

31.8.2015



Energiateollisuus

Kaukolämmön kysyntäjousto

VALOR

VALOR Partners Oy
Y: 2414724-2

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT: DEMAND SIDE MANAGEMENT IN DISTRICT HEATING SYSTEMS.....	4
1. JOHDANTO.....	5
<i>Kysyntäjouaston määritelmä.....</i>	<i>5</i>
<i>Toimeksianto ja selvityksen toteutus.....</i>	<i>5</i>
<i>Raportin rakenne.....</i>	<i>7</i>
2. KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTA.....	8
<i>Eri osapuolten roolit ja vastuut.....</i>	<i>8</i>
<i>Kuormituskäyrän muoto.....</i>	<i>9</i>
<i>Kannattavuuden kannalta olennaisimmat tekijät</i>	<i>11</i>
3. KYSYNTÄJOUSTON HYÖDYT JA HAITAT SEKÄ HYÖTYPOTENTIAALI	13
<i>Lähtökohdat kysyntäjouaston hyötyjen, haittojen ja potentiaalin tarkasteluun.....</i>	<i>13</i>
<i>Kysyntäjouaston hyötyjen ja haittojen lähteet.....</i>	<i>14</i>
<i>Kysyntäjouaston hyötypotentiaali.....</i>	<i>16</i>
4. KYSYNTÄJOUSTON KÄYTÄNNÖN TOTEUTUSMALLI JA TEKNISET VAATIMUKSET.....	20
<i>Kysyntäjouaston toteutusmalliin liittyvä aiempi tutkimus.....</i>	<i>20</i>
<i>Case-esimerkkejä kysyntäjouaston toteutusmalleista</i>	<i>22</i>
<i>Kaukolämpöalan asiantuntijoiden näkemykset kysyntäjouaston toteutusmallista</i>	<i>23</i>
5. KANNUSTIMET ASIAKKAILLE KYSYNTÄJOUSTON TOTEUTTAMISEKSI.....	26
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	28
LIITE 1: KIRJALLISUUSVIITTEET.....	30
LIITE 2: HAASTATTELUT	32

Tiivistelmä

Tämän selvityksen tarkoitus oli arvioida kaukolämmön kysyntäjouoston potentiaalia ja käytännön toteutusmalleja sekä kartoittaa aiheesta tehtyjä kansainvälisiä ja pohjoismaisia tutkimuksia. Tutkimuksessa selvitettävät kysymykset jakautuivat kolmeen pääkategoriaan, jotka olivat kysyntäjouoston hyödyt, haitat ja potentiaali, kysyntäjouoston käytännön toteutusmalli sekä kysyntäjouoston kannustimet.

Tässä selvityksessä kaukolämmön kysyntäjousto on määritelty seuraavasti: kaukolämmön kulutuksen ja sitä kautta lämpötehon tarpeen ajoituksen muuttaminen tavanomaiseen lämmitystarpeeseen verrattuna heikentämättä asiakkaiden kokemaa palvelun laatua. Lämmön kysyntäjousto ei tule sekoittaa perinteisiin energiantehokkuustoimiin, energian säästöön tai energian kysynnän rajoituksiin. Kysyntäjoustopa lämpöenergiaa ei välttämättä säästy, vaan tavoitteena on lämmönkulutuksen ajallinen siirto koko kaukolämpöjärjestelmän järjestelmän kannalta optimaalisemmaksi – eli kysyntäjoustopa tarkastelu keskittyy hetkelliseen lämpötehon tarpeeseen, ei lämpöenergian käyttöön. Kysyntäjoustopa tavoitteena on yleensä loiventaa kulutushuippuja öljykattiloiden tai muun kalliin huippu- tai varatuotannon käytön vähentämiseksi tai välttämiseksi eli huippulämmön toimittamista pyritään siirtämään peruslämmön toimittamiseksi. Tämä lähtökohtaisesti parantaa energiantuotannon taloudellisuutta ja vähentää ympäristöhaittoja.

Lähtökohta kaukolämmön kysyntäjoustop tarkasteluun on, että kysyntäjoustop ei ole käytännön hyötyä, jolle se johda merkittäviin hyötyihin jossakin osassa järjestelmää joko investointien tai käyttötoiminnan kautta syntyvinä selkeinä rahallisina säästöinä, joita voidaan jakaa kaukolämpöyhtiön ja asiakkaiden kesken. Toisin sanoen yksittäisten kiinteistöjen toteuttamista toimenpiteistä ei ole hyötyä, jolleivat ne johda järjestelmätasolla hyötyihin esimerkiksi energiantuotannossa. Jos näin ei tapahdu, muutamien kaukolämpöasiakkaiden säästö kaatuu muiden asiakkaiden maksettavaksi. Toinen edellytys kysyntäjoustop toteuttamiselle on se, että syntyvä lisäarvo on voitava jakaa tasapuolisesti sen synnyttämiseen osallistuvien kesken panosten suhteessa – tämä on luontevaa toteuttaa tariffijärjestelmän kautta.

Pääsääntöisesti huippukattiloiden käytön vähentäminen lyhyissä kuormituspiikeissä vaikuttaa olevan merkittävien hyötyjen lähde kaukolämpöjärjestelmän tasolla. Myös kysyntäjouston strateginen merkitys voi olla merkittävä, koska kysyntäjouston toteutus ”pakottaa” kaukolämpöyhtiöt yhteistyöhön asiakkaidensa kanssa aikana, jolloin kaukolämpötoimintaan kohdistuu merkittäviä riskejä. Kaukolämmön kannattava peruskuorma laskee tulevaisuudessa johtuen asiakkaiden energiatehokkuuden ja kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon lisääntymisestä ja toisaalta polttoaine- ja muista veropäätöksistä sekä ympäristöpoliittisesta ohjauksesta. Kaukolämmön kuormituskäyrän heikkeneminen pakottaa kaukolämpöyhtiöt lisäämään kaukolämpöjärjestelmän joustavuutta.

Kysyntäjouoston hyötyjen lähteitä ja potentiaalia tarkastellessa on muistettava, että kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan huomattavasti muun muassa tuotantorakenteen, lämpöverkon rakenteen, kulutusprofiilin ja lämmön varastointikyvyn suhteen. Tämän takia kysyntäjouoston hyötyjä ja niiden potentiaalia koskevia arvioita ei voi yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöjärjestelmiä – ja tämä pätee myös kysyntäjouoston toteutusmalliin. Joissain järjestelmissä kysyntäjouostolla pystytään parantamaan voimalaitosten käyttöastetta, joissain minimoimaan öljykattiloiden tai muun kalliin huipputuotannon käyttöä, joissain optimoimaan CHP-tuotannon ajoitusta kalliin sähkön aikaan ja joissain lykkäämään verkon kapasiteetin parantamiseksi tarvittavia investointeja.

Kaukolämpöyhtiöiden arvioiden mukaan realistinen oletus kysyntäjouaston hyötypotentiaaliksi on nykyratkaisuin ja nykykokemusten perusteella järjestelmästä riippuen 1-3 %:a vuosikustannuksista. Potentiaali on suurin verkoissa, joissa perus- ja huipputuotannon hintaero on suurin ja tuotantolaitokset on mitoitettu kuorman suhteen niukasti. Ajallisesti kysyntäjouaston hyötypotentiaali on suurin keväisin, syksyisin ja sellaisina talvipäivinä, kun vuorokauden sisäiset lämpötilaerot ovat suurimmillaan.

Järjestelmätason hyötyjen ja niiden ennakoitavuuden maksimoinnin kannalta kysyntäjouoston ohjaus pitäisi olla kaukolämpöyhtiöllä. Tämä tarkoittaa, että kaukolämpöyhtiö antaa signaalin, jonka mukaan kysyntäjoustojärjestelmään liittyneet kiinteistöt toteuttavat kaukolämpötehon hetkellistä tarvetta alentavia toimenpiteitä mahdollisimman ennakoitavalla ja asukkaiden kokeman palvelutason säilyttävällä tavalla. Jotta asiakkaan kokema palvelun laatu ei heikkenisi havaittavasti, toteutus on järkevää hoitaa alentamalla tai rajoittamalla patteriverkoston veden lämpötilaa hetkellisesti – ei ilmanvaihdon tai lämpimän käyttöveden rajoituksin.

On huomionarvoista, että kaukolämmön kysyntäjoustopon järjestelmätason toimivuutta ei ole asian tärkeyteen nähden tutkittu Suomessa tarpeeksi – pilottihankkeita, tutkimustietoa ja kaukolämpöjärjestelmiä koskevaa relevanttia dataa on vähän, ja data on huonosti saatavilla. Olisikin suositeltavaa, että kaukolämpöyritykset pyrkisivät laajentamaan kysyntäjoustopon ja sen toteutusmekanismeihin liittyvää tietopohjaa paitsi keskenään, myös yhteistyössä tutkijoiden kanssa.

Abstract: Demand Side Management in District Heating Systems

The objective of this study was to assess the commercial potential of demand side management (DSM) in district heating systems and its practical application models and, in addition, to chart international and Nordic studies performed on the subject. The research questions were divided into three main categories: the benefits, disadvantages and potential of demand side management, practical applications of demand side management, and customer incentives required in implementing DSM.

Demand side management of district heating (DH) is defined in the study as follows: shifting the timing of district heat consumption and thus also the need for district heating capacity compared to conventional heating needs without compromising the quality of service experienced by customers. DSM of district heating should not be confused with traditional energy efficiency or energy saving measures or restrictions in energy use. Demand side management does not necessarily save thermal energy, but the aim is the temporal transfer of heat consumption in the district heating system to make the whole system more optimal. Thus, DSM focuses on instantaneous thermal power need, not on the daily or yearly total use of thermal energy. The objective of DSM is usually to offset consumption peaks to reduce or avoid the use of oil-fired boilers or other expensive peak or reserve production. This, in principle, improves the efficiency of energy production and reduces negative environmental impacts.

The starting point for assessment of district heating demand side management is that there is no use in applying DSM if it does not lead to significant benefits in some part of the DH system, either through reduced investment need or savings in operational costs which can be shared among the district heating company and its customers. In other words, individual DSM measures in single properties are not useful, unless they lead to benefits at a system-level e.g. in energy production. If this does not happen, the savings of a few district heating customers have to be paid by other customers. The second condition for implementation of DSM is that the generated value-added must be distributed fairly between participants in the DSM in proportion to their inputs – this is most easily done through tariff system.

As a rule, reducing the use of expensive peak production during short-term load peaks seems to be the most significant source of benefits at the DH system level. In addition, the strategic importance of DSM can have significant strategic importance since DSM implementation "forces" district heating companies to cooperate with their customers at a time when district heating business faces significant risks. The profitable base load of district heating decreases due to customers' improved energy efficiency, increases in customer-level heat production, increases in fuel and other taxes, as well as environmental policy guidance. The weakening of district heating load curve forces district heating companies to increase the flexibility of their district heating systems.

In assessing the potential and sources of benefits of DSM, it should be noted that district heating systems differ considerably, inter alia, in their production and network structure, load curve and heat storage capacity. For this reason, estimates for DSM benefits and their potential cannot be generalized to all district heating systems - and this also applies to the implementation model of DSM. In some systems, DSM can be used to improve utilization of power plants, in some systems to minimize the use of oil-fired boilers or other costly peak production, in other systems to optimize the timing of CHP production based on electricity price, and still in others, to postpone investments needed to improve the capacity of the network.

Based on district heating companies' assessments, the realistic estimate for total commercial benefits of district heating DSM are 1-3% of annual costs depending on the system, based on current solutions and current experiences. The potential is largest in networks in which the price difference between base and peak production is the largest and in which production capacity is scarce with respect to peak load. The potential benefits of DSM are the greatest during spring, autumn and winter days when temperature differences within one day are large.

To maximize system-level benefits and their predictability, the control of DSM should be with the district heating company. This means that the DH company gives a signal based on which customers, who have joined the DSM system, take temporary measures to reduce the need for district heating in a predictable and quality-ensuring manner. In order not to weaken customer service quality noticeably, the application of DSM should be based on reducing or limiting the radiator water temperature temporarily – not on restrictions in the use of ventilation or hot water.

It is noteworthy that the effects and potential of district heating DSM have not really been studied at a system level in Finland – relevant data on pilot projects, district heating systems and research is scarce, and the data is not easily available. It would be recommended that DH companies would seek to expand knowledge base about DSM and its implementation mechanisms not only with each other but also in collaboration with researchers.

I. Johdanto

Kysyntäjouston määritelmä

Tässä selvityksessä kaukolämmön kysyntäjoustopilla (demand side management, DSM) tarkoitetaan *kaukolämmön kulutuksen ja sitä kautta lämpötehon tarpeen ajoituksen muuttamista tavanomaiseen lämmitystarpeeseen verrattuna heikentämättä asiakkaiden kokemaa palvelun laatua*. Kysyntäjoustopilla pyritään vaikuttamaan kaukolämpöasiakkaiden ajalliseen käyttäytymiseen siten, että koko energijärjestelmän tasolla saavutetaan säästöjä tai muita hyötyjä. Normaalisti kaukolämmön kulutus vaihtelee sekä vuositasolla vuodenaikojen ja ulkolämpötilan mukaan että lyhyemmällä aikavälillä viikko- ja päivärytmin mukaan. Päivätasolla lämmöntarpeessa havaitaan yleensä kaksi huippua: aamulla, kun lämpimän käyttöveden tarve on suuri ja ilmanvaihtojärjestelmät käynnistyvät, sekä iltapäivällä työajan jälkeen, kun ihmiset ovat palanneet koteihinsa. Kulutuksen vaihtelut aiheuttavat lisäkustannuksia kaukolämpöjärjestelmälle ja heikentävät sen tehokkuutta.

Lämmön kysyntäjoustopia ei tule sekoittaa perinteisiin energiatehokkuustoimiin, energian säästöön tai energian kysynnän rajoituksiin. Kysyntäjoustopissa lämpöenergiaa ei välttämättä säästy, vaan tavoitteena on lämmönkulutuksen ajallinen siirto koko kaukolämpöjärjestelmän järjestelmän kannalta optimaalisemmaksi. Esimerkiksi toimistorakennusten osalta kaukolämpöasiakkaita voidaan ohjata käyttämään lämpöenergiaa yöaikana automatiikan avulla. Tällöin lämpöä varastoituu rakennukseen, mikä vähentää lämpöenergian kysyntää aamuhuipun aikana. Kun hetkellisen kaukolämpötehon tarvetta (kysyntää) saadaan ohjailtua tarpeeksi suuren rakennus- tai asiakasmassan osalta, mahdollistaa se kaukolämmön tuottamiseen käytetyn energiantuotannon optimoinnin. Tämä luonnollisesti edellyttää, että kiinteistön talotekniikka soveltuu tämän tyyppiseen säätämiseen. Kysyntäjoustopon näkökulmasta kiinnostavaa on siis hetkellisen kaukolämpötehon tarpeen kehitys – ei niinkään kaukolämpöenergian tarpeen kehitys. Kaukolämpöjärjestelmä kokonaisuutena toimii kuitenkin oleellisesti pidemmällä aikavälillä kuin esimerkiksi sähköjärjestelmä, sillä lämmityksen vähentäminen ja lisääminen näkyvät sisälämpötilassa selvällä viiveellä riippuen myös sääolosuhteista. Tämä tekee kaukolämmön kysyntäjoustopon hallinnasta haastavaa.

Kysyntäjoustopon tavoitteena on yleensä loiventaa kulutushuippuja öljykattiloiden tai muun kalliin huipputuotannon käytön vähentämiseksi tai välttämiseksi eli huippulämmön toimittamista pyritään siirtämään peruslämmön toimittamiseksi. Tämä lähtökohtaisesti parantaa energiantuotannon taloudellisuutta ja vähentää ympäristöhaittoja. Tulevaisuudessa yhä tärkeämmäksi voi nousta myös CHP-tuotannon (sähkön ja lämmön yhteistuotannon) ajoittaminen kalliin sähkön aikaan kapasiteetin riittävyyden mahdollistamissa rajoissa. Joissakin tapauksissa myös verkon kapasiteetin riittävyyden varmistaminen joustopilla voi olla tarpeen. Kysyntäjoustopon avulla voi myös olla mahdollista lykätä uusia verkosto- tai tuotantoinvestointeja tai ne voidaan toteuttaa kevyempinä (jos investoija voi luottaa kysyntäpään joustopien toteutumiseen). Toimiva joustopjärjestelmä parantaa lämpökuormituksen ennustettavuutta ja sitä kautta vähentää kapasiteetin tarvetta sekä tuotannossa että verkossa.

Toimeksianto ja selvityksen toteutus

Energiateollisuus ry valmisti vuonna 2013 kaukolämpöalan strategian, jonka keskeisimpänä tavoitteena oli vastata kaukolämpöliiketoiminnan toimintaympäristön tuleviin muutoksiin. Strategiassa tunnistettiin monta kehityssuuntaa, joissa lämmön kysyntäjoustopista saattaisi olla hyötyä. Myös viime vuosien markkinakehitys on tehnyt kaukolämmön kysyntäjoustopin toteutuksesta helpompaa, koska talotekniikka ja energian käytön ohjausjärjestelmät ovat kehittyneet ja mahdollistavat useita malleja kysyntäjoustopin toteuttamiseksi. Lisäksi kaukolämmön hinnoittelumalleja on kehitetty sellaiseen suuntaan, että kannustimien luominen kysyntäjoustopin edistämiseksi on helpompaa kuin ennen.

Tämän selvityksen tarkoitus oli arvioida kaukolämmön kysyntäjoustopin potentiaalia ja käytännön toteutusmalleja sekä kartoittaa aiheesta tehtyjä kansainvälisiä ja pohjoismaisia tutkimuksia. Tutkimuksessa selvitettävät kysymykset jakautuivat kolmeen pääkategoriaan, jotka olivat kysyntäjoustopin hyödyt ja haitat, kysyntäjoustopin käytännön toteutusmalli sekä kysyntäjoustopin kannustimet (ks. Kuva 1). Tutkimuskysymyksiä tarkasteltiin sekä erikokoisten kaukolämpöyritysten että -asiakkaiden näkökulmista, ja potentiaalia arvioitiin myös erilaisten kuormitusjaksojen aikana (lähinnä eri vuodenaikoina). Kaukolämpöyritysten osalta erikokoisten ja lämmöntuotantorakenteeltaan eroavien järjestelmien tarkastelun avulla haluttiin arvioida erityyppisten kaukolämpöjärjestelmien soveltuvuutta kysyntäjoustopiin sekä näin mahdollistaa johtopäätösten soveltaminen jokaisen ET:n jäsenyhtiön omassa toimintaympäristössä – tai vähintään antaa hyvä pohja yhtiökohtaisiin jatkoselvityksiin.

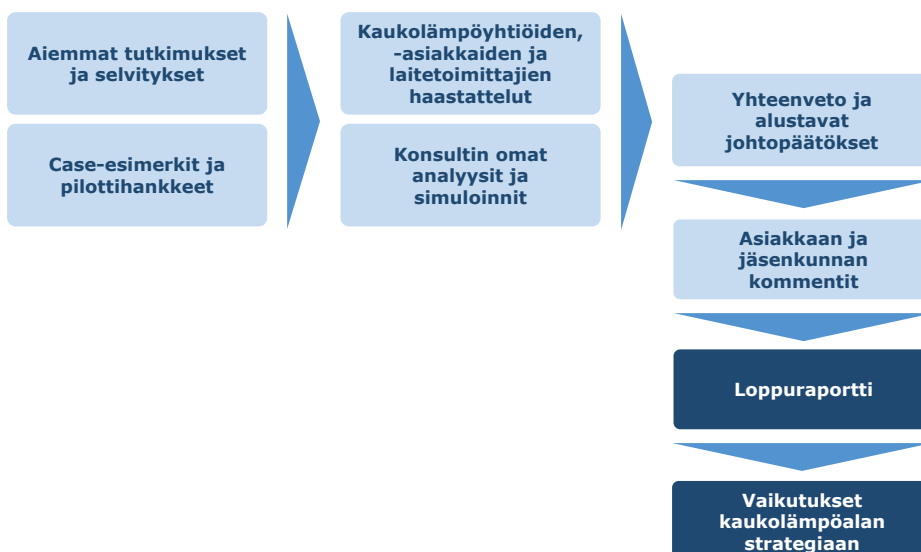


Kuva 1. Tutkimuksen keskeiset kysymykset

Tutkimus toteutettiin kolmessa vaiheessa. Tutkimus aloitettiin kirjallisuuskatsauksella, jossa käytiin läpi kysyntäjoustoan liittyvää kirjallisuutta kansainvälisistä tieteellisistä julkaisuista ja kaukolämpöalan toimijoilta (esim. pohjoismaisten kaukolämpöyhdistysten raportit, IEA). Kirjallisuuskatsauksen osana etsittiin olemassa olevia kaukolämmön kysyntäjousto-esimerkkejä sekä pilottihankkeita. Toisessa vaiheessa haettiin näkökulmia kysyntäjouaston potentiaaliin ja toteutusmalleihin alan toimijoiden haastattelujen kautta. Haastatteluissa käytiin läpi erikokoisia kaukolämpöyrityksiä, kaukolämpöasiakkaita sekä laite- ja palvelutoimittajia. Yhteensä haastatteluja tehtiin 20 kappaletta. Liitteessä 2 on listattu haastatellut yritykset ja henkilöt.

Kaukolämmön kysyntäjouaston potentiaalia ja hyötyjä erikokoisissa ja eri tuotantorakenteen omaavissa järjestelmissä arvioitiin lisäksi mallinnusten avulla. Mallinnoilla haluttiin selvittää erityisesti kysyntäjouaston pitkän tähtäimen teoreettista potentiaalia olettaen, että kaukolämpöyhtiöt voisivat kysyntäjouaston avulla muokata kaukolämmön kuormituskäyrän omasta näkökulmastaan optimaaliseksi. Mallinnoita tehtiin neljälle tuotannon monipuolisuudeltaan erilaiselle kaukolämpöjärjestelmälle. Ne kuvaavat tyypillisiä, nykyisiä suomalaisia järjestelmiä ja mahdollisia tulevaisuuden järjestelmiä. Käytetty simulointimalli (Energy Pro) pyrkii ajamaan laitoksia siten, että muuttuvat kustannukset annetulla laitteistokokoonpanolla minimoidaan.

Kuvassa 2 havainnollistetaan tutkimuksen toteutusmallia.



Kuva 2. Tutkimuksen toteutusmalli

Raportin rakenne

Tämä tutkimusraportti koostuu viidestä luvusta sekä yhteenvedosta. Tämän johdantoluvun jälkeen luodaan katsaus kaukolämpöjärjestelmän toimintaan käyden läpi eri osapuolten rooleja ja vastuita, tyyppillisen kaukolämpöjärjestelmän kuormituskäyrien muotoja sekä kaukolämmön kannattavuuden kannalta olennaisimpia tekijöitä. Kolmannessa luvussa käydään läpi kaukolämmön kysyntäjouaston hyötyjen (ja haittojen) lähteitä sekä arvioidaan kysyntäjouaston hyötypotentiaalia paitsi haastatteluissa saatujen näkemysten myös pitkän tähtäimen teoreettista hyötypotentiaalia kuvaavien simulointien avulla. Neljännessä luvussa tarkastellaan kysyntäjouaston käytännön toteutusmallia sekä aiemman tutkimuksen ja case-esimerkkien että haastateltujen kaukolämpöalan asiantuntijoiden näkemysten perusteella. Viidennessä luvussa analysoidaan asiakkaille tarjottavia kannustimia kysyntäjouaston toteuttamiseksi. Lopuksi esitetään yhteenveto työn tuloksista sekä johtopäätökset kysyntäjouaston potentiaalista ja toteutusmallista. Raportti päättyy liitteisiin, joissa listataan kirjallisuusviitteet sekä työn pohjaksi haastatellut kaukolämpöasiantuntijat.

2. Kaukolämpöjärjestelmän toiminta

Eri osapuolten roolit ja vastuut

Kaukolämpö kilpailee lämmitysmarkkinoilla muiden lämmitysmuotojen, kuten sähkölämmityksen, öljylämmityksen ja maalämmön kanssa. Kaukolämpö on useimmiten määrävssä markkina-asemassa, mikä ei ole kiellettyä, mutta sen väärinkäyttö on (saalistushinnoittelu, kohtuuton hinnoittelu tms.).

Kaukolämpöjärjestelmän toiminta voidaan jakaa neljään osaan: lämmön tuotantoon, myyntiin, jakeluun ja kulutukseen. Kaukolämpöyhtiö tuottaa, myy ja jakelee lämmön asiakkailleen. Kaukolämpöyhtiö toimittaa kuuman kaukolämpöveden asiakaskiinteistön lämmönjakohuoneeseen, jossa kaukolämpövesi lämmittää lämmönsiirtimien avulla kiinteistön lämmitys-/ patteriverkon veden sekä lämpimän käyttöveden. Näin kaukolämpöverkon vesi ei sekoitu kiinteistön sisäisiin vesiverkkoihin. Lämmönsiirtimien yhteydessä on kaukolämpöyhtiön mittauskeskus, jossa meno- ja paluuviesien lämpötilaerojen ja virtausmäärien perusteella lasketaan asiakkaan käyttämä energia. Asiakkaan kaukolämpölaitteet koostuvat lämmönjakokeskuksessa olevista lämmönsiirtimistä, säätölaitteista ja pumpuista sekä kiinteistön sisäisestä lämmönvaihtojärjestelmästä (tyypillisesti patteriverkko ja siihen kuuluvat säätölaitteet).

Kuvassa 3 on kuvattu eri osapuolten rooleja ja vastuita kaukolämpöjärjestelmässä. Kaukolämpöyhtiö ei läheskään aina tuota itse kaikkea lämpöä, vaan ostaa osan lämmöstä kaukolämpöverkon alueella olevilta prosessiteollisuuden yrityksiltä tai esim. datakeskuksilta. Lisäksi kaukolämpöyhtiöt käyttävät alihankkijoita tuotannon ja verkoston uudisrakennuksessa, käytössä ja kunnossapidossa sekä erilaisissa tietojärjestelmissä. Kaukolämpöasiakkaat puolestaan tukeutuvat usein käyttöön ja kunnossapitoon liittyvissä asioissa huoltoyhtiöihin sekä kiinteistöjen hallinnoinnin osalta isännöintitoimistoihin tai suurempiin kiinteistömanagereihin. Tämän lisäksi taloyhtiöille ja kiinteistöjen omistajille tarjoo nykyään palvelujaan kasvava joukko erilaisia energiatehokkuus- tai -mittauspalveluita tarjoavia yhtiöitä.

Rooli	Lämmön tuotanto	Lämmön vähittäismyynti	Lämmön jakelu	Kaukolämmön kulutus
Vastuutaho	Kaukolämpöyhtiö	Kaukolämpöyhtiö	Kaukolämpöyhtiö	Asiakkaat
Tärkeimmät muut osapuolet	<ul style="list-style-type: none"> Muut lämmöntuottajat <ul style="list-style-type: none"> Teollisuuden hukkalämpö (prosessiteollisuus, datakeskukset) (Asiakkaiden hukkalämpö) Käyttö- ja kunnossapitoyhtiöt 	<ul style="list-style-type: none"> Järjestelmä-toimittajat 	<ul style="list-style-type: none"> Maanrakennusyhtiöt Käyttö- ja kunnossapitoyhtiöt Putkiasennusyhtiöt 	<ul style="list-style-type: none"> Huoltoyhtiöt Isännöitsijät Energiatehokkuus-palveluyhtiöt

Kuva 3. Eri osapuolten roolit ja vastuut kaukolämpöjärjestelmässä

Kaukolämmön kysyntäjoustop toteutusmallin osalta eri osapuolten näkökulmat eroavat hieman toisistaan. Asiakkaat ovat luonnollisesti kiinnostuneita lähinnä omasta lämmön kulutuksestaan ja sen kustannuksista, eivät niinkään koko järjestelmän toiminnan järkevyydestä. Esimerkiksi asiakkaat tekevät kiinteistöissään omia energiansäästötoimenpiteitä (muun muassa yönaikaisia lämmönpudotuksia tai poistoilmalämpöpumppujen asennuksia), jotka suuressa mittakaavassa samaan aikaan toteutettuna syövät kaukolämpöverkoston peruskuormaa ja sitä kautta tehokkuutta. Lisäksi ne saattavat hankaloittaa kaukolämpöjärjestelmän kokonaishallintaa. Kaukolämpöyhtiöiden tavoitteena on puolestaan mahdollisimman tehokas ja kannattava lämmöntuotanto koko järjestelmä huomioden. Kysyntäjoustop toteutusta suunniteltaessa täytyykin huomioida miten asiakkaita kannustetaan sellaiseen kysyntäjoustop, joka muodostaa riittävän suuria hyötyjä koko järjestelmän tasolla sekä hyödyttää myös ympäristöä.

Kuormituskäyrän muoto

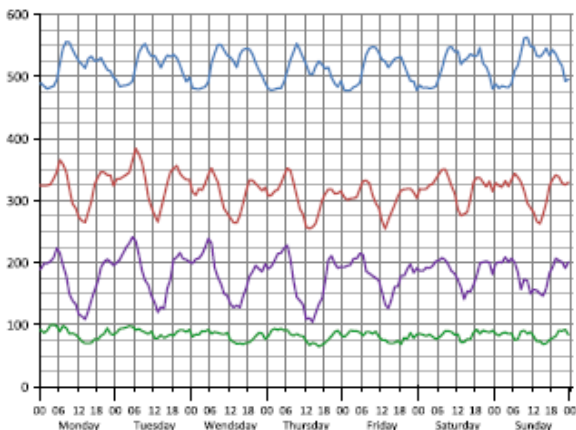
Kaukolämmön kulutus vaihtelee sekä vuositason että hetkellisesti viikko- ja päivärhythmin mukaan. Vuositason vaihtelun aiheuttavat säätilojen ja varsinkin ulkolämpötilan vaihtelut. Lämmön kulutuksen viikko- ja päivärhythmin aiheuttavat kaukolämpökiinteistöissä asuvien ihmisten toiminta ja sen ajoittuminen sekä erilaiset rakennuskohtaiset energiatehokkuustoimet.

Erityyppisten asiakkaiden kulutuskäyttäytyminen vaihtelee ja siihen vaikuttavat rakennusten ominaisuuksien lisäksi se, mitä toimintaa rakennuksessa on. Rakennuksissa, joissa ei ole käytössä mitään normaalista poikkeavaa säätöjärjestelmää (esimerkiksi suurin osa asuinrakennuksista), vaihtelua kaukolämmön kulutukseen aiheuttaa lähinnä lämpimän käyttöveden kulutus (ulkolämpötilan ja aurinkoisuuden lisäksi). Lämmönkulutuksessa tämä on nähtävissä suhteellisen pieninä aamu- ja iltakulutushuippuina. Asuinrakennuksissa lämmönkulutuksen päivätason vaihtelu on suurinta keväällä ja syksyllä, jolloin ulkolämpötila vaihtelee eniten. Talviaikaan ennen noin vuotta 2003 rakennetuissa koneellisen ilmanvaihdon kiinteistöissä ilmanvaihdoteho yleensä puolittuu automaattisesti, kun pakkasta on 15 astetta tai enemmän, mikä toimii eräänlaisena automaattisena kysyntäjoustopuna.

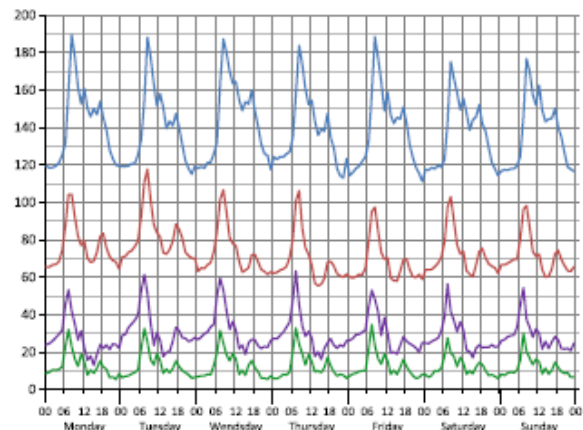
Suurimmat päivä- ja viikkotasolla nähtävät lämmönkulutuksen vaihtelut tapahtuvat rakennuksissa, joissa on käytössä erilaisia energiatehokkuusjärjestelyitä, kuten aikasäädetty ilmanvaihtojärjestelmä tai lämpötilan alentaminen yöaikana. Tällaisia rakennuksia ovat esimerkiksi julkiset rakennukset sekä liike- ja teollisuusrakennukset. Tällaisten rakennusten lämmönkulutuksessa aamuhuiput ovat nähtävissä hyvin selkeästi. Toimistorakennukset sekä julkiset rakennukset soveltuvat yleensä hyvin kysyntäjoustopuon, sillä kulutuksessa on selkeä rytmi, jossa kulutukseen tulee aamu- ja iltahuippu.

Alla olevissa kuvissa on esitetty eri toiminnassa olevien rakennusten tuntitasen lämmöntarpeen rytmi (Gadd & Werner 2013a). Kuvaajat perustuvat kaukolämpödataan, joka on kerätty Ruotsista 141 rakennuksesta kahden kaukolämpöjärjestelmän alueelta yhden vuoden ajalta. Tarkastellut rakennukset on jaoteltu asuinrakennuksiin, julkisiin rakennuksiin ja liikerakennuksiin. Jaottelua on tarkennettu rakennuksissa käytettyjen energiansäästötoimenpiteiden mukaan. Kuvassa 4 on esitetty erityyppisten rakennusten lämpötehon tarpeen viikkorytmin keskiarvot eri vuodenaikoina (joulukuu–helmikuu, maalisku–huhtikuu & loka–marraskuu, toukokuu & syyskuu, kesäkuu–elokuu).

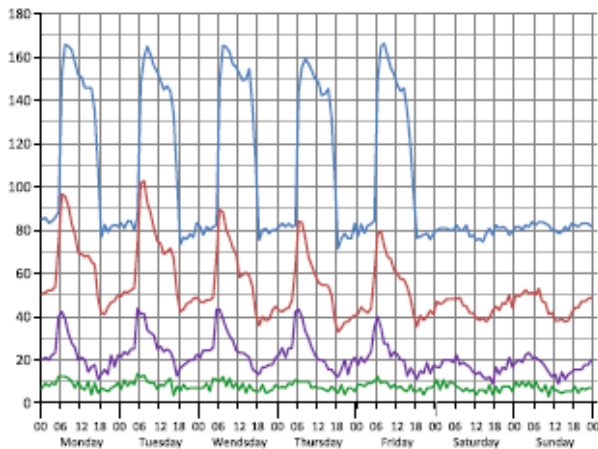
Lämmöntarverytmi asuinrakennuksista, joilla käytössä jatkuvatoiminen lämmitys



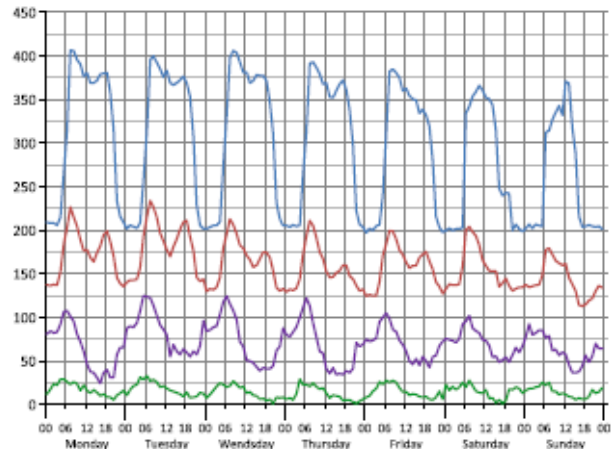
Lämmöntarverytmi julkisista rakennuksista, joilla energiansäästötoimenpiteenä yöaikainen sisälämpötilan pudotus



Lämmöntarverytmi julkisista rakennuksista, joilla on käytössä ilmastoinnin energiasäästötoimenpiteitä viitenä päivänä viikossa



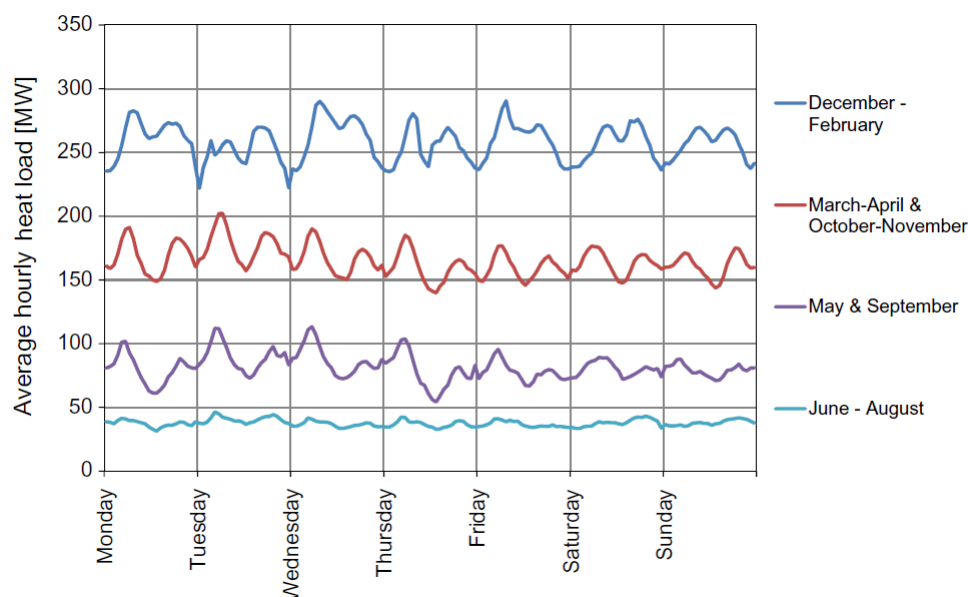
Lämmöntarverytmi liikekiinteistöistä, joita käytetään viikon jokaisena päivänä ja joissa on käytössä energiasäästötoimenpiteitä



Kuva 4. Erityyppisten rakennusten tuntitason lämmöntarpeen keskiarvoja (kW) eri vuodenaikoina (yläikäyrästä lähtien: joulukuu–helmikuu, maaliskuu–huhtikuu & loka–marraskuu, toukokuu & syyskuu, kesäkuu–elokuu) (Gadd & Werner 2013a)

Koko kaukolämpöjärjestelmän osalta kulutusvaihtelut ovat pienempiä kuin yksittäisten asiakkaiden kohdalla, sillä asiakkaiden eriaikaiset kysyntähuiput risteilevät ja siten tasapainottavat kysyntää. Yleisesti kaukolämpöjärjestelmän tason vaihtelusta voidaan sanoa, että lämmöntarpeessa on nähtävissä aamu- ja iltahuiput, joita aiheuttavat lämpimän käyttöveden tarve sekä ilmanvaihtokoneiden käynnistyminen. Ulkolämpötilan suuret vuorokausivaihtelut kevät- ja syysaikana näkyvät lämmönkysynnässä pudotuksena keskipäivällä, kun lämpötilan kohoaminen ja mahdollinen auringonpaiste lämmittävät rakennuksia.

Alla olevassa kuvassa on esitetty tuntitason lämmöntarpeen keskiarvo eri vuodenaikoina (joulukuu–helmikuu, maaliskuu–huhtikuu & loka–marraskuu, toukokuu & syyskuu, kesäkuu–elokuu) eräessä ruotsalaisessa kaukolämpöjärjestelmässä, jonka vuosittainen lämmöntuotanto noin 4400 TJ (n. 1200 GWh) (Gadd & Werner 2013b). Kuvassa erottuvat lämmöntarverytmin kolme piirrettä: 1) päivän aikana on kaksi kulutushuippua (aamu- ja iltahuiput), 2) suuret ulkolämpötilaerot yön ja päivän aikana keväisin ja syksyisin aiheuttavat hetkellisen lämmönkulutuksen pudotuksen keskipäivällä, ja 3) järjestelmätasolla lämmöntarve on eri viikonpäivinä melko samanlainen eivätkä viikonlopun päivät eroa rytmiltään juurikaan arkipäivistä.



Kuva 5. Tuntitason lämmöntarpeen keskiarvo eri vuodenaikoina ruotsalaisessa kaukolämpöjärjestelmässä, jonka vuosittainen lämmöntuotanto on noin 4400 TJ (1 200 GWh) (joulukuu–helmikuu, maalis–huhtikuu & loka–marraskuu, toukokuu & syyskuu, kesäkuu–elokuu) (Gadd & Werner 2013b)

Kannattavuuden kannalta olennaisimmat tekijät

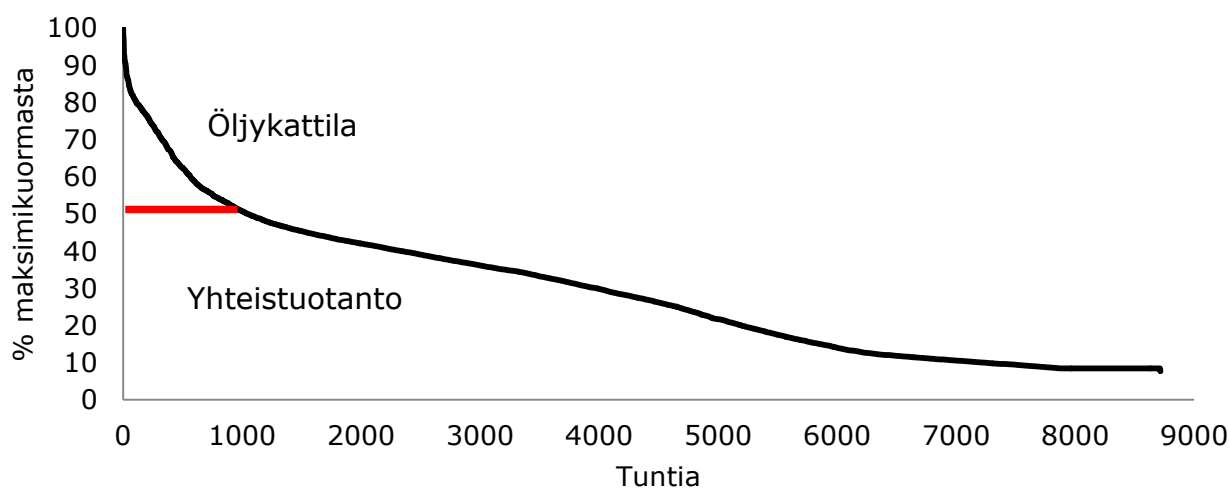
Lämmön kysynnän kausivaihtelun vuoksi kaukolämpöjärjestelmässä tarvittava teho tuotetaan normaalisti vähintään kahdella tuotantoyksiköllä, peruskuormalaitoksella ja huippulämpökeskuksella. Tämä on edullisinta sekä talouden että järjestelmän luotettavuuden kannalta. Peruslämpö tuotetaan järjestelmästä riippuen normaalisti CHP-laitoksilla tai kiinteän polttoaineen kattilalla (KPA-kattila), joissa investointikustannukset ovat suuret, ja ne nousevat yksikkökoon kasvaessa. CHP-laitoksista saadaan yleensä paras hyötysuhde (ja paras kannattavuus) silloin, kun laitoksia voidaan ajaa jatkuvasti täydellä teholla. KPA-kattiloiden hallittavuus on helpointa melko suurella teholla. Huippulämpö tuotetaan erilliskattiloilla, joissa polttoaineena on usein kevyt polttoöljy. Huippulaitos voi toimia myös varalaitoksena.

Kaukolämpötoiminnan kannattavuus perustuu peruslämmön toimittamiseen, kun taas huippulämmön toimittaminen on usein tappiollista ja parhaimmillaan nollakatteista. Erityisesti nopeat kulutuksen vaihtelut aiheuttavat lisäkustannuksia kaukolämpöjärjestelmälle ja vähentävät sen tehokkuutta. Kaukolämpöjärjestelmä tarvitsee kulutuksen mukaan joustavan tuotantorakenteen tai kysyntäjoustop kaltaisia järjestelyjä, joilla kulutuksen vaihteluun vastataan. Kaukolämpötoiminnan kannattavuus perustuu Kuvan 6 mukaisesti ensisijassa peruskuormalaitosten korkeaan käyttöasteeseen, käytettävyyteen ja hyötysuhteeseen. Näitä tekijöitä voidaan parantaa mm. minimoimalla voimalaitosten käynnistysten/alasajojen määrä ja maksimoimalla täydellä kuormalla ajettavan käyntiajan. Lisäksi tekijöihin vaikuttavat oikein mitoitetut tuotanto-, verkosto- ja asiakaslaitteet sekä järkevät polttoainevalinnat. Toinen merkittävä kaukolämpötoiminnan kannattavuuteen vaikuttava tekijä on (erityisesti fossiilisia polttoaineita käyttävien) huippulämpökeskusten käytön minimointi. Kolmas merkittävä kannattavuuteen vaikuttava tekijä on tasapainoinen lämpöverkko. Tasapainoisella verkolla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että verkko on optimaalisesti kuormitettu ja se kestää putkirikon – siinä ei ole siis merkittäviä vikoja, pullonkauloja tai saneerausvelkaa. Kaikkiin kolmeen kannattavuuden kannalta olennaisimpaan tekijään voidaan vaikuttaa positiivisesti kaukolämmön kysyntäjoustop hyödyntämällä.

- 1 Peruskuormalaitosten hyötysuhteen, käytettävyyden ja käyttöasteen maksimointi
- 2 Huippulämpökeskusten ja muiden kustannukseltaan peruskuormalaitoksia kalliimpien voimalaitosten käytön minimointi
- 3 Tasapainoinen lämpöverkko

Kuva 6. Kaukolämpötoiminnan kannattavuuden kannalta olennaisimmat tekijät

Kuvassa 7 on esitetty kuvitteellisen kaukolämpöjärjestelmän tehon pysyvyyskäyrä, jossa lämpö tuotetaan kahdella eri tuotantolaitoksella, eli tyypillinen keskisuurten kaupunkien tilanne. CHP-teho voi jakautua myös kahdelle laitokselle, esim. uudelle ja vanhalle.



Kuva 7. Pysyvyyskäyrä suomalaisessa keskisuuressa kaukolämpöjärjestelmässä vuodelta 2011

3. Kysyntäjouaston hyödyt ja haitat sekä hyötypotentiaali

Lähtökohdat kysyntäjouaston hyötyjen, haittojen ja potentiaalin tarkasteluun

Kansainvälisiä tutkimuksia kysyntäjoudesta on tehty melko paljon, mutta suurin osa tutkimuksista keskittyy sähköjärjestelmiin. Kaukolämmön kysyntäjousto on jäänyt tutkimuksissa vähemmälle huomiolle, mutta aiheesta julkaistujen raporttien ja artikkelien määrän kehityksen perusteella kiinnostus kysyntäjousta kohtaan myös kaukolämpöjärjestelmissä on selkeästi ollut kasvussa viime vuosina. Tässä sekä seuraavissa luvuissa esitellään sekä tieteellisestä kirjallisuudesta että kaukolämpötoimialan raporteista löydettyjä kaukolämmön kysyntäjoustoan liittyviä julkaisuja ja käytännön esimerkkejä tämän selvityksen tärkeimpien tutkimuskysymysten mukaisesti jaoteltuna.

Yleisinä huomioina tutkimuksista ja alan kirjallisuudesta voidaan todeta, että termiä kysyntäjousto käytetään varsin kevyesti. Monissa kysyntäjoustoan viittaavissa tutkimuksissa on itse asiassa selvitetty erilaisia energiansäästötoimenpiteitä, tai termi on ainakin ymmärretty eri tavalla kuin tässä selvityksessä. Suurin osa selvityksistä ei myöskään tarkastele kysyntäjouaston hyötyä tai potentiaalia koko kaukolämpöjärjestelmän tasolla, vaan suuressa osassa tutkitaan vain sitä, mitä rakennusten sisällä tapahtuu, jos lämpö katkaistaan tai sitä vähennetään (esim. miten sisälämpötila laskee, miten asukkaat sen kokevat). Joissain selvityksissä esitetään arvioita järjestelmätason vaikutuksista, mutta mallinnukset tai käytännön esimerkit puuttuvat. Käytännön esimerkkien ja mallinnusten vähäisyys on suuri haaste kaukolämmön kysyntäjouaston edistämisen kannalta, ja ne muodostavat selkeän aihepiirin jatkotutkimuksen kohteeksi. Jos monissa selvityksissä tarkasteltuja yksittäisiä rakennuksia koskevia toimenpiteitä kuitenkin toteutetaan silloin, kun se on kaukolämpöjärjestelmän kannalta järkevää, ne voivat johtaa koko järjestelmän kannalta positiiviseen kaukolämmön kysyntäjoustoan. Koska edellä mainitun kaltaisista teknisistä ja kysyntäjouaston toteutustapoihin liittyvistä tutkimuksista voi saada arvokkaita näkökulmia kysyntäjouaston toteutusmalleihin, myös tällaisia selvityksiä on tarkasteltu tässä työssä.

Aiemmissa tutkimuksissa ja selvityksissä ei ole juurikaan tarkasteltu kysyntäjouaston ansaintalogiikkaa, hyötyjen jakamista tai kannustimia. Mielenkiintoista on lisäksi, että kysyntäjouaston haitoista tai esimerkiksi negatiivisesta kysyntäjoudesta ei löydetty selvityksiä eikä näitä asioita käsitelty lainkaan löydettyissä tutkimuksissa.

Konsultin lähtökohta kysyntäjouaston tarkasteluun on, että lähtökohtaisesti kaukolämmön kysyntäjoudesta ei ole käytännön hyötyä, jollei se johda (yhdessä muiden toimenpiteiden kanssa) merkittäviin hyötyihin jossakin osassa järjestelmää joko investointien tai käyttötoiminnan kautta syntyvinä säästöinä. Toisin sanoen yksittäisten kiinteistöjen toteuttamista toimenpiteistä ei ole hyötyä, jolleivät ne johda järjestelmätasolla hyötyihin. Jos näin ei tapahdu, muutamien kaukolämpöasiakkaiden säästö kaatuu muiden asiakkaiden maksettavaksi. Toinen edellytys kysyntäjouaston toteuttamiselle on se, että syntyvä lisäarvo on voitava jakaa tasapuolisesti sen synnyttämiseen osallistuvien kesken panosten suhteessa – tämä on luontevaa toteuttaa tariffijärjestelmän kautta.

Kysyntäjouaston hyötyjen lähteitä ja potentiaalia tarkastellessa on myös muistettava, että kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan huomattavasti muun muassa tuotantorakenteen, lämpöverkon rakenteen, kulutusprofiilin ja lämmön varastointikyvyn suhteen. Tämän takia kysyntäjouaston hyötyjä ja niiden potentiaalia koskevia arvioita ei voi yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöjärjestelmiä – ja tämä pätee myös kysyntäjouaston toteutusmalliin. Joissain järjestelmissä kysyntäjoustolla pystytään parantamaan voimalaitosten käyttöastetta, joissain minimoimaan öljykattiloiden tai muun huippukapasiteetin käyttöä, joissain optimoimaan CHP-tuotannon ajoitusta kalliin sähkön aikaan ja joissain lykkäämään verkon kapasiteetin parantamiseksi tarvittavia investointeja. Kysyntäjousta tulee siis aina tarkastella järjestelmäkohtaisesti.

Lisäksi kysyntäjouaston potentiaalia arvioitaessa on hyvä huomata, että kysyntäjouaston potentiaalia voidaan lähestyä joko pitkän tähtäimen teoreettisen maksimipotentiaalisen näkökulmasta tai huomattavasti sitä alhaisemman tämän päivän käytännön potentiaalisen näkökulmasta. Maksimipotentiaali voidaan arvioida simulointien avulla muokkaamalla verkon kuormituskäyrä kaukolämmön tuotannon ja verkon kannalta optimaaliseksi. Tämän potentiaalisen toteuttaminen vaatisi kuitenkin käytännössä sitä, että kaukolämpöyhtiö pystyisi ohjaamaan kaikkien asiakkaidensa lämpötehon tarvetta täysin halunsa mukaan, mikä ei ole realistista. Käytännössä potentiaali täytyy arvioida tästä hetkestä muutaman vuoden aikaperspektiivillä huomioiden rajoitukset kaukolämpöasiakkaiden tehontarpeen leikkaamisessa ja kysyntäjouaston teknisissä toteutusmahdollisuuksissa sekä toteutuksen vaatimat investoinnit. On toki hyvä huomata, että nyt tehtävillä päätöksillä voidaan asiakkaita kannustaa esimerkiksi hinnoittelun keinoin tekemään sellaisia teknisiä ratkaisuja, joiden kulutusprofiili on edullinen koko kaukolämpöjärjestelmän kannalta, jolloin mm. hinnannostopaineita saadaan pienennettyä. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi huippukulutuksen ja -tehon merkityksen korostamista nykyistä enemmän.

Kysyntäjouaston hyötyjen ja haittojen lähteet

Kysyntäjouaston hyötyjä on sivuttu monissa tutkimuksissa. Hyödyt on usein jaettu kaukolämpöryityksen ja asiakkaan näkökulmiin. Kaukolämmön kysyntäjouaston haittoihin ei ole otettu kantaa yhdessäkään tässä kirjallisuuskatsauksessa läpikäydyssä tutkimuksessa.

Kysyntäjouastosta mainitaan koituvan kaukolämpöryitykselle seuraavia etuja (mm. Kärkkäinen et al. 1999, Kärkkäinen et al. 2003, Koskelainen 2006, Kensby 2014, IEA 2003):

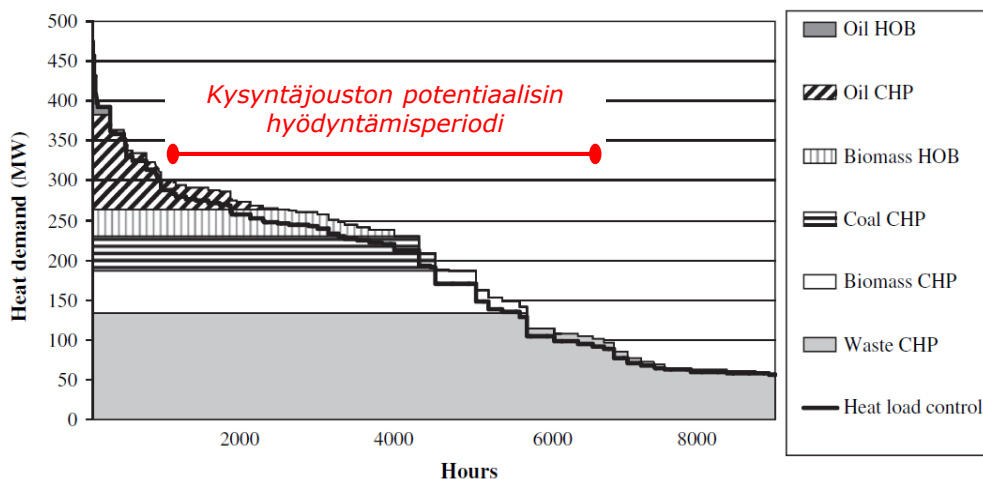
- energian hankinta- ja -tuotantokustannusten minimointi
- harvempia laitosten ylös- ja alasajoja tasaisemman kysynnän ansiosta
- kuormitusasteen lisäyksestä johtuva tuotantokapasiteetin tehokkaampi hyväksikäyttö
- alhaisemmat lämmön tuotantokustannukset, koska suurempi osa lämmöstä voidaan tuottaa yhteistuotannolla
- lämmöntuotanto yhteistuotantolaitoksilla, lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla sähköhinnan (ei lämmöntarpeen) mukaan
- kaukolämpöverkoston laajennusten lykkäys
- alhaisemmat järjestelmän investointikulut, jotka johtuvat mahdollisuudesta käyttää kaukolämpöverkkoa tehokkaammin kysyntäjouaston ansiosta

Kysyntäjouaston hyödyiksi kuluttajan kannalta mainitaan

- alhaisemmat lämmityksen käyttökustannukset, jos kysyntäjouaston avulla lämpöenergiaa tai pumppausenergiaa kuluu vähemmän
- alhaisemmat energiakulut, jos asiakas alentaa lämmönkulutustaan kalliin lämmöntuotannon aikana ja kuluttaa enemmän silloin kun lämpö on halvempaa - tämä hyöty tulee esiin hinnoittelumallin kautta
- kuluttajapalveluiden kehittyminen uusien hinnoittelumallien ja liiketoimintamallien kautta

Yleisiä kysyntäjouaston etuja mainittiin olevan muun muassa energiapolitiikan edistäminen energian säästön ja ympäristökysymysten osalta.

Kuten edellä jo todettiin, kaukolämmön kysyntäjouastoon liittyvissä julkaisuissa on hyvin vähän energiajärjestelmätason mallinnuksia tuotannon optimoinnista tai esimerkkejä energiajärjestelmätasolla käytännössä saavutetuista kysyntäjouaston hyödyistä (tai haitoista). Lähes kaikissa läpikäydyissä tutkimuksissa kysyntäjouaston potentiaali ja sen hyödyt koko järjestelmän kannalta ovat lähinnä arvioita (mm. Kärkkäinen et al. 2003, Kensby 2014) ja näitä sekä kysyntäjouaston teknistä toteutusta on esitetty kappaleessa 4. Yksi tällainen tutkimus on tehty ruotsalaisten tutkijoiden toimesta. Työssä (Difs et al. 2010) tutkittiin mallinnusten avulla kuinka lämpötehon säännöstely rakennuksissa vaikuttaa koko kaukolämpöjärjestelmän toimintaan taloudellisesti, ympäristötekijöiden kannalta sekä myös marginaalituotannon osalta. Lämpötehon säännöstelyn vaikutukset simuloitiin muuttamalla kysyntäkäyrää. Tutkimus kohdistui Linköpingin kaukolämpöjärjestelmään, jossa kaukolämmön tuotanto ja höyryn tuotanto olivat 1700 GWh (vuosi 2008) ja lämpötehon kysynnän maksimi noin 500 MW. Tutkimuksessa kysyntäjouastotoimiin osallistui 24 %:a kaukolämmitystä kerrostaloista ja yhteensä kysyntäjouastolla vähennettiin kaukolämmön vuosittaista kysyntää 10 GWh (vähennyspotentiaali perustuu seuraaviin tutkimuksiin Vernerstedt et al. 2008a ja 2008b; teknisestä toteutuksesta on kirjoitettu luvussa 4). Tulokset osoittivat, että kyseisellä tavalla toteutettu kaukolämmön kysyntäjousto toi säästöjä varsinkin keskivertolämpötehon tarpeen aikoina, kun taas talviajan huipputehojen ja kesäajan minimitehujen aikana kysyntäjouastolla ei ollut suurta vaikutusta (ks. Kuva 8). Huippu- ja minimitehujen aikaan kysyntäjouaston käytöllä oli vain vähän vaikutusta huippukattiloiden käyttöön. Syynä tähän esitettiin kesäajan osalta se, että kyseistä lämpötehon säätöä ei tehty käyttöveden lämmitykselle ja kesäisin lämmöntarve koostuu pääasiassa käyttöveden lämmityksestä. Talviajan osalta taas selitykseksi esitettiin, että lämpötehon säätöä ei pystytty toteuttamaan kovin monena päivänä matalien ulkolämpötilojen takia.



Kuva 8. Kysyntäjoustolla tasoitettu kysyntäkäyrä Linköpingin kaukolämpöjärjestelmästä (perustuu simulointiin) (lähde: Difs et al. 2010)

Kysyntäjouston ensisijaiset hyötyjen lähteet ovat haastattelujen perusteella voimalaitoksen käyttöasteen parantaminen (mm. vähemmän alasajoja ja käynnistämisiä) sekä huippulämpökeskusten käyntiajan pienentäminen tai järjeistämisen – erityisesti syksyllä ja keväällä, kun vuorokauden sisäiset lämpötilat vaihtelevat voimakkaasti. Luonnolliset kulutuksen kysyntäjouston potentiaaliset hyödyt riippuvat paljolti kaukolämpöjärjestelmästä (järjestelmän koko, tuotantorakenne).

Kuvassa 9 on esitetty Konsultin laatima yhteenveto kaukolämmön kysyntäjouston hyödyistä kaukolämpöyhtiön ja toisaalta kaukolämpöasiakkaiden ja yhteiskunnan näkökulmasta.

Kaukolämmön tuotanto

- Peruskuormavoimalaitosten käyttöastetta ja käyntiaikaa saadaan parannettua⁽¹⁾ (ensisijainen tavoite)
- Huippulämpökeskusten ja muiden kustannukseltaan peruskuormalaitoksia kalliimpien voimalaitosten käyttöaikaa saadaan lyhennettyä, mutta toisaalta käyttöastetta parannettua
- Uusia tuotantoinvestointeja voidaan lykätä tai toteuttaa kevyempinä (jos investoija voi luottaa kysyntäpään joustoihin)
- CHP-laitoksilla tuotettu sähkö saadaan ajoitettua kalliimman sähkön aikoihin
- Lämpöpumppujen⁽²⁾ käyttö saadaan ajoitettua edullisemman sähkön aikoihin

1) Esimerkiksi harvempia laitosten ylös- ja alasajoja tasaisemman kysynnän ansiosta
2) Tai sähkökattiloiden

Kaukolämpöverkko

- Pumppausenergian ja/tai -tehon tarpeen aleneminen (verkkotasapainon ylläpidon helpottuminen)
- Verkostoinvestointien lykkääminen tai mitoituksen keventäminen
- Järjestelmätason energiatehokkuuden parantaminen

Kaukolämpöasiakkaat

- Alhaisemmat kiinteät tehomaksut, jos ne perustuvat mitattuun todelliseen tehontarpeeseen, ja sitä saadaan alennettua
- Alhaisemmat energiakustannukset, jos tariffimalli palkitsee energiankäytön siirtämisestä edullisemman lämmön hinnan ajankohtiin
- Kuluttajapalveluiden kehittyminen uusien hinnoittelu- ja liiketoimintamallien kautta

Yhteiskunta

- Energiantuotannon ympäristöystävällisyyden edistäminen
- Mahdollinen yleinen energiansäästö
- Mahdollisten vientikelpoisten ratkaisujen kehittäminen

Kuva 9. Kaukolämmön kysyntäjouston hyötyjen lähteitä eri toimijoiden näkökulmasta

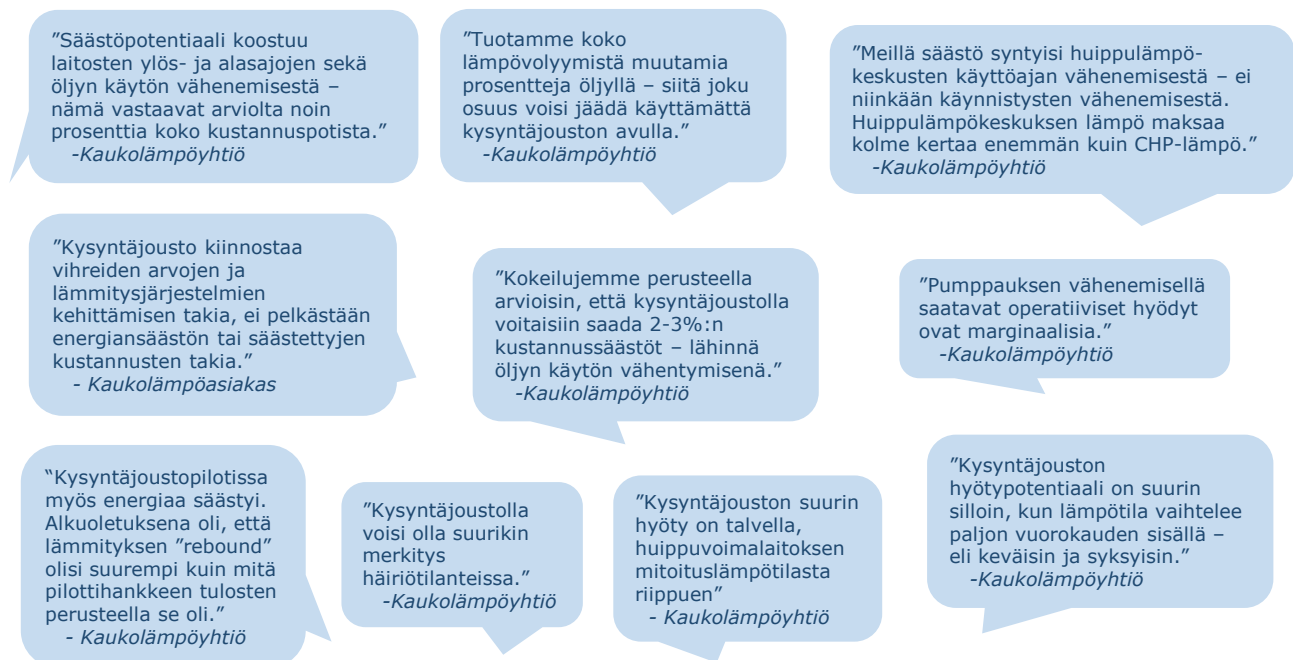
Kuten edellä mainittiin, kaukolämmön kysyntäjouston haittoja ei ole tarkasteltu aiemmassa aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa. Haastattelujen ja konsultin analyysin perusteella kysyntäjouston potentiaalisina haittoina voidaan esittää ainakin seuraavat seikat:

- Huonosti rakennettu kysyntäjouston toteutusmalli saattaa johtaa siihen, että lämpötehopiikki muuttuu entistä korkeammaksi, mutta vain eri ajankohtaan (näin tapahtuu esim. silloin, jos kysyntäjousto on laajasti käytössä ja

kaikilla kiinteistöillä on samanlainen ohjauslogiikka; kun kaikille kiinteistöille annetaan sama hinta- tai muu signaali, ne käyttäytyvät todennäköisesti täysin samalla tavalla, mikä voi johtaa ylituotantitilanteeseen)

- Ennuste-epävarmuuden toteutuessa kysyntäjousto saattaa johtaa ei-toivottuihin vaikutuksiin järjestelmätasolla (esimerkiksi, jos kiinteistöjen ennakoidaan käyttäytyvän tietyllä tavalla, mutta asukkaiden ennakoimattomien toimenpiteiden ja/tai ennakoimattomien sääolosuhteiden muutosten vuoksi kiinteistö käyttäytyykin eri tavalla)
- Mahdollinen etukäteen sovittu kiinteä kannustin asiakkaille saattaa johtaa tappioihin kaukolämpöyhtiölle, jos oletetut hyödyt eivät konkretisoidukaan
- Kysyntäjoustoprojektin toteutukseen tarvittavat investoinnit saattavat olla suuremmat kuin sillä saatavat yhteenlasketut nettokassavirrat – tai saman hyödyn olisi saattanut saavuttaa edullisemmin esim. lämpöakun avulla
- Liian voimakkaana toteutettu ohjaus voi heikentää asiakastytyvyyttä erityisesti silloin, kun se toteutetaan energiayhtiön suorana ohjauksena

Kuvassa 10 on esitetty haastatteluissa esitettyjä asiantuntijoiden näkemyksiä kysyntäjoustoprojektin hyödyn lähteistä ja hyötypotentialista. Kommentit esitetään anonyymeinä, mutta kuitenkin haastateltavan edustama sidosryhmä mainitaan kommentin yhteydessä.



Kuva 10. Haastatteluissa esitettyjä asiantuntijoiden näkemyksiä kysyntäjoustoprojektin hyödyn lähteistä ja hyötypotentialista

Kysyntäjoustoprojektin hyötypotentiali

Kuvaan 11 on koottu kysyntäjoustoprojektin hyötypotentialiin vaikuttavia järjestelmäkohtaisia tekijöitä. Yleisellä tasolla voidaan sanoa, että mitä suuremmat ovat erot eri lämmöntuotantolaitoksilla tuotetun lämmön hinnassa ja mitä huonommat ovat lämmön varastointimahdollisuudet, sitä suurempi on kysyntäjoustoprojektin hyötypotentiali kaukolämpöjärjestelmässä. Tämä käy ilmi myös jäljempänä kuvattujen simulointien tuloksista. Hyötypotentialia kasvattavat myös lämpökuorman suhteen niukasti mitoitettujen voimalaitokset, jolloin kysyntäjoustoprojektilla voidaan mahdollisesti vähentää huippulämpökeskusten ylös- ja alasajoja. Samoin kysyntäjoustoprojektilla aikaansaatu joustoprojektin merkitys korostuu, jos järjestelmässä on tarjolla saatavuudeltaan vaihtelevaa teollisuuden ylijäämälämpöä tms., joka kattaa vain osan järjestelmän tehon tarpeesta. Kysyntäjoustoprojektilla voidaan tasoittaa vaihtelevan saatavuuden vaikutuksia muun lämmöntuotannon tarpeen heilahteluun – toki sama efekti voitaisiin saada aikaan myös lämpöakulla. Lämpöakkuun verrattuna kysyntäjousto on kuitenkin parempi joustoprojektin mekanismi, jos kaukolämpöverkko on hajanainen ja verkossa on selkeitä pullonkauloja. Kysyntäjousto voidaan kehittyneessä järjestelmässä kohdistaa hyvinkin tarkasti tietylle maantieteelliselle alueelle, mikä taas voi olla lämpöakun avulla hankalampaa.

Hyötypotentiaalia kasvattavia tekijöitä

- Huonot lämmön varastointimahdollisuudet
- Suuret erot eri lämmöntuotanto-laitoksilla tuotetun lämmön hinnassa
- Lämpökuorman suhteen niukasti mitoitettut voimalaitokset
- Tarjolla saatavuudeltaan vaihtelevaa teollisuuden ylijäämlämpöä tms., vain osa tehosta kattaen
- Epäoptimaalinen kaukolämpöverkko (asiakkaat hajallaan, kriittisiä pullonkauloja)

Hyötypotentiaalia alentavia tekijöitä

- Paljon lämpöakkukapasiteettia
- Runsaasti erilaista lämmöntuotantoa: CHP, lämpöpumput, hakekattila...
- Lämpökuorman suhteen reilusti mitoitettut voimalaitokset
- Tarjolla runsaasti yhteistoimintaan perustuvaa kiinteää lämmöntoimitusta
- Suuri kuormitustiheys
- Väljästi mitoitettu kaukolämpöverkko

Kuva 11. Kysyntäjouaston hyötypotentiaaliin vaikuttavia järjestelmäkohtaisia tekijöitä

Seuraavassa käydään läpi tuloksia ja johtopäätöksiä simuloinneista, joilla selvitettiin erityisesti kysyntäjouaston pitkän tähtäimen teoreettista potentiaalia sekä potentiaaliin vaikuttavia tekijöitä. Oletuksena mallinuksissa oli, että kaukolämpöyhtiöt voisivat kysyntäjouaston avulla muokata kaukolämmön kuormituskäyrän omasta näkökulmastaan optimaaliseksi. Koska tämä ei ole käytännössä realistisesti mahdollista vielä vuosiin, simuloinnin tuloksia kannattaa pitää suuntaa-antavina arvioina kysyntäjouaston pitkän tähtäimen maksimipotentiaalista.

Simuloinnit tehtiin Energy Pro -ohjelmistolla. Se pyrkii minimoimaan käyttäjän määrittelemän kaukolämpöjärjestelmän käyttökustannukset esimerkiksi vuoden aikana. Ohjelmaan annetaan syöttötietoina laitosten ja mahdollisten lämpövarastojen ominaisuudet, lämmönkulutus ja sähkön pörssihinta tuntitasolla, polttoaineiden hinnat ja laitosten muut muuttuvat käyttökustannukset. Ohjelma ottaa jossakin määrin huomioon myös laitosten tehonsäätönopeuksia ja käynnistys- ja pysäytyskustannuksia. Optimointi etenee siten, että ohjelma hakee ensin lämmöntuotannon kannalta edullisimmat tunnit, ts. ne, jolloin lämmöntuotantokustannus on edullisimmillaan ja ohjaa laitokset käymään silloin, sitten seuraavaksi kannattavimmat jne., kunnes koko lämmöntarve on täytetty. Lämmöntuotantokustannus CHP-laitoksella lasketaan siten, että polttoaine- ja muista muuttuvista kustannuksista vähennetään sähköstä kunakin tuntina saatava tuotto, ja jäljelle jäävä kustannus kohdennetaan kaukolämmölle.

Laskennassa oli mukana neljä laitostekoonpanovaihtoehtoa. Perustapauksessa on CHP-laitos, joka täyttää puolet kaukolämmön huipputehontarpeesta ja huippuöljykattila. Muissa vaihtoehtoissa tätä on täydennetty pienemmällä tai suuremmalla lämpöpumpulla (LP) ja/tai pelkkää lämpöä tuottavalla hakekattilalla. Taulukossa 1 on esitetty vaihtoehtojen ominaisuudet. MVV:t tarkoittavat lämpötehoa.

Taulukko 1. Laitosten lämpötehot simuloinnissa

	CHP, MW	Öljy, MW	LP, MW	Hake, MW
CHP+öljy+hake+pieni LP	50	70	13	25
CHP+öljy+iso LP	50	70	25	-
CHP+öljy+pieni LP	50	70	13	-
CHP+öljy+hake	50	70	-	25
CHP+öljy	50	70	-	-

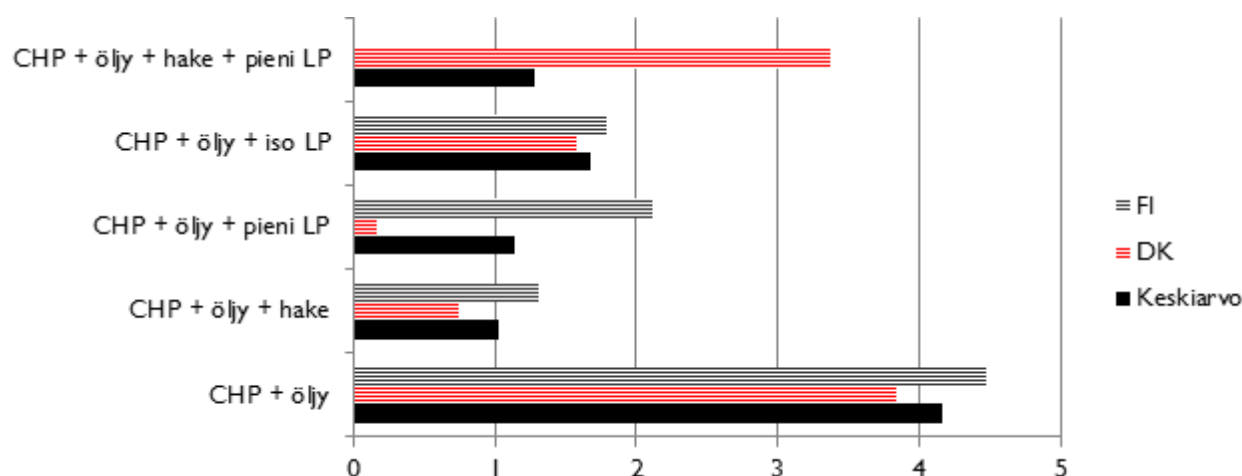
Maksimilämmönkulutus on laskelmassa 100 MW, CHP:n sähköteho 30 MW (eli rakennusaste 0,6) ja lämpöpumpun COP 3. Kaikissa tapauksissa järjestelmässä on oletettu olevan lämpövarasto, jonka kapasiteetti energiassa mitaten on noin 1/3000 koko vuoden kulutuksesta eli hiukan pienempi kuin Suomessa kaukolämpöjärjestelmissä keskimäärin.

Lämmönkulutusprofiili on saatu keskikokoisesta suomalaisesta järjestelmästä vuodelta 2011 ja sähkön hintana on käytetty joko vuoden 2011 Nord Poolin Suomen aluehintaa tai Tanskan aluehintaa vuodelta 2014, jossa tapauksessa sähkön hinta on ollut keskiarvona alaisempi, mutta hinnan vaihtelu suurempi. Laitosten muuttuvat kustannukset on oletettu taulukon 2 mukaisiksi. Puulle ei ole oletettu olevan mitään veroja tai tukia. Kaikki hinnat ovat ilman arvonlisäveroa.

Taulukko 2. Laitosten muuttuvat kustannukset ja tuotot simuloinnissa

Laitostyyppi	Polttoaine	Sähkö, tapaus FI	Sähkö, tapaus DK	Käyttö ja kunnossapito, €/lämpö-MWh	Käynnistys, €/pa-MW
	€/MWh				
CHP	20	0-150, keskiarvo 49	-60-160, keskiarvo 31	2	20
Öljykattila	80			5	-
Hakekattila	20			2	-
Lämpöpumppu	sähkö			3	-

Arviossa oletettiin, että lämmönkulutusta leikataan kysyntäjoustopilla siten, että 50%:a huipputehosta ylittävistä kuormista siirretään ko. osuuden ylittävä osa viereisille tunneille. Kokonaiskysyntä ei muutu. Kyseinen huipputehon siirto vaatisi toteutuakseen jonkinasteista lämmön varastointia rakenteisiin tai erillisiin rakennuskohtaisiin varastoihin tms. Energiankäytön ajankohdan siirto on tässä oletettu melko radikaaliksi, jotta vaikutus saadaan näkyviin. Kuvassa 12 on esitetty siirroilla aikaansaatu säästö.

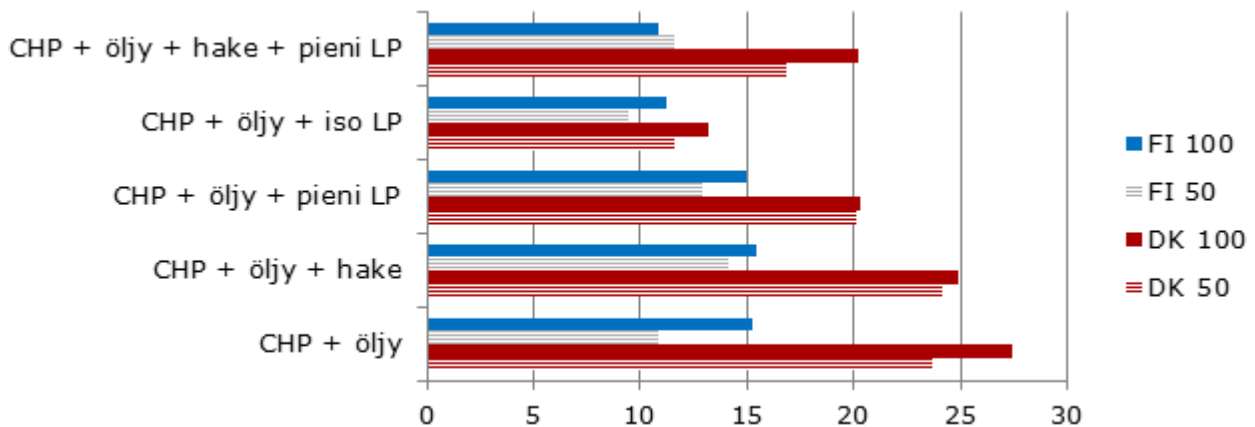


Kuva 12. Säästö lämmöntuotantokustannuksissa (€/MWh), joka laskennallisesti saavutetaan huipputehon leikkauksella ja vastaavan energiamäärän siirrolla pienemmän kuorman tunneille (laitosten tehosuhteet esitetty taulukossa 1)

Suurimmillaan säästöt ovat – kuten olettaa saattaa – järjestelmällä, jossa tuotantoyksiköiden välinen marginaalikustannusero on suurimmillaan. Järjestelmän monipuolisuus ja suuri kapasiteetti suhteessa kulutukseen puolestaan pienentävät kysyntäjoustopilla saavutettavaa hyötyä. Esimerkiksi ylimmässä vaihtoehdossa Suomessa ei synny säästöä, koska ko. järjestelmässä on useita vaihtoehtoisia lämmöntuotantomuotoja, joiden tuotantokustannusten välillä on pienehköt erot. Lisäksi kysyntäjoustopin hyötyä kyseisessä järjestelmässä Suomen osalta vähentää se, että Tanskassa sähkön hinnat heiluvat merkittävästi enemmän. Huomattakoon toki myös, että simuloinnissa Tanskan sähkön hinnat ovat vuodelta 2014 ja Suomen sähkön hinnat vuodelta 2011, kuten edellä todettiin.

Järjestelmässä oletusarvoisesti olevan lämpövaraston koon vaikutusta kysyntäjoustopuon kannattavuuteen simuloitiin myös. Ehkä hieman yllättäen varastokoon kasvaessa ainakin ohjelman käyttämällä optimointitavalla kysyntäjoustopuon hyöty säilyy lähes samana eli varasto ja kysyntäjousto eivät siinä mielessä kilpaile keskenään, vaan paras tulos saavutetaan käyttämällä molempia.

Lämmöntuotannolla katettavat muuttuvat kustannukset kokonaisuutena ovat kuvan 13 mukaiset. Käytännössä näihin on lisättävä pääomakustannusten kattamisesta, verkon rakentamisesta ja ylläpidosta sekä liiketoimintariskistä aiheutuvat kustannukset. Muuttuvat tuotantokustannukset ja herkkyys tuotantopanosten hinnanvaihteluille ovat pienimmillään järjestelmässä, jossa on monipuolisesti sekä sähköä tuottavia että kuluttavia yksiköitä, molempia melko suurilla tehoilla lämmöntarpeeseen nähden. Investointikustannukset saattavat toki rajoittaa tällaisen ratkaisun toteutusta.



Kuva 13. Lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset (€/MWh) simuloinneissa (CHP:n tapauksessa tuotantokustannus saadaan vähentämällä muuttuvista kustannuksista sähköstä saatava hinta ja kohdistamalla loppu lämmölle; selitteessä FI 100 tarkoittaa tuloksia Suomen sähköhinnoilla v. 2011, kun kysyntä on toteutuneen mukainen, ja FI 50 tarkoittaa huipun siirtoa pienemmän kulutuksen tunneille - DK:t ovat vastaavasti samat Tanskan v. 2014 hinnoilla)

Simuloinnin tulosten perusteella kysyntäjoustopuon aikaan saatava säästö voisi olla järjestelmästä riippuen pitkällä tähtäimellä teoriassa jopa suuruusluokkaa 1-4 €/MWh lämmön tuotantokustannuksista (5-25 %:n säästö). Tästä kannattaa kuitenkin pitää suuntaa-antavana arviona kysyntäjoustopuon teoreettisista maksimihiyödyistä, koska käytännön toteutus esitetyllä mallilla ei ole tällä hetkellä käytännössä mahdollista. Lisäksi esimerkiksi laitosten tehonsäätönopeuksien ja käynnistyskustannusten huomiointi sisältää epävarmuuksia. Toisaalta näiden tarkka huomiointi todennäköisesti lisäisi hyvin toteutetulla kysyntäjoustopuon saavutettavaa hyötyä, joissakin tapauksissa huomattavastikin. Saatua tuloksia on hyvä verrata haastatteluissa saatuihin kaukolämpöyhtiöiden näkemyksiin, joiden mukaan realistinen oletus kysyntäjoustopuon hyötypotentiaaliksi nykyratkaisuin ja nykykokemusten perusteella on järjestelmästä riippuen 1-3 %:a lämmön tuotantokustannuksista.

Kysyntäjoustopuon ajoittumisesta voidaan todeta, että kysyntäjoustopuon hyötypotentiaali on suurin keväisin ja syksyisin ja ylipäänsä silloin, kun vuorokauden sisäiset lämpötilaerot ovat suurimmillaan – sen sijaan pitkään jatkuvien pakkasjaksojen aikoina kysyntäjoustopuon ja lämpöakun hyödyt ovat vähäiset tai olemattomat. Joitain joustopuon voi tuki syntyä pakkasjaksojenkin aikoina, jos kaukolämpöverkon piirissä on useita asiakkaita, joilla on lämpöpumppu; nämä asiakkaat voivat käyttää lämpöpumppua silloin, kun lämpö on kallista ja sähkö halpaa. Tällainen ohjausvaikutus edellyttää kuitenkin mahdollisimman tarkoin kustannusvastaavaa (tuntitasen) lämmön hinnoittelua.

Jos kuluttajilla olisi merkittävästi omaa vapaasti teholtaan säädettävää lämmöntuotantoa (kuten lämpöpumppuja), kaukolämpötehon leikkaus onnistuisi helpostikin, mutta tällöin kyse olisi nimenomaan leikkauksesta, ei ajoituksen siirrosta. Leikkauksen kannattavuus kokonaisuuden kannalta riippuu täydentävän (leikkaavan) tuotantomuodon käyttö- ja pääomakustannuksista. Esimerkiksi kiinteistökohtaisten lämpöpumppujen ja CHP-kaukolämmön hallittu vuorottaiskäyttö sähkö- ja lämmön tuotantokustannuksia vastaavien hintojen perusteella saattaisi olla koko lämpöjärjestelmän näkökulmasta kannattava vaihtoehto erityisesti tilanteissa, jossa sähkö- ja lämmön hinta vaihtelee voimakkaasti. Jos järjestelmätason ohjaus olisi mahdollista, ratkaisun voisi ajatella jossakin määrin vastaavan simulointivaihtoehtoa ”CHP + öljy + iso/pieni LP”, tosin sillä erolla, että mahdollisuudet syöttää kiinteistökohtaisista lämpöpumpuista lämpöä verkkoon lienevät teknis-taloudellisesti rajoitettuja.

4. Kysyntäjouaston käytännön toteutusmalli ja tekniset vaatimukset

Myös kysyntäjouaston käytännön toteutusmallin suunnitteluun liittyy useita huomioitavia asioita. Ensinnäkin kaukolämpöjärjestelmät eroavat asiakkaiden teknisten valmiuksien osalta toteuttaa kysyntäjouastoa. Uudemman rakennuskannan alueilla kaukolämpöjärjestelmien etäohjaus voidaan toteuttaa ilman suuria asiakaskohtaisia lisäinvestointeja, koska rakennusten talotekniikka on selvästi kehittyneempää kuin vanhoissa rakennuksissa. Uudet rakennukset ovat myös keskimäärin energiatehokkaampia ja paremmin eristettyjä kuin vanhat, joten ne käyttävät vähemmän lämpöä asumiskuutiota kohden mutta toisaalta kestävät pidempiä lämmön rajoitusjaksoja. Toiseksi, kysyntäjouaston toteutukseen liittyvä ohjaus-/signaalimekanismi on pystyttävä toteuttamaan siten, että se ei aiheuta ns. negatiivista kysyntäjouastoa. Negatiiviseen kysyntäjouastoon voi johtaa esimerkiksi sellainen tilanne, että suuri rakennusmassa käyttäytyy täsmälleen samalla tavoin kytkemällä ilmanvaihtonsa minimiin aamutehopiikin aikana. Tällöin voi käydä niin, että kaikkien rakennusten poistaessa ilmanvaihtonsa rajoitukset samanaikaisesti, syntyy alkuperäistä suurempi tehopiikki, mutta vain eri aikaan. Asiakkaiden ylireagoinnin välttämiseksi ohjaussignaali olisi siis pystyttävä kohdentamaan alueellisesti tai asiakaskohtaisesti – olettaen, että kysyntäjouastoa voidaan toteuttaa laajassa mittakaavassa.

Ylipäänsä kaukolämmön kysyntäjouaston ennakointi ja hallinta on selvästi haastavampaa kuin sähkökuorman kysyntäjouaston hallinta, koska kaukolämpöjärjestelmä on monimutkaisempi ja lämmitykseen liittyvät aikavakiot ovat pitkiä. Tästä syystä kaukolämmön kysyntäjouaston hyödyntämisessä korostuu ennuste-epävarmuuden hallinta, jotta positiivisen kysyntäjouaston toteuttamiseksi tehdyt toimenpiteet eivät muutu vaikutuksiltaan kielteisiksi. Ennuste-epävarmuudella tarkoitetaan a) säätötilan, kuten tuulen ja lämpötilan, b) sekundääristen lämmitysmuotojen ja c) ihmisten/asiakkaiden käyttäytymisen aiheuttamaa epävarmuutta kaukolämmön kysynnässä. Lämpökuorman mittaukseen, etäluentaan ja ohjaukseen liittyvän tekniikan tulisi olla varsin pitkälle kehittyntä, jotta kaukolämmön positiivinen kysyntäjouasto olisi hallittavissa. On myös hyvä huomata, että kaukolämpöyhtiön asiakas on useassa tapauksessa taloyhtiö, jota pyörittävät operatiivisesti isännöitsijä ja huoltoyhtiö, jotka eivät välttämättä ole perehtyneet lämmitysasioihin yhtä syvällisesti kuin kaukolämpöyhtiö. Kaukolämmön kulutuksesta (vuonna 2012) asuintalojen osuus oli 55%:a, teollisuusyritysten 10%:a ja muiden asiakkaiden 35%:a.

Lopuksi on vielä hyvä huomioida, että suuri osa kaukolämmön kysyntäjouastolla aikaansaataavista hyödyistä voi olla mahdollista toteuttaa myös lämpöakkujen avulla (tai jossain määrin myös kaukolämpöverkon oman varastointikapasiteetin avulla). Lämpöakut ovat käytännössä kuuman veden varastoja, jotka sijaitsevat usein voimalaitosten yhteydessä ja joita voidaan käyttää tilapäisinä kuuman veden lähteinä voimalaitosten käytön sijaan. Lämpöakkujen avulla voidaan lyhytaikaisista tehopiikeistä selviytyä käynnistämättä lisäkapasiteettia, mikä voi joissain järjestelmissä olla riittävä ja edullisempi ratkaisu kuin kysyntäjouaston laajamittainen käyttö. Lämpöakkujen heikkouksia kysyntäjouastoon verrattuna voivat olla lämpöhäviöt (joskin varaston koko vaikuttaa asiaan voimakkaasti: suurilla akuilla jopa viikkojen varastoinnin tappiot ovat vain muutamia prosentteja lämpösisällöstä), kohtalaisen suuret investointikustannukset sekä hankaluudet varastojen sijoittamisessa siten, että ne auttaisivat verkkotasapainon ylläpitämisessä kaikissa eri tilanteissa. Lämmön varastointikustannukset tosin ovat pienet verrattuna sähkön varastointiin, suurilla lämpövarastoilla suuruusluokkaa 1/100 sähkön vastaavista.

Kysyntäjouaston toteutusmalliin liittyvä aiempi tutkimus

Kaukolämmön kysyntäjouaston erilaisia teknisiä toteutuksia on tuotu esiin muutamissa tutkimuksissa. Nämä tutkimukset liittyvät usein rakennusten lämmönvarastointiin ja monen teknisen tutkimuksen tavoitteena on ollut tutkia miten yksittäiset rakennukset reagoivat lämpöenergian pienentämiseen.

Kaukolämmön menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan. Kysyntäjouaston säätö on mahdollista toteuttaa käyttämällä useita lämpötilan säätökäyriä siten, että eri käyrät aktivoidaan kysynnän mukaan. Kysyntäjouaston säätökäyrät ovat muodoltaan samanlaisia kuin muutoinkin käytössä olevat säätökäyrät, mutta käyrän jyrkkyyttä tai vertikaalista positiota muutetaan. Kysyntäjouaston säätökäyrät sijaitsevat normaalikäyrän alapuolella mutta esilämmityksen aikana ne sijaitsevat normaalikäyrän yläpuolella. Kysyntäjouastoa toteutettaessa on huomioitava, että lämpötilamuutokset aiheuttavat ylimääräistä kuormitusta lämmitysjärjestelmään ja tämän takia lämpötilamuutokset tulee olla mahdollisimman hitaita. Hyväksytty lämpötilamuutos suurille putkille on 1 °C viittä minuuttia kohden. (Kärkkäinen et al. 2003)

VTT:n (Kärkkäinen et al. 2003) teettämän tutkimuksen tavoitteena oli osoittaa, että kulutuksen ohjauksella voidaan alentaa kaukolämpöjärjestelmän kustannuksia. Tutkimuksen kohteena oli kolme toimistorakennusta, joista kaksi sijaitsi Jyväskylässä ja yksi Mannheimissa. Jyväskylässä sijaitsevien rakennusten lämmitystä vähennettiin niin, että sisälämpötila laski 2 °C:lla. Tulokset osoittivat, että lämpötehoa voitiin leikata 2–3 tunnin jaksolla keskimäärin 20–25 %:a hyödyntämällä rakennusten massaa ja vesikeskuslämmitystä. Tulosten perusteella arvioitiin, että Jyväskylän osalta kysyntäjouastolla

pystyttäisiin vähentämään tarvittaessa päivittäistä lämmön kulutusta 10–20 %:a (tehon osalta jopa 25 %:a), jos kysyntäjousto laajennettaisiin koskemaan useampia samankaltaisia rakennuksia. Kyseisessä kaukolämpöjärjestelmässä 20 %:n huipputehon leikkaukseen tarvittaisiin noin 160 rakennusta, joista jokaisen lämmitetty tilavuus olisi 20 000 m³.

Sisätilan sallitusta heilahtelusta voisi todeta sen verran, että useimmissa tutkimuksissa lämpötilan muutos on pidetty yhdessä tai kahdessa asteessa. Nopeasti vaihteleva sisäilman lämpötila heikentää asukkaiden viihtyvyyttä, ja näin ollen tyytymättömien asukkaiden osuus kasvaa. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 on määritetty oleskeluvyöhykkeelle lämmityskauden lämpötilaksi 21 °C. Kokeellisesti on todettu, että lämpöviihtyvyyttä ei vielä huononna 0,5 °C/h:n muutos, mutta operatiivinen lämpötila ei saa huojua yli 1 °C:lla oleskeluvyöhykkeellä. Hyväksyttävissä oleva poikkeama sisälämpötilasta on +/- 1 °C:ta.

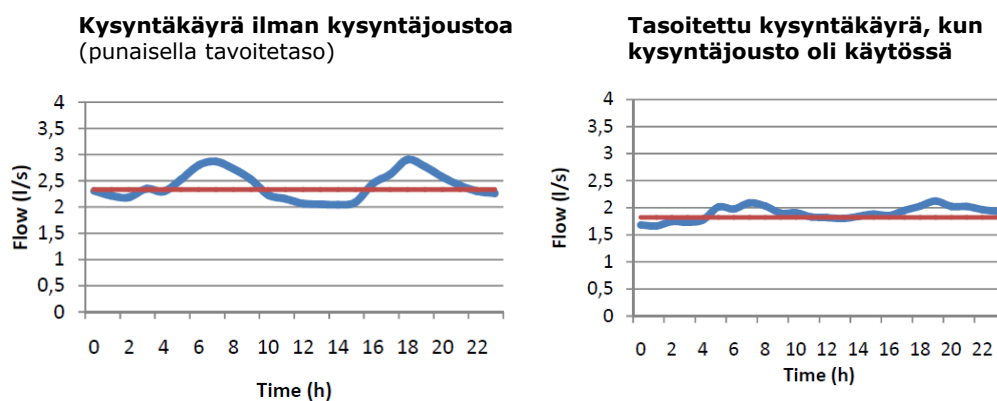
Kensby et al. ovat tehneet kaksi tutkimusta (2014 ja 2015), joissa testattiin viiden Göteborgissa sijaitsevan asuinkerrostalon mahdollisuutta toimia kaukolämpöjärjestelmän lämpövarastona optimoimalla sisälämpötilaa siten, ettei siitä ole haittaa asukkaille. Kerrostalot oli rakennettu vuosien 1934 ja 1950 välillä, niissä oli 3-5 kerrosta ja niiden vuosittainen lämmönkulutus oli alueelle normaali, noin 150 kWh/m². Testissä talojen lämpötehoa muutettiin kontrolloimalla patteriverkoston menolämpötilan säätökäyrää käyttämällä perinteistä takaisinkytkentäsäädintä. Tutkimuksessa patteriverkoston menoveden lämpötilaa muutettiin viidellä eri tavalla 21 tunnin sykleissä kontrolloimalla ulkolämpötilaa. Maksimissaan ulkolämpötilaa muutettiin 7 °C:lla normaalitasosta. Esimerkiksi yhdessä testisyklissä ulkolämpötilaa nostettiin ensin 7 °C:lla yhdeksän tunnin ajaksi, tämän jälkeen lämpötilaa laskettiin normaalista tasosta 7 °C:lla yhdeksäksi tunniksi ja kaksi tuntia lämpötila pidettiin normaalina. Sisälämpötila mitattiin ja tulokset osoittavat, että sisälämpötila muuttui testauksen aikana maksimissaan ±0,5 °C:lla. Tutkimuksessa arvioitiin myös kysyntäjoustopotentialia koko kaukolämpöjärjestelmän osalta. Tulosten mukaan 500 suuren asuinrakennuksen hyödyntäminen lyhytaikaisessa lämmönvarastoinnissa vastaisi noin 14200 m³:n kokoisen lämpövaraston käyttöä kaukolämpöjärjestelmässä. Tämä vähentäisi päivittäisiä lämmön tehonvaihteluita 50 %:lla sekä pienentäisi huippulämmön tarvetta ja lämmöntuotantoyksiköiden ylös- ja alasajoja. Esitetyn kokonaisen lämpövarasto maksaisi arviolta noin 1,5-3 miljoonaa euroa, joten rakennusta kohden kysyntäjoustopotentiali saisi maksaa 3000–6000 euroa ollakseen kilpailukykyinen lämpövaraston kanssa. Ainakin uuteen automatiikkaan lisättyä kyseinen investointitaso lieenee hyvinkin mahdollista saavuttaa.

Vuonna 1995 kysyntäjoustopotentialia testattiin Keravalla julkisissa rakennuksissa, jotka olivat pääosin koulurakennuksia (Kärkkäinen et al. 1999). Tutkimuksen päätarkoituksena oli seurata sisälämpötilan käyttäytymistä. Rakennusten lämmityksen säätöjärjestelmää muutettiin siten, että aluksi rakennukseen menevän lämmitysveden lämpötilaa nostettiin yhden tunnin ajaksi 54 °C:sta 78 °C:een, jolloin lämmitysteho nousi lyhytaikaisesti. Tämän jälkeen lämmitysveden lämpötilaa laskettiin asteittain 45 °C:een ja palautettiin tunnin kuluttua alkuperäiselle tasolle. Kokeissa sopivien keskimääräisten säätöaikojen todettiin olevan yhdestä kahteen tuntiin. Rakennuksissa käytetyn leikkaussäädön avulla rakennuksen käyttämää lämpötehoa pystyttiin leikkaamaan keskimäärin 40 %:lla.

Helsinkiin sijoittuvassa tutkimuksessa (Jokinen et al. 2014, Jokinen 2013) simuloitiin eri-ikäisten asuinkerrostalojen lämmönvarastointikykyä katkaisemalla huonetilojen lämmitys tunnin ajaksi joka arkiamu vuoden ajan. Lämmintä käyttövetä ei katkaistu. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Helsingin kaukolämmitetyn kiinteistökannan potentiaalia lyhyen aikavälin lämmönvarastoinnissa. Tutkimuksessa keskityttiin rakennusten sisäpuolisiin ominaisuuksiin, kuten ominaislämpökapasiteettiin ja sisäisiin lämpökuormiin, auringon säteilyyn ja talotekniikkaan sekä tutkittiin näiden yhteisvaikutusta kaukolämmitetyissä kiinteistöissä. Simuloinnit toteutettiin tuntitasolla vuoden ajalta ja simulointiohjelmana käytettiin IDA-ICE-ohjelmaa. Tulokset osoittivat, että ennen vuotta 2003 rakennetut asuinkerrostalot käyttäytyivät lämmönkatkaisun aikana keskenään melko samalla tavalla kun taas vuoden 2003 jälkeen rakennetut talot käyttivät lämpöenergiaa huomattavasti tehokkaammin kuin ennen tätä rakennetut. Uusissa taloissa sisälämpötilat eivät pudonneet lämmönkatkaisun aikana asetusarvoksi annettua yhtä astetta enempää edes kylmimmillä pakkasilla. Tutkimuksen tuloksista selvisi, että potentiaalisin rakennuskanta kysyntäjoustopotentialia olivat 1940–2003 rakennetut asuinkerrostalot. Tämän ikäisissä taloissa lämmitystehot olivat korkeita ja rakennusmassa suuri, mutta rakennusten jäähtyminen oli suhteellisen hidasta. Uudemmissa asuinkerrostaloissa lämmönvarastointikyky oli yleisesti ottaen parempi ja siksi talon jäähtyminen lämmityksen katkaisun jälkeen oli hitaampaa. Uusimmat asuinkerrostalot soveltuisivat kysyntäjoustopotentialiin hyvin hitaan jäähtymisen takia, mutta lämmitysenergian tarve oli näissä taloissa iäkkäämpiä taloja huomattavasti pienempi paremman energiatehokkuuden ansiosta. Kaikkein vanhimmissa asuinkerrostaloissa ongelmaksi muodostui asuntojen liian nopea jäähtyminen lämmönkatkaisun aikana talvikuukausina.

Kysyntäjoustopotentialia on myös mahdollista toteuttaa säätöjärjestelmän avulla automaattisesti esimerkiksi siten, että ns. patterikierrossa käytettyä lämmitysenergiaa vähennetään silloin, kun lämpimän käyttöveden kulutuksessa on piikki. Tämä on mahdollista toteuttaa siten, että lämmön kulkemista pattereille vähennetään tai suljetaan (Gaia Consulting Oy 2011)

– käytännössä patteriverkon tasapainon pysyvyyden kannalta lieene parempi alentaa patteriverkon veden lämpötilaa. Ruotsissa Karlshamnissa on tutkittu kaukolämmön kysyntäjoustop toteutusta juuri tällaisella mekanismilla (Wernstedt & Johansson 2008, Wernstedt et al. 2007). Tavoitteena oli saavuttaa tasainen kulutuskäyrä alueelle, jossa testauksen piiriin kuului 14 rakennusta (yhteensä 350 asuntoa). Kaukolämpökeskuksia taloissa ohjattiin internetin välityksellä ja järjestelmän oli kehittänyt NODA (ks. www.noda.se). Asuntojen sisälämpötiloja seurattiin ja sisälämpötilat saivat pudota maksimissaan 21 °C:sta 20 °C:een. Järjestelmä optimoi lämpötehon tarvetta koko alueen osalta siten, että automaattinen agenttipohjainen säätöjärjestelmä valitsi kysyntäjoustopa tarvitessaan sen asunnon, jolla oli parhaat edellytykset luopua lämmön käytöstä hetkeksi ja hyödyntää rakenteisiin varautunutta lämpöä. Määräviä tekijöitä tähän olivat asunnon jäähtymisen aikavakio sekä lämpötilaero sallittuun minimilämpötilaan (=enimmäislämpönpudotuksen määrä). Tämän kaltaista huutokauppaa asuntojen välillä käytiin kahden minuutin välein. Suurimmalla osalla asunnoista aikavakio (aikavakio kuvaa rakennuksen suhteellista, koosta riippumatonta lämpökapasiteettia) oli noin 300 tuntia ja osassa 150 tuntia. Tulokset osoittivat, että vuoden 2007 helmikuussa järjestelmän käyttöönoton myötä lämpötehon tarve patteriverkostossa alentui 11 %:a ja lämpöenergiankulutuskin vähentyi 7 %:a. Asukailta ei tullut järjestelmään tai lämpötilan pudotuksiin liittyviä valituksia testausten aikana. Kuvassa 14 on esitetty kysyntäjoustop avulla aikaansaadut muutokset kaukolämmön kysyntäkäyrään.



Kuva 14. Case-esimerkki kaukolämmön kysyntäkäyrän tasoittamisesta kysyntäjoustop avulla: Karlshamnin kysyntäjoustopohanke (lähde: Wernstedt, F., Johansson, C. 2008a)

IEA:n vuonna 2011 valmistuneen tutkimuksen *Interaction between district energy and future buildings that have storage and intermittent surplus energy* päätavoitteena oli kehittää ohjeita ja menetelmiä kustannustehokkaaseen tapaan integroida matalaenergiatalot (sekä niihin liittyvä hajautettu energiantuotanto ja lämmön varastointikyky) kaukolämpö- ja kaukojäähdytysjärjestelmiin. Kysyntäjoustopon tutkimus otti kantaa siitä lähtökohdasta, että tulevaisuuden rakennuksissa nähtiin olevan usein aktiiviset lämmön varastointijärjestelmät (aurinkojärjestelmien ohella) sekä hyvän eristyksen ansiosta pitkät jäähtymisajat. Lämmitysenergian katkaisun jälkeen lämpötilan laskettiin putoavan matalaenergiataloissa ainoastaan 0,33 °C tuntia kohden ulkolämpötilan ollessa -20 °C, mikä on vain kolmasosa "normaalirakennusten" tahdistista. Näiden lisäksi käyttöveden lämmityksen osuuden lämmönkulutuksesta laskettiin olevan suuremman kuin vanhemmissa rakennuksissa, mikä taas mahdollistaisi kysyntäjoustopon hyödyntämisen mm. lämmön huipputarpeen aikana. Tutkimuksessa korostettiin, että matalaenergiatalojen ainutlaatuiset piirteet olisi mahdollista yhdistää taloudellisesti kaukolämpö- ja kaukojäähdytysjärjestelmiin ja tutkimus pyrki tuomaan esiin uusia ideoita tähän liittyen. Yksinkertaisimmaksi tavaksi esitettiin kysyntäjoustopon mahdollistaminen taloudellisten kannustimien sekä kiinteistöjen automaatiojärjestelmien avulla. Tutkimuksessa tehtiin lopuksi myös case-tarkasteluja matalaenergiatalojen asuinalueesta (240 taloa), jossa olisi käytössä aurinkolämpöjärjestelmät sekä kausiluonteinen lämpövarasto (borehole seasonal storage) kolmessa eri kohteessa (Okotoks Kanadassa, Lontoossa ja Tukholmassa). Tarkasteluissa arvioitiin alueiden energiatehokkuutta sekä kysyntäjoustop- ja energiatehokkuustoimenpiteiden hyödyntämistä alueilla. Kysyntäjoustopon osalta tutkittiin lämmityksen vähentämistä tiettyinä aikoina (0,7 °C:n tai 1 °C:n lasku, kun lämpöä ei ole saatavilla yhteistuotantolaitoksesta), tai yön aikana tehtävää sisälämpötilan laskemista. Lisäksi energiatehokkuuden osalta arvioitiin talojen eristyksen parantamisen vaikutuksia.

Case-esimerkkejä kysyntäjoustop toteutusmalleista

Oulun Energian ja Oulun yliopiston säätötekniikan asiantuntijat (KLEI-projekti) toteuttivat talvina 2013–2014 ja 2014–2015 pilottihankkeen, jossa selvitettiin huippukulutuksen leikkauspotentiaalia muutaman kiinteistön osalta. Ensimmäisenä talvena mittaukset toteutettiin kolmessa kohteessa, jotka olivat asuinrakennus, toimistorakennus ja koulurakennus. Toisena talvena mittaukset suoritettiin edellisten lisäksi kirjistorakennuksessa. Teknisesti kysyntäjoustop oli toteutettu

siten, että Oulun Energian palvelin laski ja määrittä kiinteistöille tarvittavat asetusarvot vuorokaudeksi eteenpäin lämmönkulutusennusteen muodossa. Kulutusennusteen perusteella kiinteistön automaatiojärjestelmä optimoi lämmönkulutusta latausjakson ja leikkausjaksojen avulla. Hankkeen tulosten perusteella toteutusmallin kannattavuutta Oulun energijärjestelmässä arvioitiin siten, että investointi kulutusta leikkaavaan palvelimeen (noin 150 000 €) olisi Oulun Energialle kannattavaa, jos järjestelmään liittyisi noin 100–200 yhden kulutushuipun profiiliin kiinteistöä (liikekiinteistöjä tai muita suuria ilmanvaihtoa käyttäviä kohteita) tai 150–230 kahden kulutushuipun profiiliin kiinteistöä (asumiskäytössä olevia rakennuksia). Työssä todettiin, että tämä tulos ei vielä kerro, pystytäänkö kulutushuippuja leikkaamalla vähentämään öljyn käyttöä merkittävästi. Projektin lopullisia tuloksia ei ole vielä saatavilla. (Manninen, 2014)

Kysyntäjoustoratkaisuja testattiin myös Fortumin toimesta lämmityskauden 2014–2015 aikana Järvenpäässä ja Espoossa. Järjestelmä perustui siihen, että Fortum hinnoitteli lämpönsä tuntikohtaisesti. Tavoitteena oli lämmityskustannusten alentaminen kymmenessä asuin kerrostalossa siten, että taloihin varattiin lämpöä hinnan ollessa edullinen ja hyödynnettiin se kalliimman energian aikoina. Lämmön varaamista ja purkamista ohjattiin kiinteistöautomaatiikalla Fortumin antaman tuntipohjaisen hintaennusteen pohjalta. Energijärjestelmän eduksi havaittiin tasaisempi kulutus ja tuotanto. Lisäksi kokeilulla haluttiin selvittää voitaisiinko tällaisen kysyntäjoustoratkaisun avulla vähentää varalämpölaitosten käyttöä ja käynnistymisiä (Fortum 2015a).

Fortum testasi kaukolämmön kysyntäjoustop hyödyntämistä uuden ohjausautomaatiikan avulla myös Aalto-yliopistokiinteistöjen TUAS-talossa Otaniemessä sekä kerrostalossa Leppävaarassa talven 2015 aikana. TUAS-talon lämmönjakohuoneeseen asennetun ohjauslaitteen avulla lämmönkulutusta ohjattiin kalleimman lämmön tunneista halvempiin tuntiperusteisen hintasignaalin avulla. Leppävaarassa asuntojen sisälämpötilan ohjaus tapahtui joko digitaalisilla termostaateilla tai internetin kautta. Molemmissa testikohteissa tärkeässä roolissa oli palautteen saaminen talojen käyttäjiltä. TUAS-talossa lämmitystä vähennettiin jopa neljän tunnin ajaksi (maksimissaan siten, että kaukolämpöveden menolämpötila laski 20 °C:lla). Tällöinkin sisälämpötila aleni enimmillään vain yhdellä asteella. Leppävaaran kerrostalon asukkailla on saatu positiivista palautetta lämmön ohjauksen helppoudesta internetissä perinteisen käsikäyttöisen termostaatin sijaan (Fortum 2015b). Fortum on ilmoittanut jatkavansa kysyntäjoustop pilottihankkeita myös tulevana lämmityskausina.

Ruotsissa jo edellä mainittu Karlshamns Energi sekä teknologiayritys Noda ovat jatkaneet kysyntäjoustop kehittämistä ja testaamista parin vuoden ajan Karlshamnin Svängstassa noin 100 kiinteistössä. Kokeilussa olevista kiinteistöistä noin puolet oli asumiskäytössä ja loput olivat teollisuusrakennuksia sekä toimitiloja. Alueelle kehitetyssä järjestelmässä lämpötehoa vähennettiin rakennusten termistä massaa hyväksikäyttäen silloin, kun oli tarvetta huippu- tai varateholle. Rakennusten lämpötehoa voitiin järjestelmässä vähentää jopa 12 tunniksi, mutta normaalit lämpökatkot olivat pituudeltaan noin 1–2 tunnin mittaisia. Kysyntäjoustopkokeilun piirissä oleville rakennuksille oli kaikille kehitetty omat algoritminsa, joilla lämmönkulutusta säädettiin ja joiden avulla oli mahdollista nähdä missä rakennuksissa lämpöä oli milloinkin mahdollista vähentää. Tällä varmistettiin se, että asumisviihtyvyys ei vaarantunut. Ohjausjärjestelmän suurin hyöty kaukolämpötuotannon kannalta oli leikata huipputehon tuotantoa, joka toteutetaan fossiilisilla polttoaineilla. Kun järjestelmä on täysin rakennettu, kysyntäjoustoplla on mahdollista säästää lämpötehoa 5 – 7 MW 60 MW:sta. Järjestelmän takaisinmaksuajaksi on laskettu viisi vuotta. (Fjärrvärmetidningen 2014)

Hollannissa kaukolämpöyritys NUON testasi kysyntäjoustop potentiaalia laajemmassa mittakaavassa (yhteensä 2000 asuntoa). Kysyntäjoustop toteutettiin säätämällä kaukolämpömenoveden lämpötilaa ja seurantajakso kesti kaksi talvikautta. Tulokset Hollannin osalta osoittivat, että DSM-tekniikka vähensi 20 %:lla tehohuippuja puolen tunnin jaksolla tarkasteltuna ja 10 %:lla tunnin jaksolla tarkasteltuna. (Kärkkäinen et al. 1999)

Kaukolämpöalan asiantuntijoiden näkemykset kysyntäjoustop toteutusmallista

Kuvaan 15 on koottu kaukolämpöalan asiantuntijoiden näkemyksiä kysyntäjoustop toteutusmallista. Näkemykset on esitetty suorina lainauksina haastatteluista. Kommentit esitetään anonymyminä, mutta kuitenkin haastateltavan edustama sidosryhmä mainitaan kommentin yhteydessä.



Kuva 15. Haastatteluissa esitettyjä asiantuntijoiden näkemyksiä kysyntäjoustop käytännön toteutusmallista

Haastattelussa saatujen kommenttien sekä konsultin analyysin perusteella kysyntäjoustop toteutusmallille voidaan määritellä seuraavat yleiset periaatteet:

- Pienissä järjestelmissä kysyntäjoustoa kannattaa todennäköisesti lähteä toteuttamaan vain suurimpien lämpöasiakkaiden kanssa, jolloin toteutus on yksinkertaisempaa ja vaikutukset helpommin hallittavissa
- Lisäksi luontevaa on etsiä ensimmäiseksi kohteita, joissa lämmitys voidaan katkaista ilman, että lämpötilan havaittava lasku aiheuttaisi merkittäviä ongelmia (esim. varastot, teollisuushallit, kirkot, kauppakeskukset tms.)
- Suurissa, hajanaisissa järjestelmissä riittävän kokonaisvolyymin saamisen ja verkon tasapainon hallinnan kannalta on hyvä, että mukana kysyntäjoustopjärjestelmässä on myös asuinkiinteistöjä
- Järjestelmätason hyötyjen maksimoiminen ja kysyntäjoustop vaikutusten mahdollisimman hyvän ennakkoinnin näkökulmasta kysyntäjoustop ohjaus olisi luontevaa pitää kaukolämpöyhtiöllä

- Järjestelmän ymmärrettävyyden ja läpinäkyvyyden näkökulmasta olisi edullista, jos viesti ohjauksen tarpeesta tulisi asiakkaalle mahdollisimman avoimesti, hintana tai muuna näkyvänä prioriteettisignaalinä
- Asiakkaille tulisi kertoa perusteellisesti, miksi kysyntää ohjataan ja mitä hyötyä siitä on asiakkaille ja muille

Käytännön tasolla kysyntäjousto täytyy pystyä toteuttamaan siten, että asiakkaan kokemana palvelun laatu ei heikkene. Tästä syystä ilmanvaihtoon kajoavat toteutusmallit eivät ole optimaalisia tai niitä pitää ainakin selvittää tarkasti, koska ilmanvaihtoa rajoitettaessa vaikutukset ovat usein nopeasti havaittavia (kosteus kasvaa, ilman laatu ja tuottavuus heikkenee jne.). Samasta syystä myöskään lämpimän käyttöveden käyttöä ei ole järkevää rajoittaa. Ilmanvaihdon rajoittamiseen liittyy myös sellainen merkittävä riski, että mahdollisten asiakaskiinteistön homeongelmien tapauksessa kaukolämpöyhtiö saatetaan katsoa korvausvelvolliseksi, vaikka ilmanvaihto ei olisikaan ongelmien todellinen tai ainoa syy. Koska ilmanvaihto kuitenkin vastaa merkittävästä osasta toimistorakennusten tarvitsemasta lämpöenergiasta, esimerkiksi toimistorakennuksissa voitaisiin asiakkaan suostumuksella testata ilmanvaihdon ohjaamista siten, että viikonlopun jälkeinen ”ylösnosto” tehtäisiin optimoiden tehon käyttöä. Laajassa mittakaavassa järkevin ratkaisu toteuttaa kysyntäjoustoa on kuitenkin patteriverkostossa virtaavan veden *lämpötilaa* rajoittamalla. Veden virtausta ei ole järkevää rajoittaa, sillä se johtaisi ainakin kerrostaloissa todennäköisesti siihen, että patteriverkoston tasapaino katoaisi ja lämpö jakautuisi epätasaisesti huoneistojen kesken.

Kysyntäjouston ohjaus voidaan toteuttaa esimerkiksi dynaamisen hinnoittelun avulla, suorana massaohjaussignaalinä kiinteistöjen kaukolämpökeskuksille tai säännöllisenä aikaperusteisena ohjauksena. Dynaamisessa hinnoittelussa kaukolämpöyhtiö antaa kiinteistöille omiin tuotantokustannuksiinsa perustuvat kaukolämmön hinnat esimerkiksi joka tunnille tai reaaliajassa. Kiinteistöt reagoivat hintasignaaliin kaukolämpökeskukseen syötetyn algoritmin mukaisesti rajoittaen lämmönkulutusta kalleimpien tuntien aikana. Dynaamisen hinnoittelun heikkous on se, että ilman reaaliaikaista hinnoittelua se voi johtaa kaikkien kiinteistöjen käyttäytymiseen samalla tavalla, mikä saattaa jopa jyrkentää kaukolämmön kuormituspiikkejä. Tämä ongelma saattaa kuitenkin olla korjattavissa esimerkiksi porrastamalla signaalinantoa siten, että ajoitus ei ole täsmälleen sama kaikille. Lisäksi järjestelmän rakentamisen kustannukset saattavat olla kohtalaisen suuret, jos se tehdään vanhan ohjausjärjestelmän päälle.

Suora massaohjaussignaali annetaan etähallittavien kiinteistöjen kaukolämpökeskuksille, jotka reagoivat annetun signaalin mukaisesti rajoittaen patterikierron veden lämpötilaa. Tämä ohjaustapa vaatii luonnollisesti sen, että kiinteistöjen kaukolämpökeskuksia pystytään ohjaamaan etänä. Uudemmissa kiinteistöissä tämä mahdollisuus pääsääntöisesti on, mutta vanhemmissa 1970- ja 1980-luvulla rakennetuissa kiinteistöissä se on harvinaisempaa. Vanhoihin kiinteistöihin olisikin luontevaa soveltaa säännöllistä aikaperusteista ohjausta esimerkiksi siten, että kaukolämpökeskus ohjeistetaan laskemaan patterikierron veden lämpötilaa säännöllisesti joka aamu klo 7-9.

Kysyntäjouston toteutuksen suurin haaste ja riski on ennuste-epävarmuuden hallinta. Tämä tarkoittaa epävarmuutta sen ennustamisessa kuinka paljon kaukolämpökuormaa eri toimenpiteillä pystytään vähentämään sekä kuinka nopeasti ja kuinka suurena kuorma palautuu. Jos esimerkiksi patterikierron veden lämpötilaa rajoitetaan, asukkaat voivat reagoida aukaisemalla patteriventtiilit äärimmilleen, mikä vaikeuttaa nettotehovaikutuksen arviointia. Massaohjaussignaalinä ja säännöllisellä aikaperusteisella ohjauksella kysyntäjouston vaikutukset pystytään todennäköisesti hallitsemaan paremmin kuin dynaamisella hinnoittelulla.

5. Kannustimet asiakkaille kysyntäjouston toteuttamiseksi

Tässä selvityksessä kannustimet ymmärretään positiivisiksi kannustimiksi, joita voidaan asettaa esimerkiksi teho- tai energiamaksuun. Negatiivisia kannustimia, kuten sakkoluonteista erittäin kallista huipputehoa, ei tarkastella. Negatiiviset kannustimet liittyvät enemmän energian säännöstelyyn. Edelleen kannustimet ymmärretään tässä selvityksessä laajasti ohjausvaikutukseksi tähänhetkiseen tilanteeseen verrattuna. Näin ollen esimerkiksi kustannusvastaava tuntipohjainen hinnoittelu katsotaan kannustimeksi asiakkaille säästää tehoa kalliiden tuntien aikana, jos aiemmin käytössä on ollut sama hinta koko vuoden, koska kannustin ohjaa asiakkaita siirtämään lämpötehon tarvettaan kalliilta tunneilta edullisempiin tunteihin. Kapeasti tulkiten kannustimeksi voitaisiin katsoa myös vain kustannusvastaavan hinnoittelun päälle asiakkaille tarjotut lisäkannustimet.

Nykyinen tuntitasoinen mittausdata kulutuksesta sekä kehittyneet automaatiojärjestelmät mahdollistavat erityyppisiä ja aiempaa monimutkaisempia kaukolämmön hinnoittelumalleja. Hinnoittelumallien järjestyminen riippuu suuresti kaukolämpöyhtiöstä ja sen tuotantorakenteesta. Asiakkaille tarjottavia kannustimia erityyppisille asiakkaille kysyntäjouston toteuttamiseksi ja edistämiseksi on tutkittu muutamissa tutkimuksissa.

Hinnoittelumallien kehittämisessä tärkeänä pidetään sitä, miten kysyntäjouston hyödyt jaetaan lämmöntuottajan ja loppukuluttajan välillä huomioiden järjestelmään käytetyt investoinnit sekä se, kuinka paljon asiakas on valmis käyttämään kysyntäjoustopia. Tutkimuksissa on myös selvinnyt, että asiakas toivoo hinnoittelun olevan avointa siinä määrin, että asiakas ymmärtäisi milloin energian tuottaminen on kalliimpaa ja milloin halvempaa. Kustannusvastaavamman hinnoittelumallin perustelu asiakkaalle on myös helpompaa. Hinnoittelun ei myöskään tulisi olla liian monimutkainen, sillä asiakkaan on ymmärrettävä mistä komponenteista kaukolämmön hinta muodostuu. (ÅF 2012)

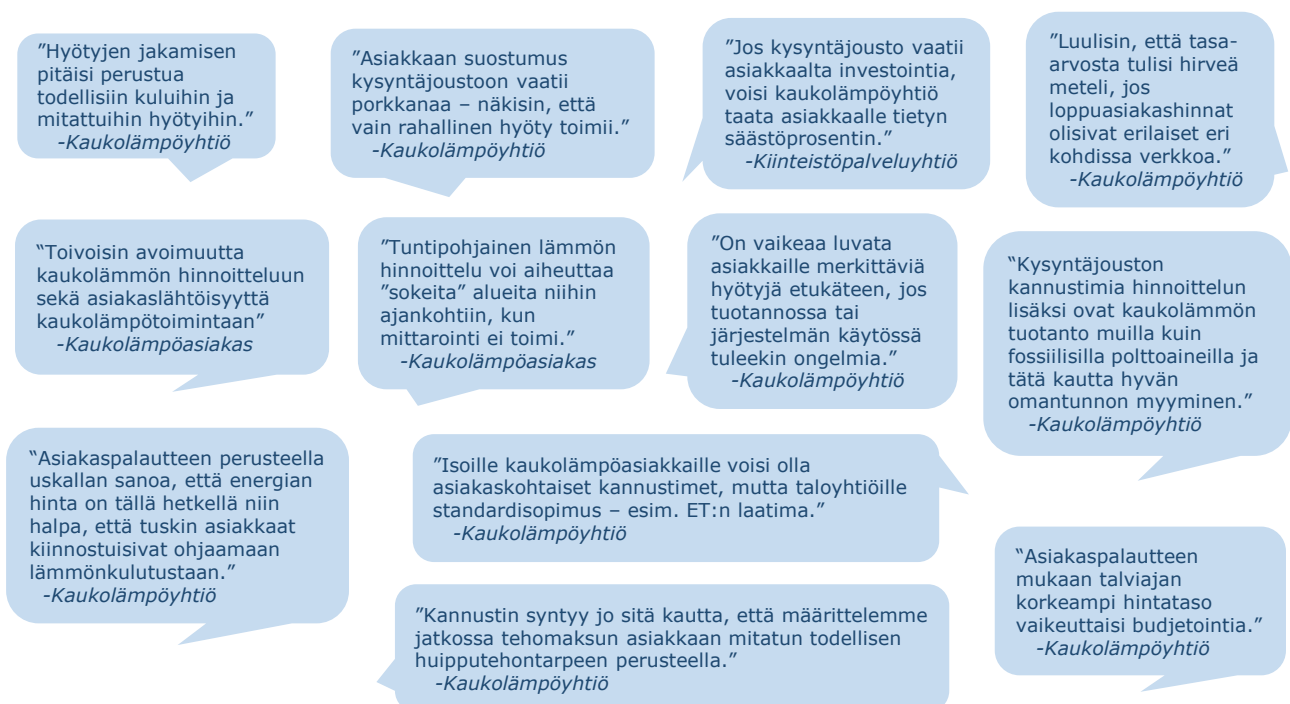
Ensimmäinen kysymys kysyntäjouston hinnoittelumallien kehittämisessä on se, ohjaako kysyntäjoustopia lämmöntuottaja vai asiakas itse (käytännössä kiinteistöautomaatio etukäteen asetettujen parametrien mukaan). Jos kysyntäjousto perustuu lämmöntuottajan oikeuteen rajoittaa asiakkaan päivittäistä huippukulutusta tahdonsa mukaan (esimerkiksi 25 %:lla maksimissaan kolmen tunnin ajan kahdessa periodissa vuorokauden aikana), asiakas voisi tästä hyvästä saada alennusta kaukolämmön kiinteästä vuosimaksusta. Jos taas asiakas (kiinteistöautomaatio) saa päättää milloin hän toteuttaa lämmönhuippujen katkaisua, hinnoittelumallin tulisi antaa sellainen signaali, että lämmön katkaisu ajoittuu ajallisesti niihin hetkiin, jolloin marginaalikustannukset ovat korkeimmillaan. Tästä syntyisi taloudellista hyötyä lämmöntuottajalle, ja osa siitä hyödystä voitaisiin siirtää asiakkaalle esimerkiksi alentamalla tehomaksua. Hinnoittelu voisi perustua päivittäisen tehohiipun mittaukseen, jonka mukaan asiakas maksaa kiinteän maksun vuosittain tai kuukausittain. (Kärkkäinen et al. 2003)

Kirjallisuudesta löytyy seuraavia kysyntäjoustopia tukevia hinnoittelumalleja (Manninen 2014, Aarnio 2014, ÅF 2012, Kärkkäinen et al. 2003):

Hinnoittelumallin nimi	Kuvaus
Tasahinnoittelu	<ul style="list-style-type: none"> perustuisi halvempaan tasahinnoitteluun niille, jotka lähtevät mukaan kysyntäjoustopiin kannustaisi asiakkaita vähentämään kulutusta kaikkina vuoden- ja vuorokaudenaikoina säästöt syntyvät energiamäärän vähenemisestä
Kausihinnoittelu	<ul style="list-style-type: none"> eri hinnat vuodenaikojen mukaan (esim. kesä ja talvi) tai vuorokauden aikaisten kysyntähuippujen mukaan (esim. kesä, talvi ja huippukulutus) energiakustannus korkeampi kalliin tuotannon aikana kannustaa kustannussäästöihin silloin, kun marginaalikustannukset ovat korkeimmillaan
Ulkolämpötilaan perustuva hinnoittelu	<ul style="list-style-type: none"> energian hinta olisi jaettu ulkolämpötilasta riippuviin hintaluokkiin hintaa määräytyisi vuorokaudeksi kerrallaan kannustaa kustannussäästöihin silloin, kun marginaalikustannukset ovat korkeimmillaan
Huipputehoon perustuva hinnoittelu	<ul style="list-style-type: none"> tehomaksua alennettaisiin vastaamaan alentunutta rakennuksen huipputehoa asiakkaalle vuosittainen hyvitys järjestelmän käytöstä energiamaksu jaettu perusteho- ja huipputehohintoihin laskutus perustuisi esimerkiksi tuntikohtaisiin keskitehohintoihin

Investointikannustimet	<ul style="list-style-type: none"> kannustin asiakkaalle lähtää mukaan laiteinvestointeihin esimerkiksi kaukolämpöyhtiön koroton maksuaika investoinnille
Hybridiasiakashinnoittelu	<ul style="list-style-type: none"> niille asiakkaille, joilla on käytössä vaihtoehtoinen lämmitysmuoto hinnoittelumalli voisi perustua korkeampaan energiamaksuun huippukysynnän aikana ja vastineeksi asiakkaalla olisi alhaisempi tehomaksu

Senaatti-kiinteistöt kehitti yhdessä Fortumin kanssa kaukolämmön joustavia hinnoittelumalleja, jotka ohjasivat kulutuksen pienentämistä kulutushuippujen aikana ja kulutuksen siirtämistä niihin ajankohtiin, jolloin lämmöntuotanto oli edullisempaa ja ympäristöystävällisempää. Yhtenä hinnoitteluvaihtoehtona oli tunneittain mitattava ulkolämpötilaan perustuva energian hinnoittelu, jossa talven pakkasilla hinta oli noin kolme kertaa suurempi kuin kesällä. Tehomaksun perustana oli maksimilämpöteho, jonka asiakas valitsi itse. Pienen tehomaksun ja siihen liittyvän korkean ylitysmaksun avulla pyrittiin ohjaamaan kiinteistön lämmönkulutusta tasaisemmaksi. Ulkolämpötilaan perustuvassa hinnoittelumallissa lämmön kustannukset vaihtelevat suuresti eri vuosina. (Malm & Salonen 2014)



Kuva 16. Haastatteluissa esitettyjä asiantuntijoiden näkemyksiä asiakkaille tarjottavista kannustimista

Kuvaan 16 on koottu haastattelujen asiantuntijoiden näkemyksiä kysyntäjoustoön käyttöönottoon tarvittavista kannustimista asiakkaille. Haastatellut olivat lähtökohtaisesti sitä mieltä, että asiakkaille täytyy tarjota positiivisia (rahallisia) kannustimia, jotta he suostuvat osallistumaan kysyntäjoustojärjestelmään – erityisesti jos osallistuminen vaatii asiakkaalta investointeja. Kannustimet voivat perustua joko tehomaksujen tai energiamaksujen alennuksiin tai suoriin investointitukiin. Isoille kaukolämpöasiakkaille on mahdollista tarjota asiakaskohtaisia, räätälöityjä kannustimia. Sen sijaan taloyhtiöille ja muille pienemmille asiakkaille on järkevää kehittää standardisopimukset ja -ratkaisut.

Kaukolämpöyhtiöiden kannalta olisi kuitenkin mielekästä, että palkitseminen tapahtuisi jälkikäteen ja perustuisi todennettuihin hyötyihin. Tällöin riski hyötyjen realisoimattomuudesta jakautuisi molempien osapuolien kesken. Kaukolämpöyhtiön ohjaamassa järjestelmässä kysyntäjoustoön osallistuvien asiakkaiden tehomaksujen alentaminen on luontevin kannustinmalli, kunhan se toteutetaan tasapuolisesti eri asiakasryhmien kannalta. Yleisen hyväksyttävyyden ja uskottavuuden kannalta on oleellista, että hyödyt ja kustannukset kohdennetaan siten, että asiakasryhmien välinen tasapuolisuus säilyy (hyödyt jaetaan niille asiakkaille, jotka osallistuvat niiden tuottamiseen). Luonteva kannustinjärjestelmä olisi esimerkiksi sellainen, jossa asiakkaan tehomaksu perustuisi liukuvasti kolmen edellisen vuoden maksimitehontarpeiden keskiarvoon. Kysyntäjoustojärjestelyn toimiessa suunnitellusti kiinteistön maksimitehontarpeet laskisivat vaiheittain, mikä johtaisi kiinteistön kiinteiden kustannusten alenemiseen. Tällaisessa järjestelmässä kannustin perustuisi toteutuneisiin tehontarvemuutoksiin, mutta silti järjestelmätason hyötyjen varmistaminen jäisi kaukolämpöyhtiön vastuulle.

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Kaukolämmön kysyntäjousto pitää pystyä selkeästi erottamaan energiansäästöstä ja toisaalta asiakkaan palvelun koetun laadun heikentämisestä tai rajoittamisesta. Tästä syystä tässä selvityksessä kaukolämmön kysyntäjousto määriteltiin seuraavasti: *kaukolämmön kysyntäjoustolla tarkoitetaan kaukolämmön kulutuksen ja sitä kautta lämpötehon tarpeen ajoituksen muuttamista tavanomaiseen lämmitystarpeeseen verrattuna heikentämättä asiakkaiden kokemaa palvelun laatua.*

Normaalisti kaukolämmön kulutus vaihtelee sekä vuositasolla vuodenaikojen ja ulkolämpötilan mukaan että lyhyemmällä aikavälillä viikko- ja päivärytmin mukaan. Kaukolämpötoiminnan kannattavuus perustuu peruslämmön toimittamiseen, kun taas huippulämmön toimittaminen on usein tappiollista ja parhaimmillaankin nollakatteista – toisin sanoen kulutuksen vaihtelut aiheuttavat lisäkustannuksia kaukolämpöjärjestelmälle ja vähentävät sen tehokkuutta. Kysyntäjoustolla huippulämmön toimittamista pyritään siirtämään peruslämmön toimittamiseksi, eli kysyntäjouaston tavoitteena on yleensä loiventaa kulutushuippua kalliimpien polttoaineiden käytön välttämiseksi. Muita tavoitteita voivat olla esimerkiksi CHP-tuotannon ajoittaminen kalliin sähkön aikaan kapasiteetin mahdollistamissa rajoissa, tuotanto- tai verkkoinvestointien lykkääminen tai toteuttaminen kevyempinä eli verkon nykykapasiteetin riittävyyden varmistaminen joustoilla.

Kaukolämmön kysyntäjouaston ennakointi ja hallinta on selvästi haastavampaa kuin sähkökuorman kysyntäjouaston hallinta, koska kaukolämpöjärjestelmä on monimutkaisempi ja lämmitykseen liittyvät aikavakiot ovat pitkiä (lämpöjärjestelmä reagoi paljon hitaammin kuin esim. sähköjärjestelmä). Kaukolämmön kysyntäjouaston hyödyntämisessä korostuukin ennuste-epävarmuuden hallinta, jotta positiivisen kysyntäjouaston toteuttamiseksi tehdyt toimenpiteet eivät muutu vaikutuksiltaan kielteisiksi.

Ennuste-epävarmuudella tarkoitetaan

- a) Säätilan, kuten tuulen ja lämpötilan
- b) Sekundääristen lämmitysmuotojen
- c) Ihmisten/asiakkaiden käyttäytymisen

aiheuttamaa epävarmuutta kaukolämmön kysynnässä. Lämpökuorman mittausta, etäluenta ja ohjaus tuleekin olla pitkälle kehittyneitä, jotta kaukolämmön positiivinen kysyntäjousto olisi hallittavissa.

Kysyntäjoudesta ei ole käytännön hyötyä, jollei se johda (yhdessä muiden toimenpiteiden kanssa) merkittäviin hyötyihin jossakin osassa järjestelmää joko investointien tai käyttötoiminnan kautta syntyvinä säästöinä rahallisina säästöinä, joita voidaan jakaa kaukolämpöyhtiön ja asiakkaiden kesken. Toisin sanoen yksittäisten kiinteistöjen toteuttamista toimenpiteistä ei ole hyötyä, jolleivät ne johda järjestelmätasolla hyötyihin. Jos näin ei tapahdu, muutamien kaukolämpöasiakkaiden säästö kaatuu muiden asiakkaiden maksettavaksi. Toinen edellytys kysyntäjouaston toteuttamiselle on se, että syntyvä lisäarvo on voitava jakaa tasapuolisesti sen synnyttämiseen osallistuvien kesken panosten suhteessa – tämä on luontevaa toteuttaa tariffijärjestelmän kautta.

Kysyntäjouaston hyötyjen lähteitä ja potentiaalia tarkastellessa on myös muistettava, että kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan huomattavasti muun muassa tuotantorakenteen, lämpöverkon rakenteen, kulutusprofiilin ja lämmön varastointikyvyn suhteen. Tämän takia kysyntäjouaston hyötyjä ja niiden potentiaalia koskevia arvioita ei voi yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöjärjestelmiä – ja tämä pätee myös kysyntäjouaston toteutusmalliin. Joissain järjestelmissä kysyntäjoustolla pystytään parantamaan voimalaitosten käyttöastetta, joissain minimoimaan öljykattiloiden tai muun kalliin huippukapasiteetin käyttöä, joissain optimoimaan CHP-tuotannon ajoitusta kalliin sähkön aikaan ja joissain lykkäämään verkon kapasiteetin parantamiseksi tarvittavia investointeja. Kysyntäjousto tulee siis aina tarkastella järjestelmäkohtaisesti.

Pääsääntöisesti huippukattiloiden käytön vähentäminen lyhyissä kuormituspiikeissä vaikuttaa kuitenkin olevan merkittävin hyötyjen lähde kaukolämpöjärjestelmän tasolla. Käytännön tasolla kysyntäjouaston hyötyjen realisoituminen voitaisiin varmistaa siten, että investointeja tai käyttötoimintaa suunniteltaessa katsottaisiin aina ensin voitaisiinko kysyntäjouaston keinoin lykätä investointia tai välttää aiheutuvalta kustannukselta. Myös kysyntäjouaston strateginen merkitys voi olla merkittävä, koska kysyntäjouaston toteutus ”pakottaa” kaukolämpöyhtiöt yhteistyöhön asiakkaidensa kanssa aikana, jolloin kaukolämpötoimintaan kohdistuu merkittäviä riskejä.

Kaukolämpöyhtiöiden arvioiden mukaan realistinen oletus kysyntäjouaston hyötypotentialiksi on nykyratkaisuin ja nykykokemusten perusteella järjestelmästä riippuen 1-3 %:a vuosikustannuksista. Simulointien avulla kysyntäjouaston teoreettiseksi pitkän tähtäimen säästöpotentialiksi arvioitiin järjestelmästä riippuen 5-25 %:a vuotuisista tuotantokustannuksista. Nämä ovat kuitenkin teoreettisia arvioita, joihin liittyy epävarmuuksia, eivätkä ne ole

toteutettavissa tällä hetkellä. Potentiaali on suurin verkoissa, joissa perus- ja huipputuotannon hintaero on suurin ja tuotantolaitokset on mitoitettu kuorman suhteen niukasti. Ajallisesti kysyntäjoustopotentiaali on suurin keväisin, syksyisin ja sellaisina talvipäivinä, kun vuorokauden sisäiset lämpötilaerot ovat suurimmillaan – sen sijaan pitkään jatkuvien pakkasjaksojen aikoina (kun lämmön marginaalituotantokustannukset ovat jatkuvasti korkeat) kysyntäjoustopotentiaali on vähäinen tai olemattomat. Joitain joustoja voi tulla syntyä tällöinkin, jos kaukolämpöverkon piirissä on useita asiakkaita, joilla on lämpöpumppu; nämä asiakkaat voivat käyttää lämpöpumppua silloin, kun lämpö on kallista ja sähkö halpaa, mikä keventää kaukolämpötehon tarvetta. Tämä kuitenkin edellyttää mahdollisimman tarkoin kustannusvastaavaa (mielellään tuntitasoista) lämmön hinnoittelua.

Pienissä järjestelmissä kysyntäjoustopotentiaalia kannattaa lähteä toteuttamaan vain suurimpien lämpöasiakkaiden kanssa, mutta suurissa järjestelmissä riittävän kokonaisvolyymien ja maantieteellisen kattavuuden kannalta on hyvä, että mukana on myös asuinkiinteistöjä. Järjestelmätason hyötyjen ja niiden ennakoitavuuden maksimoinnin kannalta kysyntäjoustopotentiaalin ohjaus pitäisi olla kaukolämpöyhtiöllä. Tämä tarkoittaa, että kaukolämpöyhtiö antaa signaalin, jonka mukaan kysyntäjoustopotentiaalin liittyneet kiinteistöt toteuttavat kaukolämpötehon hetkellistä tarvetta alentavia toimenpiteitä mahdollisimman ennakoitavalla ja asukkaiden kokeman palvelutason säilyttävällä tavalla. Jotta asiakkaan kokema palvelun laatu ei heikkenisi, toteutus on järkevää toteuttaa patteriverkoston veden lämpötilaa rajoittamalla – ei ilmanvaihdon tai lämpimän käyttöveden rajoituksin.

Kaukolämpöyhtiö voi antaa signaalin kiinteistöille kysyntäjoustopotentiaalin toteuttamiseksi ainakin kolmella eri tavalla. Vanhojen kerrostalojen osalta (jotka eivät ole etähallinnassa) lienee järkevää rakentaa kiinteistöjen kaukolämpökeskuksiin selkeä automaatiikka, joka esimerkiksi rajoittaa patterikierron veden lämpötilaa joka aamu klo 7-9. Tällaisia kiinteistöjä ei voi kuitenkaan olla liian suurta määrää suhteessa koko järjestelmän tehontarpeeseen. Kiinteistöille, jotka ovat joko etähallinnassa tai joita voidaan muulla mekanismilla ohjata etänä, ohjaussignaali voidaan antaa massaohjaussignaalinä (esim. tekstiviestinä) tarpeen mukaan joko kaikille kiinteistöille tai kohdistetusti vain osalle kiinteistömäärästä. Kolmas ja kaikkein hienostunein vaihtoehto on rakentaa pörssin kaltainen järjestelmä kaukolämpöverkkoon, jossa kaukolämpöyhtiö antaa tuntitasoisen kustannusperusteisen kaukolämpöhinnat kiinteistöille. Kiinteistöt optimoivat hintojen perusteella omaa kaukolämmön käyttöönsä. Jotta kaikki järjestelmään kytketyt kiinteistöt eivät käyttäytyisi identtisesti aiheuttaen potentiaalisesti entistä suurimpia tehopiikkejä, hinnoittelun pitäisi olla ”reaaliaikaista”, jolloin kiinteistöjen päätökset olla käyttämättä lämpötehoa jonakin ajankohtana vaikuttaisivat kyseisen ajankohdan lämmön hintaan kysynnän ja tarjonnan lakien mukaisesti. Huomattakoon, että kysyntäjoustopotentiaalin rakentaminen vaatii luonnollisesti sopimusta kaukolämpöyhtiön ja asiakkaan välillä, jotta yhtiöllä olisi oikeus ohjata asiakaskiinteistön kaukolämpötehon käyttöä.

Kysyntäjoustopotentiaalin rakentaminen vaatii luonnollisesti myös kannustimien tarjoamista asiakkaille, jotka päättävät liittyä järjestelmään. Kannustimet ymmärretään tässä selvityksessä laajasti ohjausvaikutukseksi tämänhetkiseen tilanteeseen verrattuna. Näin ollen esimerkiksi kustannusvastaava tuntipohjainen hinnoittelu katsotaan kannustimeksi asiakkaille säästää tehoa kalliiden tuntien aikana, jos aiemmin käytössä on ollut sama hinta koko vuoden. Näin siksi, että tuntipohjainen hinnoittelu kuitenkin ohjaa asiakkaita siirtämään lämpötehon tarvettaan tuotantokustannuksiltaan kalliilta tunneilta edullisempiin tunteihin, mikä on kysyntäjoustopotentiaalin tavoitteena. Tuntipohjaiseen hinnoitteluun liittyy kuitenkin riskinä ennuste-epävarmuuden hallinta, kuten edellä todettiin. Koska kysyntäjoustopotentiaali on tuntitasoista asia, myös hinnoittelun täytyisi tapahtua tuntitasolla, jos sillä halutaan olevan kannustinvaikutus asiakaskiinteistöihin.

Kaukolämpöyhtiön kannalta olisi mielekästä, että palkitseminen tapahtuisi jälkikäteen ja perustuisi todennettuihin hyötyihin. Näin vältetään tilanteelta, jossa yhtiö myöntäisi asiakkaille etuja, mutta järjestelmätason hyödyt jäisivätkin toteutumatta. Suurille kaukolämpöasiakkaille on luontevaa tarjota asiakaskohtaisia kannustimia, mutta taloyhtiöille standardisopimuksia ja -ratkaisuja. Kannustimet voivat perustua joko tehomaksujen tai energiamaksujen alennuksiin tai suoriin investointitukiin. Asiakkaiden tehomaksujen alentaminen vaikuttaisi kuitenkin luontevimmalta kannustinmallilta, kunhan se toteutetaan tasapuolisesti eri asiakasryhmien kannalta. Yleisen hyväksyttävyyden ja uskottavuuden kannalta on oleellista, että hyödyt ja kustannukset kohdennetaan siten, että asiakasryhmien välinen tasapuolisuus säilyy (hyödyt jaetaan niille asiakkaille, jotka osallistuvat niiden tuottamiseen). Luonteva kannustinjärjestelmä olisi esimerkiksi sellainen, jossa asiakkaan tehomaksu perustuisi liukuvasti kolmen edellisen vuoden maksimitehontarpeiden keskiarvoon. Kysyntäjoustopotentiaalin toiminnassa suunnitellusti kiinteistön maksimitehontarpeet laskisivat vaihtelevasti, mikä johtaisi kiinteistön kiinteiden kustannusten alenemiseen. Tällaisessa järjestelmässä kannustin perustuisi toteutuneisiin tehontarvemuutoksiin, mutta silti järjestelmätason hyötyjen varmistaminen jäisi kaukolämpöyhtiön vastuulle.

On huomionarvoista, että kaukolämmön kysyntäjoustopotentiaalin järjestelmätason toimivuutta ei ole asian tärkeyteen nähden tutkittu Suomessa tarpeeksi – pilottihankkeita, tutkimustietoa ja kaukolämpöjärjestelmiä koskevaa relevanttia dataa on vähän, ja data on huonosti saatavilla. Olisikin suositeltavaa, että kaukolämpöjärjestelmätasot pyrkisivät laajentamaan kysyntäjoustopotentiaalia ja sen toteutusmekanismeihin liittyvää tietopohjaa paitsi keskenään, myös yhteistyössä tutkijoiden kanssa.

LIITE I: Kirjallisuusviitteet

- Aarnio, O-P. 2014. Uusien kaukolämmön hinnoittelumallien kehittäminen. Diplomityö. Tampereen Teknillinen yliopisto, Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma.
- Basciotti, D., Schmidt, R.R. 2014. Peak reduction in district heating networks: A comparison study and practical considerations. The 14th International Symposium on District heating and cooling, September 7th to September 9th, 2014, Stockholm, Sweden.
- Difs, K., Bennstam, M., Trygg, L., Nordenstam, L. 2010. Energy conservation measures in buildings heated by district heating – A local energy system perspective. *Energy* 35 (2010) 3194-3203.
- Fjärrvärmetidningen. 2014. Smart fjärrvärmenät minskar reservdriften. Fjärrvärmetidningen Nr 7, October 2014.
- Fortum. 2015a. Fortum ja Leanheat yhteistyöhön TA-Yhtymän ja Järvenpään Mestariasuntojen kanssa – kysyntäjoustolla älykkäämpää kaukolämpöä asuinkerrostaloihin. Lehdistötiedote 12.3.2015. Saatavilla: <http://www.fortum.com/fi/media/pages/fortum-ja-leanheat-yhteistyohon-ta-yhtyman-ja-jarvenpaan-mestariasuntojen-kanssa-kysyntajoustolla-alykkaampaa.aspx>
- Fortum. 2015b. Älykäs kaukolämpö – asumismukavuudesta tinkimättä. Fortum ForEnergy blog. Saatavilla: <https://fortumforenergyblog.wordpress.com/2015/01/20/alykas-kaukolampo-%E2%80%92-asumismukavuudesta-tinkimatta/>
- Gadd, H. & Werner, S. 2013a. Heat load patterns in district heating substations. *Applied Energy* 108 (2013) 176-183.
- Gadd, H. & Werner, S. 2013b. Daily heat load variations in Swedish district heating systems. *Applied Energy* 106 (2013) 47-55.
- Gaia Consulting Oy. 2011. Älykäs kaukolämpö ja sen mahdollisuudet. Energiategollisuus ry. Saatavilla: <http://energia.fi/julkaisut/alykas-kaukolampojarjestelma-ja-sen-mahdollisuudet>
- International Energy Agency (IEA). 2003. Optimised district heating systems using remote heat meter communication and control. District heating and cooling, Annex VI, Report 2002:S7. 2003.
- International Energy Agency (IEA). 2005. Dynamic heat storage optimisation and demand side management. 2005.
- International Energy Agency (IEA). 2011. Interaction between district energy and future buildings that have storage and intermittent surplus energy. District heating and cooling, Annex IX, 2011 8DHC-11-03. 2011.
- Johansson, C. & Wernstedt, F. 2010. Heat load reductions and their effect on energy consumption. The 12th International symposium on district heating and cooling 2010, Tallinn, Estonia.
- Johansson, C., Wernstedt, F., Davidsson, P. 2012. Combined heat & power generation using smart heat grid. International Conference on Applied Energy ICAE 2012, Jul 5-8, 2012. Suzhou, China.
- Jokinen, E. 2013. Kysyntäjousto kaukolämmitetyissä kiinteistöissä. Diplomityö. Aalto-yliopisto.
- Jokinen, E., Kontu, K., Rinne, S., Lahdelma, R. 2014. Demand side management in the district heated buildings to optimize the heat production. ECOS 2014 – The 27th International conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems. June 15 – 19, 2014. Turku, Finland
- Kensby, J., Truschel, A., Dalenbäck, J-O. 2015. Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test. *Applied Energy* 137 (2015) 773-781.
- Kensby, J., Truschel, A., Dalenbäck, J-O. 2014. Utilizing buildings as short-term thermal energy storage. The 14th International Symposium on District Heating and Cooling, September 7th to September 9th, 2014, Stockholm, Sweden.

- Koskelainen, L., Saarela, R., Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus. 2006.
- Kärkkäinen, S., Sipilä, K., Ranne, A., Kekkonen, V., Koponen, P., Koskelainen, L., Heikkinen, J. 1999. Kysynnän hallinta kaukolämmitysjärjestelmissä. DSM:n perusteet ja tarvittava tekniikka. VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. 1999. Espoo.
- Kärkkäinen S., Sipilä K., Pirvola L., Esterinen J., Eriksson E., Soikkeli S., Nuutinen M., Aarnio H., Schmitt F., Esigruber C. 2003. Demand side management of the district heating systems. VTT Research Notes 2003 (2247).
- Malm, T & Salonen, A. 2014. Kaukolämmön hinnoittelumalli joustavaksi. Kontrahti, Senaatti-kiinteistöjen sidosrymälehti 3/2014. Saatavilla: http://www.senaatti.fi/filebank/2506-Kontrahti_314_lowres.pdf
- Manninen, Aino-Kaisa. 2014. Kaukolämmön tuotantoa ja kulutusta tasapainottavat liiketoimintamallit. Diplomityö. Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta. 2014.
- Olsson Ingvarsson, L.C., & Werner, S. 2008. Building mass used as short term heat storage. The 11th International symposium on district heating and cooling 2008: Reykjavik, Iceland.
- Wernstedt F, Davidsson P, Johansson C. 2007. Demand side management in district heating systems. 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS'07, Honolulu, HI. 2007.
- Wernstedt, F., Johansson, C. 2008a. Intelligent distributed load control. 2008a. The 11th International symposium on district heating and cooling 2008: Reykjavik, Iceland.
- Wernstedt F, Johansson C, Wollerstrand J. 2008b. Sänkning av returtemperaturer genom laststyrning (Decreased return-temperatures through heat load control). Report No. 2008:2.
- ÅF-Consult Oy. 2012. Kaukolämmön hinnoittelun nykytila ja tulevaisuuden mahdollisuudet. Energiateollisuus ry. Saatavilla: <http://energia.fi/julkaisut/kaukolammon-hinnoittelun-nykytila-ja-tulevaisuuden-mahdollisuudet-loppuraportti>

LIITE 2: Haastattelut

Yhtiö	Henkilö	Asema
Aalto-kiinteistöt	Satu Kankaala	Ympäristö- ja kehittämisspäälikkö
Aalto-kiinteistöt	Tiina Sekki	Energia-asiantuntija
ARE	Heikki Mäki	Suunnittelupäälikkö
Elenia Lämpö	Tero Holappa	Liiketoiminnan kehityspäälikkö
Elenia Lämpö	Anne Piispanen	Tekninen johtaja
Enegia	Juhani Vättö	Senior Energy Specialist
Fortum	Maarit Pihlajaniemi	Tutkimus- ja tuotekehityspäälikkö
Fortum	Juha Kurra	Tuotepäälikkö
Helen	Kai Backlund	Yksikön päälikkö, markkinointi ja tuotekehitys
HOAS	Kim Lindholm	Osastopäälikkö asunto- ja kiinteistöpalvelut
Hyvinkään Lämpövoima	Antti Eskola	Kaukolämpöpäälikkö
Icecapital REAM	Juha Haapakoski	Director, partner
Icecapital REAM	Jouni Lindström	Real Estate Manager
Jyväskylän Energia	Janne Pirttimäki	Kehittämisspäälikkö
Jyväskylän Energia	Tytti Laitinen	Projektipäälikkö
Kamstrup	Olli Torikka	Maaohjaaja
Kiinteistöliitto	Petri Pylsy	Energia-asiantuntija
Kiinteistöliitto	Jukka Kero	Pääekonomisti
Kuopion Energia	Petri Turtiainen	Asiakaspäälikkö, kaukolämpö
Mäntsälän Sähkö	Esa Muukka	Toimitusohjaaja
Oulun Energia	Harri Kaisto	Kaukolämpöohjaaja
Ouman Energiategohkuuspalvelut	Matti Nevala	Toimitusohjaaja
Rauman Energia	Jouni Kartano	Kaukolämpöohjaaja
Senaatti-kiinteistöt	Teppo Malm	Talotekniikan asiantuntija, LVI
Turku Energia	Jari Kuivanen	Kaukolämpöohjaaja
VVO-Yhtymä	Kimmo Rintala	Yksikön ohjaaja, ylläpito ja hankinnat