

Energiaväylän kuluttajan lämpöpumppukeskus

Kari Kauppila, EnerSys CM Oy



Uudenmaan liitto
Nylands förbund

TECHVILLA



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Kari Kauppila

20.10.2017

ENERGIAVÄYLÄN KULUTTAJAN LÄMPÖPUMPPUKESKUS

1	ALKUSANAT.....	2
2	TEORIAA JA KÄYTTÖTALouden PERUSTEITA	3
2.1	LÄMPÖPUMPUN HYÖTYSUHDE JA SEN RIIPPUVUUS LÄMPÖILOISTA	3
2.2	LÄMMITYSKUORMIEN LÄMPÖTILATASOJEN VAIHTELU	5
2.3	KOKONAISKÄYTTÖTALOUS.....	6
2.4	RAKENNUSTEN LÄMPÖKUORMIEN LUONNE.....	6
3	ESIMERKKIKOhteiden KUORMAPROFIILIT	7
3.1	LÄMMITYSKUORMAT	7
3.2	JÄÄHDYTYSKUORMAT.....	10
4	KOKO JÄRJESTELMÄN YLEISKUVAUS	11
4.1	LÄMMÖN TUOTANTO.....	11
4.2	SIIRTOVERKOSTO	12
4.3	KULUTTAJALAITTEET	12
5	KULUTTAJAPÄÄN LÄMPÖPUMPPUKESKUS	13
5.1	JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUN YLEISIÄ LÄHTÖKOHTIA	13
5.2	KULUTTAJALAITTEISTON VAATIMUKSISTA JA KOKOONPANOSTA	14
5.2.1	<i>Kompressorit.....</i>	<i>14</i>
5.2.2	<i>Ominaisuudet ja kokoonpano</i>	<i>15</i>
5.2.3	<i>Liitäntä kuluttajalaitteisiin ja käyttö.....</i>	<i>16</i>
5.2.4	<i>Laitteiden ja järjestelmien hankinnasta.....</i>	<i>17</i>
6	ESIMERKKIKOHDE	18
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	19

LIITTEET

1 Esimerkkikohteen taloustarkastelu

1**ALKUSANAT**

Tämä tarkastelu on alustava ja tarkastelun laajuus on rajattu koskemaan energiaväylän kuluttajapään järjestelmää.

Tässä työssä perusolettamuksena on käytetty hajautetun tuotannon periaatetta, jossa energiaväylän matalalämpötilaista lämpöä siirretään matalalämpötilaisen (lämpötilatason oletettu olevan luokkaa 15..30oC) siirtoverkoston kautta kuluttajien lämpöpumppukeskuksille, jossa lämpötila nostetaan hyödyntämiskelpoiselle tasolle. Tässä mallissa myös yksittäisillä kuluttajilla on mahdollisuus ajaa ylijäämälämpönsä takaisin väylään ja sitä kautta muiden kuluttajien käyttöön (tilanne jossa ylijäämälämmöstä on tiettyinä aikoina niukkuutta).

Teknologiana on rajauduttu tarkastelemaan pelkästään mekaaniseen kompressoriin perustuvaa lämpöpumppua. Energiaväylän muihin pääosiin on otettu kantaa siltä osin, kun ne liittyvät tämän työn painopistealueeseen.

Selvitystyössä esitetyt tekniset tiedot ja kuvat ovat periaatteellisia eikä niitä saa käyttää sellaisenaan toteutukseen.

Tästä raportista on toimitettu ennakkoversio kommentoitavaksi 30.6.2017. Tämä raportti korvaa kokonaisuudessaan kyseisen ennakkoversion.

2 TEORIAA JA KÄYTTÖTALouden PERUSTEITA

2.1 Lämpöpumpun hyötysuhde ja sen riippuvuus lämpötiloista

Energiaväylän idea on hyödyntää ylijäämälämpövirtoja, joiden lämpötilataso on yleensä niin matala, että niitä ei pysty suoraan hyödyntämään rakennusten lämmityksessä. Väliin tarvitaan tällöin lämpöpumppprosessi, jonka avulla matalalämpötilaisen lämpövirran avulla voidaan tuottaa korkeammassa lämpötilassa olevaa hyödyntämiskelpoista lämpöä mekaanisen energian avulla (käytännössä sähkömoottorin pyörittämä kompressor).

Lämpöpumpun hyötysuhde eli lämpökerroin (engl. COP Coefficient of Performance) määritellään tuotetun lämmön suhteena tarvittavaan mekaaniseen työhön, käytännössä lämpökerroin lasketaan lämpöpumpun tuottaman lämmön ja käyttämän sähkön suhteena.

Lämpökerroin riippuu termodynamiikan lakien mukaisesti lämpöpumppprosessin päälämpötiloista kaavan 1 mukaisesti:

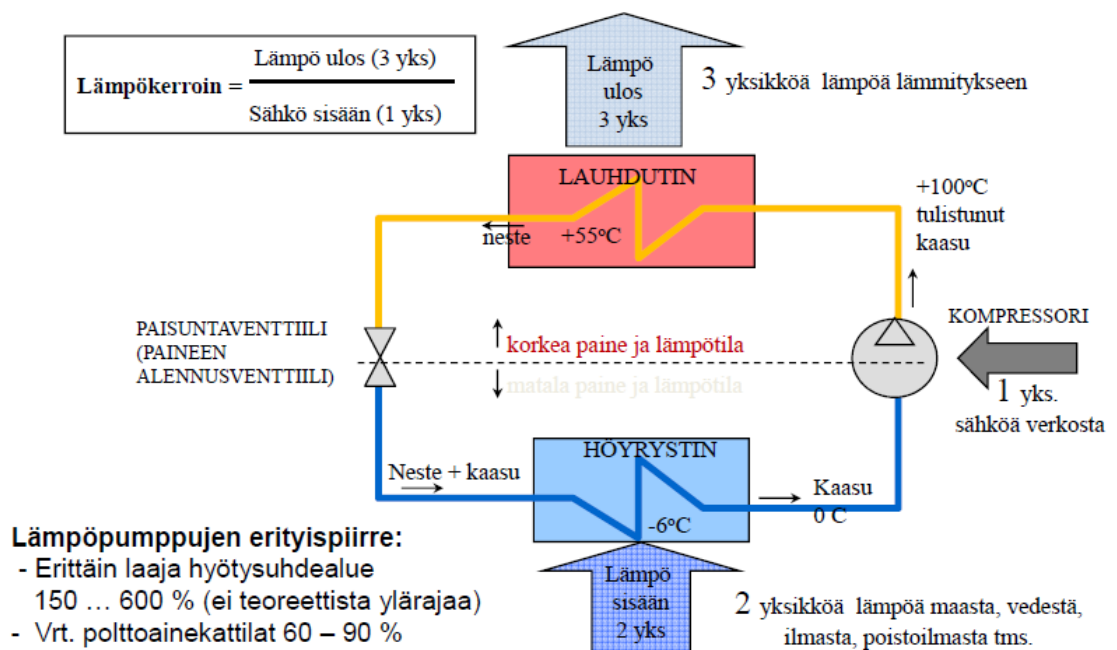
Kaava 1 Lämpöpumpun hyötysuhteen riippuvuus käyttölämpötiloista

$$\text{COP} = \eta_c T_L / (T_L - T_H)$$

jossa η_c = ideaalisuuskerroin, arvo yleensä välillä 0,5 .. 0,7

T_L = Lämpöpumpun lauhtumislämpötila Kelvineinä (C-asteet + 273,15), joka on käytännössä 1..3 °C korkeampi, kuin lämpöpumpulla tuotetun lämmitysveden lämpötila

T_H = Lämpöpumpun höyrystyslämpötila Kelvineinä , joka on käytännössä 5..10 °C alempi, kuin lämpöpumpun lämmönlähteenä käyttämän veden tai liuoksen lämpötila



Kuva 1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Kaavan mukaisesti hyötysuhde on sitä parempi, mitä alempi on lauhtumislämpötila tai mitä ylempi on höyrystymislämpötila. Käytännön lämpöpumpputekniikka kuitenkin asettaa rajansa sille, millä alueella lämpötilat voivat oikeasti liikkua.

Höytysuhteen lisäksi lämmönlähteen lämpötilan nousu lisää käytännön lämpöpumppulaitoksista saatavaa lämmitystehoa olennaisesti perustuen kompressorin tuottaman kylmäaineen massavirran kasvuun ja painesuhteen alenemiseen. Taulukkoon 1 on laskettu käytännön esimerkki tapauksesta, jossa samaan kompressoriin perustuva lämpöpumppu käyttää lämmönlähteenään

- 1) Luonnon maaperää esim. lämpökaivoa, jolloin maasta tulevan liuoksen lämpötila on talvella tyypillisesti 0°C
- 2) Lämpimämpää liuosta, esimerkiksi energiaväylän vesi, jonka lämpötila on esimerkissä +25°C.

Taulukko 1		Lämmönlähteen lämpötilan vaikutus lämpöpumpun suoritusarvoihin	
		1)	2)
		Lämmönlähteenä maaperä	Lämmönlähteenä energiaväylä
Lämmönlähteen lämpötila		0 C	25 C
Lämmityskuorman lämpötila		50 C	50 C
Lämmitysteho		100	216
Suhteellinen tehon lisäys			116 %
Lämpökerroin, COP		3,4	5,3
Suhteellinen COP:n parannus			57 %

Esimerkki on laskettu todellisen mäntäkompressorin ominaisuuksien mukaan ja tulosten mukaan laitoksen lämmitysteho kasvaa yli 2-kertaiseksi ja hyötysuhde 1,6-kertaiseksi.

Käytännön lämpökertoimet riippuvat hyvin monesta eri tekijästä, alla esimerkkejä:

- Lämmönlähteen lämpötilan todellinen profiili
- Lämmityskuorman todellinen lämpötilavaatimus ja lämpötilan vaihtelut (esim. lämmitysverkoston ulkolämpötilasta riippuva säätökäyrä)
- Järjestelmän kytkentä ja käyttötapa (ajetaanko matalimman esim. lattialämmityskuorman ehdoilla, vai korkealämpötilaisen käyttöveden ehdoilla, vaikutus erittäin suuri)
- Lämpöpumppuprosessin termodynaaminen tehokkuus (erittäin monta vaikuttavaa tekijää, mm. kompressori, lämmönsiirrinten toiminta, paisuntaventtiili, kylmäprosessin kytkentätapa, kylmäaine jne)

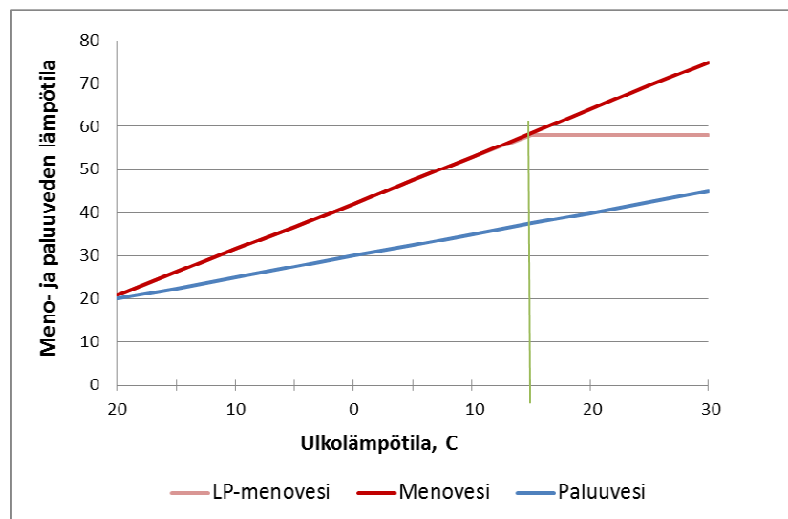
Käytännön vuosilämpökertoimet liikkuvat välillä 2,5..4,5, kun lämmönlähteenä käytetään pääasiassa luonnon lämmönlähdettä (maaperä, ilma, vesistö). Lämpökerroin voi olla huomattavasti korkeampi, jos lämmönlähteenä on korkealämpötilaisempi väliaine ja lämmityskuorman vaatima lämpötilataso kohtuullinen.

2.2 Lämmityskuormien lämpötilatasojen vaihtelu

Lämmönlähteen lämpötilan lisäksi lämmitettävän kohteen lämmönjakeluverkon vaatimalla lämpötilatasolla on olennainen merkitys lämpöpumpun käyttötalouteen. Lämmitysverkostojen veden lämpötilaahan säädetään ulkoilman mukaan siten, että kaikkein korkeinta lämpötilaa tarvitaan huippupakkasilla (kuva 2), jolloin myös lämmön tarve on suurin.

Lämpöpumpun ongelmana on se, että samalla kun sillä tuotettavan veden lämpötilatasoa nostetaan, sen tehontuottokyky ja hyötysuhde pienenevät. Lisäksi eri laitteilla on maksimilämpötilansa, jota ei voi ylittää (sarjatuotantolaitteilla max. välillä 50 – 68°C).

Jos lämpöpumpun suurin sallittu tuottolämpötila on esimerkiksi +58°C, mutta verkosto tarvitsee toimiakseen kovalla pakkasella +75°C vettä, lämpötilan nosto 58 -> 75°C joudutaan suorittamaan jollain muulla kalliimmalla tavalla, esimerkiksi sähkövastuksilla. Esimerkki kuvassa 2.



Kuva 2 Kuvassa olevan lämpöpumpun tuottokyky maksimissaan +58°C vettä, jolloin ulkolämpötilan alittaessa -15°C lämpötilan nostoon +58:sta ylöspäin tarvitaan lisälämpöä, esimerkiksi sähkövastuksia, vaikka lämpöpumpun teho muuten riittäisi.

Rakennusten lämmitysverkostoissa käytetyt lämpötilatasot ovat vaihdelleet vuosikymmenten aikana, seuraavassa esimerkkejä. Ilmoitetut lämpötilat ovat lämmitysverkoston mitoituksessa käytetty menoveden ja verkostosta tulevan paluuvien lämpötila mitoituslämpötilassa eli huippupakkasella.

- Vanhat öljylämmitykselle mitoitettut verkostot, mitoituslämpötilat 80/60°C. Eivät sovellu käytännössä lainkaan sellaisenaan lämpöpumppukäyttöön, ovat onneksi harvinaisia ja useimmiten modifioitavissa lämpöpumppukäyttöön
- Pitkään käytössä ollut yleismitoitus 70/40°C, yleinen kaukolämpöaloissa, soveltuu yleensä lämpöpumppukäyttöön varsinkin, kun lämpöpumppu osatehomitoitetaan
- Uuden kaukolämpöohjeen K1 mukainen mitoitus uudistaloissa johtaa käytännössä jopa tasolle 50/30°C, soveltuu erinomaisesti lämpöpumppukäyttöön, vastaa lämpöpumpun kannalta käytännössä lattialämmitystä.
- Sen sijaan lämpimän käyttöveden lämpötilavaatimuksia on viime aikoina nostettu, lähtevän veden lämpötilan tulee olla käytännössä +58 ja kierrosta palaavan jopa +55°C.

2.3 Kokonaiskäyttötalous

Kokonaiskäyttötalouteen vaikuttaa lämpökertoimen lisäksi olennaisesti lämpöpumpun teho- ja energiakattavuus, jotka riippuvat seuraavista päätekijöistä:

- Lämpöpumpusta todellisissa käyttöolosuhteissa saatava lämmitysteho (taulukko 1) suhteessa lämmityskuormaan
- Lämpötilan tuottokyky suhteessa lämmitysverkoston lämpötilavaatimuksiin
- Järjestelmän käytettävyys.

Teho- ja energiakattavuudella voi olla jopa lämpökerrointa suurempi merkitys kokonaiskäyttötalouteen, koska tarvittavan lisäenergian todellinen hinta voi olla moninkertainen (jopa kymmenkertainen) verrattuna lämpöpumpun tuottaman lämmön hintaan. Esim. yritysten käyttämästä sähkönsiirrosta veloitetaan lähes poikkeuksetta todellisesta käytöstä riippuva tehomaksu, jota peritään yleensä seuraavan puolen vuoden ajan suurimman mitatun tehon mukaan. Tämä tehomaksu voi nousta merkittävästi, mikäli lämpöpumppulämpöä joudutaan korvaamaan suoralla sähkölämmityksellä.

Energioiden hintasuhteet ja hintarakenne (esim. tehomaksujen osuus) johtavat tietynlaiseen mitoitusoptimiin, jossa pääoma- ja käyttökustannusten summa saavuttaa miniminsä. Nykyisillä hintasuhteilla esim. uusien asuinrakennusten maalämpöjärjestelmien optimaalinen mitoitusaste on noussut varsin korkeaksi, 70 .. 100 % tehosta ja 95..100 % energiasta.

2.4 Rakennusten lämpökuormien luonne

Erityyppisten ja ikäisten rakennusten lämpökuormien profiili eli lämpökuorman ajallinen jakautuminen vuoden ja vuorokauden aikoina vaihtelee merkittävästi ja kuormaprofiili tulee aina ottaa huomioon lämpöpumppujärjestelmän suunnittelussa ja mitoituksessa.

Asuntorakennuksissa lämmityksen aiheuttama kuorma riippuu lähes pelkästään ulkolämpötilasta ja käyttöveden lämmityskuorma asukkaiden määrästä. Kuormaprofiili on tasaisempi, helpommin ennustettava ja tehon tarve suhteessa lämmön tarpeeseen pieni, jolloin huipputehon käyttöaika on pitkä (= kokonaislämmön tarve/huipputeho), luokkaa 2500 .. 3000 h/v ja lämpöpumppu voidaan mitoittaa taloudellisesti perustellusti jopa 100 % teholle varsinkin uudiskohteissa, joissa lämpötilatasot ovat matalat.

Toisen ääripään muodostavat rakennukset, joissa lämpökuorma muodostuu käytön mukaan. Tällaisia ovat esim. liiketilat, joissa käyttöaikana joudutaan käyttämään suuria ilmanvaihtomääriä ja lämpökuorma muodostuu tuloilman lämmittämisestä. Muuna aikana lämmitystarve voi olla minimaalinen. Tällaisissa kohteissa lämmityksen huipun käyttöaika voi jäädä jopa alle 1000 h/v.

Käsityksen saamiseksi todellisista kuormaprofiileista seuraavassa kohdassa on tarkasteltu kolmen esimerkkikohteen kuormaprofiileja.

3 ESIMERKKIKOhteiden KUORMAPROFIILIT

3.1 Lämmityskuormat

Esimerkkikohteista on saatu tuntitehotiedot vuodelta 2016 Hyvinkään Lämpövoima Oy:ltä. Kohteiden oletetaan edustavan tyypillisiä alueen kohteita.

Taulukkoon 2 on koottu pääkulutustiedot:

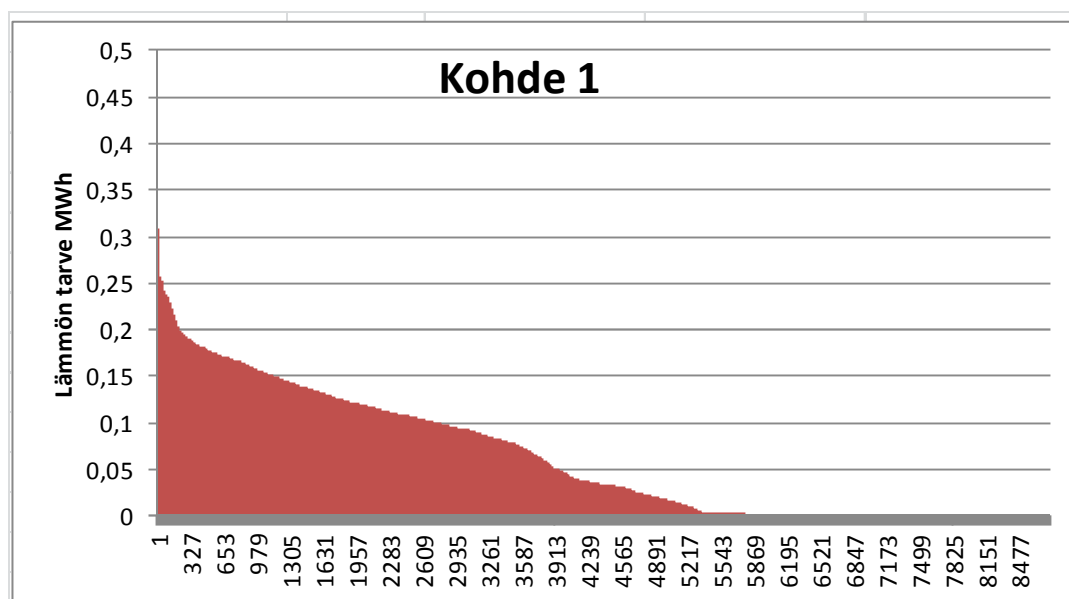
Taulukko 2 Esimerkkikohteiden lämmön kulutus vuonna 2016

Kohde		Kohde 1	Kohde 2	Kohde 3
Lämmön kulutus	MWh	544	650	792
Huipputeho	kW	308	460	515
Minimiteho	kW	0	10	2
Keskiteho	kW	62	74	90
Huipun käyttöaika	h/v	1766	1414	1537

Taulukon ensimmäisellä rivillä on mitattu kaukolämmön kokonaiskulutus, toisella suurin mitattu kaukolämmön tuntiteho, kolmannella minimiteho, neljännellä keskiteho ja lopussa huipun käyttöaika, joka lasketaan jakamalla energiamäärä huipputeholla.

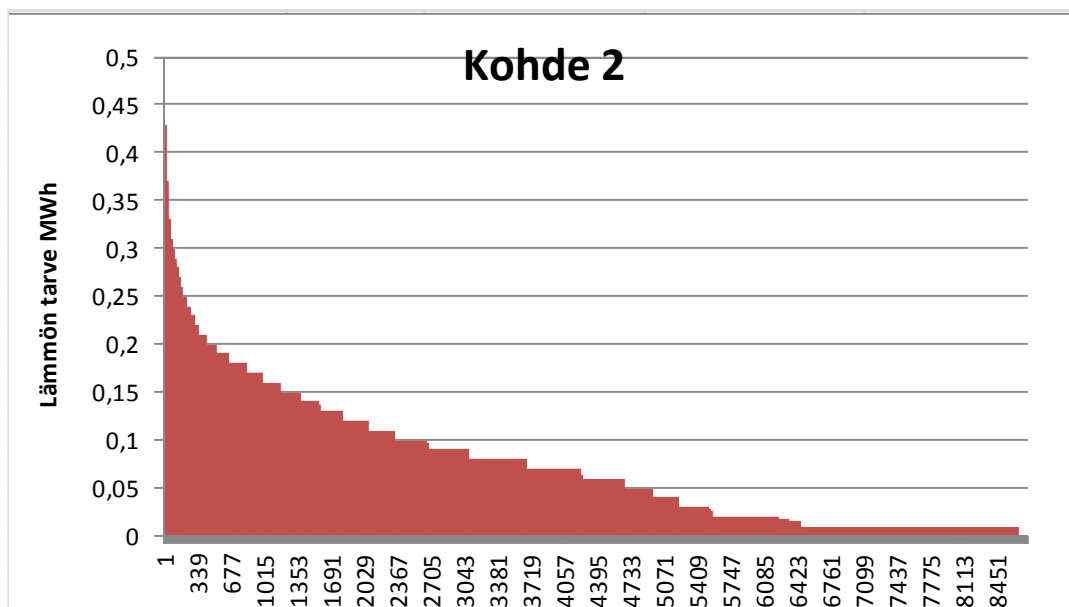
Esimerkkikohteiden huipun käyttöajat ovat suhteellisen lyhyet, luokkaa 1500 h/v, kun asuintaloissa vastaava luku voi olla luokkaa 3000 h/v. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että yhtä paljon lämpöä (MWh/v) kuluttavaan asuintaloon riittäisi puolta pienempi lämmitysteho/lämmityslaite.

Toinen erityinen piirre on pieni tai olematon minimiteho, mikä johtuu siitä, että kohteissa ei ole käytännössä mitään muuta lämpökuormaa lämpimänä aikana käyttöaikojen ulkopuolella kuin käyttöveden kierto. Tämäkin kuorma puuttuu, mikäli lämmin käyttövesi tuotetaan paikallisesti sähkövaraajilla tai lämmitys lopetetaan kokonaan. Tämä näkyy selvästi varsinkin kohteen 1 pysyvyyskäyräprofiilissa, jossa nollakuormaa on peräti 4 kk/v. Vastaavan kokoisessa asuintalossa on jatkuva käyttövesikuorma ja käyttöveden kierron aiheuttama kuorma, jonka suuruus voi olla jopa 10..15 kW eli moninkertainen verrattuna esimerkkikohteisiin.



Kuva 3a Pienin kohde, huippu 300 kW, käytön aikainen kuorma tasaisin, mutta lämpökuorma nolla noin 4 kk/vuodessa

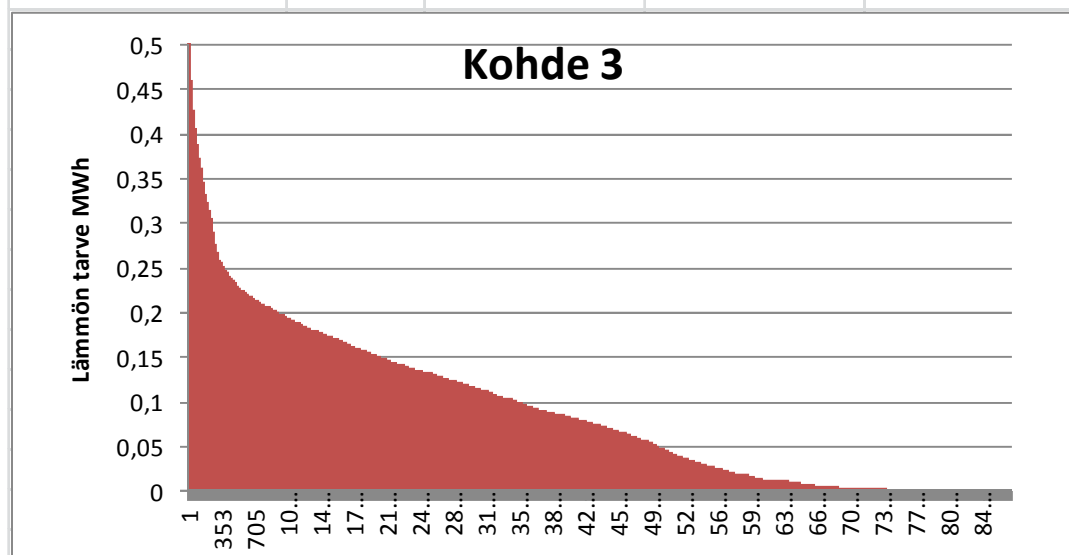
Esimerkkikohteista on laskettu tuntidatan perusteella lämmöntarpeen pysyvyyskäyrät järjestämällä tuntitehot suuruusjärjestykseen. Kuvista näkyy selvästi näiden kohteiden tehopainotteisuus suurena huipun kapeutena ja korkeutena.



Kuva 3b

Kohteessa 2 on jyhyin huipun käyttöaika, alle 1400 h/v.

Kohteen minimikuorma on muita suurempi, n. 10 kW.



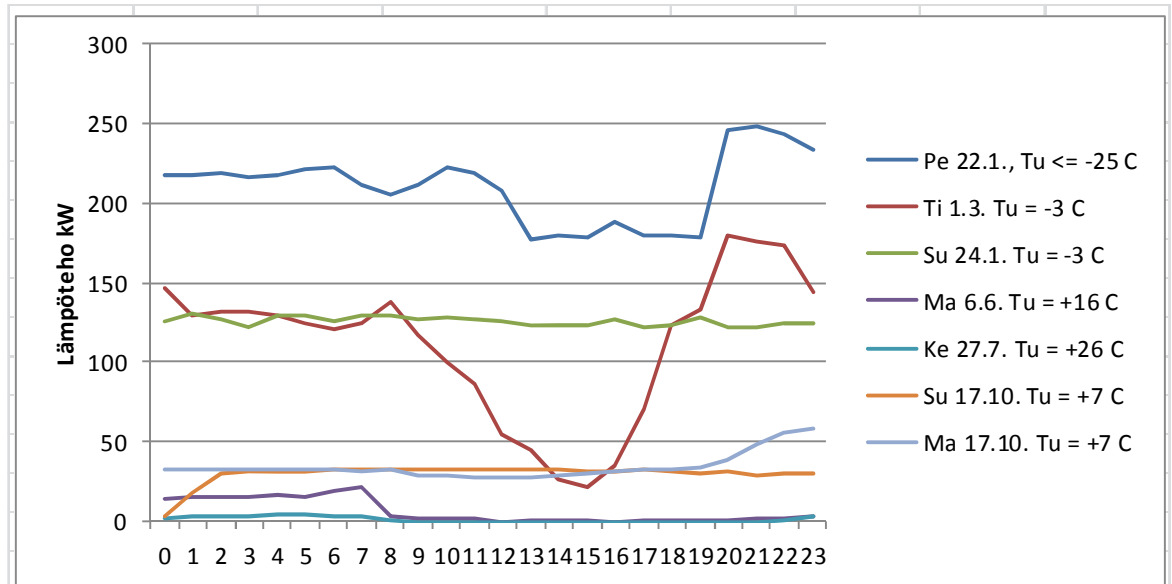
Kuva 3c

Kuten kohde 2, mutta minimikuorma lähes nolla

Suuret kuormavaihtelut

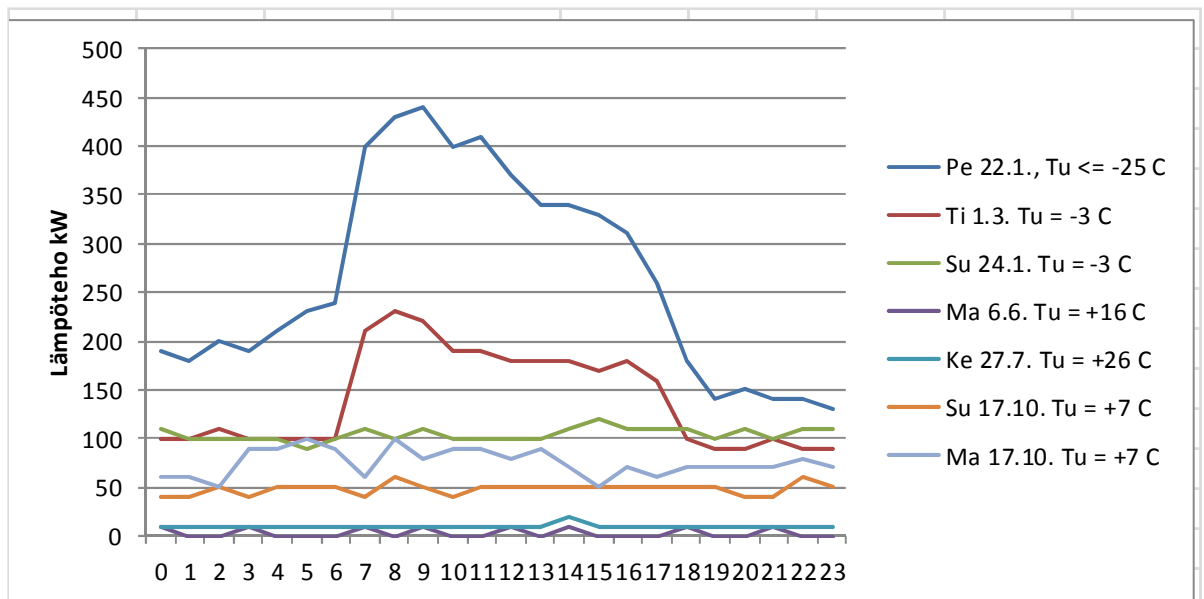
Kolmas erityinen piirre ovat suuret kuormavaihtelut arkipäivän ja muun ajan välillä. Kuviin 4a-4c on poimittu muutama tyyppivuorokausi eri vuodenaikoina.

Ensimmäisessä kuvassa oleva kohteen 1 kuormaprofiili on selvästi muista poikkeava, koska työpäivien aikainen lämmitystarve on pienempi kuin muiden tuntien syynä esimerkiksi tuotannon aiheuttamat sisäiset lämpökuormat.



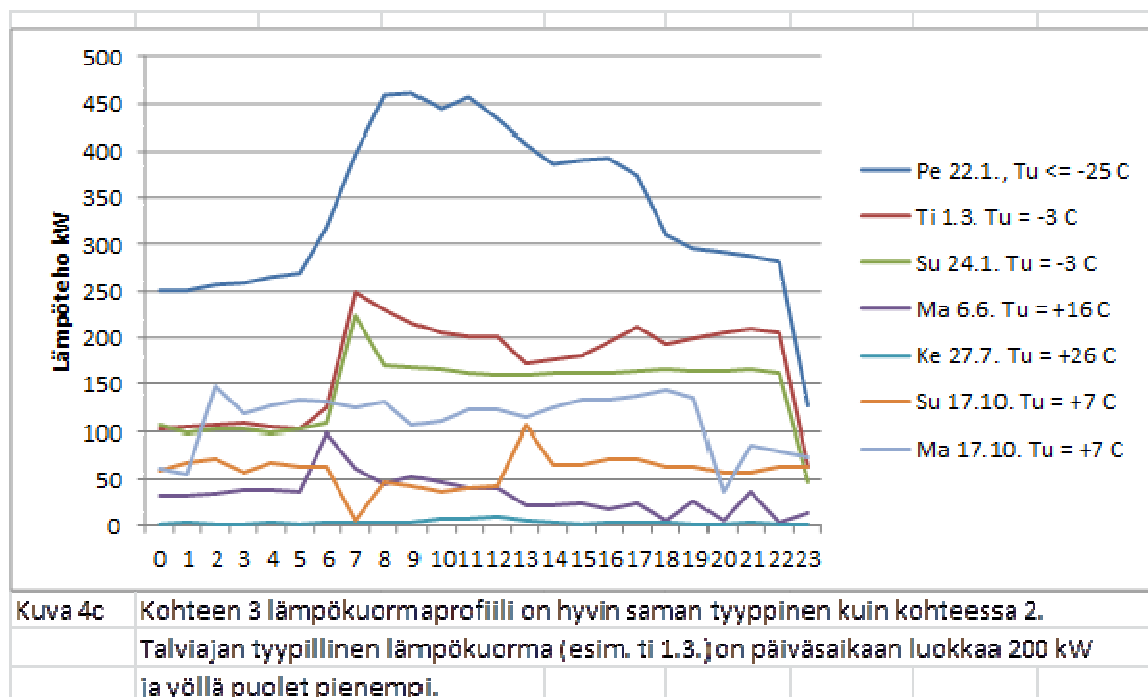
Kuva 4a Kohteen 1 lämpökuormaprofiili on muista poikkeava, koska työpäivien aikainen lämmön täre on pienempi kuin muun ajan, syynä lienee tuotantoon liittyvät suuret sisäiset lämpökuormat, jotka pienentävät ulkopuolista lämmitystarvetta.

Kuvassa 4b on kohteen 2 vuorokausiprofiilit, jotka ovat melko tavanomaiset ja joissa näkyy selvästi käyttöaikaisen suuren ilmanvaihtotarpeen vaikutus.



Kuva 4b Kohteen 2 vuorokausiprofiileissa näkyy suuri kuormavaihtelu, jonka pääasiallisena syynä lienevät suuret käyttöaikaiset ilmanvaihtotarpeet.

Kohteen 3 vuorokausiprofiili on hyvin saman tyyppinen kohteen 2 kanssa.



Lämpökuormaprofiileista voidaan vetää seuraavat johtopäätökset, jotka vaikuttavat talokohtaisten lämpöpumppulaitosten jatkossa "Kuluttajalaitos" suunnitteluun:

- Suuret kuormavaihtelut, mitkä edellyttävät kuluttajalaitokselta erittäin hyvää säädettävyyttä
- Suuret huipputehon tarpeet, mutta hyvin pienet minimikuormat, jolloin ei ole mahdollista päästä pitkään huipun käyttöaikaan ja investointivaltaisen tekniikan saaminen kannattavaksi aiheuttaa jonkin verran haasteita
- Esimerkkikohteissa hyvin pienet käyttöveden tarpeet, jolloin käyttöveden tuotantojärjestelmästä ei kannata tehdä monimutkaista ja kallista.

3.2 Jäähdytyskuormat

Lämpöpumppu soveltuu periaatteessa yhtä hyvin myös jäähdytyksen kuin lämmön tuotantoon ja suurkohteissa lämpöpumppuja ja/tai maapiiriä käytetään lähes aina myös jäähdytyksen tuotantoon. Maalämpöjärjestelmissähän maapiiristä saatavaa jäähdytystä voidaan hyödyntää suoraan jäähdytykseen, mutta tässä tapauksessa energiaväylän lämmintä vettä ei sellaisenaan pystytä hyödyntämään ellei lämpötilaa säädetä alemmas.

Esimerkkikohteissa ei kuitenkaan ole ilmoitettu olevan merkittäviä jäähdytyskuormia, joita kannattaisi liittää lämpöpumppukeskukseen.

Jäähdytystoiminnon lisääminen lämpöpumppukeskukseen on täysin mahdollista, mutta se lisää tässä tapauksessa laitoksen monimutkaisuutta ja tilantarvetta suhteellisen paljon, joten tästä täytyy saada selvä taloudellinen hyöty, jotta lisätoiminnolle saataisiin kannattavuutta.

4 KOKO JÄRJESTELMÄN YLEISKUVAUS

Tässä työssä painotutaan kuluttajapään ratkaisuihin, joten koko järjestelmää on käsitelty hyvin karkealla ja alustavalla tasolla.

Energiaväylä käsittää periaatteessa samat toiminnot ja pääosat kuin perinteinen kaukolämpöjärjestelmä. Peruserona on se, että osa lämmön tuotannosta tapahtuu asiakaskiinteistöjen yhteydessä lämpöpumppulaitteilla.

Seuraavassa on käyty läpi lyhyesti järjestelmän pääosat ja erot kaukolämpöön.

4.1 Lämmön tuotanto

Energiaväylään on tarkoitus syöttää matalalämpötilaista ylijäämälämpöä, joka muutetaan hyödyntämiskelpoiseen korkeampaan lämpötilaan kuluttajien kiinteistöjen lämpöpumppulaitoksilla.

Tässä tapauksessa peruslämpö on tarkoitus ottaa talteen paikallisen lasivillatehtaan prosessin poistokaasupesurin esipuhdistetusta kiertovedestä.

Saatujen lähtötietojen perusteella pesuriveden lämpötilataso on nykyään kesällä hiukan yli 30°C ja talvella hiukan alle. Lämmön talteen otto pesurivedestä laskee lämpötilatasoa noin 1°C/300 kW lämmön talteenottotehoa, jolloin 3 MW lämmön talteenotto laskisi lämpötilatasoa noin kymmenellä asteella (muutokseen vaikuttaa todellisuudessa useita tekijöitä, joten todellinen lämpötilavaikutus tulisi selvittää erikseen).

Pesuriveden ja energiaväylän väliin tarvitaan lämmönsiirrinasema, jossa vielä epäpuhtauksia sisältävästä pesurikierron vedestä siirretään lämpö puhtaaseen energiaväylän veteen tai mietoon lämmönsiirtoliuokseen (esimerkiksi etanoliliuos). Lämmönsiirrinasema voidaan mitoittaa 2..3 K lämpötilaerolle.

Tarkat lämpötilatasot eivät ole tiedossa, mutta oletus tässä vaiheessa on, että energiaväylässä käytettävät lämpötilatasot määräytyvät käytännössä lämmön talteenottoprosessin asettamisen reunaehtojen mukaisesti.

Tarkempien tietojen puuttuessa tässä vaiheessa on tehtävä oletamus, jonka mukaan energiaväylässä käytettävissä oleva talviaikainen lämpötilataso mitoitustilanteessa olisi meno +25°C ja paluu +15°C. Todelliset, kuormituksesta ja vuodenajasta riippuvat lämpötilatasot tulisi selvittää erikseen.

Koska kustannuksia syntyy myös sekä siirrossa, että asiakaspäässä, tämän hukkalämmön hinnan tulisi olla erittäin matala.

Tämän peruslämmön käytettävyyden tulisi olla lisäksi 100 %, koska kuluttajapäähän voidaan rakentaa varakapasiteettia hyvin rajallisesti. Lisä/varakapasiteetin hankkimiseen voisi olla kohtuulliset edellytykset, koska alueella syntyy tai on saatavissa useita mahdollisia materiaali- ja energiavirtoja.

4.2 Siirtoverkosto

Siirtoverkosto on perusmuodossaan kaksiputkinen, kuten kaukolämpökin. Erona perinteiseen kaukolämpöön huomattavasti matalampi lämpötilataso ja siirrossa käytettävä pieni lämpötilaero. Perinteisessä kaukolämpöverkostossa menoveden lämpötila voi olla korkeimmillaan 120°C ja jäähtymä kuluttajalaitteissa luokkaa 50..70°C, jolloin paluuv veden lämpötila vaihtelee tasolla 40 ..60°C.

Energiaväylän lämpötilatasot tulisi optimoida tuotannon ja kuluttajalaitteiden vaatimusten kompromissina. Lämpöpumppujen kannalta lämpötilatasoa pitäisi nostaa talvella, koska lämpöpumpuista saataisiin enemmän tehoa paremmalla hyötysuhteella. Lämmön talteenoton kannalta tilanne on taas päinvastainen, joten käytännössä energiaväylän lämpötilataso laskee talvella ellei lämpötilaa nosteta jälkilämmittämällä pesurilta lähtevää vettä/ lämmönsiirtoliuosta sopivalla lisälämmitysjärjestelmällä, mutta tämä lisää sekä käyttö- että investointikustannuksia.

Tässä tapauksessa kuitenkin lämmön talteenotto prosessin oletetaan määräävän täysin sen, millaisia lämpötilatasoja on mahdollista käyttää ilman energiaväylän lämpötilan talviaikaista lisälämmitystä.

Tuntematta tarkemmin mahdollisuuksia vaikuttaa lämmön talteenotto prosessiin verkoston mitoitusta määrääväksi jäähtymäksi on oletettu tässä vaiheessa 10°C, jolloin tarvittava virtaama nousisi moninkertaiseksi vastaavan tehoiseen kaukolämpöön nähden. Virtaamaa voitaisiin pienentää talvella esimerkiksi priimaamalla energiaväylän menoliuosta.

Toisaalta matalat lämpötilatasot antavat mahdollisuuden käyttää siirtoverkostossa PE-muoviputkea (polyeteeni), johon perustuva siirtokanava on vastaavan kokoisena selvästi perinteistä teräksistä kaukolämpökanavaa edullisempaa rakentaa.

Mikäli verkoston materiaalina käytetään PE-putkea, suurin jatkuva käyttölämpötila saa olla +45°C, mutta lyhytaikaiset reilutkin ylitykset ovat mahdollisia. Putkistoa suunniteltaessa on otettava huomioon PE-materiaalin suuri lämpölaajenemiskerroin (15 x teräs).

Energiaväylän lämpötilatasoa voidaan myös säätää kesällä alaspäin, mikäli esimerkiksi väylän paluuvettä halutaan käyttää myös suoraan jäähdytykseen. Tällöin jäähdytyksestä saatavan kokonaishyödyn tulisi olla suurempi kuin lämpötilan alentamisen aiheuttama hyötysuhteen lasku. Lämpötilatasojen optimointia kannattaa kuitenkin tarkentaa mahdollisissa jatkoselvityksissä.

Siirtoverkoston pumppaus on käytännössä keskitettävä peruslämmön tuotantopaikalle ja pumppausta säädettävä siten, että kauimmaisella kuluttajalla on käytössään riittävä, noin 50 kPa:n paine-ero.

4.3 Kuluttajalaitteet

Kaukolämmön kuluttajalaitteet muodostuvat lämmönjako- ja mittauskeskuksesta. Ytimen muodostavat lämmönsiirtimet, joissa ensiöpuolen kuuma (kuluttajapäässä max. 115°C) ja korkeapaineinen kaukolämpövesi luovuttaa lämpöä huomattavasti matalammassa lämpötilassa ja paineessa toimivaan kuluttajan lämmityspiiriin. Lämmönsiirtimiä on aina vähintään 2 kpl – lämmitykselle ja käyttövedelle, suuremmissa rakennuksissa voi olla useampia, esim. patteripiirille ja ilmanvaihtopiirille omansa. Myös rakennusten sisäisten verkostojen lämpötilan pääsääätö tapahtuu kaukolämmön jakokeskuksessa. Energiaväylässä kaikki nämä toiminnot korvataan kuluttajalaitoksella, joka siis perustuu lämpöpumpputekniikkaan. Tarkempi kuvaus seuraavassa kohdassa 5.2.3.

5 KULUTTAJAPÄÄN LÄMPÖPUMPPUKESKUS

5.1 Järjestelmän suunnittelun yleisiä lähtökohtia

Lämpöpumput perustuvat samaan prosessiin kuin jäädytyskoneet ja myös käytettävät komponentit ovat pääosin samoja. Eri komponenttien (kompressorit, lämmönsiirtimet, paisuntaventtiilit jne) ja väliaineena käytettävien kylmäaineiden kirjo on niin laaja, että tämä mahdollistaa hyvin joustavasti erilaisten tarpeiden hoitamisen, kunhan järjestelmä suunnitellaan ja laitteet valitaan oikein.

Ensimmäisenä lähtökohtana on suositus siitä, että laitteisto perustuisi yleisesti saatavissa oleviin, tunnettuihin ja hyväksi koettuihin avainkomponentteihin seuraavien perustein:

- Komponentit ovat edullisempia ja nopeasti ja laajasti saatavissa
- Komponenttien ominaisuudet ovat tiedossa ja niistä on kokemusta
- Osaavaa huoltopalvelua on tarjolla enemmän ja halvemmalla
- Riskit saadaan paremmin hallintaan.

Tämä tarkoittaa käytännössä esimerkiksi yleisesti saatavissa olevan, tunnetun kompressorityypin valintaa lämpöpumpun ytimeksi.

Toinen lähtökohta on se tosiasia, että tähän tarkoitukseen soveltuvaa käyttövalmista tuotesarjaa ei ole markkinoilla, vaan laitokset joudutaan ja myös kannattaa suunnitella ja tuotteistaa tämän tyyppistä käyttöä varten erikseen. Esimerkkinä sarjatuotantolaitteiden rajallinen lämpötilan tuottokyky ja rajoitukset lämmön lähteen maksimilämpötilan suhteen.

Markkinoilla on maalämpökäyttöön soveltuvia, pienen ja keskikokoluokan laitteita ja järjestelmiä tarjolla todella runsaasti, mutta tästä huolimatta suurten kohteiden maalämpöjärjestelmät ja laitteet joudutaan ja kannattaa suunnitella yksilöllisesti lämpöpumppuyksiköjä myöten. Tältä puolelta on saatavissa runsaasti ja pitkäaikaista kokemusta, jota voidaan hyödyntää myös energiaväylätyyppisissä kohteissa.

Kolmas lähtökohta on yksinkertaisuus, josta seuraa käytön helppous ja myös pienempi tilantarve. Lämpöpumppujärjestelmästä on mahdollisuus tehdä huipputehokas jakamalla prosessi useaan eri lämpötilatasoon ja hyödyntämällä kylmäprosessin eri vaiheita (tulistus, lauhtuminen, alijäähtyminen jne), mutta kääntöpuolena on monimutkainen järjestelmä, suuri tilantarve, liitäntäputkien määrän lisääntyminen ja kalliimpi investointikustannus. **Lähtökohdaksi on otettu tässä vaiheessa kytkeytyminen asiakaskohteeseen kaukolämmön tavoin kahdella putkella.**

Laitoksiin tulee olla mahdollisuus lisätä tarvittaessa erilaisia lisätoimintoja, kuten konejäädytys ja ylijäämälämmön syöttäminen energiaväylään. Kyseiset toiminnot ovat lisättävissä järjestelmään yleensä suhteellisen pienin lisäinvestoinnein.

Lisätietoa kohdassa 5.2.4. jossa käsitellään järjestelmien hankintaa.

5.2 Kuluttajalaitteiston vaatimuksista ja kokoonpanosta

5.2.1 Kompressor

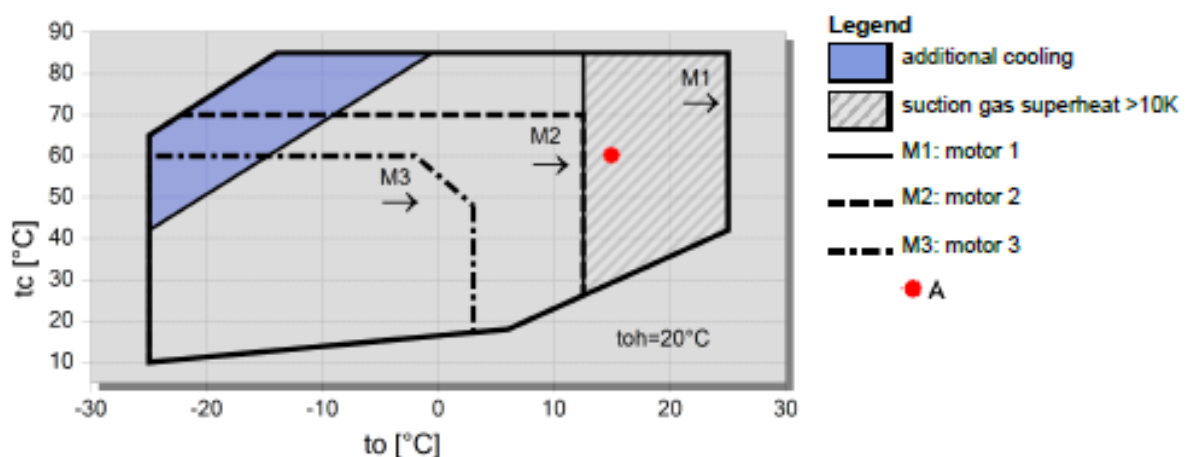
Energiaväylässä vaaditaan korkeaa lämpötilatasoa sekä lämmön lähteen puolella eli lämpöpumpun höyrystinpuolella että lämmön tuotannon puolella, jossa korkeimmat vaadittavat tuottolämpötilat ovat 70..75°C luokkaa. Järjestelmän osista kompressor ja kylmäaine muodostavat keskeisimmän lämpötilatasoihin vaikuttavan tekijäkokonaisuuden.

Näistä lähtökohdista paras kompressorityyppi voisi olla perinteinen mäntäkompressor seuraavin perustein:

- Soveltuu käytettäväksi vaadittavalle lämpötila-alueelle R134a-kylmäaineen kanssa (kuva 5). Huom. R134a-kylmäaineen käyttöä ei ole rajoitettu, mutta markkinoille ollaan tuomassa korvaavia kylmäaineita, joiden kasvihuonevaikutus on selvästi pienempi tai nolla, joten myös tällaista korvaavaa kylmäainetta voidaan jatkossa käyttää.
- Erittäin laaja tarjonta ja mallisarja, eniten käytetty, koettu kompressorityyppi
- Tehonsäätöalue venttiilikansisäädöllä jopa 10 ... 100 % tai taajuusmuuttajalla 50..140 %

Haittapuolena voisi pitää käyntiääntä verrattuna esimerkiksi pienissä ja keskisuurissa lämpöpumpuissa nykyisin yleisiin epäkeskeisesti liikkuviin kierukoihin perustuvaan scroll-kompressorin. Kompressorityyppi ei ole missään nimessä ehdoton, vaan myös muuta tyyppiä voidaan käyttää, jos toimittaja voi varmistaa sen yleisen saatavuuden ja soveltuvuuden vaadittuihin olosuhteisiin.

Application Limits 100%



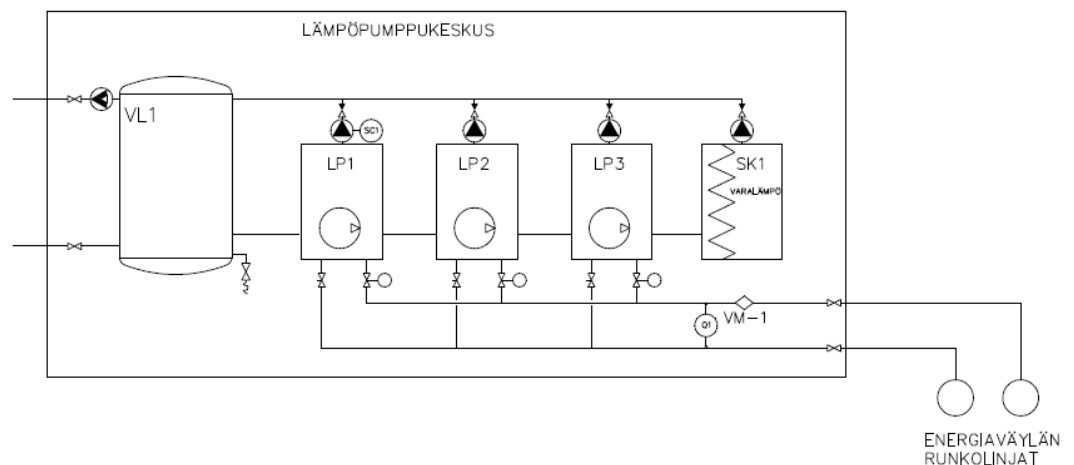
Kuva 5

Esimerkki R134a-kylmäaineella toimivan mäntäkompressorin sallitusta käyttöalueesta, joka on hyvin laaja ja riittää hyvin energiaväylän olosuhteissa. Vaaka-akselilla höyrystyslämpötila ja pystyakselilla lauhtumislämpötila, joka mahdollistaa parhaimmillaan jopa yli 80-asteisen veden tuotannon tosin hyötysuhteen kustannuksella.

5.2.2 Ominaisuudet ja kokoonpano

Em. perustein kuluttajapään laitos voitaisiin toteuttaa seuraavin periaatein:

- Lämpöpumppukeskus mitoitettaisiin pääsääntöisesti "leikatulle" huipputeholle (lisätietoa liitteen 1 esimerkissä), koska lisälämmön tuottaminen esim. sähköllä on suhteellisen kallista ja lisää tuntuvasti kohteen tehomaksuja. Maakaasukohteissa osatehomitoitus voi olla järkevää, koska huiput voitaneen ajaa jatkossakin kaasukattiloilla.
- Peruskokoonpanoa vastaavalla laitoksella tuotettaisiin kaikki lämmitys ja kaikki tai osa lämpimästä käyttövedestä tapauksesta riippuen (pienen käyttövesikuorman tapauksissa osa käyttövedestä kannattaa tietyissä tapauksissa tuottaa sähköllä, koska näin päästään parempaan kokonaistalouteen).
- Laitoksen peruskokoonpano sisältäisi seuraavat laitteet (ks. periaatekuva):
 - o Puskurivaraaja tehonsäädön helpottamiseksi ja minimikuormatilanteita varten
 - o Lämpöpumppuyksiköitä 2 – 4 kpl riippuen teholuokasta, näistä 1 -2 varustettaisiin tehonsäädöllä
 - o Lisäksi tarvittaessa sähkökattila varalämmitystä varten, kattilan sähköteho vastaisi maksimissaan kompressorien yhteistä sähkötehon tarvetta eli olisi noin $\frac{1}{4}$ lämpöpumppukeskuksen nimellistehosta
 - o Putket ja oheislaitteet, kuten pumput, venttiilit ja säätöventtiilit
 - o Laitosautomaatiikka, joka säätelee laitoksen tehoa ja lämpötilaa (näennäisestä yksinkertaisuudesta huolimatta automaation "fiksuus" vaikuttaa olennaisesti laitoksen toimivuuteen ja käyttötalouteen eli tähän kannattaa panostaa). Lisäksi lämpöpumppujen paisuntaventtiilien säädöltä vaaditaan normaalia enemmän ylikorkeiden höyrystymislämpötilojen hallitsemiseksi. LP-keskukset tulee olla kytkettävissä etävalvontaan ja -käyttöön.
 - o Sähkökeskus, johon sekä kompressorit, pumput ja moottoriventtiilit kytkettäisiin.
- Lämpöpumppujen kytkentään on useita eri vaihtoehtoja ja kytkentöjä optimoimalla voidaan maksimoida lämpökerrointa ja säädettävyyttä. Kuvan "rinnankytkentä" on periaatteellinen eikä sitä saa sellaisenaan käyttää toteutuksissa.



Kuva 6 Lämpöpumppukeskuksen periaatekuva (ei saa käyttää toteutuksissa), lämpöpumppuyksiköiden lukumäärä ja kytkentä varioidaan kohteen mukaan.

- Laitteet sijoitettaisiin joko erilliseen, tehdasvalmiiseen ulkokonttiin tai sisälle asennettuna tehdasvalmiiseen laitekehikkoon.

5.2.3 Liitäntä kuluttajalaitteisiin ja käyttö

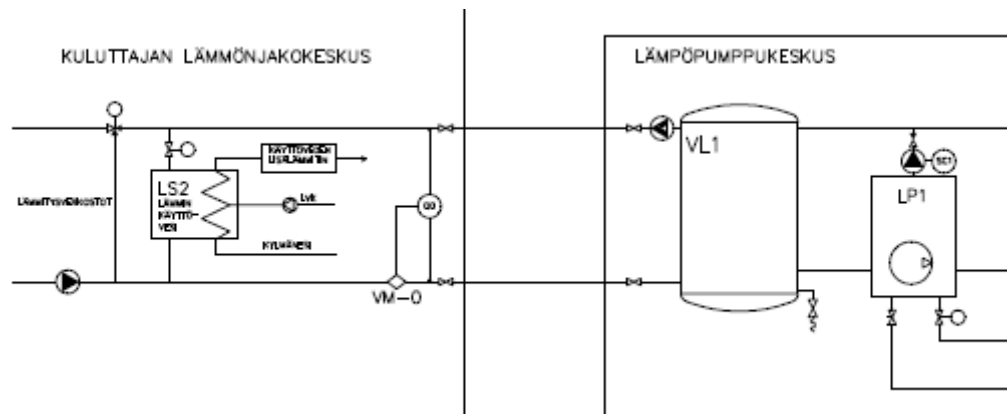
Kuluttajapään kytkentään on useita eri vaihtoehtoja ja toimivin kytkentä kannattaa lähtökohtaisesti selvittää tapauskohtaisesti. Useimmissa tapauksissa helpoin ja edullisin tapa on kytkeä lämpöpumppukeskus nykyisiin kaukolämmön talojohtoihin, jolloin myös nykyistä mittauskeskusta voidaan hyödyntää entisellä tavalla. Talojohtojen dimension riittävyys on kuitenkin varmistettava ottaen huomioon lämpöpumppukeskuksen sijoituspaikka, koska virtaamat kasvavat pienentyneen lämpötilaeron vuoksi.

Lämmönsiirrinten lämpötilahäviön takia lämmityksen lämmönsiirrin kannattaa yleensä ohittaa ja kytkeä lämmitysverkostot suoralla kytkennällä lämpöpumppukeskukseen.

Lämmin käyttövesi voidaan tuottaa olemassa olevalla lämmönsiirtimellä, mutta lämmönsiirrinkapasiteetti tulee tarkistaa ja tarvittaessa lisätä, jotta käyttövettä voidaan tuottaa mahdollisimman pienellä lämpötilaerolla.

Joissain tapauksissa lisäksi kannattaa asentaa sähkölämmiteinen priimausvaraaja, joka ikään kuin vaihtaa käyttöveden lämpötilan riittävyttä eri tilanteissa ja mahdollistaa lämpöpumppukeskuksella tuotettavan lämpötilan tilapäisen alentamisen tilanteissa, joissa lämpöpumpun hyötysuhteen paraneminen kompensoi käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan lisäsähkön kulutuksen.

Kohteissa, joissa on erityisen suuri käyttövesikuorma, käyttöveden lämmitys tulee suunnitella erikseen ja integroida tarvittaessa lämpöpumppukeskukseen.



Kuva 7 Periaatteellinen kytkentäesimerkki kuluttajan lämmönjakokeskukseen lähtökohtana lämpöpumppukeskuksen kytkentä nykyisiin kaukolämmön talojohtoihin

Peruskäyttötavaksi on oletettu sellainen, jossa järjestelmän tehoa säädetään kuormien mukaan ja lämpötilaa lämpimän käyttöveden mitatun menolämpötilan mukaan muutoin paitsi silloin, kun verkoston menoveden lämpötilapyynti ylittää käyttöveden lämpötilan (käytännössä lämpötilan alittaessa -20°C). Todellinen käyttötapa on selvitettävä kuluttajakohtaisesti ja otettava huomioon keskuksen suunnittelussa/varustuksessa.

Keskuksen käyttämä sähkö on otettava rakennuksen omasta sähköliittymästä, jolloin sähköliittymän ja sähköpääkeskuksen kapasiteettia on tarvittaessa nostettava lämpöpumpun aiheuttaman sähkötehon lisäyksen verran. Tämä voi olla merkittäväkin kustannus, joten se tulee selvittää etukäteen ja ottaa huomioon kokonaisuuden suunnittelussa.

Lämpöpumppukeskus vaatii varsinkin alussa enemmän käyttöoperointia kuin kaukolämpö-keskus. Laitos on oikeasti otettava käyttöön ja säädettävä käyttökuntoon yksilöllisesti, minkä jälkeen laitos on saatavissa toimimaan täysin automaattisesti. Erilaisia käyttöhäiriöitä esiintyy toki aika ajoin, kuten kaikissa teknisissä järjestelmissä. Yksi operointitapa voisi olla sellainen, että kaikki lämpöpumppukeskukset otettaisiin koko järjestelmän operaattorin kaukovalvonnan piiriin ja niitä käytettäisiin osana järjestelmäkokonaisuutta.

5.2.4 Laitteiden ja järjestelmien hankinnasta

Kohdassa 5.1 käsiteltiin alustavasti energiaväylän kuluttajapään järjestelmien suunnittelulähtökohtia. Vaatimukset voisi vetää yhteen siten, että lämpöpumppukeskuksesta tulisi saada **hinnaltaan edullinen, mutta energiatehokas, muuntojoustava, käyttövarma ja helpokäyttöinen**.

Vaatimukset ovat melko kovat ja tietyllä tavalla ristiriitaiset. Kylmä- ja lämpöpumpputekniikka on toisaalta siinä mielessä ainutlaatuista, että se mahdollistaa tietyn asian toteuttamisen käytännössä lukemattomalla eri tavalla varioiden kytkentoja, mitoituksia, kylmäprosessia, kylmäainetta, pääkomponentteja, käyttötapoja jne. Tämä näkyy myös käytännön lämpöpumppukohteissa, joista parhaimmat toimivat huippuluokan käyttötaloudella ja epäonnistuneet laitokset eivät toimi lainkaan (heikoin lenkki dominoi).

Kaiken perustan muodostaa hyvän yleiskonseptin luominen, jota voidaan helposti varioida ja monistaa eri kokoluokkiin. Tästä löytyy hyviä esimerkkejä maalämpöjärjestelmistä, joista eri konseptien toimivuudesta on saatu kokemuksia jopa vuosikymmenten ajalta (ensimmäiset suuret järjestelmät rakennettu 80-luvun alkupuolella, osa käytössä edelleen).

Tässä tapauksessa suositellaan esimerkiksi menettelytapaa, jossa valittuun (yksi tai useampia) koekohteeseen suunnitellaan pilot-laitos taustalla ajatus, että energiaväylä olisi mahdollista toteutetaan aluksi hyvin suppeassa pilot-laajuudessa (voi olla hankalaa Sahanmäen alueella, mutta voisi onnistua jossain muualla).

Suunnittelutyö käsittää sekä lämpöpumppukeskuksen, että kuluttajaliitännän suunnittelun, koska nämä vaikuttavat olennaisesti toinen toisiinsa ja "heikot lenkit" pystytään paremmin eliminomaan. Samalla tulee määritellä energiaväylän runkoverkoston lämpötilat ja muut käyttöperiaatteet.

Hankinnan ei pitäisi olla tämän jälkeen ongelma, koska Suomestakin löytyy arviolta 5 – 10 toimittajaa, jotka pystyvät tarjoamaan ja rakentamaan vaadittavan lämpöpumppukontin suunnitelmien mukaisesti. Suunnitelmat on vietävä niin yksityiskohtaiselle tasolle, että eri toimittajien tarjoussisällöt ovat keskenään täysin yhteneväisiä. Yksityiskohtaiset rakenteet ja laitesijoitukset voi jättää usein toimittajan vastuulle.

Tällainen toimintatapa on normaalia suurten jäähdytyslaitosten tekijöille, koska käytännössä jokainen suurtoimitus joudutaan räätälöimään käyttökohteen mukaan ja laitteet asennetaan usein juuri konttiin tai valmiisiin kehyksiin perustuvaan koneikkoon, esimerkkinä vaikkapa jäähallikoneikot.

Myös suurkohteiden maalämpöjärjestelmien toimituksessa tällainen toimintatapa on käytännössä ainoa mahdollinen ja jopa lämpöpumppukoneet hankitaan tilaustyönä juuri kohteen tarpeisiin optimoituina ja toimitukset ovat onnistuneet tähän saakka erinomaisesti.

Ongelmia on tullut lähinnä sellaisissa tapauksissa, joissa hankintamäärittelyaineisto on ollut ylimalkainen tai jopa virheellinen, jolloin toimittajat ovat voineet tarjota "oman päänsä" mukaan laitteita, jotka eivät ole oikeasti vastanneet tarkoitustaan. Osa toimittajista tarjoaa lisäksi omaa vakiotuotettaan, vaikka se ei soveltuisi tarkoitukseen. Tarjoukset tulee tämän vuoksi evaluoida tarkasti ja joko pyytää toimittajaa tekemään muutokset tai hylätä väärät tarjoukset.

Hintahaarukka on ollut tällaisissa kilpailutuksissa leveä, halvin tarjous on ollut jopa puolet kalleimman hinnasta ja siitä huolimatta joskus jopa laadukkain eli kilpailuttaminen kannattaa.

6 ESIMERKKIKOHDE

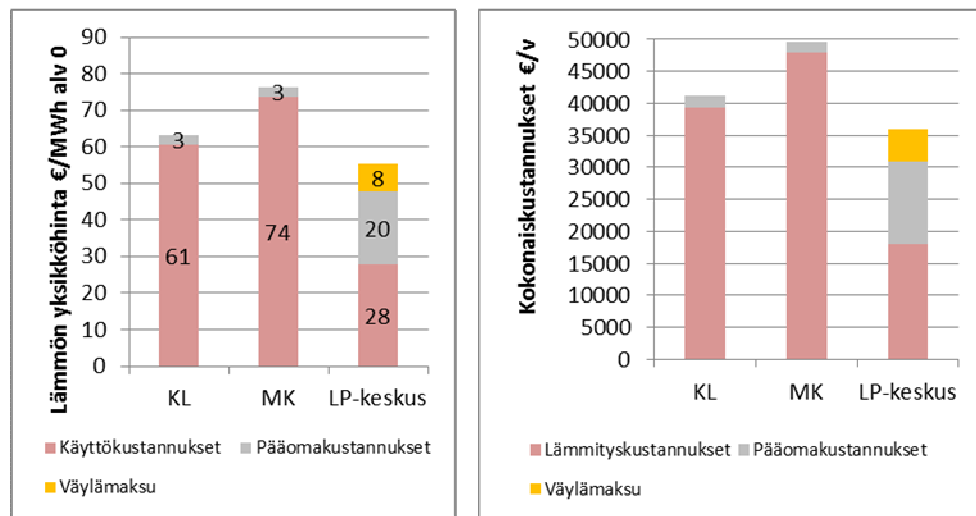
Liitteessä 1 on käyty läpi esimerkkikohteeksi valitun kohteen 2 alustava mitoitus ja taloustarkastelu. Kohde on valittu esimerkiksi, koska siinä on myös kesäaikaista kuormaa ja sen oletetaan edustavan muutenkin tyypillistä kuluttaja-asiakasta. Kohteen lämmöntarve oli

650 MWh/v ja huipputehon tarve tuntidatan perusteella 460 kW ja minimiteho noin 10 kW. Lämpimän käyttöveden kokonaistarpeeksi on arvioitu hiukan yli 100 MWh/v tuntidatan perusteella ja tästä suurin osa näyttäisi olevan lämpimän käyttöveden kierron aiheuttamaa kuormaa.

Kohteeseen on mitoitettu lämpöpumppukeskus (400 kW), laskettu sille investointiarvio (150 000 € alv 0). Tulosten mukaan kyseisessä kohteessa on päästävissä suunnilleen samaan kokonaiskustannusten tasoon kuin nykyään kaukolämmöllä ottaen huomioon lämpöpumppukeskuksen investointikustannukset ja väylämaksun (oletus 10 €/MWh).

Säästöt olisivat selvästi suuremmat, mikäli kohde olisi maakaasulämmitteinen, koska maakaasukattilaa voitaisiin käyttää jatkossakin huipputehojen ajamiseen ja lämpöpumpulla korvattava maakaasu on hiukan kalliimpaa kuin kaukolämpö.

Tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä.



Kuva 8

Esimerkkikohteen lämmityskustannukset laskettuna tehdyin lähtöolettamuksin eri vaihtoehdoille (kaukolämpö, maakaasu ja energiaväylään kytketty lämpöpumppukeskus).

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiaväylähanke on tarkoitus toteuttaa teollisuusalueella, jossa eri kuluttajien lämpökuormat ja kuormaprofiilit vaihtelevat erittäin paljon. Valittujen tarkastelukohteiden perusteella päätellen tyypillistä näyttäisi olevan lämpöenergian kulutukseen nähden korkeat huipputehon tarpeet ja hyvin pienet minimikuormat ja käyttöveden tarpeet.

Suuressa kaukolämpöverkossa yksittäisten kuluttajien kulutuskäyttäytyminen kompensoituu ja tasaantuu suureen massaan, mutta energiaväylään on tarkoitus kytkeytyä kuluttajakohtaisilla lämpöpumppukeskuksilla, jolloin yksittäisen kuluttajan kulutusprofiili ja muut teknistaloudelliset lähtökohdat on otettava tarkasti huomioon keskusta ja liitäntää suunniteltaessa.

Tämä johtaa todennäköisesti myös siihen, että erityyppisten kuluttajien liittämisen taloudellinen kannattavuus vaihtelee melko voimakkaasti. Periaatteessa parhaimpaan kannattavuuteen voitaisiin päästä kohteessa, jossa on suuri lämpökuorma (mielellään useampi GWh/v) ja maakaasulämmitys, jolloin maakaasua voitaisiin käyttää jatkossakin huipputehon tuottamiseen ja lämpöpumppukeskuksen ominaisinvestointia saataisiin alemmas ja hyötysuhdetta ylemmäs. Tämä tarkoittaa sitä, että sopivissa kohteissa olisi mahdollista saavuttaa selviä säästöjä nykytilanteeseen verrattuna ja päästä kohtuullisen hyvään kannattavuuteen. Huomattakoon, että maakaasun korvaaminen tehtaan prosessilämmön tuotannossa ei ole läheskään aina mahdollista eikä kannattavaa, joten energiaväylän lämpöpumppulämmöllä voidaan korvata lähinnä maakaasulla tehtävää tilalämmitystä.

Myös suuri jäähdystystarve olisi eduksi, koska lämpöpumppukapasiteettia voitaisiin hyödyntää myös jäähdytykseen ja ajaa lauhdelämpö energiaväylään. Korkealämpötilaisempi ylijäämälämpö on mahdollista ajaa myös suoraan energiaväylään.

Tarkastellut esimerkkikohteet osoittautuivat kannattavuuden kannalta melko haastaviksi, koska niissä on suhteellisen pienet lämmöntarpeet, mutta lämmöntarpeeseen nähden poikkeuksellisen suuret huipputehon tarpeet ja pienet tai olemattomat minimitehön tarpeet. Toki myös Hyvinkään suhteellisen edullinen kaukolämmön hinta aiheuttaa omat haasteensa kaukolämpöä korvaavan investoinnin kannattavuudelle.

Teollisuuslaitoksen ylijäämälämmön talteenottoon perustuvan energiaväylän peruslämmön lähteen tehon riittävyys ja käytettävät lämpötilatasot tulisi varmistaa ja löytää tapa varmistaa toimitukselle 100 % käytettävyys, koska kuluttajapäähän ei voida eikä kannata rakentaa useinkaan varakapasiteettia.

Markkinoilla ei ole mitä todennäköisimmin tarjolla suoraan energiaväylän lämpöpumppukeskuksiksi soveltuvaa tuotesarjaa, mutta tällainen tuotesarja olisi täysin mahdollista konseptoida, suunnitella ja valmistuttaa tilaustyönä. Suomessa on useita toimittajia, tyypillisesti suurten kylmälaitosten valmistajia, jotka kykenisivät toimittamaan vaadittavan lämpöpumppukeskuksen, kunhan saisivat tätä varten riittävän seikkaperäisen, korkeatasoisen suunnitelman. Tuotesarja kannattaisi kehittää sellaiseksi, että se soveltuisi käytettäväksi mahdollisimman laajasti erilaisissa energiaväyläsovellutuksissa.

Yksi olennaisimmista asioista energiaväylän kehittämisessä on kokonaisuuden optimointi siten, että ylijäämälämmön tuotanto, siirto ja kuluttajalaitteet muodostavat yhdessä optimaalisen kokonaisuuden käyttötoiminta mukaan lukien.

Hyvä tapa saada tällaiseen selvästi kehitysasteella olevaan hankkeeseen konkretiaa ja lisävarmuutta, olisi perustaa pilot-hanke, jossa valittavaan pilot-kohteeseen laadittaisiin tarkempi selvitys ja suunnitelmat. Pienimuotoisen pilot-järjestelmän toteuttaminen voi olla hankalaa Sahanmäen alueella, mutta saattaisi onnistua jossain muualla.

ESIMERKKIKOHTEN TALOUSTARKASTELU

1 Esimerkkikohde

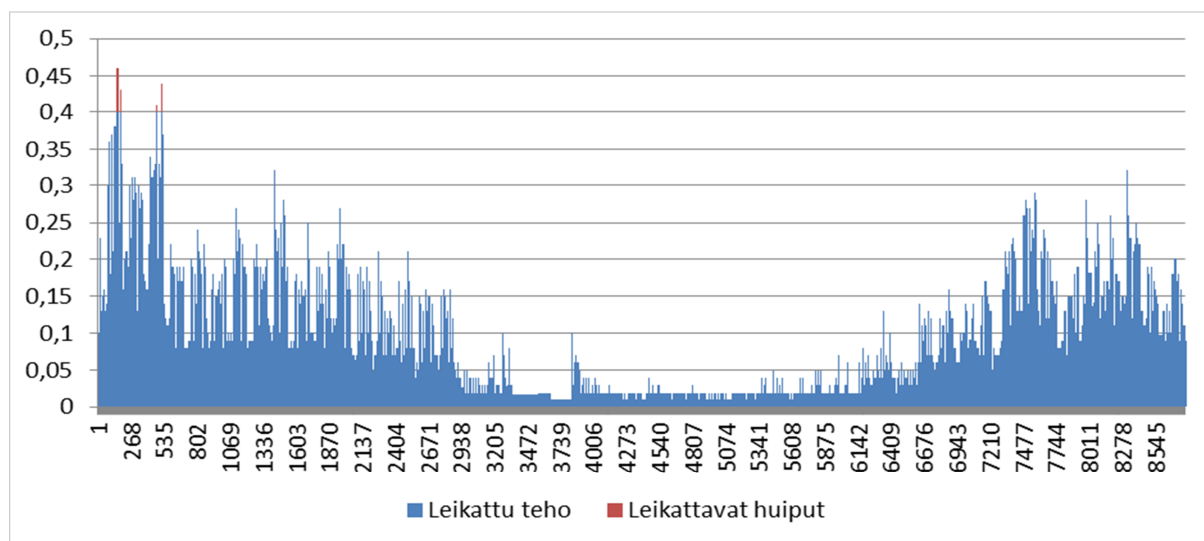
Taloustarkastelua varten on valittu esimerkkikohteeksi kohde 2, koska siinä on myös kesäaikaista kuormaa ja sen oletetaan edustavan muutenkin tyypillisempää kuluttaja-asiakasta. Kohteen lämmöntarve on 650 MWh/v ja huipputehon tarve tuntidatan perusteella 460 kW ja minimiteho noin 10 kW. Lämpimän käyttöveden kokonaistarpeeksi on arvioitu hiukan yli 100 MWh/v tuntidatan perusteella ja tästä suurin osa näyttäisi olevan lämpimän käyttöveden kierron aiheuttamaa kuormaa.

1.1 Lämpöpumppukeskuksen mitoitus

Mitoitus lähtee ”leikatusta huipputehosta”, mikä tarkoittaa sitä, että harvoin/satunnaisesti esiintyviin huipputehoihin ei kannata eikä tarvitse yrittää vastata tuotannollisesti. Lämmityskuormaa voi itse asiassa ohjata monin tavoin ja pitemmälle menevissä järjestelmissä myös lämmitystehon ohjaus kannattaa ottaa mukaan.

Helpoin tapa kuorman ohjaukseen on ilmanvaihtomäärien pienentäminen huippupakkasilla ja joissain kohteissa lisäksi tehon ”lainaaminen” patteriverkostolta, jossa viiveet ovat niin pitkät, että edes useamman tunnin kestävää lämpötilan alentamista ei todennäköisesti edes huomata.

Tuntidatan mukaan kohteen suurin esiintynyt tuntiteho on ollut 460 kW ja 400 kW ylittäneiden tuntien määrä on ollut 13 h koko vuoden aikana kuvan mukaisesti. Huomattakoon, että 350 kW tehon ylittäneiden tuntienkin lukumäärä on ollut ainoastaan 33 h, joten käytännössä tavoitteeksi voitaisiin ottaa myös 350 kW teho, mutta käytetään tässä esimerkissä tehomitoituksena pyöreää 400 kW tehoa.



Kuva L1 Esimerkkikohteen tuntitehojen jakauma, jonka mukaan tehontarve on ylittänyt 400 kW ainoastaan 13 tunnin aikana koko vuonna.

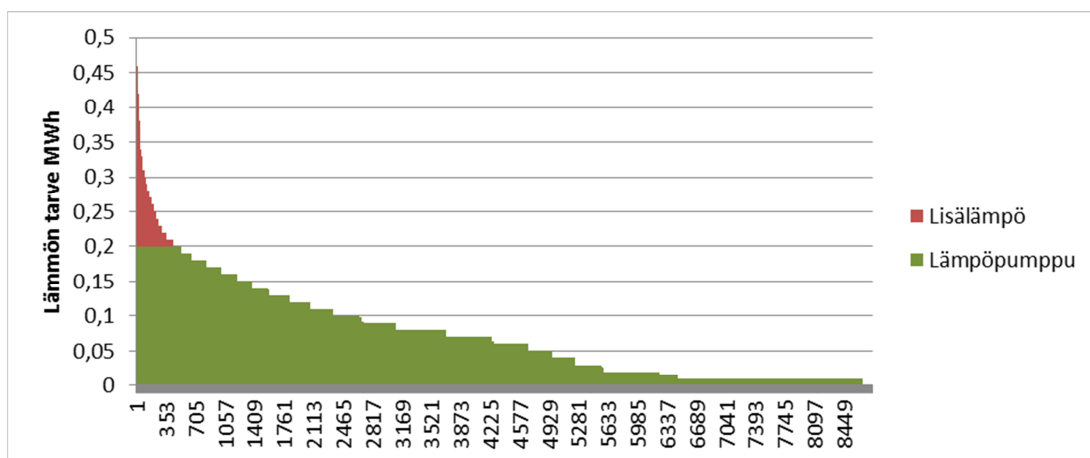
Lämpöpumppukeskuksen mitoitustehoksi tulisi tällöin 400 kW olosuhteissa, joissa tuottolämpötilan on oltava +70°C ja energiaväylän tuleva vesi +25°C.

Lämpöpumppukeskus tarvitsee sähkötehoa näissä olosuhteissa noin 120 kW.

Vaadittu 400 kW teho toteuttaa esim. laitoksella, joka käsittää neljä 100 kW lämpöpumppuyksikköä. Tällöin esimerkiksi sylinterinkansisäädöllä varustetun mäntäkompressorikoneen minimitehoksi on ilmoitettu 10 kW vastaten hyvin kohteen minimikulutusta, jolloin tehoa säätävää konetta voidaan käyttää myös kesäkuorman ajoon varaajan kautta.

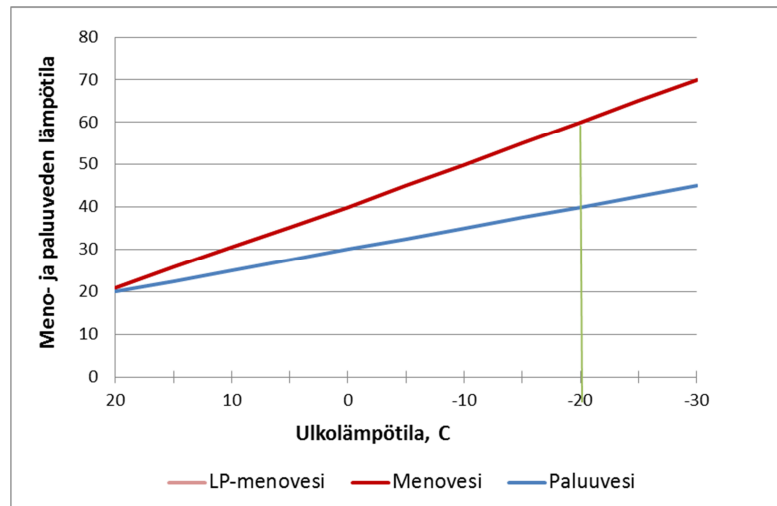
Pysyvyyskäyräkuvasta nähdään, että valitseva teho on alueella 50 – 200 kW ja pelkästään 200 kW tehoisella lämpöpumpulla voitaisiin tuottaa peräti 95 % vuosienenergiasta kuvan mukaisesti. Lämpöpumpun näkökulmasta katsoen paras ratkaisu olisikin pienitehoisempi laitos, joka tuottaisi peruskuormaa mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Ongelmaksi muodostuisi tällöin huipun tuottaminen, johon ei liene tarjolla tässä tapauksessa kovin hyvää vaihtoehtoa. Leikatunkin huipun ajo sähkökattilalla aiheuttaa niin suuret tehomaksut, että se ei liene taloudellisesti mielekäästä, joten tässä vaiheessa joudutaan lähtemään liikkeelle täysitehoisesta lämpöpumpusta, jossa joudutaan tekemään kompromisseja tehon ja hyötysuhteen välillä.

Mikäli kohteessa olisi esimerkiksi valmis maakaasu- tai öljykattila, huippu voitaisiin tuottaa suhteellisen edullisesti kattilalla ja lämpöpumppulaitos mitoittaa osateholle.



Kuva L2 200 kW lämpöpumpulla pystyttäisiin tuottamaan 95 % vuosienenergiasta, jos huippu saataisiin hoidettua taloudellisesti jollain muulla tavalla

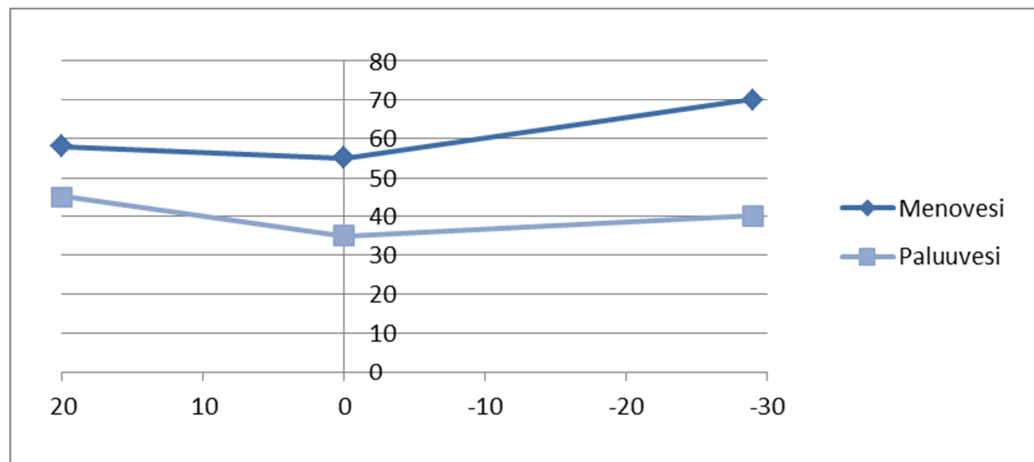
Kohteen lämmitysverkoston lämpötilakäyrän oletetaan olevan tavanomainen kuvan mukaisesti, jolloin verkoston lämpötilavaatimus ylittää +60°C ainoastaan ulkolämpötilan alittaessa -20°C, mutta näitä tunteja on vuodessa keskimäärin 1..2 %. Muuna aikana laitosta ajetaan joko lämpimän käyttöveden tai lämmitysverkoston mukaan.



Kuva L3

Kohteen oletettu verkoston lämpötiläkäyrä

Oletetaan tässä esimerkissä, että lämpöpumppukeskuksen käyttö optimoitaisiin lämpimän käyttöveden tuotannon mukaan, jolloin menovettä säädettäisiin suunnilleen kuvan L4 mukaisesti ja muutama prosentti käyttövedestä jouduttaisiin tuottamaan suoralla sähköllä. Laskennassa käytetyn ”yksinkertaisen” lämpöpumppulaitoksen kokonaislämpökertoimeksi saataisiin tällä ajotavalla 4,5 energiaväylän olosuhteissa.



Kuva L4

Laskennassa käytetty lämpötilan tuottoprofiili ulkolämpötilan mukaan, paluuvien lämpötila arvioitu

Huomattakoon, että kyseinen 4,5 vuosi-COP on laskettu yksinkertaiselle peruslaitokselle. Parhailla suurkiinteistöjen maalämpölaitoksilla on päästy käytännössä samalle tasolle, vaikka päälämmönlähteenä on huomattavasti kylmempi maaperä. Kehittämällä ja optimoimalla järjestelmiä energiaväyläolosuhteissa olisi mahdollista päästä selvästi korkeampaan, jopa 5..6 vuosilämpökertoimeen muistaen, että hyötysuhteella on kuitenkin hintansa eli tavoitteena on tuki löytää optimitaso.

1.2 Lämpöpumppukeskuksen investointiarvio

Tämän selvitystyön puitteissa ei ole ollut mahdollista tehdä esimerkiksi budjettitason hintatarjouksen hankkimiseksi tarvittavaa laitossuunnittelua, joten kustannukset on arvioitu perustuen vastaavatyypisiin aikaisemmin suunniteltuihin ja hankittuihin laitoksiin.

Hankintakustannuksia voidaan säästää suunnittelemalla järjestelmä helposti muunneltavaksi sarjatuotteeksi ja kilpailuttamalla toimittajat. Sähkön syötön ja kuluttajalaitteisiin liittämisen kustannukset voivat vaihdella merkittävästi tapauskohtaisesti riippuen esimerkiksi tarvittavien putki ja sähkökaapelivetojen pituudesta. Jos kohteessa on ylimääräistä sähkökapasiteettia, sähkön syötön hinta laskee olennaisesti. Jos kapasiteettia on jo ennestään niukasti ja myös liittymisjohtoa joudutaan vahvistamaan, hinta voi olla selvästi esitettyä korkeampi.

Alla olevassa taulukossa on esitetty arvio 400 kW lämpöpumppukeskuksen hankinnan ja liittämisen kustannuksista. Lisäksi on varauduttava muihin kustannuksiin, joista merkittävin tulee olemaan energiaväylän liittymismaksu, jolla katetaan verkoston ja tuotantopään kustannuksia.

Taulukko

Järjestelmän osa		LP-keskus	Lisätiedot
Lämpöpumppukeskus		120000	Asennusvalmis LP-kontti
Sähkön syöttö ja kapasiteetin lisäys		20000	Kustannusvaihtelut voivat olla suuria
Liittyminen vanhaan lämmönjakokeskukseen		10000	Kustannusvaihtelut voivat olla suuria
Energiaväylän liittymismaksu			Kaukolämmön liittymismaksua vastaava
Muut kustannukset			Suunnittelu, projektihoito ym.
Yhteensä		150000	

Lämpöpumppukeskuksen ominaisinvestointikustannukseksi saadaan näin 300 €/kW. Huomattakoon, että kokoluokan kasvaessa lämpöpumppukeskuksen ominaisinvestointi pienenee selvästi, esimerkiksi 1 MW kokoluokassa ominaisinvestointi olisi enää luokkaa 200..250 €/kW.

1.3 Talousvertailu

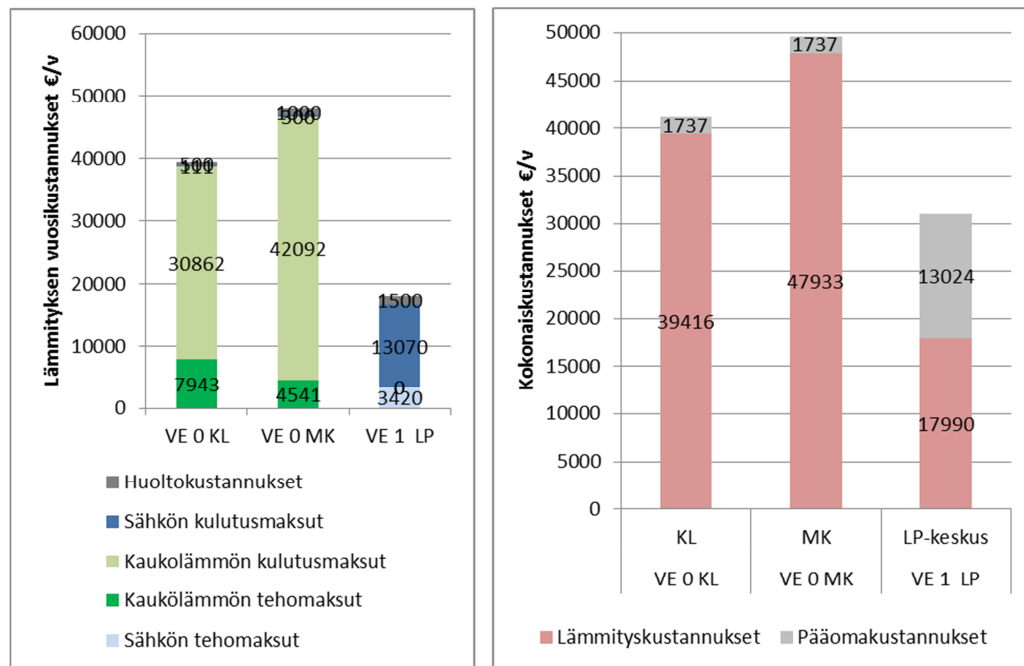
Lasketaan kohteen lämmityskustannukset vertaamalla nykytilannetta hypoteettiseen uuteen tilanteeseen, jossa kaukolämmön tilalle on asennettu lämpöpumppukeskus. Tässä selvityksessä rajaudutaan tarkastelemaan pelkästään kohteeseen liittyviä kustannuksia, ei siis koko energiaväylän kustannuksia, jotka on selvitettävä laajemman tarkastelun avulla.

Vertailuun otettu lisäksi laskennallinen tapaus, jossa tarkastelukohde lämmitettäisiin maakaasulla.

Käytettävät lähtötiedot perustuvat tämän hetken hintatasoon seuraavin oletuksin

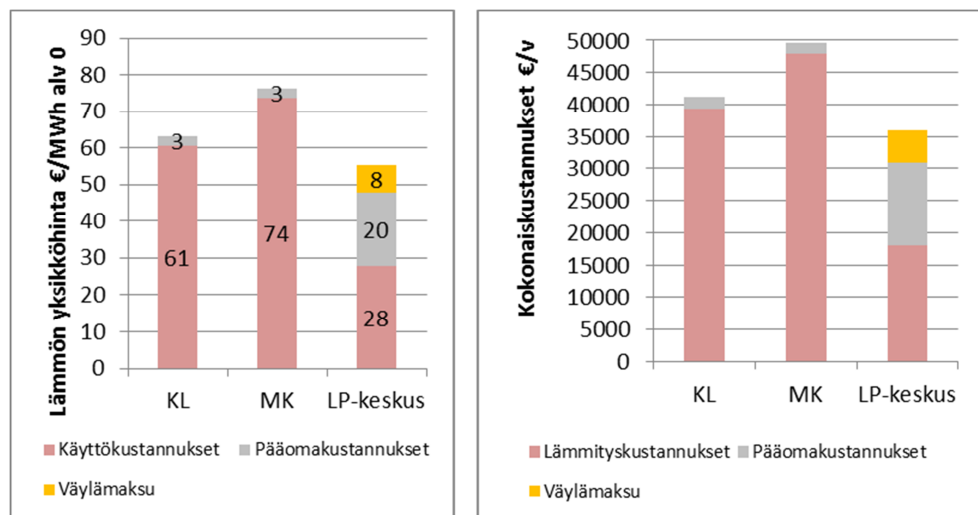
- Kaukolämmön hinta suoraan HLV:n nykyisen hinnaston mukaisesti olettamalla tehomaksua määräävän huipputehon suuruudeksi 450 kW
- Myös laskennallinen maakaasuvaihtoehto laskettu suoraan HLV:n tariffilla
- Lämpöpumpun käyttämä sähkö oletetaan hankittavan Caruna Oy:n tehotariffilla Tehosiirto 1, jossa tehomaksu on hiukan halvempi. 2,85 €/kW, kk, kun Tehosiirto 2 tehomaksu on peräti 4,77 €/kW, kk, vaikka tässä tariffissa siirron energiahinta on alempi (myös tariffi kannattaa optimoida kohdekohtaisesti).
- Lämpöpumpun vaikutuksen kohteen sähkötehoon ja tehomaksuihin oletetaan olevan nettomääräisenä 70 kW, koska muun sähkökuorman piikki ei todennäköisesti osu samoille tunneille.
- Sähkön ostohintana käytetään tämän hetken markkinahintaa, joka on luokkaa 35 €/MWh alv 0.. Sähkön kulutuksen muuttuvaksi kokonaishinnaksi tulee tällöin noin 85 €/MWh alv 0, johon on lisättävä tehomaksujen vaikutus (laskettu erikseen kustannuslaskelmassa).
- Kaikki hinnat on laskettu alv 0
- Vuotuiset pääomakustannukset on laskettu annuiteetilla 3,5 %/15 v. Todellinen käyttöikä voi olla jopa reilusti pitempi, kun kuluja ja vanhentuvia osia uusitaan tarpeen mukaan (kompressorit, pumput, venttiilit, automatiikka).
- Myös vertailuvaihtoehdoille on laskettu vertailtavuuden vuoksi pääomakustannuksia oletetun uusintainvestoinnin mukaan, kaukolämmölle 20 000 € siirrinpaketin uusimiseen ja maakaasuvaihtoehdolle 30 000 € kattilan uusimiseen.

Tulokset on esitetty seuraavalla sivulla olevissa kuvassa ja laskentaerittely liitteenä.



Kuva L5 Vasemmanpuoleiseen kuvaan on laskettu vuotuiset käyttökustannukset ilman väylämaksuja ja oikean puoleisessa kuvassa käyttökustannuksiin lisätty em. tavalla lasketut pääomakustannukset (ilman energiaväylän liittymismaksua)

Käytettyjen olettamusten mukaan lämpöpumpun käyttökustannukset ovat selvästi muita edullisemmat ilman väylämaksua. Ero muihin vaihtoehtoihin pienenee, kun mukaan lasketaan pääomakustannukset ja väylämaksu (kuva L6). Väylämaksun hinnaksi on oletettu Hanna Suhosen opinnäytetyössä mainittu 10 €/MWh, mikä on lisätty kuvassa L6 lämpöpumppuvaihtoehdon hintaan. Maksun oletetaan kohdistuvan vain siihen osaan lämmöstä, joka otetaan energiaväylästä eikä koske siis kompressorisähkön osuutta.



Kuva L6 Oletettu väylämaksu 10 €/MWh lisättynä lämpöpumppuvaihtoehtoon. Maksun oletetaan kohdistuvan väylästä otettuun lämpöön, jolloin sitä vähentää lämpöpumpun sähköllä tuotettu osuus.

Kuvan mukaisesti lämpöpumppuvaihtoehto olisi vielä hiukan muita edullisempi oletetun väylämaksun jälkeenkin, mutta pääomakustannuksissa ei ole otettu huomioon mahdollista liittymismaksua.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että energiaväylä ei tuo merkittäviä kustannussäästöjä tarkastelukohteessa kaukolämpöön verrattuna, mutta maakaasuun verrattuna säästöä syntyy selvästi enemmän.

Todettakoon, että tarkasteltu kohde on lämpöpumppukohteena hankalahko suurten tehovaihteluiden ja tehopainotteisuuden vuoksi. Toki myös suhteellisen edullinen kaukolämmön hinta heikentää kaukolämpöä korvaavan investoinnin kannattavuutta.

Paremmen kannattavuusnäköymän aikaansaamiseksi mahdolliseksi pilot-kohteeksi kannattaisikin hakea selvästi suurempaa kohdetta, jossa lämpö tai osa lämmöstä tuotettaisiin nykyään maakaasulla ja jossa voisi olla lisäksi jäähdytystarvetta. Tästä saattaisi koitua mm. seuraavanlaisia etuja:

- Lämpöpumppukeskus voitaisiin mitoittaa osateholle ja tuottaa huippulämpöä maakaasulla (tai öljyllä vaihtamalla kaasukattilaan öljypoltin).
- Suuren kohteen suuri lämpöpumppukeskus tulisi ominaisinvestoinniltaan edullisemmaksi ja mahdollistaisi korkeamman hyötysuhteen
- Suuressa kohteessa on todennäköisesti edullisempaa järjestää lämpöpumppua varten tarvittava sähkön lisäkapasiteettia kuin pienemmässä
- Sähkön hinta ja siirtomaksut alenevat kulutuksen kasvaessa (esim. keskijännitesiirron teho- ja siirtomaksut selvästi alemmat kuin pienjännitesiirrossa)

LIITE 1/1				
TALOUSVERTAILULASKELMA				
Kohde:	Kohde 2	Kaikki hinnat alv		
Pvm:	20.10.2017	0 %		
Laskentatapaus:	Peruslaskentatapaus nykyhinnoin	Annuiteetti		
		3,5 %		
Lämmitysenergian kokonaistarve	650 MWh/v	15		
Jäähdytysenergian kokonaistarve	0 GWh	0,087		
		VE 0 KL	VE 0 MK	VE 1 LP
		KL	MK	LP-keskus
Energiahinnat				
Lämpöpumppusähkön hinta	€/MWh			85,0
Kaukolämmön tai polttoaineen hinta	€/MWh	47,5	60,2	
Muun sähkön hinta	€/MWh	85,0	85,0	85,0
Energiatase				
Kaukolämpöteho tai kattilalaitoksen teho	kW	450	450	400
Lämpöpumpulaitoksen teho	kW			400
Lämpöpumpulämmön määrä	MWh/v			645
Energiaväylästä otetun lämmön määrä	MWh/v			502
Lisäsähkön määrä	MWh/v			
Kauko- tai maakaasulämmön määrä	MWh/v	650	650	5
Lämmityksen polttoainetase				
Lämpöpumpun hyötysuhde	MWh/v			450 %
Muun lämmön tuotannon hyötysuhde		100 %	93 %	100 %
Lämpöpumppusähkö	MWh/v			143
Kaukolämpö, maakaasu tai lisäsähkö	MWh/v	650	650	5
Ilmaisenergia	MWh/v			502
Apusähkön määrä	MWh/v	1	3	6
Lämmityskustannukset				
Sähkön tehomaksut				3420
Lämpöpumppusähkön hankinta	€/v			12184
Lisäsähkön hankinta	€/v			399
Kaukolämmön tai maakaasun tehomaksut	€/v	7943	4541	
Kaukolämmön tai maakaasun kulutusmaksut	€/v	30862	42092	
Apusähkö	€/v	111	300	487
Väylämaksu	€/v			5020
Lämmityksen käyttö- ja huoltokustannukset	€/v	500	1000	1500
Lämmityskustannukset yhteensä	€/v	39416	47933	23010
Ero perusvaihtoehtoon VE 0 nähden	€/v	0	8517	-16406
	%	0 %	22 %	-42 %
Lämmitysenergian keskihinta	€/MWh	60,64	73,74	35,40
Investointikustannukset				
Investoinnit yhteensä		20000	20000	150000
Kokonaisvuosikustannukset				
Lämmityksen muuttuvat vuosikustannukset	€/v	39416	47933	23010
Pääomakustannukset	€/v	1737	1737	13024
Kokonaiskustannukset yhteensä	€/v	41152	49670	36034
Ero perusvaihtoehtoon	€/v	0	8517	-5119