

TALOTEKNIikka 2030- Rakennusten energiajoustavuus ja kulutusjousto

Juha Jokisalo, Matti Lehtonen, Yuchen Ju, Xiaolei Yuan ja Risto Kosonen



TALO|20
tekniikka|30

Alkusanat

Tämän projektin toteutuksesta on vastannut Aalto- yliopiston tutkijaryhmä: Juha Jokisalo, Matti Lehtonen, Yuchen Ju, Xiaolei Yuan ja Risto Kosonen

Projektin ohjausryhmää on osallistunut aktiivisesti seuraavat henkilöt:

Anna-Maria Kolhinen	A-insinöörit
Harri Launo	Are
Marko Otranen	Are
Markku Ylinen	Are
Marko Holopainen	Bravida
Timo Meri	Bravida
Riku Mandelin	Caverion
Antero Vauhkonen	Caverion
Markus Kurkinen	Granlund
Kim Hagström	Halton
Ville Jalkanen	Kotkan energia
Mikko Sahikallio	QMG
Jouni Ylhäinen	Sweco
Ilkka Salo	Talteka
Mikko Pieskä	Tammi Kiinteistötekniikka

Kiitos kaikille hankkeen työryhmätyöskentelyyn osallistuneille.

Espoossa 30.9.2023

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1. Johdanto.....	4
2. Energiajouston toteutuksen lähtökohdat	5
2.1 Energiajoustomittarit	5
2.2 Energiamarkkinat ja tariffit	6
2.2.1 Kaukolämpö	7
2.2.2 Sähkö	8
2.3 Ohjausalgoritmien periaatteet	11
3. Kulutusjouston hyödyt rakennuksen omistajille.....	12
3.1 Sähkö- ja lämpöpumppulämmitys pientaloissa	12
3.1.1 Suora sähkölämmitys	12
3.1.2 Varaava sähkölämmitys sekä maalämpöpumppu	13
3.2 Kaukolämmitetyt rakennukset.....	14
3.2.1 Keskitetty ja hajautettu kulutusjousto.....	15
3.2.2 Hajautettu kulutusjousto kolmessa rakennustyyppissä.....	16
3.2.3 Kulutusjousto uimahallissa.....	17
3.2.4 LV-varaaja kaukolämmön alakeskuksessa.....	18
3.3 Kulutusjouston päästövähennyspotentiaali.....	20
4. Energiajärjestelmien sektorikytkentä	23
4.1 Sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmän välinen sektorikytkentä.....	23
4.2 Sähköisen liikenteen vaikutus.....	25
5. Kehityskohteet	27
6. Johtopäätökset.....	28
Lähdeluettelo.....	29

1. Johdanto

Pariisin ilmastositoumuksella Euroopan unioni on sitoutunut hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali jo vuoteen 2035 mennessä. Suurista kasvihuonekaasupäästöistä johtuen rakennuksilla ja rakentamisella on merkittävä rooli ilmastomuutoksen torjunnassa sekä hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisessa. Tällöin tarvitaan samanaikaisia toimenpiteitä koko elinkaaren ajan. Näissä toimenpiteissä olemassa oleva rakennuskanta on vaikuttavuuden kannalta avainasemassa, sillä rakennuskanta uudistuu vain noin 1–2 % vuodessa.

Komission tavoitteiden mukaisesti pienemmällä energiankulutuksella sekä uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytöllä on ratkaiseva rooli unionin energiariippuvuuden vähentämisessä fossiilista polttoaineista ja niiden tuonnista sekä energian toimitusvarmuuden edistämässä. REPowerEU-suunnitelman tavoitteiden mukaisesti komissio edellyttää nykyistä selkeästi parempaa energijärjestelmän integrointia rakennuksien talotekniikkajärjestelmien kanssa.

Tämä uusiutuvien energialähteiden vaihtelevan tuotannon integrointi on yksi keskeisistä kysymyksistä tulevissa kestävässä ja hiilivapaissa energijärjestelmissä. Näissä ratkaisuissa yhdyskuntapohjaisen energijärjestelmän, joka sisältää paikallisen tuotannon, on oltava vuorovaikutuksessa sekä paikallisen rakennuskannan että energijärjestelmän (sähköverkko ja kaukolämpöverkko) kanssa uusiutuvien energialähteiden optimaalisen hyödyntämisen ja käyttömukavuuden varmistamiseksi.

Uusiutuvien energialähteiden tehokkaampi hyödyntäminen ja sisäilmaston parantaminen edellyttää sitä, että talotekniikkajärjestelmien tulee olla nykyistä älykkäämpiä. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EBPD) mukaisesti rakennusten älykkyyttä tulee parantaa. Kehityksen vauhdittamiseksi EU-komissio on ehdottanut uutta älyvalmiusindikaattoria (SRI) järjestelmän älykkyyden vertailuun. SRI:n roolia ollaan nyt vielä täsmentämässä juuri tällä hetkellä, kun rakennusten energiatehokkuusdirektiiviä ollaan päivittämässä

Rakennuksien järjestelmät tulee suunnitella siten, että järjestelmäteknikka mahdollistaa optimaalisen ohjauksen yhdessä älykkään energijärjestelmän kanssa. Lisäksi käyttövaiheen aikana tulee älykkäästi yhdistää energiatuotanto- ja hintaennusteet rakennuksen energiankäyttöön, jotta mahdollistetaan rakennuksen maksimaalinen joustopotentiali. Kaikki edellä mainittu edellyttää rakennuksien älykkyyden parantamista. Tällöin voidaan kulutuspiikkejä pienentää, kun rakennukset toimivat hajautettuina energiavarastoina, jolloin rakennukset tasaavat tehon tarvetta sekä mahdollistavat sähkön tarjonnan ja kysynnän tasapainottamisen.

Tässä projektissa tutkittiin kirjallisuuden avulla mahdollisia ratkaisuja, joilla voidaan leikata sekä lämmön että sähkön tehon tarvetta hyödyntämällä lyhytaikaisia lämpö- ja sähköenergiavarastoja. Tämä projektin tavoitteena on kartoittaa toteutuneita ratkaisuja, joita on käytetty energijoustavissa rakennuksissa ja energiayhteisöissä sekä kartoittaa eri ratkaisujen energijoustavuuspotentialia ja analysoida jouston avulla saatavaa taloudellista hyötyä.

2. Energiajouston toteutuksen lähtökohdat

Suunniteltu laajamittaisten uusiutuvien energialähteiden käyttöönotto tuotannossa voi vaikuttaa merkittävästi energiaverkkojen toimintaan ja myös heikentää niiden vakautta. Tämän takia rakennuksen energiankäyttöä tulee sopeuttaa energiantuotannon kanssa. Tulevaisuudessa rakennuksien energiajärjestelmien kykyä toimia yhdessä vaihtelevan energiatuotannon kanssa tulee merkittävästi parantaa. Rakennuksien energiajoustavuuden parantaminen on useissa yhteyksissä esitetty olevan tehokas keino hallita hetkellistä tehontarvetta ja samalla mahdollistaa uusiutuvien energialähteiden laajemman hyödyntämisen tuotannossa.

Rakennuksen energiajoustavuus mahdollistaa kysynnän ja tarjonnan hallinnan ilmasto-olosuhteiden, käyttäjien tarpeiden ja energiantuotannon vaatimusten mukaisesti. Rakennusten energiajoustavuutta voidaan pitää indikaattorina sen kyvystä tarjota tuotannolle menetelmä tehopiikkien hallintaa. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin energiajouston mittareita, tariffeja ja edelleen ohjausmenetelmiä, jotka ovat keskeisiä lähtökohtia energiajouston toteutuksessa.

2.1 Energiajoustomittarit

Rakennuksen energiajoustoja voidaan mitata periaatteessa kolmella tavalla (Kuva 2.1):

- ajallinen energiankäyttö
- siirretty teho/energiamäärä
- taloudellinen hyöty dynaamisista tariffeista

Ajallisen energiankäytön jouston yhteydessä voidaan mitata esimerkiksi sitä, kuinka pitkän ajan rakennuksen terminen massa tai energiavaraston avulla voidaan leikata tehontarvetta (Reynders, 2017). Vastaavasti voidaan mitata kuinka pitkään kestää energiavaraston lataus- tai purkusaika (Stinner, 2016) tai kuinka monta tuntia rakennuksen lämmitysjärjestelmän käyttöä voidaan rajoittaa (Nuytten, 2013).



Temporal Flexibility (time)

To quantify flexibility including the time forced or delayed operation needed to fill or deplete a storage capacity.



The Amplitude of Energy/Power Modulation

To quantify the amount or percentage of energy/power can be shifted by thermal mass or thermal storage.



Cost

To quantify the costs of activating flexibility, such as based on dynamic energy price to optimize power profile in order to reduce costs.

Kuva 2.1 Energiajouston mittaamisen kolme eri näkökulmaa (aika, teho/energia ja kustannus).

Tehon tarpeen energijoustopuhtausmittausta mitataan sitä, kuinka suuri on lataus- (P^+) ja purkuvaiheen (P^-) teho suhteessa normaalikäytön tehoon (P_{ref}) (Ju et al, 2021) (kuva 2.2). Energijoustavuutta voidaan myös mitata ladatun ja puretun energiamäärän avulla (Le Dréau et al., 2016). Tällöin verrataan lataus- ja purkutehon avulla laskettua energiaa tarkastelujakson aikana siihen energiamäärään, joka olisi normaalisti käytetty ilman teho-ohjauksen käyttöä.

Power flexibility: Hourly charged or discharged power	$P^+ = P_{temp,inc.} - P_{ref}$	$P^- = P_{temp,dec.} - P_{ref}$
Energy flexibility: Charged or discharged energy during a certain charged or discharged period	$\Delta Q_{heat-charged} = \int_0^{\infty} q_{heating} (\Delta q_{heating} > 0) dt \quad q_{charging} = \int_0^{\tau_{charging}} P^+ \cdot dt$ $\Delta Q_{heat-discharged} = \int_0^{\infty} q_{heating} (\Delta q_{heating} < 0) dt \quad q_{discharging} = \int_0^{\tau_{discharging}} P^- \cdot dt$	

Kuva 2.2 Energijoustavuus tehontarpeen ja energiankulutuksen avulla määritettynä.

Energijousto (Flexibility factor) on myös mahdollista laskea, kun arvioidaan kuinka suuri osa energiankäytöstä tapahtuu kalliin (high) ja matalan hinnan (low) aikana (yhtälö 2.1) (Ju et al, 2021). Vastaavasti arvio voidaan laskea tehon käytön avulla siitä, kuinka paljon ladataan lämpövarastoa tai termistä massaa (FF^+) tai puretaan sitä (FF^-) (yhtälö 2.2).

$$FlexibilityFactor = \frac{\int_{lowpricetime} q_{heating} dt - \int_{highpri} q_{heating} dt}{\int_{lowpricetime} q_{heating} dt + \int_{highpri} q_{heating} dt} \quad (2.1)$$

$$FF^+ = \frac{\int_0^{\tau_{hs}} P^+ \cdot dt}{\int_0^{\tau_{hs}} P_{ref} \cdot dt} \quad FF^- = \frac{\int_0^{\tau_{hs}} P^- \cdot dt}{\int_0^{\tau_{hs}} P_{ref} \cdot dt} \quad (2.2)$$

Rakennuksen omistajalle suurin mielenkiinto on mitata kustannussäästöä, jonka kulutuksen jousto mahdollistaa dynaamisilla energianhinnoilla. Kustannussäästö voidaan mitata indeksillä FI, joka lasketaan yhtälön 2.3 avulla:

$$FI = 1 - \frac{C^1}{C^0} \quad (2.3)$$

missä C^1 on energiakustannus kulutusjoustolla
 C^0 on energiakustannus ilman kulutusjousto

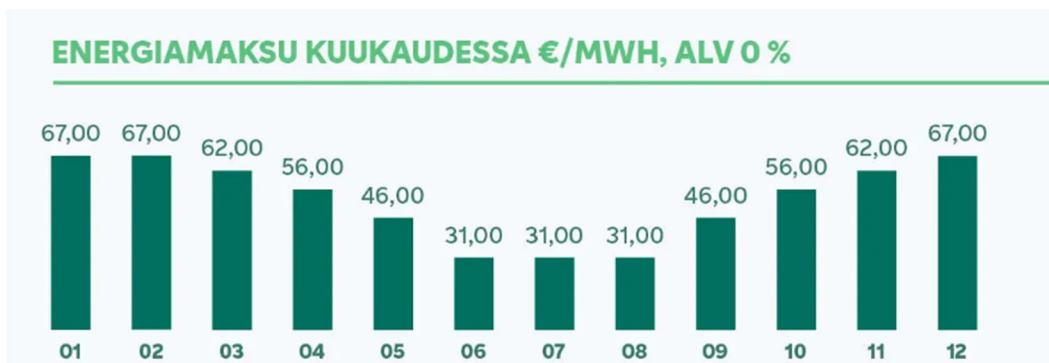
2.2 Energiatarkastelut ja tariffit

Energianhinta on vaihdellut viime aikoina voimakkaasti. Suomessa, Pohjoismaissa ja Euroopassa sähkön hinta nousi merkittävästi alkaen 2021 loppukesällä. Vuoden 2022 jälkipuoliskon aikana sähkön

markkinahinta saavutti Suomessa tähänastiset huippunsa elo- ja joulukuussa. Sähkön hinnan odotetaan vaihtelevan suuresti myös jatkossa. Muun muassa sää, Pohjoismaiden vesivarastot ja Euroopan ilmapiiiriä kiristävä sota Ukrainassa tulevat määräämään sähköenergiainnan kehitystä.

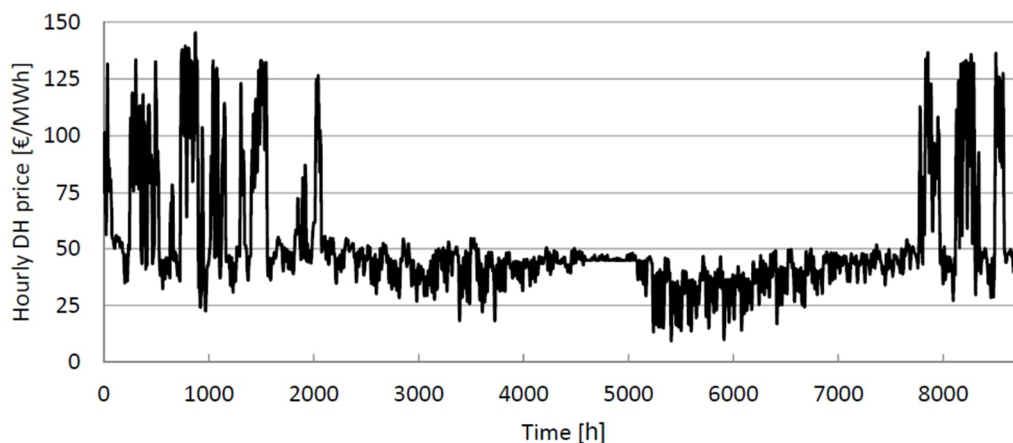
2.2.1 Kaukolämpö

Kaukolämmössä on perinteisesti käytetty vuoden aikojen mukaan tai kuukausittain vaihtuvaa hintaa. Kuvassa 2.3 esitetään kaukolämmön hinta vuoden 2022 tammikuu- joulukuu välisenä aikana (Fortum). Talvikuukausina hinta on korkein ja laskee siitä mentäessä kohti välikautta ja kesää. Hinta on halvimillaan kesäkuukausien aikana.



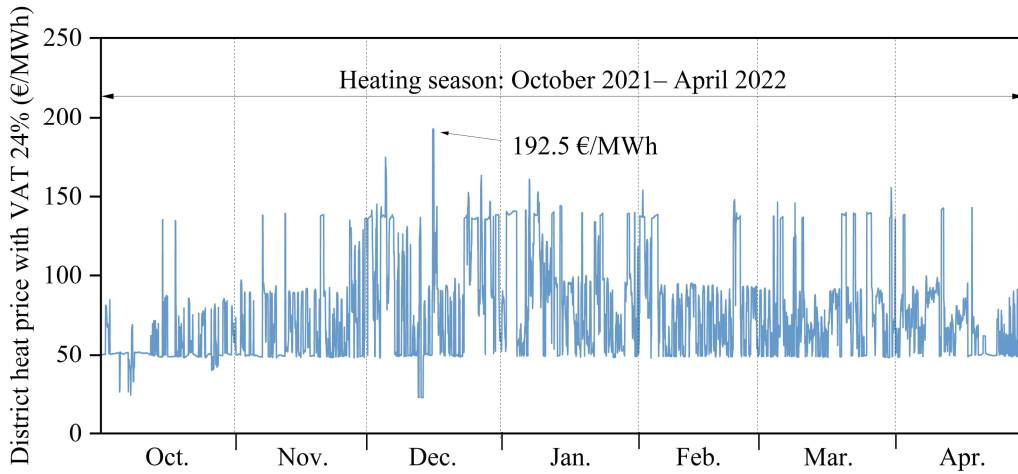
Kuva 2.3 Kaukolämmön hinta vuoden 2022 aikana (Fortum).

Kaukolämmön dynaamista hinta on arvioitu useissa tutkimuksissa (Salo et al., 2019). Kuvassa 2.4 esitetään esimerkki, kun tuotanto perustuu pääasiassa biopolttoaineen käyttöön ja huipputeho katetaan öljykattilalla.



Kuva 2.4 Kaukolämmön laskennallinen hinta (biopolttoaine ja öljykattila) (Salo et al., 2019).

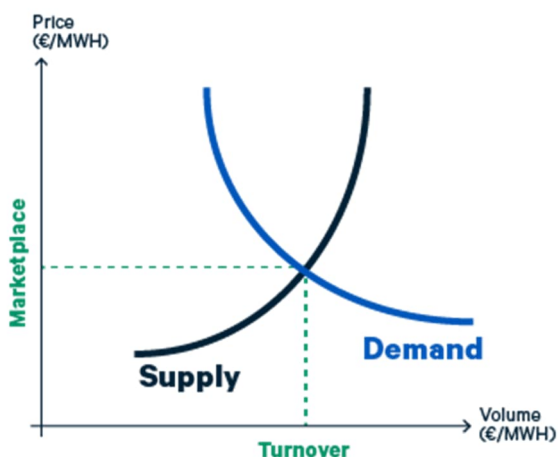
Hinnan muodostukseen vaikuttaa energiatuotannon rakenne. Kuvassa 2.5 esitetään tutkimuskäyttöön laadittu synteettinen tuntihinta, kun tuotannossa on useita tuottotapoja (Ju et al., 2023B). Näin vaihtelee hintaa ei tällä hetkellä ole tuotu markkinoille. Voidaan kuitenkin arvioida, että tuotannossa käytettävien lämpöpumppujen takia myös kaukolämmön hinnoittelumalleissa voi tulla muutoksia lähitulevaisuudessa.



Kuva 2.5 Kaukolämmön laskennallinen tunti hinta lämmityskauden aikana (useita tuotantomuotoja) (Ju et al., 2023B).

2.2.2 Sähkö

Sähkön markkinahinta vaihtelee voimakkaasti tuotantotilanteen ja kulutuksen määrän mukaan ja tämän vaihtelun odotetaan lisääntyvän sitä mukaa kuin sään mukana vaihtelevan uusiutuvan energian, s.o. tuulivoiman ja aurinkosähkön määrä markkinoilla kasvaa. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla seuraavan päivän hinta (Elspot) määräytyy edellisenä päivänä klo 12 skandinaavista aikaa tehtyjen osto- ja myyntitarjousten perusteella. Ostotarjoukset summataan hinnaltaan laskevassa järjestyksessä ja myyntitarjoukset nousevassa järjestyksessä. Kohta, jossa nämä kysyntä- ja tarjontakäyrät leikkaavat, muodostaa sitten hinnan kaikelle myydylle sähkölle kyseisellä tasejaksolla (tasejakso on nyt 1 tunti, keväällä 2024 15 min), kuva 2.5. Sähkömarkkina toimii siis siten että kallein myyty energiayksikkö määrää hinnan kaikelle sähkölle kyseisellä tasejaksolla.








Kuva 2.5. Sähkön hinnan määräytyminen seuraavan päivän markkinoilla. Lähde: nordpool

Sähkömarkkinaosapuolien kannalta merkittävä kysymys on sähkötaseiden hallinta. Jos myyty ja ostettu sähkömäärä poikkeaa toisistaan, joutuu sähköyhtiö ostamaan/myymään erotuksen kantaverkko-yhtiön ylläpitämän säätösähkömarkkinan kautta. Tämä voi tulla hyvin kalliiksi. Ennen säätösähköön turvautumista sähköyhtiöt pyrkivät siksi tasapainottamaan taseensa sähköpörssiin

päivän sisäisillä markkinoilla (Elbas). Näillä markkinoilla hinta vaihtelee jatkuvasti ja kauppoja syntyy sitä mukaa kuin osto- ja myyntitarjoukset kohtaavat.

Sähköpörssi on pääasiallinen kanava sähköenergian ostossa ja myynnissä. Koska sähköjärjestelmässä on tuotannon ja kulutuksen oltava koko ajan tasapainossa, ylläpitää kantaverkkooyhtiö lisäksi reservimarkkinoita tarvittavan hetkellisen tehonsäätökapasiteetin varmistamiseksi, kuva 2.6.

	FFR	FCR-D	FCR-N	FRR	M-FRR
	Fast Frequency reserve, Finland 18 %, Nordics total 0-300 MW (estimate)	Frequency Containment Reserve for Disturbances, Finland ~300 MW, Nordics total 1450 MW upwards and 1400 MW downwards	Frequency Containment Reserve for Normal Operation, Finland ~120 MW, Nordics total 600 MW	Automatic Frequency Restoration Reserve, Finland 60-80 MW, Nordics total 300-400 MW	Manual Frequency Restoration Reserve Reference incident + imbalances of balance responsible parties
Activated	In large frequency deviations In low inertia situations	In large frequency deviations Up-regulation and down-regulation separately	Used all the time	Used in certain hours	Activated if necessary
Activation speed	In a second	In seconds	In three minutes	In five minutes	In fifteen minutes
					

Kuva 2.6. Suomen kantaverkkooyhtiö Fingridin ylläpitämät reservimarkkinat. Lähde: Fingrid.

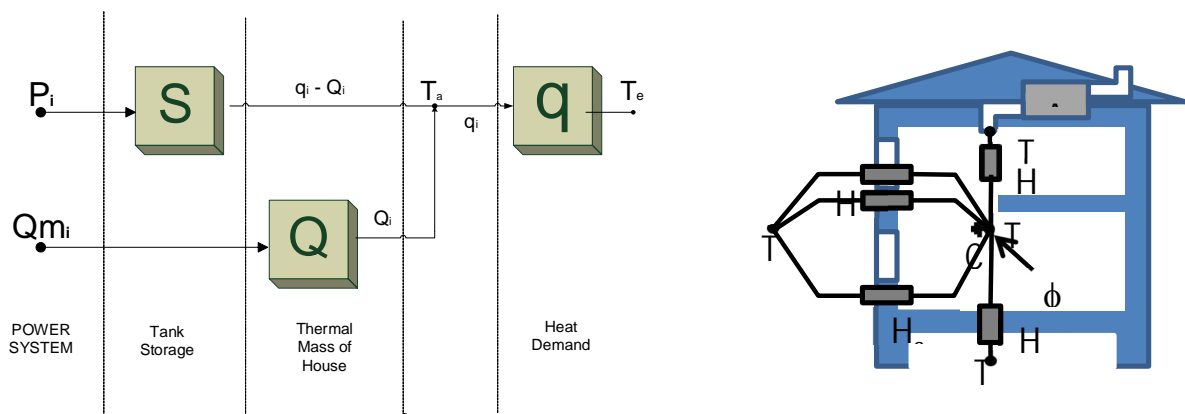
Nopeat reservit FFR ja taajuuden vakautusreservit FCR-D aktivoituvat häiriötilanteissa sekunnin tai sekuntien aikaskaalassa. Niiden tarkoitus on tukea järjestelmää yllättävissä tilanteissa, kuten ison voimalaitoksen irrotessa verkosta. Taajuuden vakautusreservi FCR-N toimii normaalitilassa jatkuvasti ja pyrkii pitämään taajuuden 50 +/- 0.1 Hz haarukassa. Isojen häiriötilanteiden varalta on lisäksi markkina taajuuden palautusreserville, jonka tarkoitus on palauttaa taajuus 50 Hz arvoon ja samalla vapauttaa nopeammat reservit mahdolliseen uuteen käyttöön. Taajuuden palautusreservi jakautuu automaattiseen FRR-A ja manuaaliseen FRR-M. Niiden aktivoituaika lasketaan minuuteissa.

Sähkön käyttäjän näkökulmasta yksinkertaisin tapa osallistua kysynnän joustoon on hankkia sähkö pörssitariffilla, joka vaihtelee Elspot-hinnan mukaan. Koska sähkön hinta on tiedossa jo edellisenä päivänä, voi sähkön käyttöä ajoittamalla minimoida energiakustannuksia. Tällainen toiminta on mahdollista, jos hallussa on merkittäviä kuormia, joiden käyttöä voidaan ajastaa tai jos käytössä on energiavarastoja. Merkittävä potentiaali on tavallisesti lämmitys- ja jäähdytyskuormissa, etenkin jos niihin on yhdistetty lämpövarastoja.

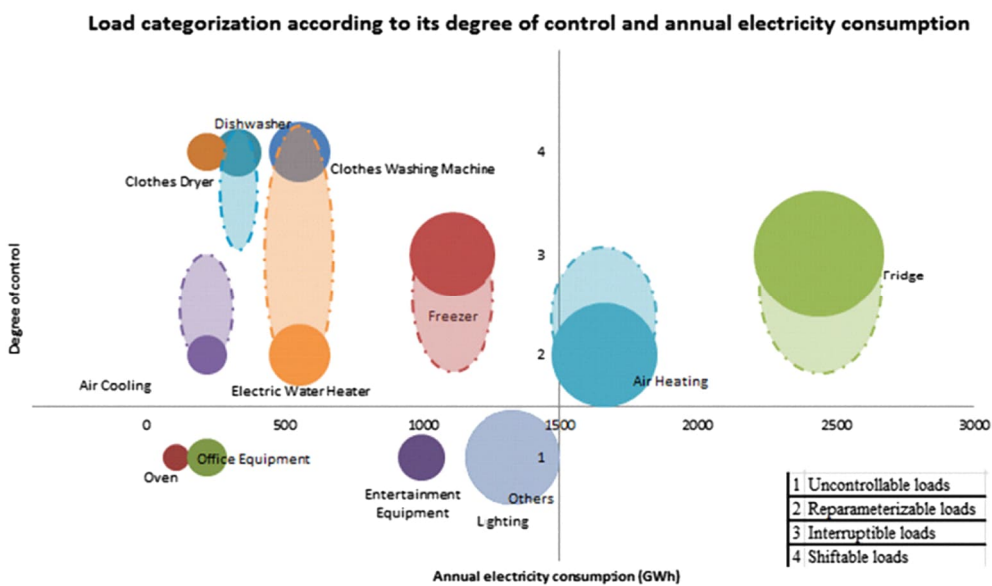
Isompia joustavia kuormia voidaan myydä joustona myös Fingridin ylläpitämille reservimarkkinoille. Tällainen toiminta vaatii tavallisesti jonkin aggregaattorin, joka yhdistää joukon kuormia isommaksi kokonaisuudeksi ja vastaa niiden käytöstä Fingridin suuntaan. Aggregaattoriliiketoimintaan on syntynyt siihen erikoistuneita yrityksiä.

Sähkölämmityskuormien joustomahdollisuuksia asuintalossa on havainnollistettu kuvassa 2.7. Yksinkertaisimmin voidaan jousto toteuttaa lämmityksen vesivaraajan avulla, jolloin lämpö varataan halvan sähkön aikana ja puretaan kiinteistöön lämmöntarpeen mukaan. Toinen vaihtoehto on hyödyntää rakennuksen massoihin varastoinutta lämpöenergiaa. Jälkimmäisen ratkaisun

haittapuolena on se, että lämpötila vaihtelee asunnon sisällä, mikä saattaa vaikuttaa haitallisesti asumismukavuuteen.



Kuva 2.7. Asuintalon terminen malli ja lämmitysjärjestelmän jouston lähteet. S on lämpövarasto, esimerkiksi vesivaraaja. Q on rakennuksen massoihin varastoitunut lämpö. q on lämmöntarve ja P & Q energiaverkosta otettu lämmitysenergia.



Kuva 2.8. Kotitalouden sähkökäyttökohteita ja niiden joustopotentiali. Vaaka-akselilla kokonaisvuosienergia (Portugalin tapauksessa), pystyakselilla arvioitu jouston määrä.

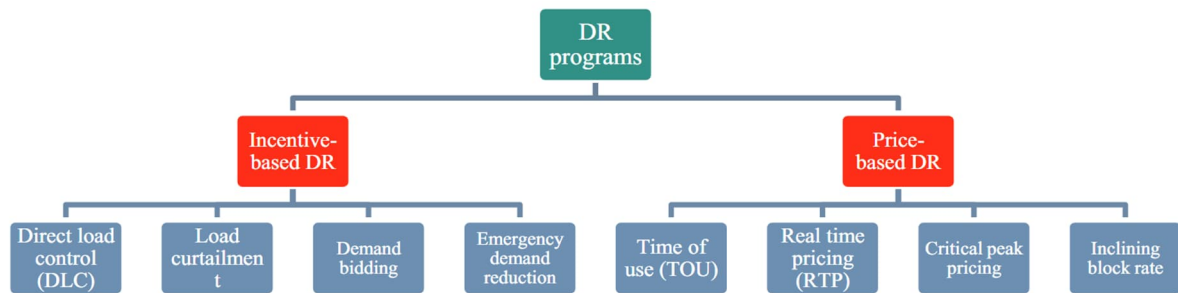
Erilaisten sähkökuormien joustopotentialin määrä riippuu niiden käytön kriittisyydestä, sekä energiavolyymistä (Soares et al., 2014). Kuvassa 2.8. on haarukoitu tavallisempien sähkökäyttökohteiden jouston potentiaalia Portugalin tapauksessa. Joukosta erottuvat erilaiset termostaattiohjatut kuormat sekä valkoiset kodinkoneet. Kulutuselektronikka ja nykyaikainen valaistus (LED) eivät tarjoa merkittävää jouston määrää.

2.3 Ohjausalgoritmien periaatteet

Sähkön hinta vaihtelee tuotannon mukaan tunneittain. Tuntihinnoiteltu sähkö on edullisempaa kuin kiinteähintainen sähkö, mikäli sähkönkäyttöä voidaan ohjata hintasignaalin mukaan.

Kulutusjousto on sähkönkulutuksen hetkellistä vähentämistä tai lisäämistä sähkön tuotantotilanteen mukaisesti. Sähköä kannattaa käyttää silloin, kun sitä tuotetaan paljon ja vähäpäästöisesti sekä se on edullista. Kulutusta voi siis joustaa molempiin suuntiin, jolloin digitaalisten palveluiden avulla sähkön ostaja voi optimoida oman käyttönsä edullisimpaan hetkeen ja rajoittaa sähkönkäyttöä kalleimpina ajankohtina.

Kulutusjouston (Demand Response=DR) taloudellinen motivaatio liittyy energiankäytön rajoittamiseen ja siitä saatavaan hyötyyn (incentive-based) tai sitten ohjaamalla kulutusta tuntihinnan mukaan (price based) (kuva 2.9) (Jordehi, 2019). Sopimuksen mukaan kuluttajille voidaan maksaa huomattava kannustin käytön vähentämisestä. Nämä kannustimet voivat auttaa sähköjärjestelmää parantamaan sen luotettavuutta. Vastaavasti nostamalla sähkön hintaa kysyntähuippujen aikoina ja odottamattomien tilanteiden aikana, energiayhtiöt kannustavat kuluttajia vähentämään kulutustaan.



Kuva 2.9 Kulutusjouston ohjauksen ratkaisut tehon leikkaukseen ja dynaamisen hinnan käyttöön.

Kulutusjoustossa voidaan käyttää seuraavia strategioita:

- Lämpötilan asetusarvon muutos: lämpötilojen (huoneilma, tuloilma tai varaajan) asetusarvojen muuttaminen energiahinnan tai verkon tarpeiden mukaan.
- Tehon siirto: lämmitystarpeen siirtäminen kalliiden tuntien ulkopuolella esilämmittämällä rakennuksien termistä massaa ennen kalliiden tuntien ajankohtaa tai vähentämällä tehon käyttöä kalliin hinnan aikana
- Lämpövarastointi: lämmön varastointi halvan energian aikoina ja sen käyttäminen kalliin energian aikoina.
- Tehon leikkaus: tehon leikkaus huipputehon aikana, jolloin verkon stabiilius on uhattuna
- Tehon rajoitus: rakennuksen tai rakennusryhmän maksimilämmitystehon rajoittaminen asettamalla kullekin rakennukselle maksimitehot.
- Tehontarpeen ennustaminen: kulutustietojen ja sääennusteiden käyttäminen lämmöntarpeen ennustamiseen. Tämä toteutetaan data-analytiikan ja koneoppimisalgoritmien avulla.

Kulutusjouston ohjauksessa voidaan käyttää sääntö- tai mallipohjaisia algoritmeja.

Sääntöihin perustuvat strategiat: käyttää ennalta määritettyjä sääntöjä määrittääkseen tietyssä tilanteessa suoritettavat asianmukaiset toimet. Sääntöihin perustuvassa ohjausstrategioissa säännöt

ilmaistaan yleensä "jos-niin"-lauseiden muodossa, jotka määrittelevät ehdot, jotka on täytettävä, jotta tietty toimenpide voidaan toteuttaa.

Mallipohjaiset strategiat: käyttää ohjattavan järjestelmän matemaattista mallia ennustaakseen sen käyttäytymistä ja määrittääkseen sopivan ohjaustoimenpiteen. Malli voi perustua kokonaan tai osittain järjestelmän fysikaaliseen malliin tai malli on "black-box", jossa voidaan myös koneoppimista hyödyntää.

3. Kulutusjouston hyödyt rakennuksen omistajille

3.1 Sähkö- ja lämpöpumppulämmitys pientaloissa

Tässä luvussa tarkastellaan suoralla- tai varaavalla sähkölämmityksellä tai maalämpöpumpulla varustettujen suomalaisten pientalojen lämmityksen kulutusjousto-ohjauksen vaikutuksia energian kulutukseen sekä energiakustannuksiin. Kaikissa tarkasteltavissa simulointitapauksissa sähkön kulutusta ohjataan sähkön tuntihinnan avulla pyrkien ajoittamaan lämmityssähkön kulutusta mahdollisimman edullisille ajankohdille säätämällä lämmitystä huonekohtaisesti. Lämminvesivaraajilla varustetuissa simulointitapauksissa (kts. luku 3.1.2) lämminvesivaraajien lämmitystä ohjataan myös sähkön tuntihinnan avulla. Tarkasteltavissa tutkimuksissa simuloitujen pientalot sijaitsevat pääkaupunkiseudulla ja niiden lämmitystarve on simuloitu energialaskennan testivuoden 2012 säätiedoilla (Ympäristöministeriö, 2017) ja sähkön hintana on käytetty vuoden 2012 tuntihintaa. Sähkön veroton pörssihinta vaihteli sen vuoden aikana 3.9 ja 300 €/MWh välillä ja vuoden keskiarvo oli 36.4 €/MWh, eli käytetty pörssisähkön hintataso on huomattavasti matalampi kuin esim. vuonna 2022 Ukrainan sodan seurauksena merkittävästi noussut sähkön pörssihinta, joka oli vuoden aikana keskimäärin noin 154 €/MWh. Mutta, vuoden 2012 sähkön pörssihinta kuvaa melko hyvin sähkön pörssihinnan tasoa vuoden 2012 alun ja vuoden 2020 lopun välisenä aikana, jolloin vuotuinen keskiarvo vaihteli 28 ja 47 €/MWh välillä. Kaikissa tarkasteltavissa tutkimuksissa sähkön energiakustannukset on laskettu käyttäen sähkön kokonaishintaa, jossa on mukana sähkön energia- ja siirtohintaa ja veroineen.

3.1.1 Suora sähkölämmitys

Alimohammadisagvand et al. (2017) vertaili kulutusjoustolla saavutettavia säästöjä sähköisellä radiaattorilämmityksellä ja -lattialämmityksellä varustetuissa pientaloissa. Vertailu tehtiin sekä vanhassa 1960-luvun rakennuskantaa kuvaavassa puurunkoisessa pientalossa sekä passiivitaso- ja lämmöneristystasolla (RIL, 2009) varustetussa betonirakenteisessa vuonna 2012 rakennetussa pientalossa. Molempien pientalojen lämmitetty nettoala on 180 m² ja ne ovat 2-kerroksisia.

Taulukossa 3.1 on esitetty sähkön kokonaiskulutus sekä energiakustannukset sähköisellä radiaattorilämmityksellä varustetuissa esimerkkikohteissa. Vanhassa heikosti lämmöneristetyssä hatarassa pientalossa sähkön kokonaiskulutus ja energiakustannukset ovat noin 3-kertaiset äärimmäisen hyvin lämmöneristettyyn passiivipientaloon verrattuna riippumatta siitä, käytetäänkö kohteessa lämmityksen

kulutusjousto vai ei. Tulokset paljastavat, että tilojen lämmityksen kulutusjousto-ohjaus hieman vähentää molempien kohteiden sähkönkulutusta johtuen siitä, että tilojen lämmityksen ohjausalgoritmi laskee simuloidun lämmityskauden aikana keskimäärin hieman enemmän huonekohtaista lämmityksen asetusarvoa kuin nostaa sitä. Tulokset osoittavat, että radiaattorilämmityksen kulutusjousto-ohjaus vähentää 60-luvun pientalon energiakustannuksia 0.6 €/m², eli 3 kertaa enemmän kuin passiivipientalossa, mutta kustannussäästöt syntyvät suurelta osin vähentyneen energiantarpeen seurauksena.

Taulukko 3.1. Sähkön vuotuinen kokonaiskulutus sekä energiakustannukset ilman kulutusjousto-ohjausta (ref.) ja lämmityksen kulutusjousto-ohjauksella (DR) sähköisellä radiaattorilämmityksellä varustetussa 1960-luvun pientalossa sekä vuoden 2012 passiivipientalossa.

Building type	Case	Total delivered energy		Total energy cost		
		kWh/m ² ·a	Difference, %	€/m ² ·a	Difference, %	Absolute, €/(m ² ·a)
Built, 1960	Ref.	304	--	32.7	--	--
	DR	299	-1.7	32.1	-2.0	-0.6
Passive, 2012	Ref.	103	--	10.6	--	--
	DR	102	-1.2	10.4	-2.5	-0.2

Taulukossa 3.2 on esitetty vastaavasti sähkön kokonaiskulutus sekä energiakustannukset sähköisellä lattialämmityksellä varustetuissa esimerkkikohteissa, jotka ovat muilta osin samoja, kuin taulukon 3.1 esimerkkikohteet. Tulokset osoittavat, että sähköisen lattialämmityksen kulutusjousto-ohjauksen hyödyntäminen vähentää selvästi 1960-luvun pientalon sähkönkulutusta, mutta passiivipientalossa sähkönkulutus ei laske, vaan se hieman jopa lisääntyy kulutusjousto-ohjauksen käytön myötä. Lattialämmityksen kulutusjousto-ohjauksen käyttö vähentää energiakustannuksia 1960-luvun pientalossa 2.7 €/m² ja passiivitalossa 0.6 €/m². Tulokset osoittavat, että lattialämmityksen kulutusjousto-ohjauksella saavutetaan selvästi enemmän energiakustannussäästöjä, kuin radiaattorilämmityksellä varustetuissa kohteissa, koska lattialämmitys aktivoi rakenteiden termistä massaa selvästi tehokkaammin.

Taulukko 3.2. Sähkön vuotuinen kokonaiskulutus sekä energiakustannukset ilman kulutusjousto-ohjausta (ref.) ja lämmityksen kulutusjousto-ohjauksella (DR) sähköisellä lattialämmityksellä varustetussa 1960-luvun pientalossa sekä vuoden 2012 passiivipientalossa.

Building type	Case	Total delivered energy		Total energy cost		
		kWh/m ² ·a	Difference, %	€/m ² ·a	Difference, %	Absolute, €/(m ² ·a)
Built 1960	Ref.	325	--	34.9	--	--
	DR	314	-3.1	32.2	-7.7	-2.7
Passive, 2012	Ref.	105	--	10.8	--	--
	DR	105	0.2	10.2	-5.8	-0.6

3.1.2 Varaava sähkölämmitys sekä maalämpöpumppu

Alimohammadisagvand et al. (2018) vertaili kulutusjoustolla saavutettavia säästöjä varaavalla sähkölämmityksellä ja maalämpöpumpulla varustetuissa 2-kerroksisissa pientaloissa. Molemmat pientalot ovat betonirakenteisia, niissä käytetään passiivitasen lämmöneristystasoa (RIL, 2009) ja kohteiden lämmitetty nettoala on 180 m². Molemmissa pientaloissa on käytössä vesikiertoinen lattialämmitys 40/30 °C lämpötilamitoituksella ja kaksi erillistä 500 L lämminvesivaraajaa, joista käytetään tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. Varaajat on kytketty niin, että tilojen lämmitysverkostoon liitetty varaaja esilämmittää lisäksi myös käyttövedettä, joka virtaa esilämmityksen jälkeen käyttövesiverkostoon liitettyyn varaajaan. Varaavan sähkölämmityksen tapauksessa molemmat varaajat on varustettu 9 kW:n

lämmitysvastuksella, mutta maalämpöpumpulla varustetussa tapauksessa lämmitysteholtaan 9 kW:n maalämpöpumppu lämmittelee molempia varaajia. Molemmissa pientaloissa käytetään kulutusjousto-ohjausta sekä huonetilojen lämpötilojen säädössä sekä varaajien lämmityksen ohjauksessa ja lämpötilojen säädössä käyttäen sähkön tuntihintaa.

Taulukossa 3.3 on esitetty kulutusjousto-ohjauksen vaikutukset lämmityssähkön kulutukseen sekä kustannuksiin molemmissa simuloituissa tapauksissa. Tulokset osoittavat, että kulutusjousto-ohjauksella saavutettava suhteellinen kulutus- ja kustannussäästö on selvästi suurempi maalämpöpumpulla varustetussa pientalossa verrattuna varaavalla sähkölämmityksellä varustettuun pientaloon, johtuen merkittävästi pienemmästä sähkön kulutustasosta. Absoluuttinen kustannussäästö on sen sijaan selvästi korkeampi varaavalla sähkölämmityksellä varustetussa pientalossa johtuen samasta syystä. Vertailtaessa taulukon 3.3 tuloksia luvussa 3.1.1 esitettyihin tuloksiin (kts. taulukko 3.2) havaitaan, että betonirakenteisen pientalon varustaminen lämminvesivaraajilla ei lisää tutkituissa tapauksissa kulutusjousto-ohjauksella saavutettavaa energiakustannussäästöä. Tämä johtuu siitä, että betonirakenteisen pientalon rakenteiden lämmönvarastointikyky on niin suuri, ettei kulutusjousto-ohjauksella varustettujen varaajien käyttö tuo enää lisähyötyä. Tässä yhteydessä on syytä korostaa, että tulos pätee vain tutkituissa tapauksissa ja tulokseen vaikuttaa merkittävästi kulutusjousto-ohjauksen käytetyn sähkön tuntihinta ja erityisesti sen vaihtelu sekä lämmityksen ohjausalgoritmi.

Taulukko 3.3. Lämmityssähkön kulutusjousto-ohjauksella saavutettavat vuotuiset energia- ja kustannussäästöt maalämpöpumpulla ja varaavalla sähkölämmityksellä varustetuissa passiivipientaloissa.

Case	Savings of heating electricity		Savings of heating electricity cost	
	Relative, %	Relative, %	Absolute, €/m ² , a	
GSHP with two storage tanks	-11.4	-13.8	-0.30	
Storing electric heating with two storage tank	-1.8	-6.7	-0.51	

3.2 Kaukolämmitetyt rakennukset

Tässä luvussa tarkastellaan kaukolämmityksellä varustettujen suomalaisten rakennusten kulutusjousto-ohjauksen vaikutuksia energian kulutukseen sekä kustannuksiin. Simulointitutkimuksissa tarkasteltavia rakennustyyppisiä ovat asuinkerrostalo, toimistorakennus, kulttuurikeskus sekä uimahalli ja kaikki kohteet sijaitsevat pääkaupunkiseudulla. Kaikkien tarkasteltavien kohteiden kantavat rakenteet ovat betonia, joten kohteiden lämmönvarauskyky on suuri. Uimahallin lämmönvarauskyky on muita kohteita vielä selvästi suurempi, koska siinä kohteessa rakenteiden lämmönvarauskyvyn lisäksi hyödynnetään myös allasvettä lämpövarastona. Kaikissa tarkasteltavissa kulutusjoustoa hyödyntävissä simulointitutkimuksissa (luvut 3.2.1- 3.2.3) lämmityksen kulutusta ohjataan luvussa 2.2.1 esitetyn (kts. kuva 2.4) kaukolämmön synteettisen tuntihinnan avulla pyrkien ajoittamaan kaukolämmön kulutus mahdollisimman edullisille ajankohdille. Tutkimuksissa käytetty kaukolämmön synteettinen verollinen tuntihinta vaihteli vuoden aikana 9 ja 145 €/MWh välillä ja vuoden keskiarvo oli 51 €/MWh. Kaikissa tarkasteltavissa kulutusjoustoa hyödyntävissä

simulointitutkimuksissa rakennusten lämmitystarve on simuloitu energialaskennan testivuoden 2012 säätiedoilla (Ympäristöministeriö, 2017).

Luvussa 3.2.4 tarkastellaan kaukolämmön alakeskukseen asennetun lämminvesivaraajan vaikutusta toimistorakennuksen kaukolämmön tehontarpeeseen, energiajousto- ja kaukolämmön tehomaksuun. Tarkasteltavassa simulointitapauksessa rakennuksen lämmitystarve on simuloitu lokakuun 2020 ja syyskuun 2021 välisenä aikana pääkaupunkiseudulla toteutuneita sääolosuhteita käyttäen.

3.2.1 Keskitetty ja hajautettu kulutusjousto

Yuan et al. (2023) vertaili keskitetyllä ja hajautetulla kaukolämmityksen kulutusjoustolla saavutettavia energia- ja kustannussäästöjä toimistorakennuksessa. Rakennus on valmistunut 1960-luvulla, mutta se on remontoitu 2000-luvulla talotekniikan ja ikkunoiden osalta. Rakennuksessa on käytössä vesiradiaattoriverkosto 70/40 °C lämpötilamitoituksella.

Keskitetyn kulutusjouston tapauksessa tilojen lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa ohjataan ulkoilman lämpötilan lisäksi kaukolämmön synteettisen tuntihinnan perusteella. Ohjausperiaatteen mukaan kaukolämmön hinnan ollessa lämmityskaudella korkea, lasketaan menoveden lämpötilaa, mikäli huoneiden lämpötila pysyy hyväksyttävällä tasolla. Vastaavasti kaukolämmön hinnan ollessa matala, nostetaan menoveden lämpötilaa, mikäli huoneiden lämpötila ei ole liian korkea. Sen sijaan hajautetulla kulutusjoustolla varustetussa tapauksessa tilojen lämmitysverkoston lämpötilaa ohjataan pelkästään ulkoilman lämpötilan perusteella, mutta tilojen lämpötilaa ohjataan lämmityskaudella huonekohtaisesti kaukolämmön tuntihinnan perusteella. Ohjausperiaatteen mukaan lämpötilan asetusarvoa nostetaan kaukolämmön hinnan ollessa matala ja lasketaan hinnan ollessa korkea. Muutoin käytetään normaalia lämmityksen asetusarvoa.

Taulukossa 3.4 on esitetty kaukolämmön kokonaiskulutus sekä energiakustannukset keskitetyllä ja hajautetulla kulutusjoustolla varustetussa toimistorakennuksessa. Tulokset osoittavat, että keskitetyllä kulutusjousto-ohjauksella saavutettavat säästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin hajautetulla, eli huonekohtaisella kulutusjousto-ohjauksella. Tulokset myös paljastavat, että keskitetyn kulutusjouston käyttö vähentää vuotuista kaukolämmön kulutusta sekä kaukolämmön energiakustannuksia 1.5 %, joten keskitetyllä kulutusjoustolla saavutettu kustannussäästö syntyy vähentyneen kaukolämmön kulutuksen seurauksena. Myös hajautetun kulutusjouston käyttö vähentää kaukolämmön kulutusta, mutta suhteellinen kaukolämmön kustannussäästö on selvästi suurempi kuin suhteellinen energiansäästö. Tässä yhteydessä on syytä huomata, että huonekohtaisen kulutusjousto-ohjauksen käyttö vesiradiaattoriverkostossa edellyttää etäohjattavien elektronisten patteritermostaattien käyttöä, kun keskitetty kulutusjousto-ohjaus voidaan toteuttaa säätämällä menoveden lämpötilaa kaukolämmön alakeskuksesta ja käyttämällä perinteisiä termostaattisia patteriventtiileitä. Keskitetyn kulutusjousto-ohjauksen vähäistä säästöpotentiaalia selittää pitkälti se, että termostaattinen patteriventtiili kompensoi kulutusjousto-ohjauksella korotettua tai laskettua menoveden lämpötilaa vähentämällä tai kasvattamalla vesivirtaa, jolloin ohjaustoimenpiteen vaikutus vähenee.

Taulukko 3.4. Keskitetyllä ja hajautetulla (huonekohtaisella) kaukolämmön kulutusjoustolla saavutettavat energia- ja kustannussäästöt toimistorakennuksessa.

Case	Total DH energy		Saving potential		
	Specific demand, kWh/m ² ,a	Specific costs, €/m ² ,a	DH energy, %	DH energy cost, relative, %	DH energy cost, absolute, €/(m ² , a)
Centralized	126.7	8.08	-1.5 %	-1.5 %	- 0.12
Decentralized	125.5	7.77	-2.7 %	-5.2 %	-0.43

3.2.2 Hajautettu kulutusjousto kolmessa rakennustyyppissä

Suhonen et al. (2020) vertaili hajautetulla kaukolämmityksen kulutusjoustolla saavutettavia energia- ja kustannussäästöjä kolmessa eri rakennustyyppissä. Vertailussa on mukana 1990-luvulla valmistunut asuinkerrostalo, toimistorakennus ja kulttuurikeskus. Rakennusten lämmitetyt nettoalat ovat: 4900 m² (asuinkerrostalo), 2400 m² (toimistorakennus) ja 3900 m² (kulttuurikeskus). Kohteiden tilojen lämmitys on toteutettu vesiradiaattoriverkostolla 70/40 °C lämpötilamitoituksella. Tilojen lämmityksen kulutusjousto-ohjaus on toteutettu samalla ohjausperiaatteella kuin luvussa 3.2.1 esitetty hajautettu kulutusjousto-ohjaus.

Taulukossa 3.5 on esitetty kaukolämmön kokonaiskulutus sekä energiakustannukset tilojen lämmityksen kulutusjoustolla varustetuissa esimerkkirakennuksissa. Tulokset osoittavat, että kulutusjousto-ohjauksen käytöllä kohteiden vuotuinen kaukolämmön kulutus vähenee kohteesta riippuen noin 2-3 %, joten kaikkien kohteiden lämmöntarve hieman pienenee ohjauksen seurauksena. Kulutusjousto-ohjauksen seurauksena syntyneet suhteelliset kaukolämmön energiakustannussäästöt ovat suhteellisia energiansäästöjä suuremmat ja vaihtelevat kohteesta riippuen noin 3 ja 7 % välillä. Saavutetut suhteelliset ja absoluuttiset kustannussäästöt ovat asuinkerrostalossa ja kulttuurikeskuksessa samaa luokkaa, mutta toimistorakennuksessa säästöt ovat hieman suuremmat. Kulutusjousto-ohjauksella saavutettu absoluuttinen kustannussäästö (0.3 €/m²) ovat simuloitussa 1990-luvun toimistorakennuksessa hieman pienempi kuin luvussa 3.2.1 esitetty samanlaisella hajautetulla kulutusjousto-ohjauksella 1960-luvun toimistossa saavutettu säästö (0.42 €/m²), koska 1990-luvun toimistorakennuksen lämmitystarve on huomattavasti pienempi. Eli tulokset osoittavat kaikkiaan, että lämmityksen kulutusjousto-ohjauksella saavutettavat kustannussäästöt vaihtelevat rakennustyyppikohtaisesti ja absoluuttinen kustannussäästö ovat sitä suurempi, mitä suurempi lämmitystarve kohteella on.

Taulukko 3.5. Hajautetulla kaukolämmön kulutusjoustolla saavutettavat energia- ja kustannussäästöt asuin kerrostalossa, toimistorakennuksessa sekä kulttuurikeskuksessa.

Case	Space heating		Total DH energy		Saving potential		
	Specific demand, kWh/m ² ,a	Specific cost, €/m ² ,a	Specific demand, kWh/m ² ,a	Specific costs, €/m ² ,a	DH energy, %	DH energy cost, relative, %	DH energy cost, absolute, €/m ² , a
Apartment building	52.9	3.4	88.9	5.2	-1.7 %	-3.2 %	-0.2
Office building	56.6	3.5	72.1	4.4	-3.1 %	-6.8 %	-0.3
Cultural center	66.5	4.3	93.8	6.1	-2.1 %	-3.2 %	-0.2

3.2.3 Kulutusjousto uimahallissa

Yuan et al. (2021) tutki kaukolämmityksen kulutusjoustolla saavutettavia energia- ja kustannussäästöjä uimahallissa. Uimahalli on valmistunut 1960-luvun lopussa ja sen lämmitetty nettoala on noin 8000 m². Uimahallin tiloja, ilmanvaihtoa, käyttö- sekä allasvettä lämmitetään kaukolämmöllä. Uimahallissa on vesitilavuudeltaan noin 1120, 157 ja 47 m³ uima-altaat. Kahden suuremman altaan veden normaali lämmityksen asetusarvo on 26.5 °C ja pienimmille lapsille tarkoitetun pienimmän altaan lämmityksen asetusarvo on 28 °C. Simulointitutkimuksessa kaukolämmön kulutusjousto-ohjausta käytetään tilojen ja allasveden lämmityksen ohjaamiseen korottamalla tilojen ja kahden suuremman altaan veden lämmityksen asetusarvoa edullisen kaukolämmön ajankohtina 3.5 °C normaalista asetusarvosta ja laskemalla asetusarvoa 0.5 °C kalliin kaukolämmön aikana. Käytetyllä allasveden lämmityksen ohjaustavalla altaisiin voi varastoitua enimmillään hieman alle 6 MWh lämpöenergiaa nostamalla lämmityksen asetusarvoa matalimmasta 26 °C asetusarvosta korkeimpaan 30 °C asetusarvoon. Lisäksi uimahallin rakenteisiin varastoituu merkittäväsi lämpöenergiaa kulutusjousto-ohjausta käytettäessä. Kondensoimisen välttämiseksi, tilojen lämmityksen asetusarvo säädetään jatkuvasti siten, että se on aina 2 °C korkeampi kuin allasveden lämpötila-asetusarvo.

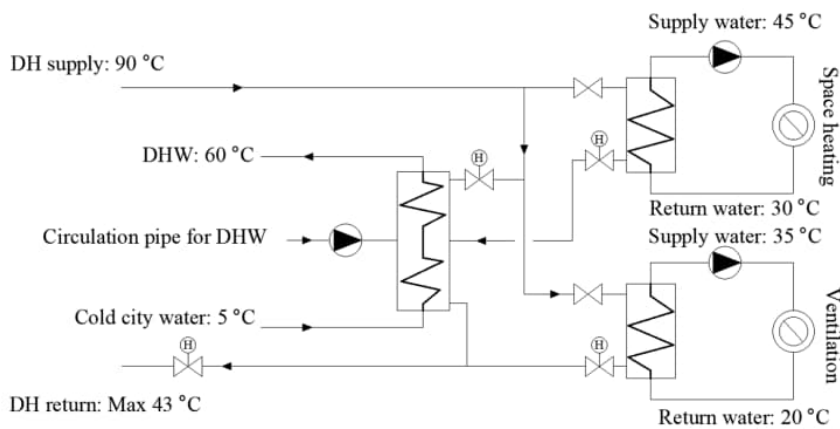
Taulukossa 3.6 on esitetty uimahallin kaukolämmön tarve eriteltynä tilojen, allasveden sekä muun kulutuksen osalta ilman kulutusjousto-ohjausta (Reference case) ja kulutusjousto-ohjauksella (DR case). Tulokset osoittavat, että kulutusjousto-ohjaus kaikkiaan kasvattaa kaukolämmön vuotuista kokonaiskulutusta hieman alle 2 %. Tämä johtuu siitä, että käytetty lämmityksen ohjaustapa keskimäärin nostaa allasveden lämpötilaa hieman alle 1 °C vuoden aikana ja lisäksi kahden suurimman allastilan ilmanvaihdon lämmitystarve hieman kasvaa. Allastilan ilmanvaihtoa ohjataan tarpeen mukaisesti pyrkimällä ylläpitämään tilan suhteellista kosteutta tavoitearvojen sisällä. Ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan seurauksena tilojen lämmitystarve vähenee hieman kulutusjousto-ohjausta käytettäessä. Vaikka kulutusjousto-ohjaus kasvattaa kohteen kaukolämmön kulutusta, kaukolämmön energiakustannukset kuitenkin hieman laskevat kulutusjoustopon käytön myötä.

Taulukko 3.6. Kaukolämmön tarve ja kulutusjoustopon vaikutus kaukolämmön tarpeeseen ja energiakustannuksiin uimahallissa. Kulutusjousto on käytössä tapauksessa (DR case).

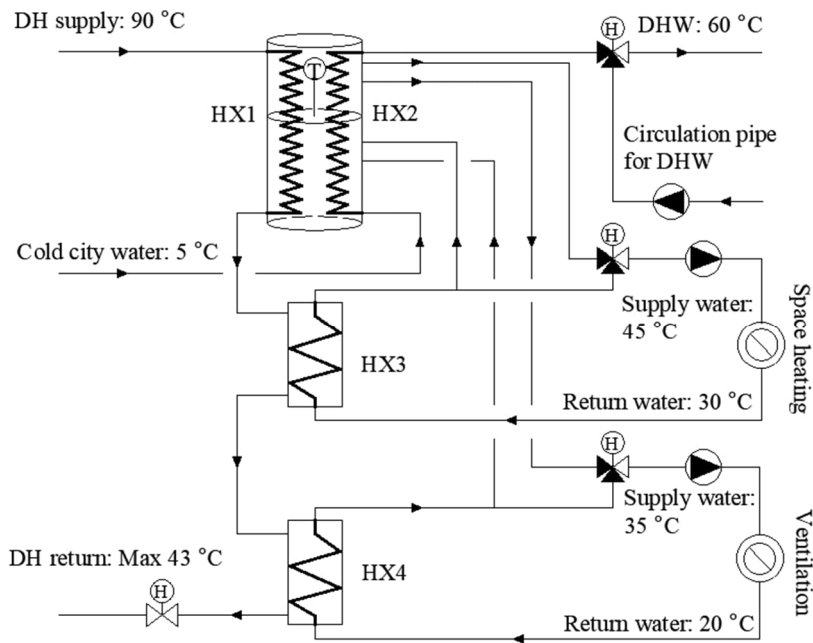
Case	Specific demand [MWh,a]				Saving potential	
	Space heating	Pool water heating	Others	Total DH energy	DH energy [$\Delta\%$]	Cost [$\Delta\%$]
Reference case	458	669	1 590	2 717	0.0 %	0.0 %
DR case	453	706	1 605	2 764	+1.7 %	-1.1 %

3.2.4 LV-varaaja kaukolämmön alakeskuksessa

Ju et al. (2023A) tutki simulointitutkimuksessa kaukolämmön alakeskukseen asennetun lämminvesivaraajan hyödyntämisen vaikutuksia kaukolämmön tehontarpeeseen toimistorakennuksessa. Esimerkkikohde on valmistunut 1980-luvulla ja sen lämmitetty nettoala on 2400 m². Perustapauksessa kohteessa on tavallinen kaukolämmön alakeskus ilman varaajaa (kuva 3.1) ja vertailutapauksessa alakeskus on varustettu tilavuudeltaan 5 m³ varaajalla (kuva 3.2). Toimistorakennuksessa suurimmat hetkelliset kaukolämmön tehontarpeet tyypillisesti ilmenevät aamuisin pääilmanvaihtokoneiden käynnistyessä ja tutkimuksessa selvitettiin kuinka varaajan lämmitystä kannattaa ohjata, jotta kaukolämmön tehopiikit saadaan leikattua aamuisin mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin, kuinka paljon kaukolämmön sopimusvesivirtaa voidaan vähentää varaajalla varustetun alakeskuksen tapauksessa ilman lämpöolojen heikentymistä rakennuksessa.

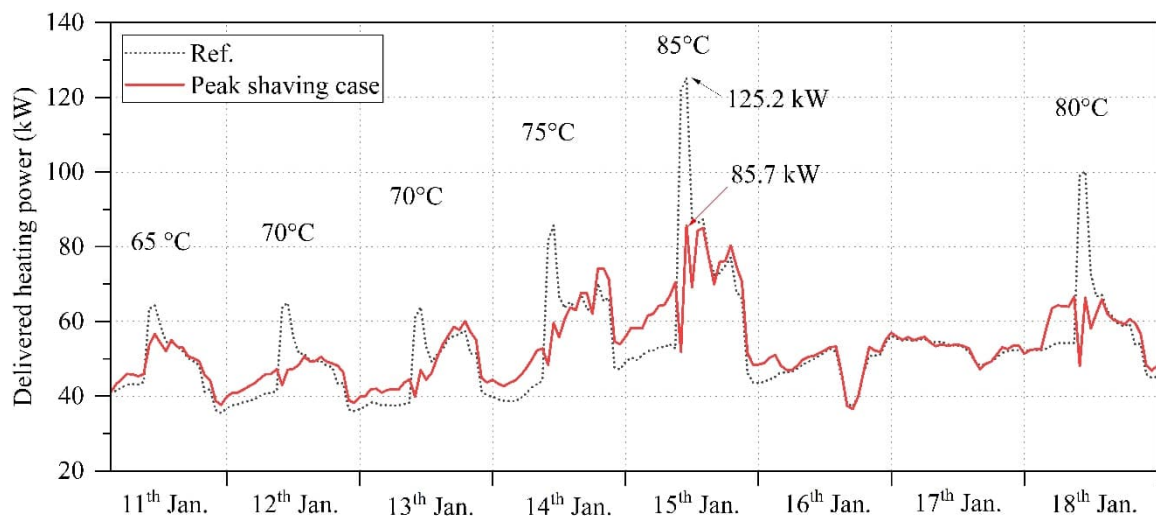


Kuva 3.1 Kaukolämmön alakeskus perustapauksessa (Ju et al. 2023A).



Kuva 3.2 Kaukolämmön alakeskus varustettuna lämminvesivaraajalla (Ju et al. 2023A)

Kuvassa 3.3 on esillä esimerkkikohteen kaukolämmön tehontarve simulointitutkimuksessa käytetyn tarkastelujakson (10/2020 – 9/2021) kylmimmän 8:n päivän jakson aikana, jolloin lämmityskauden korkeimmat kaukolämmön tehontarpeet esiintyivät. Kuvassa on esillä tehontarve ilman varaaja olevan alakeskuksen tapauksessa sekä 5 m³ varaajalla varustetun alakeskuksen tapauksessa. Molemmissa tapauksissa kaukolämmön sopimusvesivirta on sama. Tulokset osoittavat, että varaajan käytöllä kokolämmityskauden kaukolämmön huipputehontarve vähenee esimerkkitapauksessa 125 kW:sta 86 kW:iin, eli yli 30 %. Kaukolämmön tehomaksun hinnoittelutapa vaihtelee kaukolämmön tuottajasta riippuen, mutta esimerkkikohteen tapauksessa kaukolämmön tehomaksu laskisi varaajan käytön seurauksena 1.1 €/m², joka on noin 2.5-4 kertaa suurempi kustannussäästö verrattuna luvuissa 3.2.1 ja 3.2.2 esitettyihin kulutusjoustolla saavutettuihin kaukolämmön energiakustannussäästöihin toimistorakennuksessa. Lisäksi Ju et al. (2023A) osoittaa, että esimerkkikohteessa kaukolämmön sopimusvesivirtaa voisi vähentää vielä 86 kW:sta 30% lisää vaarantamatta rakennuksen lämpöoloja.

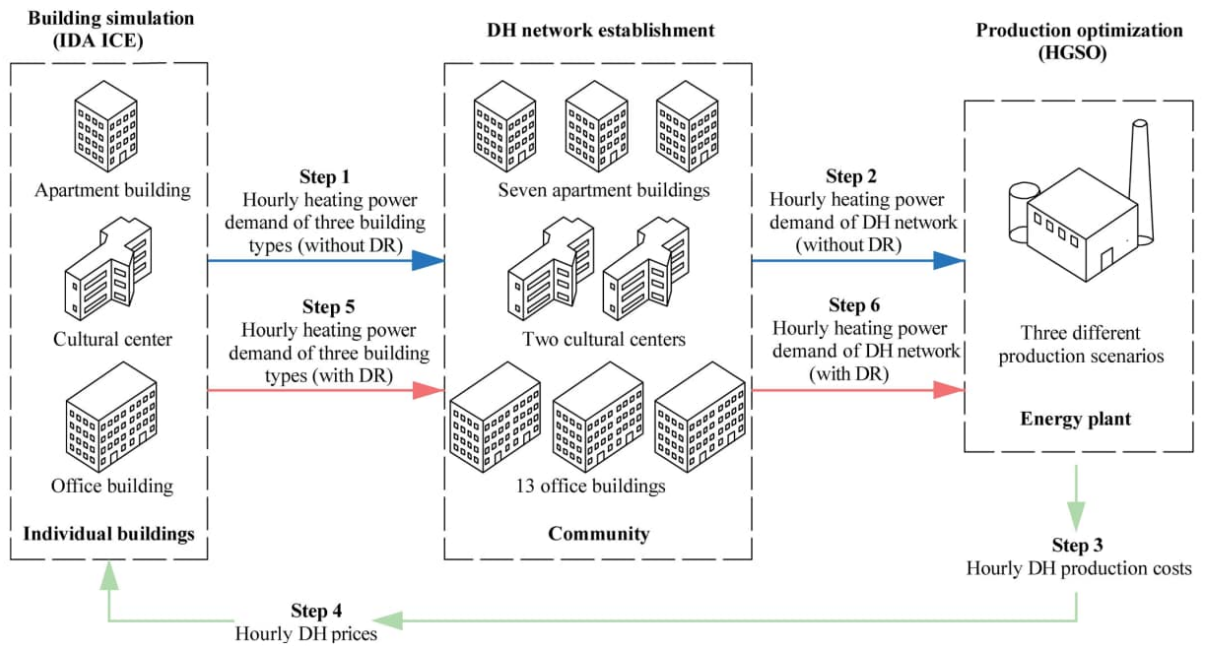


Kuva 3.3 Toimistorakennuksen kaukolämmön tehontarve tammikuussa 2021. Kaukolämmön alakeskus on varustettu 5 m³ varaajalla (Peak shaving case), mutta perustapauksesta (Ref.) varaajaa ei ole (Ju et al. 2023A).

Ju et al. (2023B) tutkii vuoden 2023 loppupuolella julkaistavassa tutkimuksessa toimistorakennuksen tilojen lämmityksen sekä kaukolämmön alakeskukseen asennetun lämminvesivaraajan lämmityksen kulutusjousto-ohjauksen ja kaukolämmön tehonleikkauksen vaikutuksia kaukolämmön energiakustannuksiin ja tehomaksuun suomalaisessa toimistorakennuksessa. Tulokset osoittavat, että kulutusjousto-ohjauksella saadaan vähennettyä selvästi sekä kaukolämmön energiakustannuksia että tehomaksua, mutta merkittävimmät kustannussäästöt saadaan aikaiseksi lämpöoloja vaarantamatta pienentämällä kaukolämmön sopimusvesivirtaa lämminvesivaraajalla varustetussa tapauksessa. Suhonen et al. (2023) on myös tutkinut tilojen lämmityksen kulutusjouston vaikutuksia kaukolämmön energia- sekä tehomaksuihin asuinkerrostalossa, toimistorakennuksessa ja kulttuurikeskuksessa Saksassa. Tulokset osoittavat, että pelkästään kulutusjouston hyödyntäminen vähentää esimerkkikohteiden kaukolämmön tehomaksuja noin 2-4% kohteesta riippuen sen lisäksi, että energiakustannukset vähenevät noin 3-5 %.

3.3 Kulutusjouston päästövähennyspotentialiaali

Ju et al. (2022) tutki kaukolämmön kulutusjouston hyödyntämisen vaikutuksia kaukolämmön tuotannon CO₂ päästöihin saksalaisessa kaukolämpöverkossa Hampurissa. Simulointitutkimisessa hyödynnettiin samanlaista hajautettua tilojen lämmityksen kulutusjousto-ohjausta, kun Suhonen et al. (2020) luvussa 3.2.2 esitettyssä tutkimuksessa. Tutkimuksessa simuloituun pieneen kaukolämpöverkkoon kytkettiin 7 asuinkerrostaloa, 13 toimistorakennusta sekä 2 kulttuurikeskusta (kuva 3.4). Tutkimuksessa oletettiin, että kaikkien kaukolämpöverkkoon kytkettyjen rakennusten lämmitystä ohjataan saman kulutusjousto-ohjausperiaatteen mukaisesti. Kulutusjousto-ohjaus toteutettiin käyttämällä tutkituille kaukolämmön tuotantoskenaarioille määritellyjä kaukolämmön tuntihintoja.



Kuva 3.4 Rakennusten ja kaukolämmön tuotannon simulointiprosessi (Ju et al. 2022).

Ju et al. (2022) vertaili kulutusjoustop hyödyntämisen vaikutuksia päästöihin käyttäen kolmea vaihtoehtoista kaukolämmön tuotantoskenaariota (taulukko 3.7):

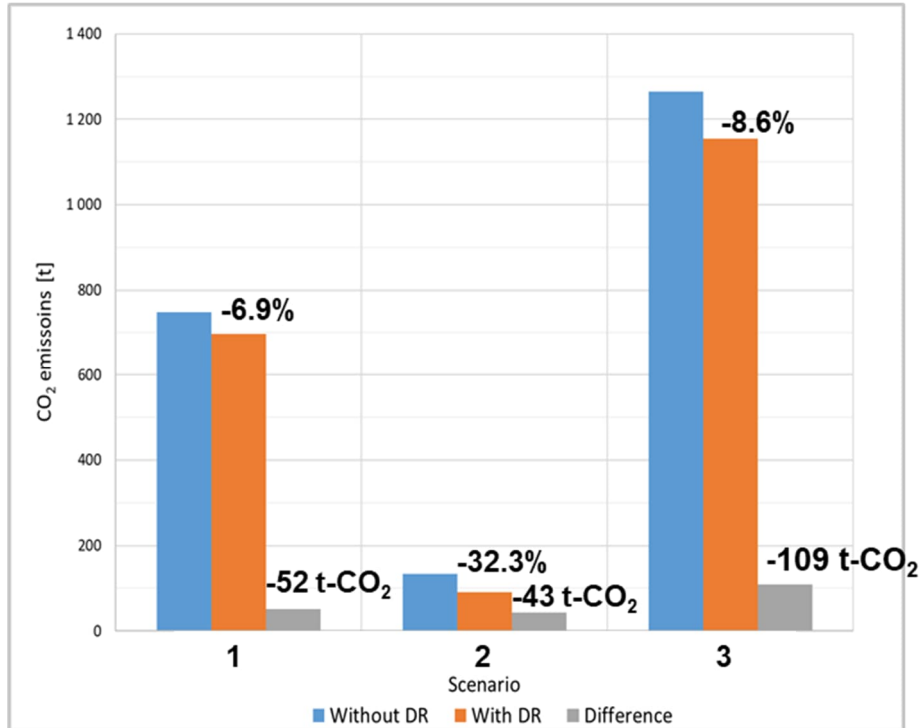
- Skenaario 1: Kaukolämpöä tuotetaan ensisijaisesti ilman fossiilisia CO₂ päästöjä biokaasu CHP laitoksella ja lämmityksen huipputehontarve katetaan kolmella maakaasukattilalla, jotka tuottavat fossiilisia CO₂ päästöjä.
- Skenaario 2: Kaukolämpöä tuotetaan ensisijaisesti aurinkolämmöllä, biokaasu CHP laitoksella ja CO₂ neutraalisti tuotetulla sähköllä toimivalla lämpöpumppulaitoksella. Lämmityksen huipputehontarve katetaan kahdella maakaasukattilalla, jotka tuottavat fossiilisia CO₂ päästöjä
- Skenaario 3: Kaukolämpö tuotetaan ensisijaisesti aurinkolämmöllä ja lisätehontarve tuotetaan lämpöpumppu- ja sähkökattilalaitoksilla, jotka käyttävät fossiilisilla polttoaineilla tuotettua sähköä.

Taulukko 3.7. Kaukolämmön tuotantoskenaariot (1-3) simuloitussa kaukolämpöverkossa (Ju et al. 2022).

Generation unit	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
	Heat/electricity power (MW)	Heat/electricity power (MW)	Heat/electricity power (MW)
CHP	+0.737 / +0.527	+0.737 / +0.527	–
Gas boiler 1	+1.950 / 0	+1.950 / 0	–
Gas boiler 2	+1.100 / 0	+1.100 / 0	–
Gas boiler 3	+1.100 / 0	–	–
Heat pump (HP)	–	+1.320 / –0.330	+2.000 / –0.500
Electric heater (EH)	–	–	+3.550 / –3.740
Solar thermal (ST)	–	+0.483 / 0	+0.483 / 0
Total heat power	4.887	5.590	6.033

Kuvassa 3.5 on esillä kaukolämmön tuotannon CO₂ päästöt taulukossa 3.7 esitetyillä tuotantoskenaarioilla, kun kaukolämpöverkkoon kytkettyjen rakennusten lämmityksessä käytetään kulutusjoustop ohjasta tai perustapauksissa sitä ei käytetä. Tulokset osoittavat, että CO₂ päästöjen määrä vaihtelee todella merkittävästi tuotantotavasta riippuen riippumatta siitä, käytetäänkö lämmityksen ohjauksessa kulutusjoustop vai ei. Kulutusjoustop hyödyntämällä CO₂ päästöjä voidaan kuitenkin vähentää

7:stä jopa 32%:iin. Tulokset osoittavat, että kulutusjoustolla saavutettava suhteellinen päästövähennys on sitä suurempi, mitä pienemmät CO₂ päästöt tuotannossa on, mutta absoluuttinen päästövähennys on sitä merkittävämpi, mitä enemmän CO₂ päästöjä tuotannossa syntyy. Tämä tarkoittaa sitä, että kulutusjouston hyödyntämisellä saavutetaan merkittävimmät ilmastovaikutukset sellaisissa kaukolämpöverkoissa, joissa fossiiliset CO₂ päästöt ovat korkeita ja huipputehontarve tuotetaan fossiilisia energialähteitä käyttäen.



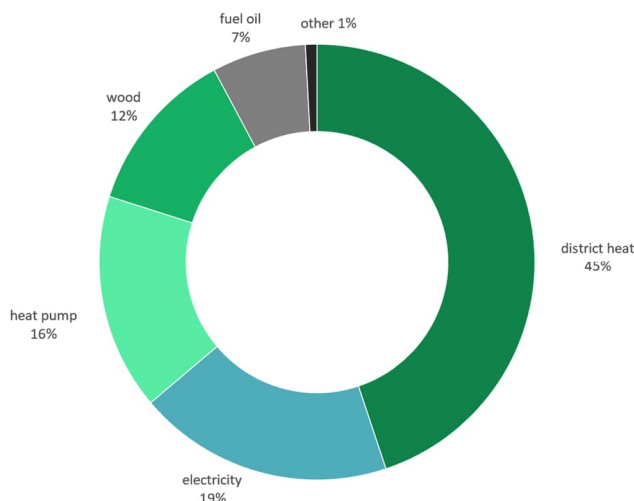
Kuva 3.5 Kulutusjouston vaikutus kaukolämmön tuotannon päästöihin kolmella eri tuotantoskenaariolla saksalaisessa kaukolämpöverkossa.

4. Energiajärjestelmien sektorikytkentä

Uusiutuvan sääriippuvan energiatuotannon yhä yleistyessä kysynnän ja tuotannon välisen tasapainon hallinta käy yhä haasteellisemmaksi. Yhtenä merkittävänä osaratkaisuna nähdään sektorikytkentä eri energiamuotojen ja -sektoreiden välillä. Kyseeseen tulee tällöin vuorovaikutus sähköjärjestelmän, kaukolämpöjärjestelmän ja sähköistyvän liikenteen välillä. Tulevaisuudessa myös vetytalouden odotetaan muodostavan merkittävän osan kokonaisenergiajärjestelmää ja sen joustojen hallintaa.

4.1 Sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmän välinen sektorikytkentä

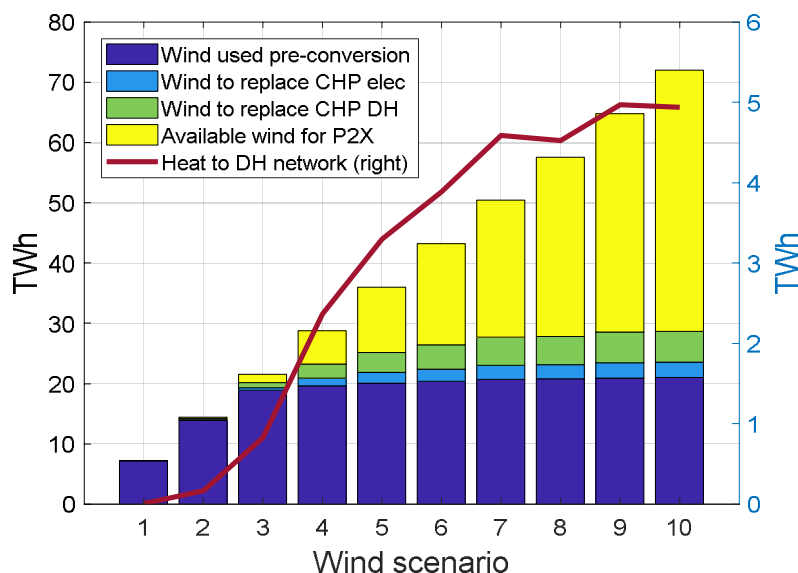
Siinä missä sähköenergian kokonaiskäyttö on Suomessa noin 86 TWh vuodessa, kuluu lämmitykseen energiaa noin 37 TWh. Eri lämmitysmuotojen osuus Suomessa vuonna 2020 on esitetty kuvassa 4.1. Kaukolämmöllä on merkittävä rooli sen kattaessa lähes puolet lämmöntarpeesta.



Kuva 4.1. Eri lämmitysmuotojen jakauma Suomessa vuonna 2020. Lähde: Energiateollisuus.

Koska kaukolämpöjärjestelmä on keskitetty järjestelmä, muodostaa se kiinnostavan jouston kohteen, joka voidaan valjastaa sähköjärjestelmän ja kaukolämpöjärjestelmän välisen sektori-integraation avulla. Käytännössä tällainen integraatio on tullut mahdolliseksi sitä mukaa kun sähkön rooli kaukolämmön tuotannossa kasvaa, joko lämpöpumppujen tai sähkökattiloiden muodossa. Yhdistämällä järjestelmään lämpövarastoja, voidaan sähkömarkkinoiden hintojen vaihtelua hyödyntää optimoimalla varastojen latausta Elspot-hinnan perusteella. Tulevaisuudessa voitaisiin ajatella myös erilaisten Fingridille myytävien reservijoustopien toteuttamista tällaisen sektorikytkennän avulla.

Kaukolämpöjärjestelmän ja sähköjärjestelmän sektorikytkennän vaikutusta energiajärjestelmän kykyyn integroida tuulivoimaa on tutkittu Suomessa erilaisilla skenaarioilla (Jokinen et al., 2020). Tutkimuksen tuloksia on havainnollistettu kuvassa 4.2.



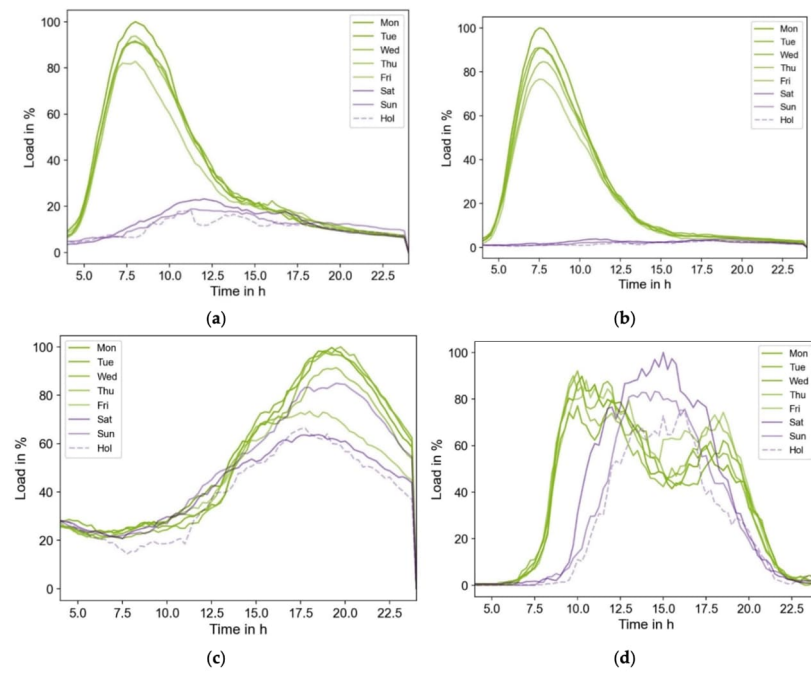
Kuva 4.2. Sähkön ja kaukolämpöjärjestelmän sektorikytkennän vaikutus energijärjestelmän kykyyn integroida tuulivoiman tuotantoa.

Kuvan 4.2. tapaus vastaa skenaariota, jossa kaukolämpö tehtäisiin sähkökattiloilla. Tuuliskenaariot olivat artikkelin julkaisuvuoden (2020) tuulikapasiteetin 2160 MW monikertoja. Mainittakoon, että vuoden 2022 lopussa Suomessa oli asennettua tuulivoimakapasiteettia jo 5677 MW, joten tällä hetkellä ollaan lähellä skenaariota 3. Kuvassa tummansininen alue vastaa suoraan nykyiseen sähkönkulutukseen menevää tuulivoimaa, vaalean sininen vastaa sitä osuutta tuotannosta, joka korvaa poistuvaa nykyistä yhdistettyä sähkön ja lämmöntuotantoa sähkön osalta. Vihreä vastaa tuulivoimalla tuotetun kaukolämmön osuutta ja keltainen on tuulivoimatuotannon ylijäämä, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi vetytalouden puolella, tai mahdollisesti viedä naapurimaihin.

Kuvan 4.2. skenaarioista voidaan päätellä, että tuulivoiman yleistyessä, sähkön ja lämmön sektorikytkentä tarjoaa kaukolämpöjärjestelmälle hyvän lähtökohdan sen hiilineutraalille kannalle muuttamisessa. Hyödyntämällä isoja keskitettyjä lämpövarastoja, voidaan sähkön roolia kaukolämpöjärjestelmässä edelleen tehostaa. Energian varastointi lämpönä on merkittävästi halvempaa kuin sähkön varastointi. Tämän vuoksi voidaan odottaa, että kaukolämpöjärjestelmän lämpövarastoilla voisi olla erittäin merkittävä rooli jouston lähteenä energijärjestelmissä, mahdollistaen laajamittaisemman tuulivoiman integroinnin sähköjärjestelmään, ja toisaalta hyödyntäen tuulisten päivien halpoja sähkön markkinahintoja kaukolämpöasiakkaiden hyväksi.

Tulevaisuudessa myös vetytaloudella tulee olemaan merkittävä rooli sähkön ja lämmön sektorikytkennässä. Tuotettaessa vetyä elektrolyysin avulla, vapautuu sivutuotteena lämpöä. Näin käy myös kompressoimalla vetyä varastointia tai kaasuverkossa tapahtuvaa siirtoa varten. Niin ikään useissa vedyn käyttötapauksissa sivutuotteena syntyy lämpöä. Laajamittaisen vedyntuotannon tapauksessa myös nämä lämpövirrat tulevat olemaan massiivisia, ja niiden täysimääräinen hyödyntäminen vaatii lämpövarastojen käyttöä kaukolämpöjärjestelmän yhteydessä.

4.2 Sähköisen liikenteen vaikutus



Kuva 4.3. Liikennetutkimukseen perustuvia malleja sähköautojen latauksen kuormalle Suomessa eri kohteissa. a) pysäköintilaitos, b) työpaikat, c) kotilataus ja d) ostoskeskus.

Sähköisen liikenteen ja siihen liittyvän sähköautojen lataustoiminnan odotetaan tarjoavan myös yhden merkittävän jouston lähteen sähköjärjestelmän kannalta. Yhdyskuntien ja rakennusten kannalta sähköautojen lataus muodostaa merkittävän kuorman, joka vaikuttaa paikallisten sähköjärjestelmien suunnitteluun ja rakennetun ympäristön energiankäyttöön. Kuvassa 4.3. on hahmoteltu (ohjaamattoman) sähköautojen latauksen muodostaman kuorman vaihtelua Suomen olosuhteissa (Rauma et al, 2021). Kuvan mallit perustuvat liikennetutkimuksen perusteella tehtyihin simulaatioihin.

Kokonaisuutena ottaen voidaan sähköautojen lataus jakaa seuraaviin tyyppitapauksiin:

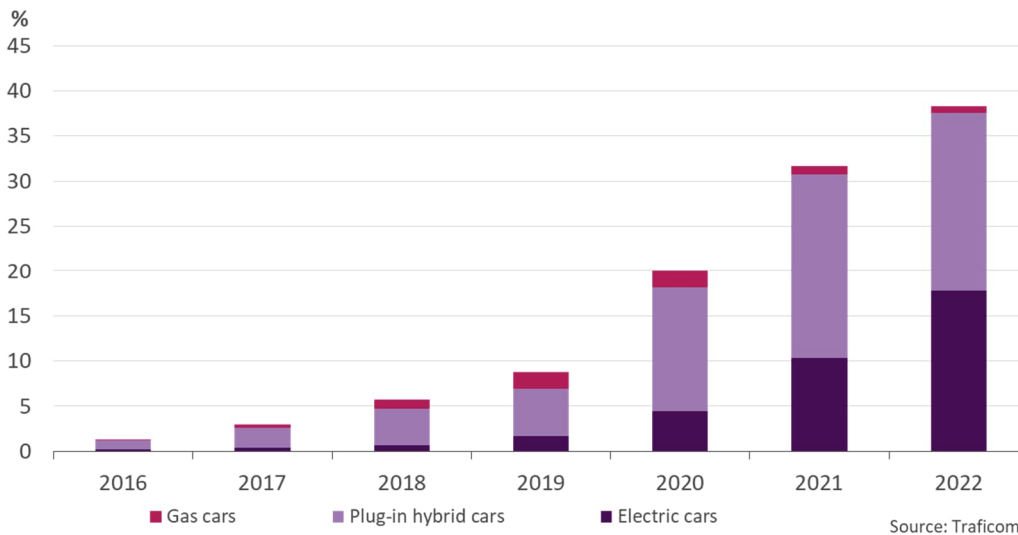
- Pysäköintihallit
- Työpaikat
- Kotilataus
- Liikekeskukset
- Tienvarsilataus

Pisimmän ajan sähköautot viettävät kotien parkkipaikoilla, latauksen painottuessa ilta- ja yöaikaan. Tyypillisimmin lataus tapahtuu hitaasti ja pienellä teholla. Kotilataus muodostaa hyvän kohteen kysynnän joustolle ja se on helppoa toteuttaa sähkön pörssihintaan perustuvalla ratkaisulla. Lataus työpaikalla on myös otollinen optimointikohde pörssihinnalla toimittaessa, koska autot tyypillisesti viettävät pitkän ajan työpaikalle pysäköitynä. Pysäköintilaitokset ovat työpaikkojen kaltaisia johtuen pitkistä pysäköintiajoista.

Liikekeskusten tapauksessa sähköautojen latauskuorma painottuu aamun tunteihin ja toisaalta illan suuhun, sekä viikonloppuisin keskelle päivää. Liikekeskusten tapauksessa pysäköintiajat ovat lyhyempiä ja auton haltijalle on tärkeämpää saada akku ladattua kuin säästää latauksen hinnassa. Tämän vuoksi pörssihinnalla optimointi ei juuri tule liikekeskusten latausjärjestelmissä kyseeseen. Fingridin reservimarkkinoille osallistuminen saattaisi kuitenkin olla toimiva optio liikerakennusten latausjärjestelmien kannalta.

Tienvarsilatauksen suhteen latauksen nopea saatavuus on vielä liikekeskuksiakin tärkeämpää. Tämän vuoksi tienvarsilatauksen potentiaalia kysynnän joustoon voi pitää varsin pienenä.

Edellä esitetyt mallit perustuvat henkilöautojen lataustarpeeseen. Suomessa on noin 2 miljoonaa henkilöautoa ja uusien autojen osalta autokanta sähköistyy tällä hetkellä nopeasti, kuva 4.4. Ottaen huomioon autojen pitkä käyttöikä, lähes 20 vuotta, tapahtuu autokannan uusiutuminen kuitenkin verrattain hitaasti. Useiden arvioiden mukaan on henkilöautojen sähköistymisen sähköntarvetta lisäävä vaikutus noin 10% nykyisestä tehon ja energiantarpeesta sitten kun kaikki henkilöautot on sähköistetty.



Kuva 4.4. Vaihtoehtoisten energiamuotojen osuus autojen ensirekisteröinneissä Suomessa.

Henkilöautojen lisäksi sähköistyy kaupunkien julkinen bussiliikenne sekä jakeluautot ja lyhyen matkan kuorma-autoliikenne. Rekkosten sähköistyminen on vielä avoin kysymys, koska pitkien ajomatkojen vuoksi akkujen koko muodostuu tällä hetkellä merkittäväksi rajoitukseksi. Vety saattaa tarjota sähköä käytännöllisemmän ratkaisun rekkaliikenteen saattamisessa hiilivapaalle kannalle.

5. Kehityskohteet

Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyessä energijärjestelmässä tarvitaan nykyistä enemmän joustavuutta. Yksittäisten kiinteistöjen ja energiayhteisöjen odotetaan osallistuvan tehontarpeen kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseen. Tulevaisuudessa rakennuksien energijärjestelmien kykyä toimia yhdessä vaihtelevan energiatuotannon kanssa tulee merkittävästi parantaa. Tämä tarkoittaa talotekniikkajärjestelmien kannalta sitä, että järjestelmien ohjattavuutta ja mahdollisuuksia vastaanottaa ulkoisia ohjaussignaaleja, esimerkiksi energiantuottajalta tulisi parantaa. Järjestelmien välisten rajapintojen avaaminen tulisi mahdollistaa ja tehdä nykyistä helpommaksi tietoturvallisuus huomioon ottaen. Lisäksi kulutusjoustop käytöstä energiantuottajalle syntyvän hyödyn jakoa kiinteistön omistajan ja energiantuottajan kesken tulisi avata ja kehittää.

Merkittäviä käytännön kehityskohteita ovat paikallisten lämpöpumppuratkaisujen ja kaukolämpöjärjestelmän hybridisovellukset. Lämpövarastoja hyödyntävien hybridisovelluksen optimointi eri näkökulmista, kuten kiinteistön tai kaukolämpöjärjestelmän kannalta, ovat myös merkittäviä kehityskohteita.

6. Johtopäätökset

Energiajärjestelmässä tarvitaan nykyistä enemmän joustavuutta uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntymisen myötä. Sähkön kulutusjoustoa on käytetty Suomessa jo melko pitkään, mutta kaukolämmön kulutusjoustopon käyttö on vielä tällä hetkellä kehitys- ja tutkimusvaiheessa.

Rakennusten energiajoustavuutta voidaan pitää indikaattorina sen kyvystä tarjota tuotannolle menetelmä tehopiikkien hallintaa. Energiajoustopon mittaamisessa on kolme eri näkökulmaa: aika, teho/energia ja kustannus. Kiinteistöomistajan kannalta energiajoustopossa mielenkiintoisinta on arvioida, kun arvioidaan kuinka suuri osa energiankäytöstä tapahtuu kalliin ja matalan hinnan aikana. Sähkön osalta on olemassa toimivat sähkömarkkinat. Kaukolämmössä käytetään vielä tällä hetkellä vuoden aikojen mukaan tai kuukausittain vaihtuvaa hintaa.

Kiinteistön omistaja voi vähentää lämmityksen energiakustannuksia sekä lämmitystehontarpeen vähenemisen myötä myös kiinteitä tehomaksuja kulutusjoustopon hyödyntämällä lämpöoloja vaarantamatta. Lämmityksen kulutusjoustopolla saavutettavat lämmityksen kustannussäästöt ovat hyvin tapauskohtaisia riippuen mm. rakennustyyppistä, lämmöneristystasosta, rakennuksen lämmönvarauskyvystä, lämmönjakojärjestelmästä, energian hinnoista sekä käytetystä kulutusjoustopon ohjausperiaatteesta sekä siitä, kuinka paljon rakennuksen lämpöoloille sallitaan joustovaraa. Tässä raportissa esitellyissä tutkimuksissa kulutusjoustopon hyödyntämisellä saavutettavat suhteelliset kustannussäästöt vaihtelevat 1-14 % välillä ja absoluuttiset 0,1-2,7 €/m² välillä, mutta tässä yhteydessä on syytä korostaa, että kulutusjoustopolla saavutettavat säästöt olisivat selvästi suuremmat, mikäli esitetyissä tutkimuksissa olisi käytetty Venäjän hyökkäyssodan alkamisen jälkeen nousseita ja suuresti vaihtelevia energian hintoja.

Riippumatta lämmityksen kulutusjoustopon ohjaukseen käytetyistä energian hinnoista, tässä raportissa esitetyt tutkimuksen osoittavat, että lämmityksen kulutusjoustopolla saavutetaan sitä suuremmat absoluuttiset kustannussäästöt, mitä suurempi rakennuksen lämmitystarve on. Rakennuksen termistä massaa aktivoivat lämmönjakotavat, kuten lattialämmitys lisäävät osaltaan kulutusjoustopolla saatavaa kustannussäästöä. Hajautetulla tilojen lämmityksen kulutusjoustopolla voidaan säästää energiakustannuksia selvästi enemmän kuin keskitetyllä kulutusjoustopolla, kun lämmitysvesiverkosto oletetaan olevan tasapainossa riippumatta siitä, käytetäänkö kulutusjoustopon vai ei.

Lisäksi kaukolämmön alakeskukseen asennettavalla lämminvesivaraajalla on mahdollista vähentää toimistorakennuksen lämmityksen tehopiikkejä merkittävästi ja lämminvesivaraajan hyödyntäminen mahdollista kaukolämmön sopimusvesivirran merkittävän pienentämisen lämpöoloja vaarantamatta. Kulutusjoustopon hyödyntämällä voidaan vähentää myös energiantuotannon CO₂ päästöjä merkittävästi. Kulutusjoustopon käytön vaikutus päästövähennyksiin, riippuu huomattavasti käytetystä energian tuotantotavoista. Kulutusjoustopon hyödyntämisellä saavutetaan merkittävimmät ilmastovaikutukset sellaisissa kaukolämpöverkoissa, joissa fossiiliset CO₂ päästöt ovat korkeita ja huipputehontarve tuotetaan fossiilisia energialähteitä käyttäen.

Sähkön kulutusjoustopon osalta kiinnostavin kohde on erilaiset lämmitys- ja jäähdytyskuormat. Kaukolämpöjärjestelmän ja sähköjärjestelmän sektori-integraatio tarjoaa joustopon merkittävän keskitetyn potentiaalin, etenkin jos käytetään lämpövarastoja. Tulevaisuudessa myös vetytalouden laajeneminen

tarjoaa uusia mahdollisuuksia yhdyskuntien lämmitysjärjestelmien optimoimiselle. Sähköautojen yleistyminen tarjoaa sähkön kulutusjoustolle mahdollisuuksia etenkin kotilatauksen ja työpaikkalatauksen tapauksissa.

Lähdeluettelo

Alimohammadisagvand, B., Alam, S., Ali, M., Degefa, M., Jokisalo, J. and Sirén, K. Influence of energy demand response actions on thermal comfort and energy cost in electrically heated residential houses. *Indoor and Built Environment*. 26, (3) (2017). 298-316.

<https://doi.org/10.1177/1420326X15608514>

Alimohammadisagvand, B., Jokisalo, J. and Sirén, K. Comparison of four rule-based demand response control algorithms in an electrically and heat pump-heated residential building. *Applied Energy*. 209, (2018) p. 167-179 13 p. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.088>

Jokinen, I. et al. Carbon Emission Reduction Potential in the Finnish Energy System Due to Power and Heat Sector Coupling with Different Renovation Scenarios of Housing Stock. *Processes* 2020, 8, 1368. <https://doi.org/10.3390/pr8111368>

Ju, Y., Jokisalo, J., Kosonen, R., Kauppi, V. and Janßen, P. Analyzing power and energy flexibilities by demand response in district heated buildings in Finland and Germany. *Science and Technology for the Built Environment*. 27 (19). 2021.

<https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1950434>

Ju, Y., Lindholm, J., Verbeck, M., Jokisalo, J., Kosonen, R., Janßen, P., Li, Y., Schäfers, H. and Nord, N. Cost saving and CO2 emission reduction potential in German district heating system with demand response. *Science and Technology for the Built Environment*. 28 (2). 2022.

<https://doi.org/10.1080/23744731.2021.2018875>

Ju, Y., Jokisalo, J., Kosonen, R. Peak Shaving of a District Heated Office Building with Short-Term Thermal Energy Storage in Finland. *Buildings*. 13 573. 2023A.

<https://doi.org/10.3390/buildings13030573>

Ju, Y., Hiltunen, P., Jokisalo, J., Kosonen, R., and Syri, S. Benefits through space heating and thermal storage with demand response control for a district-heated office building. 2023B. (julkaistaan vuoden 2023 aikana)

Le Dréau et al. *Energy*, 111: 991-1002, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.076>

Nuytten T. et al. *Applied energy*, 104: 583-591, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029>

Rauma, K. et al. Electric Vehicles as a Flexibility Provider: Optimal Charging Schedules to Improve the Quality of Charging Service. *Electricity* 2021, 2, 225-243.

<https://doi.org/10.3390/electricity2030014>

Reynders G et al. *Applied energy*, 198: 192-202, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.061>

RIL 249-2010 Matalaenergiarakentaminen, Asuinrakennukset. Helsinki, RIL, 2009.

Salo, S., Hast, A., Jokisalo, J., Kosonen, R., Syri, S., Hirvonen, J. and Martin, K. The impact of optimal demand response control and thermal energy storage on a district heating system. *Energies*, 12(9), 2019. <https://doi.org/10.3390/en12091678>

Soares, A., et al. Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 490-503. 2014.

Stinner S et al. *Applied Energy*, 181: 140-154, 2016
(<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.055>)

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

Suhonen, J., Lindholm, J., Verbeck, M., Ju, Y., Jokisalo, J., Kosonen, R., Janßen, P. and Schäfers, H. Energy, cost and emission saving potential of demand response and peak power limiting in the German district heating system. *International Journal of Sustainable Energy*. 42, 1, 1092-1127. 2023. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2251601>

Yuan, X., Lindroos, L., Jokisalo, J., Kosonen, R., Pan, Y., and Jin, H. Demand response potential of district heating in a swimming hall in Finland. *Energy and Buildings*. 248. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111149>

Yuan, X., Vand, B., Martin, K., Jokisalo, J., Liang, Y., Kosonen, R. and Pan, Y. Cost-Effective Heating Control Approaches by Demand Response and Peak Demand Limiting in an Educational Office Building with District Heating. *Buildings*. 13 332. 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13020332>

Ympäristöministeriö, 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Asetus 1010/2017. Helsinki.