerroin.
SCOP	Seasonal coefficient of performance. Lämmityskauden hyötysuhde.
SEER	Seasonal energy efficiency ratio. Jäähdytyskauden hyötysuhde.

1 Johdanto

1.1 Insinööriyön tilaajan esittely

Tämän insinööriyön tilasi Ramboll Finland Oy, joka kuuluu kansainväliseen Ramboll Groupiin. Ramboll Group on vuonna 1945 perustettu suunnittelu- ja konsultointiyritys, jonka toimialana ovat

- kiinteistöt ja rakentaminen
- infra ja liikenne
- vesi
- ympäristö ja terveys
- öljy ja kaasu
- johdon konsultointi.

Yrityksen toiminnan perusteena ovat vahvasti Ramboll Groupin kestävän kehityksen arvot ja yritys onkin liittynyt YK:n Global Compact -ohjelmaan vuonna 2007. Ramboll Group on 97,5-prosenttisesti säätiömisteinen, mikä mahdollistaa kestävän liiketoiminnan kehittämisen. Vuoden 2015 175 miljoonan euron liikevaihdollaan Ramboll Finland Oy on Suomen suurin rakennetun ympäristön suunnittelu- ja konsultointiyritys. (1) Ramboll Finland Oy jakaantuu Suomessa neljään eri toimialaan, jotka ovat

- kiinteistöt & rakentaminen
- infra & liikenne
- vesi
- johdon konsultointi.

LVI-suunnitteluosasto, jolle tein tämän insinööriyön, kuuluu kiinteistöt ja rakentaminen-toimialaan.

1.2 Tarve insinööriyölle

Hiilidioksidin käyttö on alkanut yleistyä pienissä jäähdytetyissä myyntiautomaateissa, autojen ilmastointilaitteissa ja kaupan kylmässä. Suuria, megawattiluokan hiilidioksidilämpöpumppuja valmistetaan jo esimerkiksi Tanskassa. (2) Rakennusten lämmöntuotantotapana hiilidioksidia käyttävät lämpöpumput eivät ole vielä yleistyneet, eikä hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta rakennusten lämmitys- ja jäähdytystuotantomuotona ole vielä juurikaan tutkittu. Kuvassa 1 on esitetty tanskalaisen Advansor a/s:n hiilidioksidilämpöpumppu.

Suomessa energiantuotantoyhtiö Helen Oy on Helsingin kaupunginvaltuuston päätöksellä tekemässä suuria muutoksia sähkön- ja lämmöntuotantoon. Helen Oy:n tarkoitus on tuottaa energiaa hiilidioksidineutraalisti vuoteen 2050 mennessä. Päästövähennykset on tarkoitus toteuttaa muun muassa rakentamalla kaksi uutta biolämpölaitosta sekä selvittämällä lämpöpumppujen laajamittaista hyödyntämistä. (3)

Tässä insinööriyössä on tarkoitus selvittää hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta toimitilan tilalämmityksessä ja -jäähdytyksessä. Tarkastelua varten laskettiin ensin standardin SFS-EN 14825 mukaisesti hiilidioksidilämpöpumpun SCOP- ja SEER-luvut. Toiseksi hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta verrattiin kaukoenergiaan. Kaukoenergialla tarkoitetaan tässä insinööriyössä kaukolämpöä ja -jäähdytystä. Hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta arvioitiin takaisinmaksumenetelmällä, nykyarvomenetelmällä ja maksimi-investointimenetelmällä. Vertailu tehtiin kolmella eri skenaariolla.



Kuva 1. Hiilidioksidilämpöpumppu (1)

2 Hiilidioksidi kylmäaineena

Euroopan unioni julkaisi toukokuussa 2014 uuden F-kaasuasetuksen, jonka tarkoitus on vähentää ilmastolle haitallisten kylmäaineiden käyttöä kylmäkoneissa ja lämpöpumpuissa. F-kaasuasetuksessa kylmäaineiden ilmaston lämmitysvaikutusta verrataan hiilidioksidin lämmitysvaikutukseen, eli GWP:hen joka on hiilidioksidilla 1. Perinteisten kylmäaineiden GWP-luvut ovat 4–4 000. (4) Ennen F-kaasuasetusta Montrealin pöytäkirja otsonikerrosta heikentävistä aineista poisti käytännössä kokonaan markkinoilta otsonia hajottavat CFC-kylmäaineet. (5)

F-kaasuasetus on johdattanut kylmäainevalmistajat kehittämään uusia, ilmastolle mahdollisimman haitattomia kylmäaineita. Uusien kylmäaineiden kehityksen rinnalla ovat tulleet myös niin sanotut luonnolliset kylmäaineet, joita ovat esimerkiksi hiilivedyt ja hiilidioksidi. Niiden kylmäaineiden lisäksi luonnolliseksi kylmäaineeksi luokiteltava ammoniakki on ollut laajassa käytössä jo pidempään teollisessa kylmässä. Hiilivedyt ovat käytössä pienissä kylmäkoneissa, esimerkiksi jääkaapeissa. Hiilidioksidia käytettiin 1900-luvun taitteessa varsinkin merirahdin jäähdytyksessä, mutta CFC-kylmäaineiden yleistymisen syrjäytti hiilidioksidin melko nopeasti. Hiilidioksidin hyvät fysikaaliset omi-

naisuudet, vaarattomuus ympäristölle ja ilmastolle ovat nostaneet hiilidioksidin uudestaan mahdolliseksi kylmäaineeksi sekä jäähdytysjärjestelmissä että lämpöpumpuissa. (6)

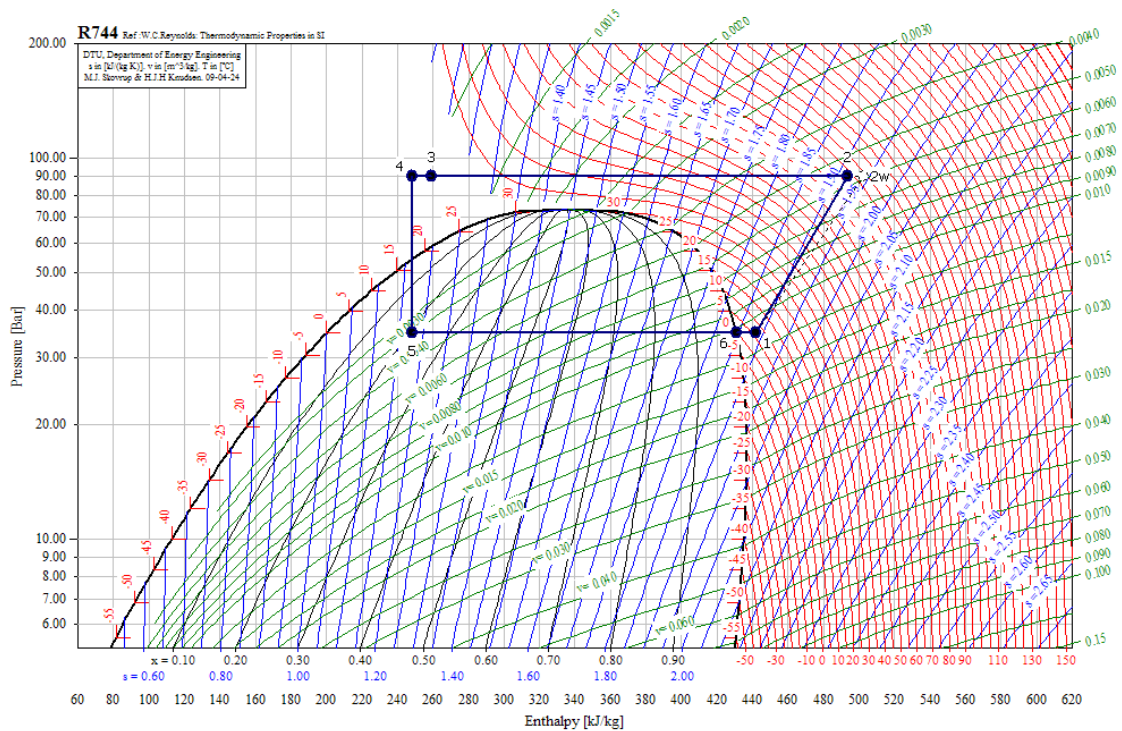
Hiilidioksidilla on varsin hyvät fysikaaliset ominaisuudet. Alhainen viskositeetti vähentää pumppauskustannuksia, korkea lämmönjohtavuus ja kaasun tiheys mahdollistavat pienemmät putkikoot ja lämmönsiirtimet. Toisaalta ongelmaksi muodostuu kriittisen pisteen alhainen lämpötila ja korkea paine (31 °C; 73,6 bar). Korkea paine luo suuria vaatimuksia hiilidioksidilämpöpumpun laitteiden paineenkestävyydelle, kun koneikkoa operoidaan transkriittisena. Kompressorin jälkeen paineputkessa saattaa vallita 120 bar:n paine. Tästä syystä hiilidioksidilämpöpumpun putkimateriaali on suositeltavaa olla hitsattavaa terästä. (6)

Hiilidioksidilämpöpumpun edut tulevat esille lämmöntuotannossa ja varsinkin lämmön ja jäähdytyksen yhteistuotannossa. Transkriittisessä hiilidioksidilämpöpumpussa lämpötila kompressorin jälkeen voi olla jopa yli 100 °C. (7) Korkea lämpötila pienentää muun muassa lämmönsiirtimien kokoa ja kiertopumppujen tehoa verrattuna esimerkiksi HFC-lämpöpumppuihin, joissa lämpötilat jäävät yleisesti huomattavasti matalammiksi. HFC-lämpöpumppujen matalasta lauhtumislämpötilasta johtuen lämmönjakojärjestelmänä on käytetty yleensä lattialämmitystä. Hiilidioksidilämpöpumppu voi sen sijaan kattaa myös ilmanvaihdon ja patteriverkoston tarvitseman korkeamman lämpötilan.

3 Transkriittinen hiilidioksidilämpöpumppu

Yksinkertaistetussa transkriittisessä hiilidioksidilämpöpumpun kiertoprosessissa kompressori puristaa höyrystynyttä hiilidioksidia nostaen hiilidioksidin painetta ja lämpötilaa. Hiilidioksidin lämpötilan noustessa yli 31 °C:n ja paineen ylittäessä 73 bar hiilidioksidi muuttuu ylikriittiseksi fluidiksi. Kompressorin jälkeen ylikriittinen fluidi ohjataan kaasujäähdyttimelle, jossa lämmönluovutus tapahtuu. Kaasujäähdyttimessä ylikriittistä hiilidioksidia jäähdytetään ilman, että hiilidioksidi kondensoituu nesteeksi. Jäähdytetty kaasu kulkee seuraavaksi paisuntalaitteelle, jossa ylikriittinen hiilidioksidi muuttuu alikriittiseksi kaasun ja nesteen seokseksi. Paisuntalaitteen jälkeen alikriittinen hiilidioksidi ohjataan höyrystimenä toimivalle lämmönsiirtimelle, jossa hiilidioksidi sitoo lämpöä höyrystimen toisella puolella kulkevasta nesteestä tai ilmasta. Höyrystynyt hiilidioksidi siirtyy tämän

jälkeen takaisin kompressorille. (6) Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu transkriittinen kiertoprosessi log p,h -piirroksessa.



Kuva 2. Yksinkertaistettu transkriittinen kiertoprosessi log p,h -piirroksessa

Suurin osa transkriittisen hiilidioksidilämpöpumpun tärkeimmistä komponenteista sijaitsee sisäyksikössä. Tärkeimpiä komponentteja sisäyksikköön kuuluu muun muassa kompressorit, nestevaraaja ja säätöjärjestelmä. Lämpöpumppuun sisältyy useita lämmönsiirtimiä, joista lämmitystä ja jäähdytystä otetaan tilalämmitykseen ja -jäähdytykseen talteen. Ulkona sijaitsevat kaasujäähdytin ja höyrystin.

4 Laskennan lähtötiedot

4.1 Kohderakennus

Vertailussa käytetty toimitila on Helsingissä sijaitseva toimistorakennus, pinta-alaltaan 12 300 m². Kohteesta oli tehty energiasimulointi, jossa on esitetty tuntitasolla tilojen energiantarve lämmitykselle ja jäähdytykselle. Energiasimulaation mukaiset lämmitys- ja jäähdytysenergiantarpeet on esitetty taulukossa 2. Taulukossa 1 on eritelty raken-

nuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien toimintalämpötilat. Jotta hiilidioksidilämpöpumpun käyttöalue olisi mahdollisimman kattava, on hiilidioksidilämpöpumpun tuotettava järjestelmille sopivan lämpöistä vettä.

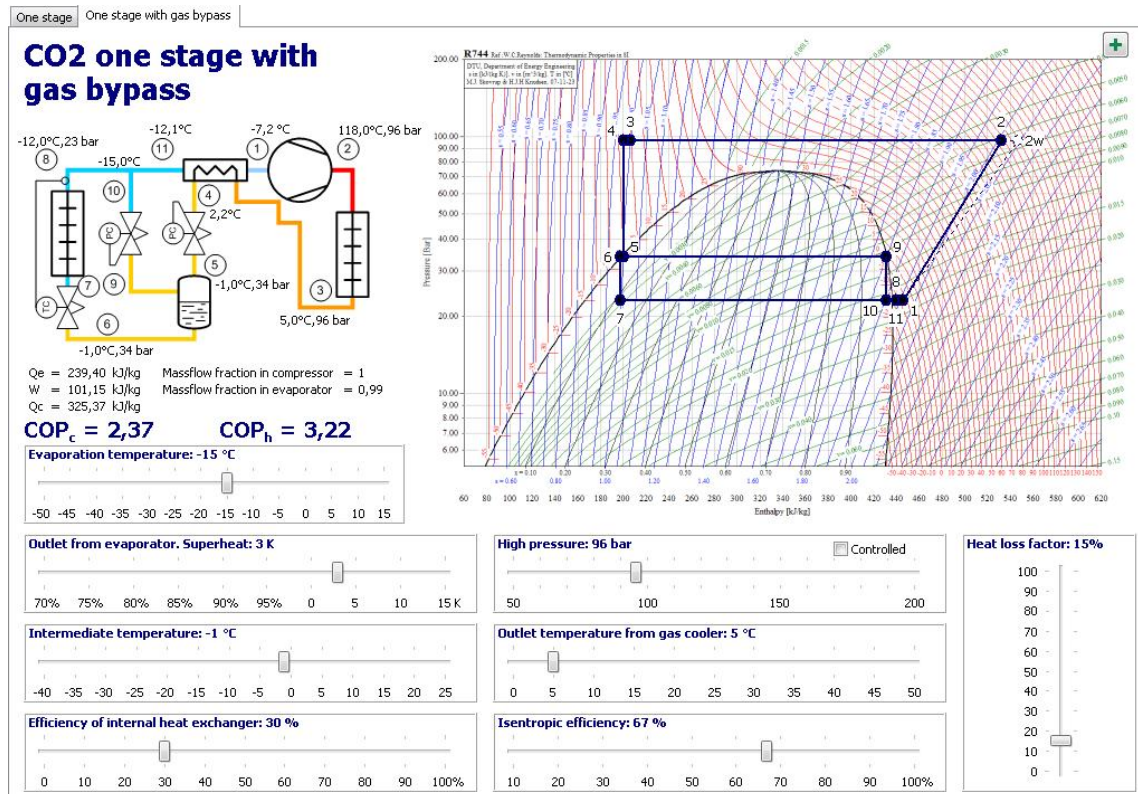
Taulukko 1. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoituslämpötilat

Laiteryhmä	Mitoituslämpötila °C - °C
Käyttövesipiirin lämmityslaitteet	58 - 55
Lämmityspatterit	60 - 30
Lattialämmitys	35 - 30
Kierrätysilmapatterit	60 - 30
Ilmanvaihtopatterit	50 - 30
Sulanapito	40 - 25
Säteilypaneelit	40 - 37
Ilmanvaihtopatterit	10 - 18
Paneelit ja konvektorit	15 - 18

4.2 Lämpöpumpun toimintalämpötilat

Lämpöpumpun kylmä- ja lämpökertoimeen vaikuttaa vahvasti kylmäaineen höyrystymis- ja lauhtumislämpötila. Transkriittisessa hiilidioksidilämpöpumpussa kylmäaine ei kondensoidu lauhtumislämpötilassa, vaan ylikriittinen hiilidioksidi jäähdytetään kaasujäähdyttimessä. Kylmä- ja lämpökertoimen laskentatapa poikkeaa tämän takia hieman kondensoivista lämpöpumpuista. Transkriittisessä järjestelmässä kylmä- ja lämpökertoimen kondensoitumislämpötila korvataan kaasujäähdyttimeen menevän ja kaasujäähdyttimestä palaavan kaasun keskiarvolämpötilalla. (8)

Tässä insinööriyössä lasketut hiilidioksidilämpöpumpun toiminta-arvot laskin tanskalaisen voittoa tavoittelemattoman IPU-yhtiön yksinkertainen yksiasteinen CO₂-kierto -ohjelmalla. Kuvassa 3 on havainnollistava kuva käytetystä ohjelmistosta.



Kuva 3. Insinööriyössä käytetty IPU:n mitoitushjelma

4.3 Kaasujäähdyttimen mitoitustilapötilat

Lämmöntuotannossa kaasujäähdyttimen lämpötilat on järkevä mitoitaa mahdollisimman suurelle lämpötilaliukumalle. Puristuslämpötila voidaan asettaa 115 °C:seen ja kaasujäähdyttimeltä palaavan hiilidioksidin lämpötila voidaan laskea 5 °C:seen. 110 °C:n lämpötilaliukuma mahdollistaa hyvän lämpökertoimen ja pienentää lämmönsiirtimien kokoa lämmityslaitteistossa.

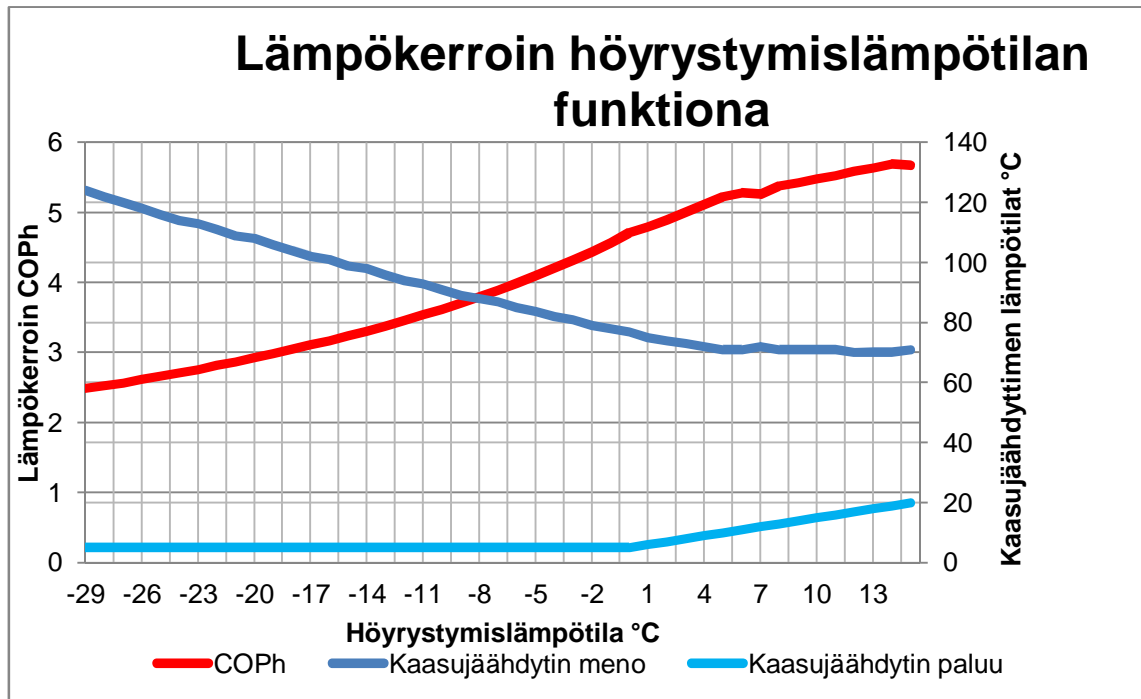
4.4 Höyrystymislämpötila ja lämmönlähde

Hiilidioksidin höyrystymislämpötila on myös kriittinen lämpökertoimen kannalta. Lämmityskaudella, kun tarvetta jäähdytykselle on rajoitetusti, on mietittävä sopiva keino toteuttaa kylmäaineen höyrystäminen. Höyrystymislämpötilaan voidaan vaikuttaa siten, millä keinolla höyrystäminen toteutetaan.

4.4.1 Suorahöyrystys ulkoilmaan (ilmalämpöpumppu)

Ilmalämpöpumppumallisessa järjestelmässä investointikustannukset ovat suhteellisen pienet verrattuna maalämpöpumppumalliseen järjestelmään. Ongelmaksi muodostuu ulkoilman lämpötila. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan mitoittava ulkolämpötila Etelä-Suomessa on -26 °C . (9) Alhainen mitoitusulkolämpötila pienentää lämpöpumpun lämpökerrointa. On kuitenkin huomioitava, että vaikka mitoitusulkolämpötila on -26 °C , niin näin alhaiset lämpötilat ovat lämmityskaudella tuntitasolla Helsingin alueella melko vähäisiä. Ulkoilman ollessa erittäin kylmää, olisi järkevää mitoittaa höyrystymislämpötila mahdollisimman kustannustehokkaalle ulkoilman lämpötilalle ja kattaa huipputeho jollakin muulla lämmöntuotantotavalla, esimerkiksi sähköllä tai kaukolämmöllä.

Kuvassa 4 on esitetty yksiasteisen hiilidioksidilämpöpumpun lämpökerroin ulkolämpötilan funktiona. Laskentaperusteina kuvassa 4 on käytetty parasta mahdollista lämpökerrointa optimoimalla kompressorin jälkeistä painetta mahdollisimman pieneksi ja lämpötilaa mahdollisimman suureksi kuitenkin niin, että kompressorin jälkeinen lämpötila ei ole alle 70 °C , jotta lämpimän käyttöveden lämmittäminen olisi vielä mahdollista. Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on 67 %. Höyrystymislämpötila on laskettu lämpötilasta -29 °C asti, koska ulkolämpötilan ollessa -26 °C höyrystymislämpötilan on oltava alhaisempi lämmön siirtymisen aikaansaamiseksi. (10) Kuvasta 4 on havaittavissa, että lämpökerroin on suurin piirtein suoraan verrannollinen höyrystymislämpötilaan. Kuvassa 4 on myös esitetty höyrystymislämpötilaa vastaava kaasujäähdyttimen lämpötila ja kaasujäähdyttimestä palaavan hiilidioksidin lämpötila.



Kuva 4. Yksiasteisen CO₂-lämpöpumpun lämpökerroin ja kaasujäähdyttimen lämpötilat höyrystyslämpötilan funktiona.

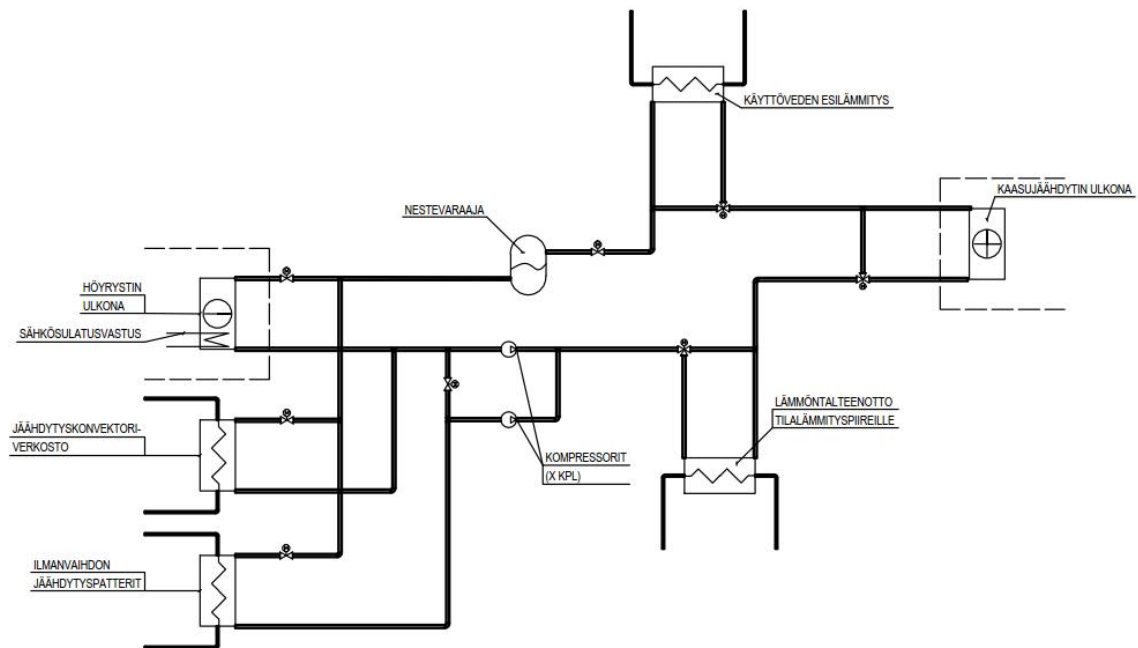
4.4.2 Höyrystys energiakaivoissa

Energiakaivoissa toteutettu höyrystys poistaisi ongelman alhaisesta höyrystyslämpötilasta, sillä kallioperän lämpötila on Etelä-Suomen alueella n. 6 °C. Maalämpötyypissä ratkaisussa ongelma on energiakaivojen poraaminen rakennetussa ympäristössä. Ongelma moninkertaistuu suurta tehoa vaativissa rakennuksissa, kuten tässä insinööriyössä käytettävässä rakennuksessa, jossa lämmityksen mitoitusteho on megawattiluokkaa. Käytännössä satojen energiakaivojen poraaminen rakennetussa ympäristössä on mahdotonta.

4.4.3 Höyrystyslämpötila ja jäähdytysjärjestelmä

Esimerkkikohteen hiilidioksidilämpöpumpun pitää toimia transkriittisena myös kesällä, koska kiinteistön lämpimän käyttöveden lämmitys tuotetaan myös hiilidioksidilämpöpumpulla. Lämmin käyttövesi pitää lämmittää Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan 58 °C:seen, jolloin ei ole mahdollista missään tilanteessa operoida hiilidioksidilämpöpumppua alikriittisenä. (9)

Kesällä jäähdytetään vettä, jota käytetään ilmanvaihdon jäähdytyspattereissa, katosäteilijöissä ja konvektoreissa. Taulukossa 1 esitettyjen mitoituslämpötilojen mukaan hiilidioksidilämpöpumpun höyrystyslämpötilan mitoitusaste asetetaan 0 °C:seen, jolloin jäähdytysverkoston ja höyrystyslämpötilan lämpötilaero on kylmän käyttöveden lämpötilasta riippuen 3–7°C. Kuvassa 5 on esitetty referenssi hiilidioksidilämpöpumpun periaatekaavio.



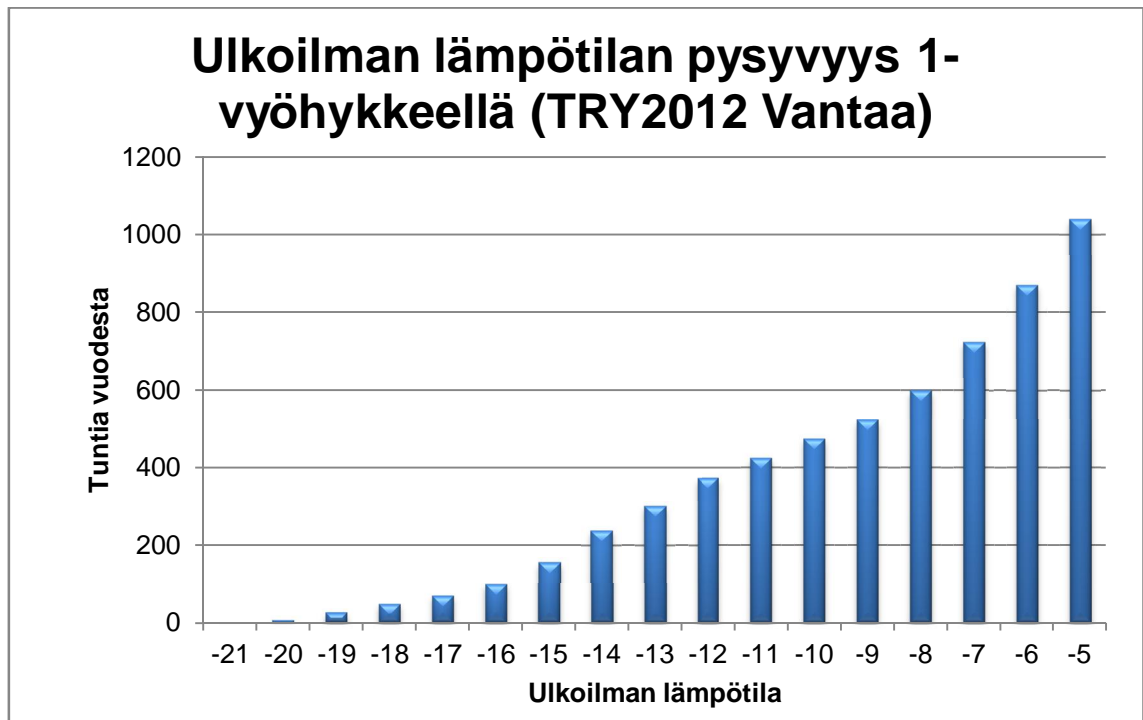
Kuva 5. Referenssihiilidioksidilämpöpumpun periaatekaavio

4.5 Helsingin ilmasto ja vaikutus lämpöenergiankulutukseen

Lämpöpumpun järkevää mitoituspistettä valittaessa on huomioitava rakennuksen sijainnin mukainen ilmasto. Koska ilmalämpöpumpuna toimivan hiilidioksidilämpöpumpun mitoituspistettä ei kannata mitoittaa Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaiseen -26 °C :seen lämpötilaan, on järkevää hakea lämpöpumpun optimaalista mitoituspistettä tarkastelemalla energialaskennan testivuotta.

Energialaskennan testivuosi on kehitetty vuonna 2011 ja se on tarkoitettu rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian laskentaa varten. Suomi on jaettu neljään eri lämpötilavyöhykkeeseen, joille on kehitetty alueellinen energialaskennan testivuosi. Lämpötilavyöhykkeille on myös laskettu ulkoilman lämpötilalle *pysyvyysarvot* (TRY2012), jotka

perustuvat energialaskennan testivuoteen. Pysyvyysarvoja tulkitaan siten, että tiettyä lämpötilaa tai sitä kylmempää esiintyy vuodesta tietty tuntimäärä. Esimerkiksi TRY2012:n mukaan ulkoilman lämpötilaa -15 °C , tai kylmempää, esiintyy vuodessa noin 155 tuntia. Referenssihiilidioksidilämpöpumpun mitoituspiste asetettiin -12 °C :seen, jolloin lämpöpumpun lisälämmittimen lämmitystarve on noin 373 tuntia vuodesta. Pysyvyysarvoja tarkasteltaessa on kuitenkin ymmärrettävä, että pysyvyysarvot eivät kata poikkeuksellisen kylmiä tai lämpimiä ajanjaksoja. Kuvassa 6 on esitetty ulkoilman lämpötilan pysyvyys tunteina 1-vyöhykkeellä, eli Etelä-Suomessa. (11)



Kuva 6. Ulkoilman lämpötilan pysyvyys 1-vyöhykkeellä tunteina vuodesta (TRY2012 Vantaa).

4.6 Referenssi-CO₂-lämpöpumpun järjestelmäkuvaus

Tässä insinööriyössä referenssihiilidioksidilämpöpumpuna käytetään ilmalämpöpumppumallista lämpöpumppua, josta talvella kaasujäähdyttimestä otetaan lämpöä talteen lämmitysjärjestelmälle ja höyrystimen jäähdytysteho ohjataan ulos lukuun ottamatta talviaikaista jäähdytystehon tarvetta. Myös osa kaasujäähdyttimessä jäähtyneestä hiilidioksidista ohjataan ulos, jotta hiilidioksidin lämpötilaa saadaan vähennettyä mahdollisimman suuren lämpötilaliukuman saavuttamiseksi. Suuri lämpötilaliukuma tarkoittaa parempaa kylmä- ja lämpökerrointa. Kaasujäähdyttimen lämpötilat mitoite-

taan suurin piirtein kaukolämpöverkon ensiöpuolen mukaisiksi. Poikkeuksena tästä on kaasujäähdyttimen ulostulon lämpötila asetettu +5 °C:seen. Referenssilämpöpumpun mitoituspisteet lämmityskaudella ovat siis seuraavat:

- kaasujäähdyttimeen menevän hiilidioksidin lämpötila 115 °C
- kaasujäähdyttimestä lähtevän hiilidioksidin lämpötila +5 °C
- höyrystymislämpötila –15 °C.

Kesällä hiilidioksidilämpöpumppu tuottaa jäähdytystehoa tilajäähdytykselle ja ilmanvaihdon jäähdytykselle. Kaasujäähdyttimen lämmitysteho ohjataan ulos lukuun ottamatta lämpimän käyttöveden tarvitsemaa lämmitystehoa. Referenssi lämpöpumpun mitoituspisteet jäähdytyskaudella ovat seuraavat:

- kaasujäähdyttimeen menevän hiilidioksidin lämpötila 70 °C
- kaasujäähdyttimestä lähtevän hiilidioksidin lämpötila 20 °C
- höyrystymislämpötila 0 °C.

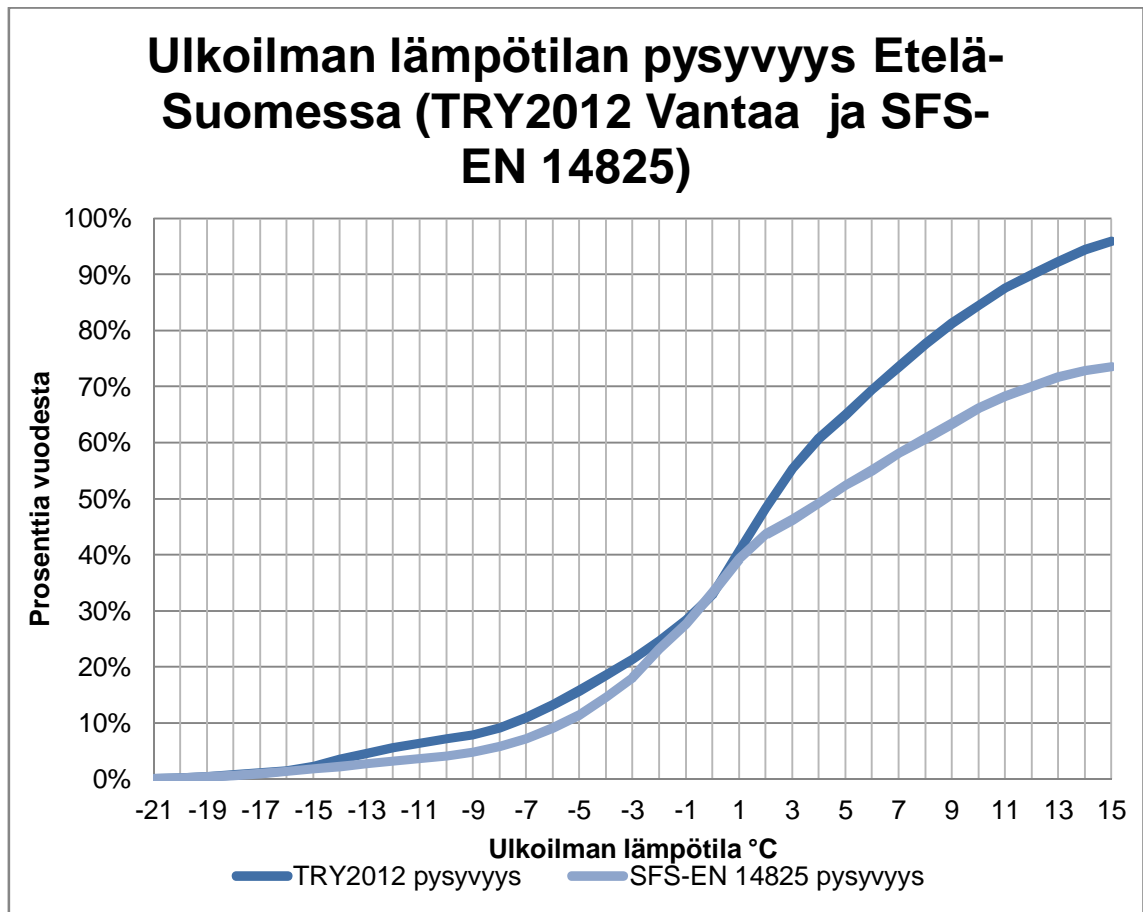
5 SCOP ja SEER

Lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden hyötysuhteet ilmoitetaan yleisimmin COP- ja EER-luvuilla. COP-luku kertoo lämpöpumpun lämpötehon ja sähkötehon suhteen. EER-luku puolestaan kertoo kylmäkoneen kylmätehon ja sähkötehon suhteen.

Lämpöpumppujen osatehojen lämpökertoimien määrittämiseen on laadittu standardi SFS-EN 14825. Standardi määrittelee lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden osahyötysuhteiden ja kausittaisten hyötysuhteiden laskentamenetelmät ja -olosuhteet. Standardin avulla on myös mahdollista laskea lämpöpumpun vuosittainen sähköenergiankulutus, sillä standardissa on annettu asetunnit kolmelle eri ilmastovyöhykkeelle, jotka ovat

- keskivertoilmasto (Strasbourg'n ilmasto)
- lämmin ilmasto (Ateenan ilmasto)
- kylmä ilmasto (Helsingin ilmasto)

Kuvassa 7 on esitetty standardin SFS-EN 14825 mukaiset ulkoilman lämpötilan pysyvyydet verrattuna TRY2012:n ulkoilman lämpötilan pysyvyyksiin. Standardin käyttö lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden vertailussa mahdollistaa vertailukelpoisen ja todenmukaisemman tuloksen lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden hyötysuhteista ja energiankulutuksesta kuin pelkät COP- ja EER-luvut. Tässä insinööriyössä on esitetty standardin SFS EN 14825 mukainen laskenta SCOP- ja SEER-luvuille. Koska standardi SFS EN 14825 on kokonaan englanninkielinen, sekaannuksen välttämiseksi yhtälöt termeineen ovat samat kuin standardissa SFS-EN 14825 on käytetty. (12)



Kuva 7. Ulkoilman lämpötilan pysyvyys Etelä-Suomessa prosentteina vuodesta (TRY2012 Vantaa ja SFS-EN 14825).

5.1 SCOP

SCOP kertoo lämpöpumpun kokonaislämpökertoimen lämmityskaudelta. SCOP lasketaan jakamalla vuotuinen referenssi lämmitysenergiantarve vuotuisella lämpöpumpun sähköenergiankulutuksella kaavalla

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad (1)$$

jossa Q_H on vuotuinen referenssi lämmitysenergiantarve (kWh) ja Q_{HE} on vuotuinen lämpöpumpun sähköenergiantarve (kWh).

Vuotuinen referenssi lämmitysenergiantarve Q_H lasketaan kertomalla lämpöpumpun lämmitysteho $P_{designh}$ (kW) lämmityksen ekvivalenttisella aktiivitulalla H_{HE} (h) kaavalla

$$Q_H = P_{designh} * H_{HE} \quad (2)$$

Lämmityksen ekvivalenttinen aktiivitus ilmoitetaan tuntitasolla. Lämmityksen ekvivalenttinen aktiivitus tarkoittaa sitä vuotuista tuntimäärää, jolloin lämpöpumpun oletetaan toimivan mitoitusasteessaan, jotta vuotuinen lämmitystarve saadaan katettua.

Lämpöpumpun vuotuinen sähköenergiantarve Q_{HE} sisältää lämpöpumpun sähköenergian kulutuksen lämpöpumpun ollessa päällä, lämpöpumpun ollessa kuormittamattomana, lämpöpumpun ollessa valmiustilassa sekä kun lämpöpumpun kampikammio on lämmitystilassa.

Lämpöpumpun vuotuinen sähköenergiantarve Q_{HE} lasketaan jakamalla vuotuinen referenssi lämmitysenergiantarve Q_H lämpöpumpun lämmityskauden aikaisen aktiivisen tilan lämpökertoimella $SCOP_{ON}$ ja summaamalla käyntiaikojen ja tehojen tulot kaavalla

$$Q_{HE} = \frac{Q_H}{SCOP_{on}} + H_{TO} * P_{TO} + H_{SB} * P_{SB} + H_{CK} * P_{CK} + H_{OFF} * P_{OFF} \quad (3)$$

jossa

H_{TO} on tuntimäärä, jolloin ei ole lämmitys- tai jäähdytyskuormaa mutta lämpöpumppu on päällä (h)

P_{TO} on se tehon syöttö, kun lämpöpumpulla ei ole lämmitys- tai jäähdytyskuormaa (kW)

H_{SB} on tuntimäärä, jona lämpöpumppu on valmiustilassa (h)

P_{SB} on se tehon syöttö, kun lämpöpumppu on valmiustilassa (kW)

H_{CK} on tuntimäärä, jona kampikammion lämmitys on päällä (h)

P_{CK} on se tehon syöttö, kun kampikammion lämmitys on päällä (kW)

H_{OFF} on tuntimäärä, jolloin lämpöpumppu on pois päältä (h)

P_{OFF} on se tehon syöttö, kun lämpöpumppu on pois päältä (kW)

$SCOP_{ON}$ on lämmityskauden keskimääräinen lämpökerroin aktiivisessa tilassa ja se määräytyy lämpöpumpun osatehosta, lisälämmitystehon tarpeesta huippupakkasilla ja lämpöpumpun lämpötilakohtaisesta lämpökertoimesta $COP_{bin}(T_j)$ painotettuna lämpötilan pysyvyydellä tietyllä lämpötila-asteella. $SCOP_{ON}$ voidaan määrittää sähköisellä tai fossiilisella lisälämmittimellä. $SCOP_{ON}$ lasketaan fossiilisella lisälämmittimellä kaavalla

$$SCOP_{ON} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j [P_h(T_j)]}{\sum_{j=1}^n h_j \left[\frac{P_h(T_j) - \text{sup}(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} + \frac{\text{sup}(T_j)}{\eta_{sffbu} * CC} \right]} \quad (4)$$

jossa

T_j on ulkoilman intervallikohtainen kuivalämpötila (°C)

j on lämpötilaintervallin numero

n on lämpötilaintervallien kokonaismäärä

$P_h(T_j)$ on rakennuksen lämpötilaintervallikohtainen lämmitystehontarve (kW)

h_j on lämpötilan pysyvyys tietyllä lämpötilaintervallilla

$COP_{bin}(T_j)$ on lämpökerroin tietylle lämpötilaintervallille

$\text{sup}(T_j)$ on fossiilisella polttoaineella toimivan lisälämmittimen tehontarve (kW)

η_{sffbu} on fossiilisella polttoaineella toimivan lisälämmittimen hyötysuhde

CC on hyötysuhdemuunnos, jonka arvo on 2,5

Laskennan tuloksena referenssi hiilidioksidilämpöpumpun SCOP-luvuksi muodostui 4,46. Liitteessä 2 on esitetty referenssi lämpöpumpun SCOP-luvun laskenta.

5.2 SEER

SEER kertoo kylmäkoneen vuosittaisen kylmäkertoimen jäähdytyskaudelta. SEER lasketaan jakamalla vuosittainen referenssi jäähdytysenergiantarve Q_C (kWh) vuosittaisella kylmäkoneen sähköenergiankulutuksella Q_{CE} (kWh) kaavalla

$$SEER = \frac{Q_C}{Q_{CE}} \quad (5)$$

Vuosittainen referenssi jäähdytysenergiantarve Q_C lasketaan kertomalla kylmäkoneen jäähdytysteho $P_{designc}$ (kW) jäähdytyksen ekvivalenttisella aktiivitulalla H_{HE} (h) kaavalla

$$Q_C = P_{designc} * H_{HE} \quad (6)$$

Jäähdytyksen ekvivalenttinen aktiivitulo esitetään tunteina. Jäähdytyksen ekvivalenttinen aktiivitulo tarkoittaa sitä vuotuista tuntimäärää, jolloin kylmäkoneen oletetaan toimivan mitoituspisteessään, jotta vuotuinen jäähdytystarve saadaan katettua.

Kylmäkoneen vuotuinen sähköenergiantarve Q_{CE} sisältää kylmäkoneen sähköenergian kulutuksen kylmäkoneen ollessa päällä, kylmäkoneen ollessa kuormittamattomana, kylmäkoneen ollessa valmiustilassa sekä kun kylmäkoneen kampikammio on lämmitys-tilassa.

Kylmäkoneen vuotuinen sähköenergiantarve Q_{CE} lasketaan jakamalla vuotuinen referenssi jäähdytystehontarve Q_C kylmäkoneen jäähdytyskauden aikaisen aktiivisen tilan kylmäkertoimella $SEER_{ON}$ ja summaamalla käyntiaikojen ja tehojen tulot kaavan mukaisesti:

$$Q_{CE} = \frac{Q_H}{SEER_{on}} + H_{TO} * P_{TO} + H_{SB} * P_{SB} + H_{CK} * P_{CK} + H_{OFF} * P_{OFF} \quad (7)$$

jossa

H_{TO} on tuntimäärä, jolloin ei ole lämmitys- tai jäähdytyskuormaa mutta kylmäkone on päällä (h)

P_{TO} on se tehon syöttö, kun kylmäkoneella ei ole lämmitys- tai jäähdytyskuormaa (kW)

H_{SB} on tuntimäärä, jona kylmäkone on valmiustilassa (h)

P_{SB} on se tehon syöttö, kun kylmäkone on valmiustilassa (kW)

H_{CK} on tuntimäärä, jona kampikammion lämmitys on päällä (h)

P_{CK} on se tehon syöttö, kun kampikammion lämmitys on päällä (kW)

H_{OFF} on tuntimäärä, jolloin kylmäkone on pois päältä (h)

P_{OFF} on se tehon syöttö, kun kylmäkone on pois päältä (kW)

$SEER_{ON}$ on kylmäkoneen jäähdytystilan keskimääräinen kylmäkerroin aktiivisessa tilassa ja se määräytyy kylmäkoneen osatehosta ja kylmäkoneen lämpötilakohtaisesta kylmäkertoimesta $EER_{bin}(T_j)$ painotettuna lämpötilan pysyvyydellä tietyllä lämpötilasteella $EER_{bin}(T_j)$ lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$SEER_{ON} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j * P_c(T_j)}{\sum_{j=1}^n h_j \left(\frac{P_c(T_j)}{EER_{bin}(T_j)} \right)} \quad (8)$$

jossa

T_j on ulkoilman intervallikohtainen kuivalämpötila (°C)

j on lämpötilaintervallin numero

n on lämpötilaintervallien kokonaismäärä

$P_c(T_j)$ on rakennuksen lämpötilaintervallikohtainen jäähdytystehontarve (kW)

h_j on lämpötilan pysyvyys tietyllä lämpötilaintervallilla

$EER_{bin}(T_j)$ on kylmäkerroin tietylle lämpötilaintervallille

Laskennan tuloksena referenssi hiilidioksidilämpöpumpun SEER-luvuksi muodostui 2,83.

6 CO₂-lämpöpumpun vertailu kaukoenergiaan

Kaukoenergialla tarkoitetaan tässä insinööriyössä kaukolämpöä ja kaukokylmää. Kaukolämmitys on Suomen yleisin rakennusten lämmitysmuoto. Kaukolämmön historia Suomessa ulottuu 1950-luvulle, jolloin Espoon Tapiolaan rakennettiin Suomen ensimmäinen vesikiertoinen kaukolämpölaitos. Kaukolämmön edut ovat varsinkin tiheästi rakennetussa ympäristössä, jossa rakennukset sijaitsevat lähellä toisiaan ja putkimatkat pysyvät näin ollen suhteellisen lyhyinä. Suomessa valtaosa kaukolämmön energiälähteistä on kuitenkin fossiilisia polttoaineita, joista luopumiseen liittyy kansainvälistä painetta. (13)(14)

Vertailin kaukoenergian ja hiilidioksidilämpöpumpun elinkaarikustannuksia kolmella eri menetelmällä: takaisinmaksumenetelmällä, nykyarvomenetelmällä ja maksimiinvestointimenetelmällä. Elinkaarikustannusmenetelmien lisäksi laadin kolme erillistä laskentatapausta, joita nimitän tässä insinööriyössä 1. skenaarioksi, 2. skenaarioksi ja 3. skenaarioksi. Elinkaarilaskuissa otin huomioon inflaatiot ja nimelliskoron yhdessä investointikustannusten kanssa. Herkkyystarkasteluissa muutin inflaatioita ja nimelliskorkoja sekä kaukoenergian investointikustannuksia. Tässä insinööriyössä järjestelmien vertailuelinkaareksi lasketaan 30 vuotta. Kaikkien kolmen skenaarion elinkaarikustannukset on esitetty taulukoissa 3 ja 4.

6.1 Hiilidioksidilämpöpumpun elinkaarikustannukset

Hiilidioksidilämpöpumpun elinkaarikustannukset koostuvat seuraavista tekijöistä:

- investointikustannus
- sähköenergian hinta ja sen kehitys
- sähköenergian kulutus
- sähköliittymän hinta
- yksi laaja huolto
- vuosittainen huolto
- huipputehon aikainen lisälämmitys.

Lämpöpumpun energianlähde on sähkö, jota lämpöpumppu kuluttaa merkittävästi. Elinkaarikustannuksissa sähköön liittyvä ainoa kiinteä kustannus on sähköliittymän hinta. Referenssikohteessa lämpöpumpun virta on satoja ampeereja, jolloin sähköliittymän hinnasta on käytännössä pyydettävä tarjous liittymän tarjoajalta. Elinkaarilaskennan herkkyystarkasteluissa on otettu huomioon erilaisia vaihtoehtoja sille miten sähköenergian hinta kehittyy tarkasteluajanjaksolla.

Huipputehon aikainen lisälämmitys toteutetaan kaukolämmöllä, joten hiilidioksidilämpöpumpun elinkaarilaskuissa otetaan huomioon kaukolämpöliittymän hinta. Helsingissä kaukolämpöön liittyessä on kaukolämpöliittymä mitoitettava rakennuksen täydellä lämmitystehontarpeella, jolloin elinkaarilaskuissa otetaan huomioon kaukolämpöliittymän vesivirtamaksu täydellä vesivirralla. Kaukolämmön energiamaksun muutosta arvioidaan elinkaarilaskennan herkkyystarkasteluissa samoin tavoin kuin sähköenergian hinnan kehitystä.

6.2 Kaukoenergian elinkaarikustannukset

Kaukoenergian elinkaarikustannukset koostuvat seuraavista tekijöistä:

- kaukolämpöpaketti
- kaukojäähdytyspaketti
- liittymiskustannukset kaukolämmölle ja –jäähdytykselle
- energiamaksut
- vuosittainen huoltokustannus
- yksi suuri huolto elinkaaren aikana.

6.3 Investointikustannukset

Järjestelmien investointikustannukset saadaan laitevalmistajilta, energian toimittajilta sekä internetistä. Hiilidioksidilämpöpumpun koneikon hinta perustuu laitetoimittajan hinta-arvioihin. Sähköliittymän hinnan laskin suoraan sähköliittymän tarjoajan ilmoittamasta hinnasta sähköliittymän ampeeria kohden. Hiilidioksidilämpöpumpun tarvitsemaa lisälämmitys toteutetaan kaukolämmöllä. Helsingin alueella kaukolämpöliittymä on mitoitet-

tava rakennuksen kokonaislämmitystehontarpeelle, jos vaihtoehtoiset lämmönlähteet eivät kata rakennuksen lämmitystehontarvetta kokonaan. (15) Tämän takia hiilidioksidilämpöpumpun priimaus eli lisälämmityksen investointi on laskuissa samanhintainen kuin kaukoenergian kaukolämpöliittymä.

Kaukoenergian kaukolämpöpakettien hinnat sain kaukolämpöpakettien valmistajalta. Kaukolämmön liittymähinnan laskin energiantoimittajan verkkosivuilta. Kaukojäähdytyksen liittymähintaan sain energiantoimittajan hinta-arvion.

6.4 Muuttuvat kustannukset

Kaukolämmön energiamaksut ovat saatavilla varsin avoimesti internetistä, mutta kaukojäähdytyksen energiamaksut ja liittymiskustannukset ovat käytännössä aina kysyttävä kaukojäähdytystä tarjoavalta energiayhtiöltä. Kaukojäähdytyksen energiamaksuissa on käytetty kaukolämmön energiamaksun kesähintaa. Elinkaarilaskuissa on otettu huomioon kaukoenergian vesivirtamaksu ja energiamaksu muuttuvina kustannuksina.

Laadin elinkaarikustannukset dynaamisella energiasimulointiohjelmalla Ida Ice:lla lasketuilla lämmitys- ja jäähdytyskuormilla. Elinkaarilaskuista muodostin kolme herkkyystarkastelua, joissa muutin investointikustannuksia ja inflaatioprosentteja. Dynaamisella energiasimulointiohjelmalla lasketut lämmitys- ja jäähdytyskuormat ovat esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Dynaamisella energiasimuloinnilla lasketut energiantarpeet.

	Energia MWh/a	Teho kW
Tilalämmitys	305	242
IV-lämmitys toimisto	185	279
IV-lämmitys parkkihalli	67	38
LKV-lämmitys	91	
Lumensulatus	79	72
Tilajäähdytys	320	295
IV-jäähdytys	53	439
Lämmitys yhteensä	728	617
Jäähdytys yhteensä	373	660

Laskuissa tehdyt oletukset komponenttien elinkaaresta on otettu huomioon huoltokustannuksissa. Lämpöpumppujen ja kaukoenergiajärjestelmien elinkaaren aikana arvioidaan olevan yksi laaja huolto, jonka lisäksi lasketaan 2 % investointikustannuksesta vuosittaiseen huoltoon. Laajojen huoltojen kustannukset ovat pelkästään valistuneita arvauksia. Oletuksena on kuitenkin ollut, että kaukoenergian huoltaminen on halvempaa kuin hiilidioksidilämpöpumpun, koska hiilidioksidilämpöpumpussa on merkittävästi enemmän huollettavia komponentteja, esimerkiksi kompressorit. Molemmissa järjestelmissä on huomioitu kahden vuoden takuu, jolloin huoltokustannukset kuuluvat laitevalmistajille.

Taulukko 3. Skenaarioissa käytetyt muuttumattomat laskennan lähtöarvot

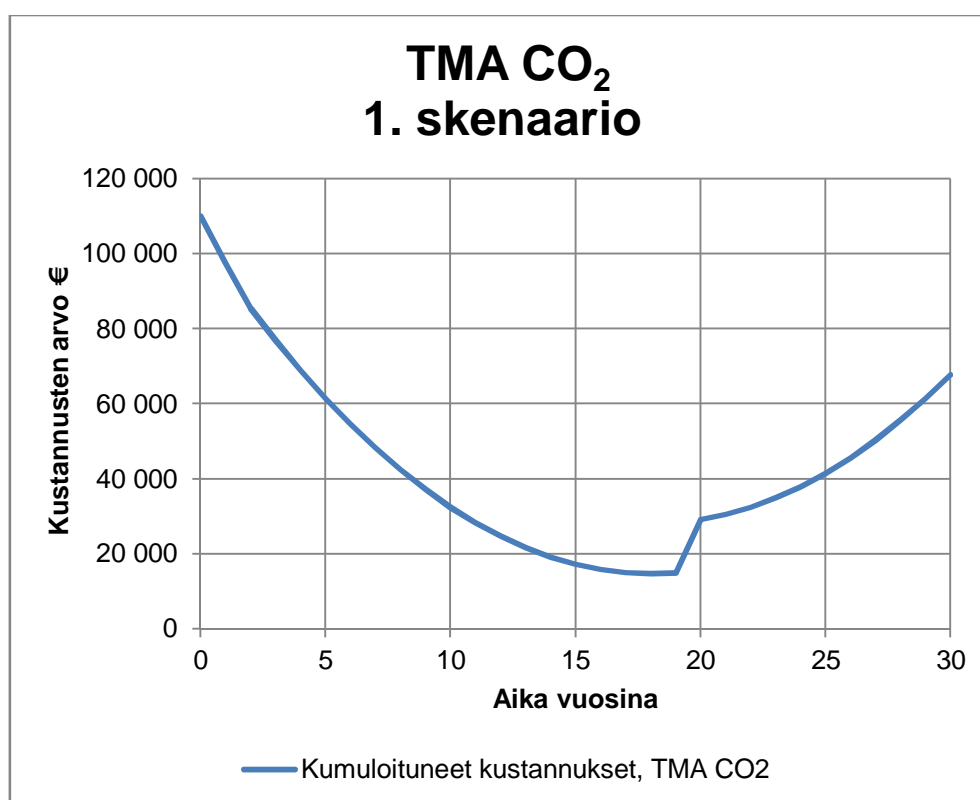
	Kaukoenergia	CO2
Investoinnit €		356500
KL-energia €/a	29318	1466
Sähköenergia €/a	28	24395
KJ energia €/a	9683	0
Huollot €/a	5930	8913
Laitteusinta €	5000	25000
Nimelliskorko %	2	

Taulukko 4. Skenaarioissa käytetyt muuttuvat laskennan lähtöarvot

	KL-energian inflaatio %	KJ- energian inflaatio %	Sähköenergian inflaatio %	Kaukoenergian investointi €
1. skenaario	1	1	3	246 500
2. skenaario	3,2	3,2	2,08	296 500
3. skenaario	2	2	3	271 500

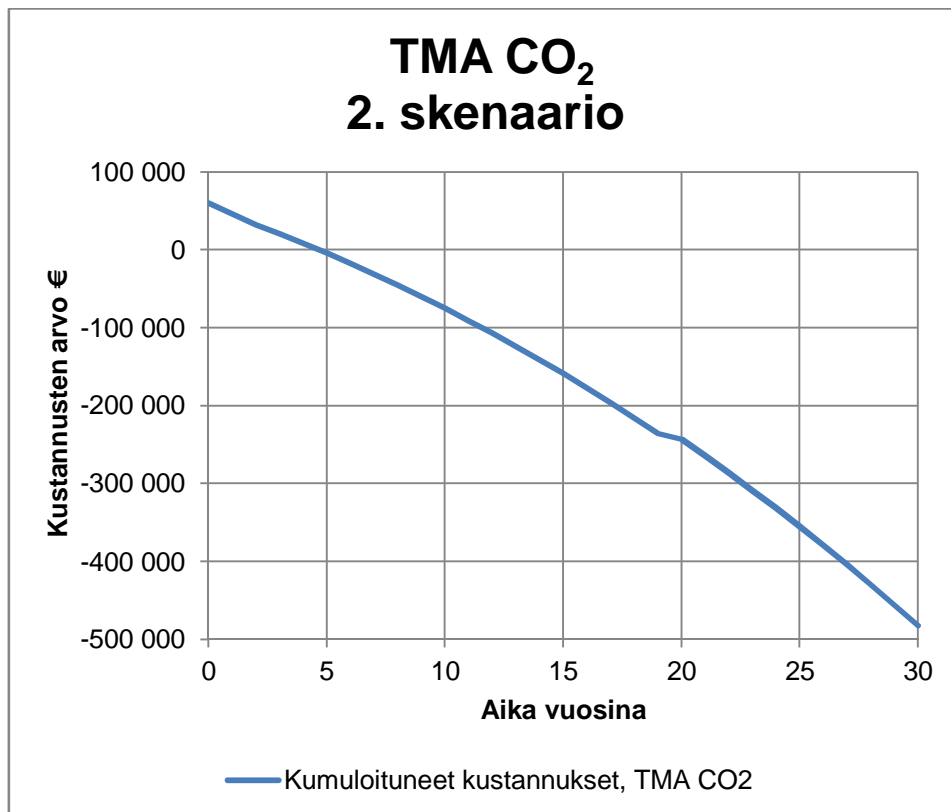
6.5 Takaisinmaksuaika

Ensimmäisenä laskin lämpöpumpun takaisinmaksuajan verrattuna kaukoenergiaan matalalla kaukoenergian inflaatiolla. 1. Skenaarion elinkaarikustannukset on esitetty taulukoissa 3 ja 4. Kaukoenergian investointikustannukset laskin kaukoenergialle erittäin edullisiksi, mutta kuitenkin realistisiksi. Kuvassa 8 on havaittavissa hiilidioksidilämpöpumpun takaisinmaksuaika. Ensimmäisessä skenaariossa hiilidioksidilämpöpumppu ei maksa itseään takaisin 30 vuoden tarkastelujaksolla. Tähän vaikuttaa vahvasti kaukojäähdytyksen investointikustannus sekä sähkö- ja kaukoenergian hinnan kehitys. Kuvasta 8 on havaittavissa, että hiilidioksidilämpöpumpun kumuloituvat kustannukset lähestyvät kuvaajan x-akselia ajan edetessä, mutta skenaariossa käytetty korkea sähköenergian hinnank kehitys alkaa kerryttää hiilidioksidilämpöpumpun kumuloituvia kustannuksia niin, ettei hiilidioksidilämpöpumppu maksa tarkasteluajanjaksolla itseään takaisin. Kuvassa 8 havaittava äkillinen nousu 20 vuoden kohdalla syntyy yhdestä elinkaaren aikana tapahtuvasta laajasta huollosta. 20 vuoden kohdalla korkeasta sähköenergian inflaatiosta johtuen hiilidioksidilämpöpumpun kumuloituvat kustannukset jatkavat kohoamistaan.



Kuva 8. Takaisinmaksuaika hiilidioksidilämpöpumpulle verrattuna kaukoenergiaan.

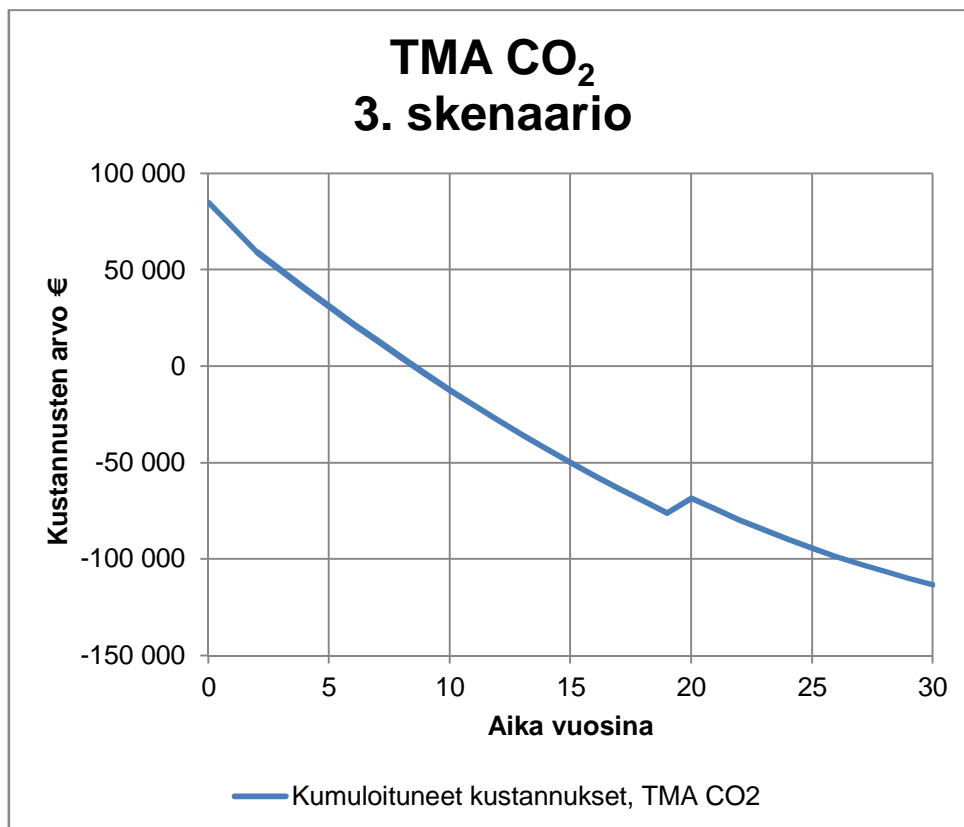
2. skenaariossa nostin kaukoenergian investointisummaa merkittävästi, mutta kuitenkin niin, että investointisumma on realistinen. Kaukoenergian huolto- ja PTS-kustannukset ovat samat kuin ensimmäisessä skenaariossa. Sähkö- ja kaukoenergian hinnan inflaation laskin ekstrapoloimalla mennyttä hintakehitystä. Hiilidioksidilämpöpumpun investointikustannukset, huolto- ja PTS-kustannukset ovat samat kuin ensimmäisessä skenaariossa. Taulukossa 3 ja 4 on esitetty 2. skenaarion elinkaarikustannukset ja inflaatiot. Kuvasta 9 on havaittavissa hiilidioksidilämpöpumpun takaisinmaksuaika tarkasteluajanjakson funktiona. Takaisinmaksuaika toisessa skenaariossa hiilidioksidilämpöpumpulle on viisi vuotta. 2. skenaariossa hiilidioksidilämpöpumpun takaisinmaksuajan lyhyt aika selittyy käytännössä kaukoenergian korkeammilla investointikustannuksilla ja matalammalla sähkön hintakehityksellä verrattuna kaukoenergian hintakehitykseen. Ekstrapoloitu sähköenergian hinnan kehitys nopeuttaa myös takaisinmaksuaikaa, koska sähköenergian hinnan kehitys on tätä insinööriyötä kirjoittaessa melko maltillista.



Kuva 9. Takaisinmaksuaika hiilidioksidilämpöpumpulle verrattuna kaukoenergiaan.

3. skenaariossa kaukoenergian investointikustannukset ovat suuremmat kuin 1. skenaariossa, mutta pienemmät kuin 2. skenaariossa. Kaukoenergian inflaatio on 3. skenaariossa pienempi kuin sähköenergian inflaatio. Hiilidioksidilämpöpumpun investoin-

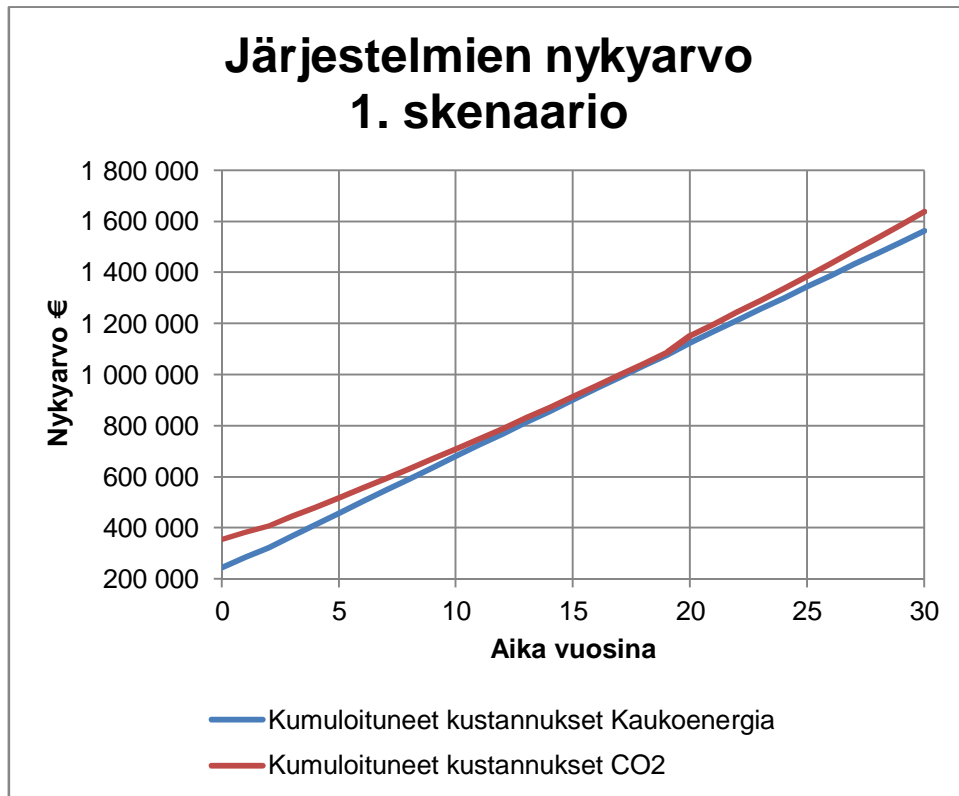
tikustannus on pidetty ennallaan. 3. skenaariossa hiilidioksidilämpöpumppu maksaa itsensä takaisin yhdeksän vuoden aikana. Kuvasta 10 on havaittavissa hiilidioksidilämpöpumpun takaisinmaksuaika tarkasteluajanjaksolla. 3. skenaariossa havaittava takaisinmaksuajan piteneminen verrattuna 2. skenaarioon johtuu pääasiassa edellisten skenaarioiden tapaan kaukoenergian investointikustannuksen muutoksesta.



Kuva 10. Takaisinmaksuaika hiilidioksidilämpöpumpulle verrattuna kaukoenergiaan.

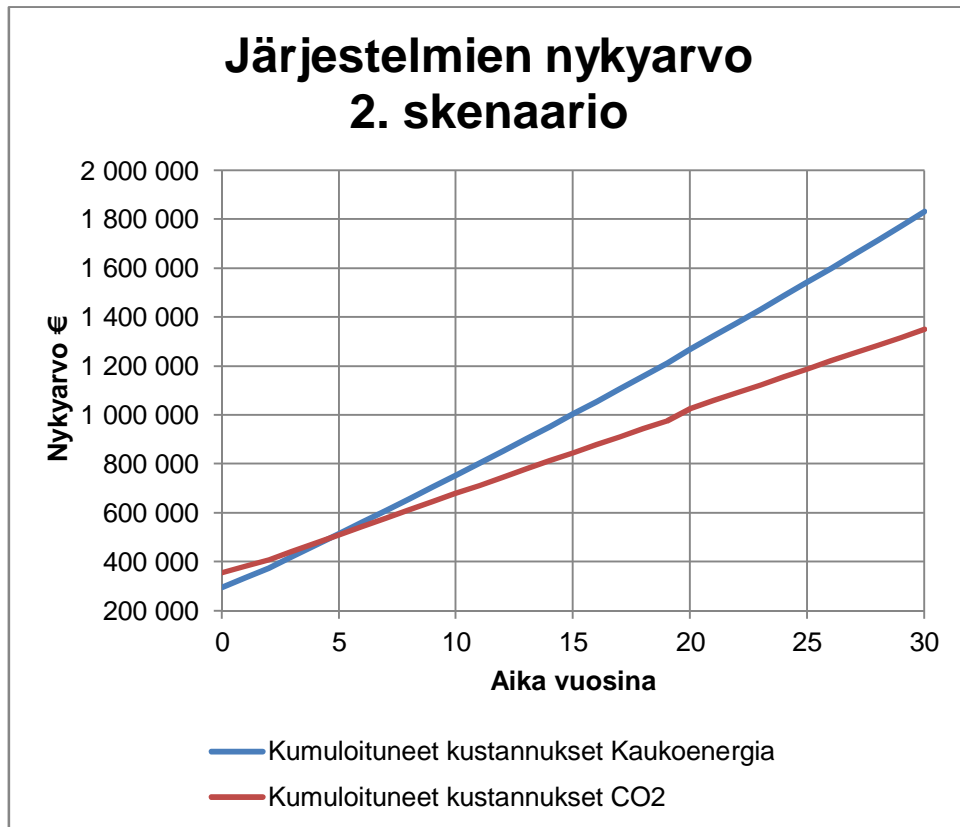
6.6 Nykyarvo

Nykyarvomenetelmässä järjestelmien tarkastelujakson aikana kumuloituvat kustannukset diskontataan nykyarvoon. 1. skenaariossa hiilidioksidilämpöpumpun nykyarvoksi muodostui 1 639 500 euroa ja kaukoenergian 1 563 100 euroa. Kuvasta 11 on havaittavissa järjestelmien nykyarvo tarkastelujakson funktiona. Hiilidioksidilämpöpumpun kuvaava käyrä ei leikkaa kaukoenergiaa kuvaavaa käyrää. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty 1. skenaarion laskenta-arvot.



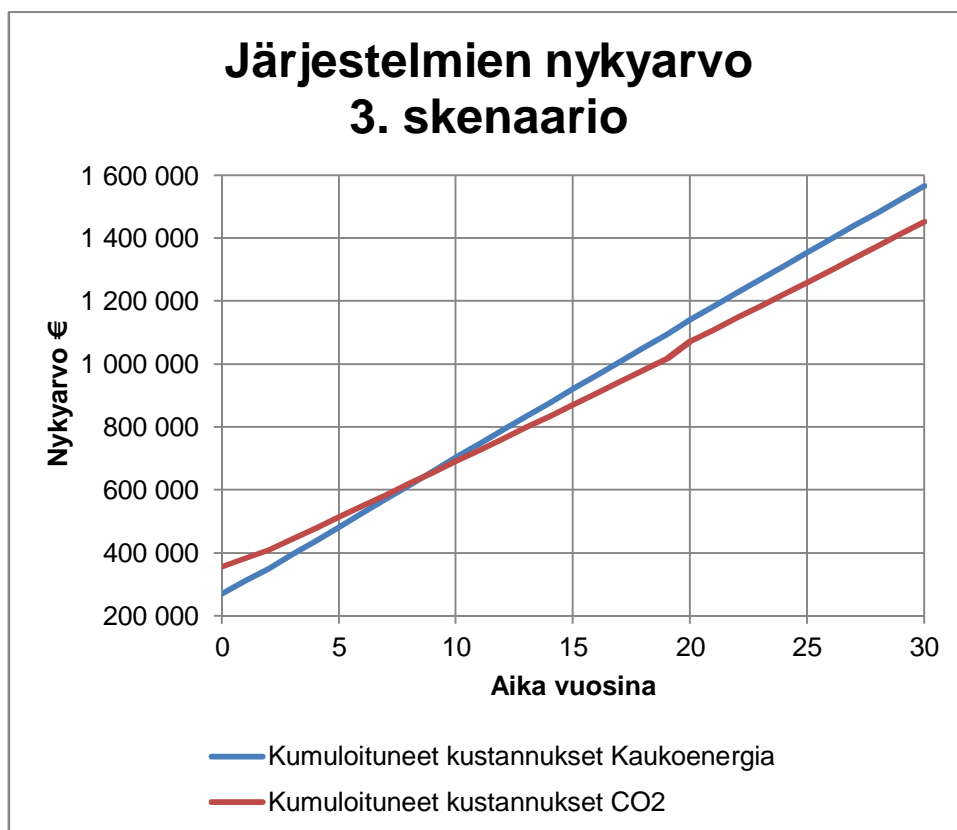
Kuva 11. Järjestelmien nykyarvo tarkasteluajanjakson funktiona.

2. skenaariossa järjestelmien nykyarvot poikkeavat merkittävästi toisistaan. Hiilidioksidilämpöpumpun nykyarvoksi muodostui 1 349 400 euroa ja kaukoenergian nykyarvoksi 1 831 800 euroa. Lähes puolen miljoonan euron nykyarvon eron selittää merkittävästi suurempi investointikustannus sekä ekstrapoloitu kaukoenergian hinnan kehitys. Kuvasta 12 on havaittavissa järjestelmien nykyarvojen kehitys. Taulukossa 3 on esitetty 2. skenaarion laskenta-arvot.



Kuva 12. Järjestelmien nykyarvo tarkasteluajanjakson funktiona.

Järjestelmien nykyarvojen erotus 3. skenaariossa on merkittävästi pienempi kuin 2. skenaariossa. Hiilidioksidilämpöpumpun nykyarvoksi muodostui 1 454 000 euroa ja kaukoenergian nykyarvoksi 1 567 000 euroa. Kuvassa 13 on esitetty 3. skenaarion mukaiset nykyarvot järjestelmille.



Kuva 13. Järjestelmien nykyarvo tarkasteluajanjakson funktiona

6.7 Maksimi-investointi

Maksimi-investoinnin menetelmä laskee mikä on investoinnin suurin mahdollinen summa, jotta investointi olisi vielä kannattava vertailtavaan järjestelmään. Tässä insinööriyössä oletetaan kannattavan järjestelmän olevan se järjestelmä, joka tulee elinkaaritarkastelujaksossa halvemmaksi. Jos vertailtava järjestelmä ei maksa itseään takaisin tarkasteluajanjaksolla, maksimi-investoinnin menetelmä antaa hyvän kuvan siitä, kuinka kaukana järkevästä investoinnista vertailtava järjestelmä on. Hiilidioksidilämpöpumpun maksimi-investoinniksi muodostui 1. skenaariossa 280 000 euroa. Hiilidioksidilämpöpumpun maksimi-investoinnin ja kaukoenergian erotus ensimmäisessä skenaariossa on 33 500 euroa, eli noin 14 %.

2. skenaariossa maksimi-investointi kertoo, kuinka suuri vaikutus kaukoenergian investointikustannuksen nostolla ja kaukoenergian inflaatiolla on hiilidioksidilämpöpumpun investoinnin kannattavuuteen. Hiilidioksidilämpöpumppu on toisessa skenaariossa kannattava vielä 840 000 euron investointikustannuksella. Maksimi-investoinnin suurta

summaa selittää myös kaukoenergian inflaatio, joka suurempi kuin sähköenergian inflaatio.

Maksimi-investointi 3. skenaariossa on merkittävästi pienempi, kuin 2. skenaariossa. Muutokseen vaikuttaa ennen kaikkea kaukoenergian pienempi investointikustannus. Myös kaukoenergian pienempi inflaatio vaikuttaa hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuuteen. 3. skenaariossa hiilidioksidilämpöpumpun maksimi-investoinniksi muodostui 460 000 euroa.

6.8 Elinkaarilaskennan tulokset

1. skenaariota lukuun ottamatta hiilidioksidilämpöpumppu maksoi itsenä takaisin melko nopeasti. Tuloksena voidaan todeta, että kaukoenergian ja varsinkin kaukojäähdytyksen hinnoittelulla voidaan käytännössä muuttaa hiilidioksidilämpöpumppu kannattavaksi tai kannattamattomaksi. Mikäli oletettaisiin hiilidioksidilämpöpumppu ja kaukoenergian investointikustannukset samansuuruisiksi, hiilidioksidilämpöpumppu maksaisi itsensä takaisin käyttöhetkestä alkaen. Taulukkoon 5 on koottu elinkaarilaskennan tulokset.

Taulukko 5. Elinkaarilaskennan tulokset

		Nykyarvo €	Takaisin- maksuaika a	Maksimi- investointi €
1. Skenaario	CO2	1 447 885	-	280 000
	Kaukoenergia	1 380 118		
2. Skenaario	CO2	1 349 436	5	840 000
	Kaukoenergia	1 831 785		
3. Skenaario	CO2	1 453 976	9	460 000
	Kaukoenergia	1 567 163		

7 Yhteenveto

Tässä insinöörityössä käsitellyt lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden osahyötysuhteet sekä elinkaarilaskennat ovat itsessään jo niin laajoja aiheita, että niistä saisi muodostettua omat insinöörityönsä. Ongelmaksi muodostui laajojen aiheiden lisäksi hiilidioksidilämpöpumpun poikkeava ja monimutkainen tekniikka verrattuna perinteiseen HFC-järjestelmään.

Insinööriyössä selvitettiin hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta toimitilan tilälämmityksessä ja -jäähdytyksessä kahdella keinolla. Ensimmäisenä laskettiin hiilidioksidilämpöpumpun lämpö- ja kylmäkertoimet standardin SFS EN 14825 mukaisesti osatehoille. Toisena vertailtiin hiilidioksidilämpöpumpua kaukoenergiaan elinkaarilaskujen avulla.

Työn tuloksena voidaan todeta, että hiilidioksidilämpöpumppu on mahdollista saada kannattavamaksi kuin kaukoenergia. Kannattavuuteen kuitenkin vaikuttaa hiilidioksidilämpöpumpun optimaalinen toimintapiste, mikä vaatii syvällistä asiantuntemusta hiilidioksidilämpöpumpun toimintaperiaatteista. Suurin epävarmuustekijä hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuudessa on kaukojäähdytyksen investointikustannus. Jotta toimitilaan hankittavasta lämmitys- ja jäähdytystuotantovasta saataisiin tarkka analyysi kannattavuudesta, on tiedettävä melko tarkkaan kaukojäähdytyksen investointikustannukset. Työ antaa kuitenkin suuntaa hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuudelle toimitilassa.

Hiilidioksidilämpöpumpun kannattavuutta olisi järkevää selvittää myös kaukoenergiaan integroituna, jolloin olisi mahdollista höyrystää hiilidioksidia kaukojäähdytysverkkoon ja jäähdyttää hiilidioksidia kaukolämmitysverkkoon. Tällaisella järjestelmällä olisi mahdollisuudet parempiin kylmä- ja lämpökertoimiin, koska kaukoenergian verkostojen lämpötilan ovat hiilidioksidilämpöpumpulle optimaalisemmat kuin ulkoilman lämpötila.

Lähteet

- 1 Tietoa Rambollista. 2016. Verkkodokumentti. Ramboll Finland Oy.
<http://www.ramboll.fi/ramboll_finland_oy>. Luettu 29.11.2016
- 2 compHEAT. 2016 Verkkodokumentti. Advansor A/S.
<<http://www.advansor.dk/en/products/compindustri-products-for-industrial-applications/compheat/>>. Luettu 3.10.2016.
- 3 Hiilineutraali tulevaisuus. 2016. Verkkodokumentti. Helen Oy.
<<https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/hiilineutraali-tulevaisuus/>>. Luettu 3.8.2016.
- 4 Uusi F-kaasuasetus tuo rajoituksia kylmäaineiden käyttöön. 2014. Verkkodokumentti. Turvallisuus ja -kemikaalivirasto.
<<http://www.tukes.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/Kylmalaiteliikkeit/Uusi-F-kaasuasetus-tuo-rajoituksia-kylmaaineiden-kayttoon/>>. Luettu 24.7.2016.
- 5 Montrealin pöytäkirja. 2016. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö.
<[http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmansuojelu_ja_otsonikerroksen_suojelu/Kansainvalinen_yhteistyö_ja_EUasiat/Montrealin_poytakirja/Montrealin_poytakirja\(1849\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmansuojelu_ja_otsonikerroksen_suojelu/Kansainvalinen_yhteistyö_ja_EUasiat/Montrealin_poytakirja/Montrealin_poytakirja(1849))>. Luettu 3.10.2016.
- 6 Owen, Mark S. 2014. ASHRAE handbook of refrigeration. Atlanta: ASHRAE.
- 7 Sarkar J., Souvik Bhattacharyya & Ram Gopal M. 2004. Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications. Verkkodokumentti. Saatavilla:
<<http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Project/Some%20papers%20for%20CO2%20Ref/Optimization%20of%20a%20transcritical%20CO2%20heat%20ump%20cycle%20for%20simultaneous%20cooling%20and%20heating.pdf>> Luettu 6.11.2016.
- 8 Coefficient of Performance. 2016. Verkkodokumentti. Industrial heat pumps.
<http://www.industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/cop_heat_pump>. Luettu 21.11.2016.
- 9 Rakennusten energiatehokkuus. 2011. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 10 Heat Flux. 2016. Verkkodokumentti. GreenTEG AG.
<<http://www.greenteg.com/heat-flux-sensor/definition-of-heat-flux/>>. Luettu 29.11.2016.

- 11 Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2016. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/energiailaskennan-testivuodet-nyky>>. Luettu 11.10.2016.
- 12 SFS-EN 14825. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling. Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. 2016. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 13 Kaukolämpömuistoja Espoosta. 2016 Verkkodokumentti. Fortum Oy. <http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Kaukolampo/Espoon_historiikki_final.pdf>. Luettu 3.10.2016.
- 14 Kaukolämpö. 2016. Verkkodokumentti. Energiamaailma.fi. <<http://energiamaailma.fi/mista-virtaa/kaukolampo/>>. Luettu 3.10.2016.
- 15 Helenin ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle. 2015. Verkkodokumentti. Helen Oy. <https://www.helen.fi/globalassets/lampo/ammattilaiset/kaukolampo/kaukolampoon_hybridikytkenta_kaukolampolaitteiston_rinnallepdf>. Luettu 11.10.2016.

