Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Maisterin Advanced Energy Solutions -koulutusohjelma

Kiinteistöjen hyödyntäminen energiaverkkojen tasapainottamisessa

Siiri Lapila

Diplomityö 2022

Copyright ©2022 Siiri Lapila

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Author Siiri Lapila

Title of thesis Utilizing Buildings to Balance Energy Networks

Programme Advanced Energy Solutions

Major Sustainable Energy Systems and Markets

Thesis supervisor Professor Matti Lehtonen

Thesis advisor(s) M.Sc. (Tech.) Olli Nummelin

Collaborative partner Caverion Suomi Oy

Date 21.12.2022 **Number of pages** 76 **Language** Finnish

Abstract

iFLEX is a project funded by European Union's Innovation and Research programme Horizon 2020. The objective of the project is to engage consumers in demand response. The aim of the thesis was to examine the opportunities for apartment buildings to balance energy networks, as well as the requirements and the prospects of the demand response in apartment buildings. The flexibility potential of an apartment building was studied through the pilot of the iFLEX project. The study was based on direct control of the exhaust air heat pump in which the electricity consumption of the heat pump was limited for a specific amount of time. The flexibility potential was determined by analyzing the results.

Based on the results, the electricity consumption of the building was reduced by 68 percent compared to the previous hour. The amount refers to a decrease of 11 kilowatts. In addition, the share of electricity consumption in the building's total energy decreased from 23 percent to 6 percent during the study. When the electricity consumption of the heat pump was reduced, district heating consumption increased. Based on this, the price ratio between electricity and district heating determines which form of heating is more profitable to use. The study demonstrated that apartment buildings could be utilized to balance the power grid. However, the flexibility potential of the building is relatively small; therefore, several similar buildings need to be aggregated to join the Finnish power market.

Demand response will play a central role in the energy transition. However, a few challenges need to be overcome before large-scale implementation. In order to promote demand response, the focus should be on informing the stakeholders, developing regulations, productizing demand response, and harmonizing processes and systems related to demand response.

Keywords demand response, apartment building, flexibility potential, exhaust air heat pump

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Tekijä Siiri Lapila

Työn nimi Kiinteistöjen hyödyntäminen energiaverkkojen tasapainottamisessa

Koulutusohjelma Advanced Energy Solutions

Pääaine Sustainable Energy Systems and Markets

Vastuuopettaja/valvoja Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja(t) Diplomi-insinööri Olli Nummelin

Yhteistyötaho Caverion Suomi Oy

Päivämäärä 21.12.2022 **Sivumäärä** 76 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

iFLEX on EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman Horisontti 2020 rahoittama hanke, jonka tavoitteena on saada energiankuluttajat osaksi kysyntäjoustoa. Diplomityön tavoitteena oli selvittää kiinteistöjen mahdollisuuksia energiaverkkojen tasapainottamisessa sekä kiinteistöjen kysyntäjouston yleistymisen edellytyksiä ja tulevaisuudennäkymiä. Kiinteistöjen kysyntäjouston potentiaalia tutkittiin iFLEX-hankkeen pilottikohteena toimivan asuinkerrostalon avulla. Joustopotentiaalin määrittäminen perustui poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeisiin, joissa lämpöpumpun käyttö katkaistiin määräajaksi. Ohjauskokeiden vaikutuksia kohteen energiankulutukseen tutkittiin saatujen mittaustulosten pohjalta.

Tutkimustulosten perusteella kiinteistön sähkönkulutusta saatiin vähennettyä jopa 68 prosenttia ohjauskoetta edeltävään tuntiin verrattuna. Määrällisesti se vastasi 11 kilowatin laskua sähkötehossa. Lisäksi viimeisen ohjauskokeen aikana kiinteistön sähkönkulutuksen osuus kokonaisenergiasta saatiin laskettua 23 prosentista 6 prosenttiin. Kun sähkönkulutusta vähennettiin, kaukolämmön kulutus kasvoi. Tämän perusteella sähkön ja kaukolämmön välinen hintasuhde määrittää sen, kumpaa lämmitysmuotoa on kannattavampaa käyttää. Ohjauskokeiden avulla pystyttiin osoittamaan asuinkiinteistöjen mahdollisuus sähköverkon tasapainottamisessa. Koska pilottikohteen joustopotentiaali on yksinään suhteellisen pieni, useamman samankaltaisen kiinteistön joustopotentiaali on yhdistettävä kysyntäjoustomarkkinoille pääsemiseksi.

Kysyntäjouston rooli tulee energiamurroksen myötä kasvamaan. Useita haasteita on kuitenkin ratkaistava ennen kuin kysyntäjouston laaja-alainen käyttöönotto on mahdollista. Tämän perusteella sähkön kysyntäjouston edistämiseksi tulee keskittyä erityisesti sääntelyn kehittämiseen, sidosryhmien informointiin, kysyntäjouston tuotteistamiseen sekä prosessien ja järjestelmien yhtenäistämiseen.

Avainsanat kysyntäjousto, asuinkerrostalo, joustopotentiaali, poistoilmalämpöpumppu

Sisällysluettelo

Esipuhe 7
Lyhenteet 8
1 Johdanto 9
1.1 Työn tausta 10
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset 11
1.3 Työn rakenne 12
2 Energiamarkkinat Suomessa 13
2.1 Energiantuotanto ja -kulutus 13
2.2 Sähkömarkkinat 16
2.2.1 Sähkön hinnoittelu 19
2.3 Kaukolämpö 20
2.3.1 Kaukolämmön hinnoittelu 21
3 Kysyntäjousto 22
3.1 Sähkön kysyntäjousto 25
3.1.1 Sähkön kysyntäjouston toteuttaminen kiinteistössä 27
3.1.2 Sähkön kysyntäjoustomarkkinat kiinteistöille 29
3.2 Kaukolämmön kysyntäjousto 30
3.2.1 Lämmön kysyntäjouston toteuttaminen kiinteistössä 31
3.3 Kysyntäjouston hyödyt ja haasteet 32
4 Euroopan unionin ilmastotavoitteet 34
4.1 Euroopan unionin toimet energia- ja ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi 35
4.1.1 Suomen kansallinen energia- ja ilmastosuunnitelma 37
4.2 Kysyntäjousto lainsäädännössä 37
4.3 Tutkimus ja innovointi Euroopassa 39
4.3.1 Kysyntäjoustohankkeita ja pilotointeja 41
4.4 Poliittisten toimien vaikutus energiamarkkinoihin ja energiakriisi 43
5 Asuinkiinteistön mahdollisuuksien tutkiminen energiaverkkojen tasapainottamisessa 45
5.1 iFLEX Assistant 45
5.1.1 iFLEX Assistantin toiminnalliset osat 47

5.2 Suomen pilottikohde 48
5.2.1 Rakennuksen energiajärjestelmät 50
5.3 Kuormien ohjaus ja pilotointi 51
6 Tutkimustulokset 53
7 Johtopäätökset 58
Lähteet 61

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty toimeksiantona Caverion Suomi Oy:lle. Caverion Suomi Oy on mukana EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman Horisontti 2020 rahoittamassa iFLEX-hankkeessa. Hankkeen tavoitteena on saada energiankuluttajat osaksi kysyntäjoustoa helpottamalla heidän osallistumista energiankulutuksen hallintaan kysyntäjousto-ohjelmien avulla.

Haluan kiittää diplomityöni valvojana toiminutta Matti Lehtosta arvokkaista keskusteluista. Lisäksi haluan kiittää työni ohjaajaa Olli Nummelinia ajankohtaisen aiheen tarjoamisesta sekä asiantuntevista neuvoista. Suuret kiitokset myös Simo Tähtiselle ja kaikille muille, jotka edesauttoivat diplomityöni valmistumista.

Lopuksi haluan kiittää läheisiäni tuesta sekä kannustuksesta koko opintourani aikana.

Helsingissä 21.12.2022
Siiri Lapila

Lyhenteet

AFM	Automaattinen joustavuuden hallinta (Automated Flexibility Management)
aFRR	Automaattinen taajuuden palautusreservi (automatic Frequency Restoration Resrve)
AMR	Etäluettava energiamittari (Automated Meter Reading)
BEMS	Rakennuksen energianhallintajärjestelmä (Building Energy Management System)
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
CO2	Hiilidioksidi
COP	Lämpöpumpun hyötysuhde (Coefficient of Performance)
DR	Kysyntäjousto (Demand Response)
DSM	Kysynnän hallinta (Demand Side Management)
DT	Digitaalinen kaksonen (Digital Twin)
EIC	Euroopan innovaationeuvosto
EIT	Euroopan innovaatio- ja teknologiainstituutti
ERC	Euroopan tutkimusneuvosto
EU	Euroopan unioni
EU ETS	Euroopan unionin päästökauppajärjestelmä (EU Emissions Traiding System)
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances)
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency Containment Reserve for Normal Operation)
FMI	Ilmatieteen laitos (Finnish Meteorological Institute)
HEMS	Kodin energianhallintajärjestelmä (Home Energy Management System)
IoT	Esineiden internet (Internet of Things)
JACE	Java-sovelluksen ohjauskone (Java Application Control Engine)
mFRR	Manuaalisen taajuuden palautusreservi (manual Frequency Restoration Reserve)
MSCA	Marie Skłodowska-Curie -toimet
MVA	Megavolttiampeeri
NECPs	Kansalliset energia- ja ilmastosuunnitelmat (National energy and climate plans)
oBIX	Avoin rakennuksen tietokanta (open Building Information Xchange)
PILP	Poistoilmalämpöpumppu
RAI	Resurssienkeräysrajapinta (Resource Abstraction Interface)
RR	Korvaava reservi (Replacement Reserve)
SG	Älykäs sähköverkko (Smart Grid)
TCP	Tietoliikenneprotokolla (Transmission Control Protocol)
UTC	Koordinoitu yleisaika (Coordinated Universal Time)
WSI	Sääpalveluiden rajapinta (Weather Service Interface)
YK	Yhdistyneet kansakunnat

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on ihmiskunnan suurin globaali haaste [1, s. 9]. Kasvihuonekaasupäästöjä syntyy eniten energiasektorilla, ja siksi ilmastonmuutoksen hillitsemisen keskiössä on päästöjen vähentäminen energiajärjestelmissä. Arviolta kaksi kolmasosaa päästöistä liittyvät fossiilisten polttoaineiden hyödyntämiseen lämmityksessä, sähköntuotannossa, liikenteessä ja teollisuudessa. Päästöjen vähentämiseksi merkittävimmät toimet koskevat uusiutuvan energian lisäämistä ja energiajärjestelmien energiatehokkuuden parantamista. [2.]

Uusiutuva energiantuotanto on vaihtelevaa ja vaikeasti ennustettavaa, mikä tuottaa haasteita sähköverkon tasapainon hallinnassa. Sähköverkon toiminnan kannalta olisi järkevää mukauttaa kysyntä vastaamaan uusiutuvilla energialähteillä tuotettua energiaa. Sen toteuttaminen vaatii joustavia ratkaisuja ja erityisesti kuluttajia, jotka ovat valmiita mukauttamaan kulutustaan tarpeen mukaan. [3, s. 181.] Uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä on myös tärkeää pystyä säätämään ja ohjaamaan rakennusten tehonkulutusta, jotta tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino saadaan säilytettyä [4, s. 1].

Energiantuotannon muutoksen lisäksi, uusia ratkaisuja tarvitaan energiankulutukseen. Kiinteistöt ja rakennussektori ovat vastuussa merkittävästä osasta energian kokonaiskulutuksesta ja -päästöistä. Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen vähentää energiankulutusta, mikä puolestaan pienentää tuotantokapasiteetin ja huipputehon tarvetta. [4, s. 1.] Energiankulutus kuormittaa ympäristöä ja aiheuttaa eniten kustannuksia rakennuksen koko elinkaaren aikana. Rakennusten energiankulutus on peräisin lämmityksestä sekä sähkönkäytöstä. [5.] Perinteisten energiatehokkuustoimien ohella, kysyntäjousto on noussut tärkeäksi keinoksi energiajärjestelmistä aiheutuvien päästöjen ja kustannusten leikkaamisessa [4, s. 1].

1.1 Työn tausta

Siirtymä fossiilisten polttoaineiden käytöstä kohti vähäpäästöisiä energialähteitä muuttaa sekä energiajärjestelmän rakennetta että toimintaa [6]. Uusiutuvien energialähteiden lisääntyminen tekee sähköntuotannon ennustamisesta ja hallinnasta monimutkaisempaa. Uudenlaisia valvontamekanismeja tarvitaan, jotta kysynnän ja tuotannon välinen tasapaino saadaan pidettyä hallinnassa. Ongelmanratkaisun keskiössä ovat energiankuluttajat. Heillä on hallinnassaan suuri määrä joustavia resursseja, kuten kodinkoneita ja lämpöpumppuja, joiden avulla voidaan tasapainottaa energiajärjestelmiä. [7.]

iFLEX (Engaging Energy Consumers in Flexible Energy Consumption) on Euroopan unionin innovaatio- ja tutkimusohjelman Horisontti 2020 (Horizon 2020, H2020) rahoittama hanke, joka käynnistyi vuoden 2020 lopulla. Hankkeen tavoitteena on saada energiankuluttajat osaksi kysyntäjoustoa helpottamalla heidän osallistumista energiankulutuksen hallintaan kysyntäjousto-ohjelmien avulla. [8.] Kuvassa 1 on esitetty avustussopimustunnus, jota kaikkien EU:n rahoitusta saaneiden hankkeiden on edellytetty käyttävän.

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme under Grant Agreement No 957670

Kuva 1: iFLEX-hankkeen avustussopimustunnus [7]

iFLEX-hankkeen ydinkonseptina toimii älykäs henkilökohtainen avustaja, iFLEX Assistant, joka on kehitetty kuluttajien tueksi joustavuuden hallintaan. iFLEX Assistant on ohjelmistoagentti, joka toimii kuluttajan, rakennuksen energiajärjestelmän, eri sidosryhmien sekä ulkoisten järjestelmien kanssa vuorovaikutuksessa auttaen kuluttajia toteuttamaan energiatavoitteitaan paikallisen energiahallinnan ja kysyntäjouston avulla. Hankkeessa hyödynnetään viimeisimpään kehitykseen perustuvaa automaatiota sekä tekoälyä. Hanke keskittyy ensisijaisesti asuinrakennusten energiankulutuksen hallintaan. iFLEX Assistantia pilotoidaan eri painotuksilla kolmessa maassa: Suomessa, Kreikassa sekä Sloveniassa. Suomen pilottikohteena toimii opiskelijoille suunnattu asuinkerrostalo. Kyseinen asuinkerrostalo on toiminut myös aiemmin pilottikohteena EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman Horisontti 2020 rahoittamassa HOLISDER-hankkeessa. HOLISDER on toiminut iFLEX-hankeen edeltäjänä. [7; 8.]

iFLEX-hankkeen kehitys perustuu iteratiiviseen prosessiin, minkä seurauksena hanke toteutetaan kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäinen vaihe päättyi vuoden 2021 lopulla ja sen tavoitteena oli luoda iFLEX-kehyksestä ja sovelluskohtaisesta iFLEX Assistantista vähimmäisvaatimukset täyttävä

tuote, joka otettiin käyttöön esipilotissa muutaman valitun käyttäjän kesken. Hankkeen toinen vaihe on tällä hetkellä käynnissä ja sen tarkoituksena on hyödyntää ensimmäisestä vaiheesta saatua palautetta iFLEX-kehyksen uusien toimintojen kehittämisessä sekä käyttökokemuksen parantamisessa. Toisen vaiheen lopussa parannettua iFLEX-kehystä ja iFLEX Assistantia validoidaan pienimuotoisilla piloteilla. Viimeisessä vaiheessa puuttuvat toiminnot lisätään ja palvelun laatua hienosäädetään. Lisäksi keskitytään käyttökokemuksen parantamiseen toisesta vaiheesta saadun palautteen pohjalta sekä kasvattamaan sitoutuneiden loppukäyttäjien määrää. Hankkeen lopullista iFLEX Assistantia tulisi validoida mahdollisimman laajassa mittakaavassa. [9, s. 8.]

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää kiinteistöjen mahdollisuuksia energiaverkkojen tasapainottamisessa sekä tarkastella kiinteistöjen kysyntäjouston yleistymisen edellytyksiä. Tarkoituksena on myös selventää kiinteistöjen kysyntäjouston roolia tulevaisuudessa. Työssä selvitetään asuinkerrostalon sähkönkäytön joustopotentiaalia tutkimalla iFLEX-hankkeen pilottikohteena toimivasta asuinkiinteistöstä saatuja poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeiden mittaustuloksia. Tämän perusteella diplomityö rajataan niin, että se keskittyy ainoastaan asuinkiinteistöjen kysyntäjoustoon. Työssä tarkastellaan energiaverkkoja kysyntäjouston näkökulmasta ja siksi työssä käsitellään sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjoustoa. Sähkö- ja kaukolämpöverkot eroavat merkittävästi toisistaan, minkä seurauksena kysyntäjouston toteuttaminen ja niistä saatavat hyödyt ovat keskenään hyvin erilaisia. Tästä johtuen työssä käsitellään molempia omina kokonaisuuksinaan.

Diplomityön tavoitteiden saavuttamiseksi tutkimuskysymykset ovat muotoiltu seuraavanlaisiksi:

- Voidaanko kiinteistöjen avulla vakauttaa energiamarkkinoita?
- Mitkä ovat edellytykset kiinteistöjen kysyntäjouston yleistymiselle?
- Mitkä ovat kiinteistöjen kysyntäjouston tulevaisuudennäkymät?

1.3 Työn rakenne

Työ alkaa luvusta 2, jossa tarkastellaan Suomen energiamarkkinoita sekä eritellään energiantuotantoa ja -kulutusta. Luvussa keskitytään sähkömarkkinoiden rakenteeseen ja toimintaperiaatteisiin sekä kaukolämpöjärjestelmän toimintaan. Lisäksi luvussa käydään läpi sähkön ja kaukolämmön hinnoittelua Suomessa sekä tarkastellaan energiamarkkinoiden muuttumista tulevaisuudessa.

Luvussa 3 tutustutaan kysyntäjouston yleistymistä edistäviin tekijöihin, sekä tarkastellaan sähkön ja lämmön kysyntäjoustoa teoriatasolla. Luvussa käydään myös läpi kysyntäjouston toteuttaminen kiinteistössä sekä eritellään kysyntäjouston hyötyjä ja toteuttamisen haasteita.

Luvussa 4 käsitellään Euroopan unionin asettamia ilmastotavoitteita ja -toimia sekä kysyntäjouston lainsäädäntöä. Lisäksi luvussa esitellään pääpiirteittäin Suomen kansallinen energia- ja ilmastosuunnitelma sekä perehdytään tutkimukseen ja innovointiin Euroopassa. Luvun lopussa käsitellään poliittisten toimien vaikutuksia energiamarkkinoihin, ja etsitään syitä energiakriisille.

Luku 5 vastaa diplomityön tutkimusosuudesta. Luvussa esitellään iFLEX Assistant ja tutustutaan Suomen pilottikohteeseen. Lisäksi luvussa käydään läpi, kuinka pilottikohteen energiakuormia ohjataan ja minkälaisia ohjauskokeita hankkeen aikana on suoritettu.

Luvussa 6 esitellään poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeista saadut tutkimustulokset. Luvussa 7 kootaan diplomityö yhteen sekä arvioidaan tutkimustulosten luotettavuutta ja tehdään niistä johtopäätöksiä.

2 Energiamarkkinat Suomessa

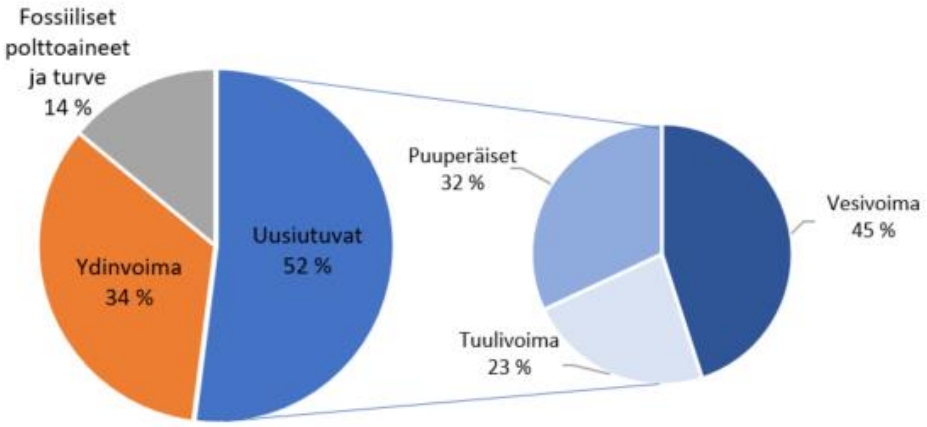
Energiamarkkinat ovat murroksessa. Tavoite hiilineutraalista yhteiskunnasta nopeuttaa muutosta tarjoten markkinaraon puhtaiden teknologioiden parissa. Vaikka Suomessa on vahvaa osaamista energia-alalla sekä vakiintuneita energiantuotanto- ja toimitustapoja, ei pelkästään niiden avulla pystytä vastaamaan ilmastonmuutoksen aiheuttamiin haasteisiin. Osa perinteisistä tuotantotavoista säilyttää asemansa, mutta niiden tueksi tarvitaan pienempää hajautettua tuotantoa ja energiavarastoja. [10]. Päästöjen vähentämisessä energialla on keskeinen rooli. Vuonna 2020 Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärä oli 48,3 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia, josta 72 prosenttia oli lähtöisin energiasektorilta, muodostaen suurimman osan Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. [11.] Jotta energiasektorin päästöjä saadaan vähennettyä, uusiutuvan energian määrää on kasvatettava ja energiatehokkuutta parannettava [12]. Merkittävät päästövähennykset vaativat suuria rakenteellisia muutoksia sekä energiajärjestelmään että energiamarkkinoihin.

2.1 Energiantuotanto ja -kulutus

Suomessa tuotetaan huomattava määrä sähköä ja lämpöä hyötysuhteeltaan korkeissa yhteistuotantovoimalaitoksissa (Combined Heat and Power, CHP) [13]. Yhteistuotannossa sähkö ja lämpö tuotetaan samassa prosessissa. Sähköä voidaan tuottaa höyry- tai kaasuturbiineilla ja niistä saatu lämpö hyödynnetään kaukolämpönä tai vaihtoehtoisesti teollisuuden prosessilämpönä. [14.] Yhteistuotanto on tehokas polttoaineita hyödyntävä energiantuotantotapa, sillä sähkön ja lämmön samanaikainen tuottaminen mahdollistaa polttoaineen sisältämän energian hyödyntämisen lähes kokonaan, hyötysuhteen yltäessä yli 90 prosenttiin [15]. Yhteistuotannossa polttoaineiden käyttö ja päästöt ovat kolmasosan pienemmät verrattuna sähkön ja lämmön erillistuotantoon [16]. Lisäksi se tarjoaa joustavuutta polttoaineiden suhteen, minkä seurauksena muun muassa biomassan tai jätteiden hyödyntäminen on mahdollista [15].

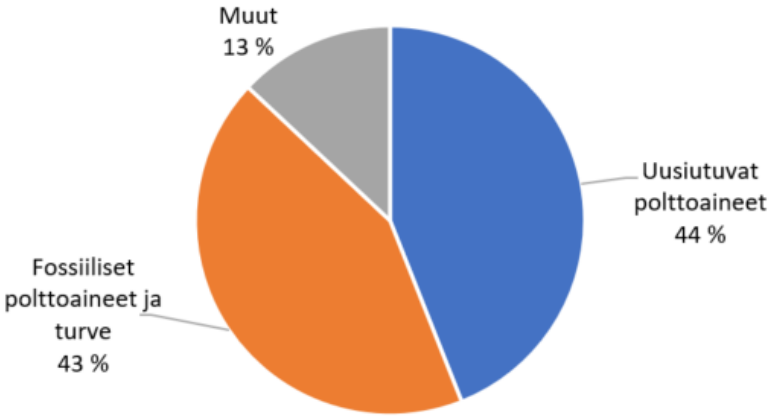
Vuonna 2020 Suomessa tuotettiin sähköä 66,6 TWh, josta 52 prosenttia oli uusiutuvilla energialähteillä tuotettu. Tämä tarkoittaa, että ensimmäistä kertaa noin 50 vuoteen yli puolet Suomen sähköntuotannosta tuotettiin uusiutuvilla energialähteillä. Kuva 2 havainnollistaa eri energialähteiden osuuksia Suomen sähköntuotannossa vuonna 2020. Uusiutuvista energialähteistä vesivoiman osuus oli kaikista suurin. Uusiutuvan energian lisäksi sähköä tuotettiin ydinvoimalla sekä fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella. Yhteistuotannon osuus oli 27 prosenttia koko sähköntuotannosta. Sähkön kokonaiskulutus Suomessa samana vuonna oli 81,6 TWh, josta 82 prosenttia

katettiin kotimaisella tuotannolla ja loput nettotuonnilla. Sähköä tuotiin Virosta, Venäjältä ja Pohjoismaista. [17.]



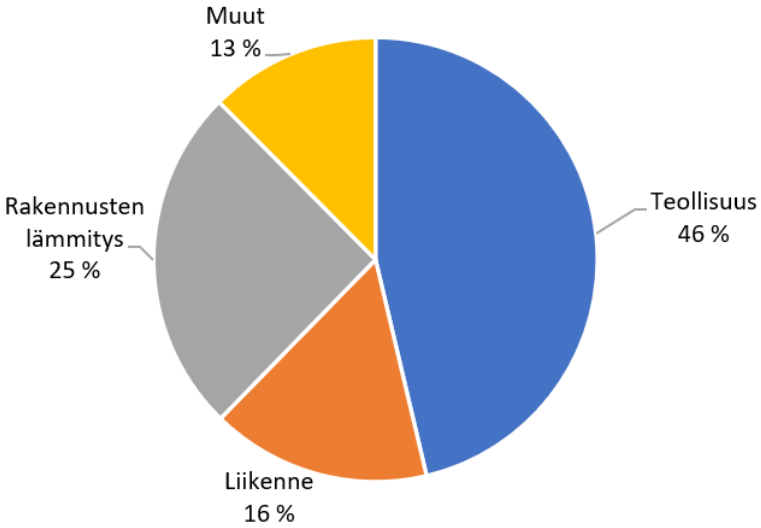
Kuva 2: Sähköntuotanto energialähteittäin Suomessa vuonna 2020 [17]

Vuonna 2020 kaukolämmön tuotanto oli 35,1 TWh. Kaukolämmön tuotannossa hyödynnettiin kuvan 3 mukaisesti uusiutuvia polttoaineita, fossiilisia polttoaineita ja turvetta sekä muita energialähteitä. Muihin energialähteisiin kuuluvat savukaasupesurit ja lämpöpumput. Puuperäisten polttoaineiden osuus (38 prosenttia) kaukolämmön tuotannosta oli kaikista suurin. Kaukolämmöstä noin 55 prosenttia tuotetiin yhteistuotannolla. [17.] Kuvasta voidaan huomata, että fossiilisten polttoaineiden määrä kaukolämmön tuotannossa on edelleen melko suuri.



Kuva 3: Kaukolämmön tuotanto energialähteittäin Suomessa vuonna 2020 [17]

Energian loppukäyttö Suomessa vuonna 2020 oli 288 TWh. Energian loppukäyttö tarkoittaa sitä energian määrää, joka jää jäljelle käytettäväksi, kun kokonaiskulutuksesta on vähennetty energian siirto- ja muuntohäviöt. [18.] Eniten energiaa käytettiin teollisuudessa ja toiseksi eniten rakennusten lämmityksessä. Kuva 4 havainnollistaa energian loppukäytön jakautumista sektoreittain vuonna 2020.



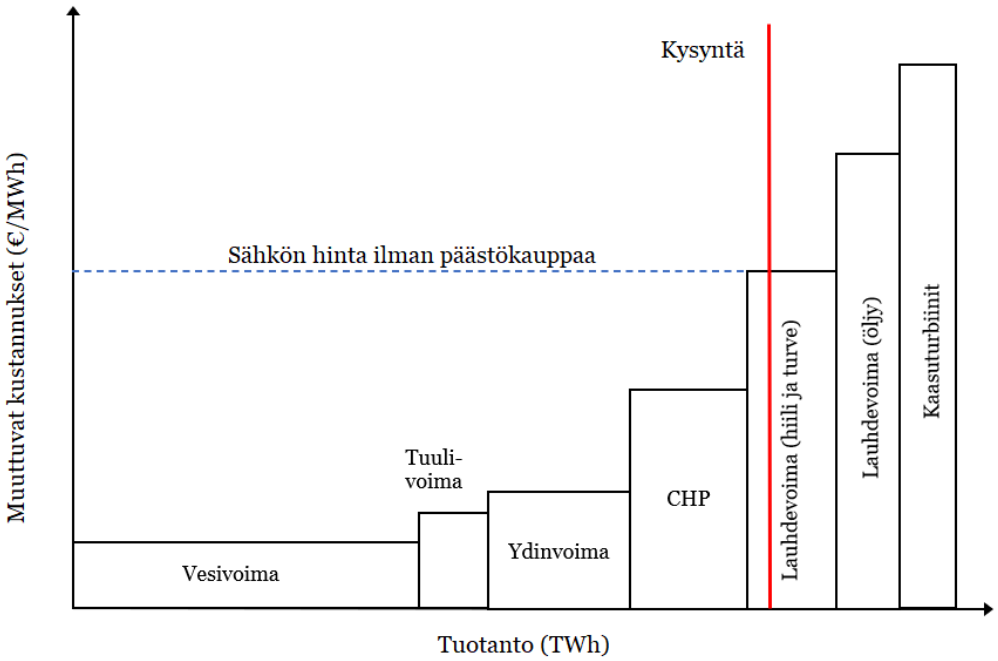
Kuva 4: Energian loppukäyttö Suomessa 2020 [19]

Asuinrakennusten osuus energian loppukäytöstä on arviolta 20 prosenttia, josta noin kaksi kolmasosaa kuluu tilojen lämmittämiseen. Rakennuksen koko, rakennuskannan energiatehokkuus sekä ulkoilman lämpötila vaikuttavat lämmitysenergian tarpeeseen. Vuonna 2020 oli ennätyksellisen lämmintä, minkä seurauksena asumisen energiankulutus laski edelliseen vuoteen verrattuna lähes neljä terawattituntia. Täten tilojen lämmityksen osuus asumisen energiankulutuksesta oli normaalia matalampi, 64 prosenttia. Kokonaisuudessaan asumiseen kului energiaa hieman alle 61 TWh. [20.]

2.2 Sähkömarkkinat

Toimivat sähkömarkkinat mahdollistavat sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapainottamisen sekä varmistavat yhteiskunnan sähkönsaannin [21]. Suomen sähkömarkkinat vapautettiin kilpailulle asteittain vuonna 1995, mikä tarkoitti sähköntuotannon ja -myynnin erottamista sähkönsiirrosta ja -jakelusta. Lisäksi vuoden 1998 muutoksen myötä kaikki kuluttajat pystyvät kilpailuttamaan itse sähkönmyyjänsä. Sähkönsiirto ja -jakelu ei ole kuitenkaan kilpailutettavissa, sillä useiden rinnakkaisten sähköverkkojen rakentaminen ei ole kannattavaa. [22, s. 6.] Sähkömarkkinat tarjoavat sähkönkäyttäjille myös mahdollisuuden pienimuotoiseen sähköntuotantoon ja sen myyntiin sähkömarkkinoille [23]. Lain näkökulmasta pientuotannoksi lasketaan kaikki enintään 2 MVA:n tuotantolaitteistot [24]. Tämä tukee sähkönkäyttäjien aktiivista osallistumista sähkömarkkinoilla. Suomessa kantaverkkoyhtiönä toimii luonnollisessa monopoliasemassa oleva Fingrid, jonka toimintaa ja hinnoittelua valvoo Energiavirasto [25; 26]. Sähkönjakeluverkoista vastaa yhteensä noin 80 sähköverkkoyhtiötä [27].

Suomi kuuluu osaksi pohjoismaisia tukkusähkömarkkinoita, joissa kaupankäynti tapahtuu Nord Pool -sähköpörssissä [23]. Tukkumarkkinoilla kauppaa käyvät sähköntuottajat sekä suuret sähkön kuluttaja- ja välittäjäyhtiöt. Sähkön tukkuhinta määräytyy sähköpörssissä kysynnän ja tarjonnan perusteella ja se on esitetty kuvassa 5. Tarjontakäyrä eli tuotantolaitosten ajojärjestys, muodostuu siten, että eri tuotantomuodot menevät muuttuvien kustannusten mukaisesti nousevaan järjestykseen. Muuttuvat kustannukset koostuvat polttoaineen ja käytön kustannuksista sekä voimalaitosten säädettävyydestä. Sähkön kysyntä on esitetty punaisella viivalla. Kysynnän ja tarjonnan välinen leikkauspiste määrittää sähkön tukkuhinnan. [28; 29.]



Kuva 5: Sähkön hinnan määräytyminen tukkumarkkinoilla [30]

Pohjoismaat ja Baltian alueet jaetaan tarjousalueiksi fysikaalisen siirtokapasiteetin perusteella. Suomi koostuu vain yhdestä tarjousalueesta. Tarjousalueilla voi olla sähkön yli- tai alijäämä tai tasapaino. Sähkö virtaa halvemmilta alueilta kohti korkean kysynnän ja hinnan alueita. Jos sähkön määrä on tarjousalueiden välillä kantaverkkoyhtiöiden asettamien kapasiteettirajojen sisällä, hinta on sama kaikilla tarjousalueilla. Eri hinta-alueita syntyy, kun verkossa on siirtorajoitteita eli pullonkaulatilanteita. [21; 31.]

Nord Pool -sähköpörssissä on kolme keskeistä markkinapaikkaa: 1) vuorokausimarkkinat, 2) päivänsisäiset markkinat ja 3) johdannaismarkkinat. Elspot-vuorokausimarkkinoilla (day-ahead market) kaupataan sähköä seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Tarjoukset on jätettävä ennen markkinoiden sulkeutumista kello 13.00 Suomen aikaa. Kun vuorokausimarkkinat sulkeutuvat, käydään kauppaa päivänsisäisillä Elbas-markkinoilla (intraday market) myös jokaiselle tunnille erikseen. Sähkön toimitushetken lähestyessä saattaa tulla muutoksia sähkön kulutukseen. Päivänsisäisillä markkinoilla mahdollistetaan markkinaosapuolten tarkennukset tuotanto- ja kulutussuunnitelmiinsa lähempänä käyttöhetkeä. Markkinat sulkeutuvat Suomen alueella toistaiseksi 0 minuuttia ennen toimitusta. Johdannaismarkkinoilla kauppaa käydään sähkön hintaan sidoksissa olevilla johdannaistuotteilla, kuten futuureilla, fowardeilla ja optioilla. Niiden avulla suojataan sähkön hinta suurilta vaihteluilta. [21; 28.]

Sähköverkon luotettava toiminta on riippuvainen tuotannon ja kulutuksen välisestä tasapainosta, minkä seurauksena sähköä on oltava tarjolla yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Sähköverkon tasapainoa kuvaa sähköverkon

taajuus, joka on tasapainotilassa 50,0 Hz, mutta normaalialue vaihtelee 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Vaikka sähkönkulutus- ja tuotantotarpeet suunnitellaan etukäteen, on niitä mahdotonta ennustaa täydellisesti. Tästä johtuen tarvitaan säätösähkö- ja reservimarkkinoita sähköverkon tasapainon säilyttämistä varten. [32; 33.]

Tehotasapainon hallintaan käytettävät reservit jaotellaan käyttötarkoituksensa mukaan kolmeen ryhmään: 1) taajuuden vakautusreserveihin, 2) taajuuden palautusreserveihin ja 3) korvaaviin reserveihin. Reserveinä toimivat voimalaitokset, erilaiset kulutuskohteet ja energiavarastot, jotka pystyvät muuttamaan tehoa tarpeen mukaan. Taajuuden vakautusreservejä hyödynnetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Ne jakautuvat edelleen taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N) ja taajuusohjattuun häiriöreserviin (FCR-D). Taajuusohjatun käyttöreservin tavoitteena on pitää taajuus normaalialueella (49,9–50,1 Hz). Taajuusohjatun häiriöreservin tavoitteena on pitää taajuus vähintään 49,5 Hz:ssä tai enintään 50,5 Hz:ssä silloin, kun taajuus poikkeaa normaalitaajuusalueelta. [32; 34.]

Taajuuden palautusreserveillä palautetaan taajuus normaalialueelle ja vapautetaan aktivoituneet taajuuden vakautusreservit takaisin käyttöön. Taajuuden palautusreservit jakautuvat automaattiseen taajuudenpalautusreserviin (aFRR) ja säätösähkömarkkinoihin (mFRR). Automaattisen taajuuden palautusreservin tarkoituksena on palauttaa sähköverkon taajuus nimellistaajuuteen ja palauttaa taajuudensäätöalueen tehotasapaino suunniteltuun arvoon. [35.] Säätösähkömarkkinoiden avulla pystytään reaaliaikaisesti tasapainottamaan tuotannon ja kulutuksen välistä tasapainoa. Säätösähkö voidaan tilata tarpeen mukaan joko ylös- tai alassäätönä. Korvaavilla reserveillä (RR) varaudutaan häiriötilanteiden jälkeen mahdollisesti ilmeneviin uusiin vikatilanteisiin niin, että aikaisemmin aktivoituneet taajuuden palautusreservit palautetaan takaisin valmiuteen. Korvaavat reservit eivät ole käytössä pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. [32; 36.]

Säästä riippuvaisen tuotannon lisääntyessä ja energiatehokkuustavoitteiden tiukentuessa joustavuuden tarve kasvaa sähköjärjestelmässä. Sähkömarkkinoiden on muututtava. Pysyäkseen ajan tasalla ja edistääkseen päästöttömään sähköjärjestelmään siirtymistä Fingridin näkemyksen mukaan toimenpiteitä tarvitaan erityisesti loppukäyttäjien aseman vahvistamisessa sekä markkinapaikkojen yhteensovittamisessa tuotantorakenteen kanssa. Myös markkinatoimijoiden aktiivista osallistumista sähköjärjestelmän tasapainottamisessa tulee tukea. [37, s. 1.]

Sähkön kysyntäjoustolle on Suomessa tarjolla kahdeksan eri markkinapaikkaa. Markkinoille pääsy edellyttää minimitarjouskoon täyttämistä. Kuva 6 havainnollistaa Suomen nykyistä kysyntäjouston markkinatilannetta.

Kuva 6: Kysyntäjouston markkinapaikat Suomessa 1.2.2022 [38]

2.2.1 Sähkön hinnoittelu

Sähkön vähittäismarkkinoilla Energiavirasto valvoo, että markkinaosapuolet toimivat sähkömarkkinalainsäädännön velvoitteiden mukaisesti. Sähkön vähittäismarkkinoilla sähköyhtiöt myyvät sähköä loppukäyttäjille [39]. Sähkön hinta muodostuu kolmesta kokonaisuudesta 1) sähköenergian hinnasta, 2) sähkönsiirron hinnasta sekä 3) sähkö- ja arvonlisäveroista. Sähköenergian hinta sisältää sähkön hankinta- ja myyntikustannukset. Hankintakustannukset määräytyvät sähköyhtiön oman tuotannon arvon tai sähköpörssistä ostetun sähkön hinnan mukaisesti. Sähkön myyntikustannukset sisältävät myyntiin ja markkinointiin liittyviä kustannuksia, kuten asiakaspalvelusta ja laskutuksesta aiheutuvia kustannuksia. Siirtomaksun avulla katetaan sähköverkkoon ja sähkönsiirtoon liittyviä palveluita, kuten sähköverkon ylläpito ja rakentaminen. [40; 41] Asiakkaan saamassa sähkölaskussa sähköenergian hinta ja sähkönsiirron hinta koostuu kulutusmaksusta (c/kWh) sekä kiinteästä perusmaksusta (€/kk). Arvonlisäveroa peritään sähköenergiasta, sähkönsiirrosta sekä sähköverosta. Sähkövero laskutetaan siirtohinnan yhteydessä. Kotitalousasiakkaan sähkölaskusta noin 40 prosenttia tulee sähköenergiasta, noin 30 prosenttia sähkönsiirrosta sekä noin 30 prosenttia veroista. [42.]

Sähköyhtiöt tarjoavat erilaisia sähkösopimuksia, joista asiakkaat valitsevat omaan kulutukseensa sopivan vaihtoehdon. Sähkösopimusta valittaessa voidaan ottaa huomioon sähköntuotantotapa, hinnoittelutapa sekä sopimuksen voimassaoloaika. Sähkönsiirrosta vastuussa oleva yhtiö määräytyy automaattisesti asuinpaikan perusteella. [43.] Yleisesti sähköyhtiöiden hinnoittelu perustuu neljään hinnoittelutyyppiin: yleissähköön, kausisähköön, aikasähköön ja pörssisähköön. Yleissähkön hinta pysyy vakiona vuorokaudesta ja vuodenajasta riippumatta ja sitä käytetään tyypillisimmin kerros- ja rivitaloasunnoissa. Kausisähkön hinta perustuu kausittaiseen vaihteluun,

jossa hinnat jaetaan talvipäiviin ja muuhun aikaan. Aikasähkön hinta jakautuu vuorokaudenajan perusteella päivä- ja yösähköön. [44.] Pörssisähkön hinta perustuu Nord Pool -sähköpörssin hintoihin ja hinta vaihtelee tunneittain [45].

2.3 Kaukolämpö

Suomen yleisin lämmitysmuoto on kaukolämpö [46]. Tällä hetkellä vajaa puolet Suomen asuin- ja palvelurakennuksista hyödyntää kaukolämpöä [47]. Kaukolämpöjärjestelmän toiminta koostuu neljästä osa-alueesta: lämmön tuotannosta, myynnistä, jakelusta ja kulutuksesta, joista kolmesta ensimmäisestä kaukolämpöyritys on vastuussa [48, s. 8]. Kaukolämpöveden lämpötila on riippuvainen ulkoilman lämpötilasta, jolloin menoveden lämpötila vaihtelee 65 ja 115 celsiusasteen välillä ja paluuveden 40 ja 60 celsiusasteen välillä. Tuotantolaitoksilla tuotettu lämpöenergia siirretään kaukolämpöverkkojen avulla asiakkaille kuumana vetenä. Rakennuksessa olevan lämmönsiirtimen avulla kaukolämpövedessä oleva lämpöenergia siirretään asukkaiden käyttöön, jonka jälkeen jäähtynyt vesi palaa takaisin paluuputkessa tuotantolaitokseen uudelleen käytettäväksi. [49.] Kaukolämpövesi ei siis kierrä rakennuksen lämmitysverkossa. Kaukolämpöä voidaan hyödyntää huoneiden, käyttöveden sekä ilmanvaihdon lämmittämiseen. Kaukolämmön taloudellisuus on riippuvainen siitä, kuinka tiheästi alue on rakennettu ja minkä kokoisia rakennuksia alueella sijaitsee. Täten, kaukolämmitys on sitä taloudellisempaa, mitä tiheämmin alue on rakennettu ja mitä suurempia rakennukset ovat. [46.]

Kaukolämpöjärjestelmät ovat vielä pääosin suljettuja ja kaukolämmön hinnoittelu on kiinteää. Tulevaisuudessa hiilineutraali lämmitysjärjestelmä on avainasemassa päästöjen vähentämisessä, ja siksi lämmitysjärjestelmien kehitysmahdollisuuksia on viime vuosina tutkittu laajasti. Kaukolämmön sekä kaukojäähdytyksen keskeinen rooli energiajärjestelmissä tulee säilymään myös tulevaisuudessa. Kaukolämpötoiminnassa on kuitenkin parantamisen varaa erityisesti ympäristöystävällisyyden näkökulmasta tarkasteltuna. Kaukolämmön joustavuuspotentiaalia ja energiajärjestelmien integraatiota tullaan jatkossa hyödyntämään tehokkaammin. Tämän seurauksena Suomessa on etsitty kilpailukykyisiä ratkaisuja lämmön tuotantoon ja hankintaan sekä kehitelty sopivia liiketoimintamalleja. Esimerkkinä toimii kaksisuuntainen kaukolämpöverkko, johon kuluttaja voi myydä ylijäämälämpönsä tai tuottamansa lämmön. Lisäksi kaukolämpöverkkojen mitoituslämpötilojen madaltaminen sekä kaukolämmön varastointi on havaittu merkittäviksi keinoiksi kaukolämpöjärjestelmien tehokkuuden parantamisessa. Kaukolämmön varastointi vähentää huippukattiloiden tarvetta, ja matalampiin lämpötilatasoihin perustuva kaukolämpöjärjestelmä kasvattaa energiatehokkuutta ja edistää päästöttömyyttä. Lisäksi verkon matalampi lämpötila mahdollistaa monipuolisemman energialähteiden hyödyntämisen, kuten

hukkalämmön ja lämpöpumppujen käytön. Myös sähköä hyödyntävät lämmitysteknologiat tuovat sähköjärjestelmälle joustavuutta. Sähkön ja lämmön sektori-integraatio on mahdollista toteuttaa kaukolämmön avulla taloudellisesti ja laajassa mittakaavassa. [50; 51.] Tätä tukee EU:n komission heinäkuussa 2021 julkaisema 55-valmiuspaketti, jonka mukaan jäsenmaiden tulisi velvoittaa kaukolämmitys- ja jäähdytysverkot avaamaan pääsy kolmansille osapuolille [52].

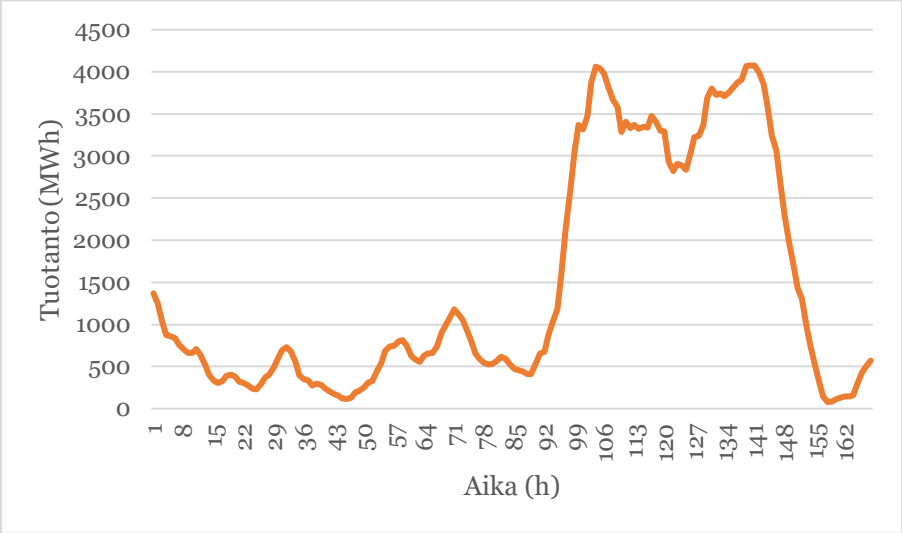
2.3.1 Kaukolämmön hinnoittelu

Suomessa kaukolämpötoiminta on määräävässä markkina-asemassa, mikä tarkoittaa, että tällaisessa asemassa oleva yritys on niin keskeinen toimija markkinoilla, että se pystyy toimimaan hyvin itsenäisesti muihin markkinaosapuoliin verrattuna. Määräävän markkina-aseman väärinkäyttö on kiellettyä. [53.] Kilpailulainsäädäntö (948/2011) ohjaa kaukolämpöyhtiöiden hinnoittelua ja sen toteutumista valvoo Kilpailu- ja kuluttajavirasto [54, s. 3–13].

Kaukolämmön hinta on riippuvainen lämmön tarjoavasta energiayhtiöstä ja kaukolämmön tuotantotavasta, siksi eri paikkakuntien välillä hinnoissa on eroja. Kaukolämmön hinta koostuu 1) kerran maksettavasta liittymismaksusta, 2) tehomaksusta ja 3) energiamaksusta. Liittymismaksun suuruuteen vaikuttavat kiinteistön koko sekä etäisyys tuotantolaitokselta. Sen avulla katetaan verkoston rakentamisesta syntyviä kustannuksia. Tehomaksu on riippuvainen asiakkaan liittymän koosta (kW). Energiamaksu kattaa lämmön tuotantoon sekä siirtoon liittyvät kulut ja sen laskutus perustuu asiakkaan käyttämään energiamäärään (MWh). [55; 56.] Tehomaksun sijaan voidaan käyttää myös kiinteää vesivirtamaksua, joka perustuu sopimusvesivirtaan. Siihen vaikuttavat sekä kiinteistön lämmitystehontarve että lämmönjakotapa. Sopimusvesivirta tarkoittaa asiakkaan käyttöön suurinta varattua kaukolämpöveden virtaamaa (m^3/h) mitoitusulkolämpötilassa tunnin aikana. [57.] Mitoitusulkolämpötila on paikkakuntakohtainen arvio ulkoilman lämpötilan minimiarvosta tietyllä säävyöhykkeellä [58]. Kaukolämmön tuotantokustannukset vaihtelevat vuodenajan mukaan. Kaukolämpöyhtiöt voivat tarjota asiakkailleen kahdenlaista sopimusmallia, kausihintaista sekä kiinteähintaista kaukolämpöä. Kausihinnoittelussa energian hinta vaihtelee vuodenaikojen mukaan ja kiinteähintaisissa sopimuksissa energian hinta pysyy vakiona koko sopimuksen voimassaoloajan. [59.]

3 Kysyntäjousto

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi asetetut tavoitteet luovat paineita energiasektorille päästöjen vähentämisessä ja uusiutuvan energian lisäämisessä [60, s. 1]. Sähköntuotanto siirtyy fossiilisten polttoaineiden käytöstä kohti uusiutuvaa ja hajautettua energiantuotantoa. Suomelle tämä tarkoittaa tuulivoimatuotannon kasvua. Suomen sääolosuhteet etenkin talvikuukausina soveltuvat hyvin tuulivoiman tuotantoon ja siksi siihen investoidaan. [61, s. 2.] Vuonna 2021 Suomessa tuulivoimalla tuotettiin 8,1 TWh sähköä [62]. Tuulivoimatuotannon kasvu tulee olemaan hyvin voimakasta, sillä Suomen Tuulivoimayhdistyksen arvioon mukaan Suomella on tuulivoimapotentiaalia 30 TWh:n edestä vuoteen 2030 mennessä [61, s. 2]. Tuulivoima on tuotantokustannuksiltaan edullinen energiantuotantomuoto, mikä tarkoittaa, että se laskee sähkön hintaa silloin, kun sääolosuhteet ovat otolliset sen tuotannolle. Vaikutus sähkön hintaan on vastakkainen, kun tuulivoimaa on vähän tarjolla, jolloin sähkö joudutaan tuottamaan kalliimmilla energiantuotantomuodoilla. [63.] Kuva 7 havainnollistaa Suomen tuulivoimatuotannon vaihtelevuutta marraskuussa yhden viikon aikana.



Kuva 7: Tuulivoiman tuotanto Suomessa (MWh/h) 7.11.–13.11.2022 [64]

Tuulivoima lisää vaihtelua ja luo epävarmuutta sähköjärjestelmään tuotannon näkökulmasta. Joustolähteitä on oltava tarpeeksi, jotta tuulivoiman ja muun vaihtelevan tuotannon lisääminen sähköverkkoon onnistuu kustannustehokkaasti ja sähköverkon luotettava toiminta voidaan taata. [65, s. 5–45]. Energia-alan tulevaisuuden kehitystrendit painottuvatkin hyvin vahvasti sähköverkon toimintaan, sähkötehon riittävyyteen, lämpömarkkinoihin sekä energiayhtiöiden toiminnassa uusiutuvaan energiaan ja niitä tukeviin teknologioihin [66, s. 2].

Suomen tavoite saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä toimii ohjaavana tekijänä siinä, minkälaisiin energiajärjestelmäratkaisuihin päädytään. Erityisesti yhteiskunnan sähköistymistä pidetään välttämättömänä tavoitteen saavuttamisessa [65, s. 38]. Sähköistymisen myötä sähkönkulutus kasvaa voimakkaasti, ja siksi sähköjärjestelmän luotettava toiminta on keskeisessä asemassa. Sitran tekemässä selvityksessä ”Enabling cost-efficient electrification in Finland” arvioitiin, että Suomen laaja sähköistyminen lisäisi sähkön tarvetta yli viidesosan nykyiseen verrattuna vuoteen 2035 mennessä [67]. Sähköistyminen lisää erityisesti kiinteistöistä aiheutuvaa kuormaa ja kulutushuippuja [68]. Sektori-integraation merkitys korostuu energiantuotannossa, kun yhä suurempi määrä sähköstä tuotetaan uusiutuvalla energialla. Sektori-integraatiossa vähäpäästöinen sähköntuotanto tukee yhteiskunnan tavoitteita päästöjen vähentämisessä ja eri sektoreiden joustavuus edistää uusiutuvan energiantuotannon lisäämistä. [69, s. 4.] Sektori-integraatiolla tarkoitetaan energiasektoreiden (sähkö, lämpö, kaasu ja liikenne) yhdistämistä tavalla, joka mahdollistaa sektorien välisen kulutus- ja tuotantopiikkien tasapainottamisen. Vaikka suoran sähkölämmityksen suosio on laskussa, sähköön perustuvan lämmityksen osuus tulee kasvamaan tulevaisuudessa lämpöpumppujen lisääntymisen myötä. Suomessa erityisesti sähkö- ja lämpösektorien yhdistäminen tukee kysyntäjouston toteuttamista. [70.] Lämmön tuottaminen lämpöpumpuilla mahdollistaa lämmityksen päästöjen vähentämisen ja tarjoaa jousto- ja varastointimahdollisuuksia. Lämpöenergian varastointi esimerkiksi kiinteistöihin, käyttöveteen tai kaukolämpöjärjestelmään on kannattava vaihtoehto silloin, kun kotimaisesti tuotetun uusiutuvan sähkön määrän kasvaessa ilmenee lämmön tuotantoon hinnaltaan kilpailukykyistä sähköä. [69, s. 51.]

Sähkönkäytön lisääntyminen ja uudenlaiset energiaratkaisut luovat tarpeen älykkäille sähköverkoille ja energiajärjestelmille. Älykkäällä sähköverkolla (Smart Grid, SG) tarkoitetaan sähkönsiirrossa käytettävää järjestelmää, johon on perinteisen sähkövoimatekniikan lisäksi yhdistetty automaatio-, tieto- ja viestintäteknologiaa, luotettavan, tehokkaan ja vuorovaikutteisen verkon aikaansaamiseksi. [71; 72, s. 1377.] Yhdessä älykkäiden mittausjärjestelmien kanssa älyverkot tavoittavat kuluttajat ja muut toimijat tarjoamalla reaaliaikaista tietoa kulutuksesta. Älykkäät sähköverkot ovat erityisen hyödyllisiä integroitaessa yhä suurempia määriä uusiutuvia energialähteitä ja uusia kuormia, kuten energiavarastoja ja sähköajoneuvojen latauspisteitä. Lisäksi älykkäiden sähköverkkojen avulla markkinatoimijat pystyvät tarjoamaan kuluttajille uudenlaisia palveluita, mikä mahdollistaa sen, että kuluttajat pystyvät mukauttamaan kulutustaan ja hyötymään verkon tarjoamasta joustavuudesta. Yleisesti siis älykkään sähköverkon suurimmat hyödyt piilevätkin sen kyvystä parantaa luotettavuutta, tehokkuutta sekä kuluttajien vaikuttamismahdollisuuksia ja reagointikykyä. [73.]

Suomi on edelläkävijä etäluettavien energiamittareiden (Automatic Meter Reading, AMR) osalta. Etäluettavat mittarit mahdollistavat

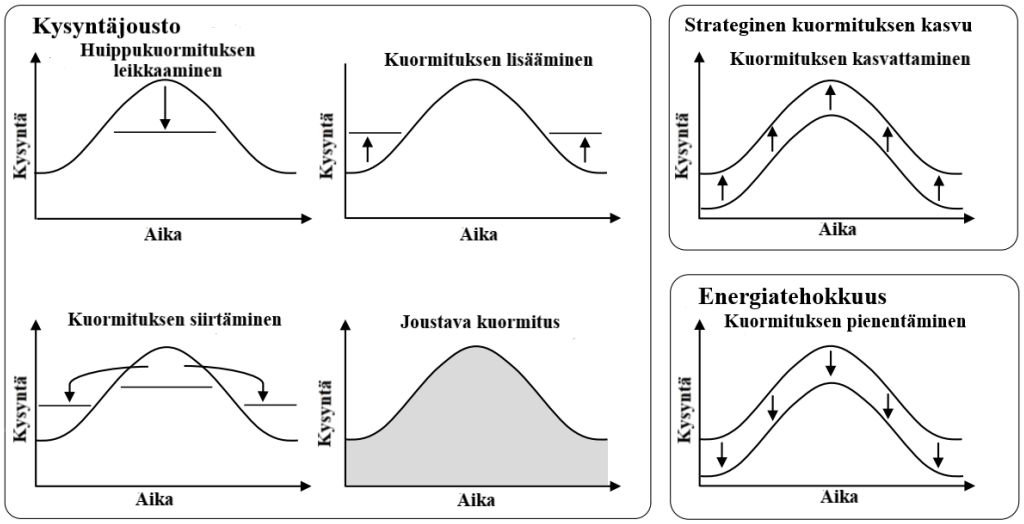
sähkönkulutuksen mittauksen tunnin välein ja datan lukemisen etäyhteyden avulla. Tämä tarkoittaa, että sähkölasku perustuu toteutuneeseen kulutukseen eikä arvioon ja vuotuiseen tasaukseen. [74.] Etäluettavat mittarit luovat uusia mahdollisuuksia sähkön vähittäismarkkinoille tuntihinnoitteluun perustuvien hinnoittelumallien muodossa, mikä edesauttaa asiakkaan osallistumista kysyntäjouston tuntimarkkinoille [75, s. 4]. Tuotantorakenteen muuttuessa myös sähkön markkinamalli on päivitettävä reaaliaikaisemmaksi vastaamaan uusiutuviin tuotantotapoihin perustuvaa sähköntuotantoa. Nykyinen taseselvitysjakso perustuu tunnin aikaväliin, mutta se muuttuu, kun vuoden 2023 toukokuun aikana Suomessa siirrytään 15 minuutin jaksoon eli varttitaseeseen. Varttiin siirrytään myös energiamittauksessa sekä pörssi- ja reservikaupankäynnissä. Siirtymä tapahtuu vaiheittain sähköjärjestelmän käyttövarmuuden turvaamiseksi. Muutos taseselvitysjakson pituudessa tukee kysyntäjouston toteuttamista. [76.]

Uusiutuvan energian lisääntymisen myötä sähköjärjestelmän on kestettävä tuotannon ja kulutuksen hetkittäisiä vaihteluja sekä myös pidempiaikaisia vaihteluja päivä- ja kausitasolla [1, s. 9]. Sähkömarkkinoiden säätötarve on pääasiallisesti katettu tuotantopuolen resursseilla [65, s. 28]. Kun fossiilisten polttoaineiden käyttö sähköntuotannossa vähenee, myös perinteinen säätövoima vähenee. Samalla uusiutuvan energian lisääntyminen ja yhteiskunnan sähköistyminen kasvattavat säätötarvetta entisestään. [77, s. 3–4.] Kysyntäjousto, energian varastointi ja joustavan tuotannon lisääminen ovat välttämättömiä sähköjärjestelmän toiminnan takaamiseksi. Kysyntäjouston avulla saadaan kulutus vastaamaan sen hetkistä tuotantoa, jolloin säätötarve vähenee. Energian varastointiteknologioiden kehittyminen mahdollistaa tuotanto- ja kysyntäpiikkien välisten erojen tasoittamisen. Joustava tuotanto mahdollistaa sen, että tuotantoa pystytään lisäämään kysynnän kasvaessa. Aiemmin tämä on toteutettu fossiilisia polttoaineita hyödyntävien varavoimaloiden avulla, mutta tulevaisuudessa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi biokaasun käyttöön pohjautuvia vaihtoehtoja. [1, s. 9–10.]

Teollisuuden lisäksi kysyntäjoustoa on pitkään toteutettu kuluttajien keskuudessa aikaohjauksen ja pörssihintaan perustuvien sähkösopimusten kautta. Suomella on hyvät mahdollisuudet kysyntäjoustoratkaisujen kehittämiselle. Sähkön vähittäismarkkinat ovat jo kauan olleet avoimia kilpailulle, mikä edesauttaa uusien palveluiden muotoutumista. Myös Suomen energiajärjestelmän infrastruktuuri on kehittynyttä, ja muutosta edistäviä teknologiaratkaisuja on olemassa. [1, s. 10.] Jotta kysyntäjouston hyödyntäminen olisi laaja-alaisesti mahdollista, on tärkeää saada muodostettua kokonaiskuva kysyntäjouston toiminnallisuudesta ja mukana olevien toimijoiden rooleista. Lisäksi on tärkeää saada tietoa mukana olevien osapuolien liiketoimintaa tukevasta markkinamallista, kysyntäjoustoa koskevan lainsäädännön kehittämisestä sekä tiedonsiirtorajapintojen yhdistämisestä. Myös kysyntäjouston ansaintalogiikkaa on kehitettävä ja asiakkaiden tietoisuutta lisättävä. [75, s. 5–18.]

3.1 Sähkön kysyntäjousto

Kulutuspuolen joustavuuden merkitys korostuu uusiutuvan energian lisääntymisen ja yhteiskunnan sähköistymisen myötä. Sähkönkulutuksen kasvuun on sopeuduttava. Sähköntuotannon kasvattamisen sijaan, tehokkaampana ja edullisempana vaihtoehtona on hallita kysyntää [78, s. 122]. Kysynnän hallinta (Demand Side Management, DSM) on energianhallintatekniikka, jota käytetään loppukäyttäjien kulutustottumusten muokkaamiseen ja sähköjärjestelmän tasapainon parantamiseen. Jos päivittäisten kuormitushuippujen ja matalan kysynnän välisiä eroja saadaan kavennettua, järjestelmän tehokkuus paranee. Kaikista tärkein saavutus koskee kuitenkin sähköjärjestelmän optimoitua toimintaa. Kysynnän hallinta on tarpeellinen työkalu nykyaikaisille älykkäille energiajärjestelmille. [79, s. 1–2; 80, s. 2.] Kysynnän hallinta jakautuu kolmeen ryhmään: 1) kysyntäjoustoon, 2) energiatehokkuuteen ja 3) strategisen kuormituksen kasvattamiseen [81, s. 1]. Kuva 8 havainnollistaa kysynnän hallinnan toteutusmallien jaottelua.



Kuva 8: Kysynnän hallinnan jaottelu kysyntäjoustoon, energiatehokkuuteen ja strategisen kuormituksen kasvattamiseen [81, s. 1]

Kysyntäjousto (Demand Response, DR) tarkoittaa sähkönkulutuksen muuttamista hetkellisesti tehotasapainon hallinnan tarpeisiin tai sähkönkäytön siirtämistä korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan [38]. Kysyntäjousto voidaan toteuttaa kuvan 8 mukaisesti huippukuormituksen leikkaamisena (Peak clipping), kuormituksen lisäämisenä matalan kysynnän aikana (Valley filling), kuormituksen siirtämisenä (Load shifting) tai joustavana kuormituksena (Flexible load shaping). Energiatehokkuus määritellään pitkän aikavälin säästöstrategiaksi, jolla pyritään säästämään energiaa ja kuormitusta hyödyntäen energiatehokkaita prosesseja. Strategisen kuormituksen kasvattamisen tavoitteena on kasvattaa sähkön

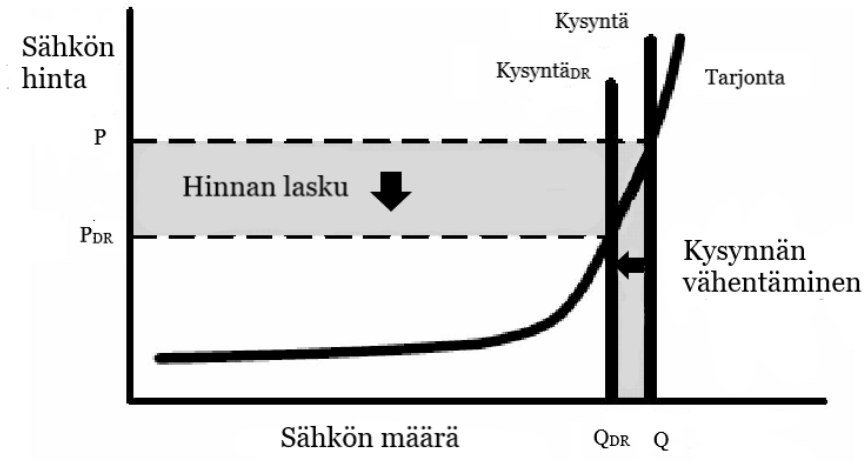
kuormitusta ja sitä hyödynnetään etenkin lämpöpumppujen ja lämpövarastojen yhteydessä. [82, s. 3–4.]

Kysyntäjousto-ohjelmat voidaan jaotella implisiittiseen eli hintaperusteiseen ja eksplisiittiseen eli kannustinperusteiseen kysyntäjoustoon. Implisiittisen kysyntäjouston tarkoituksena on vaikuttaa loppukäyttäjän sähkönkäyttöön dynaamisen hinnoittelun avulla, jolloin sähköstä maksettava määrä vaihtelee ajankohdan mukaan. [83, s. 108.] Implisiittinen kysyntäjousto perustuu kysynnän tasoittamiseen niin, että korkeita hintoja tarjotaan huippupiikkien aikana ja alhaisia hintoja huippupiikkien ulkopuolella [84, s. 1990]. Kysyntäjouston toteuttaminen edellyttää asianmukaista viestintä- ja mittausteknologiaa, ajantasaisia laskutusmalleja jälleenmyyjille sekä palautteen tai muun vastaavanlaisen viestintämenetelmän hyödyntämistä kuluttajien ohjeistuksessa [85, s. 3]. Implisiittisen kysyntäjouston toteutusmalleja ovat muun muassa käyttöaikaan perustuva hinnoittelu (Time of Use) ja kriittisen ajanhinnoittelu (Critical Peak Pricing) [84, s. 1990].

Eksplisiittinen kysyntäjousto perustuu ulkoiseen ohjaukseen, jossa kuluttaja saa pyynnön muuttaa kulutustaan tarpeen mukaan, joko vähentämään tai lisäämään kulutustaan, ja saa siitä vastineeksi erillisen korvauksen. Pyynnön voi laukaista tasapainotuspalveluiden aktivointi, sähkön hintaerot tai sähköverkon rajoitus. Loppukäyttäjä voi osallistua sähkömarkkinoille joko itsenäisesti tai tekemällä sopimuksen aggregaattorin kanssa. Eksplisiittisen kysyntäjouston toteuttaminen edellyttää riittävien viestintä- ja mittausteknologioiden lisäksi selkeitä osallistumissääntöjä. [85, s. 2–3.] Eksplisiittisen kysyntäjouston toteutusmalleja ovat muun muassa suora kuormanhallinta (Direct Load Control) ja hätätilanteen aikainen kysyntäjousto (Emergency Demand Response) [84, s. 1990].

Kumpikaan kysyntäjousto-ohjelma ei pysty korvaamaan toista, sillä kysyntäjoustoon osallistumisen vaatimukset ja niistä saatavat hyödyt ovat keskenään erilaisia. Implisiittiseen kysyntäjoustoon osallistuminen mahdollistaa pienemmän sähkölaskun saamisen, kun taas eksplisiittisestä kysyntäjoustosta ansaitsee erillisen korvauksen. [85, s. 2.] Molemmat kysyntäjoustotyypit palvelevat eri tarkoitusta, mutta ne täydentävät toisiaan ja siksi kuluttajilla tulisi olla mahdollisuus valita itselleen sopiva vaihtoehto kysyntäjoustoon osallistumiseksi. Kuluttajat voivat valita pelkästään toisen tai vaihtoehtoisesti molemmat maksimoidakseen saamansa hyödyt. [86, s. 2.]

Kuva 9 havainnollistaa kysyntäjouston vaikutusta sähkön hintaan. Pystyakselilla on esitetty sähkön hinta (P, P_{DR}) ja vaaka-akselilla sähkön määrä (Q, Q_{DR}). Alaindeksi DR viittaa kysyntäjoustotapahtumaan. Kuvan käyrä jäljittelee tarjontaa. Kun kysyntä pienenee nuolen osoittaman määrän verran $Q \rightarrow Q_{DR}$, sähkön hinta laskee nuolen osoittaman määrän verran $P \rightarrow P_{DR}$.



Kuva 9: Kysyntäjouston vaikutus sähkön hintaan [87, s. 2]

3.1.1 Sähkön kysyntäjouston toteuttaminen kiinteistössä

Sähkön kysyntäjouston toteuttaminen kiinteistössä edellyttää ominaisuuksiltaan sopivaa rakennusautomaatiojärjestelmää. Täten oleellisinta kysyntäjouston toteuttamisen kannalta onkin selvittää, minkälainen automaatiojärjestelmä rakennuksessa on ja kuinka helposti sähkönkulutus saadaan ohjautumaan kysyntäjoustosignaalien mukaan. Kysyntäjoustoon hyödynnettävää kuormaa on pystyttävä ohjaamaan kohteen automaatiojärjestelmällä. Lisäksi kuorman energiankulutus on voitava mitata tai todentaa luotettavasti. Rakennusten tekniset valmiudet kysyntäjoustoon on hyvä selvittää etenkin sellaisissa kohteissa, joissa on melko nykyaikainen rakennusautomaatiojärjestelmä. Kysyntäjouston mahdollisuus kannattaa kuitenkin huomioida jo kiinteistön rakentamis- tai peruskorjausvaiheessa, jos mahdollista, jotta automaatiojärjestelmä täyttää tarvittavat vaatimukset. Automaatiojärjestelmän lisäksi on tärkeää kartoittaa energiamittareiden tilanne ja selvittää kuinka hyvin ne soveltuvat kysyntäjouston toteuttamiseen. [88, s. 4–8.]

Kysyntäjouston toimivuutta on testattava erilaisissa käyttötilanteissa ennen varsinaista käyttöönottoa. Tämän avulla voidaan varmistaa, että kysyntäjousto toteuttaa halutun toiminnon kiinteistön energiankulutuksessa. Kiinteistön sisäolosuhteet sekä turvallisuus ovat ensisijaisessa asemassa kysyntäjoustoon nähden. Mikäli sisäolosuhteet tai turvallisuus vaarantuvat kysyntäjouston takia, automaatiojärjestelmä keskeyttää joustotapahtuman. Jotta kiinteistö voi osallistua sähkön kysyntäjoustomarkkinoille, on energiamittareiden lokitiedoista pystyttävä varmentamaan jouston toteutuminen. Jouston sähköinen raportointi edellyttää, että automaatiojärjestelmä on kytketty internetiin. [88, s. 8.]

Kiinteistöt, jotka osallistuvat sähkön kysyntäjouston toteuttamiseen osallistuvat samalla sähköverkon taajuuden hallintaan sekunti- ja minuuttitasolla. Sähköverkon taajuuden on säilyttävä 50 Hz:ssä, minkä seurauksena kiinteistöjen on lisättävä kulutustaan taajuuden ylittäessä 50 Hz ja vähennettävä kulutustaan taajuuden laskiessa 50 Hz:n alapuolelle. Jos kiinteistön automaatiojärjestelmän yhteyteen on asennettu sähköverkon taajuutta mittaava verkkoanalysaattori, kysyntäjousto voidaan toteuttaa taajuusvaihteluiden mukaan ilman ulkopuolista ohjausta. Muuten jouston ohjaus suoritetaan ulkoiselta palvelimelta internet-yhteyden avulla. [88, s. 8.]

Yksittäisen kiinteistön kysyntäjouston potentiaalia voidaan arvioida kokonaistehon, ulkoisen ohjauksen ja vaikutusten kautta. Kuorman kokonaistehon on oltava riittävä, jotta kysyntäjousto olisi kannattavaa toteuttaa. Kuorman tarvitsemaa tehoa on pystyttävä säätämään ulkoisen signaalin mukaan. Lisäksi tärkeimpänä on huomioida, vaikuttaako sähkönkulutuksen säätäminen kiinteistön sisäilmaan tai turvallisuuteen. [88, s. 5.]

Vuodenaikojen vaikutus kerrostalojen sähkönkulutukseen on pienempi kuin muunlaisissa asuinrakennuksissa. Yleisesti asuinkerrostalojen yksittäisten huoneistojen kulutukset ovat melko pieniä. Täten kerrostalojen suurin ja samalla myös ohjattavissa oleva kuorma koostuu autolämmityksestä, saunoista ja mahdollisesta sähköisestä lattialämmityksestä peseytymistiloissa. Sähköautojen kysynnän kasvaessa myös latauspisteiden määrä tulee kasvamaan. Tämä luo painetta tehdä lisäasennuksia lämmityspisteisiin sekä koko kiinteistön pääjakeluun. Lisäasennusten yhteydessä kannattaa myös huomioida kysyntäjoustotarpeet. Lämpöpumppuratkaisut kasvattavat suosiotaan asuinrakennuksissa. Niiden avulla pystytään korvaamaan tai täydentämään öljy- tai kaukolämpöä. Tästä johtuen kiinteistön sähkötehot ja -energian tarve kasvaa, mutta kiinteistön ostoenergian tarve pienenee. Kiinteistöjen kokonaisteho muodostuu eri laitteiden vuorottaisesta käytöstä, minkä takia kiinteistön huipputehoa ei yleensä määritetä laskemalla kaikkien laitteiden tehot yhteen. Kysyntäjoustoon soveltuvien laitteiden käyttöajat vaihtelevat, jolloin vain osa tehosta on hyödynnettävissä huipputehon tai halutun ohjausajankohdan aikana. Asuinrakennuksissa nimittäin harvoin samaan aikaan on käytössä liesi, sauna, pyykinpesukone, astianpesukone sekä auton lämmitys. [75, s.104–122.]

3.1.2 Sähkön kysyntäjoustomarkkinat kiinteistöille

Kiinteistöt voivat osallistua taajuusohjatuille reservimarkkinoille. Markkinoille päästäkseen on täytettävä minimitarjouskoko. Harvoin yksittäisten kiinteistöjen joustotehot ovat kuitenkaan riittäviä, minkä vuoksi on tarpeellista yhdistää useamman kiinteistön tehot. Tätä toimintaa kutsutaan aggregoinniksi. Kiinteistöjen sähkön kysyntäjoustolle sopivimmat markkinapaikat ovat toistaiseksi FCR-N ja FCR-D-reservimarkkinoilla. Kun kysyntäjoustoon osallistuvien kiinteistöjen määrä tulevaisuudessa kasvaa, mahdollistaa se myös muille reservimarkkinoille osallistumisen. FCR-N-markkinalle pääsyn minimitarjouskoko on 100 kW, FCR-D:llä vastaavasti 1 MW (1000 kW). Lisäksi FCR-N-markkinalle osallistuvien kuormien pitää pystyä säätämään tehoaan sekä alas- että ylöspäin, mutta FCR-D-markkinalla riittää pelkkä alaspäin säätö. [88, s. 4–9.] Vaatimuksia asettaa myös kuormien aktivoimisaika. FCR-N-markkinalle pääsy edellyttää, että jousto saadaan aktivoitua täyteen tehoon kolmessa minuutissa. FCR-D-markkinalla puolet joustosta on aktivoitava viidessä sekunnissa ja täydet joustot tulee saada käyttöön 30 sekunnissa. [89, s. 8.] Markkinapaikkojen ominaisuudet on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1: Kiinteistöille soveltuvat kysyntäjouston markkinapaikat

Markkinat	Minimitarjouskoko	Säätö	Aktivoimisaika
FCR-N	100 kW	ylös/alas	3 min
FCR-D	1 MW	alas	5 s/50 % 30 s/100 %

Työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmässä on pohdittu erilaisia vaihtoehtoja kysyntäjoustomarkkinoiden kehittymisen edistämiseksi. Mahdollisina keinoina pidetään muun muassa sähkösiirtohinnoittelun harmonisointia, tehoperusteisen siirtohinnoittelun lisäämistä sekä luopumista yö- ja päiväsähköön perustuvasta jakeluverkkoyhtiöiden toteuttamasta kulutuksen ohjaamisesta. Kyse on siis järjestelmätason muutoksista, joilla tuetaan palveluntarjoajia markkinaehtoisten ratkaisujen kehittämisessä, niin että kuluttajat saadaan osallistumaan aktiivisemmin kysyntäjoustoon. [1, s. 4.]

3.2 Kaukolämmön kysyntäjousto

Rakennukset aiheuttavat yli 30 prosenttia Suomen päästöistä [90]. Lämmön kysyntäjousto on tehokas tapa vähentää rakennuksista aiheutuvia päästöjä [88, s. 10]. Kaukolämmön kulutus vaihtelee jatkuvasti joko päivärytmin mukaisesti tai vuositasolla vuodenaikojen vaihtelun mukaisesti. Myös rakennusten kulutuskäyttäytyminen vaihtelee sen mukaan, mihin tarkoitukseen ne on suunniteltu. Täten asuinrakennusten ja toimitilarakennusten kulutuskäyttäytymisessä on selkeitä eroja. Asuinrakennuksissa eniten vaihtelua kaukolämmön kulutukseen aiheuttaa lämpimän käyttöveden kulutus ulkolämpötilan ja auringonpaisteen ohella. Tämä näyttäytyy lämmönkulutuksessa verrattain pieninä kulutushuippuina aamuisin ja iltaisin. Päivätasolla asuinrakennuksissa lämmönkulutuksen suurin vaihtelu tapahtuu keväällä ja syksyllä eli silloin, kun ulkolämpötila vaihtelee eniten. Suurimmat päivä- ja viikkotason vaihtelut lämmönkulutuksessa voidaan havaita julkisissa rakennuksissa sekä erilaisissa toimitila- ja teollisuusrakennuksissa, joissa hyödynnetään joitakin energiatehokkuustoimia. Energiatehokkuustoimia ovat esimerkiksi aikasäädetty ilmanvaihtojärjestelmä tai lämpötilan laskeminen yöaikana. Tämän kaltaisilla rakennuksilla on selkeä rytmi lämmönkulutuksessa, josta on helppo havaita aamu- ja iltakulutushuiput. Sen vuoksi ne sopivatkin hyvin kysyntäjoustoon. [48, s. 9.]

Kaukolämpöjärjestelmässä tarvittava teho on usein tuotettava kysynnän kausivaihteluista johtuen vähintään kahdella erilaisella tuotantoyksiköllä, peruskuormalaitoksella sekä huippukuormalaitoksella. Ratkaisu on edullisinta järjestelmän luotettavuuden ja taloudellisuuden kannalta. Peruslaitoksina hyödynnetään yhteistuotantolaitoksia tai kiinteän polttoaineen kattiloita. Huippulämpö tuotetaan yleensä öljyllä toimivilla erilliskattiloilla. Koko kaukolämpötoiminnan kannattavuus perustuu peruskuormalaitosten toimintaan, sillä huippulämmön toimittaminen on yleensä tappiollista ja parhaimmillaankin vain nollakatteista. Etenkin äkilliset muutokset kulutuksessa aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia kaukolämpöjärjestelmälle vähentäen samalla sen tehokkuutta. Tästä johtuen kaukolämpöjärjestelmä tarvitsee kulutuksen mukaan joustavan tuotantorakenteen tai vaihtoehtoisesti kysyntäjoustoa kulutuksen vaihteluihin vastaamiseksi. [48, s. 11–12.]

Kaukolämmön kysyntäjoustossa tavoitellaan lämmitystarpeen vähentämistä huippukulutuksen aikana jaksottamalla kulutusta ja varastoimalla lämpöä. Täten kaukolämmön kysyntäjousto perustuu lämmönkulutuksen parempaan hallintaan, hukkalämpöjen hyödyntämiseen sekä lämmön varastointiin [91, s. 3–4.] Kaukolämmön kysyntäjoustoa ei saa sekoittaa perinteisiin energiatehokkuustoimiin, energian kysynnän rajoituksiin tai energiansäästöön. Kaukolämmön kysyntäjoustossa ei välttämättä säästy lämpöenergiaa, vaan siinä tavoitellaan lämmönkulutuksen ajallista siirtämistä järjestelmän näkökulmasta optimaalisemmaksi, mikä mahdollistaa säästöt koko järjestelmän tasolla [48, s. 5.]

3.2.1 Lämmön kysyntäjouston toteuttaminen kiinteistössä

Kaukolämmön kysyntäjouston toteuttamisen kannalta on oleellista huolehtia siitä, ettei asiakkaan kokema palvelun laatu heikkene. Tämän takia ilmanvaihtoon sidoksissa olevat ratkaisut eivät ole optimaalisia, sillä ilmanvaihdon rajoittamisen vaikutukset ovat helposti havaittavissa. Sama pätee myös lämpimän käyttöveden rajoittamiseen. Kannattavin ratkaisu kysyntäjouston toteuttamiselle on patteriverkoston veden lämpötilan alentaminen tai hetkellinen rajoittaminen. [48, s. 25–29.]

Älykkäät lämmityksen ohjausjärjestelmät ovat kasvattaneet suosiotaan kiinteistöissä mahdollistaen kysyntäjouston toteuttamisen. Lämmön kysyntäjouston toteuttamisen kannalta paras tilanne on silloin, kun kysyntäjouston mahdollisuus on huomioitu jo automaatiojärjestelmän suunnitteluvaiheessa. Kohteessa on oltava etävalvottava automaatiojärjestelmä, joka pystytään yhdistämään muihin järjestelmiin. Lämmityslaitteita, varaavia lämmityslaitteita, jäähdytysjärjestelmiä sekä autojen lämmitys- ja latauslaitteita voidaan ohjata avoimen rajapinnan kautta. Asiakkaan ja kuormia ohjaavan osapuolen välille on tehtävä sopimus, jotta asiakkaan kuormia on mahdollista ohjata ulkopuolelta. Jouston aikaiset tapahtumat on erityisen tärkeä rekisteröidä ja tallentaa, sillä niiden avulla pystytään varmistamaan kysyntäjoustolaitteiston toimivuus sekä seuraamaan jouston vaikutuksia rakennuksen sisäolosuhteisiin. Rakennuksen automaatiojärjestelmän avulla data voidaan rekisteröidä ja tallentaa ensin paikallisesti ja siirtää sieltä pilvipalveluun. [88, s. 15.]

Rakennuksen lämmitystä on mahdollista vähentää hetkellisesti ilman, että se vaikuttaa merkittävästi asuntojen tai huoneiden lämpötilaan. Se, kuinka kauan lämmitystä voidaan rajoittaa, riippuu pitkälti ulkoilman lämpötilasta. Mitä kylmempi ulkona on, sitä lyhyemmän ajan rakennuksen termiseen massaan varastoitunut lämpö riittää ylläpitämään kohtuullisia sisäolosuhteita. Lämmön kysyntäjoustolle parhaiten soveltuvia kohteita ovat isokokoiset kerrostalot, joilla on suuri lämmönvarastointikyky. Rakennuksen automaatiojärjestelmän avulla lämmitys voidaan ohjata alkamaan aamuyöllä ennen kulutushuippuja, jolloin rakennuksen termistä massaa voidaan hyödyntää kulutushuippujen leikkaamisessa. [88, s. 16.] Kaukolämmön kysyntäjousto sopii parhaiten verkkoihin, joissa perustuotannon ja huipputuotannon välinen hintaero on suurin ja tuotantolaitosten mitoitus on kuorman suhteen niukka. Kysyntäjouston potentiaali on ajallisesti suurin keväällä ja syksyllä sekä talvipäivinä, joina vuorokauden sisäiset lämpötilaerot ovat suurimmillaan. [48, s. 29.]

Kaukolämmön kysyntäjousto on suhteellisen uusi konsepti eikä sille siksi ole vielä markkinoita. Useita pilotointeja on kuitenkin kaukolämmön kysyntäjouston osalta suoritettu. Osa kaukolämpöyhtiöistä tarjoaa korvauksia kysyntäjoustosta, mutta merkittävin hyöty kiinteistön omistajalle näkyy

toistaiseksi kaukolämmön perusmaksussa. Kysyntäjouston myötä kiinteistölle riittää entistä pienempi kaukolämpöliittymä, mikä heijastuu perusmaksun suuruuteen. Markkinoiden avaaminen kilpailulle on kaukolämmön kysyntäjouston yleistymisen edellytys. [88, s. 15.]

3.3 Kysyntäjouston hyödyt ja haasteet

Kysyntäjousto hyödyttää kaikkia markkinaosapuolia teknisestä, taloudellisesta ja ympäristön näkökulmasta tarkasteltuna [92, s. 1]. Kysyntäjouston myötä koko energiajärjestelmän älykkyys kasvaa ja sen alttius häiriöille vähenee. Kantaverkkoyhtiöt hyötyvät, kun sähköverkon taajuus pysyy paremmin tasapainossa. [88, s. 3.] Sähkön vähittäismyynnin osalta kysyntäjoustoa voidaan hyödyntää sähkönhankinnan suunnittelussa, tasehallinnassa ja säätösähkömarkkinoiden tarjouksissa. Kysyntäjousto mahdollistaa myös vähittäismyyjien liiketoiminnan sekä uusien tuotteiden ja palveluiden kehittämisen. Jakeluverkkoyhtiöt voivat käyttää kysyntäjouston tarjoamia mahdollisuuksia pitkän aikavälin sähköverkon suunnittelussa sekä reaaliaikaisessa käyttötoiminnassa. Loppukäyttäjä hyötyy, kun sähköä on mahdollista käyttää edullisen hinnan aikana ja sähkön ostoenergian tarvetta saadaan vähennettyä. Lisäksi kysyntäjousto mahdollistaa loppukäyttäjän oman pientuotannon täysimääräisen hyödyntämisen. Pientuotanto on kannattavinta silloin, kun tuotanto pystytään hyödyntämään omassa kiinteistössä. Kannattavuus laskee huomattavasti, jos pientuottaja myy tuottamaansa sähköä markkinoille. [75, s. 24–25.] Rakennuksen omistaja hyötyy, kun kysyntäjouston ansiosta kiinteistön arvo nousee ja rakennuskannan päästöt pienenevät. Lisäksi kysyntäjoustomarkkinoille osallistumisen myötä saadaan korvaus tehdystä joustosta. Energiantuottajat hyötyvät, kun huippupiikkien leikkaaminen vähentää kalleimpien energiatuotantomuotojen tarvetta. Tämän myötä varavoimaan ei tarvitse investoida enää yhtä paljon kuin aiemmin. [88, s. 3.]

Kansainväliset tutkimukset keskittyvät pääasiassa sähkön kysyntäjoustoon, mutta kiinnostus kaukolämmön kysyntäjoustoa kohtaan on selkeässä kasvussa. Kaukolämmön kysyntäjouston hyödyt on useissa tutkimuksissa jaoteltu kuluttajien ja kaukolämpöyhtiöiden saamiin hyötyihin. Kuluttajien hyödyt perustuvat matalampiin lämmityksen käyttökustannuksiin ja energiakustannuksiin. Matalammat lämmityksen käyttökustannukset toteutuvat, jos kysyntäjoustoa hyödyntäen lämpöenergiaa tai pumppausenergiaa kuluu vähemmän. Matalammat energiakustannukset saavutetaan, jos kuluttaja vähentää kulutustaan kalliiden hintojen aikana ja siirtää kulutuksensa halvempaan ajankohtaan. Tämä hyöty on saavutettavissa, kun käytetään eri hinnoittelumalleja. Kuluttajien hyötyihin lasketaan myös kuluttajapalveluiden kehittyminen uusien toimintamallien kautta. Kaukolämpöyhtiöiden merkittävimmät hyödyt koskevat peruskuormalaitosten käyttöasteen ja käyntiajan parantamista sekä huippukuormalaitosten käyntiaikojen pienentämistä tai järkeistämistä. Lisäksi kaukolämpöyhtiöt hyötyvät, kun

kaukolämpöverkoston laajennuksia pystytään lykkäämään. Yhteiskunnan näkökulmasta kaukolämmön kysyntäjousto edistää energiantuotannon ympäristöystävällisyyttä sekä yleisiä energiansäästöjä. [48, s. 14–15.]

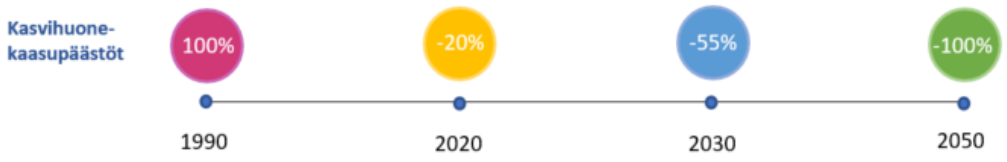
Sähkön ja kaukolämmön kysyntäjouston laajamittainen käyttöönotto vaatii useiden haasteiden selättämistä. Sähkön kysyntäjouston merkittävimmät haasteet ja esteet ovat joko taloudellisia tai poliittisia. Jotta sähkön kysyntäjouston yleistyminen olisi mahdollista, sen tulisi olla tarpeeksi kannattavaa kaikille mukana oleville osapuolille. Etenkin kysyntäjoustoa koskevat hinnoittelumallit tulisi olla tarpeeksi selkeitä sekä käytetyn tekniikan luotettavaa ja yksinkertaista käyttää. Lisäksi loppukäyttäjien tietämys tulisi olla riittävä, ja tietoa tulisi olla tarpeeksi saatavilla. Kysyntäjouston toteuttaminen on vahvasti sidoksissa erilaisiin säädöksiin, mutta niiden säätämistä ei ole koordinoitu kysyntäjouston näkökulmasta. Rakentamismääräyksissä energiankulutuksen tarkastelussa keskitytään ensisijaisesti rakennusten vuosienergian kulutukseen eikä huomioida rakennusten tehonkäyttöä tai energiankulutuksen ajallista jakautumista. Verkkoyhtiöillä ei myöskään ole tarpeeksi kannustimia kysyntäjouston edistämiseksi. Haasteita aiheuttavat hajanainen toimialakenttä, standardoimattomat prosessit ja järjestelmien rajapinnat. Tietoa ei ole tarpeeksi asiakkaiden kuormista ja niiden ohjattavuudesta. Tämän perusteella sähkön kysyntäjouston edistämiseksi tulee keskittyä sidosryhmien informointiin, sääntelyn kehittämiseen, kysyntäjouston tuotteistamiseen sekä prosessien ja järjestelmien yhtenäistämiseen. [75, s. 5–138.]

Kaukolämmön kysyntäjouston ennakointi ja hallinta on haasteellisempaa kuin sähkön kysyntäjouston, koska kaukolämpöjärjestelmä toimii pidemmällä aikavakiolla. Tästä johtuen joustotoiminnon vaikutus sisäilman lämpötilassa ilmenee viiveellä. Tämän lisäksi tutkimusten vähyys on yksi suurimmista haasteista kaukolämmön kysyntäjouston edistämisessä. Kaukolämmön kysyntäjoustoa koskevissa tutkimuksissa on todella vähän energiajärjestelmätason mallinnuksia tuotannon optimoinnista tai yleisesti esimerkkejä saavutetuista hyödyistä järjestelmätasolla. Tutkimuksissa esitetty kysyntäjouston potentiaali ja sen tarjoamat hyödyt koko järjestelmälle ovat usein arvioita. Lisäksi kaukolämmön kysyntäjouston potentiaalia tulee tarkastella vain järjestelmäkohtaisesti, sillä kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan tuotantorakenteen, lämpöverkon rakenteen, kulutusprofiilin ja lämmön varastointikyvyn osalta, eikä täten kysyntäjouston hyötyjä ja niiden potentiaalia voida yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöjärjestelmiä. Tämän perusteella lisätutkimuksia kaukolämmön kysyntäjouston edistämiseksi tarvitaan erityisesti käytännön esimerkkien ja mallinnusten osalta. Myös toimenpiteitä tarvitaan kaukolämmön kysyntäjoustomarkkinoiden kehittämiseksi. [48, s. 13–20.]

4 Euroopan unionin ilmastotavoitteet

Tutkijat ovat osoittaneet, että ilmastossa on tapahtunut ennennäkemättömiä muutoksia. Ilmaston lämpeneminen ja äärimmäisten sääilmiöiden yleistyminen aiheuttavat lisäkustannuksia Euroopan unionin taloudelle ja heikentävät samalla ruoantuotannon mahdollisuuksia. Nopealla ja laajamittaisella kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisella voidaan kuitenkin hillitä ilmastonmuutosta ja sen vaikutuksia. [93.] Ilmastonmuutosta vastaan taisteltaessa tarvitaan hyvin laaja-alaista yhteistyötä. Siksi vuoden 2015 joulukuussa maailman johtajat solmivat Pariisin ilmastosopimuksen. Sopimuksen tavoitteena on saada maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöt laskuun ja siten pitää maapallon keskilämpötilan nousu alle 2 celsiusasteessa suhteessa esiteolliseen aikaan. Tämän lisäksi lämpeneminen pyritään rajaamaan 1,5 celsiusasteeseen. [94; 95.]

Tällä hetkellä yli 75 prosenttia EU:n kasvihuonekaasupäästöistä on lähtöisin energiasektorilta ja siksi on erityisen tärkeää, että EU:n energiajärjestelmä pääsee irtautumaan fossiilisista polttoaineista [96]. Nykyisenä tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta. Tämä on oleellinen tavoite, jotta ilmastoneutraalius saavutetaan vuoteen 2050 mennessä. [97]. Kuva 10 havainnollistaa EU:n asettamia päästövähennystavoitteita suhteessa vuoden 1990 tasoon.



Kuva 10: EU:n päästövähennystavoitteet suhteessa vuoden 1990 tasoon

4.1 Euroopan unionin toimet energia- ja ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi

Vakaa ja kohtuuhintainen energiansaanti on Euroopan unionin talouden sekä kansalaisten hyvinvoinnin perusta [98]. Tämän takaamiseksi Euroopan komissio julkaisi vuoden 2015 helmikuussa energiaunionistrategian. Kyseessä on energiapoliittinen toimenpideohjelma, jonka tavoitteena on tarjota kohtuuhintaista, varmaa ja kestävää energiaa Euroopassa. Syitä energiaunionin perustamiselle on useita. Tietyt jäsenmaat, kuten Italia ja Irlanti, ovat hyvin vahvasti riippuvaisia EU:n ulkopuolelta tulevasta energiasta. Lisäksi Suomi ja viisi muuta jäsenmaata ovat vain yhden EU:n ulkopuolisen kaasuntoimittajan varassa. Tästä johtuen maat ovat alttiita energian toimitushäiriöille ja hinnan vaihteluille. Myös vuonna 2014 puhjennut Ukrainan kriisi vaikutti omalta osaltaan energiaunionin muodostumiseen. [99.] EU:n riippuvuutta energiantuonnista kuvastaa hyvin se, että vuonna 2020 EU-alueella saatavilla olevasta energiasta 58 prosenttia oli tuotettu EU:n ulkopuolella [100].

Energiaunionistrategia jakautuu viiteen osa-alueeseen: 1) energiaturvallisuuteen, 2) yhdentyneisiin energian sisämarkkinoihin, 3) energiatehokkuuteen, 4) vähähiiliseen talouteen sekä 5) tutkimukseen ja innovaatioon. Strategian täytäntöönpanoa varten, komissio esitti vuonna 2016 ”Puhdasta energiaa kaikille eurooppalaisille” -toimenpidepaketin (The Clean Energy for all Europeans Package). [98.] Paketti sisältää kahdeksan lainsäädäntöehdotusta, neljä direktiiviä ja neljä asetusta [101, s. 17]. Toimenpidepaketin kaikki säädökset hyväksyttiin vuoden 2019 toukokuuhun mennessä. Paketin hyväksyminen oli merkittävä askel kohti energiaunionin toteuttamista, vuoden 2030 tavoitteiden saavuttamista sekä erityisesti Pariisin ilmastosopimuksen velvoitteiden täyttämistä. [102.] Toimenpidepaketin toteuttamista varten vuoden 2018 joulukuussa voimaan tuli hallintoasetus, jonka perusteella jäsenmaiden on raportoitava tavoitteidensa edistämisestä energiaunionille. Tämän seurauksena EU:n jäsenmaiden oli laadittava ensimmäiset kymmenvuotiset kansalliset yhdennetyt energia- ja ilmastosuunnitelmat (National Integrated Energy and Climate Plans, NECPs) ajalle 2021–2030. [98.]

Nykyisen Euroopan komission toimikaudelle 2019–2024 on määritetty kuusi painopistettä, joista yksi on Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (European Green Deal) [103]. Sen avulla pyritään vastaamaan ilmastonmuutoksen ja ympäristön pilaantumisen aiheuttamaa uhkaa vastaan [104]. Ohjelman tavoitteena on edistää EU:n vihreää siirtymää, jotta hiilineutraalius on saavutettavissa vuoteen 2050 mennessä. Ohjelma tukee EU:n muutosta oikeudenmukaiseksi ja vauraaksi yhteisöksi, jolla on moderni ja kilpailukykyinen talous. [105.] Vihreän kehityksen ohjelman tavoitteet toteutetaan 55-valmiuspaketilla (Fit for 55). Valmiuspaketti koostuu ehdotuksista, joiden avulla tarkistetaan ja päivitetään EU:n lainsäädäntö vastaamaan asetettuja ilmastotavoitteita [106]. Paketin tarkoituksena on muuttaa Euroopan

unionin ilmasto-, energia-, liikenne-, maankäyttö- ja veropolitiikkaa niin, että 55 prosentin päästövähennystavoite saavutetaan määräajassa. Aikaisempi EU:n 40 prosentin päästövähennystavoite ei ollut riittävä ilmastoneutraaliuden saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä. [107, s. 15–16.]

Euroopan vihreän kehityksen ohjelmassa energiasektori keskittyy siirtymään puhtaaseen energiaan kolmen pääperiaatteen avulla. Ne mahdollistavat kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ja kansalaisten elämänlaadun parantamisen. Periaatteet ovat seuraavanlaiset:

- ”varmistetaan turvattu ja kohtuuhintainen energian saanti EU:ssa
- tehdään EU:n energiamarkkinoista täysin yhdentyneet, yhteenliitetyt ja digitaaliset
- asetetaan energiatehokkuus etusijalle, parannetaan rakennusten energiatehokkuutta ja kehitetään energiasektoria siihen suuntaan, että se perustuu pääasiassa uusiutuviin energialähteisiin.” [96.]

Euroopan unionin ilmastopolitiikan tarkoituksena on ohjata yhteisiä sekä jäsenmaiden omia toimia ilmastonmuutoksen hidastamiseksi ja siihen sopeutumiseksi. Ilmastopolitiikka perustuu YK:n ilmastosopimukseen sekä sitä täydentävään Kioton pöytäkirjaan ja Pariisin ilmastosopimukseen. EU:n ilmastopolitiikan keskiössä ovatkin päästökauppajärjestelmä, taakanjako ja EU:n sopeutumisstrategia. Eurooppalaisen ilmastolain voimaan astumisen myötä vuonna 2021, päästövähennystavoite vuodelle 2030 ja ilmastoneutraaliustavoite vuoteen 2050 mennessä ovat laillisesti sitovia. Ilmastolaki on osa Euroopan vihreän kehityksen ohjelmaa. [108.]

EU otti vuonna 2005 käyttöönsä päästökauppajärjestelmän (EU Emission Traiding System, EU ETS), jonka tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä teollisuuden ja energiantuotannon osalta. Kyseessä on maailman ensimmäinen ja myös suurin kasvihuonekaasupäästöjen kauppajärjestelmä. Se kattaa yli 40 prosenttia EU:n kaikista päästöistä. [109; 110.] Yritysten on hankittava päästöoikeudet jokaiselle tuottamalleen hiilidioksiditonnille. Tämän avulla kannustetaan yrityksiä vähentämään päästöjään. Kaupankäynti perustuu siihen että, mitä vähemmän saastuttaa niin sitä vähemmän maksaa. Päästöoikeuksia voidaan huutokaupata tai jakaa ilmaisjaon kautta. Huutokaupassa hinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan perusteella. [111.] Ilmaisjakoon oikeutettuja ovat muun muassa hiilivuotoriskille alttiit toimialat [112]. Päästökauppasektorilla oli aiemmin tavoitteena saavuttaa 43 prosentin päästöjen vähentäminen vuoteen 2030 mennessä vuoden 2005 tasoon verrattuna, mutta asia on ollut tarkastelun alla ja tavoitetta on päivitetty niin, että se on linjassa Euroopan vihreän kehityksen ohjelman kanssa. Täten komissio on esittänyt, että päästöjä vähennettäisiin 61 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. [108; 111.]

4.1.1 Suomen kansallinen energia- ja ilmastosuunnitelma

Suomi toimitti vuoden 2019 lopulla Euroopan komissiolle kansallisen yhdennetyn energia- ja ilmastosuunnitelmansa. Suunnitelma koostuu Suomen kansallisista tavoitteista sekä niitä koskevista politiikkatoimista, joiden avulla EU:n vuoden 2030 energia- ja ilmastotavoitteet saavutetaan. Suunnitelmassa käydään läpi politiikkatoimien vaikutus Suomen kasvihuonekaasupäästöihin, uusiutuvaan energiaan ja energiatehokkuuteen vuoteen 2040 asti. Lisäksi siinä kuvataan suunniteltujen politiikkatoimien vaikutuksia muun muassa talouteen, energiajärjestelmiin, ympäristöön ja kansalaisten terveyteen sekä tuleviin investointitarpeisiin. Suomen tavoitteena on saavuttaa hiilineutraaliuus vuonna 2035. Kaikkia viittä EU:n energiaunionistrategian osa-aluetta käsitellään Suomen yhdennetyssä energia- ja ilmastosuunnitelmassa. [113.]

EU:n asettaman tavoitteen mukaan Suomen on vähennettävä päästökaupan ulkopuolisia kasvihuonekaasupäästöjä 39 prosenttia vuoteen 2030 mennessä vuoden 2005 tasoon verrattaessa. Suomi tavoittelee uusiutuvan energian osuuden nostamista vähintään 51 prosenttiin kokonaisloppuenergian käytöstä ja tieliikenteen loppuenergian käytön osalta 30 prosenttiin. Lisäksi energiatehokkuuden osalta tarkoituksena on toimia niin, että loppuenergian kulutus ei ylitä 290 TWh:n rajaa. Suomen kansallisessa energia- ja ilmastosuunnitelmassa kysyntäjouston hyödyntäminen mainitaan energiaturvallisuuden, markkinoiden yhdentymisen ja energiatehokkuuden yhteydessä. [114, s. 4–121.]

4.2 Kysyntäjousto lainsäädännössä

Sääntelyn avulla voidaan ohjata ihmisten, yritysten sekä muiden sähkön käyttäjien toimintaa ja siksi sen avulla on mahdollista vaikuttaa myös kysyntäjoustoon. [75, s. 207.] EU-tasolla jäsenmaita ohjataan säädösten avulla. Tässä alaluvussa säädösten osalta käsitellään direktiivejä. Direktiivit määrittelevät ne tavoitteet, joihin jokaisen EU-jäsenmaan on päästävä. Direktiivit eivät kuitenkaan muuta suoraan jäsenmaan lainsäädäntöä, vaan antavat toimintaohjeita lainsäätäjille. Lainsäätäjien tehtävänä on saada direktiivin sisältö osaksi maansa lainsäädäntöä, mutta jokainen jäsenmaa saa itse päättää toteuttamisen keinoista. [115; 116.]

Euroopan unionilla ei ole vielä erityisiä tavoitteita kysyntäjouston suhteen, vaikka kysyntäjoustolla tiedostetaan olevan keskeinen rooli uusiutuvien energialähteiden integroinnin helpottamisessa ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kysyntäjoustoa on käsitelty ensimmäisen kerran sisäisiä sähkömarkkinoita koskevassa direktiivissä (2009/72/EY) työkaluna, jonka avulla voidaan parantaa sähkön toimitusvarmuutta sekä energiatehokkuutta. Direktiivi edellyttää jakeluverkonhaltijoita jakeluverkon kehittämistä suunniteltaessa harkitsemaan energiatehokkuutta edistäviä

kysynnänhallintatoimia tai vaihtoehtoisesti hajautettua tuotantoa sen sijaan, että sähkökapasiteettia tarvitsisi päivittää tai korvata. Direktiivissä painotetaan myös älykkään mittausjärjestelmän käyttöönottoa helpottamaan loppukäyttäjien osallistumista aktiivisesti sähkömarkkinoille sekä tukemaan uusien sähkötariffien toteuttamista. [83, s. 109–110; 117, s. 1141–1142.]

Energiatehokkuusdirektiivissä (2012/27/EU) otetaan kantaa energiaalan sääntelyviranomaisten sekä siirto- ja jakeluverkonhaltijoiden toimintaan tavoilla, joiden avulla helpotetaan kysyntäjouston toteuttamista. Lisäksi siinä asetetaan jäsenvaltioille vaatimuksia siirto- ja jakelutariffien osalta. [117, s. 1141–1142.]

Energiaunionistrategian toteuttamista varten julkaistu Puhdasta energiaa kaikille eurooppalaisille -paketti sisältää ehdotuksia uuden sähkömarkkinamallin tarjoamisesta Euroopan unionin alueella. Markkinamalli korostaa erityisesti sähkömarkkinoiden joustavuuden merkitystä. Paketti tavoittelee kuluttajien vaikuttamismahdollisuuksien lisäämistä. Tämän perusteella siinä ehdotetut toimet keskittyvätkin rohkaisemaan loppukäyttäjiä aktiiviseen osallistumiseen energiamarkkinoilla kysyntäjouston ja aggregoinnin kautta. Lisäksi paketti sisältää ehdotuksia sisäisiä sähkömarkkinoita, uusiutuvaa energiaa, energiatehokkuutta ja rakennusten energiatehokkuutta koskevien direktiivien korjaamiseksi sekä päivittämiseksi. [117, s. 1141–1142.]

Uuden sähködirektiivin (2019/944) tarkoituksena on huolehtia, että EU:n sähkömarkkinat ovat kilpaillut, joustavat, kuluttajakeskeiset ja syrjimättömät. Direktiivissä korostuu sähköntuottajien mahdollisuus määritellä omat hintansa. Lisäksi siinä varmistetaan, että loppukäyttäjillä on saatavilla älymittareita, hintavertailuvälineitä ja mahdollisuus valita dynaamiseen hinnoitteluun perustuvia sähkösopimuksia. Kysyntäjouston (kulutusjousto) määritelmä on esitetty direktiivissä. Koska ehdotetut kysyntäjoustotoimet perustuvat pääasiassa ”aktiivisen asiakkaan” toimintaan, on aktiivinen asiakas -termi määritelty myös direktiivissä. [117, s. 1141–1142; 118.]

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (2018/844/EU) sisältää energiatehokkuusvaatimuksia uusille ja olemassa oleville rakennuksille. Kysyntäjouston osalta direktiivissä korostetaan älykästä automaatiota sekä rakennusten ja energiajärjestelmien välistä vuorovaikutusta. [119, s. 157.]

Uusiutuvan energian direktiivissä (2018/2011/EU) kysyntäjousto esitetään kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen yhteydessä. Direktiivin mukaan sähkönjakeluverkon haltijoita vaaditaan tasaisin väliajoin arvioimaan yhdessä alueensa kaukolämmitys- tai kaukojäähdytysjärjestelmien haltijoiden kanssa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien potentiaalia tarjota tasehallintapalveluita. Tasehallintapalveluihin kuuluvat muun muassa kysyntäjousto ja uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun ylimääräisen energian varastointi. Tämän lisäksi tulee arvioida tunnistetun potentiaalin resurssi- ja kustannustehokkuutta muihin ratkaisuihin verrattuna. [120, s. 44.] Näiden perusteella kysyntäjouston edistäminen EU:n lainsäädännössä painottuu lähinnä

kysyntäjouston toteuttamisen esteiden poistamiseen eikä niinkään tavoitteiden tai velvoitteiden asettamiseen [117, s. 1147.]

4.3 Tutkimus ja innovointi Euroopassa

Horisontti 2020 oli Euroopan unionin tutkimuksen ja innovoinnin rahoitusohjelma ajalle 2014–2020, ja sitä on seurannut Horisontti Eurooppa (Horizon Europe), joka sijoittuu vuosille 2021–2027. Horisontti Eurooppa tukee Euroopan vihreän kehityksen ohjelman tavoitteita ja sen tarkoituksena on taistella ilmastonmuutosta vastaan, edistää YK:n kestävän kehityksen tavoitteita sekä tukea EU:n kasvua ja kilpailukykyä. Horisontti Eurooppa on EU:n suurin tutkimuksen ja innovoinnin ohjelma 95,5 miljardin euron kokonaisbudjetilla. Ohjelma tarjoaa rahoitus-, yhteistyö- ja kehittymismahdollisuuksia tutkimuksen, tuotekehityksen ja innovoinnin osalta erilaisille organisaatioille ja toimijoille. Sen avulla Eurooppaan saadaan uutta tietoa ja osaamista, mikä edistää uusien työpaikkojen syntymistä, talouskasvua sekä teollisuuden kilpailukykyä. Ohjelman projektit toteutetaan pääasiassa kansainvälisenä yhteistyönä. [121; 122; 123.] Horisontti Eurooppa jakautuu kolmeen pilariin: 1) Huipputason tieteeseen 2) Globaaleihin haasteisiin ja Euroopan teollisuuden kilpailukykyyn sekä 3) Innovatiiviseen Eurooppaan. Horisontti Eurooppa -ohjelman rakenne on esitetty kuvassa 11.

Kuva 11: Horisontti Eurooppa -ohjelman rakenne [124]

Huipputason tiede -pilari (Pilari 1) keskittyy perustutkimukseen ja sen rahoittamiseen. Pilari tukee tavoitetta nostaa Euroopan unionin alueella tehtävä tieteellinen tutkimus huipulle sekä maailmanlaajuisesti kilpailukykyiseksi. Pilari koostuu Euroopan tutkimusneuvostosta (ERC), Marie Skłodowska-Curie toimista (MSCA) sekä tutkimusinfrastruktuureista. [125.]

Globaalit haasteet ja Euroopan teollisuuden kilpailukyky -pilari (Pilari 2) keskittyy EU:n rahoittamiin tutkimus- ja innovaatioprojekteihin, joissa

etsitään ratkaisuja globaaleihin haasteisiin. Projektit tarjoavat myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Pilari jakautuu kuuteen isoon toimintakokonaisuuteen eli klusteriin. Klusterit jakautuvat seuraavanlaisesti:

1. Terveys
2. Kulttuuri, luovuus ja osallisuutta edistävä yhteiskunta
3. Kansalaisturvallisuus yhteiskunnassa
4. Digitaalitalous ja -teknologia, teollisuus ja avaruus
5. Ilmasto, energia ja liikkuvuus
6. Elintarvikkeet, biotalous, luonnonvarat, maatalous ja ympäristö. [126.]

Innovatiivinen Eurooppa -pilari (Pilari 3) yhdistää eurooppalaisen innovaatiojärjestelmän osapuolet tarjoten rahoitusta tutkimustulosten hyödyntämiseen kohti kaupallistamista ja markkinoita. Pilari jakautuu Euroopan innovaationeuvostoon (EIC), Euroopan innovaatioekosysteemeihin (EIE) sekä Euroopan innovaatio- ja teknologiainstituuttiin (EIT). [127.]

Erilaisia projektihakuja järjestetään näiden osaohjelmien (esim. ERC ja MSCA) ja toimintakokonaisuuksien (klusterit) mukaisesti. Työohjelma (Work Programme) on hakemusta tekevälle osapuolelle tärkein tiedonlähde. Jokaisella osaohjelmalla ja toimintakokonaisuudella on oma työohjelmansa. Työohjelma on 2-vuotinen haku- ja rahoitussuunnitelma, joka sisältää strategiset tavoitteet (Destination), niissä olevat hakukokonaisuudet (Calls) sekä yksittäiset hakuotsikot (Call topics) ja rahoitusinstrumentit (Type of Actions). Lisäksi työohjelmassa on esitetty hakuaikataulu, käytettävä budjetti ja mahdolliset erityisehdot. Euroopan komission Funding & Tenders -osallistujaportaalista löytyy kaikki projekteihin liittyvät tiedot. [123.]

Globaalien haasteiden klusteri 5 (Ilmasto, energia ja liikkuvuus) taistelee ilmastonmuutosta vastaan muuttamalla energia- ja liikennesektorit ympäristöystävällisemmiksi, tehokkaammiksi, turvallisemmiksi sekä älykkäämmiksi [128]. Klusteri jakautuu kuuteen eri tavoitealueeseen eli destinaatioon. Destinaatiot ovat:

1. Ilmastotiede ja keinot ilmastoneutraaliuden saavuttamiseksi
2. Akut ja läpimurto teknologiat
3. Kestävä, turvallinen ja kilpailukykyinen energiantuotanto
4. Tehokas, kestävä ja monipuolinen energiankäyttö
5. Puhdas liikenne: maa, meri ja ilma
6. Älykäs ja turvallinen henkilö- ja tavaraliikenne. [129.]

Klusterin 5 työohjelma, erityisesti destinaation 4 osalta, sisältää hakuja kysyntäjoustoa edistäville hankkeille. Destinaatio 4 keskittyy rakennusten ja teollisuuden energiantarpeen vähentämiseen ja niiden aktiivisempaan osallistumiseen älykkäässä energiajärjestelmässä [130, s. 18.] EU:n rahoittamilla kysyntäjoustohankkeilla on suuri painoarvo kysyntäjouston edistämisessä, ja

hankkeen kautta saatu taloudellinen tuki on merkittävä mukana oleville osapuolille.

4.3.1 Kysyntäjoustohankkeita ja pilotointeja

iFLEXiä edeltäväna hankkeena, vuosina 2017–2021, toimi HOLISDER (Integrating Real-Intelligence in Energy Management Systems enabling Holistic Demand Response Optimization in Buildings and Districts). Hankkeen tavoitteena oli tarjota kokonaisvaltaista kysyntäjouston optimointia rakennuksissa sekä asuinalueilla integroimalla energianhallintajärjestelmien älyä. HOLISDER yhdisti laajan valikoiman kehittyneitä teknologioita, jotka integroitiin avoimeen, yhteentoimivaan sekä turvalliseen tiedonhallinnan viitekehykseen. Teknologioiden integroinnilla varmistettiin energiaverkkojen, rakennusten energianhallintajärjestelmien ja laitteiden välinen yhteentoimivuus. Tämä puolestaan tuki kuluttajien vaikuttamismahdollisuuksien lisääntymistä ja heidän muuttumista aktiivisiksi markkinatoimijoiksi. Hanke keskittyi myös uusien liiketoimintamallien luomiseen. Käyttöönotetulla kysyntäjouston optimoinnin tarjoavalla viitekehyksellä arvioitiin saavutettavan merkittävä vähennys rakennusten energiakustannuksissa. [131; 132.] EU:n tarjoama rahoitus hankkeelle oli noin 3,9 miljoonaa euroa. Hanke kuului osaksi yhteiskunnalliset haasteet- ohjelmaa, joka käsitteli turvallista, puhdasta ja tehokasta energiankäyttöä. [133.]

Horisontti Eurooppa -ohjelmassa oli haku auki tämän vuoden syyskuun alkuun asti Demand response in energy-efficient residential buildings -hankkeelle. Hanke kuuluu osaksi destinaatio 4. Projektin odotetaan edistävän ja lisäävän kotitalouksien kysyntäjoustoratkaisujen hyötyjä, luotettavuutta ja hyväksyttävyyttä. Lisäksi hankkeen tavoitteena on edistää kehittyneitä kuormanhallinta- ja aggregointimenetelmiä, jotka mahdollistavat asuinrakennusten osallistumisen kaupalliseen kysyntäjoustoon. Kokonaisbudjetin on arvioitu olevan 12 miljoonaa euroa. Tietoa EU:n rahoituksen osuudesta ei ole vielä saatavilla. [134.]

Vuodelle 2023 avautuvaksi hauksi on suunnitteilla Energy Management Systems for flexibility services -hanke. Tämänhetkisen tiedon mukaan haku aukeaa 12.9.2023 [135]. Hanke kuuluu osaksi destinaatio 3. Hankkeen odotetaan edistävän älykkäiden rakennusten ja teollisuusalueiden käyttöä uusiutuvan energian tehokkaassa integroinnissa energiajärjestelmään. Lisäksi hankkeen tavoitteena on osoittaa useiden eri energianhallintajärjestelmien yhdistämisen tuomat joustavuuspalvelut sähköverkossa. Hankkeessa halutaan demonstroida myös järjestelmien yhteentoimivuutta ja tiedonvaihtoteknologioita. Hanketta tulee pilotoida paikallisella ja alueellisella tasolla. Kokonaisbudjetin arvioidaan olevan noin 10 miljoonaa euroa, josta EU:n tuki on noin puolet. [130, s. 230.]

Myös Suomessa on tutkittu ja kehitetty useita kysyntäjoustoon liittyviä järjestelmäratkaisuja. Saadut tutkimustulokset ovat olleet lupaavia [1, s. 12].

Helsingin kaupunki pilotoi sähkön kysyntäjoustoa Nuuka Solutions Oy:n kanssa vuonna 2019. Pilotoinnin alussa Helsingin kaupungilla otettiin käyttöön Nuuka Solutions Oy:n seurantajärjestelmä, jonka tarkoituksena on kerätä kaikkien kaupungin rakennusten tiedot yhteen paikkaan. Tämä mahdollisti kiinteistöjen seurannan ja ohjauksen reaaliajassa, ja siten myös virtuaalivoimalaitosten pilotoinnin. Pilotointi oli osa Energiaviisaat kaupungit -hanketta, jonka tavoitteena oli kehittää virtuaalivoimalaitoksen toimintakonseptia Helsingin kaupungin rakennuksille. Virtuaalivoimalaitoksella viitataan ohjelmistoalustaan, joka mahdollistaa siihen liitettyjen kuormien hallinnan ja ohjaamisen. Pilottikohteina toimivat Kaisaniemen ala-aste ja Meritalon ammattioppilaitos. Kummassakin kohteessa oli entuudestaan kaksisuuntainen automaatiojärjestelmä, mikä mahdollisti kuormien ohjauksen. Pilotti perustui simulointiin sähkön taajuusmarkkinoille osallistumisesta, jossa ilmanvaihtokoneita säädettiin manuaalisesti valvomon kautta. Tarkoituksena oli jäljitellä osallistumista sähköverkon taajuuden hallintaan. Pilotti keskittyi tutkimaan kysyntäjouston vaikutuksia kiinteistöjen sisäilmaan, sekä koulujen toiminta-aikana että toiminta-ajan ulkopuolella. Molempiin kohteisiin asennettiin Smartwatcherin olosuhdeanturit sisäilmanlaadun mittaamista varten. Ilmanvaihtokoneet valikoituivat säädettäviksi kuormiksi, koska niiden osuus kokonaistehosta oli suurin. Lisäksi niiden tehoa voitiin säätää alaspäin sekä ylöspäin. Suoritettujen testien perusteella koulujen sisäolosuhteet pysyivät joustotapahtumien aikana hyvinä. [88, s. 6; 136; 137.]

VTT:n vuonna 2020 julkaisemassa tutkimuksessa ”Demand Response in District Heating Market—Results of the Field Tests in Student Apartment Buildings” käsiteltiin kaukolämmön kysyntäjoustoa. Kohteena oli kahdeksan Tampereella sijaitsevaa kaukolämmitteistä opiskelijoille suunnattua asuinkerrostaloa. Tutkimus suoritettiin helmi- ja maaliskuun aikana eli silloin, kun lämmitystarve on Suomessa suurimmillaan. Kohteeseen asennettiin kysyntäjoustojärjestelmä, joka huomioi paikallisen sääennusteen sekä huonekohtaiset lämpötilamittaukset. Järjestelmän toiminta perustui hetkelliseen huoneistojen lämmityksen vähentämiseen lämpimän käyttöveden kysynnän ollessa huipussaan. Kulutuksen tasaantuessa asuntoja lämmitettiin jälleen normaalisti. Tutkimustulosten perusteella kohteiden energiankulutus laski noin 11 prosenttia. Tämä tarkoittaa vuositasolla 9 prosentin vähennystä energiakustannuksissa ja kasvihuonekaasupäästöissä. [119, s. 157; 138.]

4.4 Poliittisten toimien vaikutus energiamarkkinoihin ja energiakriisi

Muuttuneen maailmanpoliittisen tilanteen seurauksena energiasektoriin kohdistuu merkittäviä muutoksia. Venäjä on jo pitkään ollut keskeisessä asemassa fossiilisten polttoaineiden sekä sähkön tuottajana ja viejänä Euroopassa. Helmikuun lopulla alkaneet Venäjän kohdistamat sotatoimet Ukrainaan ovat kuitenkin muuttaneet energiapoliittista toimintaa pitkäksi aikaa. Suomen sekä muun Euroopan energiaturvallisuus on noussut ajankohtaiseksi aiheeksi. Venäläisestä energiasta on päästävä irtautumaan. Suomen energiajärjestelmä on monipuolinen, vakaa ja hyvin varautunut mahdollisiin muutoksiin. Suomi on vähentänyt merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana energiatuotannon riippuvuutta fossiilisiin polttoaineisiin erinäisten ilmasto- ja energiapoliittisten toimien avulla. [139; 140.]

Tarkasteltaessa Venäjän energiantuontia Suomeen ennen Ukrainan sodan alkamista huomataan, kuinka monella tapaa Suomen energiajärjestelmä on sidoksissa venäläiseen energiaan. Venäjältä on tuotu Suomeen merkittäviä määriä kivihiiltä, ydinvoiman polttoainetta, maakaasua, öljyä, sähköä ja puutuotteita. Vuonna 2021 Venäjältä tuodun energian määrä kattoi 34 prosenttia Suomen energian kokonaiskulutuksesta. Samana vuonna Suomeen tuodusta öljystä noin 67 prosenttia ja kivihiilestä noin 52 prosenttia oli lähtöisin Venäjältä. Maakaasun kohdalla osuus oli kuitenkin kaikista suurin 92 prosentilla. Venäjän osuus Suomen vuotuisesta sähkön hankinnasta oli 10 prosenttia. Venäjältä tuotu sähkö laskee sähkön hintaa Suomessa, mikä tarkoittaa hintojen nousua Venäjän tuonnin loppuessa. Venäjä lopetti sähköntuonnin Suomeen 14.5.2022, mutta ydin- ja tuulivoimaan tehtyjen investointien myötä Venäjältä tuotu sähkö saadaan korvattua. Suomen irtautumista Venäjästä edistetään investoimalla energiayrityksiin ja nopeuttamalla vihreää siirtymää. Vihreän siirtymän seurauksena fossiilisten polttoaineiden käyttö ja energiariippuvuus vähenee EU:ssa. [139; 140; 141.]

Viime vuodesta lähtien energian hinnat ovat nousseet rajusti Euroopassa sekä muualla maailmassa. Tämä on ollut ennakoitavissa koronaviruspandemian jälkeisen talouden elpymisen ja matkustusrajoitusten lieventämisen vuoksi. Energian hintojen nousu on ollut kuitenkin odotettua suurempi. Hintojen nousu on jatkunut myös tänä vuonna, mitä Venäjän hyökkäys Ukrainaan on pahentanut entisestään. Venäjä on rajoittanut maakaasun tuontia Eurooppaan jo jonkin aikaa, mutta Ukrainaan tehdyn hyökkäyksen myötä Venäjä päätti lopettaa kaasutoimitukset useaan EU-maahan kokonaan. Tämä on kasvattanut toimitusten epävarmuutta ja nostanut kaasun hinnan ennätyksellisen korkealle, mikä on puolestaan johtanut sähkön hinnan jyrkkään nousuun. Energian hinnat ovat nousseet niin korkeiksi, että puhutaan energiakriisistä. [142.]

Keski-Euroopassa maakaasulla on merkittävä rooli sähköntuotannossa. Vaikka maakaasu ei ole Suomen energiajärjestelmän kannalta keskeisessä

asemassa, vaikuttaa se osaltaan Suomessa energian hintoihin. Suomi kuuluu osaksi eurooppalaisia sähkön sisämarkkinoita, joten Keski-Euroopan sähkön hinnannousu heijastuu myös Suomeen. [143.]

Muita sähkön hinnannousuun vaikuttavia tekijöitä ovat olleet viimeaikaiset haasteet Ranskan ydinvoiman tuotannossa ja Norjan tavallista pienemmät vesivarastot. Ranskan energiantuotanto painottuu vahvasti ydinvoimaan, jolla katetaan suuri osa sähkönkulutuksesta. Tänä vuonna ydinvoiman käyttöä on kuitenkin jouduttu rajoittamaan huoltotöiden takia, eikä ydinvoiman tilalle ole saatu korvaavaa energiantuotantoa. Ranska on tunnetusti suuri sähkönviejä, ja koska sen sähköntuotannossa on ollut ongelmia, haasteet näkyvät myös Euroopan sähkömarkkinoilla. Sääolosuhteiden ja kovan kysynnän myötä Etelä-Norjassa olevat vesivarastot ovat normaalia matalammalla. Tämä on aiheuttanut rajoitteita vesivoimalla tuotetun sähkön saatavuuteen. [143.] Lisäksi äärimmäiset ilmasto-olosuhteet, jotka ovat ilmenneet esimerkiksi helleaaltoina Euroopassa, ovat lisänneet jäähdytysenergian kysyntää ja aiheuttaneet painetta sähköntuotannolle [142].

Tällä hetkellä energian hintojen nousu ja energiahuollon häiriöt ovat EU:n suurimpia huolenaiheita. EU-maiden välinen yhteistyö on erityisen tärkeää näihin haasteisiin vastaamiseksi. Yhteistyön avulla energiakriisin vaikutuksia saadaan lievennettyä ja riskejä vähennettyä. EU:n tavoitteena energiakriisistä selviytymiseksi on varmistaa kohtuuhintainen ja kilpailukykyinen energia kuluttajille, parantaa energiaturvallisuutta ja hätätilanteisiin valmistautumista sekä vahvistaa EU-maiden energiasektorin häiriönsietokykyä ja riippumattomuutta. [142.]

5 Asuinkiinteistön mahdollisuuksien tutkiminen energiaverkkojen tasapainottamisessa

Energiantuotannon ja -kulutuksen väliseen tasapainoon voidaan vaikuttaa kysyntäjouston avulla. Kysyntäjouston tutkiminen sekä pilotointi on erityisen tärkeää, jotta erilaisia kysyntäjoustopalveluita saadaan markkinoille. Mittausinfrastruktuurin sekä tieto- ja viestintäteknologioiden kehittyminen edistävät kestävän energiajärjestelmän sekä kysyntäjouston toteuttamista. Asuinrakennukset ovat muuttumassa koko ajan älykkäämmiksi erilaisten kiinteistönohjaus- ja automaatiojärjestelmien lisääntymisen myötä. Ne mahdollistavat rakennusten reaaliaikaisen seurannan ja ohjaamisen tuoden mahdollisuuksia rakennusten energianhallintaan. [77, s. 4; 144, s. 1329.]

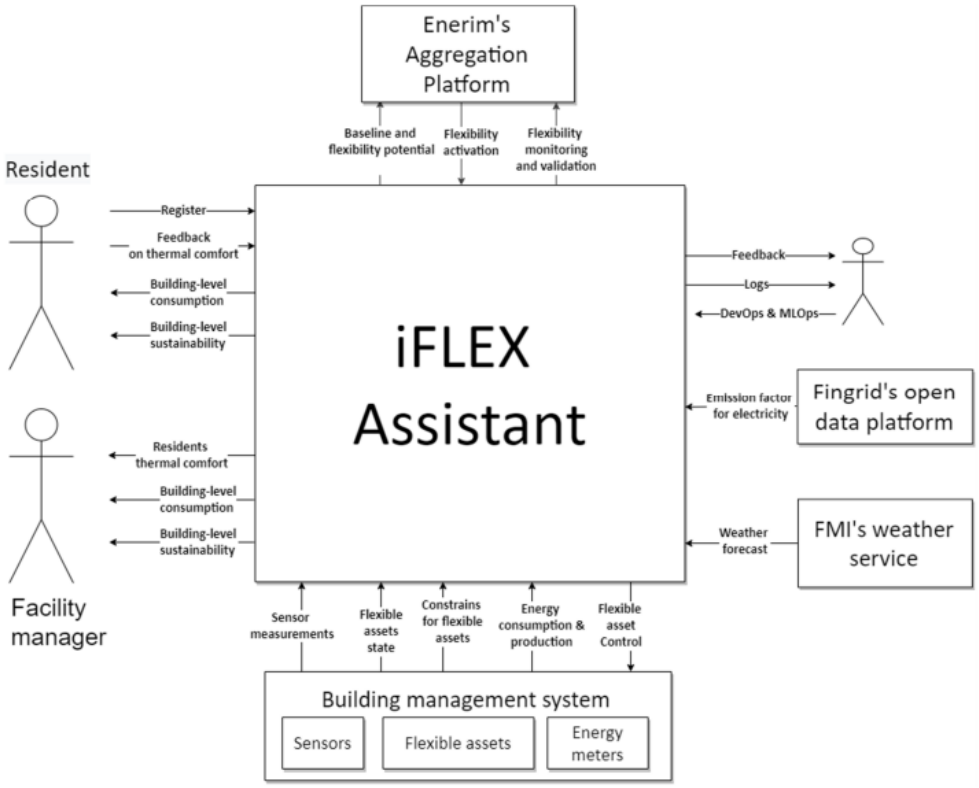
Asuinkiinteistön mahdollisuuksien tutkiminen energiaverkkojen tasapainottamisessa perustuu iFLEX-hankkeen ensimmäisen vaiheen aikana Suomen pilottikohteessa suoritettuihin poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeisiin. Tutkimuksen avulla halutaan selvittää asuinkerrostalon sähkönkäytön joustopotentiaalia ja sen soveltuvuutta sähköverkon tasapainottamiseen.

5.1 iFLEX Assistant

iFLEX Assistant (iFA) on ohjelmistoagentti, joka toimii kuluttajien, rakennuksen energiajärjestelmän, eri sidosryhmien sekä ulkoisten järjestelmien välillä auttaen kuluttajia saavuttamaan energiatavoitteensa paikallisen energianhallinnan ja kysyntäjouston avulla [7]. Lisäksi se optimoi sisäolosuhteiden mukavuuden, energiakustannukset ja ympäristöjalanjäljen asukkaiden toiveiden mukaisesti [8]. iFLEX Assistantia pilotoidaan Suomen lisäksi Kreikassa ja Sloveniassa. Pilottikohteet ovat keskenään hyvin erilaisia ja täten niissä toteutetut ratkaisut on suunniteltu vastaamaan kohteen tarpeita. iFLEX Assistantista kehitetään kaksi eri versiota, kodin energianhallintajärjestelmille (Home Energy Management System, HEMS) ja rakennusten energianhallintajärjestelmille (Building Energy Management System, BEMS) suunnatut versiot. Koska Suomen pilottikohteena toimii asuinkerrostalo, kohteeseen on toteutettu rakennuksille suunnattu iFLEX Assistant. Hankkeen kahdessa muussa pilottikohdemaassa pilotoidaan kodin energiahallintajärjestelmille suunnattua iFLEX Assistantia. [7.]

Suomen iFLEX Assistantin päätavoite on automatisoida joustavuuden hallinta asuinkerrostalossa, jossa suurimman osan energiakustannuksista (esim. lämmitys, lämmin käyttövesi ja sauna) hoitaa asunto-osakeyhtiö. Tämän perusteella yksittäisen kuluttajan sijaan iFLEX Assistant palvelee koko rakennusyhteisöä, ja loppukäyttäjinä toimivat sekä rakennuksen asukkaat että kiinteistönhoitaja. [145, s. 48.] iFLEX Assistant on integroitu rakennuksen energianhallintajärjestelmään. Kuva 12 havainnollistaa kiinteistölle

suunnattua iFLEX Assistantia ja siihen yhteydessä olevia ulkoisia järjestelmiä.



Kuva 12: Havainnekuva Suomen pilotin iFLEX Assistantista [145, s. 49]

Kiinteistönhoitajat ovat vastuussa kiinteistön toimivuudesta. iFLEX Assistant tuo havaintoja kiinteistönhoitajalle rakennuksen aiemmasta energiankulutuksesta sähkön ja kaukolämmön osalta sekä antaa arvioita rakennuksen hiilidioksidijalanjäljestä. Lisäksi se havainnollistaa kiinteistönhoitajia asukkaiden lämpömukavuudesta. Asukkaille iFLEX Assistant tarjoaa tietoa rakennustason energiankulutuksesta ja kestävyysparametreistä. Asukkaat voivat myös järjestelmän kautta antaa palautetta lämpömukavuudestaan. Palaute lähetetään kiinteistönhoitajalle sekä iFLEX-tukitiimille, jotta iFLEX Assistantia saadaan kehitettyä paremmaksi. Asukkailla on myös mahdollisuus päästä näkemään kiinteistössä suoritetut kysyntäjoustotapahtumat. iFLEX Assistantin merkittävimmät ulkoiset järjestelmät ovat Enerimin tarjoama aggregointialusta, rakennuksen energianhallintajärjestelmä, Ilmatieteen laitoksen sääpalvelu sekä Fingridin Open Data -alusta. Aggregointialusta integroitiin iFLEX Assistantiin hankkeen toisen vaiheen aikana. [145, s. 49–50.]

5.1.1 iFLEX Assistantin toiminnalliset osat

Suomen pilotin iFLEX Assistant koostuu seuraavista toiminnallisista osista: 1) asukkaiden käyttöliittymästä, 2) kiinteistönhoitajan käyttöliittymästä, 3) resurssienkeräysrajapinnasta, 4) digitaalisesta kaksosesta, 5) automaattisesta joustavuuden hallinta -komponentista sekä 6) sääpalveluiden rajapinta -komponentista [146, s. 7]. Loppukäyttäjien käyttöliittymä (End-user interface) voi olla suunnattu joko asukkaiden tai kiinteistönhoitajien käyttöön. Käyttöliittymän tarkoituksena on auttaa loppukäyttäjiä parantamaan asuintilojensa tai toimitilojensa tehokkuutta sekä kestävyyttä kysyntäjoustotapahtumien aikana. [147, s. 12.] Jokaisella pilottikohteen asukkaalla on pääsy loppukäyttäjän käyttöliittymään, mitä kautta he pääsevät tarkastelemaan rakennuksen energiankulutusta sekä hiilidioksidijalanjälkitietoja. Vain rekisteröityneet asukkaat pääsevät katsomaan asuntonsa sisäolosuhteita ja pystyvät antamaan niistä palautetta. [148, s. 21.]

Resurssienkeräysrajapinta (Resource Abstraction Interface, RAI) tarjoaa rajapinnan rakennuksen energianhallintajärjestelmille, älymittareille sekä muulle ulkoiselle mittausinfrastruktuurille. Rajapinnan tehtävänä on valvoa ja hallita energiankulutusta sekä muita tärkeitä joustotapahtumiin liittyviä parametrejä. [147, s. 14.] RAI koostuu oBIX-tietokannasta, BEMS-käyttöliittymästä, Client-käyttöliittymästä sekä Fingridin integroinnista [146, s. 7].

Automaattinen joustavuuden hallinta -komponentti (Automated Flexibility Management, AFM) tarjoaa palveluita kysyntäjouston ohjauksen ja optimoinnin toteuttamiseen. Sen toiminta perustuu peruskuorman ja joustavuuden ennustamiseen sekä kysyntäjouston hallintaan ja optimointiin. Moduuli koostuu suunnittelu-, resurssi- ja optimointimoduulista. [147, s. 15.]

Digitaalisen kaksosen (Digital Twin, DT) tarkoituksena on arvioida kuluttajan vaikutusta joustavuuden hallintaan sekä tarjota optimaalista ja kuluttajakeskeistä joustavuuden hallintaa mallipohjaisen suunnittelun sekä ohjauksen avulla. Asuinkerrostalon digitaalinen kaksonen koostuu pilottikohteen sähkön ja kaukolämmön peruskuormituksen arvioinnin -mallista sekä joustavuusmallista rakennuksen lämmitysjärjestelmän aikavakion arvioimiseksi. [147, s. 16.]

Sääpalveluiden rajapinta (Weather Service Interface, WSI) tarjoaa sääennustetietoja iFLEX Assistantille. Tietoja hyödynnetään esimerkiksi rakennuksen lämmitysjärjestelmän vasteen ennustamisessa. Suomen säätietoja tarjoaa Ilmatieteen laitos (Finnish Meteorological Institute, FMI). [147, s. 18.]

5.2 Suomen pilottikohde

Suomen pilotissa tutkitaan, kuinka kerrostalot voivat edistää sekä sähköverkon että kaukolämpöverkon tasapainoa hyödyntämällä asuinrakennuksen lämmitysjärjestelmän ja termisen massan tuomaa joustavuutta [149]. Suomen pilottikohteena toimii vuonna 2004 rakennettu opiskelijoille suunnattu asuinkerrostalo. Kerrostalossa on 90 asuntoa, joissa asuu yhteensä yli 140 asukasta. Rakennuksen ensisijaisena lämmitysmuotona toimii kaukolämpö, jonka rinnalle on asennettu poistoilmalämpöpumppujärjestelmä (PILP). Kohteessa ei ole jäähdytysjärjestelmää. Pilotissa tarkastellaan kaukolämmön kulutusta sekä rakennuksen yleisten tilojen sähkönkulutusta. Kaukolämmön kulutuksessa huomioidaan lämmin käyttövesi ja lämmitys. Sähkönkulutus koostuu ilmanvaihdosta, hisseistä, valaistuksesta, lämpöpumpusta sekä taloyhtiön yleisestä saunasta. Asukkaiden omaa sähkönkulutusta ei tarkastella pilotissa ollenkaan, sillä jokaisella asukkaalla on henkilökohtainen sähkösopimus, mikä vaikeuttaa sähkönkulutuksen seuraamista ja kysyntäjoustoon osallistumista. [9, s. 21.; 148, s. 6–21.]

Hankkeen ensimmäisen vaiheen aikana havaittiin pilotin toteuttamista rajoittavia tekijöitä, minkä seurauksena kohteeseen tehtiin lisäasennuksia ongelmien ratkaisemiseksi. Rakennuksen automaatiojärjestelmä, Schneider ATMO, ei pystynyt olemaan vuorovaikutuksessa ulkoisten järjestelmien kanssa, minkä takia kohteessa otettiin käyttöön JACE-8000-yhdyskäytävä. JACE-8000 on IoT -ohjain ja palvelinalusta useiden erilaisten laitteiden- ja alijärjestelmien yhdistämiseen. Lisäksi kohteen kaukolämpömittaukset olivat saatavilla ainoastaan 60 minuutin näytteenottotaajuudella, mikä oli liian vähäinen pilotin toteuttamista varten. Tämän seurauksena kaukolämpömittariin lisättiin uusi väyläkortti kumulatiivisen energia- ja tehomittausten lukemiseksi tiheämmällä mittausvälillä. [146, s. 6; 148, s. 22; 150, s. 1.]

Pilottikohteesta saadaan seuraavia mittaustietoja:

- Rakennustason sähkönkulutus, yhden minuutin tarkkuudella
- Kaukolämmön energiankulutus, yhden minuutin tarkkuudella
- Sääennustetiedot: ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja auringon säteily
- Rakennustason sähkönkulutus verkkoanalysaattorin kautta (jännite, virta, teho ja taajuus) 1–5 sekunnin tarkkuudella
- Ilmanvaihdon poistoilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja CO2-pitoisuus
- Rakennuksen keskimääräinen sisäilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja CO2-pitoisuus
- Kaukolämmön, lämmitysverkon, lämpimän käyttöveden ja poistoilmalämpöpumpun meno- ja paluuveden lämpötila sekä niihin liittyvät asetuspisteet

- Tilannetiedot vesipumpuista, puhaltimista, säätöventtiileistä ja lämpöpumpun kompressorista
- Poistoilmalämpöpumpun poistoilman lämpötila. [9, s. 22.]

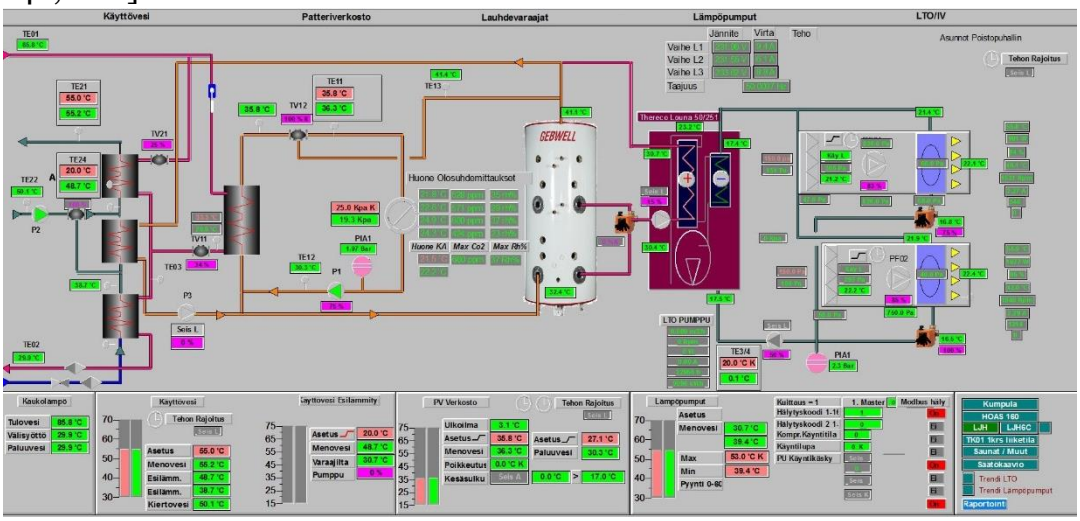
Jotta kuormien ohjauksen vaikutuksia pilottikohteessa pystytään seuraamaan, tarvitaan tietoja rakennuksen asuintilojen sekä yhteisten tilojen sisäolosuhteista. Pilottikohteen yleisiin tiloihin on asennettu edellisen hankkeen (HOLISDER) aikana neljä anturia. Niiden toiminta perustuu Sigfox-tietoliikenneverkkoon, joka on suunniteltu pienten datamäärien, kuten lämpötila- tai kosteustietojen välittämiseen [151]. Anturit on sijoitettu saunan pukuhuoneeseen, saunan suihkutilaan, kerhohuoneeseen sekä pesutupaan. Saman hankkeen aikana kohteeseen asennettiin myös verkkoanalysaattori, minkä avulla pystytään mittaamaan sähköverkon taajuutta. iFLEX-hankkeen ensimmäisen vaiheen aikana pilottiin rekisteröityi neljä asukasta, joille asennettiin sisäolosuhteita mittaavat anturit. Asennettujen mittauslaitteiden avulla saadaan mitattua asuinhuoneistojen sekä yhteisten tilojen sisäilman lämpötilaa, hiilidioksidipitoisuutta ja suhteellista kosteutta. Edellä mainittujen lisäksi kerrostalon pesutuvassa mitataan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuutta. [148, s. 21; 152, s. 46.] Asuinkerrostaloon asennettujen laitteiden tiedot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Asuinkerrostaloon asennetut mittauslaitteet [153, s. 54]

Kerros	Laitteen sijainti	Laitteen valmistaja	Laitteen malli
Pohjakerros	Saunan pukuhuone	Connected Finland	Defectify
Pohjakerros	Saunan suihkutila	Connected Finland	AirWits CO2
Pohjakerros	Kerhohuone	Connected Finland	AirWits CO2
1. kerros	Pesutupa	Connected Finland	AirWits TVOC
N/A	Asunto	HK Instruments	CDT-MOD-2000-1R-rH-D

5.2.1 Rakennuksen energiajärjestelmät

Kuva 13 havainnollistaa pilottikohteen energiajärjestelmiä. Kuvasta vasemmalta oikealle näkyy käyttövesikierto, patteriverkosto, lämminvesivaraaja, poistoilmalämpöpumppu sekä lämmöntalteenotto ja ilmanvaihto. Rakennuksen automaatiojärjestelmän avulla pystytään seuraamaan ja ohjaamaan näiden toimintaa. Lisäksi automaatiojärjestelmä vastaa valaistuksen, hissien ja saunan ohjauksesta sekä valvonnasta. Se myös mahdollistaa käytävien ja yhteisten tilojen lämpötilan sekä kosteuden seurannan. Kuvan alakulmasta voi havaita lämmitysjärjestelmän toimintaa ohjaavia parametrejä. [9, s. 21; 146, s. 6.]



Kuva 13: Suomen pilottikohteen energiajärjestelmät

Kaukolämpöverkosta saatu lämpö siirretään lämmönsiirtimien avulla patteriverkostoon ja lämpimän käyttöveden valmistukseen. Kohteeseen asennettiin poistoilmalämpöpumppu vuonna 2015 ja sen yhteyteen liitettiin 1000 litran lämminvesivaraaja. Osa lämpöpumpulla tuotetusta lämmöstä voidaan varastoida lämminvesivaraajaan. Se mahdollistaa huippupiikkien leikkaamisen korkean kysynnän aikana. Poistoilmalämpöpumppu toimii yhdessä lämmöntalteenottolaitteiston kanssa hyödyntäen rakennuksen poistoilman lämpöenergiaa. Lämpöpumpun arvioitu ottoteho on 15 kW, jonka avulla se tuottaa 50 kW lämpöä. Lämpöpumpulta lähtevän veden maksimilämpötilaksi on määritelty 53 celsiusastetta, mitä hyödynnetään sekä lämmityksessä että lämpimän käyttöveden valmistuksessa. Lämpöpumppua hyödynnetään silloin, kun sähkön avulla tuotettu lämpö on kaukolämpöä edullisempaa, huomioon ottaen lämpöpumpun hyötysuhteen (COP). Jos energiankulutus on suurempaa mitä varaaja tai lämpöpumppu pystyy toimittamaan, siirtyy järjestelmä hyödyntämään kaukolämpöä asuinrakennuksen lämmityksessä. [154.]

Lämmityksen ohjaus perustuu asuinkerrostalossa huoneistojen sisäilman keskilämpötilan ja ulkoilman lämpötilan arvoihin. Yleisten tilojen

sisävalaistusta ohjataan liiketunnistimilla ja ulkovalaistusta valoisuuden mukaan aikaohjelmia hyödyntäen. Rakennuksen ilmanvaihdosta vastaa koneellinen poistoilmajärjestelmä, jonka toiminta perustuu siihen, että asunnoista poistetaan koneellisesti likainen sisäilma ja uusi ilma tulee asuntoon korvausilmaventtiilien kautta. [154.]

5.3 Kuormien ohjaus ja pilotointi

iFLEX-hankkeen pilotointi toteutetaan kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäisen vaiheen aikana pilottikohteeseen tehtiin tarvittavat laiteasennukset tukemaan iFLEX Assistant -ohjelmistopalvelun käyttöönottoa sekä pilotoitiin palvelun toimivuutta käytännön olosuhteissa. iFLEX Assistantin toimivuus saatiin todennettua. Palvelun käyttöönottoa ja esipilotointia käsitellään tarkemmin Jemina Leinon diplomityössä ”IFLEX ASSISTANT -Ohjelmistopalvelun vaikutus asuinkiinteistöjen kysyntäjouston kehitykseen”. [153, s. 80]

iFLEX Assistantin esipilotointi oli tarkoitus suorittaa vuoden 2021 loppuun mennessä, mutta aikatauluviivästymien vuoksi ensimmäiset ohjauskokeet saatiin suoritettua vasta marraskuussa 2021. Ensimmäisen vaiheen ohjauskokeet perustuivat lämmityksen rajoittamiseen eli lämmitysverkoston asetusarvoa pudotetaan niin, että se rajoittaa rakennukseen menevää lämpöenergiaa. Ohjauskokeet kohdistuvat vain lämmitysverkostoon eli silloin, kun rajoitus on päällä lämpöpumpulla ja kaukolämmöllä lämmitetään vain rakennuksen käyttövettä. Lämmityksen rajoittamisen suurimpana haasteena toimi asuntojen sisäilman lämpötilan asettamat rajat ohjauskokeiden kestolle, sillä lämpötila ei saa laskea asunnoissa 21 celsiusasteen alapuolelle. Kohteessa on kuitenkin pyritty pitämään sisälämpötila 21 celsiusasteen sijaan 21,5 celsiusasteessa. Lyhyt jakso raja-arvon alapuolella on sallittu, mutta se tulee korjata mahdollisimman nopeasti. [153, s. 56; 154.]

Sähkön ja kaukolämmön rajoitusohjelmat on tehty rakennuksen automaatiojärjestelmään. Sähkökuormien rajoitusohjelma ohjaa ilmanvaihtoa ja lämpöpumpun käyttöä. Kaukolämmön osalta rajoitusohjelma ohjaa lämmityksen ja käyttöveden lämpötila-asetuksia. Kaukolämmön ohjauskokeita on suoritettu viime talven ja kevään aikana eri olosuhteissa. Mittausdataa on saatu eri vuorokauden ajoilta, yöaikaa lukuun ottamatta, sekä eri ulkolämpötiloissa. Monipuoliset ohjauskokeet mahdollistavat sen, että iFLEX Assistantia pystytään opettamaan, kuinka kiinteistö reagoi kysyntäjoustotapahtumiin eri olosuhteissa. [154; 155.]

Ohjauskokeet toteutetaan lähettämällä VTT:n palvelimelta lämmityksen tai sähkön rajoituksen ohjauspyyntö. VTT:n palvelimelta ohjauspyyntö saapuu pilottikohteen oBIX-tulkille (JACE), josta tieto välitetään edelleen Modbus TCP -väylällä rakennusautomaatiojärjestelmälle. Tieto kulkee järjestelmässä myös vastakkaiseen suuntaan. Automaatiojärjestelmä välittää JACE:n avulla VTT:n palvelimelle takaisin tietoa rakennuksen lämpötiloista sekä

ohjauksen vaikutuksista sähkön ja lämmön kulutuksiin. VTT toimii Caverionin lisäksi Suomen pilottikohteen toisena osapuolena. [153, s. 56.]

Pilotin ensimmäisessä vaiheessa suoritetuilla ohjauskokeilla ei saatu toivottuja tuloksia. Lämmitysverkoston asetusarvon pudottamisella ajateltiin olevan vaikutuksia myös lämpöpumpun toimintaan, eli rajoittamalla lämmitystä saataisiin kaukolämmön kulutuksen lisäksi laskettua lämpöpumpun tuottaman lämmön määrää ja siten vähennettyä sen sähkönkulutusta. Näin ei kuitenkaan tapahtunut, vaan lämpöpumppu on oletetusti jäänyt päälle rajoituksen aikana lämmittämään käyttövettä. Ongelman ratkaisemiseksi lämpöpumpulle määritettiin suoraohjaus, joka toimii päälle/pois -kytkentänä. Suoraohjauksen toimivuus on saatu toisen vaiheen aikana varmennettua, ja myöhemmin hankkeen aikana olisi tarkoitus testata sen toimintaa muun muassa sähkön spot-hinnan vaihtelun mukaan. Lisäksi hankkeessa halutaan tehdä ohjauskokeita, joissa rajoitetaan sähköä, kaukolämpöä tai molempia samanaikaisesti. Lisäksi on ajateltu, että ilmanvaihdon ohjaus otetaan mukaan ohjauskokeisiin. [155.]

Lämpöpumpun ohjauksesta aiheutuu viiveitä tiedonsiirron sekä hallitun alas- ja ylösajon osalta. Kun annetaan käsky lopettaa lämpöpumpun käyttö, kuluu 1–5 minuuttia kunnes pumppu on lopettanut kokonaan toimintansa. Sama viive ilmenee käynnistystilanteessa. Tiedonsiirrosta aiheutuva viive on maksimissaan kaksi minuuttia. [154.]

6 Tutkimustulokset

Diplomityön tutkimusosuudessa hyödynnettiin vuoden 2022 keväältä saatuja mittaustuloksia poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeista. Alun perin työssä oli tarkoituksena hyödyntää syksyn aikana suoritettavien ohjauskokeiden mittaustuloksia, mutta uusia kokeita lämpöpumpun ohjauksen osalta ei ole tehty. Kevään aikana suoritettiin neljä ohjauskoetta, joista kolmea ensimmäistä käsitellään tässä työssä. Tutkimukseen haluttiin valita ne käyttötapaukset, joiden olosuhteet (ulkoilman lämpötila) ovat keskenään mahdollisimman samanlaiset. Ohjauskokeet suoritettiin 28.3.2022, 30.3.2022 5.4.2022 ja 19.4.2022. Neljäs ohjauskoe ei ole muiden kanssa vertailukelpoinen, sillä se suoritettiin muita ohjauskokeita myöhemmin, jolloin ulkoilman lämpötila oli jo selkeästi korkeampi. Etenkin keväällä kahden viikon aikana tapahtuva muutos ulko-olosuhteissa saattaa olla hyvinkin suuri auringonpaisteen lisääntymisen ja keskilämpötilan nousun myötä. Tämän seurauksena lämmitystarve vähenee, mikä vaikuttaa kohteen energiankulutukseen.

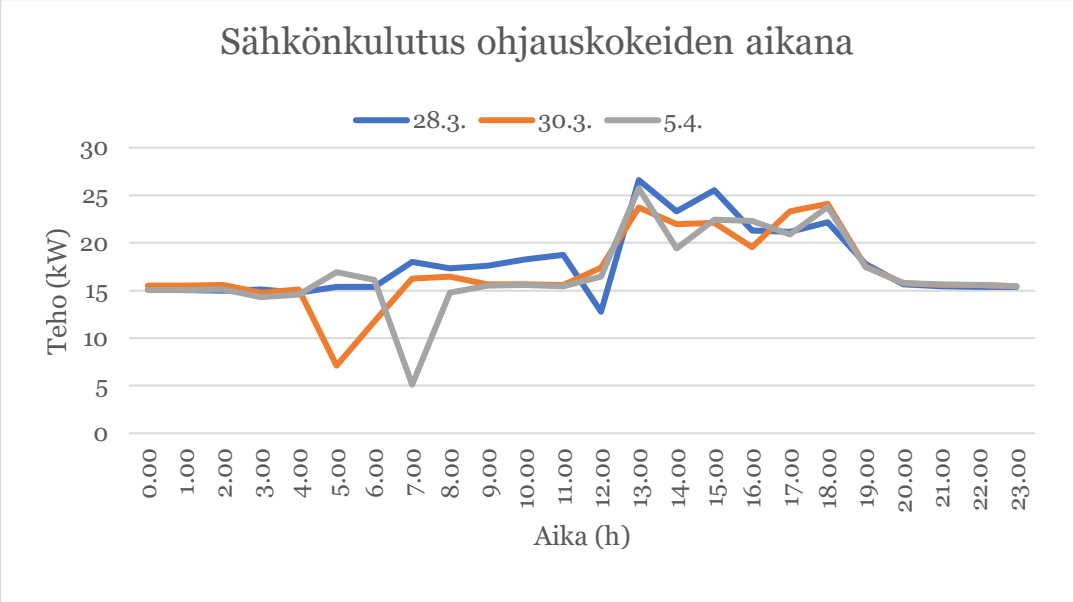
Poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeiden avulla oli tarkoituksena selvittää, kuinka paljon sähköä saadaan säästettyä, kun lämpöpumppu kytketään määräajaksi pois päältä. Syksylle ja talvelle ennakoidaan merkittävää sähkön hinnan nousua, minkä takia on tarpeellista pystyä vähentämään sähkönkulutusta korkean hinnan aikoina. Jokaisessa ohjauskokeessa PILP kytkettiin pois päältä yhden tunnin mittaiseksi ajaksi, ja saatujen mittaustulosten perusteella selvitettiin pilottikohteen sähkönkäytön joustopotentiaalia eri ajankohtina. Ohjaustapahtumia analysoitaessa on hyvä kuitenkin kiinnittää huomiota siihen, että ohjaustapahtumat eivät välttämättä kestä kokonaista tuntia. Kohteen energiankulutustiedot on saatavilla tunneittain, mutta se ei poissulje sitä vaihtoehtoa etteikö ohjauskoe olisi voinut kestää huomattavasti lyhyemmän ajan. Ohjauskokeen tarkkaa kestoa ei pystytä arvioimaan näin harvan mittausvälin perusteella.

Energiankulutustietoja saatiin kahdesta eri tietolähteestä, VTT:n omasta tietokannasta ja Caverionin hyödyntämästä EnerKey-energianhallintajärjestelmästä. Ohjauskokeiden analysointia varten piti valita kumpaa tietolähdettä työssä halutaan käyttää. VTT:n data oli tallennettu UTC-muotoon (UTC±0), mikä kuvastaa paikallista kellonaikaa nollameridiaanilla (Greenwich) ja johon muut aikavyöhykkeet ovat sidoksissa. Tämä tarkoittaa sitä, että Suomen talviaika on kaksi tuntia ja kesäaika kolme tuntia edellä UTC-aikaa, joten Suomen aikavyöhyke on joko UTC+2 tai UTC+3. [156.] Ensimmäiset ohjauskokeet suoritettiin 28.3.2022, jolloin talviaika oli juuri päivää aiemmin vaihtunut kesäajaksi. EnerKey-järjestelmässä mittausdata vastasi suoraan sen hetken Suomen aikaa. Tämän lisäksi havaittiin, että tietolähteistä saadut sähkönkulutustiedot erosivat toisistaan keskimäärin 10 kWh. Tämä voi johtua mittaustietoja keräävien ohjelmien välisestä muutaman minuutin aikaerosta. Lisäksi mittaustulosten analysoinnin aikana huomattiin, että EnerKey:n mittausdatassa sähkönkulutus laskee saman tunnin aikana,

kun ohjauskoe aloitetaan, mutta kaukolämmön kulutuksen kasvu kirjataan vasta seuraavalle alkavalle tunnille. Syy tähän on mahdollisesti se, että sähkönkulutus korvataan ensin lämminvesivaraajassa olevalla lämpöenergialla ja sitten vasta kaukolämmöllä [154].

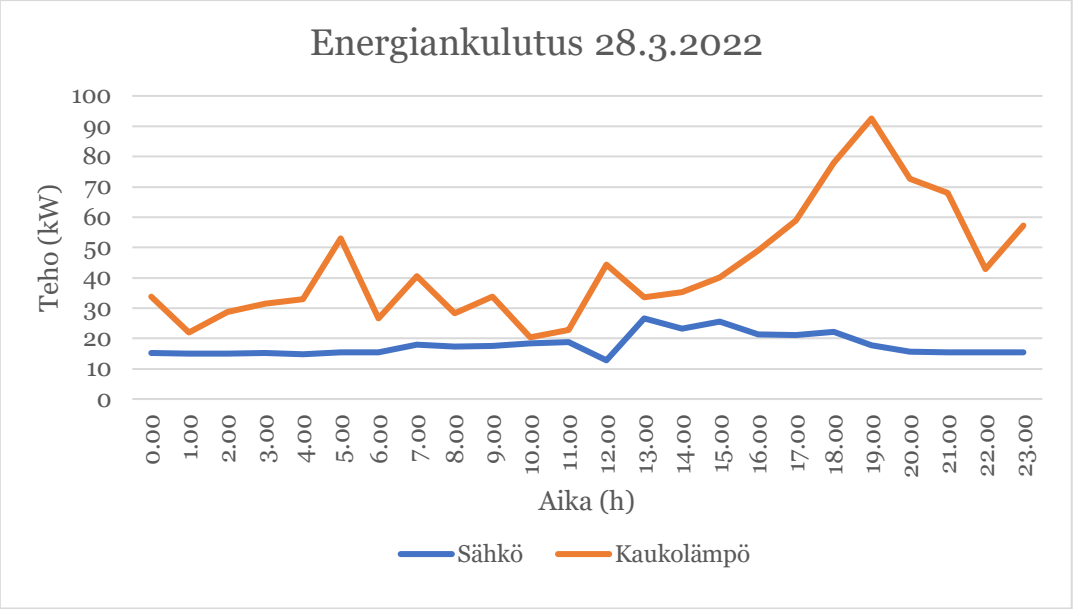
Työssä päätettiin hyödyntää VTT:n tietokannan mittausdataa, minkä johdosta ohjauskokeet näkyvät kuvaajissa kolme tuntia aiemmin Suomen aikavyöhykkeeseen verrattuna. UTC-muodon hyödyntäminen datan tallentamisessa on yleinen käytäntö, koska se ei ole riippuvainen aikavyöhykkeistä. Tiedonhallinta ja -käsittely helpottuu, kun data esitetään universaalissa muodossa. Jatkossa sekaannusten ja epäselvyyksien välttämiseksi on suositeltavaa hyödyntää UTC-tallennusmuotoa.

Kuva 14 havainnollistaa asuinkerrostalon sähkönkulutusta lämpöpumpun ohjauskokeiden aikana. Ohjauskokeet ajoittuvat seuraavasti: 1) 28.3., kello 12–13, 2) 30.3., kello 5–6 ja 3) 5.4., kello 7–8. Ohjauskokeiden ajankohdat ovat helposti havaittavissa myös kuvasta, sillä sähkönkulutuksen lasku erottuu selvästi muusta käyrästä. Lisäksi kuvan perusteella voidaan huomata, että sähkönkulutuksen käyrät ovat keskenään hyvin samankaltaisia. Sähkönkulutus pysyy jokaisessa käyrässä 15 kWh läheisyydessä kello 12 asti ja huippupiikit painottuvat iltapäivään kello 13 ja kello 18 aikoihin.

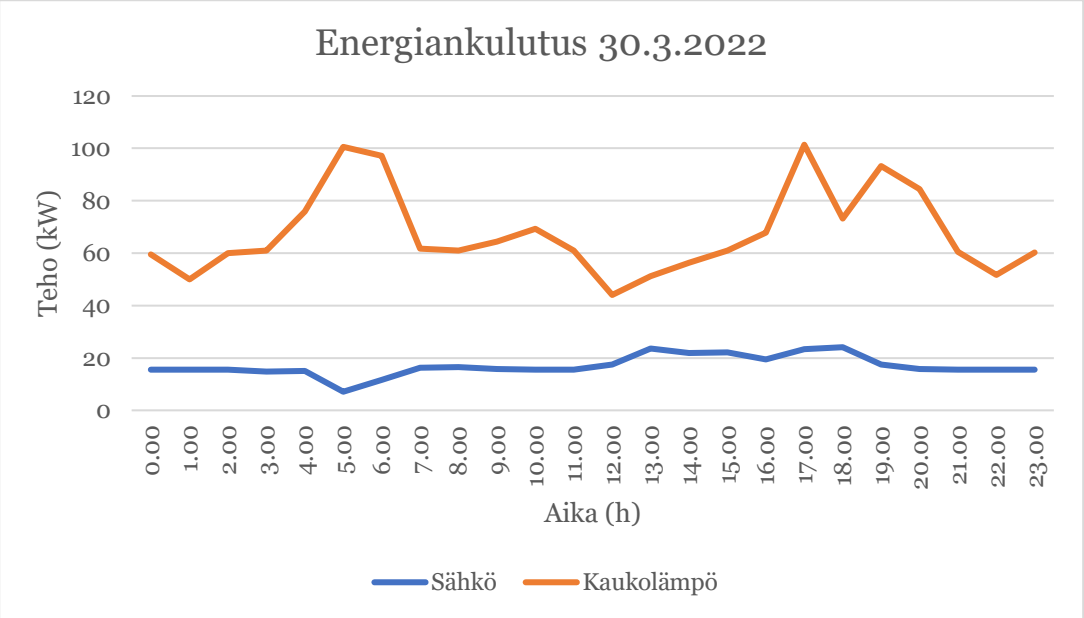


Kuva 14: Asuinkerrostalon sähkönkulutus poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeiden aikana

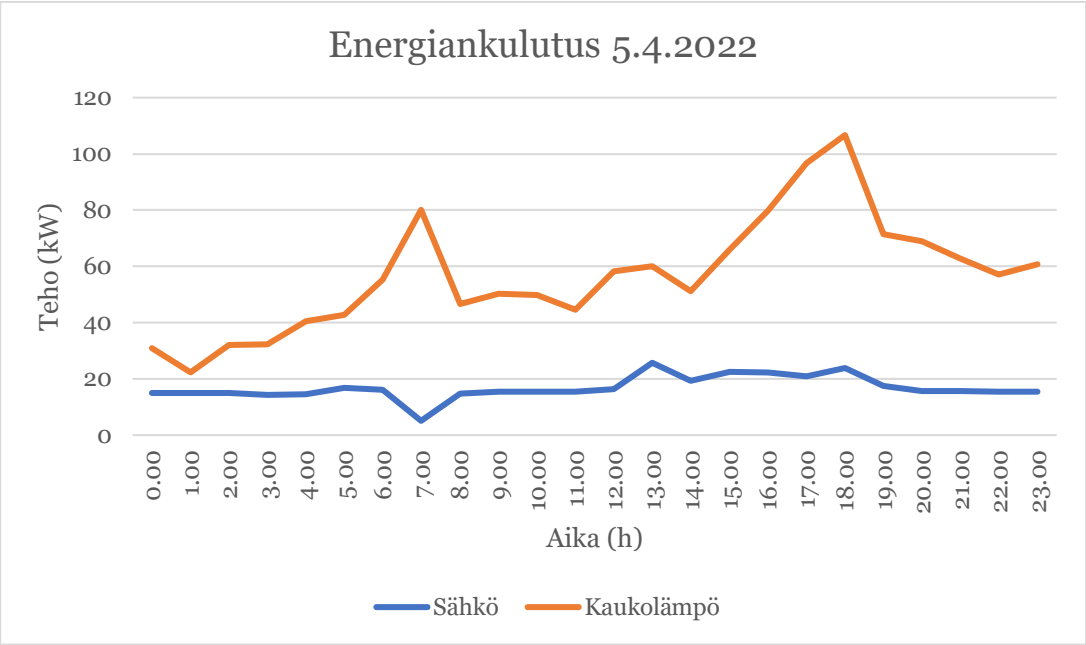
Kuvat 15, 16 ja 17 jäljittelevät asuinkerrostalon sähkön ja kaukolämmön kulutusta ohjauskokeiden aikana. Kuvat havainnollistavat, kuinka sähkönkulutuksen rajoittaminen vaikuttaa kaukolämmön kulutukseen. Kaukolämmön kulutuspiikit painottuvat illalle ja sähkön rajoitustilanteisiin. Tämä on kuitenkin ennakoitavissa, sillä kohteen energiantarve pysyy ohjaustilanteen aikana samana, mutta poistoilmalämpöpumpun sijaan se korvataan kaukolämmöllä. Joustopyynnön loppuessa käyttöpiikkiä energiankulutuksessa ei ole havaittavissa.



Kuva 15: Asuinkerrostalon sähkön ja kaukolämmön kulutus 28.3.2022.



Kuva 16: Asuinkerrostalon sähkön ja kaukolämmön kulutus 30.3.2022.



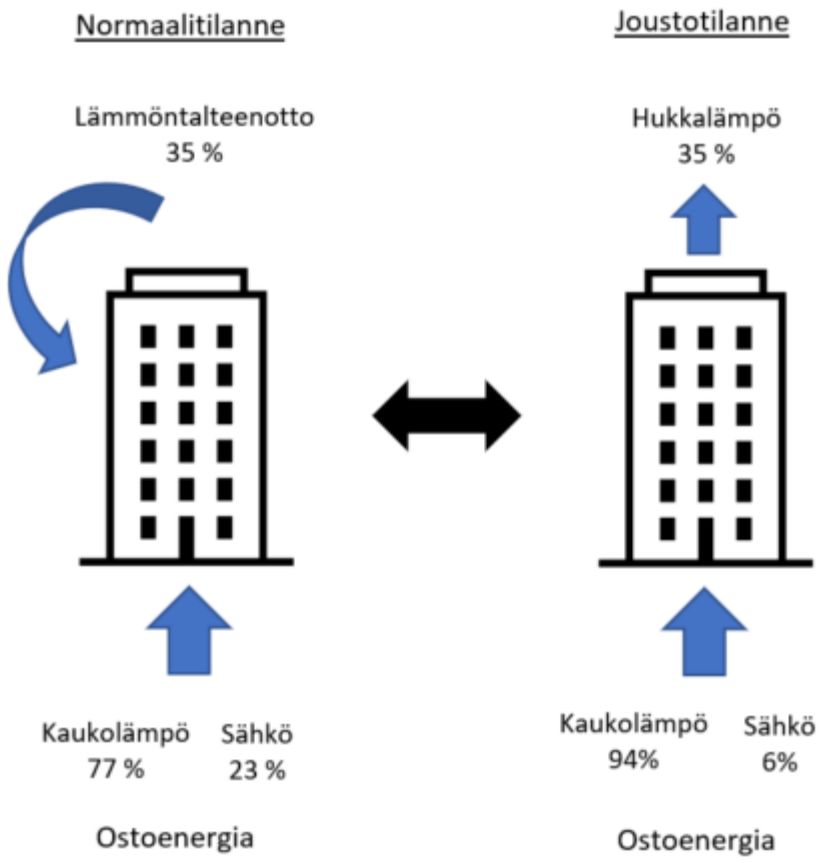
Kuva 17: Asuinkerrostalon sähkön ja kaukolämmön kulutus 5.4.2022.

Taulukossa 3 on esitetty lämpöpumpun ohjauskokeista saatuja arvoja. Taulukossa eritellään sähkö- ja kaukolämpötehojen arvot ohjauskoetta edeltävälle tunnille, ohjauskokeen aikaiselle tunnille ja ohjauskokeen jälkeiselle tunnille. Lisäksi taulukkoon on laskettu ohjauskoetta edeltävän tunnin ja ohjauskokeen aikaisen tunnin erotus sekä sen prosenttiosuus koko sähkönkulutuksesta. Muutos tehossa kuvastaa siis sitä sähkötehon määrää, mikä saadaan säästettyä lämpöpumpun käytön rajoittamisella.

Taulukko 3: Mitattuja ja laskettuja arvoja ohjauskokeista

Mittausarvot	Sähkö [kW] 28.3.	Kaukolämpö [kW] 28.3.	Sähkö [kW] 30.3.	Kaukolämpö [kW] 30.3.	Sähkö [kW] 5.4.	Kaukolämpö [kW] 5.4.
Ohjauskoetta edeltävä tunti	18,72	22,70	15,10	75,94	16,12	55,28
Ohjauskokeen aikainen tunti	12,76	44,26	7,10	100,54	5,10	79,99
Ohjauskokeen jälkeinen tunti	26,60	33,51	11,72	97,13	14,75	46,74
Muutos tehossa	5,96	21,56	8,00	24,6	11,02	24,71
%-osuus	32 %	-	53 %	-	68 %	-

Poistoilmalämpöpumpun ohjauksen vaikutuksia asuinkerrostalon energiankulutukseen analysoitiin yhden ohjauskokeen mittaustulosten pohjalta. Tarkastelun ajankohdaksi valikoitui 5.4.2022, koska kyseisellä ohjauskokeella saatiin sähkötehoa vähennettyä eniten eli 68 prosenttia. Kuvan 18 alareunassa on esitetty prosenttiosuudet ostoenergialle normaali- ja joustotilanteissa. Prosenttiosuuksien laskennassa on hyödynnetty taulukon 3 arvoja. Normaalitilanne ostoenergialle määritettiin hyödyntämällä ohjauskoetta edeltävän tunnin arvoja sekä vastaavasti joustotilanteelle ohjauskokeen aikaisen tunnin arvoja. Lämmöntalteenoton määrä selvitettiin tutkimalla lämpöpumpun ohjauksen vaikutuksia kaukolämmön kulutukseen. Lämpöpumpun käytön rajoittamisella kaukolämmön kulutus kasvoi taulukon 3 mukaisesti 24,71 kW, koska lämpöpumpun tuottama lämpöenergia korvautuu kaukolämmöllä. Tämän perusteella talteen otettavan lämpöenergian määrä oletetaan olevan sama kuin kaukolämmön muutos ohjaustapahtuman aikana. Vastaavasti joustotilanteessa oletetaan, että kyseinen määrä lämpöä menee hukkaan. Ohjaustapahtumalla saatiin kiinteistön sähkönkulutuksen osuus kokonaisenergiasta laskemaan 23 prosentista 6 prosenttiin.



Kuva 18: Kysyntäjouston vaikutus asuinkerrostalon ostoenergian tarpeeseen

7 Johtopäätökset

Diplomityön tavoitteena oli selvittää kiinteistöjen mahdollisuuksia energiaverkkojen tasapainottamisessa sekä kiinteistöjen kysyntäjouston yleistymisen edellytyksiä ja tulevaisuudennäkymiä. Kiinteistöjen kysyntäjouston potentiaalia tutkittiin iFLEX-hankkeen pilottikohteena toimivan asuinkerrostalon avulla. Joustopotentiaalin määrittäminen perustui poistoilmalämpöpumpun ohjauskokeisiin, joissa lämpöpumpun käyttö katkaistiin määräajaksi. Ohjauskokeiden vaikutuksia kohteen energiankulutukseen tutkittiin saatujen mittaustulosten pohjalta.

Tutkimustulosten perusteella asuinkiinteistön sähkönkulutusta saatiin vähennettyä 32–68 prosenttia ohjauskoetta edeltävään tuntiin verrattuna. Määrällisesti se vastasi noin 6–11 kW:n vähennystä sähkötehossa. Lisäksi viimeisen ohjauskokeen aikana kiinteistön sähkönkulutuksen osuus kokonaisenergiasta saatiin laskettua 23 prosentista 6 prosenttiin. Suoritettujen ohjauskokeiden perusteella voidaan todeta, että lämpöpumppua pystytään hyödyntämään joustokomponenttina. Optimaalisinta ajankohtaa lämpöpumpun ohjaukselle ei kuitenkaan voida näiden kokeiden avulla määrittää. Asian selvittämiseksi tarvitaan useampien ohjauskokeiden mittaustuloksia. Vähäisistä ohjauskokeista huolimatta tutkimustuloksissa esitettyjen kuvaajien samankaltaisuus tukee ohjauskokeiden onnistumista ja luotettavuutta. Ohjauskokeet perustuivat sähkönkäytön vähentämiseen, minkä seurauksena kaukolämmön kulutus kasvoi. Tämän perusteella sähkön ja kaukolämmön välinen hintasuhde määrittää sen, kumpaa lämmitysmuotoa on kannattavampaa käyttää. Lämpöpumpun käytön optimoimiseksi on suositeltavaa täyttää lämminvesivaraaja edullisen sähkön aikana ja hyödyntää vastaavasti kalliin ajanjakson aikana.

Pilottikohteeseen jäi hyödyntämätöntä joustopotentiaalia lämpöpumpun jälkeen noin 5 kW. Koska hissit ja kiuas ovat lämpöpumpun ohella suurimmat sähkökuormat, voidaan niiden avulla maksimoida pilottikohteen joustopotentiaali. On löydettävä ratkaisu, jonka avulla kuormat saadaan mahdollisimman helposti liitettyä joustoon. Lämpöpumppu on pääsääntöisesti koko ajan käytössä, mikä tarkoittaa, että sen avulla pystytään joustamaan sähkönkulutuksessa lähes milloin tahansa. Kiukaan käyttö on säännöllistä, mutta painottuu tiettyihin ajankohtiin, ja hissien käyttö on yleisesti hyvin satunnaista. Tämän perusteella hissien ja kiukaan tuomaa joustopotentiaalia voidaan hyödyntää ainakin kahdella tavalla. Hissit ja sauna voitaisiin jouston ajaksi poistaa kokonaan käytöstä. Tämä kuitenkin vaikuttaisi negatiivisesti loppukäyttäjiin ja vähentäisi kysyntäjouston mielekkyyttä. Toinen vaihtoehto olisi kiinteistön sisäisen kompensaation hyödyntäminen, mikä tarkoittaa, että kahta suurta kuormaa ei pidetä joustotilanteessa samanaikaisesti päällä. Käytännössä se voitaisiin toteuttaa niin, että joustotilanteessa rakennuksen automaatiojärjestelmä sammuttaa kiukaan silloin, kun hissejä käytetään. Hissien käyttö on sen verran lyhytaikaista, ettei hetkellinen kiukaan

sammutus ehdi vaikuttaa saunan lämpötilaan. Sisäisen kompensaation toteuttaminen edellyttää laiteasennuksia ja muutoksia automaatiojärjestelmään. Täten jatkotutkimusten tulisi keskittyä hissien ja kiukaan joustopotentiaalin varmistamiseen ja käyttöönottoon. Lisäksi kohteen ilmanvaihdon joustopotentiaalia ja sen hyödyntämistä kysyntäjoustomarkkinoilla tulee tutkia tarkemmin. Pilottikohteessa on sähköverkon taajuutta mittaava verkkoanalysaattori, jota voitaisiin myös hyödyntää kysyntäjouston toteuttamisessa.

Hyödyntämällä kiinteistön kaikki automaatio-ohjattavat sähkökuormat ja yhdistämällä ne useiden eri kiinteistöjen sähkökuormien kanssa, voidaan osallistua kysyntäjoustomarkkinoille ja siten tasapainottaa sähköverkkoa. Sopivin markkinapaikka pilottikohteena toimivalle kiinteistölle on FCR-N-reservimarkkina, jossa minimitarjouskoko on 100 kW. Kyseisellä markkinalla kuorma on aktivoitava täyteen tehoon kolmessa minuutissa ja sitä on pystyttävä säätämään alas- ja ylöspäin. Tällä hetkellä lämpöpumpun käytössä ilmenee 1–5 minuutin viive ylös- ja alasajon yhteydessä sekä tiedonsiirrosta aiheutuva kahden minuutin viive. Lämpöpumpun ohjauksen kokonaisviivettä pystytään tarvittaessa pienentämään, mutta ei niin paljon, että voitaisiin osallistua FCR-D-markkinalle, jossa aktivoinnin tulee tapahtua sekunneissa. Lämpöpumpun ohjauskokeilla saatiin pilottikohteen sähköteho hetkellisesti laskemaan 11 kW, mikä tarkoittaa, että samansuuruisen joustopotentiaalin omaavia kiinteistöjä tarvitaan vähintään 10 kappaletta markkinoille osallistumiseksi. Tämän perusteella asuinkiinteistöjen kysyntäjouston toteuttamiseksi ja markkinoille pääsemiseksi tarvitaan mukaan toimijoita, joilla on hallussaan suuri määrä samantyyppisiä kiinteistöjä. Tällaisia ovat esimerkiksi vuokra-asuntoja tarjoavat asuntosijoitusyhtiöt tai opiskelija-asuntosäätiöt.

Kysyntäjouston yleistymisen edellytyksiä pohdittaessa keskeiseen asemaan nousevat ilmastonmuutoksen vaikutusten minimoimiseksi asetetut ilmastotavoitteet. Koska energiasektori on vastuussa suuresta osasta kasvihuonekaasupäästöjä, tarvitaan muutoksia energiantuotanto- ja kulutustapoihin. Uusiutuvan energian lisääntyminen ja yhteiskunnan sähköistyminen aiheuttavat haasteita sähköverkon hallinnassa, mikä luo tarpeen kysyntäjoustolle. Kysyntäjouston toteuttaminen edellyttää älykästä energiajärjestelmää ja älykkäitä ratkaisuja. Jotta kysyntäjouston laaja-alainen käyttöönotto olisi mahdollista, tarvitaan lainsäädännöllistä ohjausta. EU:n toimesta useita direktiivejä on viimeisen vuosikymmenen aikana päivitetty vastaamaan ilmastotavoitteita. Direktiivejä ei ole kuitenkaan koordinoitu kysyntäjouston näkökulmasta, mikä hidastaa kysyntäjouston kehitystä. Direktiivejä tulisi muuttaa niin, että ne keskittyvät kysyntäjouston esteiden poistamisen sijaan tavoitteiden ja velvoitteiden asettamiseen. Lainsäädännön kehittämisen ohella sähkön kysyntäjouston edistämiseksi tulee keskittyä erityisesti sidosryhmien informointiin, kysyntäjouston tuotteistamiseen sekä prosessien ja järjestelmien yhtenäistämiseen. Kaukolämmön kysyntäjouston edistämisen

suurin haaste on tutkimusten vähyys, ja siksi lisätutkimuksia tarvitaan erityisesti käytännön esimerkkien ja mallinnusten osalta. Koska kaukolämmön kysyntäjoustolle ei ole vielä markkinoita, toimenpiteitä tarvitaan myös niiden kehittämiseksi.

Energiakriisi on osoittanut nykyisen energiajärjestelmän ja -markkinoiden heikkoudet. EU on vahvasti riippuvainen alueen ulkopuolelta tulevasta energiasta. Tästä johtuen jäsenmaat ovat alttiita energian toimitushäiriöille ja hinnan vaihteluille. Haasteet sähköntuotannossa ja kaasun korkeat hinnat ovat johtaneet siihen, että talvelle odotetaan korkeita sähkön hintoja. Pahimmassa tapauksessa sähköntuotanto ja -tuonti eivät riitä kattamaan sähkönkulutusta, jolloin uhkaa sähköpula. Koska kysyntäjouston toteutus ei ole vielä tarpeeksi kehittynyttä ja laajalle levinnyttä, jää kuluttajan omalle vastuulle huolehtia energiankulutuksensa vähentämisestä ja ajoittamisesta sopivampaan ajankohtaan. Kysyntäjoustoa tarvitaan, jotta vastaavanlaisilta tilanteilta voitaisiin välttyä tai niiden vaikutuksia saataisiin lievennettyä.

Lähteet

[1] Bremer, O. & Frilander, O. & Kaskinen, T. & Malho, M. Kysyntäjousto kuluttajan näkökulmasta. [Verkkoaineisto]. 2017. S. 37. [Viitattu 6.7.2022]. ISBN 978-952-5844-26-9. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/3481825/Kysynta%CC%88jousto+kuluttajan+na%CC%88ko%CC%88kulmasta.pdf.

[2] European Environment Agency. Energy and climate change. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.5.2022]. Saatavissa: https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2017/articles/energy-and-climate-change.

[3] Müller, T. & Möst, D. Demand response potential: Available when Needed?. Energy Policy. 2018, vol 115. S. 181–198. ISSN 0301-4215. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.025.

[4] Smart Energy Transition. Policy Brief: Rakennusten kysyntäjousto ja energiatehokkuus luovat perustan puhtaalle energiajärjestelmälle. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.7.2022.] Saatavissa: http://smartenergytransition.fi/fi/rakennusten_kysyntajousto_ja_energiatehokkuus/.

[5] Motiva. Rakentaminen ja rakennukset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.7.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset.

[6] Ratkaisuja tieteestä. Energianmurros johtaa monipuoliseen ja joustavaan energiajärjestelmään. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.7.2022]. Saatavissa: https://ratkaisujatieteesta.fi/ymparistonmuutos-ja-luonnonvarat/energiamurros-johtaa-monipuoliseen-ja-joustavaan-energiajarjestelmaan/.

[7] iFLEX. About the iFLEX project. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.7.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/about/.

[8] iFLEX. Engaging Energy Consumers in Flexible Energy Consumption. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.7.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/.

[9] iFLEX. D7.2 Revised Pilot Specifications. [Verkkoaineisto]. 2022. S. 26. [Viitattu 14.7.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/download/d7-2-revised-pilot-specifications/.

[10] Reilua Energiaa. Energiamurros luo Suomelle mahdollisuuksia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.5.2022]. Saatavissa: https://reiluaenergiaa.fi/energiamarkkinat/energiamurros-luo-suomelle-mahdollisuuksia/.

[11] Tilastokeskus. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.5.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_kat_001_fi.html.

[12] Ajankohtaista Europan parlamentti. Miten EU takaa turvallista, vihreää energiaa kaikille. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20210930STO13911/miten-eu-takaa-turvallista-vihreaa-energiaa-kaikille.

[13] Energiateollisuus. Sähkön ja lämmön tuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/tyoelama/toimialat/sahkon_ja_lammon_tuotanto.

[14] Tilastokeskus. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/meta/kas/sahko_lampo_tuo.html.

[15] Fortum. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto – tehokkaampaa sähköntuotantoa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/sahkon-ja-lammon-yhteistuotanto-tehokkaampaa-sahkontuotantoa?vtab=accordion-item-25681.

[16] Energiamaailma. Yhteistuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.8.2022]. Saatavissa: https://energiamaailma.fi/energiasta/energiantuotanto/yhteistuotanto/.

[17] Tilastokeskus. Yli puolet Suomen sähköstä tuotettiin uusiutuvilla energialähteillä vuonna 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html.

[18] Motiva. Energian loppukäyttö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto.

[19] Tilastokeskus. Energian loppukulutus sektoreittain, 1970-2021. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 29.11.2022]. Saatavissa: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12vk.px/table/tableViewLayout1/.

[20] Tilastokeskus. Asumisen energiankulutus 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.11.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/asen/2020/asen_2020_2021-12-16_tie_001_fi.html.

[21] Fingrid. Johdanto sähkömarkkinoihin. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sähkomarkkinoihin/.

[22] Energiateollisuus ry & Fingrid Oyj. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. [Verkkoaineisto]. 2013. S. 22 [Viitattu 3.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi_versio_sahkomarkk.pdf.

[23] Työ- ja elinkeinoministeriö. Sähkömarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.5.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/sahkomarkkinat.

[24] Energiateollisuus. Hajautettua sähkön pientuotantoa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.8.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_pientuotanto.

[25] Energiavirasto. Hinnoittelun valvonta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavissa: https://energiavirasto.fi/hinnoittelun-valvonta.

[26] Fingrid. Esittely. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/.

[27] Energiateollisuus. Sähköverkkoyhtiöt. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot/sahkoverkkoyhtiot.

[28] Smart Energy Transition. Miten sähkömarkkinat toimivat?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.5.2022]. Saatavissa: http://smartenergytransition.fi/fi/miten-sahkomarkkinat-toimivat/.

[29] Smart Energy Transition. Tuulivoima ja kysyntäjousto aiheuttavat murroksen sähkömarkkinoilla – miksi ja miten?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.8.2022]. Saatavissa: http://smartenergytransition.fi/fi/tuulivoima-ja-kysyntajousto-aiheuttavat-murroksen-sahkomarkkinoilla-miksi-ja-miten/.

[30] Jabłońska, M. & Viljainen, S. & Partanen, J. & Kauranne, T. The impact of emissions trading on electricity spot market price behavior. International Journal of Energy Sector Management. 2012, vol 6(3). S. 343–364. ISSN: 1750-6220. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.1108/17506221211259664.

[31] Nord Pool. Price calculation. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/.

[32] Fingrid. Reservimarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivelvoitteet-ja-hankintakanavat.

[33] Fingrid. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/.

[34] Fingrid. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissahttps://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/.

[35] Fingrid. Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.10.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/.

[36] Fingrid. Ylös- ja alassäädön hinta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/ylos--ja-alassaadon-hinta/.

[37] Fingrid. Yhteisellä tiellä kohti tulevaisuuden sähköjärjestelmää. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/sahkomarkkinoiden_tulevaisuus.pdf.

[38] Fingrid. Kysyntäjousto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/pilottihankkeita/kysyntajousto/.

[39] Energiavirasto. Sähkön vähittäismarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.8.2022]. Saatavissa: https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat.

[40] Energiateollisuus. Sähkön hinta koostuu kolmesta osasta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_hinta.

[41] Energiateollisuus. Sähkön hinta pähkinänkuoressa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.8.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/624/Sahkon_hinta_-esite.pdf.

[42] Oomi. Sähkönsiirtoa ja sähköenergiaa – mistä sähkön hinta muodostuu?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.11.2022]. Saatavissa: https://oomi.fi/sahko/sahkon-hinnan-muodostuminen/.

[43] Lumme Energia. Minkälainen sähkösopimus kannattaa tehdä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.8.2022]. Saatavissa: https://www.lummeenergia.fi/blogi/minkalainen-sahkosopimus-kannattaa-tehda/#d78d6e42.

[44] Vaasan sähkö. Mittausvalinta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.8.2022]. Saatavissa: https://www.vaasansahko.fi/sahkosopimus/mittaustavan-valinta/.

[45] PKS. Mitä on pörssisähkö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.8.2022]. Saatavissa: https://www.pks.fi/sahkotarjoukset/kotiin/mita-on-porssisahko/.

[46] Energiamaailma. Kaukolämpö ja -jäähdytys. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: https://energiamaailma.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolampo-ja-jaahdytys/.

[47] Energiateollisuus. Kaukolämpö 2021. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.11.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampo_2021_v2.pdf.

[48] Energiateollisuus & VALOR Partners Oy. Kaukolämmön kysyntäjousto. [Verkkoaineisto]. 2015. S. 32. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/439/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf.

[49] Energiateollisuus. Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot.

[50] Työ- ja elinkeinoministeriö. Lämpömarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/lampomarkkinat.

[51] Energiateollisuus. Kaukolämpöalalta iso ilmastoteko – uusi kaukolämpöjärjestelmä perustuu matalampiin lämpötilatasoihin. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/vahahiilisyyden_tiekartta/puhdistuva_energia/puhdistuva_kaukolampo/kaukolammon_murros.

[52] Työ- ja elinkeinoministeriö. Selvitykset, lämpömarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/selvitykset-lampomarkkinat.

[53] Kilpailu- ja kuluttajavirasto. Määräävä markkina-asema ja sen väärinkäyttö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: https://www.kkv.fi/kilpailuasiat/maaraavan-markkina-aseman-vaarinkaytto/.

[54] Krogerus. Kaukolämpöyhtiöiden lämmön ostaminen ja määräävän markkina-aseman asettamat kilpailuoikeudelliset reunaehdot. [Verkkoaineisto]. 2018. S. 32. [Viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/3593/Selvitys_lammon_ostamisesta.PDF.

[55] Motiva. Kaukolämmön hinta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa:

https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo/kaukolammon_hinta.

[56] Fortum. Kaukolämmön hinnat taloyhtiöille ja yrityksille. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.5.2022]. Saatavissa: https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/kaukolammon-hinnat.

[57] Helen. Helenin lämpöasiakkaiden sopimusvesivirrat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/nykyisille-asiakkaille/helenin-lampoasiakkaiden-sopimusvesivirrat.

[58] TEPA-termipankki. Mitoitusulkolämpötila. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.7.2022]. Saatavissa: https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/mitoitusulkol%C3%A4mp%C3%B6tila.

[59] Helen. Kaukolämmön hinnoittelu. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.8.2022]. Saatavissa: https://www.helen.fi/taloyhtiot/lammitys/kaukolampo-taloyhtiossa/kaukolammon-hinnoittelu.

[60] Lashmar, N. & Wade, B. & Molyneaux, L. & Ashworth, P. Motivations, barriers, and enablers for demand response programs: A commercial and industrial consumer perspective. Energy Research & Social Science. 2022, 102667. Vol 90. S. 1–10. ISSN 2214-6296. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102667.

[61] Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Tuulivoiman yleisopas. [Verkkoaineisto]. S. 19. [Viitattu 31.10.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/19414/Tuulivoiman_yleisopas.pdf.

[62] Motiva. Tuulivoima Suomessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.8.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa.

[63] Suomen Tuulivoimayhdistys. Usein kysytyt kysymykset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.10.2022]. Saatavissa: https://tuulivoimayhdistys.fi/ukk/sahkomarkkinat.

[64] Fingrid. Tuulivoimantuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.10.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/tuulivoimantuotanto/.

[65] Huuki, H. & Räihä, J. & Kukkonen, M. & Kopsakangas-Savolainen, M. Kohti tulevaisuuden sähkömarkkinoita – katsaus Suomen sähköjärjestelmän nykytilaan ja uusiin jouston lähteisiin. ARVOVESI-hankkeen raportti. Oulun yliopiston kauppakorkeakoulu,

taloustieteen, laskentatoimen ja rahoituksen yksikkö, 2021. ISBN 978-952-11- 3184-6. [Viitattu 16.8.2022]. Saatavissa: https://oulujokivisio.com/wp-content/uploads/2021/12/ARVOVESI_1_2021-Kohti-tulevaisuuden-sahkomarkkinoita.pdf.

[66] Balance consulting & Valor. Suomen energiatoimiala 2018. [Verkkoaineisto]. 2018. S. 11. [Viitattu 16.8.2022]. Saatavissa: https://static.almamedia.fi/docs/librariesprovider3/malliraportit/stk-malliraportit/malli_energiatoimiala.pdf?sfvrsn=79b31bed_4.

[67] Sitra. Uusi selvitys: Suomen ilmastotavoitteiden saavuttaminen vaatii tuntuvasti lisää puhdasta sähköä, pääosa tarpeesta halvinta kattaa tuulivoimalla. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 29.11.2022]. Saatavissa: https://www.sitra.fi/uutiset/uusi-selvitys-suomen-ilmastotavoitteiden-saavuttaminen-vaatii-tuntuvasti-lisaa-puhdasta-sahkoa-paaosa-tarpeesta-halvinta-kattaa-tuulivoimalla/.

[68] Autelo, A. Sähkömarkkinoiden muutoksessa kannattaa olla voittajien puolella. Granlund. 2022. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.9.2022]. Saatavissa: https://www.granlund.fi/blogi/sahkomarkkinoiden-muutoksessa-kannattaa-olla-voittajien-puolella/.

[69] Työ- ja elinkeinoministeriö. Sektori-integraatiotyöryhmän väliraportti 29.1.2021. [Verkkoaineisto]. 2021. S. 64. [Viitattu 6.9.2022]. Saatavissa: https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?attachmentId=15116.

[70] Brink, P. Sektori-integraatio auttaa tehotasapainon hallinnassa. Fingridlehti.fi. 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingridlehti.fi/sektori-integraatio/.

[71] STEK. Älykäs sähköverkko. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 31.10.2022]. Saatavissa: https://stek.fi/alykas-sahkon-kaytto/alykas-sahkoverkko/.

[72] Lamnatou, C. & Chemisana, D. & Cristofari, C. Smart grids and smart technologies in relation to photovoltaics, storage systems, buildings and the environment. Renewable Energy. 2022, vol 185. S. 1376–1391. ISSN 0960-1481. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.019.

[73] European Commission. Smart grids and meters. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.9.2022]. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en.

[74] Energiateollisuus. Tuntimittausta ja etäluentaa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.8.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_mittaus.

[75] Järventausta, P. & Repo, S. & Trygg, P. et al. Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Tampere, 2015. S. 362. ISBN 978-952-15-3485-0. [Viitattu 20.7.2022]. Saatavissa: http://URN.fi/URN:ISBN:978-952-15-3485-0.

[76] Viikari, M. & Mäkelä, K. Varttiin siirrytään vaiheittain toukokuusta 2023 alkaen. Fingridlehti.fi. 2022. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://www.fingridlehti.fi/varttiin-siirrytaan-vaiheittain-toukokuusta-2023-alkaen/.

[77] VTT. Säätövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinalle. [Verkkoaineisto]. 2018. S. 8. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/whitepapers/VTTWhitePaper2018-Saatovoimaa_tulevaisuuden_sahkomarkkinalle.pdf.

[78] Tahir, M. F. & Haoyong, C. & Idris, I. I. & Larik, N. A. & ullah Adnan, S. Demand response programs significance, challenges and worldwide scope in maintaining power system stability. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2018, vol 9(6). S. 121–131. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090618.

[79] Farrokhifar, M. & Bahmani, H. & Faridpak, B. & Safari, A. & Pozo, D. & Aiello, M. Model predictive control for demand side management in buildings: A survey. Sustainable Cities and Society. 2021, 103381. Vol 75. S. 1–15. ISSN 2210-6707. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103381.

[80] Kanakadhurga, D. & Prabaharan, N. Demand side management in microgrid: A critical review of key issues and recent trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022, 111915. Vol 156. S. 1–36. ISSN 1364-0321. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111915.

[81] Lampropoulos, I. & Kling, W. L. & Ribeiro, P. F. & & van den Berg, J. History of demand side management and classification of demand response control schemes. IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2013, S. 1–5. ISSN: 1932-5517. Saatavissa: doi: 10.1109/PESMG.2013.6672715.

[82] Jabir, H. J. & Teh, J. & Ishak, D. & Abunima, H. Impacts of demand-side management on electrical power systems: A review. Energies.

2018, 1050. Vol 11(5). S. 1–19. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/en11051050.

[83] Lamprinos, I. & Hatziargyriou, N. D. & Kokos, I. & Dimeas, A. D. Making demand response a reality in Europe: policy, regulations, and deployment status. IEEE Communications Magazine. 2016, vol 54 (12). S. 108–113. ISSN: 1558-1896. Saatavissa: doi: 10.1109/MCOM.2016.1600323CM.

[84] Albadi, M. H. & El-Saadany, E. F. A summary of demand response in electricity markets. Electric Power Systems Research. 2008, vol *78*(11). S. 1989–1996. ISSN 0378-7796. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002.

[85] Smart Energy Demand Coalition. Demand Response: Clarification of the standard processes required between BRPs and independent aggregators. [Verkkoaineisto]. 2015. S. 8. [Viitattu 18.7.2022]. Saatavissa: https://www.smarten.eu/wp-content/uploads/2015/07/SEDC-Standard-processes-required-between-BRPs-and-independent-aggregators1.pdf.

[86] Smart Energy Demand Coalition. Explicit and Implicit Demand-Side Flexibility - Complementary Approaches for an Efficient Energy System. [Verkkoaineisto]. 2016. S. 4. [Viitattu 18.7.2022]. Saatavissa: https://www.smarten.eu/wp-content/uploads/2016/09/SEDC-Position-paper-Explicit-and-Implicit-DR-September-2016.pdf.

[87] Younan, C. N. & Swief, R. A. & Abdelaziz, A. Y. A Combined Technique for Price Prediction and Critical Peak Decision. International Middle- East Power Systems Conference. Ain Shams University, Cairo, Egypt. 23.–25.12.2014. S.1–6. Saatavissa: https://www.researchgate.net/profile/Almoataz-Abdelaziz/publication/278963708_A_Combined_Technique_for_Price_Prediction_and_Critical_Peak_Decision/links/5588171c08aed23e568bcd03/A-Combined-Technique-for-Price-Prediction-and-Critical-Peak-Decision.pdf.

[88] Energiaviisaat kaupungit. Näin teet kiinteistöstäsi virtuaalivoimalaitoksen. [Verkkoaineisto]. 2020. S. 16. [Viitattu 15.5.2022]. Saatavissa: https://energiaviisaat.fi/wp-content/uploads/2020/11/Energiaviisaat-Virtuaalivoimalaitos-opas2020.pdf.

[89] Entsoe. Overview of Frequency Control in the Nordic Power System. [Verkkoaineisto]. 2022. S. 20. [Viitattu 23.11.2022]. Saatavissa: https://www.epressi.com/media/userfiles/107305/1648196866/overview-of-frequency-control-in-the-nordic-power-system-1.pdf.

[90] Rakennusteollisuus. Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.5.2022]. Saatavissa:

https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Materiaalitehokkuus/.

[91] Smart Energy Transition 2030. Muutospolku 3: kaukolämmön kysyntäjousto. [Verkkoaineisto]. 2017. S. 19. [Viitattu 20.5.2022]. Saatavissa: http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-polku3-kaukolammon-kysyntajousto.pdf.

[92] Honkapuro, S. & Tuunanen, J. & Valtonen, P. et al. Practical implementation of demand response in Finland. International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED, 2015. S. 1–5. ISSN: 2032-9644. Saatavissa: http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015_0928_final.pdf.

[93] Eurooppa-neuvosto. Ilmastonmuutos: mitä EU tekee?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.5.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/.

[94] Eurooppa-neuvosto. Pariisin ilmastosopimus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/paris-agreement/.

[95] Ympäristöministeriö. Pariisin ilmastosopimus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus.

[96] Euroopan komissio. Energia ja vihreän kehityksen ohjelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.5.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_fi.

[97] Eurooppa-neuvosto. Puhdas energia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.5.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/clean-energy/.

[98] Eurooppa-neuvosto. Energiaunioni. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/energy-union/.

[99] Eurooppatiedotus.fi. Mikä energiaunioni?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://eurooppatiedotus.fi/2015/04/08/mika-energiaunioni/.

[100] Eurooppa-neuvosto. Infografiikka – Kuinka riippuvaisia EU:n jäsenmaat ovat energian tuonnista?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.12.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/.

[101] DRIvE. D2.2 Current regulatory framework regarding Demand Response. [Verkkoaineisto]. 2018. S. 47. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/download-Public?documentIds=080166e5bb634fb7&appId=PPGMS.

[102] European Commission. Clean energy for all Europeans package. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en.

[103] Euroopan komissio. Euroopan komission painopisteet 2019–2024. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://finland.representation.ec.europa.eu/strategia-ja-painopisteet/euroopan-komission-painopisteet-2019-2024_fi.

[104] Euroopan komissio. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma - Euroopasta ensimmäinen ilmastoneutraali maanosa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fi.

[105] Eurooppa-neuvosto. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma - EU:n tavoitteena ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/.

[106] Eurooppa-neuvosto. 55-valmiuspaketti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/.

[107] Työ- ja elinkeinoministeriö. Hiilineutraali Suomi 2035 - kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia. 2022:53. S. 214. ISSN: 1797-3562. [Viitattu 26.11.2022]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321.

[108] Ympäristöministeriö. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka.

[109] Ajankohtaista Euroopan parlamentti. Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/priorities/ilmastonmuutos/20180305STO99003/hiilidioksidipaastoja-vahentamassa-eu-n-tavoitteet-ja-toimet.

[110] Työ- ja elinkeinoministeriö. Päästökauppa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.5.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/paastokauppa.

[111] Ajankohtaista Euroopan parlamentti. EU:n päästöjärjestelmä ja sen uudistaminen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20170213STO62208/eu-n-paastokauppajarjestelma.

[112] Työ- ja elinkeinoministeriö. Kauden 2021-2030 ilmaisjako. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/kauden-2021-2030-ilmaisjako.

[113] Työ- ja elinkeinoministeriö. Kansallinen energia- ja ilmastosuunnitelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://tem.fi/eulle-toimitettavat-suunnitelmat-ja-raportit.

[114] Ministry of Economic Affairs and Employment. Finland's Integrated Energy and Climate Plan. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment. Energy. 2019:66. S. 183. ISBN: 978-952-327-478-5. [Viitattu 5.5.2022]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161977.

[115] Euroopan unioni. Asetukset, direktiivit ja muut säädökset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.10.2022]. Saatavissa: https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_fi.

[116] Motiva. Direktiivit. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 31.10.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit.

[117] Annala, S. & Lukkarinen, J. & Primmer, E. & Honkapuro, S. et al. Regulation as an enabler of demand response in electricity markets and power systems. Journal of Cleaner Production. 2018, vol 195. S. 1139–1148. ISSN 0959-6526. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.276.

[118] Eurooppa-neuvosto. EU:n sähkömarkkinasäännöt valmiiksi energiakäännettä varten: puheenjohtajamaa ja parlamentti alustavaan sopimukseen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.10.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2018/12/19/europe-s-electricity-market-rules-get-ready-for-the-energy-transition-provisional-agreement-between-presidency-and-parliament/.

[119] Ala-Kotila, P. & Vainio, T. & Heinonen, J. Demand Response in District Heating Market—Results of the Field Tests in Student Apartment Buildings. Smart Cities. 2020, vol 3(2). S. 157–171. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/smartcities3020009.

[120] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin

olevan energian käytön edistämisestä (uudelleenlaadittu). [Verkkoaineisto]. L 328/82. 2018. S. 128. [Viitattu 31.10.2022]. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN.

[121] European Commission. Research and innovation for the European Green Deal. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.5.2022]. Saatavissa: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/environment-and-climate/european-green-deal_en.

[122] Euroopan komissio. Horisontti Eurooppa -puiteohjelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/horizon-europe_fi.

[123] EU-rahoitusneuvonta. Horisontti Eurooppa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: https://www.eurahoitusneuvonta.fi/ohjelmat/horisontti-eurooppa.

[124] Business Finland. Tutustu ohjelmaan. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/horisontti-eurooppa/tietoa-ohjelmasta.

[125] Business Finland. Pilari 1 - Huipputason tiede. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.11.2022]. Saatavissa:https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/horisontti-eurooppa/tietoa-ohjelmasta/huipputason-tiede.

[126] Business Finland. Pilari 2 – Globaalit haasteet ja Euroopan teollisuuden kilpailukyky. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.11.2022]. Saatavissa: https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/horisontti-eurooppa/tietoa-ohjelmasta/globaalit-haasteet.

[127] Business Finland. Pilari 3 - Innovatiivinen Eurooppa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.11.2022]. Saatavissa: https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/horisontti-eurooppa/tietoa-ohjelmasta/innovatiivinen-eurooppa.

[128] European Comission. Cluster 5: Climate, Energy and Mobility. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.11.2022]. Saatavissa: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/cluster-5-climate-energy-and-mobility_en.

[129] Business Finland. Klusteri 5 – Ilmasto, energia ja liikkuvuus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa:

https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/horisontti-eurooppa/tietoa-ohjelmasta/globaalit-haasteet/ilmasto-energia-ja-liikenne.

[130] Horizon Europe. Work Programme 2023-2024 – Climate, Energy and Mobility. Version 28.1.2022. [Verkkoaineisto]. 2022. S. 408. [Viitattu 3.10.2022]. Saatavissa: https://sciencebusiness.net/sites/default/files/inline-files/Cluster%205%20WP%202023-2024_1st%20draft_2022-01-28_PC.pdf

[131] HOLISDER. Integrating Real-Intelligence in Energy Management Systems enabling Holistic Demand Response Optimization in Buildings and Districts. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.7.2022]. Saatavissa: http://holisder.eu/.

[132] HOLISDER. Project. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: http://holisder.eu/project/.

[133] European Commission. Integrating Real-Intelligence in Energy Management Systems enabling Holistic Demand Response Optimization in Buildings and Districts. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: https://cordis.europa.eu/project/id/768614.

[134] European Commission. Demand response in energy-efficient residential buildings. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.10.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl5-2022-d4-01-01.

[135] Innovation Place. DRAFT-HORIZON-CL5-2024-D3-01-12: ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS FOR FLEXIBILITY SERVICES. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.11.2022]. Saatavissa: https://www.innovationplace.eu/fund/draft-horizon-cl5-2024-d3-01-12-energy-management-systems-for-flexibility-services/7328.

[136] Energiaviisaat kaupungit. Sähkön kysyntäjouston manuaalinen pilotointi Helsingissä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2022]. Saatavissa: https://energiaviisaat.fi/virtuaalivoimalaitos-hki-1/.

[137] Siemens. Virtuaalivoimalaitos – kiinteistöt hyötymään sähkömarkkinoista. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.12.2022]. Saatavissa: https://www.siemens.com/fi/fi/yhtio/ajankohtaiset-teemat/alykas-infrastruktuuri/kiinteistoejen-virtuaalivoimalaitoshanke-lisaeae-omistajien-tuot.html

[138] OUMAN. Tutkimustuloksia kysyntäjouston ja huipputehon rajoituksen vaikutuksesta kaukolämmitteisissä asuinkiinteistöissä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2022]. Saatavissa: https://ouman.fi/kysyntajouston-ja-huipputehon-rajoituksen-vaikutus-kaukolammitteisissa-asuinkiinteistoissa/.

[139] Energiateollisuus. Vihreällä siirtymällä irti venäläisestä energiasta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/ukrainan_sota/vihrealla_siirtymalla_irti_venaja-riippuvuudesta.

[140] Tilastokeskus. Venäjältä tuodun energian osuus 34 % energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2021. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.5.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/julkaisu/cl1xmekvw1pp80buvn1cznxmy.

[141] Fingrid. Venäjältä tuotu sähkö Suomessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/ajankohtaista05042022_sahkontuonti.pdf.

[142] Eurooppa-neuvosto. Energian hinnat ja toimitusvarmuus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/energy-prices-and-security-of-supply/.

[143] Hiilamo, E-A. Maksavatko suomalaiset nyt Saksan epäonnistuneesta energiapolitiikasta? Listasimme keskeiset syyt sähkön hinnan rajulle nousulle. Yle uutiset, 2022. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.8.2022]. Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-12582652.

[144] Arun, S. L. & Selvan, M. P. Intelligent residential energy management system for dynamic demand response in smart buildings. IEEE Systems Journal. 2017, vol 12(2). S. 1329–1340. ISSN: 1937-9234. Saatavissa: doi: 10.1109/JSYST.2017.2647759.

[145] iFLEX. D2.4 Revised architecture of iFLEX Framework. [Verkkoaineisto]. 2022. S. 61. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/download/d2-4-revised-architecture-of-iflex-framework/?wpdmdl=2491&refresh=63727150c1db21668444496.

[146] iFLEX. D6.5 Initial application-specific iFLEX Assistant prototype. [Verkkoaineisto]. 2022. S. 23. [Viitattu 15.9.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/download/d6-5-initial-application-specific-iflex-assistant-prototypes/.

[147] iFLEX. D6.2 Common iFLEX Framework. [Verkkoaineisto]. 2021. S. 23. [Viitattu 15.9.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/download/d6-2-common-iflex-framework/.

[148] iFLEX. D7.5 Pre-pilot deployment and validation. [Verkkoaineisto]. 2022. S. 140. [Viitattu 28.9.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/download/d7-5-pre-pilot-deployment-and-validation/.

[149] iFLEX. Offering the thermal capacity of apartment buildings. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: https://www.iflex-project.eu/offering-the-thermal-capacity-of-apartment-buildings/.

[150] Tridium. JACE 8000 controller. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.10.2022]. Saatavissa: https://www.tridium.com/content/dam/tridium/en/documents/document-lists/2021-0041-JACE8000-DataSheet.pdf.

[151] XORTEC. Energiatehokasta ja häiriötä sietävää tiedonsiirtoa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.10.2022]. Saatavissa: https://xortec.fi/iot/sigfox-verkko/.

[152] Rajala, S. Kysyntäjouston potentiaalin määrittäminen asuinkerrostaloissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo, 2020. [Viitattu 12.10.2022]. Saatavissa: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/44947/master_Rajala_Santeri_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[153] Leino, J. IFLEX Assistant -ohjelmistopalvelun vaikutus asuinkiinteistöjen kysyntäjouston kehitykseen. Diplomityö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT, LUT Energiajärjestelmät. 2021. [Viitattu 12.10.2022]. Saatavissa: https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163565/diplomity%C3%B6_Leino_Jemina.pdf?sequence=1.

[154] Tähtinen, S. Asiakkuusvastaava. Caverion Suomi Oy. Haastattelu/sähköpostikeskustelu 5.9.–2.12.2022.

[155] Kiljander, J. Senior Scientist. VTT Oy. Haastattelu/sähköpostikeskustelu 6.10.–1.12. 2022.

[156] Ilmatieteenlaitos. Ilmakehä-ABC -hakusanoja selityksineen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.11.2022]. Saatavissa: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?ini=U.