KAUKOLÄMMÖN KYSYNTÄJOUSTOPILOTTI SUOMALAISISSA ASUINRAKENNUKSISSA

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2022

Juho Kaksonen

Työn tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

TkT Jussi Saari

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Juho Kaksonen

Kaukolämmön kysyntäjoustopilotti suomalaisissa asuinrakennuksissa

Energiatekniikan diplomityö

2022

96 sivua, 46 kuvaa ja 6 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja TkT Jussi Saari

Avainsanat: kaukolämmön kysyntäjousto, kysyntäjousto, kysynnän hallinta, kaukolämpö

Tämä energiatekniikan diplomityö käsittelee kaukolämmön kysyntäjoustoa teoriassa sekä suomalaisissa asuinkiinteistöissä toteutetun kysyntäjoustopilotin tuloksiin pohjautuen.

Teoriaosuudessa käsitellään kaukolämpötoiminnan periaatteet ja erityispiirteet sekä niiden vaikutus kaukolämmön kysyntäjoustojen toteuttamiseen. Teoriaosuus perehtyy myös tarkemmin kaukolämmön kysyntäjouston toimintaperiaatteeseen, jouston tarpeen muodostumiseen, hyötyihin ja haittoihin, mahdollisiin haasteisiin sekä erilaisiin käytännön ohjaustapoihin, joiden avulla kysyntäjoustoja voidaan suorittaa. Työn käytännön osuudessa kaukolämmön kysyntäjoustoja testataan alentamalla pilotin kiinteistöjen patteriverkoston kiertolämpötilaa aikaohjattuilla kysyntäjoustoilla. Testeillä selvitetään pilotin asuinkiinteistökohteiden joustopotentiaali, muutokset energiankulutuksessa, sisälämpötilojen vaihtelut joustojen aikana, sekä eri joustoparametrien ja jouston aikana vallitsevien olosuhteiden vaikutukset joustojen toteutumiseen. Saatujen tulosten perusteella tehdään myös arvio kaukolämpöverkon muiden asuinkiinteistökohteiden joustamisella saavutettavissa olevasta teoreettisestä joustopotentiaalista.

Tuloksiksi saatiin, että pilotissa mukana olleesta kahdeksasta asuinkiinteistöstä joustot toteutuivat parhaiten energiankäytöltään keskisuurissa sekä -suurissa kohteissa, ja heikoiten pärjäsivät pilotin pienimmät kohteet. Muutokset energiankäytössä olivat keskimäärin melko pieniä, ja huhtikuun normeeratut kulutusmäärät laskivat ja toukokuun osalta kasvoivat. Sisälämpötilamuutokset olivat myös todella vähäisiä, eikä joustoja tarvinnut rajoittaa sisälämpötilan alenemisen takia. Joustojen toteutuma heikkeni pyydettyjen tehonalenemien kasvaessa sekä joustojen keston pidentyessä. Kaukolämpöverkon muiden asuinrakennusten joustopotentiaalin todettiin olevan kaukolämpöyhtiön kannalta merkittävän suuruinen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Juho Kaksonen

District heating demand-side management pilot in Finnish residential buildings

Master's thesis

2022

96 pages, 46 figures and 6 tables

Examiner(s): Professor Esa Vakkilainen and D.Sc. (Tech.) Jussi Saari

Keywords: demand-side flexibility, demand-side management, district heating demand-side management, district heating demand-side flexibility, district heating

This thesis covers district heating demand-side management in theory and based on the results of the demand flexibility pilot implemented in Finnish residential buildings.

The theory part focuses on the principles related to district heating and their effect on the implementation of district heating demand-side management. The theory part also considers operating principles, reasons behind the need for demand-side management, benefits and disadvantages, possible challenges, and different control methods for implementation. In the practical part district heating demand-side flexibility is tested by lowering the radiator network circulation temperature of the buildings using time-based control method. Tests are used to gather information about the flexibility potential, changes in energy consumption, indoor temperature fluctuations and the impacts caused by different parameters and conditions during the tests. Theoretical potential of the other residential properties of the district heating network is also estimated based on the results.

The results showed that the best response to demand side flexibility tests were delivered by energy use wise medium- and large-sized buildings, unlike the smallest buildings which did the worst out of the eight test buildings. The changes in energy use were small on average. Weather corrected consumption decreased in April and increased in May. Indoor temperature changes were also minor. Results weakened as power reduction values increased and as the durations of test periods lengthened. The demand side flexibility potential of the other residential buildings in district heating network was found to be of significant volume for the district heating company.

KIITOKSET

Haluan kiittää diplomityössäni mukana olleita henkilöitä ja yrityksiä. Erityiskiitokset ohjaajilleni Teemu Tirkkoselle (Kuopion Energia Oy) ja Esa Vakkilaiselle (LUT yliopisto), sekä työni toiselle tarkastajalle Jussi Saarelle (LUT yliopisto) työni ohjauksesta.

Tahdon kiittää myös projektissa mukana ollutta Kuopion Energia Oy:n, Niiralan Kulma Oy:n sekä Ouman Oy:n henkilöstöä yhteistyöstä. Kiitokset myös perheelleni ja ystävilleni tuesta yliopisto-opintojen sekä diplomityön aikana.

Kuopiossa 26.7.2022

Juho Kaksonen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset symbolit

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
E	ominaiskulutus	[kWh/m^3]
Q	lämmitysenergia	[Wh]
q_v	tilavuusvirta	[m^3/s]
S	lämmitystarveluku	[°Cvrk]
T	lämpötila	[K, °C]
t	aika	[s]
V	tilavuus	[m^3]

Kreikkalaiset symbolit

ρ	tiheys	[kg/m^3]
ϕ	teho	[W]

Alaindeksit

kok	kokonaiskulutus
LKV	lämmin käyttövesi
$lämmitys$	kaukolämmön kokonaislämmitysteho
N	normaali
$norm$	normeerattu kulutus
$tila$	tilojen lämmitys
v	vesi

$vpkunta$	vertailupaikkakunta

Lyhenteet

CHP	combined heat and power
DSR	demand side response
EU	Euroopan unioni
KPA	kiinteän polttoaineen kattila
LKV	lämmin käyttövesi
MAS	multi-agent system
PtH	power-to-heat

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1. Johdanto ... 9
   1.1. Työn tausta ... 9
   1.2. Työn tavoitteet ja rajaukset ... 10
   1.3. Työn sisältö ja rakenne ... 11
2. Kaukolämpö ... 13
   2.1. Kaukolämpö Suomessa ... 13
   2.2. Kaukolämmön tuotanto ... 15
   2.3. Kaukolämmön jakelu ... 18
   2.4. Kaukolämmön kustannukset ... 20
   2.5. Kaukolämmön hinnoittelu ... 22
   2.6. Kaukolämmön haasteet ja tulevaisuus ... 23
3. Kaukolämmön kysyntäjousto ... 26
   3.1. Kaukolämmön kysyntäjouston toimintaperiaate ... 26
   3.2. Kysyntäjouston tarve kaukolämpöverkossa ... 28
      3.2.1. Vuodenaikojen ja sään vaikutus ... 29
      3.2.2. Asuinrakennusten vaikutus ... 30
      3.2.3. Julkisten kiinteistöjen vaikutus ... 31
      3.2.4. Kulutusvaihteluiden kokonaisvaikutus ... 34
   3.3. Kaukolämmön kysyntäjouston hyödyt ja mahdollisuudet ... 36
      3.3.1. Lämmöntuotannon optimointi ... 37
      3.3.2. Sähköntuotannon optimointi ... 39
      3.3.3. Kaukolämmön kysyntäjouston hyötypotentiaali ... 39
      3.3.4. Hyödyt kaukolämpöasiakkaalle ... 41

3.4. Kaukolämmön kysyntäjouston uhkat ja haasteet 42
3.5. Kaukolämmön kysyntäjouston ohjaustavat 43
3.5.1. Aikaohjattu kysyntäjousto 45
3.5.2. Kaukolämpöyhtiön ohjaama jousto 48
3.5.3. Muut ohjaussignaalit ja toteutus aikaisemmissa tutkimuksissa 48
4. Kaukolämmön kysyntäjouston pilottihanke 54
4.1. Tutkimuksen tausta ja tavoitteet 54
4.2. Lähtötiedot ja käytetty laitteisto 55
4.3. Tutkimusmenetelmät 58
4.4. Tutkimustulokset 59
4.4.1. Kohdekohtaiset tulokset 59
4.4.2. Kohteiden keskinäinen vertailu 71
4.4.3. Kysyntäjoustoparametrien vertailu 73
4.4.4. Kysyntäjouston potentiaali kaukolämpöverkossa 77
5. Yhteenveto ja johtopäätökset 82
5.1. Yhteenveto 82
5.2. Johtopäätökset tuloksista 86
5.3. Tulosten vertailu muihin tutkimustuloksiin 89
5.4. Työn rajoitukset ja ehdotukset jatkotutkimukselle 90
Lähteet 93

1. Johdanto

Tämä diplomityö käsittelee kaukolämmön kysyntäjoustoa, sen toteutustapoja ja saatavilla olevia hyötyjä kaukolämpöverkoissa ja kaukolämmitteisissä rakennuksissa. Kaukolämpötoiminnan kehittämisen potentiaali on suuri, sillä kaukolämmitys on yksi merkittävimmistä lämmitysmuodoista Suomessa, ja se kattoi markkinaosuudeltaan noin 46 % kaikista lämmitysmuodoista vuonna 2020 (Energiateollisuus ry. 2022, 2). Kaukolämmön kysyntäjoustoa hyödyntämällä kaukolämpötoimija voi vaikuttaa kaukolämmöntarpeen vaihteluihin muokkaamalla asiakkaan energiankäyttöä siten, että lämmöntarpeen ajoitusta saadaan siirrettyä energiajärjestelmän kannalta optimaalisempaan ajankohtaan. Joustojen avulla voidaan saavuttaa muun muassa taloudellisia- sekä ympäristöhyötyjä. (Valor Partners Oy 2015, 3)

Tämä diplomityö on tehty Kuopion Energia Oy:lle, ja työn tarkoituksena on tutkia kaukolämmön kysyntäjouston hyödyntämistä aikaisempien tutkimusten, sekä Kuopion Energian kaukolämpöverkon kysyntäjouston pilottikohteissa tehtyjen kysyntäjoustotestien tulosten perusteella.

1.1. Työn tausta

Kaukolämpötoiminta on kehittynyt merkittävästi elinkaarensa aikana, esimerkiksi käytettävien polttoaineiden osalta, joiden pääpaino on vuosikymmenten aikana vaihtunut fossiilisista polttoaineista biomassaan ja muihin vähempipäästöisiin lämmönlähteisiin (Energiateollisuus ry. 2022, 13). Tarve kaukolämpötoiminnan kehittämiselle on kuitenkin jatkuvaa, johon vaikuttaa esimerkiksi Suomen sekä EU:n tavoitteet päästöjen vähentämisestä, hiilineutraaliuudesta ja uusiutuvien energiamuotojen osuuden sekä energiatehokkuuden kasvattamisesta (Valtioneuvosto 2019). Nämä tavoitteet, sekä kaukolämpötoimijoiden oma halu liiketoiminnan kehittämisestä tehokkaammaksi ja kannattavammaksi ovat esimerkkejä motivaattoreista kaukolämmön kysyntäjouston tutkimiselle ja hyödyntämiselle.

Joustosta saatuja hyötyjä kaukolämpöyhtiölle voivat muun muassa olla huipputuotannon määrän vähentäminen, voimalaitosten käyttöasteen parantaminen ja optimaalisempi lämmöntuotanto, ympäristöhaittojen ehkäiseminen, tuotanto- ja polttoainekustannusten minimointi, huipputuotantolaitosten ylös- sekä alasajojen määrän vähentyminen ja CHP-laitosten sähkön tuotannon optimointi sähkön hintasignaalin perusteella kalliin sähkön ajalle (Kärkkäinen et al. 2004, 64) (Valor Partners Oy 2015, 13–15). Kaukolämpöasiakkaan kysyntäjoustosta saatavia hyötyjä ovat taas esimerkiksi alhaisemmat energia- ja lämmityskulut sekä kuluttajia koskevien palveluiden kehittyminen uusien kaukolämpötoiminnan liiketoimintamallien mukana. (Valor Partners Oy 2015, 14.)

Työ tehdään kaukolämmön kysyntäjouston toteutusmallien selvittämiseksi, ja saatua tietoa hyödynnetään kysyntäjoustopilotissa ja siitä saatujen tulosten tulkinnassa. Tuloksista pyritään saamaan tietoa kysyntäjouston käyttäytymisestä erilaisissa asuinkiinteistöissä, jota hyödynnetään kysyntäjouston kannalta suotuisten kiinteistökohteiden määrittämiseksi.

1.2. Työn tavoitteet ja rajaukset

Työn tavoitteena on selvittää kaukolämmön kysyntäjouston toimintaa ja mahdollisuuksia teoriassa, pohjautuen aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin sekä kirjallisuuteen. Käytännön osuudessa tavoitteena on käyttää kerättyä tietoa pilottikohteiden kysyntäjoustojen suunnitteluun ja testaamiseen, sekä saatujen tulosten tarkasteluun.

Teoriaosuudessa keskitytään selvittämään kaukolämmön kysyntäjouston toimintaperiaatteita, tarpeen ja potentiaalin määritystä, saatavia hyötyjä ja mahdollisia haittoja sekä eri kysyntäjouston ohjaustapoja ja ohjaukseen liittyvien automaatiojärjestelmien toimintaa. Teoriaosuus käsittelee myös yleisesti kaukolämpötoimintaa ja sen erityispiirteitä ja näiden vaikutusta kaukolämmön kysyntäjouston toteuttamiseen.

Tutkimusosuudessa tavoitteena on saada suoritettua pilottikohteiden kysyntäjouston testauksia ja kerätä näistä tarvittavaa dataa myöhempää analyysiä varten. Pilottikohteiden joustoja on tarkoitus ajaa aikaisempien kirjallisuudesta löytyvien tutkimustulosten sekä itse määrättyjen joustoarvojen perusteella. Saatujen tulosten perusteella tehdään analyysi

saaduista joustojen hyödyistä, ja tehdään tuloksiin pohjautuvat laskelmat jouston skaalaamisen potentiaalista muihin Kuopion Energian kaukolämpöverkon kohteisiin.

Tutkimusosuuden keskeisiä tutkimuskysymyksiä ovat kysyntäjoustolla saatujen tehonalenemien riippuvuus kiinteistökohteesta, ulkolämpötilasta sekä muista variaatiota aiheuttavista tekijöistä. Lisäksi halutaan selvittää kuinka sisälämpötilat käyttäytyvät kiinteistössä kysyntäjoustojen aikana, muuttuuko kiinteistöjen kaukolämpöenergian käyttö, miten tehopyynnöltään ja kestoltaan erilaiset joustopyynnöt eroavat toteumaltaan toisistaan, sekä paljonko joustopotentiaalia voitaisiin teoriassa saada hyödyntämällä kaukolämpöverkon muita asuinkiinteistökohteita kaukolämmön kysyntäjoustoissa.

Työ rajataan koskemaan veden avulla siirrettyä kaukolämpöä, eikä työssä käsitellä lämmöntuotantoa tai jakelua prosessihöyrynä esimerkiksi teollisuuden tarpeisiin. Hyötyjä käsitellään pääosin kaukolämpöyhtiön näkökulmasta, ja asiakkaan saamia hyötyjä sivutaan. Kysyntäjoustotoimia kohdistetaan tutkimusosuudessa ainoastaan patteriverkoston kiertolämpötilan alentamiseen, eikä lämpimän käyttöveden tai ilmastoinnin hyödyntämistä kysyntäjoustotoimiin oteta työn tarkasteluun mukaan. Jouston toteutus rajataan koskemaan kiinteistöjä, eikä tarkasteluun oteta mukaan mahdollisia lämpöakkuja tai kaukolämpöverkon kapasiteetin käyttämistä väliaikaisena lämpövarastona. Tutkimusosuudessa mukana on pelkästään asuinkiinteistöjä, jonka vuoksi julkiset- sekä teollisuuden kiinteistöt rajataan ulos tarkastelusta. Työn suuntauksen mukaisesti mahdollisia taloudellisia hyötyjä käsitellään teoriaosuudessa, mutta tutkimusosuudessa taloudellisten hyötyjen laskeminen jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

1.3. Työn sisältö ja rakenne

Työn sisältö voidaan jakaa kahteen suurempaan osioon, joita ovat työn teoreettinen osuus sekä työn käytännön osuus, eli tehdyn tutkimuksen läpikäynti.

Työn teoreettinen osuus käy läpi kaukolämpötoiminnan merkityksen Suomessa, lämpöenergian tuotanto- ja siirtomenetelmät, kaukolämmön kustannus- ja hinnoitteluperiaatteet, toimintaan liittyvät haasteet sekä tulevaisuuden näkymät. Teoriaosuudessa käydään läpi myös kaukolämmön kysyntäjouston toimintaperiaate, kysyntäjouston tarpeen muodostuminen kaukolämpöverkossa, kysyntäjoustoon liittyvät

hyödyt ja mahdollisuudet, jouston hyötypotentiaalin määrittämisen, kysyntäjoustoon liittyvät uhkat ja haasteet sekä erilaiset kysyntäjouston ohjaustavat.

Tutkimusosuudessa perehdytään kaukolämmön kysyntäjoustoon osallistuvien pilottikohteiden mittausdataan ja sen tulkitsemiseen. Tutkimusosuus käy läpi suoritetun tutkimuksen tutkimuskohteet, lähtökohdat ja tavoitteet, käytettävissä olevat lähtötiedot sekä tutkimusmenetelmät sekä saadut tulokset ja tulosten perusteella tehtävän analyysin. Tulosten perusteella tehtävällä analyysilla pyritään tunnistamaan kysyntäjoustokohteiden ja -parametrien keskinäiset erot, sekä pyritään arvioimaan Kuopion Energian kaukolämpöverkossa saatavilla olevaa joustopotentiaalia asuinkiinteistöjen osalta.

Lopuksi työstä saatuja tuloksia käytetään johtopäätöksien tekemiseen ja tulosten oikeudellisuutta tarkastellaan kriittisesti. Saatuja tuloksia myös verrataan aikaisempiin tutkimuksiin ja käydään läpi tarvetta jatkotutkimukselle.

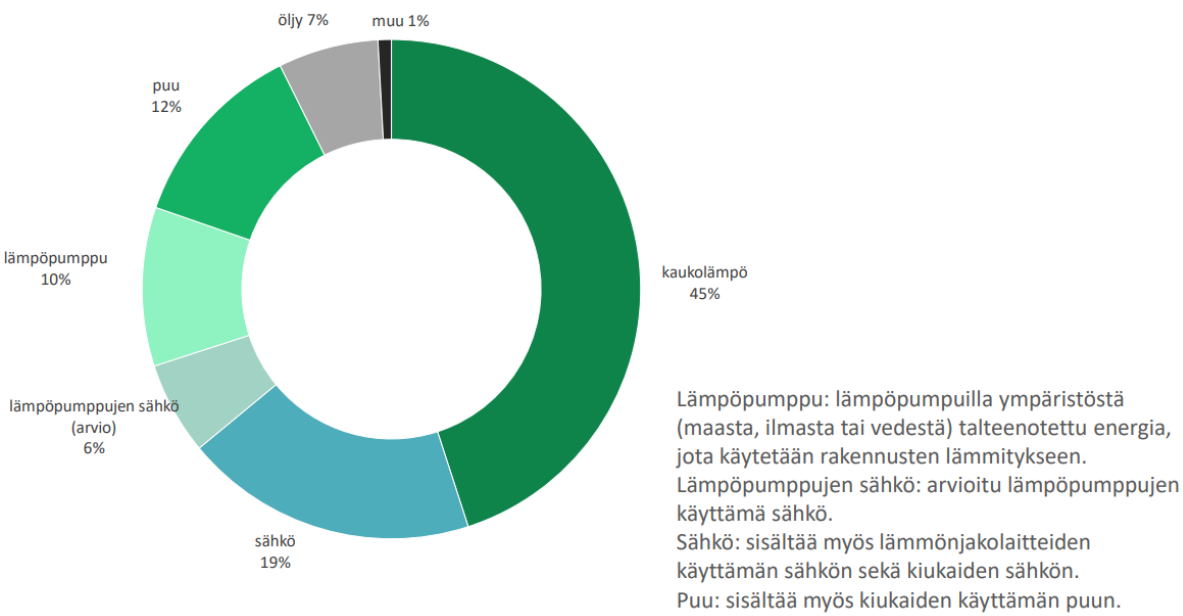
2. Kaukolämpö

Kaukolämmöllä tarkoitetaan kiinteistöjen ja käyttöveden lämmitystä kaukolämpöveden avulla siirrettyä lämpöä hyödyntäen. Kaukolämpö-käsite pitää sisällään myös lämmön keskitetyn tuotannon ja tuotetun lämmön jakelun asiakaskiinteistöille kaukolämpöverkkoa pitkin. Kaukolämpötoiminta toteutetaan Suomessa tyypillisesti liiketoimintamuodossa, toisin kuin usein pienempimuotoinen aluelämmitys. (Koskelainen et al. 2006, 25.)

Tämä kappale käsittelee kaukolämpötoiminnan periaatteita ja siihen liittyvää liiketoimintaa Suomessa. Ensimmäisenä käydään läpi kaukolämmön asemaa ja nykytilaa Suomessa, jonka jälkeen esitellään kaukolämmön tuotanto-, jakelu- ja kustannus- sekä hinnoitteluperiaatteet. Viimeiseksi käydään läpi nykyiseen kaukolämpötoimintaan liittyvät haasteet ja tulevaisuuden näkymät.

2.1. Kaukolämpö Suomessa

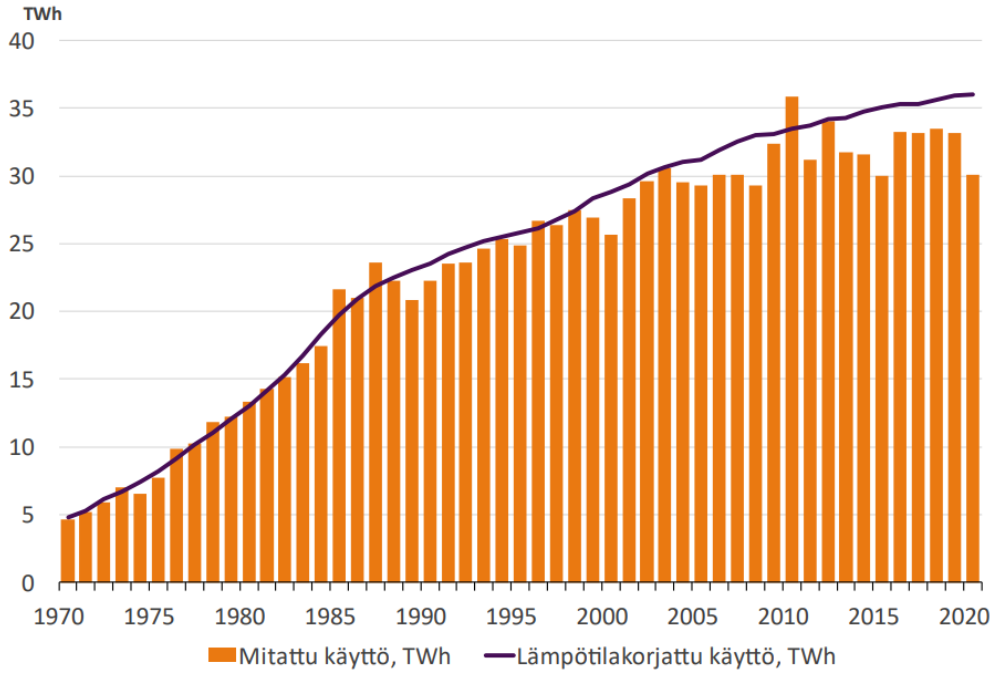
Kaukolämpö on Suomessa hyvin merkittävä lämmitysmuoto, ja sitä on harjoitettu laajemmassa mittakaavassa 1970-luvulta lähtien (Koskelainen et al. 2006, 5). Vuonna 2020 kaukolämmön asiakkaina oli yhteensä 2,98 miljoonaa asukasta, rakennetun kaukolämpöverkon pituus oli yhteensä 15 570 kilometriä ja kaukolämmön markkinaosuus kaikista lämmitysmuodoista oli 46 %. Kaukolämmön osuus suhteutettuna muihin tyypillisimpiin lämmitysmuotoihin asuin- ja palvelurakennuksissa vuonna 2020 on esitetty alla olevassa kuvaajassa. (Energiateollisuus ry. 2022, 2.)



Kuva 1. Lämmityksen markkinaosuudet asuin- ja palvelurakennuksissa Suomessa 2020. (Energiateollisuus ry. 2022, 3)

Kaukolämmön käyttö ja asiakasmäärät ovat olleet Suomessa jatkuvasti kasvavia, vaikka samanaikaisesti Suomalaisten rakennusten lämpöindeksi on ollut jatkuvassa laskussa (Energiateollisuus ry. 2022, 5–7). Lämpöindeksi kertoo kuinka paljon rakennus kuluttaa vuodessa energiaa lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden lämmittämiseen, ja sitä voidaan käyttää kiinteistöjen energiatehokkuuden vertailuun. (Motiva Oy 2021.)

Kaukolämmön käytön kasvu Suomessa on esitetty alla olevassa kuvaajassa.



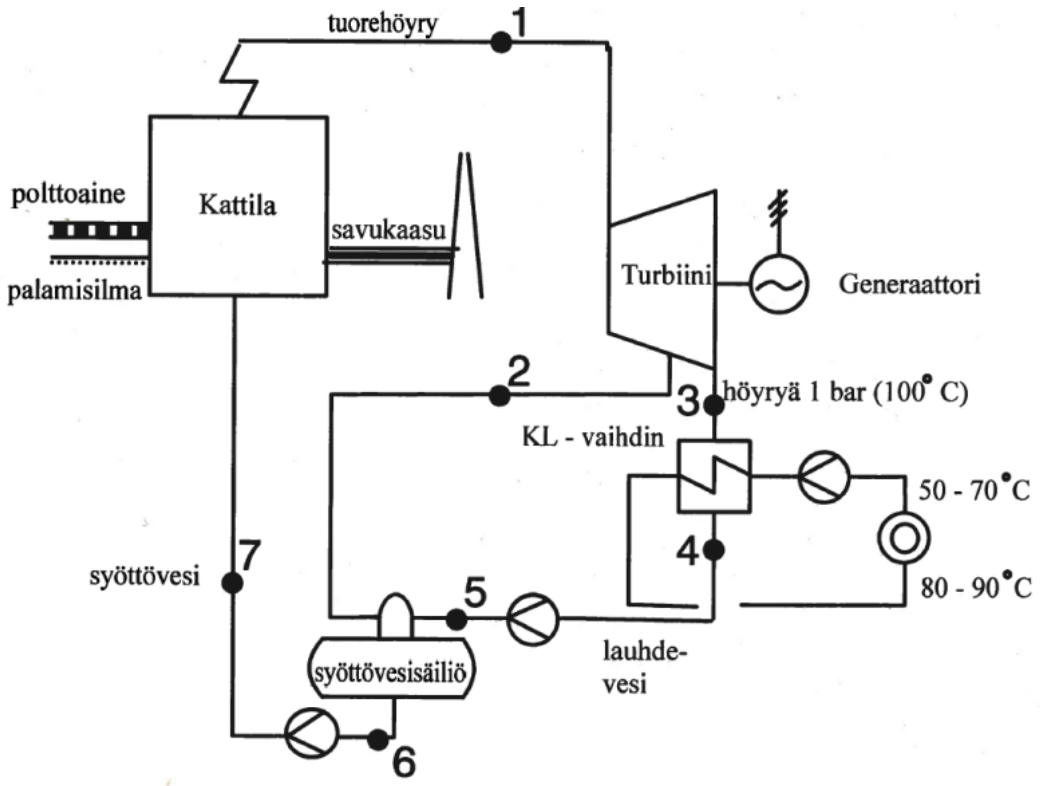
Kuva 2. Kaukolämmön mitattu- ja lämpötilakorjattu käyttö Suomessa. (Energiateollisuus ry. 2022, 5)

2.2. Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämmön tuotantomuodot voidaan jakaa perus- ja huipputuotantoon (Koskelainen et al. 2006, 322). Peruslämpöä tuotetaan yleisesti yhteistuotantona (CHP) yhteistuotantolaitoksissa, jolloin lämmön lisäksi tuotetaan myös sähköä. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon etuna on tuotantomuodon energiataloudellisuus sekä ympäristövaikutusten alhaisuus erillistuotantoon verrattuna. Yhteistuotannossa polttoaineen kulutusta voidaan pienentää alentuneiden kattila- ja prosessihäviöiden myötä. Yhteistuotantovoimalaitokset voidaan jakaa eri voimalaitostyyppeihin, joihin lukeutuvat höyryvoimalaitokset, kaasuturbiinilaitokset, kombivoimalaitokset sekä moottorivoimalaitokset. Kaukolämpöä tuottavia voimalaitoksia voidaan kutsua myös yleisnimityksellä kaukolämpö- tai lämmitysvoimalaitos. (Koskelainen et al. 2006, 47–48.)

Voimalaitoksissa polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia muunnetaan sähköksi ja hyödynnettävissä olevaksi lämmöksi useiden prosessivaiheiden avulla. Höyrykattilassa palavan polttoaineen kemiallinen energia siirtyy savukaasujen lämpöenergiaksi, joka taas siirretään savukaasuista prosessia kiertävän veden lämmitykseen sekä höyryn tulistukseen.

Höyryyn sitoutunut lämpö- ja paine-energia saadaan muutettua turbiinissa mekaaniseksi energiaksi, joka taas muutetaan generaattorin avulla sähköenergiaksi. Turbiinin jälkeen höyry lauhdutetaan kaukolämpövaihtimessa vedeksi ja vapautuva lämpö käytetään kaukolämpöverkoston kiertoveden lämmitykseen. Tyypillisen, pienikokoisen, kaukolämpöteholtaan noin 10–40 MW:n kaukolämpövoimalaitoksen komponentit ovat esiteltynä alla olevassa kuvassa. (Huhtinen et al. 2013, 21–22.)



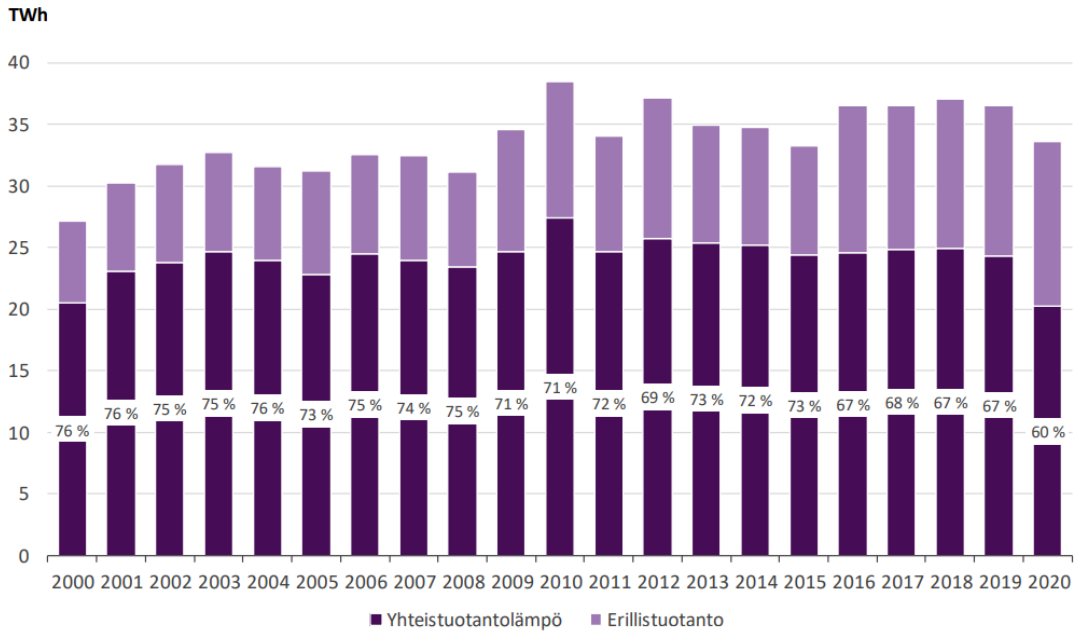
Kuva 3. Pienen kaukolämpövoimalaitoksen peruskytkentä. (Huhtinen et al. 2013, 21)

Prosessin toiminnan edellyttäviin peruskomponentteihin kuuluvat yläpuolisen kuvan mukaisesti tulistimella varustettu kattila, turbiini, kaukolämmön vaihdin, syöttövesisäiliö ja syöttövesi- sekä lauhdepumput. (Huhtinen et al. 2013, 21)

Kaukolämpöä voidaan tuottaa myös lämpökeskuksissa, joka on ainoastaan lämpöä tuottava laitos. Lämpökeskuksia käytetään yleisesti huipputehon tuotantoon tai varalaitoksina, joiden avulla lämpöä voidaan tuottaa päälaitoksen huoltojen aikana. (Koskelainen et al. 2006, 322) Lämpölaitostyypit voidaan jakaa kiinteisiin kattilalaitoksiin, joita ovat esimerkiksi vesi- ja

tuliputki sekä tulitorvikattila-laitokset, ja pienempiin siirrettäviin kattilalaitoksiin. Kiinteän polttoaineen kattilalaitoksiin lukeutuvat taas arina- ja leijupetikattila-laitokset. Lämpökeskusten yleisimmät pääpolttoaineet ovat raskas- ja kevyt polttoöljy, maakaasu sekä puu ja turve. (Koskelainen et al. 2006, 282–285.)

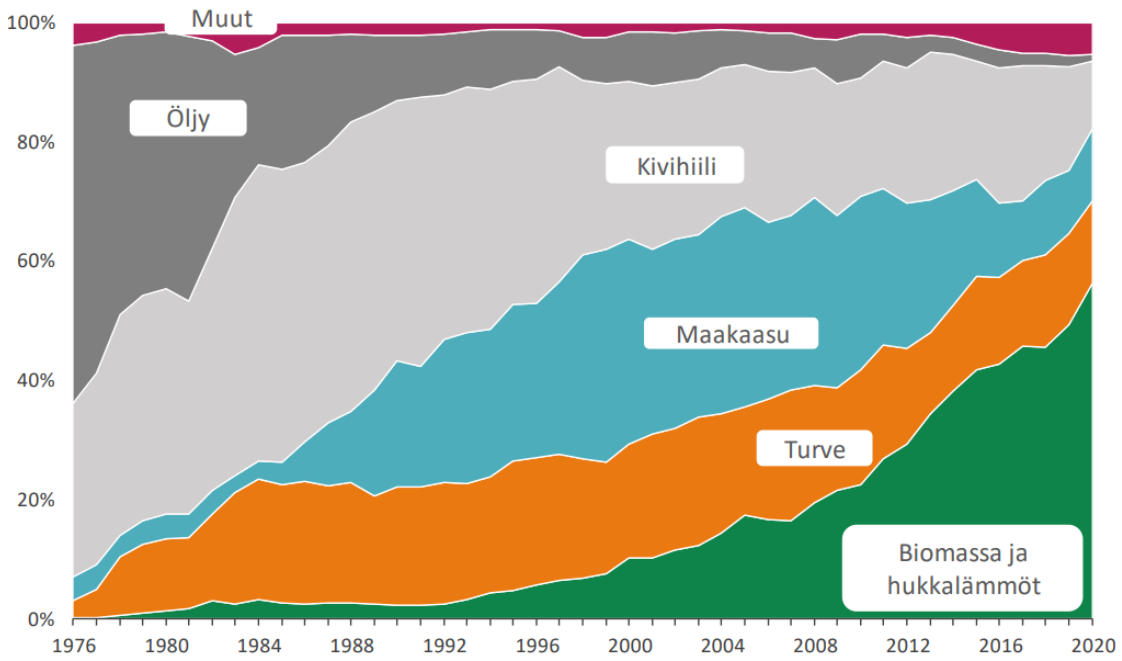
Suomessa kaukolämpöä on nykyisellään, sekä historiallisesti, tuotettu enemmän yhteistuotantona, joka voidaan havaita myös alla esitetystä kuvaajasta. Vuonna 2020 kaukolämmön hankinta oli yhteensä 33,6 TWh, josta yhteistuotannon osuus oli 60 %. (Energiateollisuus ry. 2022, 8–9.)



Kuva 4. Kaukolämmön hankinnan yhteis- ja erillistuotannon osuudet Suomessa. (Energiateollisuus ry. 2022, 9)

Kaukolämmön tuotantoon käytetyt polttoaineet ovat vaihtuneet merkittävästi kaukolämmön hyödyntämisen historian aikana, ja merkittäviä muutoksia lähivuosilta ovat esimerkiksi biomassan käytön kaksinkertaistuminen sekä hukkalämpöjen käytön kolminkertaistuminen 2010-luvun aikana. Fossiilisia polttoaineita on korvattu suuressa määrin, ja historiallisesti kaukolämmön tuotannon kannalta merkittävän öljyn osuus kaukolämmöntuotannon energianlähteenä on pienentynyt yhteen prosenttiin vuonna 2020. (Energiateollisuus ry. 2022, 13.)

Kaukolämmön energialähteiden kehitys vuodesta 1976 vuoteen 2020 on esitetty alla olevassa kuvaajassa.

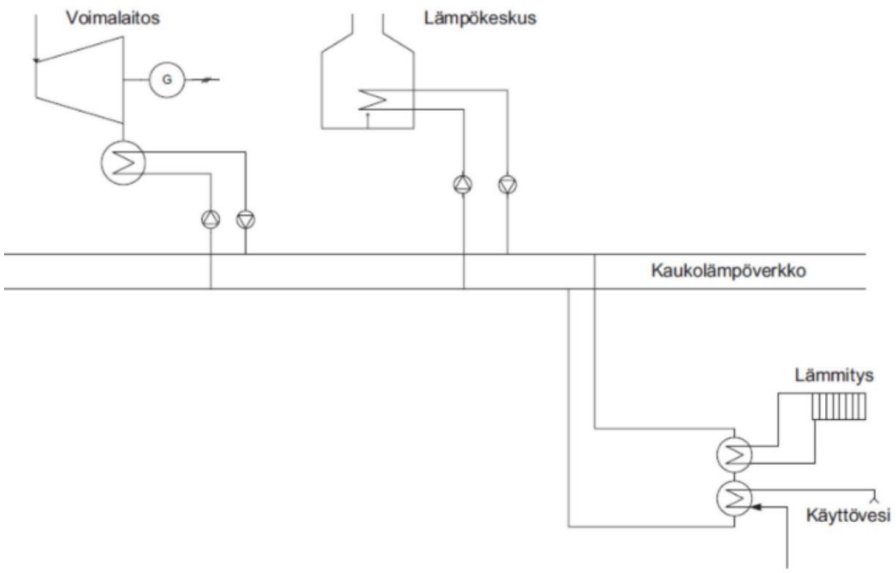


Kuva 5. Kaukolämmön hankinnan energialähteiden kehitys Suomessa. (Energiateollisuus ry. 2022, 13)

2.3. Kaukolämmön jakelu

Kaukolämmön jakelu tapahtuu siirtämällä voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa tuotettua lämpöä kaukolämpöverkon putkissa kiertävän veden avulla asiakkaiden laitteistoille, joissa kaukolämpöveden lämpöenergia siirtyy lämmönsiirtimien avulla asiakkaan lämmitysjärjestelmän käyttöön. Asiakkaan laitteisto voi käyttää siirrettyä kaukolämpöä kiinteistön lämmitykseen, käyttöveden lämmitykseen tai ilmanvaihtoilman lämmitykseen. Samaa kiertovettä käytetään uudelleen lämmön kuljettamiseen asiakkaalle, ja täten asiakkaan kiinteistöstä jäähtyneenä palannut vesi siirretään takaisin kaukolämpölaitokselle lämmitettäväksi paluuputkea pitkin. Kaukolämpölaitokselle palattuaan vettä lämmitetään laitoksen kattiloissa ja/tai lämmönsiirtimien avulla. (Koskelainen et al. 2006, 43.)

Tyypillisessä kaukolämpöjärjestelmässä käytetään kaksiputkijärjestelmää, eli yhtä meno- ja paluuputkea, jotka ovat samankokoiset ja näin yhdessä muodostavat kaukolämpöjohdon. Kaukolämpöverkossa kiertävä vesi saadaan kiertämään kaukolämpölaitosten pumppujen avulla. Periaatekuva tyypillisen kaksiputkijärjestelmän toiminnasta on esitetty alla olevassa kuvassa. (Koskelainen et al. 2006, 43.)



Kuva 6. Kaukolämpöverkon toteutuskuva kaksiputkijärjestelmällä. (Koskelainen et al. 2006, 43)

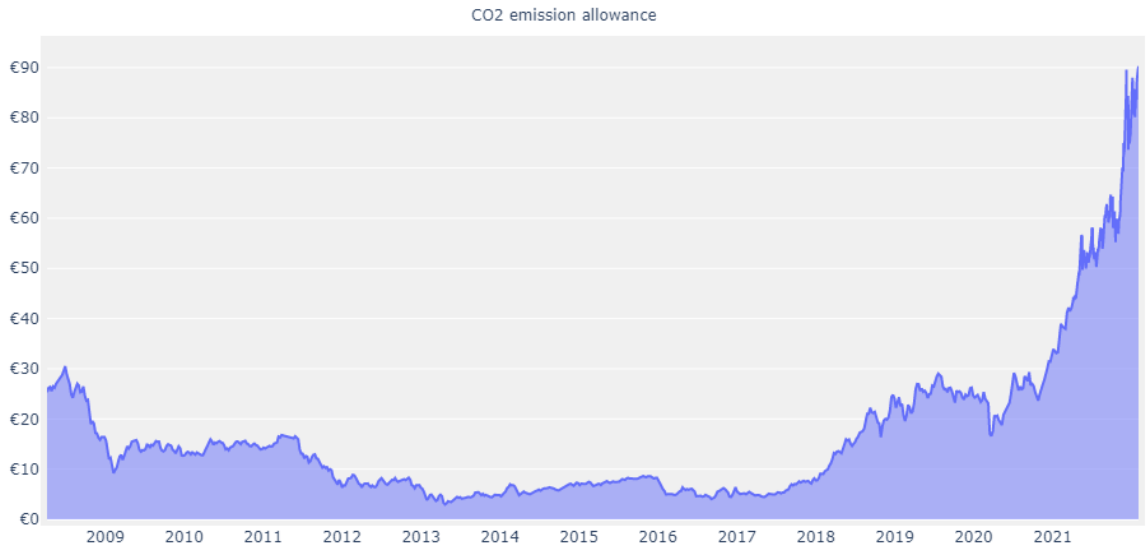
Kaksiputkijärjestelmälle tyypillistä on tuotantopäässä tapahtuva menoveden lämpötilan säätö vallitsevan ulkolämpötilan perusteella, jotta kiertoveden lämpötila ei ole liian suuri tai pieni, ja siten että lämpöhäviöt pystytään minimoimaan. Järjestelmän toiminnan kannalta tärkeää on myös riittävän korkean keskipaineen ylläpitäminen veden höyrystymisen ehkäisemiseksi, sekä kiertoveden laadun valvonta, siten että mekaaniset epäpuhtaudet sekä happi ja muut kaasut puhdistetaan pois kiertoveden joukosta korroosion ja kerrostumien muodostumisen ehkäisemiseksi. (Koskelainen et al. 2006, 44.)

2.4. Kaukolämmön kustannukset

Kaukolämpötoiminnan kustannukset muodostuvat pääomakustannuksista, kiinteistä käyttö- ja hoitokuluista sekä muuttuvista kustannuksista. Suurin osa kustannuksista muodostuu tyypillisesti pääomakustannuksista, joihin lukeutuvat alku- sekä vuosittain tehtävät investoinnit. Pääomakustannuksiin sisältyy ohjelmistot, maa-alueet ja rakennukset, tuotannolliset koneet ja laitteet, kaukolämpöverkko, muut järjestelmän hallintaan liittyvät koneet ja laitteet sekä finanssisijoitukset, lainojen korot ja lyhennykset. (Koskelainen et al. 2006, 465)

Kiinteisiin käyttö- ja hoitokuluihin lukeutuvat ulkopuoliset palvelu- ja materiaalikulut, henkilöstö- ja palkkakulut, arvonalenemiset sekä vuokrat ja muut liiketoiminnan kulut. Muuttuviin kustannuksiin taas sisältyy lämmön ja polttoaineiden ostot, polttoaine- ja tuotantoverot, varastomuutokset, pumppaus- sekä muu omakäyttösähkö, lisäveden aiheuttamat kustannukset sekä päästöoikeudet. (Koskelainen et al. 2006, 465–466.)

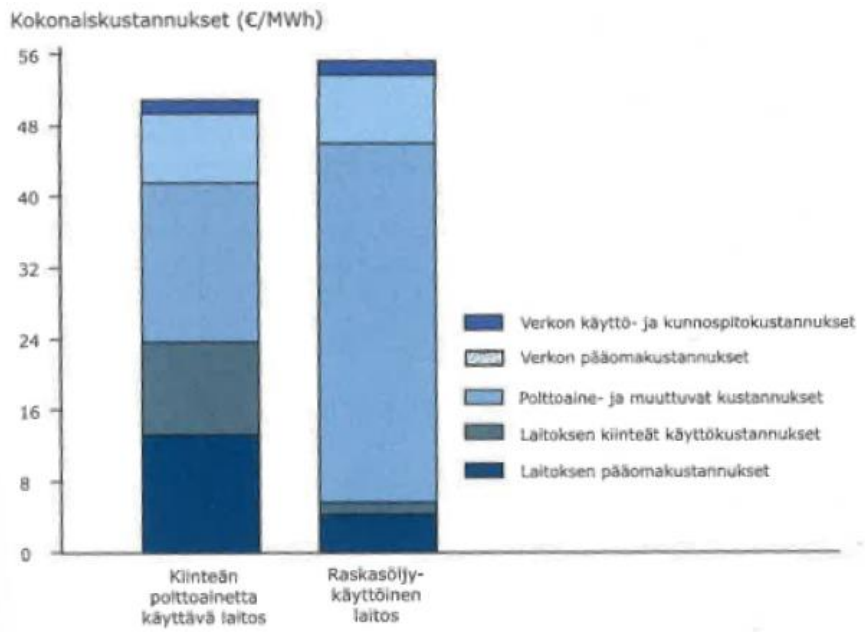
Päästöoikeuksien kasvaneet kustannukset näkyvät merkittävästi fossiilisia polttoaineita käyttävän energiantuotannon kustannuksissa, samalla lisäten päästöttömän kaukolämpötuotannon kilpailukykyä. Taustatekijänä päästöoikeuksien kasvaneeseen hintaan on EU:n päätös päästövähennyksiin sitoutumisesta. Päästöoikeuksien merkittävä kasvu viimevuosien aikana voidaan havaita alla olevasta kuvaajasta. (Energiateollisuus ry. 2022, 14)



Kuva 7. EU:n päästöoikeuksien hinnan kehitys, tallennettu 2.2.2022. (Sandbag 2022)

Pääomakustannukset määräytyvät tyypillisesti jo rakentamisvaiheessa, toisin kuin kiinteät ja muuttuvat kustannukset, joihin voidaan vaikuttaa myöhemmin asiantuntevalla käytöllä sekä oikeaoppisella kunnossapidolla. Kustannusten suuruuteen ja jakautumiseen vaikuttaa myös vuotuinen huipunkäyttöaika sekä kaukolämmön tuotannossa käytettävät polttoaineet. (Koskelainen et al. 2006, 467–468.)

Alla esitetyssä kuvaajassa on vertailtu kiinteää polttoainetta käyttävän laitoksen ja raskasta öljyä käyttävän laitoksen lämmöntuotannon kustannusten jakautumista.



Kuva 8. Esimerkki kustannusrakenteesta kiinteää polttoainetta ja raskasöljyä käyttäville laitoksille. (Koskelainen et al. 2006, 467)

Kiinteää polttoainetta käyttävän laitoksen pääomakustannus on esimerkissä 40 % tuotannon kokonaiskustannuksista, kun vastaava kustannus öljyä polttoaineena käyttävällä laitoksella on 10 %. Öljykäyttöisellä laitoksella polttoainekustannukset ovat taas kiinteää polttoainetta käyttävään laitokseen verrattuna merkittävästi suuremmat, noin 70 % kokonaiskustannuksista. (Koskelainen et al. 2006, 467.)

2.5. Kaukolämmön hinnoittelu

Kaukolämmön hinnoittelujärjestelmä perustuu Suomessa kolmeen komponenttiin, joita ovat liittymismaksu, perusmaksu sekä energiamaksu. Liittymismaksu on kertaluontoinen maksu, jonka kaukolämpöverkkoon liittyvä asiakas maksaa vain liittyessään. Liittymismaksulla voidaan yleensä kattaa suurin osa investointien pääomakustannuksista. (Koskelainen et al. 2006, 470–471.)

Perusmaksu perustuu kaukolämpöverkon asiakkaan liittymistehoon tai -vesivirtaan, ja sitä voidaan säätää kaukolämmön kilpailukyvyn ja toiminnan kannattavuuden edistämiseksi. Perusmaksulla voidaan yleisesti kattaa lämmönhankinnan kiinteät kustannukset, sekä muut

kustannukset, joita liittymis- ja energiamaksuilla ei pystytä kattamaan. (Koskelainen et al. 2006, 470–471.)

Energiamaksu taas määräytyy suoraan asiakkaan kuluttaman energiamäärän perusteella. Energiamaksun osuudella pyritään kattamaan lämmönhankinnan muuttuvat- sekä pumppauskustannukset. Asiakkaiden energiamaksut asetetaan tyypillisesti kustannuksia suuremmiksi, jonka avulla asiakkaiden energian käyttöä pyritään ohjaamaan järkevämmäksi. Suuremman energiakustannuksen avulla perusmaksua voidaan myös pienentää. (Koskelainen et al. 2006, 470–471.)

Kaukolämmön hinnoittelun tulee olla tasolla, jolla se pystyy turvaamaan yrityksen kilpailukyvyn, toiminnan kannattavuuden sekä -jatkuvuuden. Kilpailunrajoituslain mukaan kaukolämpöyhtiöllä on määräävä markkina-asema oman kaukolämpöverkkonsa asiakkaisiin, jonka perusteella kaukolämpötoimintaa ja hinnoittelua on säädelty. Hinnoittelun tulee olla pitkäjänteistä ja kustannuksiin perustuvaa, hintatason tulee olla asiakkaille kohtuullinen ja sen tulee ohjata energiankäyttöä. Asiakkaita tulee kohdella tasapuolisesti, energian kokonaistoimituksissa tuotteita ei saa keinotekoisesti yhdistää toisiinsa, ja mittauksen sekä laskutuksen on oltava luotettavaa. (Koskelainen et al. 2006, 470,472.)

Hinnoittelun ja täten toiminnan kannattavuuden kannalta merkittävää on myös lämmön tuotantotavat ja näiden keskinäinen jakautuminen, sillä toiminnan kannattavuus perustuu pääosin peruslämmön tuotantoon, joka toteutetaan tyypillisesti KPA-kattiloilla ja/tai CHP-laitoksissa. Huippulämmön tuotanto taas on tyypillisesti tappiollista tai nollakatteista toimintaa. (Valor Partners Oy 2015, 11.)

2.6. Kaukolämmön haasteet ja tulevaisuus

Suomen ja EU:n tavoitteet päästöjen vähentämisestä ja hiilineutraaliuudesta lisäävät tarvetta energia-alan muutoksille tulevaisuudessa. Suomen tavoite 55 % kasvihuonepäästöjen vähentämiseen vuoden 1990 tasolta vuoteen 2030 mennessä sekä EU:n tavoitteet uusiutuvan energian käytön osuuden kasvattamisesta 32 % sekä energiatehokkuuden lisäämisestä 32,5 % vuoden 1990 tasolta vuoteen 2030 mennessä lisäävät tarvetta toimintatapojen muutokselle. Muutosten tarve koskee myös kaukolämpötoimintaa, joka vastaa merkittävästä

osasta Suomen energiankäyttöä sekä päästöjä. (Valtioneuvosto 2019.) (European Commission 2018.)

Kaukolämpötoiminnan tehokkuutta ja päästöjen osuutta voidaan hallita toimintaa kehittämällä. Kaukolämpötoiminnan kehitysmahdollisuuksia ovat muun muassa kaukolämpöverkon lämpötilojen alentaminen, kaukojäähdytyksen laajempi hyödyntäminen, uudet lämpöenergialähteet, energianhallintajärjestelmät ja automaatio sekä kaukolämmön kysyntäjousto. (Koskelainen et al. 2006, 563.)

Kaukolämpöveden lämpötilan alentamisella voidaan lisätä sähköntuotantoa CHP-laitoksissa sekä parantaa lämmönsiirron ja -jakelun hyötysuhdetta. Jakelulämpötilaa voitaisiin laskea nykyisestä 115 ℃ tasosta esimerkiksi 90–100 ℃ tasolle ja paluulämpötilaa alentaa 30–35 ℃ tasolle, jolloin paluuvettä voitaisiin samalla hyödyntää kylmäkoneiden jäähdyttämiseen (Koskelainen et al. 2006, 563). Muutokset menoveden lämpötilaan ovat ajankohtaisia, sillä uuden energiateollisuuden kaukolämmitystä koskevan määräyksen mukaisesti kaukolämmön tuloveden lämpötila lasketaan 115 ℃ lämpötilasta 90 ℃ lämpötilaan vuoden 2022 aikana. (Energiateollisuus ry. 2021, 5.)

Yksi kehityskohde on kaukojäähdytyksen kehittäminen ja entistä laajempi hyödyntäminen. Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan kaukokylmän tuotantoa esimerkiksi vesistön, lämpöpumpun tai sähkökäyttöisten kompressorien avulla, joka siirretään loppukuluttajalle kaukojäähdytysverkon kautta kylmänä vetenä. Kaukojäähdytys voidaan integroida osaksi yhteistuotantoa ja täten parantaa energiahuollon tehokkuutta sekä taloudellisuutta. (Koskelainen et al. 2006, 563,565.)

Uusiutuvien energiamuotojen osuutta kaukolämpötuotannossa voidaan myös kasvattaa biomassan lisäyksen muodossa tai esimerkiksi integroimalla aurinko- tai geotermisiä lämpöenergiaratkaisuita osaksi kaukolämpöjärjestelmää. Muita mahdollisia ratkaisuja ovat jäteveden lämmöntalteenotto lämpöpumppujen avulla, muiden nykyisellään hyödyntämättömien hukkalämpövirtojen hyödyntäminen, sekä esimerkiksi tuulivoimasta peräisin olevan uusiutuvan sähkön käyttö kaukolämmön tuotannossa power-to-heat (PtH) laitoksissa. (IEA 2021.)

Yksi energiankäytön optimoinnin työkalu on kaukolämmön kysyntäjousto, joka mahdollistaa energiankäytön ajoituksen muuttamisen energiajärjestelmän kannalta optimaalisempaan ajankohtaan. Ajoituksen muuttamisella voidaan pienentää huipputehon

tuotantotarvetta, joka taas pienentää usein kalliita ja tyypillisesti fossiilisia polttoaineita käyttävien huippukattiloiden käyttöä. Kysyntäjoustolla voidaan myös saavuttaa energiatehokkuushyötyjä, päästövähennyksiä, optimoida sähköntuotantoa sekä saavuttaa mahdollista energiansäästöä (Valor Partners Oy 2015, 3). Kysyntäjoustoa pystytään myös hyödyntämään entistä tehokkaammin uusien automaattisten säätöjärjestelmien avulla, useisiin eri joustosignaaleihin perustuen. (Valor Partners Oy 2015, 21–23.)

Seuraavassa osuudessa perehdytään tarkemmin kaukolämmön kysyntäjouston toimintaan ja kysyntäjoustosta saavutettaviin hyötyihin sekä siihen liittyviin haasteisiin.

3. Kaukolämmön kysyntäjousto

Tämä kappale käsittelee kaukolämmön kysyntäjouston toimintaa, kysyntäjouston potentiaalia ja tarpeen muodostumista, toiminnan tavoitteita sekä siihen liittyviä hyötyjä ja haasteita. Myöhemmin esitellään myös erilaisia kysyntäjouston toteutustapoja ja ohjaussignaaleita, sekä paneudutaan aiheesta tehtyjen tutkimusten toteutustapoihin ja tuloksiin.

3.1. Kaukolämmön kysyntäjouston toimintaperiaate

Kaukolämmön kysyntäjoustolla tarkoitetaan ohjaustoimia, joilla voidaan vaikuttaa asiakkaan energiankäyttöön siten, että lämmöntarpeen ajoitusta voidaan siirtää energiajärjestelmän kannalta optimaalisempaan ajankohtaan. Kaukolämmön luonteesta johtuen lämmön kulutus vaihtelee suuresti vuoden- ja kellonajan mukaan, josta aiheutuva epätasainen kuormitus heikentää kaukolämpöjärjestelmän tehokkuutta ja lisää kustannuksia. Huipussaan kulutus on tyypillisesti talven aikana kovilla pakkasilla, sekä päivätasoa tarkastellessa aamulla, kun ilmanvaihdon lämmitysjärjestelmät käynnistyvät ja lämpimän käyttöveden tarve on suuri. Lämpimään käyttöveteen liittyvä päivätason kulutushuippu on havaittavissa myös iltapäivällä, jolloin ihmiset ovat palanneet töistä koteihinsa. Kaukolämmön kysyntäjouston ohjaustoimilla voidaan vaikuttaa kuormituksen ajalliseen jakautumiseen ja siten saavuttaa taloudellisia säästöjä sekä muita hyötyjä. (Valor Partners Oy 2015, 3.) (Koskelainen et al. 2006, 101.)

Lämmöntarpeen ajoituksen muuttamisella tarkoitetaan pääsääntöisesti kaukolämmöntarpeen kulutushuippujen siirtämistä toiselle ajankohdalle, jolloin tarvittava lämpöenergia voidaan tuottaa edullisemmin tai muutoin suuremman hyödyn mahdollistavalla tavalla. Säästöjä saadaan esimerkiksi silloin, kun kulutushuipun aikana lämpölaitoksessa kalliimmalla polttoaineella tuotettu lämpöenergia voidaan tuottaa edullisemmin toisena ajankohtana paremmalla hyötysuhteella peruslämpöä tuottavassa voimalaitoksessa. (Valor Partners Oy 2015, 3.)

Lämmöntarpeen ajallinen muuttaminen vaatii hetkellistä lämmön varastointia, jotta lämpöä pystytään käyttämään toisena ajankohtana. Jouston vaatimia varastointitapoja ovat erilliset lämpövarastot, itse kaukolämpöverkon käyttäminen lämpövarastona sekä lämmön varaaminen kiinteistöjen rakenteisiin ja järjestelmiin. Lämpöenergian varaaminen mahdollistaa joustamisen, eli lämmöntarpeen hetkellisen alentamisen kiinteistössä, jonka aikana kiinteistön kaukolämmön tarve voidaan täysin tai osittain korvata kiinteistöön varastoituneella lämpöenergialla. Kiinteistöä voidaan myös lämmittää ennakkoon tarkoituksenmukaisesti enemmän kuin on tarpeellista, jotta lämpöenergiaa varastoituu enemmän ja kaukolämpöä tarvitsee käyttää joustojakson aikana vähemmän kiinteistön lämmitykseen ja halutun minimilämpötilan ylläpitämiseen. (Guelpa E. & Verda V. 2021, 3.)

Käytännön keinoja kiinteistön hetkellisen lämpötehontarpeen alentamiselle ovat ilmanvaihdon rajoitus, lämpimän käyttöveden rajoitus sekä patteriverkoston kiertoveden lämpötilan alentaminen. Näistä keinoista ilmanvaihdon- ja lämpimän käyttöveden lämpöenergian käytön rajoitukset eivät usein ole kannattavia ratkaisuja, sillä ne vaikuttavat helposti negatiivisella tavalla asiakkaiden kokemaan palvelun laatuun. Kaukolämmön kysyntäjouston onnistuneelle toteutukselle on oleellista, että asiakkaiden kokema palvelun laatu ei heikkene kysyntäjoustotoimien takia (Valor Partners Oy 2015, 5). Myöskin patteriverkoston kiertoveden virtausmäärän rajoittaminen voi olla haitallista, sillä se voi aiheuttaa epätasaista lämmön jakautumista sekä patteriverkoston tasapainon heikentymistä. Yleisesti optimaalisin ratkaisu kiinteistön sisäisistä kysyntäjoustotoimista on lämpötehon alentaminen patteriverkoston kiertoveden lämpötilaa pienentämällä. (Valor Partners Oy 2015, 25.)

Patteriverkoston kiertoveden lämpötilan alentamisen lailla myös lattialämmityksen kiertoveden lämpötilaa voidaan alentaa samoin periaattein. Lattialämmitetyt rakennukset varaavat lämpöä paremmin, jonka takia kysyntäjoustojaksot voivat olla pidempiä, ilman että asiakkaiden kokema palvelun laatu heikkenisi. (Kärkkäinen et al. 2004, 44.) (Arteconi A. & Polonara F. 2018, 15.)

On myös huomattava, että kysyntäjoustolla ei suoranaisesti tarkoiteta energiansäästötoimia, sillä kysyntäjousto siirtää energiantarpeen ajankohtaa, mutta ei välttämättä aiheuta energian kulutuksen vähentymistä. (Valor Partners Oy 2015, 5.)

3.2. Kysyntäjouston tarve kaukolämpöverkossa

Kaukolämpötoiminnan kannattavuus pohjautuu peruskuormalaitosten käyttöasteen, energian tuotannon hyötysuhteen sekä käytettävyyden maksimointiin. Lisäksi kannattavuuteen suuresti vaikuttavana tekijänä on huipputuotannon ja muiden peruslämpöä tuottavia voimalaitoksia tuotantokustannuksiltaan kalliimpien voima/lämpölaitosten käytön minimointi sekä kaukolämpöverkon optimaalinen kuormittaminen, eli tasapainoinen kaukolämpöverkko. Edellä mainittuihin olennaisimpiin kannattavuuskriteereihin voidaan vaikuttaa toimintaa edistävästi kaukolämmön kysyntäjouston avulla. (Valor Partners Oy 2015, 11–12.)

Kaukolämmön kysyntäjouston tavoitteena on siirtää kulutushuippuja, ja siten tasata kaukolämmön energiantarvetta ajallisesti, jotta kaukolämpöjärjestelmää voidaan ajaa kokonaisuutena tehokkaammin. Tarve kuormituksen tasoittamiselle syntyy muuttuvasta lämmöntarpeesta, joka vaihtelee vahvasti vuorokauden- ja vuodenajasta riippuen. Erot kaukolämmön tarpeessa ovat merkittäviä eri viikkojen, kuukausien sekä myös vuosien välillä, johtuen muun muassa erilaisista sääolosuhteista. On myös huomioitavaa, että hetkellisen kaukolämmöntarpeen vaihtelut ovat voimakkaampia kuin vaihtelut viikko- tai kuukausitasolla. (Koskelainen et al. 2006, 41.) (Valor Partners Oy 2015, 9,13.)

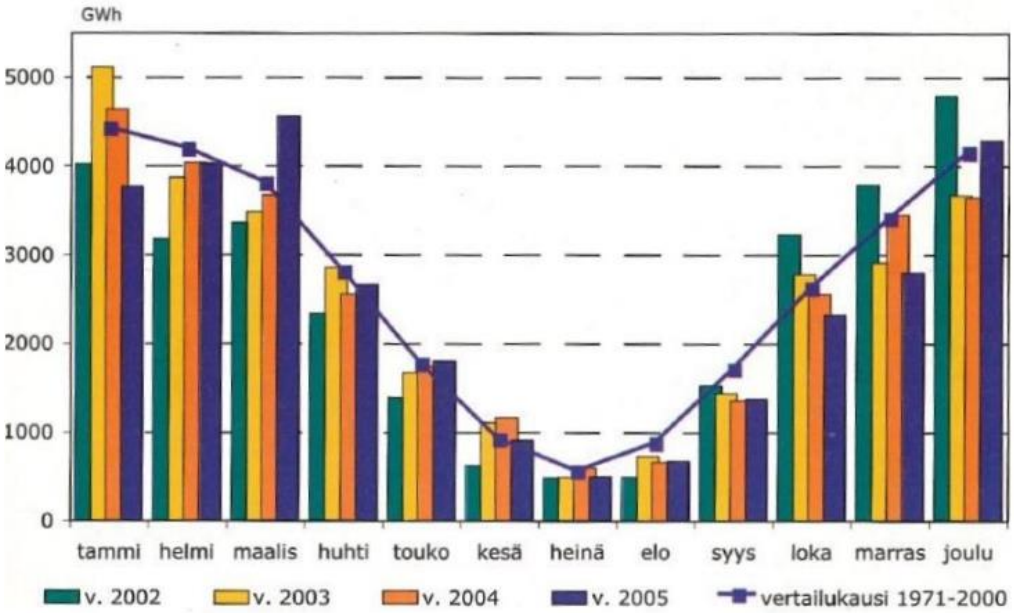
Vaihteluina viikkotasolla voidaan usein havaita kulutuksen pienentymistä viikonloppujen ajalta. Yöaikana kaukolämmön kulutus on usein myös pienempää sisälämpötilojen alentamisesta johtuen. (Koskelainen et al. 2006, 42.)

Lämmöntarpeen vaihteluun vaikuttaa suuresti myös kaukolämpöverkon asiakastyyppien jakauma, sillä lämmöntarpeen vaihtelut asuinrakennusten ja erilaisten julkisten rakennusten sekä teollisuuden rakennusten välillä ovat suuria. Rakennusten ominaisuuksien lisäksi lämmöntarpeen vaihteluihin vaikuttaa merkittävästi rakennuksessa tapahtuva toiminta ja kaukolämpöverkon kyky varastoida lämpöä hetkellisesti. (Valor Partners Oy 2015, 9,13.)

Kaukolämpöverkon asiakkaiden kaukolämmön tarve voidaan esimerkiksi jakaa neljään erilaiseen kulutusprofiiliin, jotka vastaavat tyypillisten kaukolämpöverkossa olevien erilaisten kiinteistöjen kulutusta. Tyypilliset kulutusprofiilit vaihtelevat kiinteistön tyypin ja käyttötavan perusteella, ja ne voidaan jakaa asuinrakennuksiin sekä eri energiansäästötoimia hyödyntäviin julkisiin kiinteistöihin. (Gadd & Werner 2013, 178.)

3.2.1. Vuodenaikojen ja sään vaikutus

Vuodenajoilla on myös suuri vaikutus kaukolämmön tarpeeseen, josta johtuen vuodenajasta riippuvaiset energiatarpeen muutokset on myös huomioitava osana kaukolämmön tarpeen vaihteluväliä. Kuukausi- ja vuosikohtaiset kaukolämmön kulutuksen erot voidaan nähdä koottuna alla olevasta kuvasta. Kuvan data pohjautuu kaukolämmön kulutusvaihteluun Suomessa. (Koskelainen et al. 2006, 41.)



Kuva 9. Kaukolämmön kulutusvaihtelu Suomessa kuukausi- ja vuositasolla. (Koskelainen et al. 2006, 41)

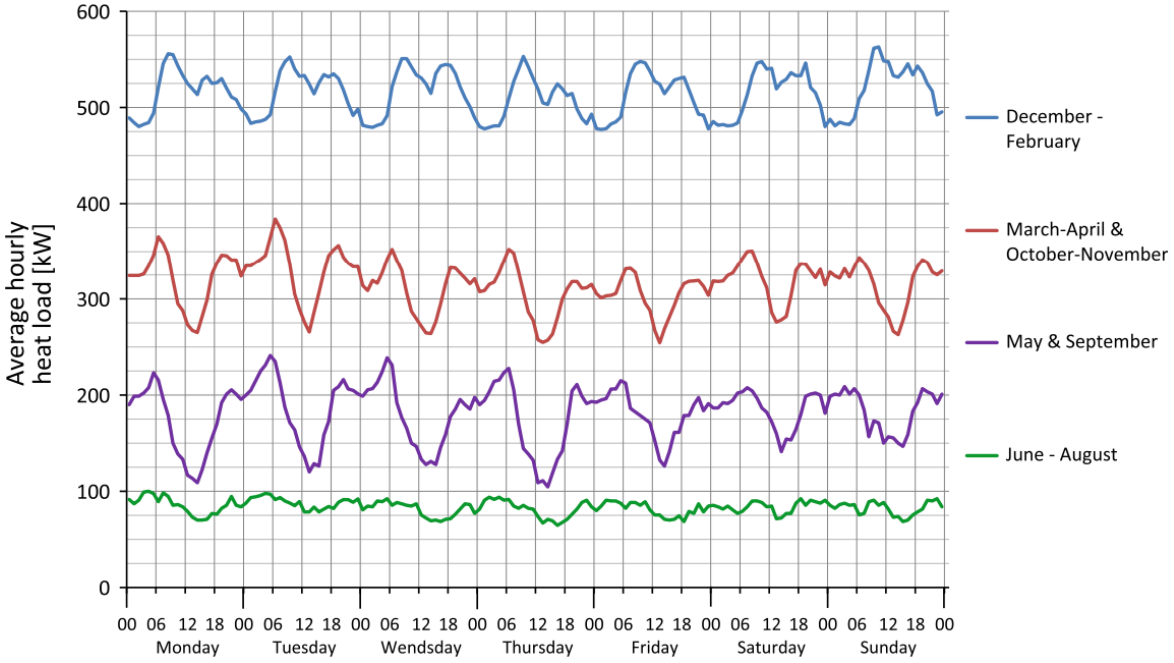
Lämpötilan pitkäaikaisvaihteluiden lisäksi kaukolämmön kulutukseen vaikuttaa hetkellinen sääolosuhteiden vaihtelu, kuten ulkolämpötila, pilvisyys ja tuulisuus. Suurin vaikutus kaukolämmön kulutukseen on ulkolämpötilan vaihtelulla, joka on satunnaista, ja jonka vaihteluväli voi olla suuri. (Koskelainen et al. 2006, 383.)

3.2.2. Asuinrakennusten vaikutus

Tyypillisesti asuinrakennuksissa, sekä osassa terveys- ja sosiaalipalvelukäytössä olevista rakennuksista kulutusprofiili on verrattain tasainen, sillä kyseisten kiinteistöjen lämmitys on jatkuvaa, eikä niihin kohdistu kulutusvaihteluita aiheuttavia energiansäästötoimia. (Gadd & Werner 2013, 178.)

Asuinrakennusten kaukolämmön tarpeen vaihteluväli ei yleisellä tasolla ole suurta, ja suurimmat vaihtelut tapahtuvat kulutuspiikkien aikana, jotka ajoittuvat aamulle sekä illalle, jolloin lämpimän käyttöveden kulutus on suurinta. Vuositasolla suurimmat vaihtelut painottuvat kevään ja syksyn ajalle, jolloin vaihtelut ulkolämpötilassa ovat suurimpia. (Valor Partners Oy 2015, 9.)

Alla olevasta kuvasta nähdään tyypillisen kerrostalon kaukolämmöntarpeen vaihtelut päivä- ja viikkotasolla eri vuodenaikoina. Data on kerätty vuoden 2010 ajalta ruotsissa sijaitsevasta kaukolämpöjärjestelmästä, jonka otannassa on mukana 141 eri kiinteistöä. (Gadd & Werner 2013, 177.)



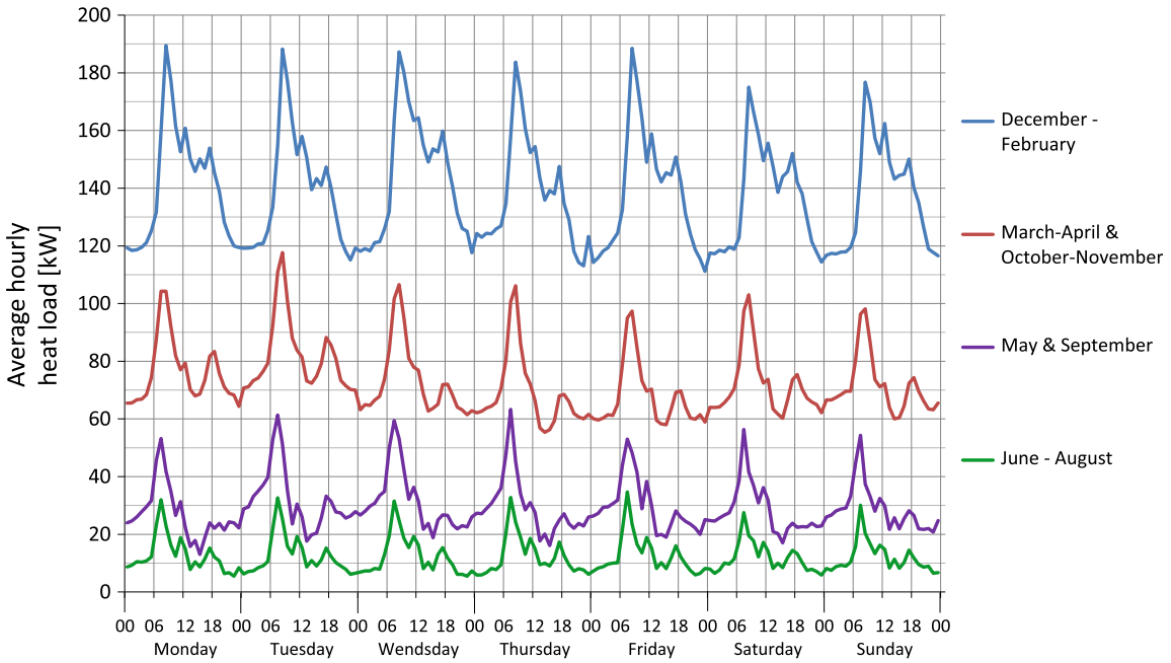
Kuva 10. Tyypillisen kerrostalon kaukolämpötarpeen vaihtelut viikonpäivästä, vuorokauden- sekä vuodenajasta riippuen. (Gadd & Werner 2013, 179)

3.2.3. Julkisten kiinteistöjen vaikutus

Julkisissa rakennuksissa, joihin sisältyvät tässä tarkastelussa myös teollisuus- ja liikerakennukset, lämmöntarpeen vaihtelu päivä- ja viikkotasolla on huomattavasti suurempaa kuin asuinrakennuksissa. Vaihteluun vaikuttaa suurimmalta osalta energiansäästötoimet, joiden takia kulutus on välillä hyvin alhaista ja lämmitysjärjestelmien käynnistyessä taas korkeaa. Energiansäästöön käytettävät tavat riippuvat suoraan kiinteistön käyttötavasta, ja siten painottuvat eri vuorokauden ja viikon ajankohdille käyttötavasta riippuen. (Gadd & Werner 2013, 178–180.)

Yöajan energiasäästöä hyödyntävissä kiinteistöissä kaukolämmön kulutus pienenee merkittävästi yön ajaksi, jolloin kiinteistön jatkuvaa lämmitystä vähennetään alentamalla kiinteistön sisälämpötilaa. Kiinteistö, jossa tällaista energiansäästötapaa käytetään voi esimerkiksi olla julkinen kiinteistö, jossa ei asioida tai oleskella yön aikana paljoa tai ollenkaan. Kyseinen energiansäästötoimenpide kuitenkin aiheuttaa kulutuspiikin aamuille, jolloin lämmitys otetaan takaisin täystehoisesti käyttöön. (Gadd & Werner 2013, 178.)

Nykyisellään rakennusten parantunut lämpöeristys ja ilmatiiviys kuitenkin rajoittavat tämän energiasäästökeinon hyötypotentiaalia. Alapuolella esitetyssä kuvassa on vuoden 2010 ajalta kerätystä ruotsissa sijaitsevan kaukolämpöjärjestelmän datasta laadittu kuvaaja yöajan energiasäästöä käyttävän rakennuksen kaukolämpötarpeen vaihtelusta. (Gadd & Werner 2013, 178.)

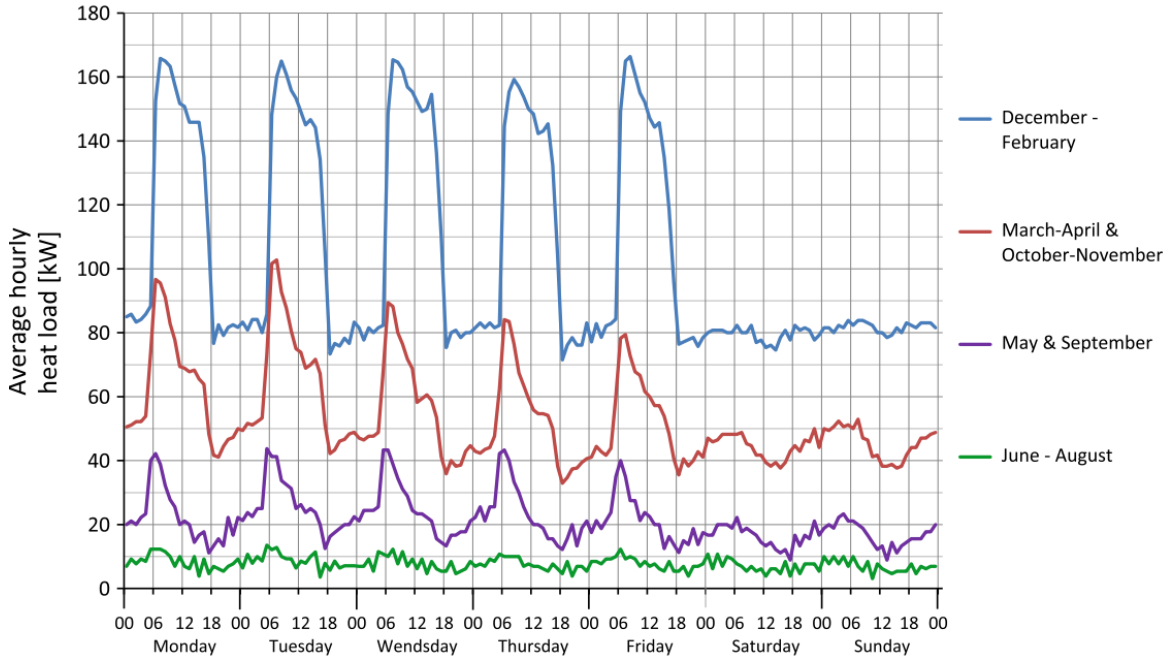


Kuva 11. Yöajan energiansäästöä käyttävän julkisen rakennuksen kaukolämpötarpeen vaihtelut viikonpäivästä, vuorokauden- sekä vuodenajasta riippuen. (Gadd & Werner 2013, 179)

Energiansäästötoimia voidaan toteuttaa myös rajoittamalla ilmanvaihtoa ja siten ilmanvaihdon käyttämää lämpöenergian määrää riippuen kiinteistön käyttöajoista ja tavasta. (Gadd & Werner 2013, 179–180.)

Ilmanvaihdon sulkeminen tai rajoittaminen arkiviikon ulkopuoliseksi ajaksi, eli viikonlopun ajaksi voidaan toteuttaa kiinteistöissä, joissa ei käydä tai oleskella viikonlopun aikana. Esimerkki tällaisesta kiinteistöstä on koulu. Tällöin järjestelmä rajoittaa tai sulkee ilmastoinnin kokonaan öiden sekä viikonlopun ajaksi, aiheuttaen lämmönkulutuksen vaihtelua. (Gadd & Werner 2013, 179–180.)

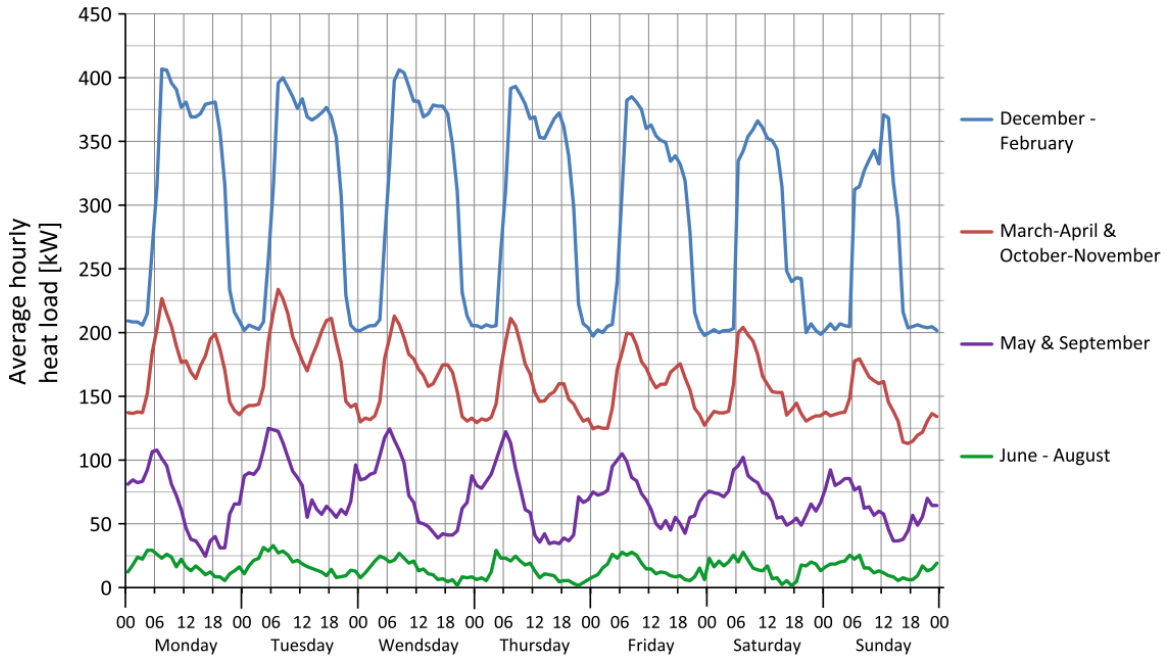
Esimerkkikuvaaja arkikäytössä olevan ilmanvaihtoa energiasäästötoimina rajoittavan kiinteistön kaukolämpötarpeen vaihteluista on esitelty alapuolella. Data on kerätty vuoden 2010 ajalta ruotsissa sijaitsevasta kaukolämpöjärjestelmästä.



Kuva 12. Vain arkikäytössä olevan ilmanvaihtoa rajoittavan julkisen rakennuksen kaukolämpötarpeen vaihtelut viikonpäivästä, vuorokauden- sekä vuodenajasta riippuen. (Gadd & Werner 2013, 179)

Saman energiasäästötoimen ilmastointia rajoittamalla tai pysäyttämällä voi myös toteuttaa kiinteistöissä, jotka ovat toiminnassa viikon jokaisena päivänä. Tällöin ilmanvaihdon rajoitus tapahtuu joka vuorokausi yöaikaan, kun kiinteistöllä ei ole käyttöä. Esimerkki tällaisesta kiinteistöstä on kauppakeskus. (Gadd & Werner 2013, 179.)

Esimerkkikuvaaja aikaisemmin esitellystä datasta koko viikon käytössä olevan ilmanvaihtoa energiasäästötoimina rajoittavan kiinteistön kaukolämpötarpeen vaihteluista on esitelty alapuolella.



Kuva 13. Energiansäästötoimena ilmanvaihtoa rajoittavan julkisen rakennuksen kaukolämpötarpeen vaihtelut viikonpäivästä, vuorokauden- sekä vuodenajasta riippuen. (Gadd & Werner 2013, 179)

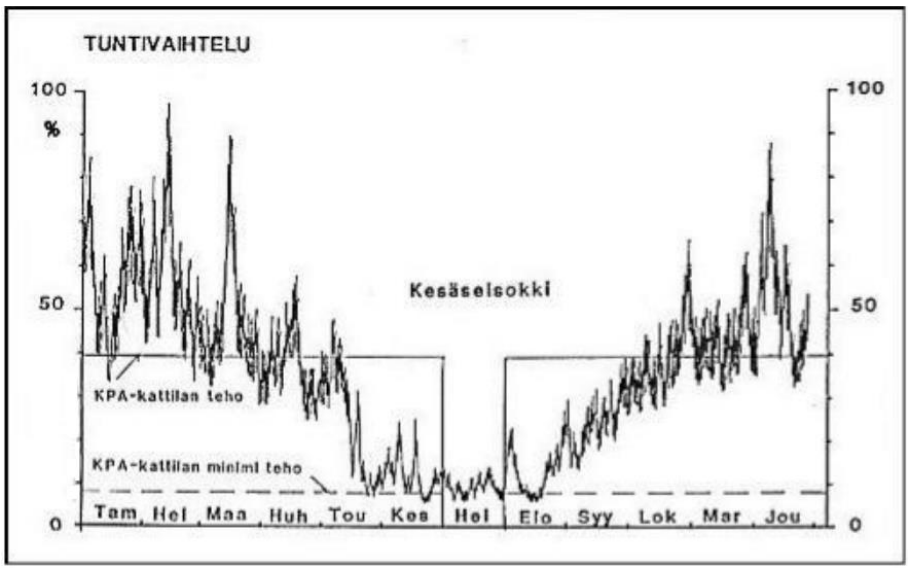
Kuvaajista voidaan myös havaita vuodenajasta riippuvaiset kulutusvaihteluiden keskinäiset erot. Tunti- ja päivätason vaihtelut ovat suurimpia, kun lämmönkulutus on myös kokonaisuudessaan suurimmillaan talvikuukausien aikana. Pienimpiä kulutusvaihtelut ovat taas kesäkuukausien aikana, jolloin lämpötarve on muutoinkin pieni.

3.2.4. Kulutusvaihteluiden kokonaisvaikutus

Kaukolämpöjärjestelmän tehon kokonaisvaihtelut ovat pienempiä kuin yksittäisten asiakkaiden kaukolämmöntarpeen vaihtelut, sillä asiakastyypistä riippuvaiset kulutushuiput ajoittuvat usein eri ajankohdille ja eri asiakastyyppien kulutusprofiilit ovat usein hyvinkin erilaisia. Samalla tavalla myös koko kaukolämpöjärjestelmän hetkelliset tehontarpeen vaihtelut ovat huomattavasti suurempia kuukausitason vaihteluihin verrattuna, joiden sisällä hetkelliset kulutushuiput ja alhaisen kulutuksen hetket tasoittuvat. (Koskelainen et al. 2006, 41–42.) (Valor Partners Oy 2015, 10.)

Lämpökuormituksen vaihtelua tasoittaa myös mahdollisesti käytössä olevat lämpövarastot tai kaukolämpöverkon hyödyntäminen lämmönvaraajana, joita hyödyntäen lämpöä voidaan tuottaa ja varastoida ennakoivasti halvemman rajakustannuksen aikana ja purkaa kalliimman kustannuksen aikana. (Koskelainen et al. 2006, 383, 389.)

Esimerkki kaukolämpötehon tarpeen tuntivaihteluista vuositasolla on esitetty alla olevassa kuvaajassa.

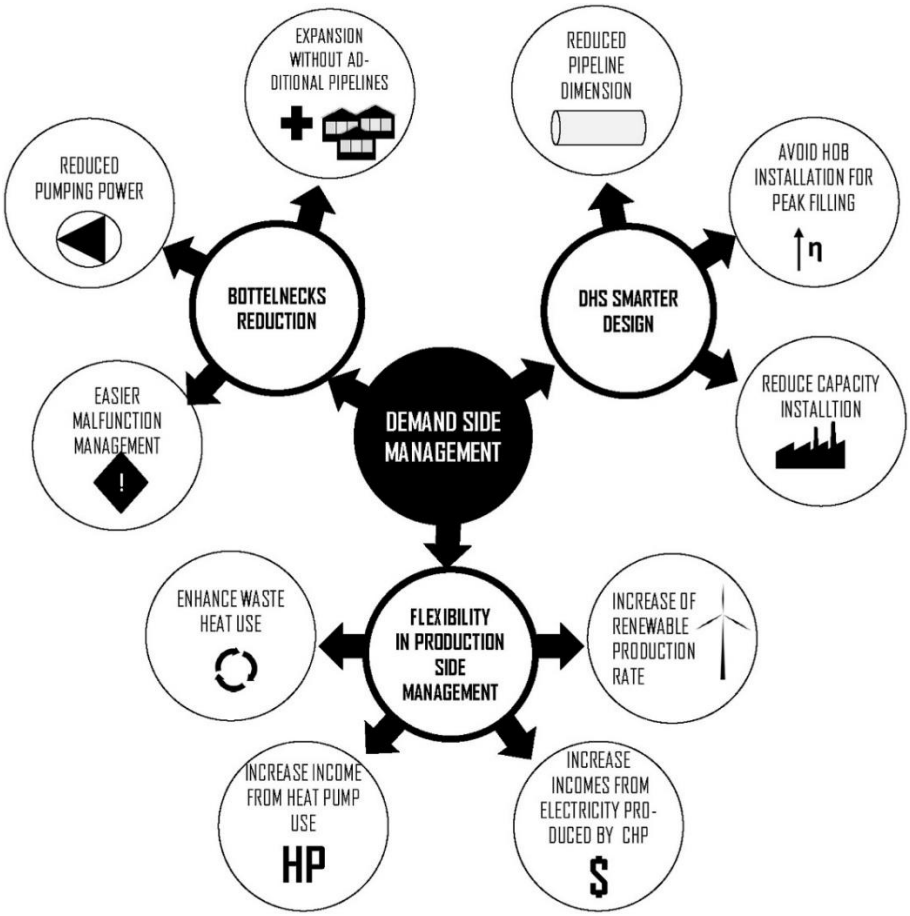


Kuva 14. Kaukolämmöntarpeen vaihtelukäyrä vuoden ajalta. (Koskelainen et al. 2006, 42)

Koko kaukolämpöjärjestelmän tasoa tarkastellessa huomattavia vaihteluita voidaan havaita aiheuttavan aamu- sekä iltahuiput, jotka johtuvat suurentuneesta lämpimän käyttöveden kulutuksesta sekä ilmanvaihtolaitteistojen käynnistymisestä. Suuret ulkolämpötilan vaihtelut kevään ja syksyn aikana aiheuttavat myös merkittävää lämmöntarpeen vaihtelua ja kulutuksen pienentymistä keskipäivän aikaan, johtuen hetkellisesti kohonneesta ulkolämpötilasta ja auringonpaisteen aiheuttamasta lämmityksestä. (Valor Partners Oy 2015, 10.)

3.3. Kaukolämmön kysyntäjouston hyödyt ja mahdollisuudet

Kaukolämmön kysyntäjouston avulla pystytään saavuttamaan useita eri hyötyjä kaukolämpötoimijalle sekä loppuasiakkaalle. Kaukolämmön kysyntäjouston potentiaalisia hyötyjä on esiteltynä kategorioittain alla olevassa kuvassa 15.



Kuva 15. Kysyntäjouston potentiaalisia hyötyjä kaukolämpötoimijalle. (Guelpa E. & Verda V. 2021, 4)

Kysyntäjouston hyödyt kaukolämpötoimijalle voivat esimerkiksi olla huipputuotannon määrän vähentäminen ja peruslämmön määrän lisääminen ja siten tuotanto- ja polttoainekustannusten minimointi. Hyötyihin kuuluu myös voimalaitosten käyttöasteen parantaminen ja optimaalisempi lämmön tuotanto ajettaessa voimalaitoksia lähellä nimellistehoa, voimalaitosten ylös- sekä alasajojen määrän vähentyminen sekä alhaisemmat

investointikulut kysyntäjouston mahdollistaman tehokkaamman kaukolämpöjärjestelmän käytön myötä. Kysyntäjouston avulla voidaan myös optimoida CHP-laitosten sähkön tuotannon ajoitusta sähkön hintasignaalin perusteella kalliin sähkön ajalle ja korvata tai lykätä verkon kapasiteetin lisäämiseksi vaadittavia investointeja, jonka mahdollistaa kaukolämpöverkon putkistojen tehokkaampi hyödyntäminen sekä jouston avulla saavutettujen kulutus- ja virtaushuippujen pienennykset. (Kärkkäinen et al. 2004, 64.) (Valor Partners Oy 2015, 13–15.)

Kaukolämmön kysyntäjouston tavoitteisiin ja niistä saataviin hyötyihin lukeutuu myös ympäristöhaittojen ehkäiseminen, mahdollinen energiansäästö, strateginen kulutuksen kasvattaminen sekä lämpöenergian tuotanto varastoon ennen huipputehon tarvetta, osana kulutushuippujen leikkaamista (Koskelainen et al. 2006, 101). Kysyntäjouston avulla voidaan myös pienentää tarvittavaa pumppaustehoa ja hyödyntää paremmin hukkalämpövirtoja sekä lämpöpumppuja osana kaukolämpöjärjestelmää (Guelpa E. & Verda V. 2021, 4). Kaukolämmön kysyntäjousto voi hyödyttää myös kaukolämpöasiakasta usealla eri tavalla (Valor Partners Oy 2015, 14).

Kysyntäjoustosta saadut hyödyt ovat hyvin kaukolämpöverkkokohtaisia, ja järjestelmäkohtaisten erojen takia hyötyjä ja niiden potentiaalia ei voida yleistää kaikkiin kaukolämpöjärjestelmiin. Aiemmin esitellyn kaukolämpöverkon kulutusprofiilin lisäksi kysyntäjouston potentiaaliin vaikuttaa muun muassa myös kaukolämpöverkon rakenne ja lämmön varastointikyky, tulevien tarvittavien laajennusten ja investointien määrä sekä kaukolämmön tuotantorakenne. (Valor Partners Oy 2015, 13.)

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin kahta kaukolämpötoiminnan taloudelliselta kannalta merkittävää joustolla saavutettavaa hyötyä, joita ovat lämmön- sekä sähköntuotannon optimointi kysyntäjouston avulla.

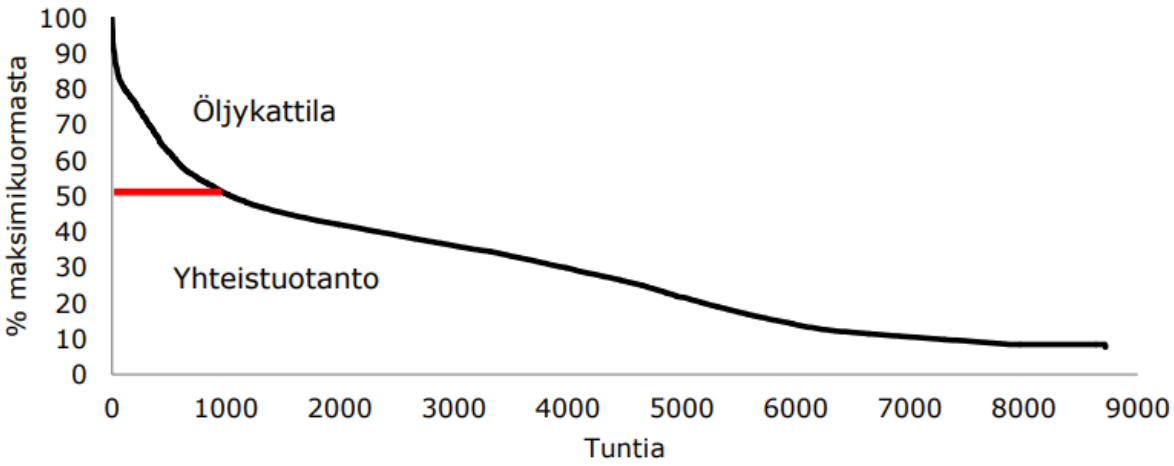
3.3.1. Lämmöntuotannon optimointi

Aikaisemmin mainitun kaukolämpöjärjestelmän lämmöntarpeen vaihtelun takia kaukolämpöä tuotetaan tyypillisesti isommilla laitoksilla peruslämpönä, sekä pienemmillä lämpökeskuksilla tuotettuna huippulämpönä, silloin kun lämmöntarve ylittää peruslämmön senhetkisen tuotantokapasiteetin. Kaukolämpötoiminnan kannalta optimaalisin tapa on

tuottaa peruslämpöä suurempikokoisilla CHP-laitoksilla ja/tai KPA-kattiloilla, joille tyypillistä on suuret investointikustannukset, mutta alhaisemmat käyttökustannukset lämpökeskuksilla tuotettuun huippulämpöön verrattuna. Peruslämpöä tuottavat laitokset pääsevät tyypillisesti parhaisiin hyötysuhteisiin ja siten taloudelliseen kannattavuuteen, kun laitoksia voidaan ajaa jatkuvasti täydellä teholla, ilman tehomuutoksia. (Valor Partners Oy 2015, 11.)

Huippulämpö tuotetaan tyypillisesti lämpökeskuksilla, joissa lämmön tuottaminen on yleensä tappiollista tai nollakatteista liiketoimintaa. Syynä tälle on lämpökeskuksissa käytetyt polttoaineet, jotka ovat tyypillisesti kalliimpia fossiilisia polttoaineita, kuten esimerkiksi kevyttä polttoöljyä. (Valor Partners Oy 2015, 11.)

Alla esitetty kuvaaja on esimerkki keskisuuren kaukolämpöjärjestelmän pysyvyyskäyrästä. Kuvaajasta nähdään kuorman tason vaikutus käytettyyn kaukolämmön tuotantotapaan vuoden tuntien aikana.



Kuva 16. Esimerkki kaukolämmön pysyvyyskäyrästä. (Valor Partners Oy 2015, 11)

Kysyntäjoustolla voidaan mahdollistaa kaukolämpöjärjestelmän joustaminen, jolloin lämpökeskuksilla tuotetun kalliimman lämmön määrää voidaan vähentää ja paremmalla hyötysuhteella ja kannattavuudella tuotetun peruslämmön määrää lisätä. Samalla huippulämpötarvetta vähentämällä voidaan maksimoida täydellä teholla ajetun laitoksen käyntiaikaa ja vähentää voimalaitosten käynnistyksien sekä alasajojen lukumäärää. (Valor Partners Oy 2015, 11,14.)

3.3.2. Sähköntuotannon optimointi

Kaukolämmön kysyntäjousto mahdollistaa myös sähköntuotannon optimoinnin, silloin kun kaukolämpöjärjestelmän lämpöä tuotetaan täysin tai osittain CHP-laitoksilla, eli lämmön- ja sähkön yhteistuotantona. (Valor Partners Oy 2015, 14)

Joustopotentiaalin ansioista lämmöntuotantoa voidaan ohjailla sähkön hinnan perusteella normaalin lämmöntarpeeseen pohjautuvan indikaattorin sijasta, siten että kalliin sähkön aikana sähköntuotantoa voidaan lisätä ja lämmöntuotantoa pienentää, ja täten tehdä yhteistuotannosta kokonaisuudessa taloudellisesti kannattavampaa. Taloudelliset hyödyt pystytään saavuttamaan parhaiten yhteistuotannossa silloin, kun yhteistuotantosähköä pystytään tuottamaan enemmän niinä hetkinä, kun kysyntä on suurinta ja tuotannon hinta on edullisempi kuin erillistuotannon hinta. (Koskelainen et al. 2006, 103.) (Valor Partners Oy 2015, 14–15.)

Kysyntäjouston avulla voidaan myös rajoittaa suurien lämpökuormien muodostumista, jotka aiheuttavat CHP-laitosten sähköntuotannon joustavuuden heikkenemistä (Guelpa E. & Verda V. 2021, 2). Jousto mahdollistaa myös lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden käytön ajoittamisen edullisen sähkön hinnan ajaksi. (Valor Partners Oy 2015, 15.)

3.3.3. Kaukolämmön kysyntäjouston hyötypotentiaali

Kysyntäjoustosta saatuihin hyötyihin vaikuttaa suuresti kyseisen kaukolämpöjärjestelmän ominaisuudet. Hyötypotentiaali on yleisesti suurimmillaan, kun järjestelmän eri lämmöntuotantolaitoksien lämmön tuotannon hintaerot ovat suuria ja lämmön varastointimahdollisuudet kaukolämpöverkossa ovat heikkoja. Potentiaalia parantaa myös tiukkaan mitoitetut voimalaitokset, joista johtuen jouston avulla voitaisiin mahdollisesti pienentää huipputuotantolaitosten ylös- ja alasajojen määrää. Muita kysyntäjouston potentiaaliin vaikuttavia tekijöitä on esitelty alla olevassa kuvassa. (Valor Partners Oy 2015, 16.)

Hyötypotentiaalia kasvattavia tekijöitä

- Huonot lämmön varastointimahdollisuudet
- Suuret erot eri lämmöntuotanto-laitoksilla tuotetun lämmön hinnassa
- Lämpökuorman suhteen niukasti mitoitetut voimalaitokset
- Tarjolla saatavuudeltaan vaihtelevaa teollisuuden ylijäämälämpöä 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 mitoitetut voimalaitokset
- Tarjolla runsaasti yhteistoimintaan perustuvaa kiinteää lämmöntoimitusta
- Suuri kuormitustiheys
- Väljästi mitoitettu kaukolämpöverkko

Kuva 17. Kaukolämmön kysyntäjouston hyötypotentiaaliin vaikuttavia kaukolämpöverkkokohtaisia tekijöitä. (Valor Partners Oy 2015, 17)

Kysyntäjouston potentiaalia lisää myös Suomalaisen rakennuskannan hyvä lämmönvarastointikyky, johon vaikuttaa Suomessa suuressa osassa rakennuksista materiaalina käytetyn betonin tehokkuus lämmön sitomisessa. Yhteisvaikutuksena suomalaisten rakennusten lämmön varastointikyky, hyvä eristys sekä poistoilman lämmöntalteenotto lisäävät kysyntäjouston hyödyntämisen mahdollisuuksia. Kysyntäjousto voi myös toimia lämpöakkujen rinnalla kaukolämpöjärjestelmän optimointimahdollisuuksien lisäämiseksi (Pesola et al. 2011, 29). Kysyntäjousto voi olla pelkkään lämpöakkuun verrattuna parempi jouston toteutusratkaisu, kun kaukolämpöverkossa on pullonkauloja ja verkko on hajanainen. Kysyntäjoustolla pystytään myös kohdistamaan joustoa maantieteellisesti tarkasti, joka on taas lämpöakkua käyttäen vaikeampaa. (Valor Partners Oy 2015, 16.)

Kysyntäjouston käytännön hyöty nykyisten kokemusten perusteella ja nykyratkaisuja käyttämällä on arvioitu olevan noin 1–3 % alhaisemmat kaukolämmön tuotantokustannukset kaukolämpöjärjestelmästä riippuen. Teoriassa kysyntäjouston hyöty voisi tulevaisuudessa olla merkittävästi isompi, kuten esimerkiksi 5–25 % säästö kaukolämmön tuotantokustannuksista Valor Partners Oy:n (2015, 19) tekemän simuloinnin perusteella. Tällaiseen maksimihyötyyn pääseminen ei ole kuitenkaan nykyisellään käytännössä mahdollista. (Valor Partners Oy 2015, 19.)

Myös Aalto Yliopiston tutkimuksen simulaatioiden mukaan tuotantokustannusten pienentyminen kaukolämmön kysyntäjoustoa hyödyntäen oli alle 2 %, ja se jakautui suurimmalta osin keskitehoisille kuormille, eikä huipputehoissa havaittu suuria alenemia. Simulaatio pyrki saamaan laajan kuvan kysyntäjouston vaikutuksista eri kysyntäjoustostrategioiden ja vaihtelevien asiakastyyppien perusteella. (Kontu et al. 2018, 12–13) Romanchenko et al. (2018) tutkimuksessa tuloksiksi taas saatiin 1 % alentuneet lämmön tuotantokustannukset (Romanchenko et al. 2018).

3.3.4. Hyödyt kaukolämpöasiakkaalle

Kaukolämpöasiakkaan kysyntäjoustosta saamat hyödyt ovat esimerkiksi alhaisemmat energia- ja lämmityskulut sekä kuluttajaa koskevien palveluiden kehittyminen uusien kaukolämpötoiminnan liiketoimintamallien mukana. (Valor Partners Oy 2015, 14)

Asiakkaan käyttökustannuksia voidaan pienentää esimerkiksi alhaisempien lämpöhäviöiden ja pumppauksen energiankäytön pienentymisen myötä. Energiakustannukset voivat taas alentua, jos asiakas pystyy pienentämään kulutustaan ja/tai siirtämään energiankulutustaan halvemman jakson ajalle, esimerkiksi tariffihinnoitteluun perustuen. (Kärkkäinen et al. 2004, 65.)

Tariffeihin perustuvassa kaukolämmön kysyntäjoustossa asiakas voi itse päättää kysyntäjoustoon osallistumisesta, johon asiakasta houkutellaan saavutettavien säästöjen avulla. Tariffit voivat perustua esimerkiksi huipputehon tarpeeseen, energian hinnan aikaperusteiseen vaihteluun tai kaukolämpötoimijan tuotannon dynaamiseen hinnoitteluun. Kaukolämpöyhtiön ohjaamassa kysyntäjoustossa asiakkaan saama säästö voi muodostua esimerkiksi alhaisemmista kiinteistä kuluista, joihin asiakas on oikeutettu hyväksyttyään sopimuksen laitteistonsa osallistumisesta kaukolämpöyhtiön ohjaamaan kysyntäjoustoon. (Kärkkäinen et al. 2004, 66.)

3.4. Kaukolämmön kysyntäjouston uhkat ja haasteet

Kysyntäjouston käyttöönottoon sekä hyödyntämiseen osana kaukolämpötoimintaa liittyy saatavien hyötyjen lisäksi myös haasteita. Haasteet liittyvät pääosin kaukolämpöjärjestelmän vaikeampaan hallittavuuteen, ennakoitavuuteen ja lämmityksen pitkiin aikavakioihin. Ennusteiden epäonnistuessa kiinteistöt voivat käyttäytyä oletettua erilaisemmin, johon syynä voi esimerkiksi olla yllättävät sääolosuhteet, asukkaiden toimenpiteet tai sekundääristen lämmitysmuotojen käyttö. Ennalta-arvaamattomuus taas vaikuttaa negatiivisesti kaukolämpöjärjestelmän kysyntäjouston potentiaaliin. (Valor Partners Oy 2015, 15, 20.)

Yhtenä kaukolämmön kysyntäjouston haasteena ovat tarvittavat tekniset valmiudet, ja näiden vaihtelut kaukolämpöverkon sisällä sekä eri kaukolämpöverkkojen välillä. Vanhojen rakennusten talotekniikkaa voidaan joutua uusimaan, jotta kysyntäjouston kannalta oleellinen kaukolämpöjärjestelmän etäohjaus voidaan suorittaa. Tämä tarkoittaa usein suuria lisäinvestointeja asiakkaalle. (Valor Partners Oy 2015, 20.)

Kysyntäjouston haasteena on myös varmistaa, etteivät joustotoimet aiheuta negatiivista kysyntäjoustoa. Negatiivisella kysyntäjoustolla tarkoitetaan tilannetta, jossa kysyntäjouston piirissä oleva rakennusmassa käyttäytyy saman ohjausalgoritmin perusteella täysin samanlaisesti ja samaan aikaan, eli rakennusmassa ylireagoi tarvittavan jouston ohjaussignaaliin. Ylireagointi voi aiheuttaa tilanteen, jossa rakennusmassa osallistuu kysyntäjoustoon samanaikaisesti, ja myös lopettaa lämmitystehon rajoitukset samanaikaisesti, aiheuttaen jopa alkuperäistä suuremman tehopiikin, mutta vain toiselle ajankohdalle. Järjestelmä täytyy toteuttaa siten, ettei käytettävä ohjausmekanismi aiheuta edellä mainittua negatiivista kysyntäjoustoa, esimerkiksi kohdentamalla kysyntäjoustotoimia asiakas- tai aluekohtaisesti. (Valor Partners Oy 2015, 20.)

Kysyntäjouston toteutuksessa täytyy myös huomioida jouston aiheuttama rasitus asiakkaan lämmitysjärjestelmälle. Rasitusta voidaan pienentää muuttamalla lämpötilaa hitaasti, esimerkiksi muuttamalla lämpötilaa portaittain vaihdettaessa kysyntäjouston ja normaalin lämmityksen välillä. Noin 1 ℃ muutos viittä minuuttia kohden on hyväksyttävä muutosnopeus suuremman kokoluokan patteriverkossa. (Kärkkäinen et al. 2004, 14.)

Taloudellisesti kysyntäjousto voi olla myös tietyissä tilanteissa lämpöakkuja kalliimpi ja huonompi ratkaisu. Aikaisemmin lämpöakku on ollut helpompi optimoinnin väline kaukolämpöverkossa, ja sitä on voitu hyödyntää kuorman tasaamisen ja huipputehojen leikkaamiseen. Lämpöakku on myös usein kustannustehokas. (Valor Partners Oy 2015, 20.) (Pesola et al. 2011, 30.)

Muita mahdollisia haasteita ovat taloudellisen kannattavuuden varmistaminen sekä asiakastyytyväisyyden ylläpito. Tarvittavat investoinnit kysyntäjouston toteutusta varten voivat olla suurempia kuin kysyntäjoustotoimilla saadut hyödyt. Kaukolämpöyhtiö voi myös joutua tappiolliseen tilanteeseen, mikäli asiakkaille maksetaan kiinteitä kannustimia kysyntäjoustoon osallistumisesta, mutta suunnitellut säästöt eivät toteudukaan oletetusti. (Valor Partners Oy 2015, 16,20.)

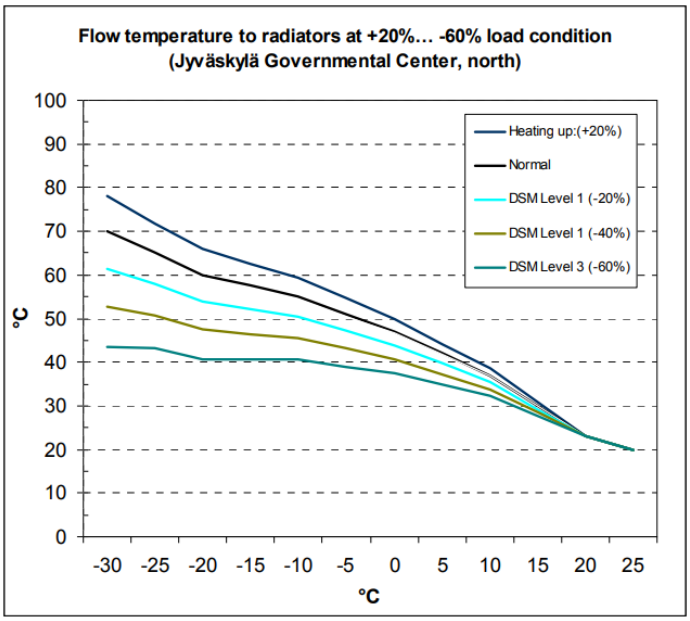
Asiakastyytyväisyys voi myös kärsiä, mikäli kysyntäjoustotoimet ovat liian voimakkaita ja siten vaikuttavat asumismukavuuteen (Valor Partners Oy 2015, 3). Ohjearvona sisälämpötilalle voidaan pitää 21 ℃ ja välttävän tason alarajana 18 ℃, jonka alittuminen voi aiheuttaa terveyshaittoja (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, 11,13). Keskimäärin tyytyväisimmillään ihmiset ovat, kun sisälämpötila on 21–22 ℃ välillä. Viihtyvyydessä on myös yksilöllisiä eroja (Sisäilmayhdistys ry. 2008). Palvelun laadun ylläpitämiseksi kysyntäjoustotoimien aiheuttamat sisälämpötilan alenemat tulee pitää annettujen ohjearvojen sisällä (Valor Partners Oy 2015, 5).

3.5. Kaukolämmön kysyntäjouston ohjaustavat

Asiakkaan kokeman palvelun laadun takaamiseksi on usein järkevintä toteuttaa kysyntäjouston vaatima asiakkaan hetkellinen lämpökuorman pienentäminen rajoittamalla kiinteistön lämmitykseen käytettävän patteriverkoston veden kiertolämpötilaa. Rajoitettaessa ilmanvaihdon lämmitystä tai lämpimän käyttöveden kulutusta, vaikutukset asiakkaalle ovat usein nopeasti havaittavissa, joka halutaan minimoida asiakkaan kokeman palvelun laadun ylläpitämiseksi. Tästä syystä kyseiset säätötapojen vaikutukset täytyy selvittää tarkasti ennen käyttöönottoa, ja siitä huolimatta eivät ole kokonaisuuden kannalta optimaalisia säätötapoja. (Valor Partners Oy 2015, 3,25.)

Kaukolämmön kysyntäjouston säätö kiinteistössä on toteutettavissa esimerkiksi käyttämällä useita eri lämpötilan säätökäyriä, jolloin kulloinkin käytettävä säätökäyrä valitaan kaukolämpöverkoston senhetkisen kysynnän perusteella, verrattuna normaaliin järjestelmään, jossa käytössä on tyypillisesti lineaarinen säätökäyrä perustuen pelkästään vallitsevaan ulkolämpötilaan. Kysyntäjoustossa käytettävät säätökäyrät ovat muodoltaan normaalia säätökäyrää vastaavia, mutta käyrien jyrkkyyttä sekä pystysuuntaista positiota muutetaan jouston tarvetta vastaaviksi. Kysyntäjouston säätökäyrät ovat normaalin säätökäyrän alapuolella, mutta mahdollisessa esilämmitysvaiheessa käytetään normaalin säätökäyrän yläpuolella olevaa säätökäyrää. (Kärkkäinen et al. 2004, 14.) (Koskelainen et al. 2006, 88.)

Alla olevassa kuvassa on esitetty Kärkkäinen et al. (2004, 42) esimerkkikohteen patteriverkoston lämpötilan säätökäyrät eri kysyntäjouston tasoilla. Käyrät esittävät patteriverkoston lämmitysveden lämpötilan ulkolämpötilan funktiona, siten että esilämmityskäyrä aiheuttaa 20 % suuremman lämpökuormituksen ja kolme eritasoista kysyntäjouston säätökäyrää pienentävät lämpökuormitusta 20 %, 40 % tai 60 % verrattuna normaaliin kuormitukseen. Kyseiset säätökäyrät olivat käytössä kysyntäjouston esimerkkikohteessa Jyväskylässä vuonna 2003, jossa jousto toteutettiin ennalta määriteltyjen aikaohjausten perusteella. (Kärkkäinen et al. 2004, 41–42.)



Kuva 18. Esimerkkikohteen patteriverkoston sisääntulolämpötila ulkolämpötilan funktioina eri kysyntäjouston säätökäyrillä. (Kärkkäinen et al. 2004, 42)

Kaukolämmön kysyntäjouston toteutuksessa on huomioitava myös rakennuksen takaisinlämmitys normaalille tasolle tehdyn jouston jälkeen. Tutkimuksessa Kärkkäinen et al. (2004, 41–42) mainitun takaisinlämmitysjakson pituuden suositeltiin olevan 1,5–2 tuntia joustojaksoa pidempi, jotta voidaan välttää takaisinlämmityksestä muutoin mahdollisesti aiheutuva lämmitystarpeen piikki. (Kärkkäinen et al. 2004, 41–42.)

Kysyntäjouston toteutukseen on olemassa useita erilaisia toimintamalleja, jotka sopivat eri kaukolämpöjärjestelmiin riippuen halutuista hyödyistä ja asiakaskunnasta, sekä saatavilla olevista teknisistä ratkaisuista. Jousto voidaan toteuttaa ilman ohjaussignaalia ennalta määrätyn ajoituksen perusteella, tai kaukolämpöyhtiön lähettämän ohjaussignaalin perusteella etähallinnan alaisille kiinteistöille tai järjestelmällä. Joustoja on mahdollista ohjata myös toteutuksella, jossa asiakas osallistuu kysyntäjoustoon kaukolämpöyhtiön määrittämään tariffi- tai hintaohjaukseen perustuen. (Valor Partners Oy 2015, 25,29.)

Kysyntäjoustoa voidaan toteuttaa myös asiakkaan ja kaukolämpötoimijan yhteistyönä, jolloin asiakas voi osallistua kysyntäjoustoon valitsemiinsa kaukolämpötoimijan määrittelemiin hintatariffeihin perustuen, mutta kaukolämpötoimijalla on silti mahdollisuus pienentää asiakkaan kuormitusta suoralla ohjauksella, mikäli tarve sen vaatii. (Kärkkäinen et al. 2004, 66)

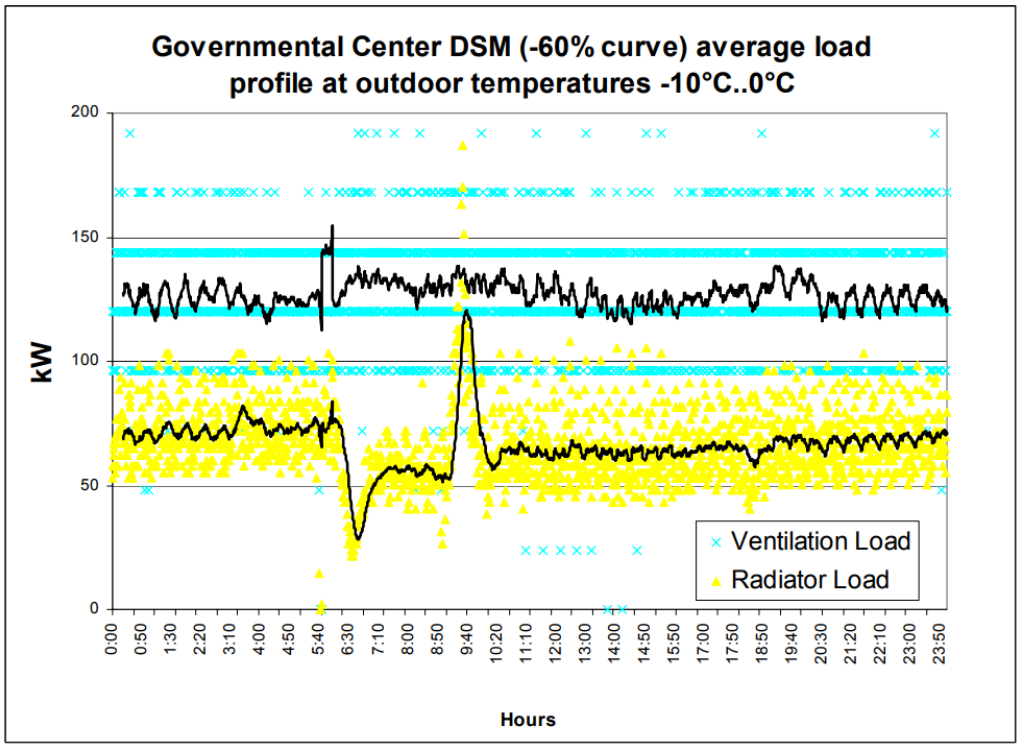
3.5.1. Aikaohjattu kysyntäjousto

Kysyntäjousto voidaan yksinkertaisimmillaan toteuttaa ilman varsinaista ohjaussignaalia, siten että jousto tapahtuu ennalta määritettyyn aikaan, jolloin kaukolämpöjärjestelmän kuormituksen on havaittu olevan tyypillisesti suuri. Aikaperusteinen ohjaus voidaan toteuttaa ohjaamalla kiinteistöjen lämpökeskuksien säätöä säännöllisesti siten, että kiinteistön lämmitystä alennetaan pienentämällä patteriverkostossa kiertävän veden lämpötilaa hetkellisesti, esimerkiksi aamuisin kello 7–9, jolloin tiedetään kaukolämmön kulutuksen tyypillisesti olevan suurta. (Valor Partners Oy 2015, 25.)

Toteutuksen etuihin kuuluu sen edullisuus ja yksinkertaisuus, ja kyseinen ohjaustapa on mahdollista toteuttaa myös vanhempiin kiinteistöihin, joita ei voida etäohjata ilman investointeja kiinteistön talotekniikkaan. (Paaskunta P. 2018.) (Valor Partners Oy 2015, 25.)

Aikaohjauksen haittapuoliin kuuluu riski kiinteistön sisälämpötilan tasaisuudesta, sillä aikaohjaus perustuu arvaukseen optimaalisesta säädöstä. Haasteena on myös tarve muuttaa aikaohjauksen säätöarvoja, mikäli rakennuksen ominaisuudet muuttuvat esimerkiksi korjauksien myötä. (Paaskunta P. 2018.)

Esimerkki aikaohjatun kysyntäjouston toteutuksesta on tutkimuksessa Kärkkäinen et al. (2004, 50–53) esimerkkikohteessa Jyväskylässä vuonna 2003, jossa jousto toteutettiin esilämmittämällä kiinteistöä kolmen tunnin ajan, jonka jälkeen lämpökuormitus pudotettiin alemmalle kysyntäjouston – 60 % säätökäyrälle, joka pienensi hetkellistä kaukolämpökuormaa jouston ajan. (Kärkkäinen et al. 2004, 50–53.)

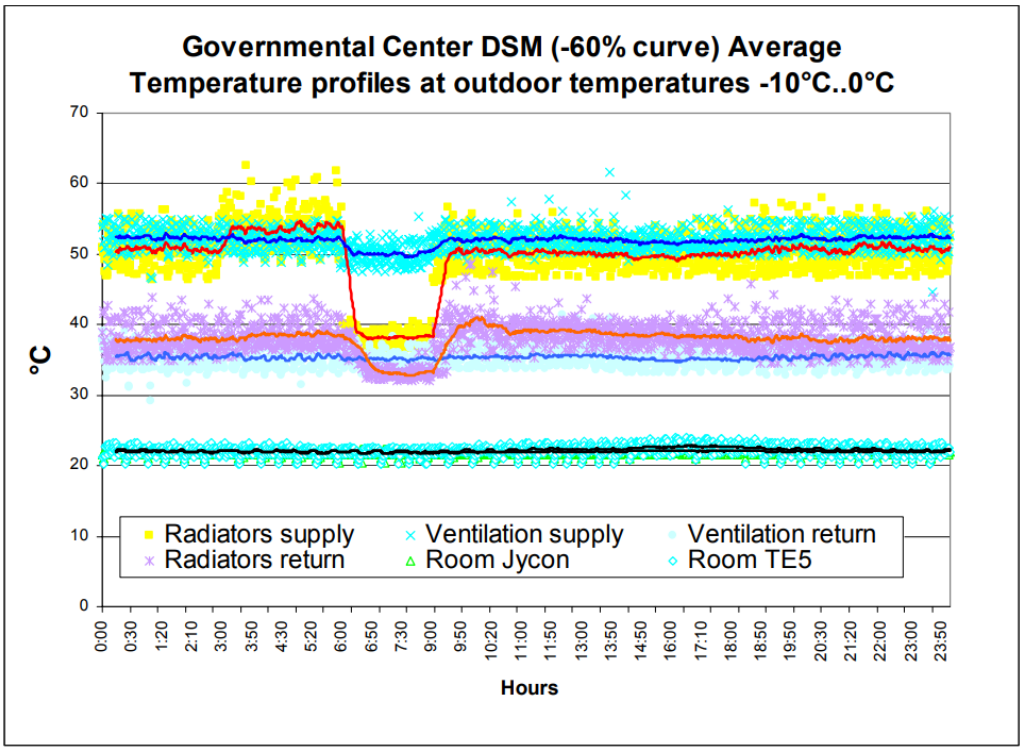


Kuva 19. Lämmitysteho ajan suhteen esimerkkikohteessa Jyväskylässä vuonna 2003. (Kärkkäinen et al. 2004, 53)

Kuvasta nähdään esilämmitysjakso kello kolmen ja kuuden välillä, sekä kysyntäjoustokäyrän vaikutus patterijärjestelmän tehoon laskevasti kello kuuden jälkeen ja nostavasti jouston loputtua kello yhdeksän aikaan. Suurin hetkellinen jousto tapahtuu noin 30 minuutin aikana jouston aloittamisesta, jolloin hetkellinen suurin tehonalenema on noin

80 % normaalitehoon verrattuna. Seuraavan 30 minuutin aikana lämpökuorman taso palaa noin -20…-30 % alempaan tasoon normaaliin kuormitukseen verrattuna, joka johtuu patteriverkoston varaaman lämpöenergian pienentymisestä, jolloin patteriverkoston kiertovettä täytyy alkaa lämmittämään jälleen tehokkaammin ja lämmitysteho nousee määrätyn minimisisälämpötilan ylläpitämiseksi. (Kärkkäinen et al. 2004, 14,52.)

Jouston ja esilämmityksen vaikutus patteriverkoston kiertolämpötilaan sekä rakennuksen sisälämpötilaan voidaan nähdä alla olevasta kuvasta.



Kuva 20. Lämpötila ajan suhteen lämmitykselle ja sisälämpötiloille esimerkkikohteessa Jyväskylässä vuonna 2003. (Kärkkäinen et al. 2004, 52)

Kuvasta nähdään aikaisemman kuvan tavoin esilämmitysjakso sekä jouston aiheuttama patteriverkoston kiertoveden lämpötilan aleneminen. Käyrästä voidaan myös havaita, että sisälämpötila ei muutu merkittävästi esilämmityksen tai kysyntäjoustosta aiheutuvan patteriverkoston lämmön alentamisen aikana.

3.5.2. Kaukolämpöyhtiön ohjaama jousto

Kysyntäjoustoja voidaan toteuttaa myös kaukolämpöyhtiön ohjaukseen perustuen. Tässä mallissa kaukolämpötoimija sekä asiakas ovat solmineet sopimuksen, joka määrittelee asiakkaan halukkuuden ja mahdollisuudet kysyntäjoustoon osallistumiseen. Esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän huipputehon tarpeen aikana kaukolämpötoimija voi alentaa asiakkaan kaukolämmön kuormitustasoa asiakkaan automaatiojärjestelmiä hyödyntäen, kuitenkin siten, ettei asiakkaan asumisen mukavuustaso heikkene merkittävästi kysyntäjoustotoimien myötä. (Kärkkäinen et al. 2004, 66.)

Käytännössä ohjaus toteutetaan lähettämällä kysyntäjoustoon osallistuvien asiakkaiden etähallittaville kaukolämpökeskuksille ohjaussignaali, jonka perusteella asiakkaiden laitteistot rajoittavat esimerkiksi kiinteistön sisälämpötilaa hetkellisesti alentamalla pattereissa kiertävän veden lämpötilaa (Valor Partners Oy 2015, 25). Tyypillisesti kaukolämpöyhtiön ohjaamassa joustossa leikataan huoneiden lämmitystehoa, mutta käyttöveden lämmitykseen joustotoimia ei käytetä. Tämä ohjaustapa vaatii kiinteistön lämpökeskuksilta tarvittavat laitteistot sekä tiedonsiirto- ja ohjausjärjestelmät kaukolämpöyhtiön suorittamaa etäohjausta varten. (Koskelainen et al. 2006, 101.)

Järjestelmään voi myös sisältyä esimerkiksi rakennuksen sisälämpötilan mittaus, jolloin sisälämpötilaa voidaan tarkkailla reaaliajassa ja lämmitystä säätää mitattujen lämpötilojen perusteella. Mittauksella voidaan varmistaa, etteivät kysyntäjoustotoimet alenna kiinteistön sisälämpötiloja haluttua tasoa alhaisemmaksi. (Ala-Kotila et al. 2020, 161.) (Koskelainen et al. 2006, 101.)

Ohjausalgoritmi voi myös hyödyntää sääennusteita jouston ennakointiin, jolla voidaan osaltaan vähentää ennuste-epävarmuutta säätilan osalta. Tämä taas parantaa kaukolämmön kysyntäjouston hallittavuutta. (Ala-Kotila et al. 2020, 163.) (Valor Partners Oy 2015, 28.)

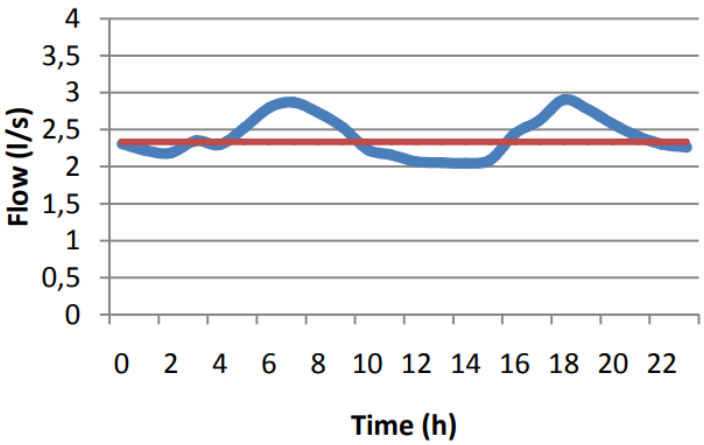
3.5.3. Muut ohjaussignaalit ja toteutus aikaisemmissa tutkimuksissa

Kysyntäjousto voidaan toteuttaa myös tariffi- tai hintaohjaukseen perustuen. Tässä kysyntäjouston mallissa asiakasta voidaan pyrkiä kannustamaan kysyntäjoustoon osallistumiseen esimerkiksi taloudellisten säästöjen avulla. Kaukolämpöyhtiö ei suoraan

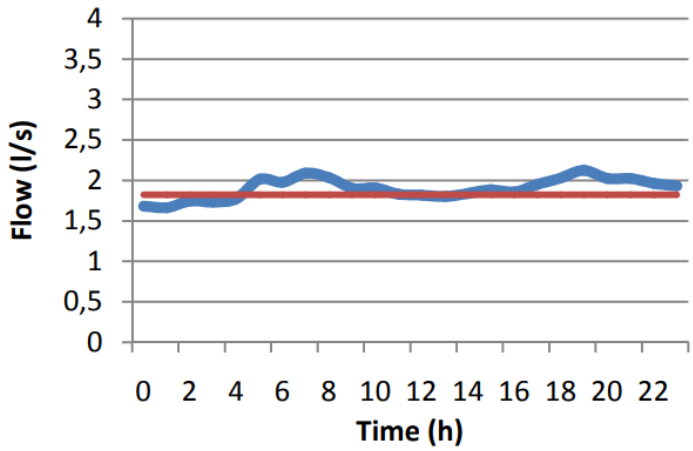
ohjaa asiakkaan laitteiston osallistumista kysyntäjoustoon, vaan asiakas manuaalisesti tai automatisoidun järjestelmän kautta osallistuu kysyntäjoustoon tiettyyn tariffi- tai hintaohjaukseen perustuen. Tariffit voivat perustua eri ohjaussignaaleihin, kuten esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän kuormituksen tasoon ja huipputehon tarpeeseen, tai energian- ja lämmöntuotannon hintaan. Asiakkaan käytännön tapoja kysyntäjoustoon osallistumiseen ovat esimerkiksi rakennuksen lämmityksen katkaisu tai pienentäminen kuuman käyttöveden kulutuksen ajaksi, rakennuksen tai tiettyjen huoneiden sisälämpötilan hetkellinen alentaminen tai lämpövarastojen hyödyntäminen, mikäli asiakkaalla on tällaisia käytössä. (Kärkkäinen et al. 2004, 66.) (Koskelainen et al. 2006, 101.)

Esimerkki tällaisesta automatisoidusta järjestelmästä on Wernstedt & Johansson (2008) tutkimuksen kohteissa Ruotsissa talvella 2007–2008, joissa kysyntäjousto toteutettiin rajoittamalla sisälämpötilaa, kun kuuman käyttöveden kulutus oli suurta. Jouston toteutus tehtiin moniagenttijärjestelmään (MAS) pohjautuen, jossa järjestelmä pyrkii ensisijaisesti täyttämään paikallisen asiakkaan lämmöntarpeen ja palvelun laadun, sekä osallistumaan kaukolämpöjärjestelmän kuorman tasapainotukseen (Wernstedt 2003, 6). Kysyntäjoustojärjestelmä hallinnoi 350 asunnon kaukolämpöjärjestelmää, jossa kysyntäjouston jakautuminen eri asuntojen välille määräytyi algoritmin perusteella. Järjestelmä valitsi kysyntäjoustoon osallistuvat asunnot sen perusteella, kuinka hyvin mikäkin asunnoista pystyi osallistumaan tarvittavaan joustoon ilman asiakkaiden kokeman palvelun laadun heikkenemistä. Järjestelmä toteutti kysyntäjoustokohteiden valinnan virtuaalisen huutokaupan perusteella, jossa kaikki järjestelmään liittyneet asunnot pyrkivät hankkimaan mahdollisimman paljon kysyntäjoustoa itselleen käyttäen valuuttana asiakkaan kokemaa palvelun laatua. Mikäli asiakkaan palvelun laatu olisi heikentynyt liikaa kysyntäjoustoon osallistumisesta, ei asiakkaalla ollut tällöin tarpeeksi valuuttaa ostaa oikeutta kysyntäjoustoon osallistumiseen. Indikaattorina asiakkaiden kokemalle palvelun laadulle pidettiin abstraktilla tasolla sitä, etteivät asiakkaat pysty havaitsemaan kysyntäjoustotoimia. Tämä sulki käyttöveteen liittyvät joustotoimet pois, sillä käyttöveteen liittyvät joustotoimet olisivat suoraan asiakkaiden havaittavissa. (Wernstedt & Johansson 2008, 1–3.)

Seuraavat kuvaajat esittävät moniagenttijärjestelmään perustuvan kysyntäjouston vaikutuksia kaukolämmön käyttöön esimerkkikohteessa.

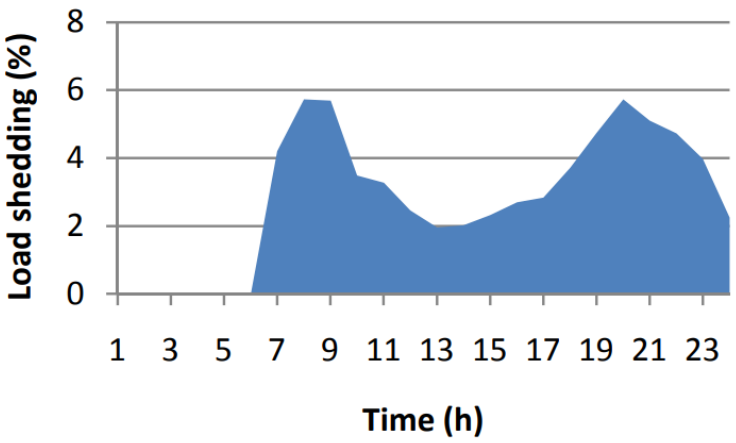


Kuva 21. Kuormituskäyrä kaukolämmön tilavuusvirran ja ajan suhteen esimerkkikohteissa ilman kysyntäjoustoa, Ruotsissa talvella 2007–2008. (Wernstedt & Johansson 2008, 4)



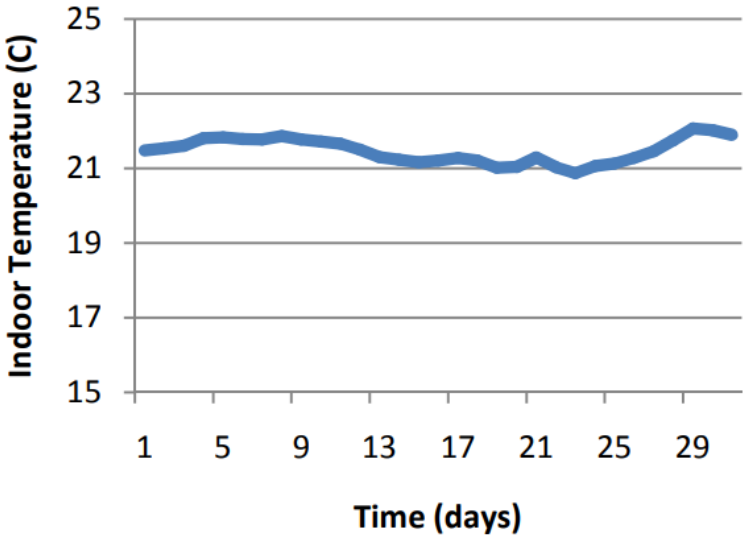
Kuva 22. Kuormituskäyrä kaukolämmön tilavuusvirran ja ajan suhteen esimerkkikohteissa kysyntäjoustoa hyödyntäen, Ruotsissa talvella 2007–2008. (Wernstedt & Johansson 2008, 4)

Kuvaajista voidaan havaita automatisoidun kysyntäjoustojärjestelmän vähentäneen kaukolämmön kuormitusta aamun- sekä illan kulutuspiikkien ajalta. Sama kuormituksen pienentyminen voidaan nähdä alla olevasta kuvasta, josta voidaan havaita suurimman kuorman alanemisen kyseisessä kohteessa tapahtuneen aamun ja illan kulutuspiikkien tasaamisen myötä juuri näinä ajanhetkinä. Kuormituksen pienentyminen päivätasolla on kuvaajassa noin 2 % - 6 % tasolla.



Kuva 23. Kysyntäjouston kuorman pienentäminen prosentteina päivän tuntien suhteen esimerkkikohteissa Ruotsissa talvella 2007–2008. (Wernstedt & Johansson 2008, 5)

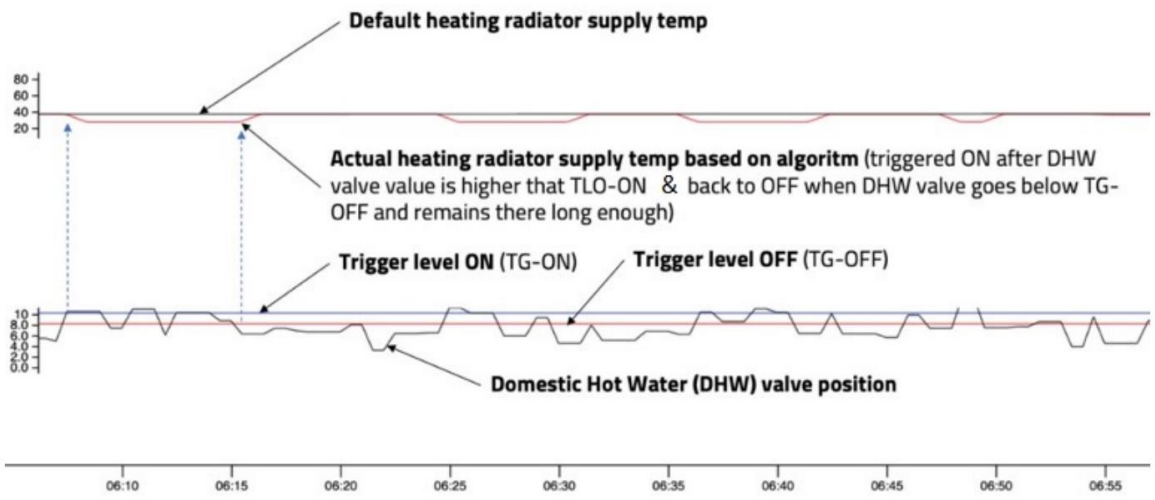
Testin aikana testiin osallistuneiden asuntojen sisälämpötiloissa ei koettu suuria pudotuksia. Kuvaajasta voidaan kuitenkin havaita, että kolmannen neljänneksen aikana lämpötila putosi minimiarvoonsa, joka vastaa suurinta järjestelmän sallimaa 2 ℃ pudotusta. (Wernstedt & Johansson 2008, 5.)



Kuva 24. Kysyntäjouston vaikutus sisälämpötilaan testijakson aikana esimerkkikohteissa Ruotsissa talvella 2007–2008. (Wernstedt & Johansson 2008, 5)

Esimerkkitutkimuksessaan Ala-Kotila et al. (2020, 157) toteutti myös asuinkiinteistöjen kysyntäjouston rajoittamalla kiinteistön patteriverkoston kiertoveden lämpötilaa perustuen lämpimän käyttöveden kulutukseen kiinteistössä, jonka avulla kiinteistön lämmöntarpeen kulutuspiikkejä voidaan pienentää. Käytännön toteutus tapahtui mittaamalla lämpimän käyttöveden venttiilin asentoa ja käyttämällä algoritmia rajoittamaan kiinteistön lämmitystä hetkellisesti, kun venttiilin asento ylittää tietyn ennalta määrätyn arvon. (Ala-Kotila et al. 2020, 157.)

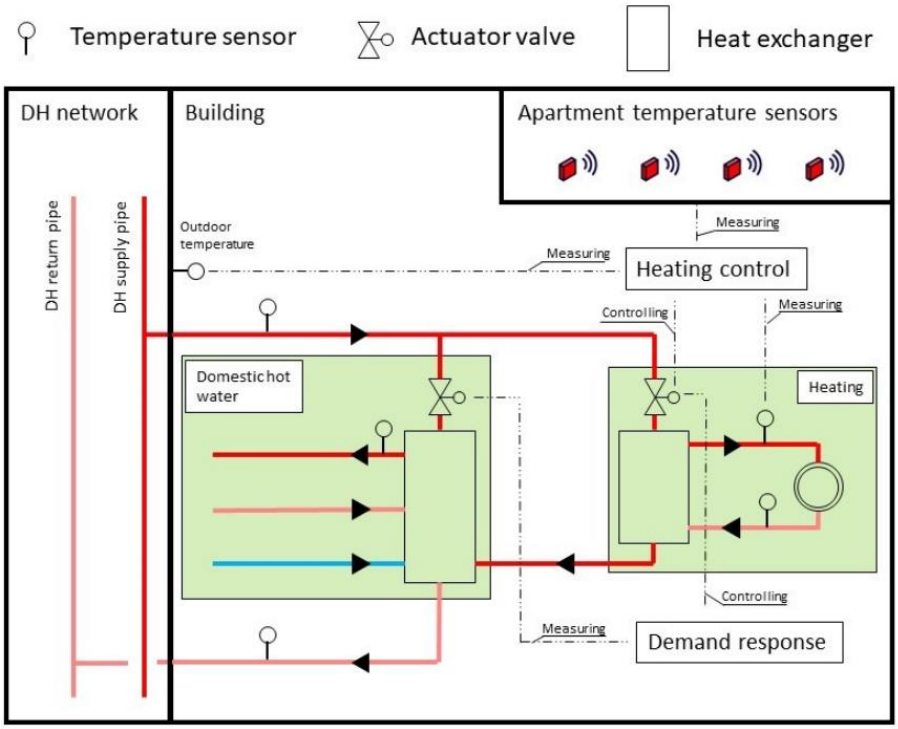
Alla esitetyssä kuvassa nähdään tutkimuksessa käytetyn kysyntäjoustoalgoritmin toimintaperiaate. Lämpimän käyttöveden venttiilin asennon saavuttaessa määritellyn raja-arvon järjestelmä automaattisesti alentaa kiinteistön patteriverkoston syöttölämpötilaa hetkellisesti.



Kuva 25. Tutkimuskiinteistön kysyntäjoustoalgoritmi perustuen lämpimän käyttöveden venttiiliasentoon. (Ala-Kotila et al. 2020, 161)

Sisälämpötilan halutuissa raja-arvoissa pysymisen varmistamiseksi asuntoihin oli myös asennettu sisälämpötila-anturit, jotka toimivat yhteistyössä kysyntäjoustoalgoritmin kanssa. Anturit mahdollistavat tarkan lämpötilan seuraamisen ja säädön verrattuna perinteisiin järjestelmiin, jotka säätävät sisälämpötilaa ainoastaan vallitsevan ulkolämpötilan funktiona. (Ala-Kotila et al. 2020, 161.)

Alla esitetystä kuvaajassa on esimerkki kiinteistön älykkäästä lämmitysjärjestelmästä ja lämmityksen ohjauksesta perustuen sisälämpötilan mittaukseen.



Kuva 26. Kysyntäjouston mahdollistava kiinteistön lämmitysjärjestelmä sisätilan lämpöantureilla. (Ala-Kotila et al. 2020, 161)

Muita vaihtoehtoisia kysyntäjouston ohjaustapoja voivat olla esimerkiksi kaukolämmön hintaennusteeseen perustuva kysyntäjousto, jossa rakennusta lämmitetään tai jäähdytetään ennustetun hintatrendin perusteella. Ennustettuun kaukolämmön hintaan vaikuttaa esimerkiksi arvioidut tuotantokustannukset ja sääennuste. (Suhonen et al. 2020, 5,15.)

Asiakkaiden lämpötehontarpeisiin voidaan vaikuttaa jouston avulla myös rajoittamalla huipputehoa tietylle ennalta määrätylle tasolle, kuten simuloidussa tutkimuksessa Salo et al. (2019, 4), jossa kiinteistöjen käyttämää huipputehoa rajoitettiin 35–50 %. Tällaisessa ohjauksessa ennalta määrätty huipputehon rajoitus katkaisee lämmitystehon lisäyksen halutulle maksimikuorman tasolle. (Salo et al. 2019, 4.)

4. Kaukolämmön kysyntäjouston pilottihanke

Työn varsinainen tutkimusosuus käsittelee Kuopion Energian kaukolämpöverkossa suoritettavaa kaukolämmön kysyntäjouston pilottihanketta, jossa kaukolämmön kysyntäjouston käyttäytymistä testataan kahdeksassa Kuopion alueella sijaitsevassa kaukolämmitteisessä asuinkiinteistössä.

4.1. Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Tavoitteena tutkimukselle on selvittää kaukolämmön kysyntäjouston potentiaali kysyntäjoustopilottiin osallistuvissa kiinteistöissä, löytää optimaalisia asetusarvoja kysyntäjoustojen ajamiseen, selvittää kysyntäjoustopotentiaalia rajoittavat sekä parantavat tekijät ja tehdä analyysi kaukolämmön kysyntäjouston skaalaamisen mahdollisuuksista Kuopion Energian kaukolämpöverkon muihin kohteisiin saatujen tulosten perusteella.

Mittausdatasta pyritään selvittämään, paljonko tehoa kysyntäjouston avulla pystytään joustamaan, ja kuinka pitkiä joustojaksot voivat olla, ilman että asukkaiden kokema palvelun laatu heikkenee liian voimakkaasti alentuneen tai liian nopeasti vaihtelevan sisälämpötilan myötä. Sisälämpötilan vaihtelua kiinteistöjen eri huoneistoissa mitataan huoneistokohtaisten lämpötilamittareiden avulla, ja tietoa käytetään joustojen onnistumisen arviointiin sisälämpötilan pysyvyyden ja siihen linkittyvän asiakkaiden kokeman palvelun laadun säilymisen osalta. Tutkimuksessa tarkastellaan myös kysyntäjouston vaikutusta kiinteistöjen kaukolämpöenergian kulutusmääriin, verrataan ulkolämpötilojen vaikutusta joustopyyntöjen toteutumiseen, sekä tarkastellaan miten eri suuruiset ja pituiset joustopyynnöt vaikuttavat joustojen toteutumiseen. Saaduista tuloksista pyritään myös selvittämään kaukolämmön kysyntäjoustolle suotuisat asuinkiinteistöt, perustuen kysyntäjoustopilottiin osallistuvien erityyppisten rakennusten joustopotentiaaliin ja käyttäytymiseen joustojen aikana.

Tutkimuksen painopiste on joustojen avulla saavutettavien kaukolämpötehon alentumien ja energiankulutuksen mahdollisten muutosten analysoimisessa. Taloudellinen selvitys

kaukolämpöyhtiön saamista rahallisista hyödyistä jätetään työn suuntauksen mukaisesti tarkastelun ulkopuolelle.

4.2. Lähtötiedot ja käytetty laitteisto

Pilottihankkeeseen osallistui yhteensä kahdeksan Kuopion alueella sijaitsevaa kaukolämmitteistä asuinkiinteistöä. Kiinteistöjen perustiedot sekä energiankäytön tiedot on esitelty alla olevissa taulukoissa.

Taulukko 1. Kysyntäjoustopilottiin osallistuvien kiinteistöjen perustiedot.

	Talotyyppi	Rakennusvuosi	Peruskorjausvuosi	Asuinpinta-ala [m2]	Tilavuus [m3]
Kohde 1	Kerrostalo	1 968	2 000	2 898	13 930
Kohde 2	Kerrostalo	1 976	2 005	4 204	17 344
Kohde 3	Luhtitalo	1 992	2 019	776	3 095
Kohde 4	Rivitalo	1 920	2 021	520	1 760
Kohde 5	Luhtitalo	1 990	-	2 702	9 664
Kohde 6	Kerrostalo	1 992	-	2 916	12 100
Kohde 7	Luhtitalo	1 996	-	2 119	8 145
Kohde 8	Kerrostalo	2 000	-	3 376	15 177

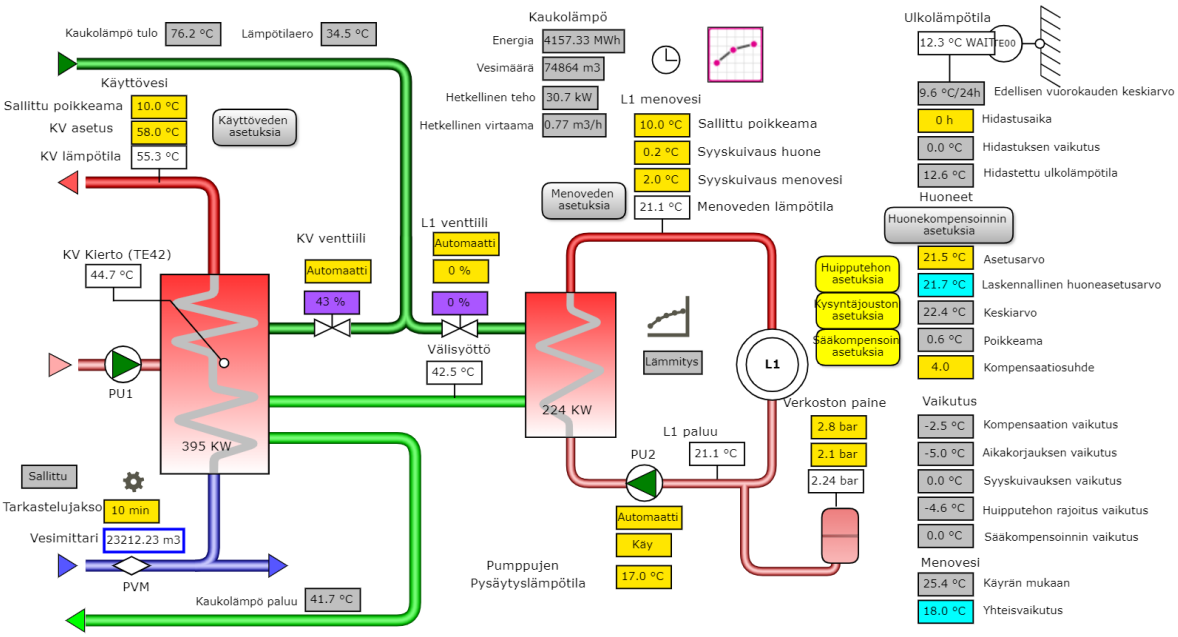
Taulukko 2. Kysyntäjoustopilottiin osallistuvien kiinteistöjen energiankäytön tiedot.

	Vuotuinen kaukolämpöenergian kulutus (2021) [MWh]	Lämmityksen vaihdinteho [kW]	Käyttöveden vaihdinteho [kW]	Laskutusteho [kW]
Kohde 1	711	501	450	258
Kohde 2	665	324	356	246
Kohde 3	133	56	180	49
Kohde 4	71	35	276	35
Kohde 5	564	239	360	166
Kohde 6	411	178	320	147
Kohde 7	450	138	276	185
Kohde 8	540	224	395	196

Kiinteistöjen lämmitystehon rajoitus toteutetaan rajoittamalla kaukolämpöveden virtaamaa patteriverkoston lämmönvaihtimelle säätöventtiilin avulla.

Joustopyyntöjen kirjaaminen järjestelmään sekä saatujen tulosten raportointi käyttäjälle toteutetaan Ounet rakennusautomaation nettivalvomopalvelun kautta. Tietojen välitys kiinteistöjen laitteistoille ja näiden etäohjaus toteutuu kohteissa Ouman Ouflex A rakennusautomaatiolaitteiston kautta.

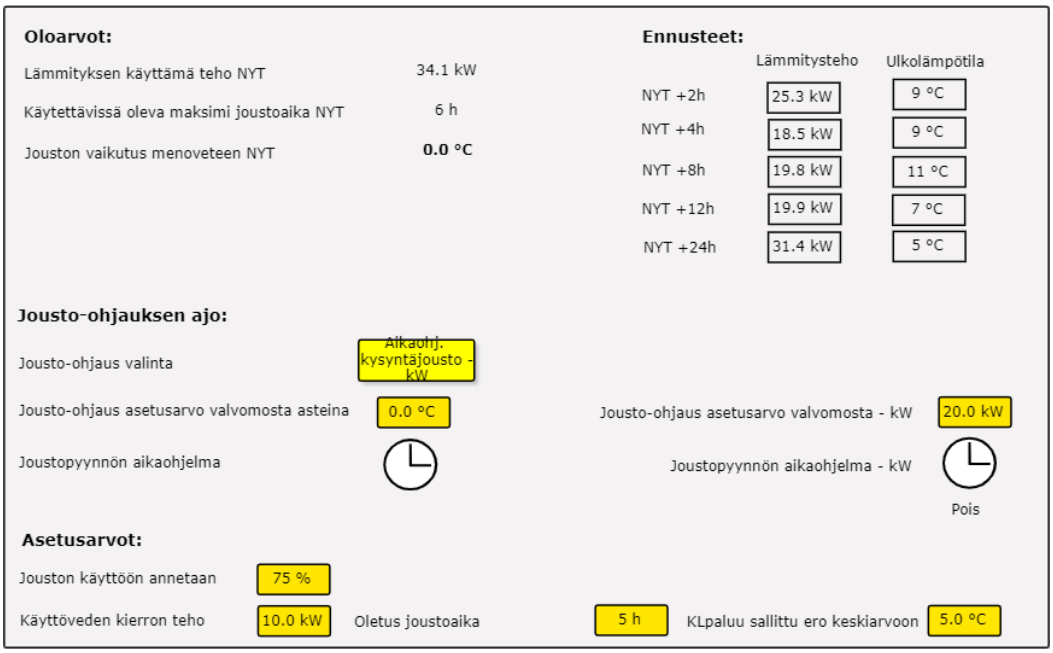
Nettivalvomon reaaliaikainen valvontanäkymä erään pilottikohteen lämmitysjärjestelmästä on esitelty alla olevassa kuvassa 27.



Kuva 27. Ounet nettivalvomonäkymä erään pilottikohteen lämmitysjärjestelmästä.

Kiinteistöjen lämmitystehon hetkellinen rajoittaminen pilotin joustojaksojen aikana toteutettiin aikaohjauksena, jonka käyttämät joustoarvot syötettiin Ounet käyttöliittymään.

Alla olevassa kuvassa 28 on esiteltynä kello-ohjelmaan tai suoraan valvomo-ohjaukseen perustuvan kysyntäjouston käyttöliittymä-paneeli.



Kuva 28. Kello-ohjelmaan tai suoraan valvomo-ohjaukseen perustuva kysyntäjousto-ohjaus Ounet käyttöliittymässä.

Haluttu tehopyyntö kirjataan kohtaan ”Jousto-ohjaus asetusarvo valvomosta – kW” ja joustopyynnön toteutumisajankohta sekä -kesto käyttöliittymän kohtaan ”Joustopyynnön aikaohjelma – kW”. Kysyntäjoustojen hallinnan käyttöliittymästä voidaan myös nähdä senhetkinen laskennallinen kiinteistön lämmityksen käyttämä teho, sekä jouston vaikutus menoveden lämpötilaan joustopyynnön ollessa päällä. Tehtävien joustopyyntöjen suunnitteluun on myös käytettävissä sääennusteen mukaisten ulkolämpötilojen perusteella määriteltyjä ennusteita kiinteistön lämpötehon tarpeesta, jotka järjestelmä luo toteutuneiden ulkolämpötilojen ja lämmitystehojen korrelaatiosta.

Ohjelmistossa on myös sisäänrakennettuna ominaisuus, joka rajoittaa joustoja automaattisesti, mikäli manuaalisesti annettu joustopyyntö aiheuttaa jonkin mitatun raja-arvon ylityksen, kuten esimerkiksi sisälämpötilan liiallisen alenemisen. Tämä mahdollistaa erilaisten joustopyyntöjen testauksen ilman vaaraa asukkaiden asuinmukavuuden heikkenemisestä.

4.3. Tutkimusmenetelmät

Pilottihankkeen tutkimus aloitettiin keräämällä tuloksia aikaisemmin tehdyistä kaukolämmön kysyntäjoustohankkeista ja -simulaatioista, saatavilla oleviin kirjallisuuslähteisiin ja tutkimuksiin pohjautuen. Kartoituksen perusteella etsittiin sopivia lähtöarvoja pilottikohteiden kysyntäjouston testiajoja varten. Testaus aloitettiin useilla eri kysyntäjouston tehomäärillä ja joustojaksojen pituuksilla, jotta saataisiin kartoitettua optimaalisimmat kohdekohtaiset joustoarvot tulosten keskinäistä tarkastelua ja aikaisempien tutkimusten tuloksiin vertailua varten. Eri joustoparametrejä testaamalla pyrittiin myös saamaan tuloksia joustotehoa ja -jaksojen pituuksia rajoittavista tekijöistä eri kiinteistöissä.

Pilotissa testattujen joustopyyntöjen pituudet vaihtelivat kestoltaan 1–8 tunnin väliltä ja olivat tehopyynnöltään 10–100 % kiinteistön sen hetkisestä laskennallisen lämmitystehon tarpeesta. Testeissä kysyntäjoustojen ohjaus toteutettiin aikaohjattuna kysyntäjoustona, joka mahdollisti myös eri kellonaikojen variaation huomioinnin joustojen toteutumisen tarkastelussa. Testijaksot painotettiin potentiaalisiin joustoajankohtiin, eli kellonaikoihin, jolloin kaukolämpöenergian kulutus on kiinteistöissä oletetusti suurinta, ja joustolla saadun tehonalentamisvaikutuksen potentiaali on siten isoin. Näitä ajankohtia on muun muassa lämpimän käyttöveden kulutuksen aiheuttamat kulutuspiikit aamuisin ja iltaisin. Testejä suoritettiin myös satunnaisissa ajankohdissa päivien ja öiden aikana, jotta saatiin tuloksia joustojen toteutumasta myös muina vuorokaudenaikoina.

Kaikissa pilottihankkeeseen osallistuneissa kiinteistöissä joustot toteutettiin ainoastaan patteriverkoston kiertolämpötilaa alentamalla, jotta voidaan välttyä lämpimän käyttöveden tai ilmastoinnin lämmityksen joustoista mahdollisesti aiheutuvasta asiakkaiden kokeman palvelun laadun heikkenemisestä. Kysyntäjoustoon osallistuvissa kiinteistöissä on asennettuna huoneistokohtaiset etäluettavat lämpötila-anturit, joiden avulla voidaan saada tietoa sisälämpötilan käyttäytymisestä suhteessa tehtyihin kysyntäjoustotoimiin. Lämpötilan mittaus myös mahdollistaa lämpötilan pitämisen haluttujen raja-arvojen sisällä, siten että kysyntäjoustoa rajoitetaan ja lämmitystehoa kasvatetaan automaattisesti, mikäli sisälämpötila putoaa määritellyn raja-arvon alapuolelle.

Testausten yhteydessä otettiin käyttöön myös kysyntäjoustojen kiinteistöautomaatiojärjestelmään sisäänrakennettu huipputehonrajoitus, joka pystyy automatisoidusti rajoittamaan kiinteistön hetkellistä kaukolämpötehoa huipputehotuntien

aikana, kun lämmitystehon tarve on suuri, johtuen esimerkiksi lämpimän käyttöveden hetkellisesti kasvaneesta kulutuksesta.

4.4. Tutkimustulokset

Tutkimuksen tuloksia käsitellään ensin kohdekohtaisesti, käydään läpi joustopyyntöjen toteutuminen kussakin kiinteistössä ja tehdään havaintoja mahdollisista joustojen toteutumista rajoittavista sekä parantavista tekijöistä pilottiin osallistuvissa kohteissa.

Seuraavaksi kohteita verrataan keskenään, ja pyritään selvittämään mitkä kohteista ovat kysyntäjouston kannalta hyviä ja mitkä huonoja kohteita. Kysyntäjouston toteutumista tarkastellaan myös eri suuruisilla- sekä pituisilla joustopyynnöillä, josta pyritään selvittämään optimaalisimmat sekä toteutumaltaan luotettavimmat joustoparametrit.

Lopuksi tutkimuksen tulokset vedetään yhteen, ja käytetään tätä tietoa kysyntäjouston kannalta suotuisten kiinteistötyyppien luokittelemiseen mahdollista tulevaisuuden skaalaustarvetta varten, sekä arvioidaan joustopotentiaalia Kuopion Energian kaukolämpöverkon muissa kohteissa.

4.4.1. Kohdekohtaiset tulokset

Joustojen toteutumista eri kohteissa selvitettiin laskemalla keskiarvoteho ulkolämpötilan funktiona joustojaksojen ajalta, sekä vertailua varten ajalta ilman joustopyyntöjä. Suurimmassa osassa kohteista joustoja päästiin suorittamaan viivästysten vuoksi vasta huhtikuun 2022 alusta, jonka takia joustojen tutkimiselle otollinen aika jäi melko lyhyeksi. Datan vähyyden vuoksi kohdekohtaista variaatiota erilaisten joustopyyntöjen osalta ei saatu eriteltyä, mistä johtuen tehojen tarkasteluun valittiin mukaan kaikki yli kolmen tunnin kestoiset sekä tehopyynnöltään yli 25 % sen hetkisestä lämmitystehosta olevat joustopyynnöt. Tällä valinnalla dataa oli tarpeeksi tulosten saamiseksi ja joustojaksojen aikaisista teholukemista saatiin samansuuntaisia, ilman lyhyiden ja teholtaan pienten joustojaksojen aiheuttamaa ylimääräistä hajontaa. Tarkastelussa mukana olleet

joustopyynnöt ovat keskiarvoltaan neljän tunnin kestoisia ja tehopyynnöltään 60 % sen hetkisestä lämmitystehosta.

Erillistä tilojen lämmitykseen menevän energian tai virtaaman mittausta ei ollut saatavilla, jonka vuoksi tehona käytettiin mittaritehoa, joka sisältää koko kiinteistön kaukolämpöenergian kulutuksen, eli tilojen lämmitykseen sekä käyttöveden lämmitykseen kuluvan energian. Lämpimän veden käytöstä aiheutuneiden tehopiikkien arviointiin ja suodattamiseen käytettiin hetkellisen vesimittarilukeman muutosta, josta arvioitiin lämpimäksi käyttövedeksi menevän 40 %. Mittaritehosta vähennetään myös lämpimän käyttöveden kierrosta aiheutuvat kiertohäviöt.

Käyttöveden lämmityksen lämpötehon hetkellinen tarve on arvioitu alla olevan kaavan mukaisesti. (Ympäristöministeriö 2013, 64)

$$\phi_{LKV} = \rho_v c_{p,v} q_{v,LKV} (T_{LKV} - T_{KV}) + \phi_{LKV,kiertohäviö} \tag{1}$$

jossa ϕ_{LKV} käyttöveden lämmityksen hetkellinen tehontarve $[kW]$, ρ_v on veden tiheys $[kg/m^3]$, $c_{p,v}$ on veden ominaislämpökapasiteetti $[kJ/(kgK)]$, $q_{v,LKV}$ on lämpimän käyttöveden tilavuusvirta $[m^3/s]$ mittausjakson t $[s]$ aikana, T_{LKV} on lämpimän käyttöveden lämpötila [°C], T_{KV} on kylmän käyttöveden lämpötila [°C] ja $\phi_{LKV,kiertohäviö}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviö $[kW]$.

Lämpimän ja kylmän käyttöveden lämpötilojen erotuksen oletetaan olevan tyypillisen arvon verran, eli 50 °C. (Ympäristöministeriö 2013, 64)

Oletetaan veden käytön perusteella suodatetun mittaritehon olevan työn tulosten tarkastelun kannalta tarpeeksi lähellä oikeaa tilojen lämmitykseen menevää tehoa, ja käytetään tästä suodatetusta tehosta jatkossa nimitystä lämmitysteho. Arvioituja lämmitysteholukemia käytetään työssä ainoastaan keskiarvojen laskentaan kuuden viikon jaksolta, joten oletetaan että arviosta johtuva virhemarginaali ei vaikuta merkittävästi keskiarvollisiin tuloksiin.

Arvioitu tilojen lämmityksen hetkellinen teho lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti.

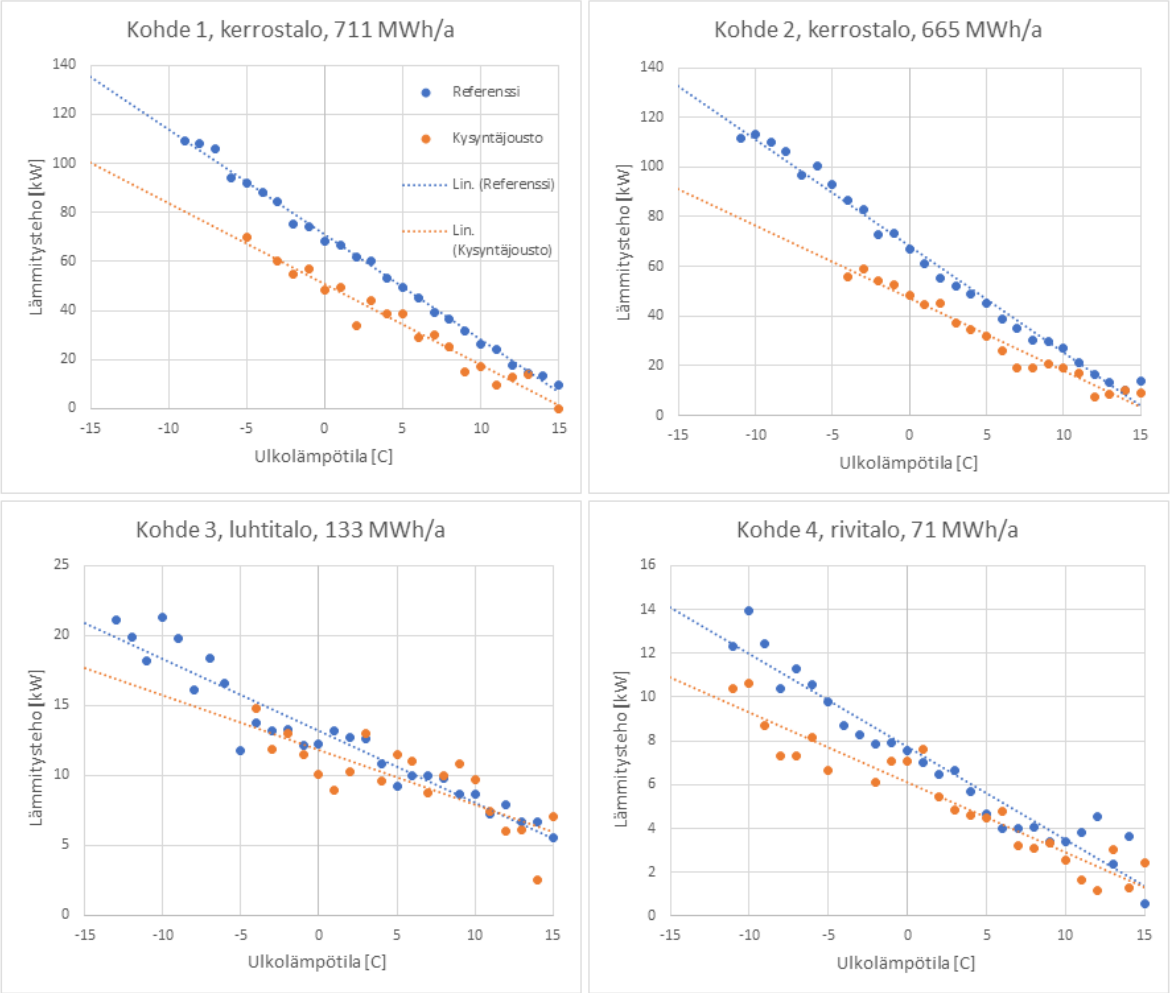
$$\phi_{tila} = \phi_{lämmitys} - \phi_{LKV} \tag{2}$$

jossa ϕ_{tila} on tilojen lämmityksen hetkellinen teho $[kW]$ ja $\phi_{lämmitys}$ on hetkellinen kaukolämmön lämmitystehon tarve, eli mittariteho $[kW]$.

Lämpimän veden kulutus pohjautuu arvioon eikä mitattuun tietoon, jonka vuoksi menetelmän käytöllä syntyy virhettä. Testien perusteella menetelmällä kuitenkin saatiin hyviä tuloksia etenkin lämpimän veden käytöstä aiheutuneiden tehopiikkien tasoittamiseen, jonka perusteella arviointimenetelmää hyödynnettiin tulosten suodatuksessa lämpimän käyttöveden tehopiikkien osalta.

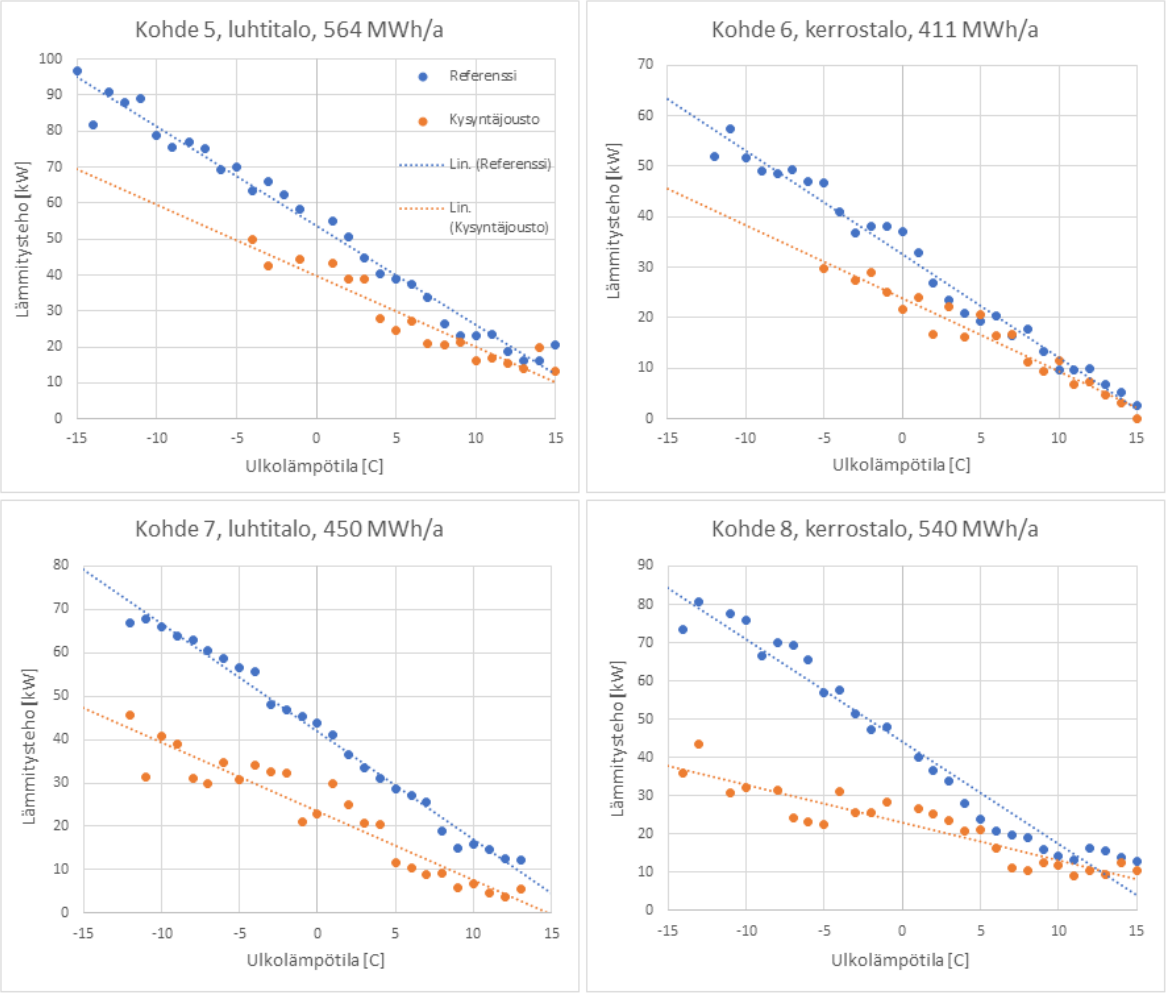
Alla esiteltyjen tehokäyrien tulosten laajuuteen vaikutti negatiivisesti vasta huhtikuussa aloitetut kysyntäjoustot siten, ettei joustojen käyttäytymistä pakkasjaksojen aikaan saatu tallennettua kuin vain osalle kohteista. Puutteellisten tulosten takia tehokäyriä tulee käsitellä suuntaa antavina. Ajastetut joustot saatiin aloitettua suurimmassa osassa kohteista aikavälillä 30.3.2022 – 8.4.2022. Poikkeuksia olivat kohde 5, jossa joustot saatiin aloitettua vasta 14.4.2022 sekä kohde 8, jossa joustot aloitettiin jo 16.2.2022. Automaattisesti tehopiikkejä rajoittava huipputehonrajoitus otettiin kaikissa kohteissa samanaikaisesti käyttöön 4.4.2022. Tehon käyttäytymisen tarkasteluun ulkolämpötilan funktiona valittiin tarkastelujaksoksi kaikille kohteille 6 viikon mittainen jakso 1.4.2022 – 13.5.2022.

Kohteiden tehokäyrät ovat esitettynä alla olevissa kuvaajissa ulkolämpötilan funktiona.



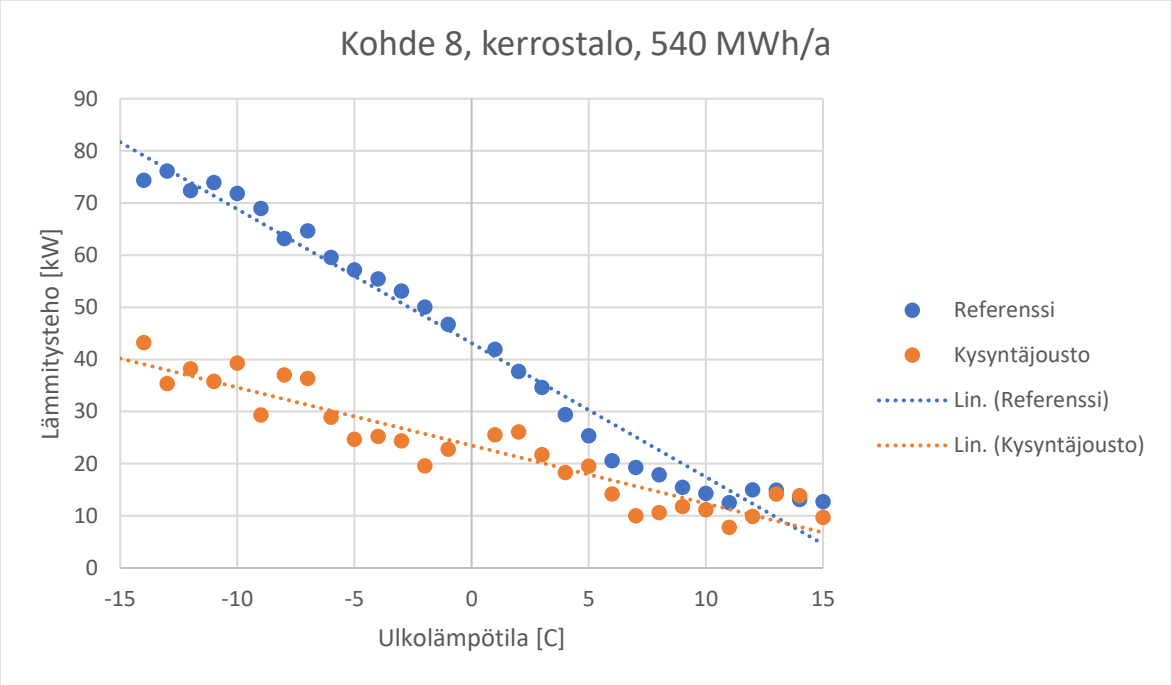
Kuva 29. Kohteiden 1,2,3 ja 4 lämmitystehon käyttäytyminen kysyntäjouston sekä referenssijakson aikana 1.4.2022-13.5.2022.

Ensimmäisen neljän kohteen kuvaajien osalta pystytään jo havaitsemaan eroja kaukolämpöenergiakäytöltään suurempien kohteiden 1 & 2 sekä pienempien kohteiden 3 & 4 välillä. Hajonta on suurempaa sekä joustojen toteutunut tehonalenema on heikompaa pienempitehoisten kohteiden osalta.



Kuva 30. Kohteiden 5,6,7 ja 8 lämmitystehon käyttäytyminen kysyntäjouston sekä referenssijakson aikana 1.4.2022-13.5.2022.

Alla on esitelty myös kohteen 8 tehokäyrä, jossa on mukana kaikki tehoarvot ajalta 16.2.2022 – 13.5.2022. Kuvaajasta huomataan, että kuvien 30 ja 31 kohteen 8 sovitteet ovat hyvin samansuuntaiset, mutta pidemmän ajanjakson huomioivassa kuvaajassa 31 on havaittavissa hieman vähemmän hajontaa suuremman datamäärän ansioista.



Kuva 31. Kohteen 8 lämmitystehon käyttäytyminen kysyntäjouston sekä referenssijakson aikana 16.2.2022-13.5.2022.

Kohteiden 1,2,5,6,7 ja 8 kysyntäjoustojen aikaiset lämpötilan funktiona olevat teholukemat ovat melko yhdensuuntaisia lineaarisen sovitteen kanssa, mutta taas kohteissa 3 ja 4 on havaittavissa huomattavasti enemmän hajontaa. Kohteet 3 ja 4 ovat myös tarkasteltavista kohteista kaukolämpöteholtaan sekä energiakäytöltään pienimmät kohteet, joka voi olla syynä epätasaisempaan käyttäytymiseen suurempitehoisiin kohteisiin verrattuna. Lämpimän veden kulutuksen tehopiikkien suodatusmenetelmä saattaa myös aiheuttaa pienitehoisten kohteiden tuloksiin prosentuaalisesti suurempaa ei-haluttua heiluntaa. On myös huomattava, että lineaarinen sovite on suuntaa antava, sillä hajonta jouston aikaisissa tehoissa on melko suurta, johtuen useista ulkolämpötilaan liittymättömistä muuttujista, kuten datamäärän vuoksi mukaan lasketuista erimittaisista ja tehopyynnöltään erisuurista joustoista.

Tehon käyttäytymisen lisäksi kohteista selvitetään myös kaukolämpöenergian kulutuksen muutos vertaamalla normeerattua energiankulutusta kysyntäjoustojen sekä huipputehonrajoituksen ajanjaksoilta edellisten vuosien samojen ajanjaksojen normeerattuun energiankulutukseen.

Normeerattu energiankulutus on laskettu alla esitetyn kaavan 3 mukaisesti. (Motiva Oy 2022, 3.)

$$Q_{norm} = \frac{S_{N,vpkunta}}{S_{toteutunut,vpkunta}} \times Q_{toteutunut} + Q_{LKV} \quad (3)$$

jossa Q_{norm} kiinteistön normeerattu lämmitysenergiankulutus $[kWh]$, $S_{N,vpkunta}$ on normaalivuoden tai kuukauden lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla $[°\mathrm{C}vrk]$, $S_{toteutunut,vpkunta}$ on vertailuajankohdan toteutunut lämmitystarveluku vuosi- tai kuukausitasolla $[°\mathrm{C}vrk]$, $Q_{toteutunut}$ on kiinteistön tilojen lämmitykseen kuluva kaukolämpöenergian määrä $[kWh]$ ja Q_{LKV} on lämpimän käyttöveden lämmittämisen energiankulutus $[kWh]$.

Lämmitystarvelukuina käytetään Kuopion lämmitystarvelukuja vertailuvuosilta 2019–2022 ja normaalinvuoden lämmitystarvelukuna vuosien 1981–2010 keskimääräistä lämmitystarvelukua. (Ilmatieteenlaitos 2022)

Käytetyt lämmitystarveluvut on esitetty alla olevassa taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuopion lämmitystarveluvut eri kuukausina.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2022	752	610	585	465	181							
2021	772	812	633	426	213	0	0	28	267	333	532	816
2020	564	568	550	471	240	0	0	0	131	326	436	576
2019	890	606	604	346	198	0	33	12	189	436	543	566
1981–2010	812	741	653	445	198	31	7	38	194	400	571	735

Lämmitykseen kuluva kaukolämpöenergiamäärä saadaan vähentämällä lämpimän käyttöveden osuus kokonaiskulutuksesta alla olevan kaavan 4 mukaisesti. (Motiva Oy 2022)

$$Q_{toteutunut} = Q_{kok} - Q_{LKV} \quad (4)$$

jossa Q_{kok} on kiinteistön kaukolämpöenergian kokonaiskulutus $[kWh]$.

Lämpimän käyttöveden arvioitu energiankulutus lasketaan seuraavan kaavan 5 mukaisesti. (Motiva Oy 2022, 7)

$$Q_{LKV} = E_{LKV} \times V_{LKV} \quad (5)$$

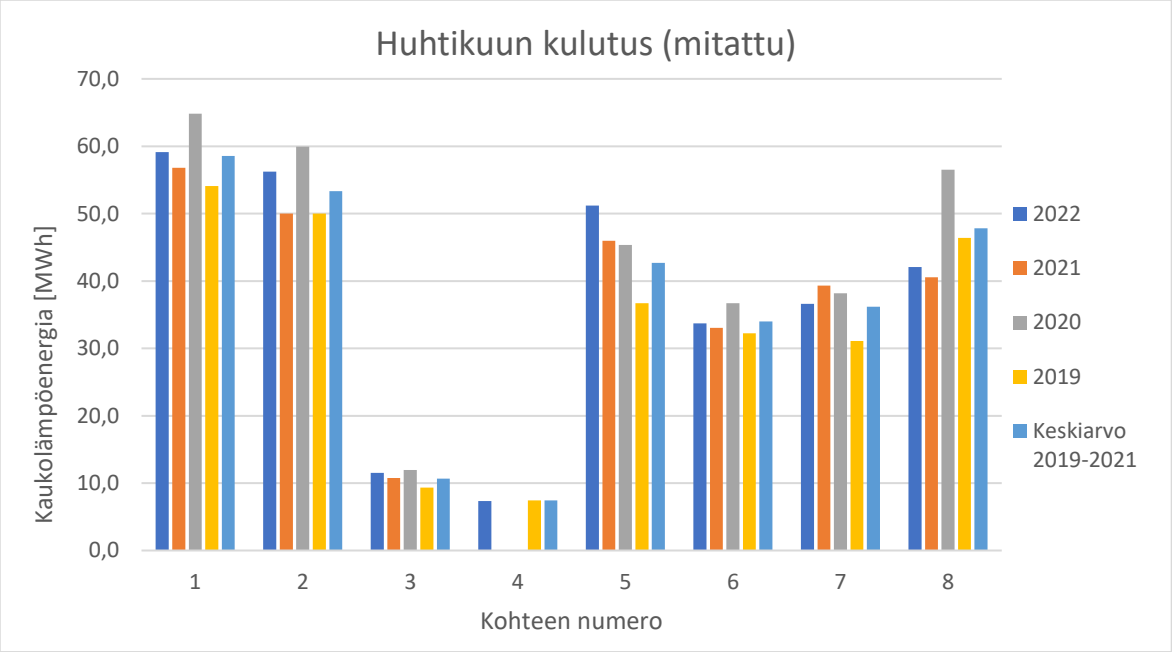
jossa E_{LKV} on lämpimän käyttöveden lämmitykseen kuluva energia $[kWh/m^3]$ ja V_{LKV} on lämpimän käyttöveden tilavuus $[m^3]$.

Veden lämmitykseen arvioidaan kuluvan 58 kWh/m^3 energiaa ja lämpimäksi käyttövedeksi arvioidaan menevän 40 % kokonaisvedenkulutuksesta alla olevan kaavan mukaisesti. (Motiva Oy 2022, 7.)

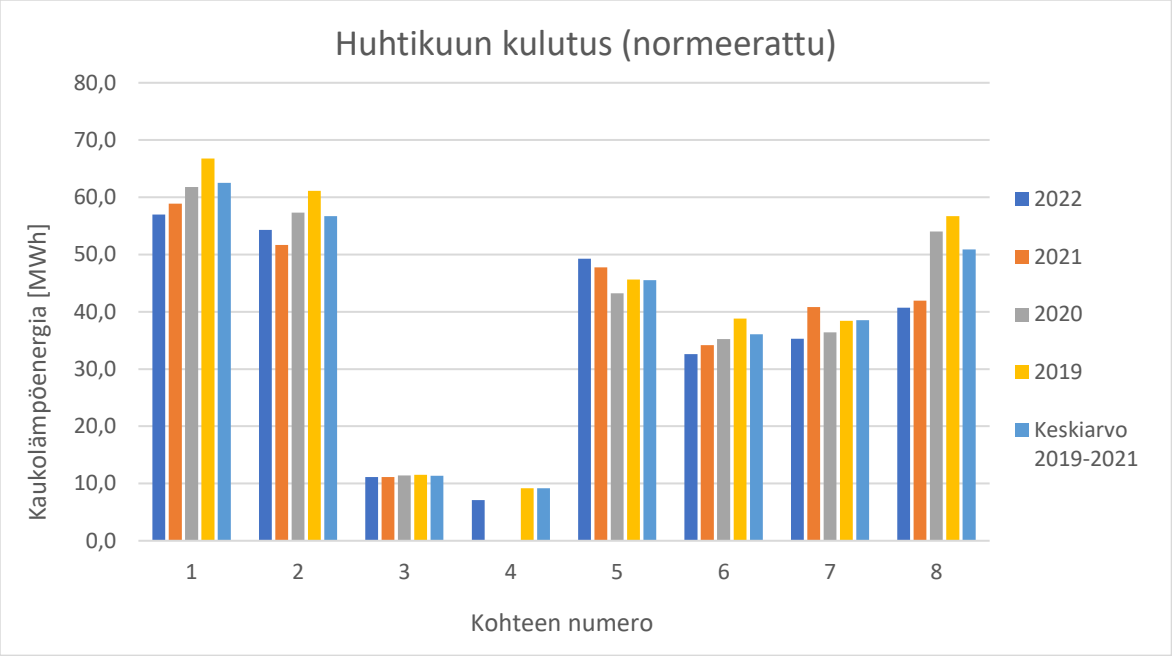
$$V_{LKV} = 0{,}4 \times V_v \tag{6}$$

jossa V_v on kiinteistön kokonaisvedenkulutus $[m^3]$.

Kaukolämpöenergian kulutuslukemat huhtikuulle ja toukokuulle ilman normeerausta sekä normeerattuna ovat esiteltynä alla olevissa kuvaajissa.



Kuva 32. Mitatut kaukolämpöenergian kulutuslukemat huhtikuulle kysyntäjoustojen ajalta vuonna 2022 sekä vertailuvuosilta 2019–2021.

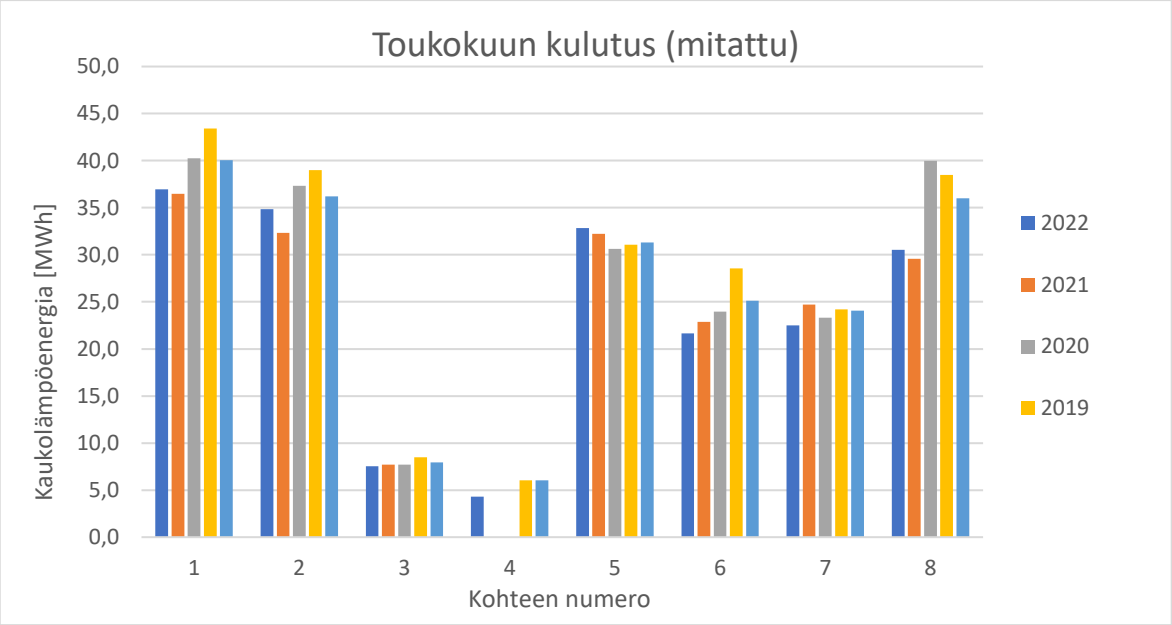


Kuva 33. Normeeratut kaukolämpöenergian kulutuslukemat huhtikuulle kysyntäjoustojen ajalta vuonna 2022 sekä vertailuvuosilta 2019–2021.

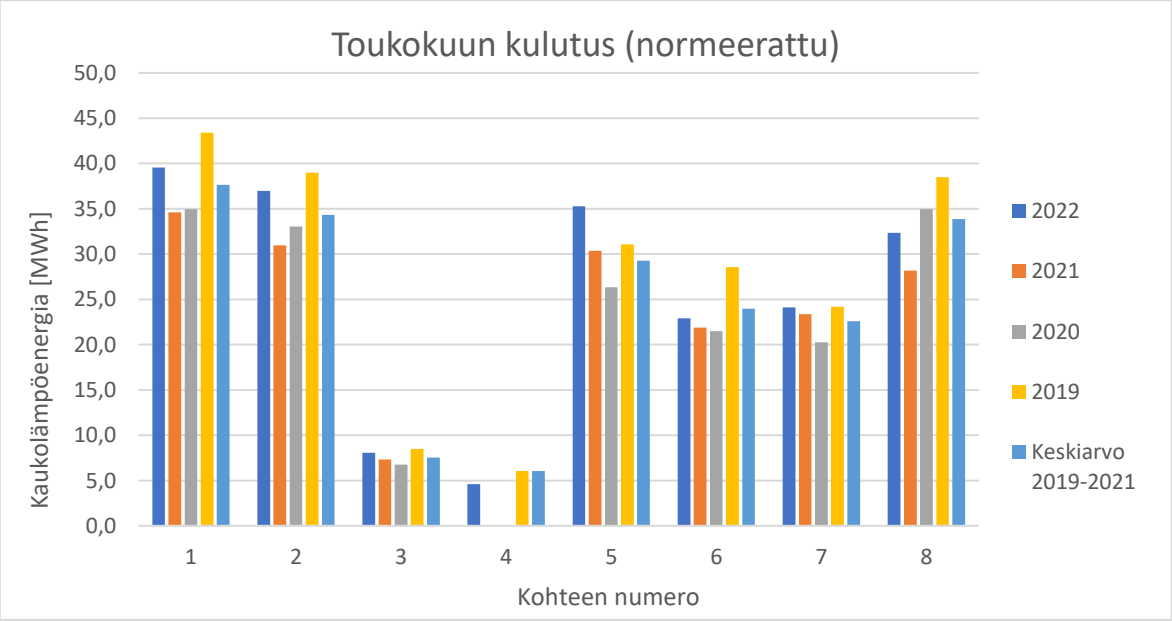
Huhtikuun osalta kaikilla paitsi kohteella 5 havaittiin vuoden 2022 normeeratun energiankulutuksen olevan alhaisempi kuin keskiarvokulutuksen vuosilta 2019–2021. Kohteen 5 kohdalla on otettava huomioon, että kyseinen kohde oli viimeisimmäksi manuaalisten kysyntäjoustojen osalta käyttöönotettu kohde aloituspäivämäärällä 14.4.2022, jolloin huhtikuun osalta ensimmäisen 2 viikon aikana kohteessa ei vielä ollut ajastettuja kysyntäjoustoja. Lisäksi kohteen 5 kaukolämpöenergian kulutus on ollut ylöspäin suuntautuvassa trendissä jo ennen kysyntäjoustojen käyttöönottoa.

Vaikka kohteiden energiankulutukset vähenivät edellisvuosien keskiarvoon verrattuna, on huomattava, että rakennusten energiankäytön trendi on ollut suurimmassa osassa kohteista jo valmiiksi laskevaa, eikä kysyntäjouston osuutta muihin mahdollisiin energiansäästötoimiin verrattuna pystytä tarkasti arvioimaan. Energiankäytön väheneminen on ajastettujen kysyntäjoustojen, huipputehonrajoituksen ja huonekohtaisen kompensoinnin sekä muiden mahdollisten energiansäästötoimenpiteiden summa. Lisäksi on muistettava, että kysyntäjouston ensisijainen tehtävä ei ole kaukolämpötoimijan kannalta energiankulutuksen vähentäminen vaan tehopiikkien ajallinen siirto. Tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että kohteissa ei havaittu joustojaksojen jälkeiseen tehonpalautukseen

liittyvää mahdollista energiankulutuksen kasvua ainakaan siinä määrin, että vuoden 2022 tarkastelujaksolla kulutus olisi ollut vertailuvuosia suurempaa.



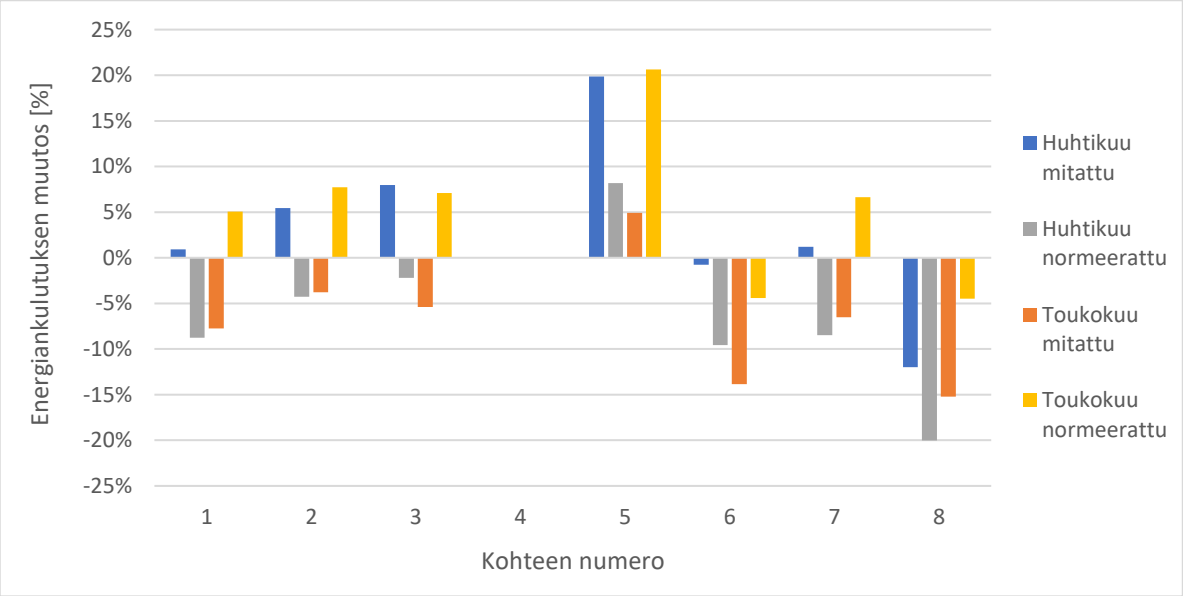
Kuva 34. Mitatut kaukolämpöenergian kulutuslukemat toukokuulle kysyntäjoustojen ajalta vuonna 2022 sekä vertailuvuosilta 2019–2021.



Kuva 35. Normeeratut kaukolämpöenergian kulutuslukemat toukokuulle kysyntäjoustojen ajalta vuonna 2022 sekä vertailuvuosilta 2019–2021.

Toukokuun osalta vuoden 2022 normeeratut tulokset taas olivat pääsääntöisesti suurempia kuin edellisen kolmen vuoden keskiarvot. Datasta voidaan kuitenkin havaita, että hajonta edellisiltä vuosilta on sen verran suurta, ettei vuoden 2022 suurempia kulutuslukemia voida olettaa johtuvan ainakaan täysin kysyntäjoustotoimista. Normeerauksen luotettavuus myös heikkenee ulkolämpötilojen kasvun myötä, mikä osaltaan voi aiheuttaa datassa näkyvää hajontaa. Heikentyminen johtuu sisälämpötiloja lähestyvistä ulkolämpötiloista, sekä oletuksesta, jonka perusteella keskilämpötilaltaan +10°C päiviä ei huomioida lämmitystarveluvun laskennassa, ja oletetaan kiinteistöjen lämmityksen loppuvan ja alkavan ulkolämpötilan ylittäessä tai alittaessa raja-arvon (Motiva Oy 2022, 1). Ei normeeratun datan kuvaajaa tarkastellessa voidaan huomata vuoden 2022 toukokuun kulutuksen olevan yhtä kohdetta lukuun ottamatta pienempi kuin edellisen kolmen vuoden keskiarvo.

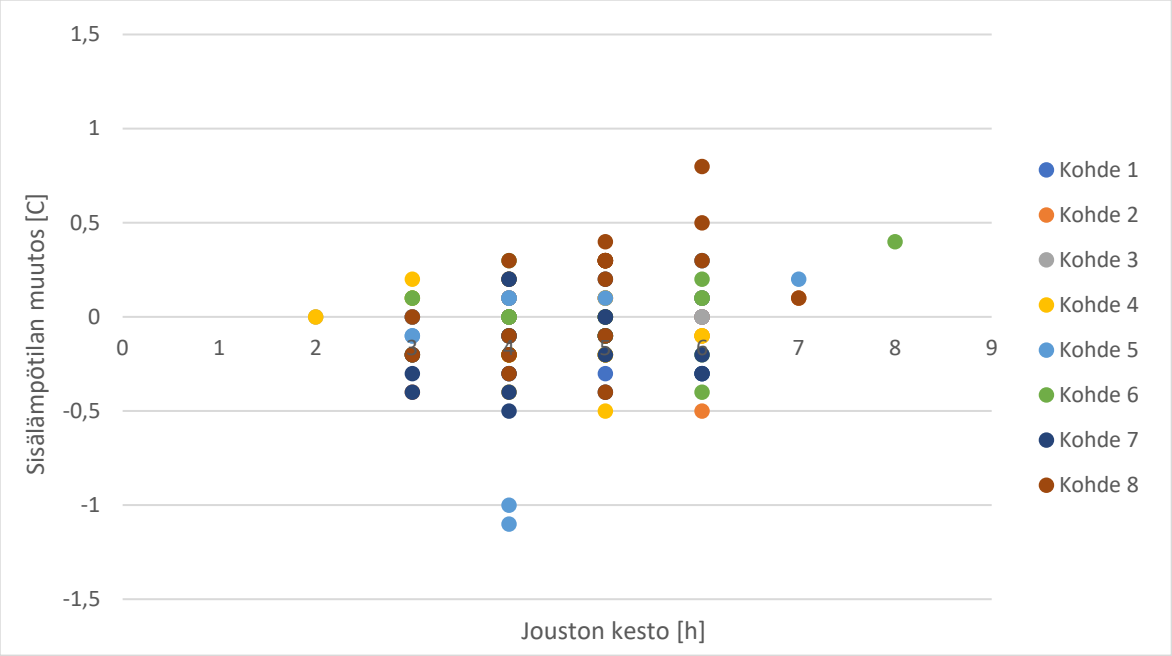
Prosentuaalinen energiankäytön muutos vuoden 2022 osalta verrattuna edellisen kolmen vuoden keskiarvoon on esiteltynä alla olevassa kuvaajassa 36. Kohteen neljä osalta data oli puutteellista, jonka takia kyseisen kohteen prosentuaalisia energiankäytön muutoksia ei alla olevassa kuvaajassa esitetä.



Kuva 36. Energiankulutuksen muutokset vuoden 2022 kysyntäjoustojen ajalta vuosien 2019–2021 keskiarvoon verrattuna.

Erityisesti datasta erottuu kohde 5, jossa huhti- ja toukokuun kulutusmäärät ovat merkittävästi edellisen kolmen vuoden keskiarvoa suurempia, sekä kohde 8, jossa kulutusmäärät ovat taas merkittävästi edellisen kolmen vuoden keskiarvoa pienempiä.

Joustojaksojen aikana tutkittiin myös sisälämpötilojen käyttäytymistä saman tarkastelujakson 1.4.2022 – 13.5.2022 aikana. Alla esitetyssä kuvaajassa on esitettynä kaikkien kohteiden sisälämpötilojen keskiarvon muutokset tarkastelujakson joustojen aikana. Keskiarvolla tarkoitetaan huoneistokohtaisten lämpötilamittausten keskiarvoa kiinteistön asuntojen kesken.



Kuva 37. Joustokohteiden sisälämpötilan keskiarvon muutokset joustojen aikana tarkastelujaksolla 1.4.2022-13.5.2022.

Kuvaajasta nähdään, että sisälämpötilojen keskiarvon muutokset ovat olleet tarkastelujakson joustojen aikana hyvin pieniä, eikä joustojaksojen pituutta tai voimakkuutta ole tarvinnut sisälämpötilojen muutosten takia rajoittaa tarkastelujakson aikana. Tapahtuneisiin lämpötilamuutoksiin voidaan olettaa vaikuttaneen enemmän ulkolämpötilan vaihtelut kuin tehdyt kysyntäjoustotoimet.

Suurimmat kohdekohtaiset sisälämpötilan keskiarvon alenemat joustojen aikana ovat listattuna alla olevassa taulukossa.

Taulukko 4. Kohteiden suurimmat sisälämpötilan alenemat tarkastelujakson aikana.

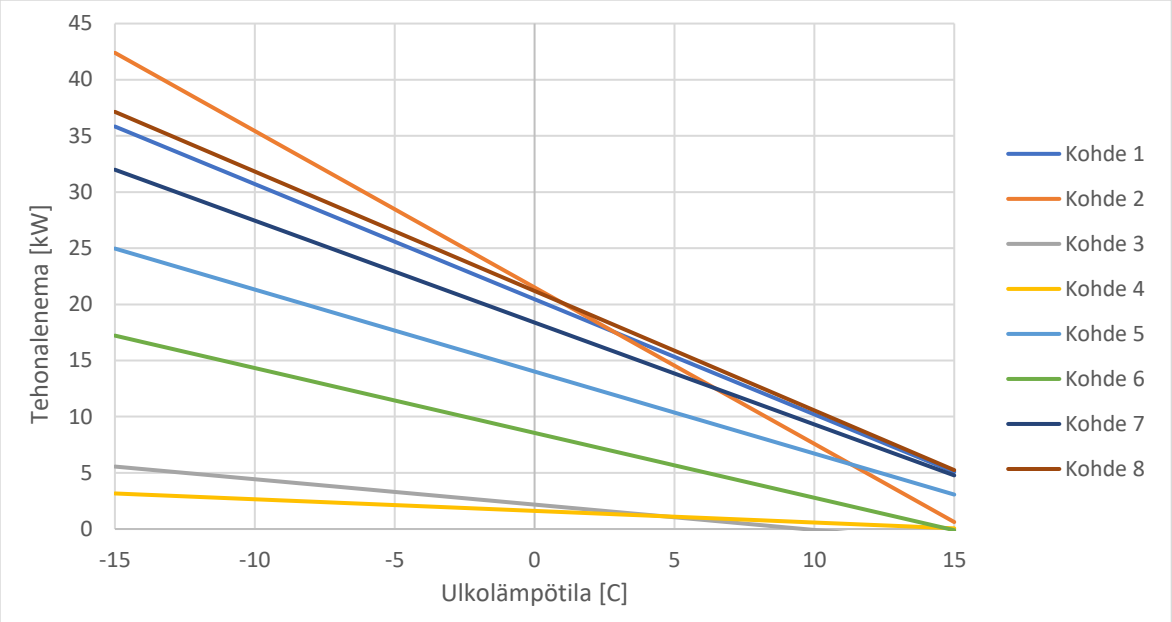
	Kohde 1	**Kohde 2**	**Kohde 3**	**Kohde 4**	**Kohde 5**	**Kohde 6**	**Kohde 7**	**Kohde 8**
K.a. lämpötilan muutos [C]	-0,3	-0,5	-0,2	-0,5	-1,1	-0,4	-0,5	-0,4

Tuloksista tulee huomata käsittelyjakson aikana vallitsevat ulkolämpötilat, jotka olivat tyypillisiä huhtikuun ja toukokuun alun lämpötiloja, ja täten sisälämpötilan muutokset jäivät oletetusti pienemmiksi kuin mitä kovempien pakkasjaksojen aikana havaittaisiin. Sisälämpötilat myös käyttäytyivät vuorokauden ajasta riippuen joustojen aikana hyvin erilaisesti, ja esimerkiksi aamupäivälle ajastetun kysyntäjouston aikana pystyttiin havaitsemaan, että keskiarvo sisälämpötila oli laskemisen sijasta noussut joustojakson aikana oletetusti auringon säteilyn aiheuttaman lämmön myötä.

Joustopyynnön pituudella tai teholla ei myöskään todettu testijaksolla olevan merkittävää yhteyttä sisälämpötilan käyttäytymiseen joustojen aikana.

4.4.2. Kohteiden keskinäinen vertailu

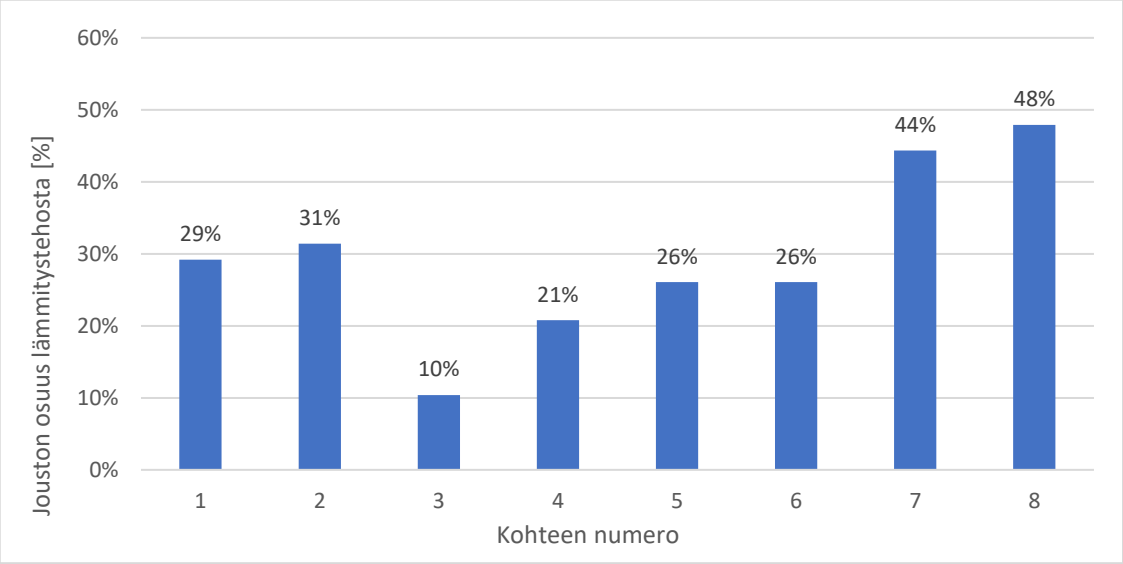
Kohteiden keskinäisessä vertailussa verrattiin teholukemia absoluuttisesti sekä prosentuaalisesti vertailujakson 1.4.2022-13.5.2022 tulosten perusteella. Alla olevassa kuvaajassa 38 on esitettynä eri kohteiden tehonalenemat ulkolämpötilan funktiona. Tehonalenemalla tarkoitetaan toteutunutta referenssitehon ja jouston aikaisen tehon lineaaristen sovitteiden erotusta tietyssä ulkolämpötilassa.



Kuva 38. Kohteiden tehonalenemat ulkolämpötilan funktiona.

Kuvaajasta nähdään, että oletusten mukaisesti tehoiltaan suurimmat sekä keskisuuret kiinteistökohteet pärjäävät absoluuttisessa vertailussa parhaiten. Teholtaan ja energiankulutukseltaan pienimmät kohteet 3 ja 4 taas pärjäsivät tarkastelussa heikoiten.

Prosentuaalisessa tehovertailussa käytetään vertailuarvona joustetun tehon osuutta sen hetkisestä referenssitehosta, eli tehosta, jonka kohde käyttäisi lämmitykseen tietyllä ulkolämpötilalla ilman kysyntäjoustoa. Prosentuaaliseen vertailuun valittiin mukaan joustojen osuuksien keskiarvo ulkolämpötilojen -15…+10 °C väliltä. Vertailun tulokset on esitetty alla olevassa kuvaajassa 39.



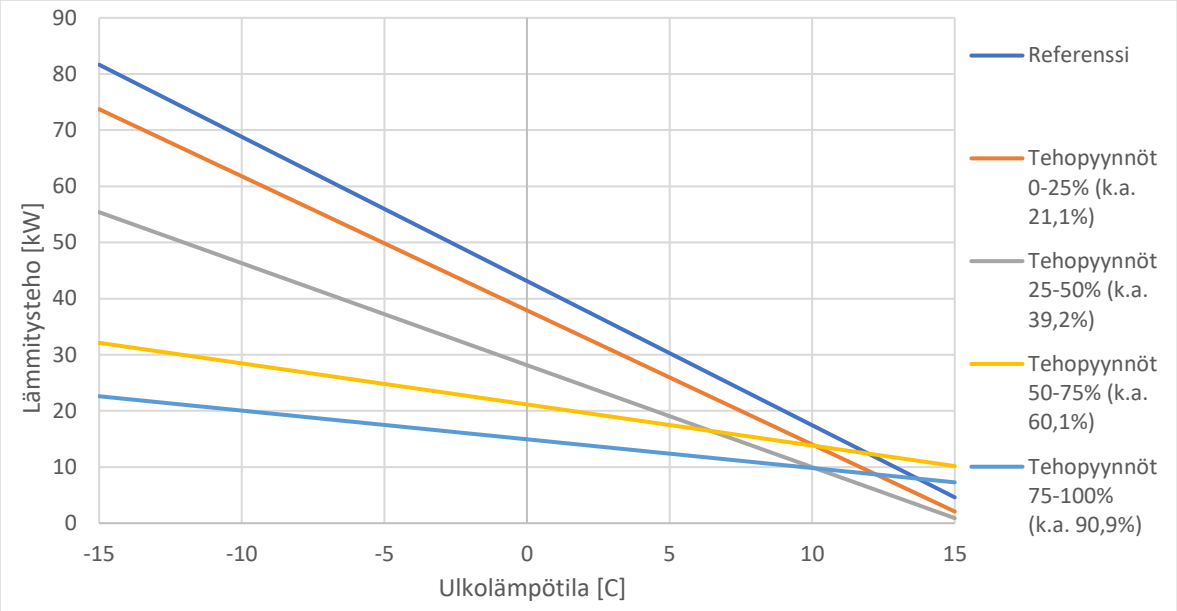
Kuva 39. Joustetun tehon prosentuaalinen osuus referenssitehosta keskiarvona ulkolämpötilojen -15…+10 ajalta.

Kuvaajasta havaitaan, että prosentuaalisessa tarkastelussa keskikokoluokan kohteet 7 ja 8 ovat parhaimpia, ja suurimmat kohteet eivät pärjää yhtä hyvin kuin absoluuttisessa tarkastelussa. Kaikista pienimpien kohteiden 3 ja 4 tulokset ovat myös suhteellisessa tarkastelussa heikoimpia.

4.4.3. Kysyntäjoustoparametrien vertailu

Kysyntäjoustoparametrien vertailuun valittiin aineiston määrän perusteella kohde 8, jossa manuaaliset kysyntäjoustot saatiin aloitettua jo 16.2.2022. Kohde 8 pärjäsi hyvin myös kohteiden keskinäisessä vertailussa, ja niiden tulosten perusteella oletetaan kohteen 8 olevan optimaalinen kysyntäjoustokohde eri joustopyyntöparametrien vertailuun.

Joustojen tehopyynnöt jaettiin aineiston määrän vuoksi neljään luokkaan. Kohteen 8 toteutuneiden teholukemien keskiarvot eri joustopyynnöillä ovat esitettynä alla olevassa kaaviossa ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 40. Kohteen 8 lämmitystehon käyttäytyminen erisuuruisilla kysyntäjouston tehopyynnöillä.

Vertaamalla toteutunutta lämmitystehon alenemaa referenssitehoon, voidaan eri tehoisten joustopyyntöjen prosentuaaliset tehonalenemat sen hetkisestä referenssilämmitystehosta esittää alla olevan taulukon mukaisesti. Taulukon toteutunut keskiarvo tehonalenema on kunkin tehopyyntöluokan keskiarvo-tehonalenema ulkolämpötilojen vaihteluväliltä -15…+10 ℃.

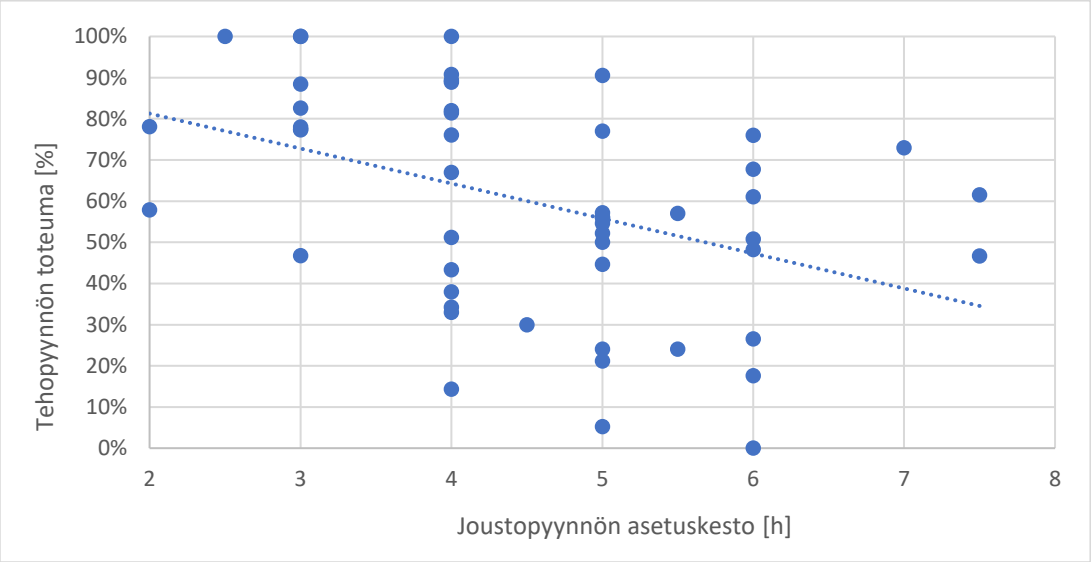
Taulukko 5. Kohteen 8 kysyntäjouston tehopyyntöjen prosentuaalinen toteuma.

Tehopyyntöjen vaihteluväli	Keskiarvo tehopyyntö	Toteutunut keskiarvo tehonalenema	Erotus
0–25 %	20,1 %	12,4 %	7,7 %
25–50 %	39,2 %	35,1 %	4,1 %
50–75 %	60,1 %	49,8 %	10,3 %
75–100 %	90,9 %	64,5 %	26,4 %

Prosentuaalisesta tarkastelusta voidaan havaita, että pienemmillä tehopyynnöillä olevat kysyntäjoustot toteutuvat keskimäärin melko hyvin annettuun tehopyyntöön nähden. Suurempien tehopyyntöjen osalta toteuma on kauempana annetusta tehopyynnöstä, ja

etenkin 75–100 % tehopyynnöillä olevat joustot jäävät keskimäärin yli 25 % päähän pyydetystä tehonalenemasta.

Kysyntäjoustopyyntöjen pituuden ja joustopyynnön toteutumisen välille ei saatu selkeää korrelaatiota tarkastelujakson ajalta. Variaatiota tuloksiin toivat tehopyynnön suuruus sekä ulkolämpötila ja ulkolämpötilan vaihtelut, jonka takia tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina. Alla olevassa kuvaajassa on esitettynä joustopyynnön toteutuminen jouston määritellyn keston funktiona.

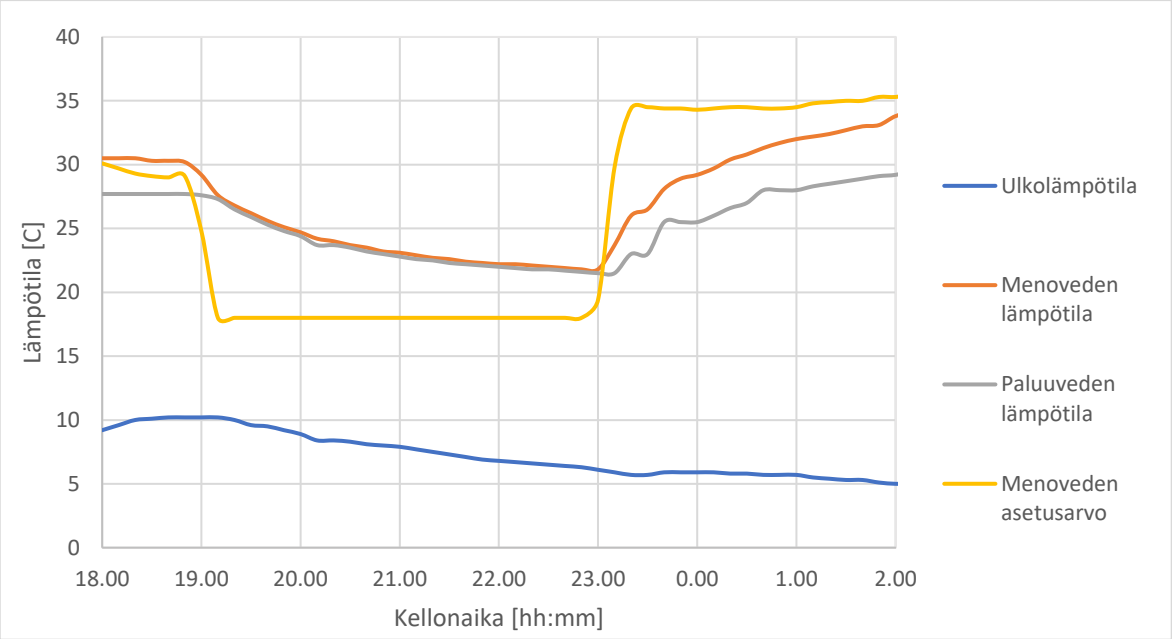


Kuva 41. Kohteen 8 joustopyynnön kesto jouston toteuman funktiona.

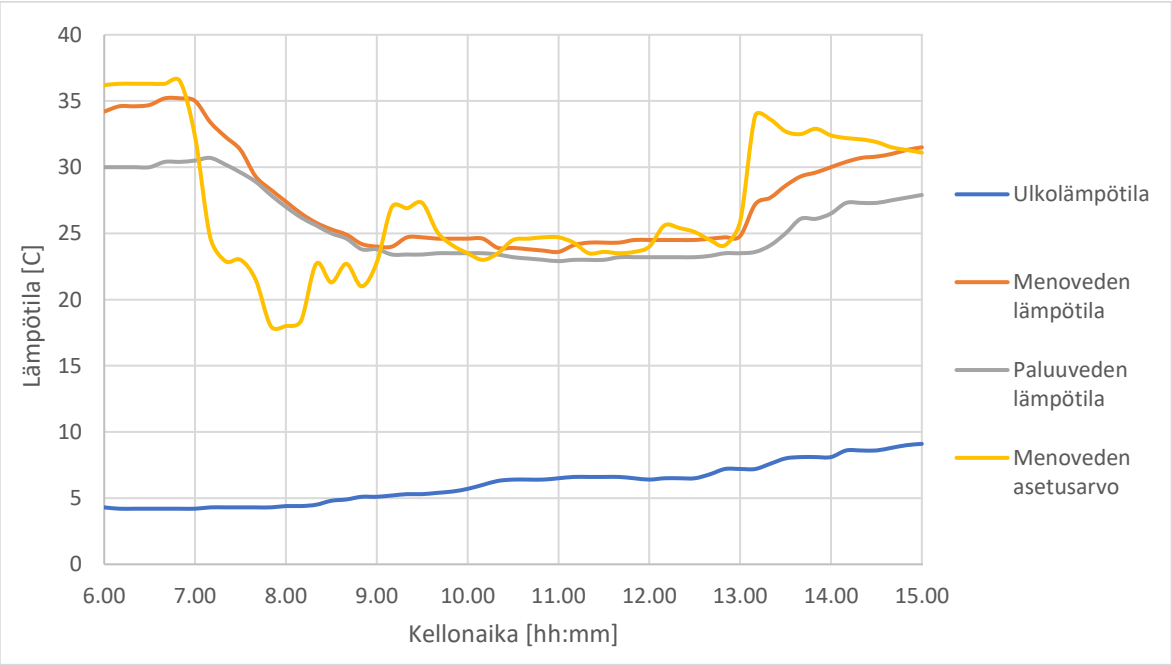
Suuresta variaatiosta huolimatta kuvaajasta voidaan nähdä trendiviivan olevan laskeva joustopyyntöjen keston kasvaessa. Testijakson aikana sisälämpötilan muutoksilla ei huomattu olevan rajoittavaa vaikutusta pidempikestoisten joustojen toteutumiseen. Pidempien joustojen aikana ulkolämpötilanvaihtelut ehtivät olla suurempia kuin lyhyillä jaksoilla, joka osaltaan vaikuttaa joustojen toteutumiseen.

Joustojen käyttäytyminen vaihtelee jakson aikana tapahtuvien ulkolämpötilan muutosten perusteella, ja on siten riippuvainen vuorokaudenajasta. Joustoja ohjaava ohjelmisto ottaa tavoitetehoksi joustojakson aloitushetkellä olevan laskennallisen lämmitystehon ja pyydetyn tehonaleneman erotuksen, ja pyrkii saavuttamaan tämän tavoitetehon koko joustojakson ajan. Tästä johtuen joustot toteutuvat eri lailla ulkolämpötilan laskiessa tai kasvaessa, kuten

alla olevista meno- ja paluuveden lämpötilojen kuvaajista voidaan havaita. Molemmissa kuvaajissa kiinteistökohde on sama sekä tehopyynnöt ovat yhtä suuria.



Kuva 42. Jouston käyttäytyminen laskevan ulkolämpötilan aikana.



Kuva 43. Jouston käyttäytyminen nousevan ulkolämpötilan aikana.

Laskevan ulkolämpötilan aikana lämmitysteho kasvaa luonnostaan, joten joustopyynnön aloitushetkellä määriteltyä tavoitetehoa on vaikeampi saavuttaa joustojakson aikana. Tämä voidaan nähdä esimerkiksi menoveden asetusarvosta, joka pyrkii alentamaan tehoa maksimaalisesti koko joustojakson ajan. Nousevan ulkolämpötilan aikana joustopyynnön aloitushetkellä määritelty tavoiteteho taas saavutetaan helpommin, sillä lämmitysteho pienenee luonnostaan lämpenevän ulkolämpötilan mukaisesti. Kuvaajassa saavutettu tavoiteteho näkyy menoveden asetusarvon heiluntana, jonka avulla ohjelmisto pyrkii pitämään lämmitystehon tavoitetehon lukemissa.

Edellä mainitut havainnot liittyvät vahvasti kyseisen kysyntäjoustoja ohjaavan ohjelmiston toimintaan, eivätkä välttämättä toteudu samoin, mikäli ohjelmisto määrittää tavoitetehon joustojakson aikana edellä mainitusta tavasta poiketen.

4.4.4. Kysyntäjouston potentiaali kaukolämpöverkossa

Tässä kappaleessa on tarkoitus selvittää kuinka paljon teoreettista joustopotentiaalia olisi saatavilla, mikäli oletetaan että kaukolämpöverkon muut asuinkiinteistöt käyttäytyisivät pilotista saatujen tulosten kaltaisesti.

Kysyntäjouston potentiaalin selvityksen syynä on hankkia tietoa kaukolämpöverkon teoreettisestä maksimaalisesta joustotehosta, jota olisi mahdollista hyödyntää esimerkiksi äkkinäisiin häiriötilanteisiin reagoimisessa tai lämpökeskusten käynnistysten määrän vähentämiseksi suurten tehopiikkien aikana. Selvitetyn maksimaalisen joustopotentiaalin hyödyntäminen kaukolämpöverkossa vaatisi sen, että kaikki kaukolämpöverkon potentiaaliset kohteet olisivat laitteistojen sekä ohjelmistojen kannalta toimintavalmiita kysyntäjoustojen ajamista varten.

Potentiaalin selvittämiseksi pilotin kahdeksan kohdetta jaettiin tulosten perusteella karkeasti kahteen eri teholuokkaan, jossa tehona käytetään kiinteistöjen kaukolämmön laskutustehoa. Laskutusteholla tarkoitetaan kohteen kolmen tunnin suurinta tehokeskiarvoa redusoituna mitoituslämpötilaan -32 ℃.

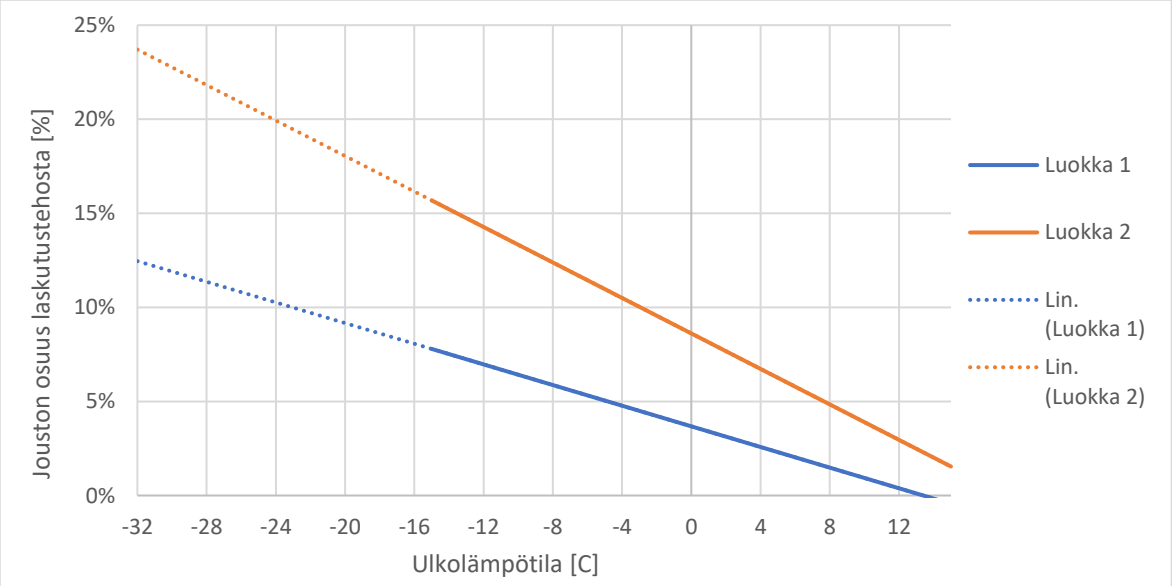
Kohteiden laskutustehot ja jako ovat esiteltynä alla olevassa taulukossa.

Taulukko 6. Kohteiden jako pienitehoisiin ja suurempitehoisiin kohteisiin.

	Kohde 1	Kohde 2	Kohde 3	Kohde 4	Kohde 5	Kohde 6	Kohde 7	Kohde 8
Laskutusteho [kW]	258	246	49	35	166	147	185	196
Luokka	2	2	1	1	2	2	2	2

Karkea jako perustui tehonalenemien laskennasta saatuihin tuloksiin, josta pienitehoiset kohteet erottuivat absoluuttisessa sekä prosentuaalisessa tarkastelussa heikoimmin suoriutuviksi. Muiden kohteiden osalta ei havaittu selkeää korrelaatiota tulosten ja laskutustehon väliltä, joten muut kohteet luokiteltiin samaan luokkaan. Kohteiden kesken lasketaan tehonalenemien keskiarvo, jota verrataan kohteiden laskutustehoon, ja täten saadaan kullekin luokalle jouston prosentuaalinen osuus laskutustehosta ulkolämpötilan funktiona.

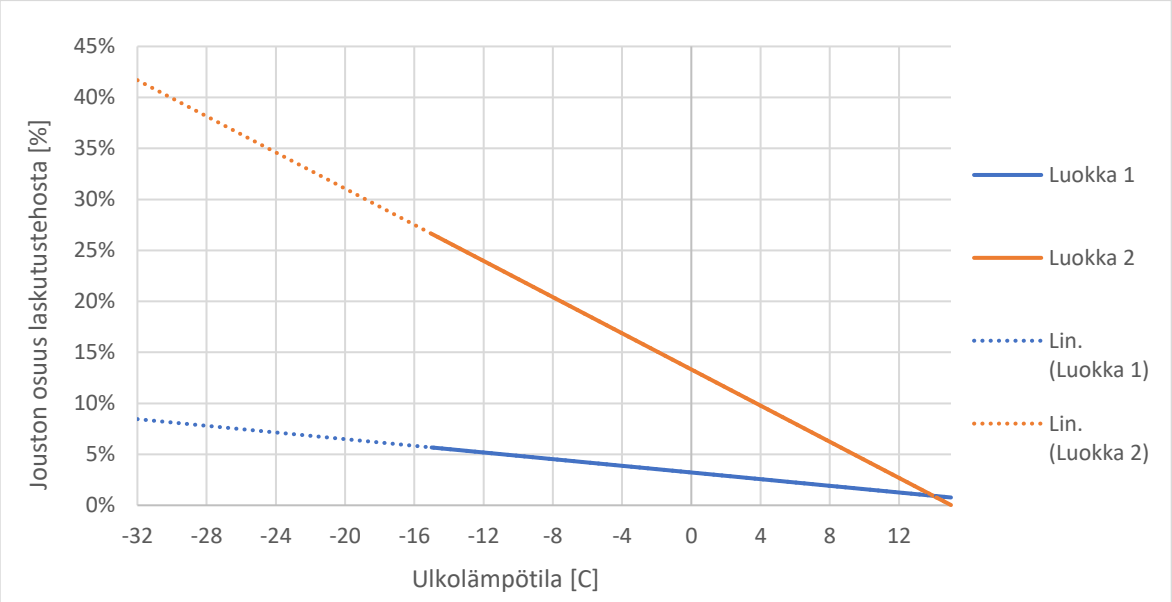
Kohteiden jousto-osuudet tyypillisillä joustopyynnöillä ovat esiteltynä alla olevassa kuvaajassa 44.



Kuva 44. Kohteiden jousto-osuudet laskutustehosta ulkolämpötilan funktiona 25–100 % tehopyynnöillä, jossa keskiarvo tehopyyntö on 60 %.

Suurimman teoreettisen tehopotentiaalin selvittämiseksi tehonalenemat selvitettiin myös ainoastaan 75–100 % tehopyynnöltään olevien joustojen osalta. Näiden joustojen keskimääräinen tehopyyntö oli 85 %.

Joustojen tehonalenemat suuremmilla tehopyynnöillä laskutustehoon suhteutettuna ovat esiteltynä alla olevassa kuvaajassa 45.



Kuva 45. Kohteiden jousto-osuudet laskutustehosta ulkolämpötilan funktiona 75–100 % tehopyynnöillä, jossa keskiarvo tehopyyntö 85 %.

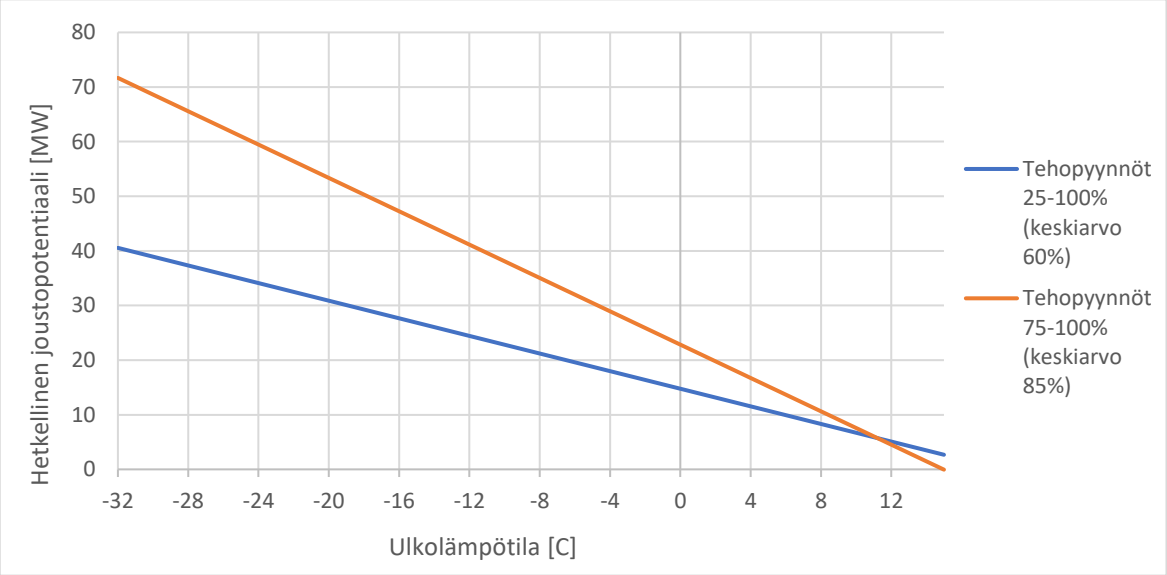
Puutteellisen datan vuoksi molempia edellä esiteltyjä datasarjoja on jouduttu jatkamaan lineaarisella sovitteella, jotta tulokseksi saadaan joustopotentiaalilukemia myös kovempien pakkasten ajalta.

Kuvaajista huomataan selkeä ero luokan 2 kohteissa, joiden osalta suurimmilla tehopyynnöillä tehdyt joustot toteutuvat merkittävästi paremmin. Luokan 1, eli pienitehoisten kohteiden kohdalla, tulokset 85 % keskiarvotehopyynnöllä osalta ovat huonommat kuin 60 % keskiarvotehopyyntöjen osalta. Tätä muutosta voi selittää esimerkiksi pienempien kohteiden tehokäyriä tarkastellessa havaittavissa oleva todella suuri joustotulosten keskinäinen vaihteluväli.

Suurimpien tehopyyntöjen osalta on myös otettava huomioon se, että 75–100 % lämmitystehon aleneman pyynnöllä tehdyillä joustoilla voi olla merkittäviä vaikutuksia sisälämpötiloihin etenkin kovempien pakkasjaksojen aikana, eivätkä ne välttämättä sovellu heikosti lämpöä varaaville kiinteistöille. Maksimipotentiaalin selvityksessä kuitenkin tehdään oletus, että kaikki rakennukset käyttäytyvät esimerkkikohteiden keskiarvon kaltaisesti eri tehopyyntöjen osalta.

Käyttäen edellä laskettuja prosenttiosuuksia, tutkitaan Kuopion Energian kaukolämpöverkon rakennusmassaa ilmoitettujen rakennuskohtaisten kaukolämmön laskutustehojen perusteella.

Aikaisemmin saatujen tulosten perusteella jätetään tarkastelun ulkopuolelle laskutusteholtaan alle 50 kW suuruiset kohteet, ja oletetaan muiden kohteiden käyttäytyvän keskimäärin samoin kuin edellä esitellyn luokan 2 kohteet. Tarkasteluun otetaan mukaan vain asuinkerrostalot sekä rivi/paritalot, sillä kysyntäjouston käyttäytyminen muun tyyppisissä kiinteistöissä jää tämän työn rajauksen ulkopuolelle.



Kuva 46. Arvioitu hetkellinen joustoteho kaukolämpöverkon asuinkiinteistökohteissa.

Tarkastelussa on mukana yhteensä 1339 kappaletta asuinkiinteistöä, joiden keskimääräinen laskutusteho on 128,1 kW. Kaikkien kohteiden teoreettinen joustopotentiaali tarkastelun

pienemmillä joustopyynnöillä mahdollistaisi jopa hetkellisen 40,6 MW tehonaleneman ja suuremmilla joustopyynnöillä jopa 71,7 MW tehonaleneman -32 °C ulkolämpötiloissa.

On kuitenkin huomattava, että teoreettisen potentiaalin arviointiin käytetty otanta rakennusten määrän sekä tarkastellun ajanjakson osalta on todella pieni, ja tuloksia voi parhaimmillaan käyttää suuntaa antavina. Joustojaksojen pituudet voivat jäädä myös erittäin lyhyiksi tai olla toteutumatta laisinkaan kovempien pakkasjaksojen aikana.

Tuloksista kuitenkin voidaan nähdä, että asuinkiinteistöjen kysyntäjoustolla on merkittävästi tehonpudotuspotentiaalia ja joustotoimien avulla olisi mahdollista korvata hetkellisesti pienempien tai keskisuurten lämpökeskusten käynnistystarve esimerkiksi häiriötilanteissa tai muutoin hetkellisten tehopiikkien aikana. Kuopion energian lämpökeskukset vaihtelevat teholtaan pienemmistä siirrettävistä laitoksista suurempiin lämpökeskuksiin. Pienimmissä lämpökeskuksissa on kaksi kappaletta kattilateholtaan 3,7 MW kattilaa, ja suurimmissa keskuksissa kaksi kappaletta 40 MW kattilaa. Lämpökeskuksia kaukolämpöverkon alueella on yhteensä seitsemän kappaletta, ja pienempiä siirrettäviä lämpökeskuksia kaksi kappaletta. (Kuopion Energia Oy 2022)

5. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä kappaleessa käydään läpi työn tärkeimmät tulokset ja tehdään niitä hyödyntäen johtopäätöksiä, sekä vertaillaan tuloksia muihin vastaaviin tutkimustuloksiin. Lopuksi käydään läpi myös työn tulosten rajoitteita sekä esitetään ehdotuksia jatkotutkimukselle.

5.1. Yhteenveto

Työssä perehdyttiin kaukolämmön kysyntäjouston käsittelyyn suomalaisissa asuinkiinteistöissä. Sisältö jakautui kahteen isompaan osioon, joita olivat teoreettinen osuus sekä tutkimusosuus.

Teoreettinen osuus käsitteli kaukolämpötoiminnan periaatteita ja siihen liittyviä erityispiirteitä sekä näiden vaikutusta kaukolämmön kysyntäjouston toteuttamiseen. Kaukolämpötoiminta on Suomessa todella merkityksellinen lämmitysmuoto, ja sen markkinaosuus kaikista lämmitysmuodoista oli lähes puolet vuonna 2020. Kaukolämpötuotanto on keskittynyt yhteistuotantoon, jossa käytetyt polttoaineet ovat siirtyneet jatkuvasti kohti vähempipäästöisiä polttoaineita. Kaukolämpötoimijoilla on kuitenkin tarpeita toiminnan kehittämiselle, esimerkiksi kallistuvista päästöoikeuksista ja tiukentuvista päästörajoituksista johtuen. Kaukolämpötoiminnan kannattavuuden, tehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi on olemassa useita erilaisia kehityskohteita. Yksi energiankäytön optimoinnin työkalu on kaukolämmön kysyntäjousto.

Teoriaosuus perehtyi myös tarkemmin kaukolämmön kysyntäjouston toimintaperiaatteeseen, jouston tarpeen muodostumiseen, hyötyihin ja haittoihin, mahdollisiin haasteisiin sekä erilaisiin käytännön ohjaustapoihin, joiden avulla kysyntäjoustoja voidaan suorittaa. Kaukolämmön kysyntäjoustolla tarkoitetaan ohjaustoimia, joilla voidaan vaikuttaa asiakkaan energiankäyttöön siten, että lämmöntarpeen ajoitusta pystytään siirtämään energiajärjestelmän kannalta optimaalisempaan ajankohtaan. Lämmöntarpeen ajoituksen muuttamisella tarkoitetaan pääsääntöisesti kaukolämmöntarpeen kulutushuippujen siirtämistä toiselle ajankohdalle, jolloin tarvittava lämpöenergia voidaan tuottaa edullisemmin tai muutoin suuremman hyödyn

mahdollistavalla tavalla. Käytännön keinoja kiinteistön hetkellisen lämpötehontarpeen alentamiselle ovat ilmanvaihdon rajoitus, lämpimän käyttöveden rajoitus sekä patteriverkoston kiertoveden lämpötilan alentaminen.

Kaukolämmön kysyntäjouston tavoitteena on siirtää kulutushuippuja, ja tasata siten kaukolämmön energiantarvetta ajallisesti, jotta kaukolämpöjärjestelmää voidaan ajaa kokonaisuutena tehokkaammin. Tarve kuormituksen tasoittamiselle syntyy muuttuvasta lämmöntarpeesta, joka vaihtelee vahvasti vuorokauden- ja vuodenajasta riippuen. Erot kaukolämmön tarpeessa ovat merkittäviä eri viikkojen, kuukausien sekä vuosien välillä, johtuen muun muassa erilaisista sääolosuhteista. Lämmöntarpeen vaihteluun vaikuttaa suuresti myös kaukolämpöverkon asiakastyyppien jakauma, sillä lämmöntarpeen vaihtelut asuinrakennusten ja erilaisten julkisten rakennusten sekä teollisuuden rakennusten välillä ovat suuria. Erilaisten rakennusten väliset erot kaukolämmön kulutusprofiilissa johtuvat esimerkiksi rakennuksen käyttöajoista, käyttötyypistä sekä mahdollisista käytössä olevista energiansäästötoimista.

Kaukolämmön kysyntäjouston avulla pystytään saavuttamaan useita eri hyötyjä kaukolämpötoimijalle sekä loppuasiakkaalle. Kaukolämpötoimijan kannalta tärkeimpiä mahdollisia hyötyjä ovat lämmön- ja sähköntuotannon optimointi, kuten huipputuotannon määrän vähentäminen ja peruslämmön määrän lisääminen sekä CHP-laitosten sähkön tuotannon ajoitus sähkön hintasignaalin perusteella kalliin sähkön ajalle. Muita potentiaalisia hyötyjä ovat verkon kapasiteetin lisäämiseksi vaadittavien investointien lykkääminen, kaukolämpöverkon putkistojen tehokkaampi hyödyntäminen, ympäristöhaittojen ehkäiseminen sekä mahdollinen energiansäästö. Kysyntäjoustosta saadut hyödyt ovat hyvin kaukolämpöverkkokohtaisia, ja niihin vaikuttaa kulutusprofiilin lisäksi esimerkiksi kaukolämpöverkon rakenne, lämmön varastointikyky ja kaukolämmön tuotantorakenne. Kaukolämpöasiakkaan saamia hyötyjä ovat esimerkiksi alhaisemmat energia- ja lämmityskulut sekä kuluttajaa koskevien palveluiden kehittyminen.

Kysyntäjouston hyödyntämiseen osana kaukolämpötoimintaa liittyy saatavien hyötyjen lisäksi myös haasteita. Haasteet liittyvät pääosin kaukolämpöjärjestelmän vaikeampaan hallittavuuteen, ennakoitavuuteen ja lämmityksen pitkiin aikavakioihin. Uhkana on esimerkiksi huonosti suunnitelluista kysyntäjoustoista aiheutuvat suuret tehopiikit, taloudellisen kannattavuuden varmistaminen sekä asiakastyytyväisyyden kärsiminen, mikäli joustotoimet aiheuttavat havaittavia muutoksia lämpötiloihin ja siten asumismukavuuteen.

Yhtenä haasteena ovat myös tarvittavat tekniset valmiudet, ja näiden vaihtelut kaukolämpöverkon sisällä sekä eri kaukolämpöverkkojen välillä.

Kysyntäjouston toteutukseen on olemassa useita erilaisia toimintamalleja, jotka sopivat eri kaukolämpöjärjestelmiin riippuen halutuista hyödyistä ja asiakaskunnasta sekä saatavilla olevista teknisistä ratkaisuista. Jousto voidaan toteuttaa ilman ohjaussignaalia ennalta määrätyn ajoituksen mukaisesti tai kaukolämpöyhtiön lähettämän ohjaussignaalin perusteella etähallinnan alaisille kiinteistöille tai järjestelmille. Joustoja on mahdollista ohjata myös toteutuksella, jossa asiakas osallistuu kysyntäjoustoon kaukolämpöyhtiön määrittämään tariffi- tai hintaohjaukseen perustuen. Asiakkaan kokeman palvelun laadun takaamiseksi on usein järkevintä toteuttaa kysyntäjouston vaatima asiakkaan hetkellinen lämpökuorman pienentäminen rajoittamalla kiinteistön lämmitykseen käytettävän patteriverkoston veden kiertolämpötilaa. Rajoitettaessa ilmanvaihdon lämmitystä tai lämpimän käyttöveden kulutusta ovat vaikutukset asiakkaalle usein nopeasti havaittavissa, joka halutaan minimoida asiakkaan kokeman palvelun laadun ylläpitämiseksi.

Työn varsinainen tutkimusosuus käsitteli Kuopion Energian kaukolämpöverkossa suoritettavaa kaukolämmön kysyntäjouston pilottihanketta, jonka tarkoituksena oli selvittää kiinteistöjen joustopotentiaali, saatavilla olevat hyödyt, sekä tehdä johtopäätöksiä kysyntäjouston skaalauksen mahdollisuuksista kaukolämpöverkon muihin kohteisiin. Pilottihankkeeseen osallistui yhteensä kahdeksan Kuopion alueella sijaitsevaa kaukolämmitteistä asuinkiinteistöä, joiden lämmitystehon hetkellinen rajoittaminen pilotin joustojaksojen aikana toteutettiin aikaohjauksena.

Kysyntäjoustojen toteutumista testattiin ajamalla tehopyynnöltään ja kestoltaan erisuuruisia joustoja pilottiin osallistuvissa kohteissa testijakson ajan. Tulokset tehon käyttäytymisestä ulkolämpötilan funktiona osoittivat kohteiden välillä olevan merkittäviä eroja, joista eniten erottui pilotin pienimpien joustokohteiden heikompi joustojen toteutuvuus muihin kohteisiin verrattuna. Prosentuaalisessa vertailussa parhaiten pärjäsivät pilotin kohteista teholtaan keskikokoluokan kohteet, sekä kaikista suurimmat kohteet. Tuloksista havaittiin myös, että samankaltaisesta teholuokasta huolimatta eri kohteiden välillä oli suuria eroja joustojen toteutumisen suhteen.

Tehojen käyttäytymisen lisäksi myös energiankulutusten muutoksia seurattiin. Normeerattujen kulutuslukemien vertailussa huhtikuun osalta kaikilla paitsi kohteella 5

havaittiin vuoden 2022 energiankulutuksen olevan alhaisempi kuin keskiarvokulutuksen vuosilta 2019–2021. Toukokuun osalta vuoden 2022 normeeratut kulutuslukemat taas olivat pääsääntöisesti suurempia kuin edellisen kolmen vuoden keskiarvot.

Testijakson aikana tallennetut sisälämpötilojen keskiarvon muutokset olivat pieniä, eikä joustojaksojen pituutta tai voimakkuutta tarvinnut rajoittaa sisälämpötilojen muutosten vuoksi.

Kysyntäjoustoparametrien vertailuun valittiin aineiston määrän perusteella kohde kahdeksan, joka pärjäsi hyvin myös kohteiden keskinäisessä vertailussa. Kyseinen kohde on vuonna 2000 valmistunut kerrostalo, jonka vuotuinen kaukolämpöenergiankulutus vuonna 2021 oli 540 MWh. Pienemmillä tehopyynnöillä olevat kysyntäjoustot toteutuivat keskimäärin melko hyvin annettuun tehopyyntöön nähden, kun taas suurempien tehopyyntöjen osalta toteuma on kauempana annetusta tehopyynnöstä. Kysyntäjoustopyyntöjen pituuden ja joustopyynnön toteutumisen välille ei saatu selkeää korrelaatiota tarkastelujakson ajalta, mutta suuresta variaatiosta huolimatta joustojen toteuman nähtiin näiden tulosten perusteella olevan laskeva joustopyyntöjen keston kasvaessa. Ulkolämpötilojen muutosten ja täten myös vuorokaudenajan vaikutus joustojen toteutumiselle pystyttiin myös havaitsemaan. Ohjelmiston toiminnasta johtuen lämpenevän ulkolämpötilan aikana joustopyynnön tavoiteteho saavutettiin helpommin ja kylmenevän ulkolämpötilan aikana tavoiteteho oli vaikeampi saavuttaa.

Kysyntäjouston potentiaalia Kuopion Energian kaukolämpöverkon osalta arvioitiin käyttämällä saatuja tuloksia, joiden avulla pyrittiin selvittämään kaukolämpöverkon teoreettista maksimijoustotehoa. Saatuja tuloksia hyödynnettiin siten, että heikoimmin pärjänneiden pienitehoisten kohteiden tulokset jätettiin laskennan ulkopuolelle, ja loppujen kohteiden tuloksista laskettiin keskiarvo, jonka oletettiin kuvaavan keskimääräisen asuinkiinteistön käyttäytymistä kysyntäjoustojen aikana. Kaukolämpöverkon 1339 asuinkiinteistön mahdollistama teoreettinen joustopotentiaali erisuuruisilla tehopyynnöillä selvitettiin, ja tulosten perusteella joustopotentiaalin todettiin olevan erittäin merkittävä, mikäli kaikki asuinkiinteistökohteet käyttäytyisivät pilotista saatujen tulosten kaltaisesti.

5.2. Johtopäätökset tuloksista

Työn alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin saatiin vastaukset, jotka olivat osittain ennakko-oletusten mukaiset ja osittain eivät. Tuloksiin vaikuttivat myös työn rajoitukset, joita on käsitelty tarkemmin myöhemmässä kappaleessa.

Joustojen toteutumien tehovertailussa absoluuttisesti ja prosentuaalisesti parhaiten pärjäsivät pilotissa mukana olleista kohteista energiankulutusmääriltään keskisuuret sekä suuret kiinteistökohteet. Näiden kohteiden kesken oli kuitenkin myös havaittavissa melko suuria eroja. Syitä kohteiden keskinäisille eroille voivat esimerkiksi olla kiinteistön koko- ja tehoerojen lisäksi erot lämmitysjärjestelmissä ja pattereiden jäähtymässä. Kiinteistön lämmitystehoon ja siten kysyntäjoustoihin vaikuttaa myös vallitseva ulkolämpötila, jonka vuoksi ulkolämpötilan mittausyksikön sijoituksella voi olla myös vaikutusta tehonmuutosten käyttäytymiseen. Osassa kohteista esimerkiksi havaittiin pakkasjakson aikana päivällä mitattuja yli 20 °C ulkolämpötiloja, joka voidaan olettaa johtuvan auringon paisteen osumisesta mittausyksikköön.

Parhaiten yksittäisistä kohteista pärjäsi kohde numero kahdeksan, joka on myös rakennusvuodeltaan kohteista uusin. Tutkimuksen otannan perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä kohteiden ja niiden lämmitysjärjestelmien rakennusvuoden vaikutuksesta tuloksiin, mutta voidaan olettaa eri kohteiden lämmitysjärjestelmien ja rakenteiden eroavaisuuksilla olevan vaikutusta kysyntäjoustojen toteutumiseen.

Pienempitehoiset kohteet olivat tarkastelun perusteella heikoimpia, johon syitä on luultavasti useampia. Mahdollisia tekijöitä ovat esimerkiksi pienistä tehomääristä johtuva liiallinen herkkyys, jolloin esimerkiksi vain muutaman kilowatin tehopyynnöllä olevan jouston aikana teho voi kokea luonnollista heiluntaa, jolloin ohjelmisto tulkitsee tavoitetehon olevan saavutettu ja ohjaa patteriverkoston menolämpötilan jatkuvan alentamisen sijasta sahaamaan koetun heilunnan mukaisesti. Virhettä voi aiheuttaa myös prosentuaalisesti isompi virhemarginaali käyttöveden osuuden arvioinnissa suurempiin kohteisiin verrattuna. Syynä pienempien kohteiden heikommalle toteumalle voisi olla heikompi kyky varastoida lämpöenergiaa, ja täten joustoja jouduttaisiin rajoittamaan liialti alentuneen sisälämpötilan takia. Työn testijakson aikana ei kuitenkaan havaittu tällaisia tuloksia, joka voidaan olettaa johtuvan myös vallinneista ulkolämpötiloista.

Kaukolämpöenergian kulutuksen suhteen normeeratut tulokset huhti- ja toukokuun osalta olivat ristiriitaisia. Huhtikuun osalta yhtä kohdetta lukuun ottamatta vuoden 2022 kysyntäjoustojen aikainen normeerattu kulutuslukema oli edellisen kolmen vuoden keskiarvoa alhaisempi. Tuloksista voidaan nähdä, että kohteissa ei havaittu joustojaksojen jälkeiseen tehonpalautukseen liittyvää mahdollista energiankulutuksen kasvua ainakaan siinä määrin, että vuoden 2022 huhtikuun tarkastelujaksolla kulutus olisi ollut vertailuvuosia suurempaa. Toukokuun osalta vuoden 2022 kysyntäjoustojen aikaiset normeeratut kulutuslukemat olivat pääsääntöisesti suurempia kuin edellisen kolmen vuoden keskiarvo. Kysyntäjoustoparametrejä ei muutettu toukokuuta varten, joten tulosten erilaisuus huhtikuuhun verrattuna on oletetusti ulkolämpötilaan perustuva. Neljän tarkasteluvuoden tulosten keskinäinen hajonta toukokuussa oli merkittävästi huhtikuuta suurempaa, joka voi olla seurausta korkeammasta ulkolämpötilasta johtuvasta normeerauksen luotettavuuden heikontumisesta. Tämän voidaan olettaa olevan osasyynä siihen, että tarkastellessa ei normeerattuja kulutusmääriä, voidaan toukokuun 2022 mitattujen kulutusmäärien havaita olevan yhtä kohdetta lukuun ottamatta pienempiä kuin edellisen kolmen vuoden keskiarvo. Virhemarginaalit huomioiden voidaan todeta toukokuun energiankulutuksen pysyneen melko samana kysyntäjoustoja sisältäneen vuoden ja referenssivuosien välillä.

Joustoparametrien keskinäisessä vertailussa tehopyynnöltään pienet ja keskisuuret joustot pärjäsivät hyvin, ja kohteessa kahdeksan tehtyjen testien perusteella todelliset joustojen aikaiset tehonalenemat pääsivät noin 4–10 % päähän määritellystä pyynnöstä. Suurimmilla tehopyynnöillä tehdyt joustot taas jäivät testeissä keskiarvollisesti noin 26 % päähän pyydetystä tehonalenemasta. Syitä tälle on esimerkiksi kysyntäjoustoihin liittyvät pitkät aikavakiot, jolloin suurella tehopyynnöllä tehty jousto voi saavuttaa tavoitetehonsa hieman hitaammin. Tällöin joustojakson aikana mitatut tehonalenemat ovat keskiarvoltaan pienempiä kuin pienempitehoisella joustopyynnöllä, jonka tavoiteteho saavutetaan nopeammin. Ennustettavuudessa pienemmällä tehopyynnöllä tehdyt joustot pärjäävät paremmin, mutta maksimaalisen tehonaleneman kannalta suuremmilla tehopyynnöillä olevat joustot kannattavat.

Ulkolämpötilan vaikutus joustettuun tehoon oli todella selkeä, ja sovitteiden mukaisesti parhaat tulokset joustolle saataisiin mahdollisimman kylmän ulkolämpötilan aikana. Todellisuudessa kovilla pakkasjaksoilla joustojen kesto voi jäädä lyhyeksi, johtuen sisälämpötilan aleneman aiheuttamasta jouston rajoituksesta. Suurimmassa osassa kohteista

myös havaittiin joustettujen tehomäärien heikentyvän todella pieniksi lähestyttäessä +10 °C ulkolämpötilaa.

Korrelaatio jouston toteuman ja keston välillä oli löyhä suuren variaation takia, mutta kohdenumero kahdeksan tulosten perusteella lineaarinen sovite näytti tulokseksi toteuman heikkenevän joustojakson pidentyessä. Syitä tälle voi olla esimerkiksi aikaisemmin mainitut kaukolämmön kysyntäjouston pitkät aikavakiot. Ulkolämpötilan vaihtelut myös ovat pidemmällä joustojaksolla suurempia, mikä voi osaltaan vaikuttaa toteumaan joko positiivisesti tai negatiivisesti, riippuen siitä onko ulkolämpötila joustojakson aikana laskeva vai nouseva. Ohjelmiston toiminnasta johtuen lämpenevän ulkolämpötilan aikana joustopyynnön tavoiteteho saavutetaan helpommin, ja kylmenevän ulkolämpötilan aikana tavoitetehoon on vaikeampi yltää. Joustoilla saavutetut tehonalenemat myös havaittiin olevan hyvin riippuvaisia vallitsevasta ulkolämpötiloista, ja joustetun tehon prosentuaalinen osuus suureni ulkolämpötilan kylmentyessä.

Teoriaosuudessa käsiteltiin jouston tarpeen muodostumista, jonka perusteella havaittiin, että joustoille suurimman hyödyn mahdollistama ajankohta joustotoimien suorittaminen tehopiikkien aikana. Asuinkiinteistöillä tehopiikit muodostuvat tyypillisesti lämpimän käyttöveden kulutuksen kasvusta, jota havaitaan tyypillisesti aamuisin sekä iltaisin, jolloin asukkaat ovat kodeissaan. Jouston avulla näitä tehopiikkejä voidaan loiventaa sekä siirtää ajallisesti kokonaiskuormituksen alentamiseksi. (Valor Partners Oy 2015, 9–10.)

Sisälämpötilojen muutokset jäivät oletettua pienemmiksi, eikä jouston tehopyynnön suuruudella tai joustojakson kestolla ollut huomattavaa vaikutusta sisälämpötilojen käyttäytymiseen. Joustojen toteumaa ei myöskään rajoitettu sisälämpötilan raja-arvon alittumisen takia, sillä lämpötilat pysyivät raja-arvojen sisäpuolella. Merkittävimpänä syynä tälle voidaan pitää testijaksojen aikana olevia ulkolämpötiloja, jotka olivat tyypillisiä huhtikuun ja toukokuun ulkolämpötiloja. Testausta ei päästy tekemään kovien ja jatkuvien pakkasten aikana, jolloin tulokset olisivat voineet olla erilaiset.

Kohteen numero kahdeksan kohdalla saatiin enemmän tuloksia myös pakkasjaksojen ajalta, mutta tulosten perusteella keskiarvosisälämpötilan muutokset olivat tällä jaksolla samansuuruisia kuin kaikkia kohteita koskevalla testijaksolla. Mitatut sisälämpötilan keskiarvon muutokset johtuivat oletetusti enemmän ulkolämpötilan vaihteluista joustojakson aikana, kuin itse joustotoimista. Tuloksista voidaan myös todeta, että kohteiden

lämmönsitomiskyky ja eristys olivat riittäviä testijakson aikana tehtyjen joustojen lämpötilavaikutusten minimoimiseksi.

Kaukolämpöverkossa olevan hetkellisen kysyntäjouston tehopotentiaalin tulokseksi saatiin joustopotentiaalin olevan jopa kymmenien megawattien suuruinen. Tulokset antavat osviittaa siitä, että kaukolämpöverkon asuinkiinteistökohteiden joustopotentiaalilla voisi olla merkittävä rooli esimerkiksi osana häiriötilanteissa tarvittavaa tehoreserviä, siten että lämpötehoa voidaan jouston avulla hetkellisesti pienentää. Myös pienemmällä määrällä kiinteistökohteita on saatavissa merkittävä määrä joustopotentiaalia, etenkin jos kysyntäjouston kannalta hyvin pärjäävät kohteet pystytään erittelemään tarkemmin. Tämän työn tulosten mukaan kaukolämmön kysyntäjouston skaalaus kannattaa toteuttaa suosimalla ensisijaisesti isompia ja keskisuuria asuinkiinteistökohteita pienten sijasta.

5.3. Tulosten vertailu muihin tutkimustuloksiin

VTT:n kokeellisessa tutkimuksessa suomalaisissa betonirunkoisissa rakennuksissa tehdyillä kaukolämmön kysyntäjoustoilla saavutettiin 2–3 tunnin kestoisten kysyntäjoustojaksojen aikana keskimäärin 20–25 % tehonalenema. Suurimmat tehonalenemat havaittiin -30 °C ulkolämpötilojen aikana (Kärkkäinen et al. 2004, 8). Tässä työssä tehtyjen testausten perusteella kohteiden keskiarvollinen tehonalenema sen hetkisestä lämmitystehosta -30 °C ulkolämpötilojen sovitteen perusteella oli noin 30 %. Vaihteluväli tämän työn kohteiden kesken -30 °C ulkolämpötiloissa oli 18 %...50 %. Keskiarvoa huonontaa heikosti pärjänneet kohteet, ja taas nostaa muutamat erittäin hyvin pärjänneet kohteet. VTT:n tutkimustulosten tarkastelussa pienempien tehonalenemien syynä on myös maksimissaan 60 % rajoitettu tehopyyntö, kun taas tämän työn testauksissa ajettiin jopa 100 % tehonalenemispyynnöllä olleita joustoja.

Toisessa VTT:n tutkimuksessa rakennuksen lämpötehoa pystyttiin keskimäärin leikkaamaan 40 %, ja sopivien säätöpituuksien todettiin olevan 1–2 tunnin kestoisia. (Kärkkäinen et al. 1999)

Tehonmuutokset tämän työn tulosten sekä aikaisempien tutkimusten tulosten suhteen voidaan havaita olevan melko samansuuntaisia. Tässä työssä mukana olleiden

pilottikohteiden suorituskyvyn suuri vaihteluväli ja pieni otanta tuo kuitenkin tämän työn tuloksiin epävarmuutta otannaltaan suurempien tutkimusten tuloksiin vertaillessa.

Sisälämpötilat eivät tämän työn testijakson aikana muuttuneet merkittävästi. Suurimpana syynä tälle voidaan olettaa olevan tyypilliset huhti- ja toukokuun ulkolämpötilat, joiden aikana ei saatu tallennettua pilottikohteiden käyttäytymistä suurempien ja pidempikestoisten pakkasjakson ajalta. IEA:n (2021, 6) tutkimuksessa testattiin sisälämpötilojen muutoksia lämmitysenergian katkaisun yhteydessä, kuten esimerkiksi kysyntäjoustotilanteessa. Tuloksiksi saatiin, että matalaenergiataloissa sisälämpötilan alenema -20 °C ulkolämpötiloissa oli 0,33 °C per tunti, joka on kolmasosa normaalirakennuksen sisälämpötilan alenemasta. (IEA 2021, 6.)

Kensby et al. tekemässä tutkimuksessa testattiin kiinteistöjen hyödyntämistä väliaikaisina lämpövarastoina, kuten esimerkiksi kysyntäjoustojen aikana. Kiinteistöjen lämmitystehoa ensin nostettiin ja sen jälkeen alennettiin muuttamalla patteriverkoston säätökäyrää, ja tuloksiksi sisälämpötilan muutoksista 52 viikon testauksella saatiin lämpötilavaihteluiden olleen maksimissaan ± 0,5 °C. (Kensby et al. 2015)

Sisälämpötilan muutokset voidaan siis olettaa melko maltillisiksi myös kirjallisuudesta saatujen tutkimustulosten perusteella. Muutokset voivat kuitenkin olla kysyntäjoustoa rajoittavia, etenkin jos kyseessä on heikommin eristetty ja -lämpöä varaava kiinteistö, kuten vanhempi kiinteistö.

5.4. Työn rajoitukset ja ehdotukset jatkotutkimukselle

Työssä saatujen tulosten ja johtopäätösten osalta voidaan todeta tiettyjä rajoittavuuksia. Yleisellä tasolla työn tulosten luotettavuuteen vaikuttaa melko pieni otanta pilottiin osallistuvista kiinteistöistä, testijakson ajallinen lyhyys sekä huhti- ja toukokuun aikana suoritetun testijakson aikana vallinneet ulkolämpötilat, jotka eivät kuvaa Suomessa talven aikana vallitsevia lämpötiloja. Näiden rajoitusten takia tuloksia on jatkettu lineaarisilla sovitteilla, jotka ovat saatujen tulosten perusteella kuvanneet tehojen käyttäytymistä melko hyvin. On kuitenkin huomattava, että sovitteilla lasketut tulokset perustuvat arvioon eivätkä mitattuihin tuloksiin.

Työn tulosten kannalta tarvittava tarkkuus saavutettiin arvioimalla lämpimän käyttöveden osuus kiinteistön kokonaisvedenkulutuksesta. Tätä tietoa hyödyntäen pystyttiin arvioimaan muutoksia energiankäytössä sekä suodattamaan lämpimän käyttöveden aiheuttamia tehopiikkejä saatavilla olleista teholukemista. Veden kulutuksen arviointi kuitenkin perustuu oletukseen, eikä mitattuun dataan, jonka vuoksi menetelmällä syntyy tuloksiin virhettä.

Energiankäytön muutosten tuloksia tarkastellessa on hyvä huomata, että erot energiankulutusmäärissä olivat melko pieniä ja edellisten vuosien normeerattuja kulutuslukemia tarkastellessa kohteiden energiankäytön trendi oli huhtikuun osalta jo valmiiksi alenemaan päin. Kysyntäjoustojen osuutta energiankäytön muutokseen on myös mahdoton arvioida tarkasti, sillä energiankulutuksen muutokset ovat ajastettujen kysyntäjoustojen, huipputehonrajoituksen ja huonekohtaisen kompensoinnin sekä muiden mahdollisten energiansäästötoimenpiteiden summa. Energiankulutuksen muutosten osalta normeerauksen luotettavuus kärsii lämpimimmistä ulkolämpötiloista, jonka vuoksi etenkin toukokuun normeerattuihin kulutuslukemiin on syytä suhtautua varauksella.

Kohteiden keskinäiseen vertailuun vaikuttaa myös kohdekohtaisesti eri aikoihin aloitetut kysyntäjoustot, mikä johtui ohjelmiston ja laitteiston käyttöönoton viiveistä. Tästä johtuen kaikilla kohteilla ei saatu tallennettua kysyntäjoustojen käyttäytymistä samoilla ulkolämpötiloilla, vaan osa kohteista ehti joustaa kovempien pakkasjaksojen aikana ja osa taas ei. Testijakson aikana havaittiin myös muutaman joustopyynnön epäonnistuneen rekisteröityä järjestelmään, jonka johdosta nämä pyynnöt on suodatettu pois käsiteltävistä tuloksista.

Sisälämpötilojen muutosten osalta tuloksiin vaikuttaa sama aikajakson pituuden ja havaittujen ulkolämpötilojen määrän aiheuttama rajoitus. Muutoksiin sisälämpötiloissa voidaan olettaa vaikuttaneen enemmän ulkolämpötilojen muutokset kuin itse joustotoimet.

Joustoparametrien vertailussa tarkasteltiin vain yhden kohteen tuloksia, sillä kyseinen kohde oli ainut, joka oli ehtinyt tallentaa joustojen käyttäytymistä myös kovempien pakkasjaksojen ajalta. Rajaus jättää ulkopuolelle kaikkien muiden kohteiden käyttäytymisen eri joustopyynnöillä.

Teoreettisen maksimipotentiaalin arvioinnissa tulosten luotettavuutta heikentää myös pieni otanta, sekä oletus että kaikki kaukolämpöverkon arvioon mukaan otetut asuinkiinteistökohteet käyttäytyvät valittujen pilottikohteiden keskiarvon mukaisesti.

Joustojen toteutuvuus ja kesto on myös etenkin kovien pakkasten aikana täysi arvoitus isossa määrässä erilaisia kiinteistöjä, jonka vuoksi tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina.

Tarkempien tulosten saamiseksi jatkotutkimus samasta aiheesta olisi oleellinen, siten että tutkimusjaksoksi saataisiin koko vuosi ja kohteiden määrää pystyttäisiin lisäämään, jotta eri kohdetyyppien väliset erot olisivat selkeämmin havaittavissa. Jatkotutkimuksessa olisi mielenkiintoista ajaa samanaikaisesti kysyntäjoustoja koko joustojen piirissä olevalle rakennuskannalle, ja täten saada mitattuja kokonaistuloksia saatavilla olevasta reservistä. Näiden tulosten perusteella olisi mahdollista arvioida saatavia hyötyjä, kuten potentiaalia häiriötilanteessa, ja siten arvioida myös kaukolämmön kysyntäjouston taloudellisia hyötyjä.

Lähteet

Ala-Kotila, P., Vainio, T., Heinonen, J. 2020. Demand Response in District Heating Market—Results of the Field Tests in Student Apartment Buildings. Smart Cities 2020, s. 157–171. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 15.1.2022]. Saatavissa: https://www.mdpi.com/2624-6511/3/2/9/pdf

Arteconi A., Polonara F. 2018. Assessing the demand side management potential and the energy flexibility of heat pumps in buildings. Energies, vol. 11, 7, 2018. [Viitattu 13.2.2022]. Saatavissa: https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1846

Energiateollisuus ry. 2021. Rakennusten kaukolämmitys, Määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2021. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 3.7.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/6412/Julkaisu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitys_Maaraykset_ja_ohjeet_%28pdf%29.pdf

Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpö 2020. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.1.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampo_2020.pdf

European Commission. 2018. EU 2030 climate & energy framework. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 1.2.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en.

Gadd, H. & Werner, S. 2013. Heat load patterns in district heating substations. Applied Energy vol. 108, s. 176–183. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 15.12.2021]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913001803

Guelpa E., Verda V. 2021. Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review, Energy, Volume 219, 2021, 119440. [Viitattu 23.2.2022]. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119440

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka 2. tark. p. Helsinki: Opetushallitus, 2013.

IEA. 2011. Interaction between District Energy and Future Buildings that have Storage and Intermittent Surplus Energy. IEA District Heating and Cooling. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.5.2022]. Saatavissa: https://www.iea-dhc.org/securedl/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOjE2NTYzMjA1NjEsImV4cCI6

MTY1NjQxMDU2MSwidXNlciI6MCwiZ3JvdXBzIjpbMCwtMV0sImZpbGUiOiJmaWxlYWRtaW5cL2RvY3VtZW50c1wvQW5uZXhfSVhcL0ZpbmFsX3JlcG9ydHNcL0ludGVyYWN0aW9uX0JldHdlZW5fRGlzdHJpY3RfRW5lcmd5X2FuZF9GdXR1cmVfQnVpbGRpbmdzLnBkZiIsInBhZ2UiOjMzM30.qnGuxTSawSlAwbSBXEd_wXN1IijAYqEsNiSQaApwM0U/Interaction_Between_District_Energy_and_Future_Buildings.pdf

IEA. 2021. District Heating, IEA, Paris. [Verkkosivu]. [Viitattu 1.2.2022]. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/district-heating

Ilmatieteenlaitos. 2022. Rakentaminen ja kiinteistönhuolto - Lämmitystarveluvut. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.5.2022]. Saatavissa: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut

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. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.5.2022]. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.026

Kontu, K.; Vimpari, J.; Penttinen, P.; Junnila, S. 2018. City scale demand side management in three different-sized district heating systems. Energies 2018, 11, 3370. [Viitattu 1.2.2022]. Saatavissa: https://www.mdpi.com/1996-1073/11/12/3370/pdf

Koponen, P., Weiss, R., & Ketomäki, J. (2019). Demand response field trial experiences. In 25th International Conference on Electricity Distribution: CIRED 2019 [1946] AIM - Association des Ingénieurs de Montefiore. [Viitattu 21.1.2022]. Saatavissa: https://www.cired-repository.org/handle/20.500.12455/656

Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus Ry. 566 s. ISBN: 952–5615–08-1

Kuopion Energia Oy. 2022. Voimalaitokset ja lämpökeskukset. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.6.2022]. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/yritys/tuotanto-ja-jakelu/voimalaitokset-ja-lampokeskukset/

Kärkkäinen, S., Sipilä, K., Pirvola, L., Esterinen, J., Eriksson, E., Soikkeli, S., Nuutinen, M., Aarnio, H., Schmitt, F., Eisgruber, C. 2004. Demand side management of the district heating systems. VTT. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.1.2022]. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2004/T2247.pdf

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. 1999. [Viitattu 23.5.2022].

Motiva Oy. 2021. Taloyhtiöt – yhdessä energiatehokkaasti, Lämmitys. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.1.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot_-_yhdessa_energiatehokkaasti/lammitys

Motiva Oy. 2022. Kulutuksen normitus. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.5.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/16105/Motiva_Kulutuksennormitus_laskentakaavat-ja-ohjeet_12-2016.pdf

Paaskunta, P. 2018. Kaukolämmön kysyntäjousto – mistä on kyse ja millaista kehitystä luvassa? Leanheat Oy. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.1.2022]. Saatavissa: https://leanheat.fi/2018/06/20/kaukolammon-kysyntajousto-mista-on-kyse-ja-millaista-kehitysta-luvassa/

Pesola, A., Bröckl, M., Vanhanen, J. 2011. Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet. Gaia Consulting Oy. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 22.1.2022]. Saatavissa: https://docplayer.fi/storage/24/2848107/1643192583/lYprHmNE3T_MxuYPTlhgSg/2848107.pdf

Romanchenko, D.; Kensby, J.; Odenberger, M.; Johnsson, F. 2018. Thermal energy storage in district heating: Centralised storage vs. storage in thermal inertia of buildings. Energy Conversion and Management, 162, 26–38. [Viitattu 3.2.2022]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418300803?via%3Dihub

Salo, S., Hast, A., Jokisalo, J., Kosonen, R., Syri, S., Hirvonen, J., & Martin, K. (2019). The Impact of Optimal Demand Response Control and Thermal Energy Storage on a District Heating System. Energies, 12(9), [1678]. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/en12091678

Sandbag. 2022. Carbon price viewer – CO2 emission allowance. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.2.2022]. Saatavissa: https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/

Sisäilmayhdistys ry. 2008. Sisäilmasto – Fysikaaliset tekijät. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.2.2022]. Saatavissa: https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Fysikaaliset-tekijat

Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Asumisterveysohje. Helsinki. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 13.2.2022]. Saatavissa: https://stm.fi/documents/1271139/1371655/Asumisterveysohje__tiivistelma_fi.pdf/8db72c91-b040-48bf-87b5-a2efd7379686

Suhonen J, Jokisalo J, Kosonen R, Kauppi V, Ju Y, Janßen P. 2020. Demand Response Control of Space Heating in Three Different Building Types in Finland and Germany. Energies. 2020; 13(23):6296. [Viitattu 29.3.2022] Saatavissa: https://doi.org/10.3390/en13236296

Valor Partners Oy. 2015. Kaukolämmön kysyntäjousto loppuraportti. Energiateollisuus Ry. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.12.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/files/439/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf

Valtioneuvosto. 2019. Programme of Prime Minister Sanna Marin's Government 10 December 2019. Inclusive and competent Finland—A socially, economically and ecologically sustainable society. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 29.1.2022]. Saatavissa: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-811-3

Wernstedt, F. 2003. Multi-Agent Systems for District Heating Management. Blekinge Institute of Technology.

Wernstedt, F., Johansson, C. 2008. Intelligent distributed load control. The 11th International symposium on district heating and cooling 2008, Reykjavik, Iceland.

Ympäristöministeriö. 2013. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.5.2022]. Saatavissa: https://www.ym.fi/download/noname/%7B8C5C3B41-E127-4889-95B0-285E9223DEE6%7D/40468