

Jesse Haakana

LIIKETOIMINTAPOTENTIALIN SELVIT- TÄMINEN YHDISTETYSSÄ SÄHKÖN- JA LÄMMÖNTUOTANNOSSA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta (ITC)
Diplomityö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jesse Santeri Haakana: Liiketoimintapotentialin selvittäminen yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Sähkötekniikan DI-tutkinto-ohjelma

Syyskuu 2019

Energiamarkkinoiden laaja-alainen murros tuo potentiaalia uudelle liiketoiminnalle. Nykyiset energiamarkkinot toimivien osapuolien toimenkuvat ja tehtävät tulevat muuttamaan tämän murroksen myötä, jolloin myös täysin uusille toimijoille avautuu mahdollisuuksia.

Energiapolitiikka on laajentunut ilmastopolitiikan osaksi ja poliittisten päätösten vaikutus on suuri energia-alalla. Fossiilisten polttoaineiden käyttö yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa kallistuu jatkuvasti nousevien päästöoikeuksien hintojen myötä. Energiavarastojen käyttö on yhä yleisempää energiasovelluksissa energiavarastojen hintojen laskiessa. Liikenteen sähköistymisen ja puhtaamman liikenteen kysynnän kasvun myötä sähköajoneuvojen latauspisteille on kasvavaa kysyntää niin kuin myös puhtaammille kaasumaisille liikennepolttoaineilla verrattuna perinteisiin bensiini- ja dieselpolttoaineisiin.

Diplomityö koostuu kahdesta osiosta: kirjallisuustutkimuksesta ja simulaatiomallista. Kirjallisuustutkimuksessa tarkastellaan tutkimuskohteena olevan energia-aseman ekosysteemin energiamarkkinoiden näkymiä nyt ja tulevaisuudessa. Energia-aseman ekosysteemi sisältää kaasumaista polttoainetta käyttävän CHP-kaasumoottorivoimalaitoksen, energiavarastot sähkölle ja lämmölle sekä latauspisteet sähköajoneuvoille ja tankkauspisteet kaasuaajoneuvoille. Energia-asema palvelee kohteen ja liikenteen energiatarpeita. Tässä kohde voidaan mieltää esimerkiksi monipuolisia palveluita tarjoavana liike-elämän kiinteistönä kuten kauppakeskuksena.

Simulaatiomallin avulla simuloidaan energia-asemaa erilaisissa kirjallisuustutkimuksen pohjalta laadituissa skenaarioissa ja lasketaan näille skenaarioille kannattavuus. Skenaarioita on useita ja näiden pohjalta oletetaan saavan riittävä kuva energia-aseman kannattavuudesta. Simulaatiomalli on koottu asianmukaisia mittaustietoja ja dataa käyttäen, jotta simulaatiomallista saadaan mahdollisimman luotettava.

Energia-aseman ekosysteemin näkymät ovat suurimmalta osalta positiivisia nyt ja tulevaisuudessa. Energiamarkkinoiden megatrendit puoltavat hyvin energia-aseman intressejä. Simulaatiomallin pohjalta saatujen simulointitulosten perusteella kaikissa määritetyissä skenaarioissa energia-aseman investointi on kannattava. Simulointituloksiin liittyy kuitenkin aina epävarmuutta, sillä tulevaisuutta ei voida täysin ennustaa oikein. Energia-asemalla nähdään kuitenkin olevan liiketoimintapotentialia edellä kuvatun kirjallisuustutkimuksen ja simulaatiomallin pohjalta lasketun kannattavuuden perusteella.

Avainsanat: yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto, energiavarasto, sähköajoneuvo, kaasuaajoneuvo, energiamarkkina, simulointi, kannattavuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Jesse Santeri Haakana: Resolving business potential in the field of CHP
Master of Science Thesis
Tampere University
Degree Programme in Electrical Engineering, MSc (Tech)
September 2019

Extensive change on energy markets will bring new potential for novel businesses. There are present parties whose functions and missions will alter during this change on current energy markets and as a consequence, new possibilities are unfolded for completely new parties.

Energy politics has expanded as a part of climate politics and the impact of political decisions are influential on energy sector. The use of fossil fuels in the combined heat and power generation is getting more expensive as the prices of emission allowances rise. Utilization of energy storage systems is becoming more common in energy applications as energy storage systems get cheaper. There is growing demand for electric vehicle recharging points and cleaner gas fuels compared to traditional petrol and diesel fuels as the electrification of traffic and growth in demand for cleaner traffic advances.

Master of Science Thesis consists of two parts: literature research and simulation model. In the literature research the prospects of the energy markets of the Energy Station ecosystem are researched in the current and future energy markets. The ecosystem of the Energy Station contains gas engine CHP plant operating on gas fuel, energy storages for electricity and heat and recharging points for electric vehicles and refueling points for gas vehicles. Energy Station serves the energy demands of the facility and traffic. In this context the facility can be assumed as a business property having varied services like a shopping center.

Energy Station is simulated with the simulation model using scenarios based on the literature research and viability is also calculated for these scenarios. There are many scenarios and they are assumed to provide satisfactory perspective for the viability of the Energy Station. Simulation model is engineered using proper measurements and data resulting in a simulation model as reliable as possible.

The prospects for the Energy Station ecosystem are mainly positive today and in the future. The megatrends of the energy markets advocate well the interests of the Energy Station. In every simulated scenario, the investment for the Energy Station is viable. However, there is always uncertainty in the simulations because future cannot be perfectly predicted. Eventually, it is noticed that business potential for the Energy Station exists according to the literature research and viability results from the simulation model.

Keywords: Combined Heat and Power, Energy Storage, Electric Vehicle, Gas Vehicle, Energy Market, Simulation, Viability

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty löytämään uusia mahdollisuuksia Höyrytys Oy:n strategian kehittämiseksi tulevaisuuden tarpeisiin. Haluan kiittää Höyrytys Oy:tä mielenkiintoisesta aiheesta, jonka rakenteeseen ja sisältöön olen kiinnostukseni mukaan saanut vaikuttaa merkittävästi. Diplomityön parissa olen saanut hyödyntää parasta osaamistani, mutta myös oppinut valtavasti enemmän energia-alasta.

Työtä ovat ohjanneet Höyrytys Oy:n Pohjois-Suomen aluepäällikkö Tapio Ritvonen ja Tampereen yliopiston sähkötekniikan yksikön professori Pertti Järventausta. Heille suuret kiitokset diplomityön aikana annetusta korvaamattomasta tuesta ja ohjauksesta sekä heidän näkemyksistään diplomityön aiheesta.

Erityiskiitokset Höyrytys Oy:n liiketoimintajohtaja Jörgen Bärlundille opastuksesta kaasumootoreihin ja biokaasuteknologiaan, Höyrytys Oy:n huoltoinsinööri Henrikki Pirkolalle opastuksesta kaasumootoreiden huoltoon ja kunnossapitoon sekä Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnan rakennusfysiikan tutkimusryhmän Anssi Laukkariselle opastuksesta kiinteistöjen lämpöenergian kuormitusprofiilien laadintaan.

Tähän pisteeseen pääseminen ei olisi ollut mahdollista ilman läheisiäni, jotka olette minua pyrkimyksissäni aina tukeneet niin opinnoissani kuin niiden ulkopuolellakin. Tämä diplomityö on omistettu teille kaikille.

Tampereella, 15.9.2019

Jesse Haakana

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tavoite ja rajaus	1
1.2 Tutkimusmenetelmät	2
2. YHDISTETTY SÄHKÖN JA LÄMMÖN TUOTANTO	3
2.1 Kaasumoottorivoimalaitos	3
2.1.1 Kaasumoottorit	5
2.2 Tahtigeneraattorit	7
3. KAASUMAISET POLTTOAINEET	8
3.1 Maakaasu	8
3.2 Nesteytetty maakaasu (LNG)	10
3.2.1 LNG:n toimitusketju	10
3.3 Biokaasu	12
3.3.1 Biokaasun puhdistus ja jalostus	13
3.4 Nestekaasu (LPG)	15
3.5 Polttoaineiden koostumus ja ominaisuudet Suomessa	16
3.5.1 Polttoaineiden verotus yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa Suomessa	17
4. ENERGIAVARASTOT	18
4.1 Sähkövarastot	18
4.1.1 Litiumioniakku	20
4.2 Lämpövarastot	21
4.2.1 Kaukolämpöakku	23
5. SÄHKÖLATAUS JA KAASUTANKKAUS	26
5.1 Sähköajoneuvojen lataus	26
5.1.1 Lataustavat 1, 2, 3 ja 4	27
5.1.2 Julkiset sähköajoneuvojen latauspisteet Suomessa	30
5.1.3 Johdoton lataus	30
5.2 Vehicle-to-Grid (V2G)	31
5.3 Kaasuajoneuvojen tankkaus	33
5.3.1 Julkiset kaasutankkausasemat Suomessa	34
6. TULEVAISUUSTARKASTELU	35
6.1 Kaasumaisen polttoaineen hinta	35
6.1.1 Kaasumarkkinoiden avautuminen	35
6.2 Sähkön tuotanto	37
6.2.1 Hintaskenaarioita pörssisähkölle	39
6.3 Lämmön tuotanto	41
6.3.1 Kaukolämpömarkkinoiden avautuminen	42
6.4 Energiavarastot	43
6.4.1 Litiumioniakustot	44
6.4.2 Tuntuvan lämmön varastot	46
6.5 Sähkö- ja kaasuajoneuvojen yleistymisen	47
6.5.1 Liikenne- ja viestintäministeriön raportti	47
6.5.2 GASELLI-raportti	48

6.6	Sähkölataus- ja kaasutankkauspiesteiden hankintatuet	53
7.	ENERGIA-ASEMA	56
7.1	Energia-aseman ekosysteemi	57
7.2	Energia-aseman tulevaisuuden näkymät.....	59
7.3	Potentiaaliset sijoituskohteet energia-asemalle	62
7.3.1	Olemassa olevan lataus- ja tankkausinfrastruktuurin hyödyntäminen	63
7.4	Energia-aseman älykäs käyttö	64
8.	ENERGIA-ASEMAN SIMULOINTI JA KANNATTAVUUS.....	67
8.1	Kohteen valinta ja kuormitusprofiilit	68
8.1.1	Sähkön kuormitusprofiili	68
8.1.2	Ihmisistä johtuva kuormitus	70
8.1.3	Lämmön kuormitusprofiili	72
8.1.4	Ajoneuvojen lataus- ja tankkauskuormat.....	74
8.2	Alkuinvestointi	76
8.3	Simulointi ja simulointitulokset.....	79
8.3.1	Referenssiskenaario	80
8.3.2	Muut skenaariot	86
8.4	Simuloinnin perusteella syntyvät tuotot ja kustannukset.....	88
8.5	Kannattavuus	90
8.5.1	Skenaarioiden kannattavuus	92
8.6	Jatkokehitys	94
9.	JOHTOPÄÄTÖKSET	96
10.	LÄHTEET	98
	LIITE 1: KAASUMAISTEN POLTTOAINEIDEN KOOSTUMUKSET JA OMINAISUUDET	110
	LIITE 2: JULKISET SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSPISTEET SUOMESSA	112
	LIITE 3: JULKISET KAASUTANKKAUSASEMAT SUOMESSA.....	113
	LIITE 4: ENERGIAVIRASTON ENSIMMÄISEN TUKIKIERROKSEN JÄLKEEN SUOMESSA OLEVAT JA TULEVAT JULKISET KAASUTANKKAUSPISTEET	114
	LIITE 5: TÄRKEIMPIEN VALTATEIDEN ENNUSTETUT LIKENNEMÄÄRÄT VUONNA 2030	115
	LIITE 6: SÄHKÖAJONEUVOJEN LEVINNEISYYS.....	117

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Vaihtosähkö, engl. Alternating Current
AD	Mädätys, engl. Anaerobic Digestion
ARA	Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus
BESS	Akkuenergiavarastojärjestelmä, engl. Battery Energy Storage System
BMS	Akun hallintajärjestelmä, engl. Battery Management System
C	väliaineen ominaislämpökapasiteetti
CBG	Paineistettu biokaasu, engl. Compressed Biogas
CCS	Yhdistelmä lataus, engl. Combined Charging System
CHP	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto, engl. Combined Heat and Power
CP	Sähköajoneuvon latauksen hallinnassa käytettävä toiminto, engl. Control Pilot
DC	Tasasähkö, engl. Direct Current
DoD	Lataus-purkaussyklien syvyys, engl. Depth of Discharge
E	väliaineen lämmittämiseen tarvittava energia
EU	Euroopan Unioni
EV	Sähköajoneuvo, engl. Electric Vehicle
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö, engl. International Energy Agency
$Hinta_{ostettu\ energia}$	energian hinta, jonka energia-asema ostaa
$Hinta_{tuotettu\ energia}$	energian hinta, jonka energia-asema tuottaa itse
I	energia-aseman investoinnin hankintameno
i	laskentakorkokanta
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli, engl. Intergovernmental Panel on Climate Change
IRR	sisäinen korkokanta, engl. Internal Rate of Return
LBG	Nesteytetty biokaasu, engl. Liquefied Biogas
LCO	Litiumkobolttioksidi, engl. Lithium Cobalt Oxide
$LiPF_6$	Litiumheksafluorofosfaatti, engl. Lithium hexafluorophosphate
LFP	Litium-rautafosfaatti, engl. Lithium Iron Phosphate
LMO	Litium-mangaanioksidi, engl. Lithium Manganese Oxide
LNG	Nesteytetty maakaasu, engl. Liquefied Natural Gas
LPG	Nestekaasu, engl. Liquefied Petroleum Gas
LTO	Litiumtitanaatti, engl. Lithium-titanate
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
m	väliaineen massa
N	investoinnin pitoaika vuosina
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi, engl. Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide
NiMH	Nikkelimetallihydridi, engl. Nickel-metal hydride
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi, engl. Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
NPV	nettonykyarvo, engl. Net Present Value
PP	Sähköajoneuvon latauspistokkeen kytkennän tunnistava toiminto, engl. Proximity Pilot
$PV(menovirta)$	menovirtojen nettonykyarvo, engl. Present Value
$PV(tulovirta)$	tulovirtojen nettonykyarvo, engl. Present Value
R_t	kassavirta
STES	Tuntuvan lämmön varasto, engl. Sensible Thermal Energy Storage
t	laskentavuosi
T_1	väliaineen alkulämpötila

T_2
TEM
VTT
V2G

väliaineen loppulämpötila
Työ- ja elinkeinoministeriö
Teknologian tutkimuskeskus
engl. Vehicle to Grid

1. JOHDANTO

Energiamarkkinat ovat murroksessa. Tuntemamme energiamarkkinat muuttuvat jatkuvasti teknisten, taloudellisten, lainsäädännöllisten ja yhteiskunnallisten muutosten seurauksena. Energiamarkkinoilla toimivien osapuolien vastuualueet sekä intressit ovat siten muuttuva käsite, mikä synnyttää uudenlaista liiketoimintapotentiaalia uusille ja nykyisille osapuolille esimerkiksi innovaatioiden kautta. Erityisesti tiedon digitaalinen ja reaaliaikainen saatavuus ja tämän tiedon käyttö synnyttävät dynaamisia markkinapaikkoja, joissa hyödykkeiden hinnat vaihtelevat kysynnän ja tarjonnan mukaan joka hetki. Markkinoille osallistuminen tehdään osapuolille yhä helpommaksi ja joustavammaksi, jopa kulutusasiakkaille. Edellä kuvattu muovaa energiamarkkinoiden ekosysteemejä ennennäkemättömällä tavalla ja tulee muuttamaan tuntemamme nykypäivän energiamarkkinat.

Energiamarkkinoilla uutta liiketoimintapotentiaalia tutkittaessa on selvitettävä energiamarkkinoiden nykytila ja sen tulevaisuuden näkymät. Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa uutta liiketoimintapotentiaalia synnyttää mahdollisuus integroida perinteiseen sähkön ja lämmön tuotantoon muita teknologioita ja energiatarpeita. Näillä yhdistelmillä voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä perinteisille energia-alan investoinneille ja siten kasvattaa kannattavuutta perinteiseen liiketoimintaan verrattuna. Tässä diplomityössä tutkitaan, minkälainen liiketoimintapotentiaali yhdistetyllä sähkön ja lämmön tuotannolla on lisäämällä samaan konseptiin energiavarastot ja liikenteen energiatarpeet.

1.1 Työn tavoite ja rajaus

Tämä diplomityö tehdään Höyrytys Oy:lle tukemaan uuden liiketoimintapotentiaalın kartoittamista yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Potentiaalia uudelle liiketoiminnalle tuo diplomityössä käsiteltävien energiamuotojen (sähkö, lämpö ja kaasu) energiamarkkinoiden murros esimerkiksi energiapoliittisten päätösten seurauksena.

Tässä diplomityössä tutkitaan energia-asemaa, joka tuottaa kaasumaisesta polttoaineesta sähköä sähköverkkoon sekä sähköajoneuvoille latauspistokkeiden kautta, lämpöä kaukolämpöverkkoon sekä kaasua kaasukäyttöisille ajoneuvoille tankkauspaikasta kautta. Näiden lisäksi energia-aseman joustavuutta ja käytettävyyttä lisätään sähkö- ja lämpövarastoilla. Energia-asemaa tarkastellaan ekosysteeminä osana, jossa

energia-asema palvelee kohteen (sähkö ja lämpö) ja liikenteen (sähkö ja kaasu) energiatarpeita, jotka energia-asema tuottaa mahdollisimman edullisesti olosuhteiden ja markkinoiden tilan perusteella.

Energia-aseman eri komponentteja yhdistelemällä voidaan tutkia sen liiketoimintapotentiaalia eri kokoluokissa. Työn tavoitteena on tutkia tämän energia-aseman liiketoimintapotentiaalia nyt ja tulevaisuudessa erilaisissa skenaarioissa. Liiketoimintapotentiaalnin tutkimisessa painotetaan teknistaloudellista kannattavuutta.

Vastaavaa konseptia, kuin tässä diplomityössä tutkittavaa energia-asemaa, on tutkittu aiemmin nimellä kokonaisenergialaitos, joka on pieni, alle 500 kW:n paikallinen polttomoottorikäyttöinen sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos. Kokonaisenergialaitos ei kuitenkaan tyydytä liikenteen energiatarpeita vaan pelkästään kohteen energian sähkön ja lämmön osalta. [1]

1.2 Tutkimusmenetelmät

Diplomityön tutkimusmenetelmiä ovat kirjallisuustutkimus sekä tutkimuksen aikana tuotettu simulaatiomalli. Kirjallisuustutkimuksessa tutkitaan diplomityössä käsiteltävien energiamuotojen (sähkö, lämpö, kaasu) markkinoiden murrosta sekä sähkö- ja kaasujoneuvojen yleistymistä ja näiden lataus- ja tankkausratkaisujen tukijärjestelmiä ja sitä, miten nämä kaikki tekijät näyttäytyvät energia-aseman liiketoimintapotentiaalnin kannalta. Simulaatiomallin avulla simuloidaan energia-asemaa määritellyillä parametreilla erilaisissa, kirjallisuustutkimuksen pohjalta laadituissa skenaarioissa, joiden avulla lasketaan kannattavuus eri kannattavuusmittareita käyttäen. Kirjallisuustutkimuksen ja simulaatiomallin tulosten pohjalta arvioidaan energia-aseman liiketoimintapotentiaalia nyt ja tulevaisuudessa.

2. YHDISTETTY SÄHKÖN JA LÄMMÖN TUOTANTO

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (engl. CHP = Combined Heat and Power) tuotetaan samassa prosessissa samanaikaisesti sähköä esimerkiksi sähköverkkoon sekä lämpöä kaukolämpöverkkoon. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa polttoaineen energiasisältö saadaan tehokkaammin hyödynnettyä kuin erillistuotannossa, ja siten yhteistuotantolaitoksen hyötysuhde on 20–30 % korkeampi kuin erillistuotannossa. Kuitenkaan kaikkea polttoaineen kemiallista energiaa ei saada hyödynnettyä sähkö- ja lämpöenergiaksi yhteistuotannossakaan vaan tuntuva osa tästä energiasta menetetään energiamuunnoksien myötä. Yleensä se energia, jota ei saada hyödynnettyä sähköntuotantoon, voidaan käyttää lämpösovelluksiin, kuten kaukolämpöön tai höyryntuotantoon. Yhteistuotannon avulla voidaan saavuttaa noin 75 – 90 % kokonaishyötysuhde ja se onkin suosittu tuotantotapa erityisesti pohjoisissa maissa, kuten Suomessa, talvikauden lämmöntarpeen vuoksi. Ilmastokysymykset ovat myös lisänneet mielenkiintoa yhteistuotantoa kohtaan, sillä polttoaine voidaan hyödyntää tehokkaammin ja siten polttoaineen tuottamat päästöt ovat yhteistuotannossa pienemmät kuin, jos erillistuotannossa tuotetaan sama energiamäärä sähköä sekä lämpöä. Paremman hyötysuhteen lisäksi yhteistuotantolaitoksella voidaan säästää laitoksen käyttökustannuksissa. [2-4]

Yhteistuotannossa polttoaineen kemiallinen energia voidaan muuntaa monilla eri tekniikoilla sähkö- ja lämpöenergiaksi. Suuren kokoluokan yhteistuotantolaitoksissa käytetään yleisesti kaasu- ja höyryturbiineja sekä polttomoottoreita. Pienemmissä CHP-laitoksissa käyttövoimana voidaan käyttää edellä mainittujen lisäksi myös polttokennoja ja Stirlingmoottoreita. Polttoaineina nämä voimalaitokset voivat käyttää fossiilisia, bio- tai ydinpoltoaineita. [4, 5]

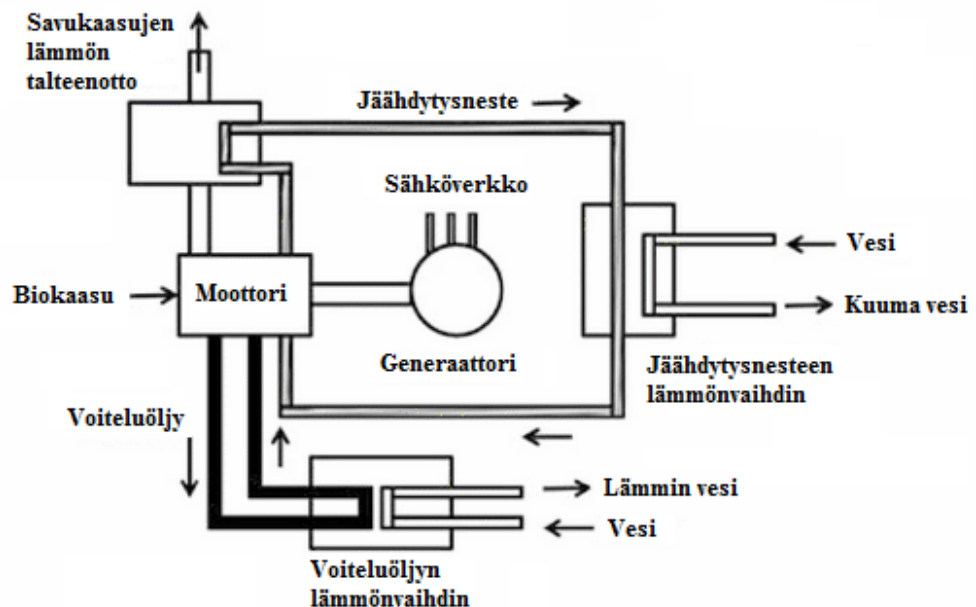
2.1 Kaasumoottorivoimalaitos

Kaasumoottorivoimalaitoksissa sähkön ja lämmön yhteistuotanto perustuu polttomoottoreihin, jotka käyttävät kaasumaisia moottoripolttoaineita. Nämä laitokset voivat olla teholuokaltaan hyvin erikokoisia, teholtaan kymmenistä kilowateista satoihin megawatteihin. Kaasumoottorivoimalaitokset voivat käyttää polttoaineenaan esimerkiksi maakaasua, nesteytettyä maakaasua (engl. LNG = Liquefied Natural Gas), biokaasua tai nestekaasua (engl. LPG = Liquefied Petroleum Gas). Kaasumoottorivoimalaitoksissa hyvän lämmön talteenoton vuoksi kokonaishyötysuhde voi olla jopa 90 % yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Kaasumoottorivoimalaitoksissa polttomoottorin mekaaninen energia muutetaan sähköenergiaksi sähkögeneraattorin avulla ja lämpöenergia otetaan talteen esimerkiksi polttomoottorin pakokaasuista. Pienemmissä yhteistuotantoyksiköissä

rakennusaste, eli sähkön ja lämmön tuotannon suhde, vaihtelee välillä 0,3...0,5 eli lämpöä tuotetaan yli tuplasti sähköön verrattuna. Suurissa yksiköissä rakennusaste on tyypillisesti välillä 0,8...0,95. [2]

Yhdessä voimalaitosyksikössä kaasumootoreita voi olla yhdestä useisiin kymmeneen, moottorin kokoluokan ollessa kilowateista kymmeneen megawatteihin. Kaasumootorivoimalaitokset soveltuvat hyvin vara- ja huippuvoimalaitoksiksi. Niiden käynnistysaika on vain minuutteja ja säätöaika sekunteja. Tästä syystä ne sopivat myös hyvin säätövoimaksi uusiutuvan energian epätasaisen tuotannon tasaamiseen. Varavoimayksiköistä pienempiä voidaan käyttää asuinrakennuksissa ja toimistorakennuksissa, kun taas isoja varavoimayksiköitä käytetään esimerkiksi sairaaloissa. Monet teollisuuslaitokset käyttävät keskikokoisia moottorivoimalaitoksia sähkön ja lämmön kysyntää varten. Peruskuormaa varten suuret yksiköt ovat sähköverkkoon kytkettyjä soveltuen myös esimerkiksi verkon taajuudensäätöön, kun taas pieniä yksiköitä käytetään paljon verkosta erillään olevissa saarekeverkoissa. [5, 6]

Kuvassa (Kuva 1) on esitetty biokaasua polttoaineenaan käyttävä kaasumootorivoimalaitos, jonka pääkomponentteja ovat kaasumootori, sähkögeneraattori ja lämmöntalteenottojärjestelmät savukaasuista, jäähdytysnesteestä sekä voiteluöljystä [7].



Kuva 1. Biokaasua polttoaineenaan käyttävä kaasumootoriin perustuva CHP-laitos. Muokattu lähteestä [7].

Kuvasta (Kuva 1) nähdään, että lämpöenergiaa otetaan talteen kyseisestä laitoksesta kolmesta eri paikasta: savukaasuista, jäähdytysnesteestä sekä voiteluöljystä. Kyseinen

laitos tuottaa sähköä ja lämpöä muuntaen biokaasun kemiallisen energian polttomoottorissa mekaaniseksi liikkeeksi ja edelleen akselin ja siten generaattorin pyörimisenergiaksi. Savukaasut sisältävät 30...50 % polttoaineen energiasta, jota voidaan käyttää keskiarvoisen höyryn tuotantoon tai veden kuumentamiseen lämmöntalteenottokattilassa. Jäähdytysnesteen kautta polttoaineen energiasta voidaan hyödyntää jopa 30 %. Tästä voidaan tuottaa matala-arvoista höyryä tai käyttää sitä veden kuumentamiseen. Voiteluöljyn lämpöosuus on pieni ja sitä käytetään veden kuumentamiseen. [5]

Lämmöntalteenottoa hyödynnetään moottorivoimaloissa pääasiassa kolmenlaisiin tarpeisiin: yhteistuotantoon, lisäsähkön tuotantoon sekä laitoksen omakäyttöä varten. Yhteistuotannossa lämmöntalteenottokattiloissa kuumennettua vettä voidaan hyödyntää asuinkiinteistöjen ja toimistojen lämmitykseen tai se voidaan syöttää kaukolämpöverkoon. Kattilassa tuotettua höyryä voidaan myös käyttää teollisuusprosessien tarpeisiin tai matala-arvoista lämpöä jäähdytystarpeisiin. Lisäsähköä voidaan tuottaa kombikytkennällä, jossa sähköä tuotetaan polttomoottorin sekä höyryturbiinin ajamalla generaattoreilla. Moottorin pakokaasuista tuotetaan lämmöntalteenottokattilassa korkeapaineista, tulistettua höyryä, joka ohjataan höyryturbiinille tuottaen lisäsähköä samalla akselilla olevalla generaattorilla. [2]

2.1.1 Kaasumoottorit

Polttomoottorin tarkoituksena on muuttaa kemiallista polttoaineeseen sitoutunutta energiaa mekaaniseksi energiaksi. Tämä saadaan aikaan puristamalla ilma, tai ilma sekä polttoaineeseen, ympäristöään suurempaan paineeseen. Puristuksen jälkeen energiasältöä kaasussa lisätään polttamalla siinä jotakin polttoainetta. Lämpötilan noustessa kaasu laajenee lähtöarvoa suurempaan tilavuuteen, joten kaasulla on laajentuessaan kyky tehdä mekaanista työtä enemmän kuin mitä kaasuun on puristusvaiheessa käytetty. Jos tämä laajenemisessa saadun ja puristukseen käytettyjen työmäärien erotus on suurempi kuin moottorin mekaaniset hankausvastukset, saadaan kone muuttamaan polttoaineeseen sitoutuneesta kemiallisesta energiasta lämpöenergiaa, jota voidaan käyttää mekaaniseksi energiaksi. Tämä mekaanisen energian määrä taas riippuu moottorin rakenteesta ja termodynaamisista olosuhteista, missä palaminen tapahtuu. Jokaisen puristus- ja palamisvaiheen välillä kaasuseos täytyy vaihtaa, sillä polttoaineen palassa puristetussa ilmassa, polttoaine kuluttaa siinä olevan hapen. [8]

Ensimmäiset polttomoottorit olivat kaasumoottoreita. Kuitenkin nestemäisten polttoaineiden yleistyttyä ne syrjäyttivät kaasun käytön polttomoottoreissa. 1990-luvulla kaasumoottoreiden suosio kasvoi erityisesti liikennekäytössä sekä moottorivoimalaitoksissa. Maakaasua on nykyään paremmin saatavilla sekä tiukentuneet päästörajoitukset ovat kasvattaneet sen käyttöä muiden fossiilisten polttoaineiden sijasta. Muita etuja kaasumaisista polttoaineista nestemäisten käyttämisen sijaan ovat [2, 9]:

- moottorin tasaisempi ja säännöllisempi sytytys,

- kylmäkäynnistyksen helpottuminen, koska nestemäisten polttoaineiden sekaan voi tiivistyä vettä, mikä haittaa moottorin toimintaa sekä
- puhtaampi palaminen ja sen seurauksena moottoriöljyn käyttöiän pidentyminen.

Polttomoottorit voidaan yleisesti jakaa termodynaamisten prosessiensa perusteella otto- ja dieselmoottoreihin, jotka eroavat toisistaan sytytystekniikoiltaan. Ottomoottori käyttää ilman ja polttoaineseoksen sytytykseen sytytystulpan synnyttämää kipinää ja voi käyttää polttoaineenaan pelkkää kaasua. Sytytyksen on tapahduttava juuri oikealla hetkellä, jotta moottori saadaan tuottamaan optimaalinen teho. Tämän takia puristuksen synnyttämää lämpöä ei voi käyttää sytytykseen ottomoottoreissa vaan sytytys tehdään sytytystulpan avulla juuri ennen puristustahdin loppua. Dieselmoottorin sytytys perustuu puristussytytykseen, jossa sytytyksessä käytettävän ilman on oltava korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Edellä mainitun lisäksi dieselmoottorin sytytykseen tarvitaan pieni määrä nestemäistä polttoainetta kaasun lisäksi, minkä vuoksi niitä kutsutaan kaksoispolttoainemoottoreiksi. Dieselmoottorin perustuessa puristussytytykseen, sen puristussuhde on paljon korkeampi kuin ottomoottoreilla. [2, 4, 9]

Näistä kahdesta moottorityypistä dieselmoottorin hyötysuhde sähkön tuotannossa on korkeampi, lähelle 50 %. Kaasua polttoaineenaan käyttävä ottomoottori voi saavuttaa noin 42 % hyötysuhteen sähkön tuotannossa, mutta on kuitenkin paljon puhtaampi päästöiltään kuin dieselmoottori. Dieselmoottorin päästöjen minimointi, erityisesti typpioksidien, vaatiikin enemmän panostuksia korkeamman palamislämpötilan takia. Ottomoottoria varten riittävät yksinkertaiset pakokaasukatalyytit, kun taas dieselmoottorin typpioksidien ja pienhiukkaspäästöjen suodattamiseen tarvitaan monimutkaisempia ja kalliimpia ratkaisuja. [2, 5]

Osakuormalla polttomoottoreiden hyötysuhde säilyy suhteellisen korkeana, esimerkiksi puolikkaalla kuormalla ottomoottorin hyötysuhde laskee noin 10 %, dieselmoottorilla ei edes niin paljoa. Monista muista moottorityypeistä poiketen polttomoottoreiden kuluminen ei merkittävästi kasva käytettäessä niitä osakuormilla. [5]

Polttomoottorit sopivat mainiosti CHP-laitoksiin, sillä suuri osa niiden energiasta, jota ei saada sähkönä, muuttuu lämmöksi, joka on sopivaa lämmitystarpeisiin. Polttomoottoreissa on neljä lämmönlähdettä: pakokaasut, nestejäähdytysjärjestelmä, öljyjäähdytysjärjestelmä ja turboahtimen jäähdytysjärjestelmä, mikäli turboahtinta käytetään. Lämmön talteenotto korkeasta lämpötilasta alentaa kuitenkin sähköntuotannon hyötysuhdetta ja siksi lämpö pyritään hyödyntämään matalan lämpötilan sovelluksissa, koska lämpövoimakoneiden hyötysuhde on riippuvainen lämpötilaerosta. [5, 10]

Kaasumoottorivoimalaitokset soveltuvat hyvin toimistojen, asuinkiinteistöjen, sairaaloiden, yliopistojen ja kaukolämpöverkkojen energiatarpeisiin. Kaasumoottorien tuottama melu on kuitenkin sen verran voimakasta, että melusuojausta yleensä tarvitaan. [5]

2.2 Tahtigeneraattorit

Generaattorin tehtävänä on muuntaa mekaaninen energia sähköenergiaksi. Tahtigeneraattorit muodostavat jokaisen sähkön tuotantojärjestelmän ytimen huolehtien järjestelmän taajuudesta, jännitteensäädöstä ja riittävästä vikavirrasta. Yhteistuotantolaitokset käyttävät tyypillisesti tahtigeneraattoreita sähkön tuotantoon lähtien kokoluoksaan kymmenistä kilowateista aina satoihin ja yli tuhanteen megawattiin. Näissä yhteistuotantolaitoksissa voidaan käyttää voiman lähteenä turbiinia tai polttomoottoria. [11]

Tahtigeneraattorit muodostuvat kolmesta pääosasta: staattorista, roottorista sekä magnetointijärjestelmästä. Voimakoneen pyöritäessä samalla akselilla olevaa magnetoitua roottoria, indusoituu staattorin käämityksiin vaihtojännite. Yleensä roottorin magneettinaavat magnetoidaan tasavirralla, jolloin roottorissa on vakiomagneettivuo. Tämä tasavirta voidaan johtaa roottorin magnetointikämeihin hiiliharjoilla. [12] Roottorin pyörimisnopeus määrittää staattoriin tuotetun vaihtojännitteen taajuuden. Tahtigeneraattorin tahtinopeus määräytyy seuraavan yhtälön (1) mukaisesti [11]:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

jossa n on tahtinopeus, f taajuus ja p on napapariluku. Esimerkiksi generaattorin, jonka napapariluku on kaksi ja taajuus 50 Hz, tahtinopeus on 1500 kierrosta minuutissa. Tahtigeneraattorissa sähköinen nopeus tai taajuus on aina tahdissa mekaanisen pyörimisnopeuden kanssa, mistä johtuu nimitys tahtigeneraattori. Tahtinopeus on aina mekaanisen pyörimisnopeuden monikerta ja nopeudet on sidottu toisiinsa napapariluvulla [12].

3. KAASUMAISET POLTTOAINEET

Kaasumaiset polttoaineet soveltuvat hyvin polttoaineiksi moottoreille. Niitä käytetään erityisesti kohteissa, joissa vaaditaan pieniä pakokaasujapäästöjä. Kaasumaiset polttoaineet sopivat ominaisuuksiensa puolesta suoraan ottomoottorin polttoaineeksi 100 %:n korvausasteella. Dieselmoottoriin jotkut kaasumaiset polttoaineet sopivat pääpolttoaineeksi, mutta ne tarvitsevat silti sytytyspolttoaineenaan dieseliä. Esimerkiksi nestekaasulla voidaan korvata korkeintaan 35 % dieselistä detonaatiovaaran vuoksi eli nestekaasu-ilmaseos saattaa syttyä liian aikaisin nestekaasun heikon puristuskestävyyden vuoksi. [13]

Kaasumaisten polttoaineiden, nestekaasun, maakaasun ja biokaasun koostumukset voivat vaihdella paljonkin valmistustavasta ja maantieteellisestä sijainnista johtuen. Maakaasun ja biokaasun pääkomponentti on metaani (CH_4), mutta esimerkiksi maakaasu voi myös sisältää vähän etaania, propaania ja butaania sekä typpeä ja hiilidioksidia. [13] Kun kaasuja käytetään energiasovelluksissa, niiden keskeisin polttotekninen ominaisuus on lämpöarvo. Kaasumaisilla polttoaineilla on kapeahko syttymisalue sekä korkeahko syttymislämpötila. Esimerkiksi maakaasun syttymislämpötila on 600 – 650 °C ja nestekaasulla noin 500 °C. Kaasumaisten polttoaineiden sytyttämiseen tarvittava energiamäärä on kuitenkin pieni. [14] Tarkempi kuvaus Suomessa käytettävien kaasumaisten polttoaineiden koostumuksesta ja ominaisuuksista on esitetty liitteen 1 taulukossa 1.

Tarkastellaan tässä kappaleessa seuraavaksi maakaasua, nesteytettyä maakaasua, biokaasua sekä nestekaasua yleisellä tasolla sekä kuvataan niiden hankintaa ja valmistusta.

3.1 Maakaasu

Fossiilisista polttoaineista maakaasu on kaikkein ympäristöystävällisin. Energianlähteenä se on yksi puhtain, turvallisin ja käyttökelpoisin verrattuna muihin fossiilisiin polttoaineisiin. Maakaasun tuottamat hiilidioksidipäästöt tuotettua energiamegawattituntia kohti ovat IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) mukaan 201,96 kg/MWh. Hiilellä ja raakaöljyllä vastaavat luvut ovat 403,2 kg/MWh ja 263,88 kg/MWh. Maakaasun CO_2 -päästöt ovat siis noin 50 % pienemmät kuin hiilellä sekä noin 23 % pienemmät kuin raakaöljyllä. Maailmanlaajuisesti valtiot ovatkin ottaneet maakaasua käyttöön energiantuotannossa pienentääkseen hiilidioksidipäästöjä ja sen globaali kulu on kasvanut merkittävästi viime vuosikymmeninä saavuttaen noin 22 % osuuden

maailman sähköntuotannosta. [15, 16] Maakaasun käytön lisääminen mahdollistaa samalla myös biokaasun lisääntyvän käytön esimerkiksi sähköntuotannossa ja liikennepolttoaineena [17].

Vuonna 2014 maakaasuvarojen on arvioitu riittävän vielä 64 vuoden ajan. Kansainvälinen energiajärjestö IEA (International Energy Agency) on arvioinut, että löytämättömiä maakaasuvaroja on vielä n. 404 triljoonaa kuutiometriä maailmanlaajuisesti, joka vastaisi 130 vuoden maakaasun käyttöä vuoden 2011 käyttöasteella. Venäjä, Iran ja Qatar hallitsevat noin 50 % maailman tämän hetken kaasuvaroista. [16]

Maakaasu on muodostunut miljoonien vuosien aikana eläin- ja kasvipärisistä orgaanisista aineista geologisissa muodostelmissa maan kuoren sisällä. Näiden orgaanisten aineiden sisältämät hiili- ja vetymolekyylit ovat kovassa paineessa pitkän ajan kuluessa muodostuneet maakaasuksi muiden fossiilisten raaka-aineiden, kuten öljyn tavoin. Maakaasuesiintymät ovat yleensä öljyesiintymien yhteydessä, jopa öljyyn liuenneena. Maakaasua esiintyy konventionaalisissa (helpommin saatavilla) sekä epäkonventionaalisissa (vaikeammin saatavilla) geologisissa muodostumissa. Konventionaalisissa esiintymissä maakaasu on tyypillisesti vapaana kaasuna esimerkiksi syvällä maan sisällä olevissa huokoisissa kivimuodostelmissa. Vaikeammin saatavilla olevia kaasuesiintymiä ovat esimerkiksi liuskekaasuesiintymät. [16, 18, 19]

Maakaasu on luonnonkaasua ja sen koostumus vaihtelee maantieteellisen sijainnin perusteella merkittävästi. Kaasu voi sisältää suuriakin määriä haitallisia aineita, esimerkiksi rikkivetyä, joka on myrkyllinen ja voimakkaasti metalleja syövyttävää. Kaasukentillä kaasu aina suodatetaan sekä kuivataan. Suomeen tuotava maakaasu on Venäjän Siperiasta peräisin, missä maakaasua on eniten maailmassa. Suomella ei ole omia maakaasuvarantoja. Siperian maakaasusta noin 98 % on metaania, minkä takia se sopiikin energiasovelluksiin mainiosti. Suomessa käytettävä maakaasu sisältää myös pieniä määriä etaania, propaania, butaania, tyyppiä sekä hiilidioksidia. Esimerkkinä saksalainen maakaasu sisältää 88 % metaania sekä 10 % tyyppiä ja pieniä määriä etaania, propaania sekä hiilidioksidia. [14, 19]

Venäjältä tuotava maakaasu jaellaan ympäri eteläistä Suomea maakaasun siirtoverkostossa. Siirtoverkoston syötetään Venäjältä tuotavaa maakaasua Imatran vastaanottoasemalla sekä kotimaista biokaasua suomalaisilta biokaasulaitoksilta Espoossa, Kouvolassa, Lahdessa sekä Riihimäellä. Suomen kaasuverkosto on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 2). [20]



Kuva 2. Suomen kaasuverkosto. [20]

Kuvasta (Kuva 2) nähdään, että Suomen itärajalta Imatralta lähtien kaasua siirretään Kouvolan kautta Kotkaan ja edelleen länteen Mäntsälään, josta verkosto jakaantuu pohjoiseen Hyvinkään kautta Tampereelle sekä etelään Helsinkiin, Espooseen ja Lohjalle. [20]

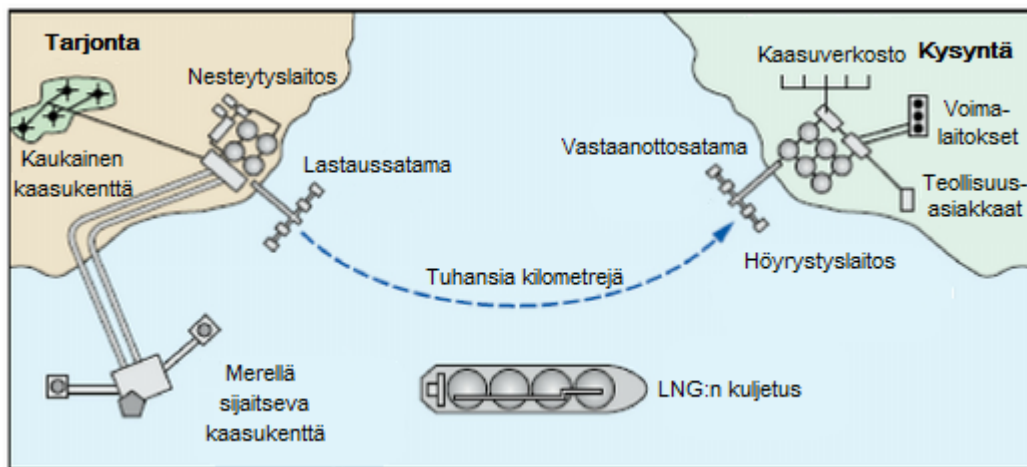
3.2 Nesteytetty maakaasu (LNG)

Nesteytetyn maakaasun ominaisuudet vaihtelevat sen koostumuksen, säiliössä olevan kaasun alkuperän ja sen käsittelyn perusteella. LNG on pääosin metaania (moolinen tilavuus 87...99 %) sisältäen myös pieniä määriä etaania, propaania, butaania, typpeä, hiilidioksidia sekä rikkiä. Ulkoisilta ominaisuuksiltaan LNG on hajutonta, väritöntä ja korrosoimatonta kryogeenistä (-169 °C) nestettä normaalipaineessa. Käytettäessä maakaasuna kaasumaisessa olomuodossa se aiheuttaa hyvin vähän hiukkas- ja hiilidioksidipäästöjä. Palaakseen kaasuna LNG:n täytyy täyttää 5...15 tilavuus- % ympäröivästä tilasta. Jos suhteellinen tilavuus kasvaa liian suureksi, ei kaasu voi palaa, sillä tilassa on tällöin liian vähän happea. Höyrystyneenä LNG saa siis samat ominaisuudet kuin maakaasu. [21]

3.2.1 LNG:n toimitusketju

Jotta nestemäistä maakaasua olisi saatavilla, on energiayhtiöiden investoitava useisiin laitoksiin, jotka ovat kytkeytyneet toisiinsa toimitusketjun kautta sekä ovat siten riippuvaisia toisistaan. Tämä ketju onkin perustettu, sillä maakaasuverkostosta kaukana olevat tai muuten sijainniltaan epäedulliset kaasukentät halutaan hyödyntää kuitenkin rakentamalla kallista ja paikallaan pysyvää kaasuverkostoa. Kaasuverkosto onkin hyvä keino siirtää kaasua kaasukentiltä, jotka ovat tarpeeksi suuria kattamaan verkoston investointi-

ja ylläpitokustannukset. Monia ratkaisuja kaukaisten kaasuesiintymien hyödyntämiseksi on esitetty viimeisten vuosikymmenien ajan. Kuitenkin ainoana kaupallisesti kannattavana ratkaisuna näiden kaukaisten kaasuesiintymien hyödyntämiseksi on kaasun nesteyttäminen, jolloin nesteytettynä kaasun tilavuus pienenee kuudessadasosaan ja on siten mielekästä kuljettaa pitkiä matkoja ilman kaasuverkostoa esimerkiksi meren yli. Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on esitetty nestemäisen maakaasun toimitusketju, kun kaasun tuotanto on kaukana sen kysynnästä. [21]



Kuva 3. Nesteytetyn maakaasun toimitusketju. Muokattu lähteestä [21].

Kuvassa (Kuva 3) maakaasu tuotetaan ensin kaasukentillä, joista se kuljetetaan kaasuputkistoa pitkin nesteytyslaitokselle ja edelleen lastataan laivaan lastausatamassa nesteytettynä maakaasuna. Laivassa LNG kulkee pitkän matkan, jopa tuhansia kilometrejä, ja saapuu vastaanottosatamaan, jossa LNG höyrystetään uudelleen. Höyrystetty LNG eli maakaasu sitten jaellaan maakaasuverkostossa teollisuusasiakkailla, voimalaitoksille sekä maakaasuverkoston jakelualueella oleville muille pienemmille asiakkaille, kuten kotitalouksiin. [21] Tarkastellaan tätä toimitusketjua seuraavaksi hieman tarkemmin.

Kaasukentiltä tuotu raakakaasu puhdistetaan ensin suurimmilta osin rikkivedystä, hiilidioksidista, vedestä, rikistä sekä elohopeasta. Tästä puhdistetusta ja kuivatusta kaasusta poistetaan ja otetaan talteen ylimääräiset hiilivedyt (kuten propaani ja butaani, joita käytetään nestekaasussa), jotta jäljelle jäävä suurimmaksi osaksi metaania sisältävä kaasu saadaan nesteytettyä. [21]

Seuraavaksi kaasu viedään jäähdytysprosessiin, jossa se viilennetään ja nesteytetään. Tämä prosessi perustuu jäähdytysyykliin, jossa peräkkäisillä laajennus- ja puristusykyillä kaasuvirrasta saadaan poistettua lämpöä jäähdytysveden tai ympäröivään ilmaan ja siten tämän kaasun lämpötila laskee ja lopulta se nesteytyy. [21]

Nesteytetty maakaasu pumpataan säiliöihin ja kuljetetaan vastaanottoasemalle rekoilla ja laivoilla. Meriteitse vietävä LNG pumpataan laivoissa oleviin varastosäiliöihin mahdollisimman nopeasti, jotta laivojen seisonnasta johtuvat kustannukset minimoitaisiin. Nesteytetyn maakaasun siirtämiseen tarkoitetut laivat ovat erikoisvalmisteisia, niiden runko on kaksinkertainen eristääkseen nesteytetyn maakaasun mahdollisimman hyvin. Ulkoinen lämpö kuitenkin reagoi nesteytetyn maakaasun kanssa ja osa siitä höyrystyy matkan aikana. Noin 0,10...0,15 % nesteytetystä maakaasusta höyrystyy päivittäin, ja tämä kaasu on poistettava, jotta paine säilyisi varastosäiliöissä tasaisena. Höyrystynyt kaasu voidaan käyttää laivan polttoaineena monipolttoainemoottoreissa. [21]

LNG höyrystetään takaisin maakaasuksi sen saavuttua vastaanottoasemalle. Maakaasu jaellaan sieltä teollisuus, voimantuotanto- ja kotitalousasiakkaille maakaasuverkoston avulla tai suoraan nesteytettyä esimerkiksi maanteitä pitkin raskailla ajoneuvoilla. [21]

LNG-terminaaleja löytyy Suomesta Porista sekä Tornioista. Haminaan LNG-terminaali on tällä hetkellä rakenteilla. Raumalle on myös ollut suunnitteilla LNG-terminaali, mutta rakennuttaja on ilmoittanut perääntyvänsä hankkeesta. Edellä mainittujen LNG-terminaalien rakentamiseen on annettu yhteensä 93 miljoonaa euroa investointitukia vuonna 2014. Investointitukien avulla pyritään nopeuttamaan LNG-verkoston syntyä Suomen rannikolle. Tavoitteena on ympäristöpäästöjen vähentäminen, LNG:n jakelu merenkulkuun, lisätä polttoainemarkkinoiden kilpailua erityisesti Etelä-Suomessa sijaitsevan maakaasuverkon ulkopuolisilla alueilla sekä parantaa energian toimitusvarmuutta. [22-25]

3.3 Biokaasu

Biokaasuteknologia on tällä hetkellä noussut esiin julkisessa keskustelussa. Biokaasuteknologia tarjoaa ratkaisun maailmanlaajuisiin haasteisiin mahdollistaen ravinnekierrätyksen, uusiutuvan energian käyttöönoton sekä materiaalikierrätyksen. Arvokkaiden ravinteiden kierrätys on tärkeää esimerkiksi ehtyvien fosforivarantojen takia. Fosfori on ruuantuotannon edellytys ja sen on ennustettu ehtyvän ennen öljyä. Fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla korvaamalla saadaan pienennettyä päästöjä sekä kasvatettua kotimaisten energianlähteiden kysyntää. Yhdyskunnissa, jätevedenpuhdistamoilla, teollisuudessa sekä maataloudessa syntyviä biohajoavia jätteitä materiaana hyödyntämällä saavutetaan materiaalikierrätyksen tavoitteet. [10]

Metaani on biokaasun pääkomponentti (osuus reaktorikaasussa 45...75 %), mutta sen lisäksi biokaasu sisältää runsaasti hiilidioksidia (osuus reaktorikaasussa 25...55 %) sekä pieniä määriä mm. vesihöyryä, joka on poistettava esimerkiksi jäähdytyksellä ennen biokaasun käyttämistä moottoripolttoaineena. Jos biokaasun käsittelylaitoksessa biokaasusta jalostetaan biometaania, joka sisältää n. 98 % metaania, saadaan tälle kaasulle samat ominaisuudet kuin maakaasulle ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi kaasujoneuvojen polttoaineena. Rikinpoiston ja kuivauksen jälkeen biokaasusta saadaan sopivaa

polttoainetta CHP-laitoksiin. Biokaasu onkin siis tärkeä tekijä kestävän energian tuotannossa, sillä sen avulla voidaan tuottaa moottoripolttoainetta, sähköä sekä lämpöä. Tällä hetkellä biokaasu onkin ainoa uusiutuva polttoaine, joka on todellinen vaihtoehto fossiilille polttoaineille käyttäen samaa infrastruktuuria. [7, 10, 13]

Biokaasua tuotetaan mädättämällä (engl. AD = Anaerobic Digestion) biomassaa anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa ja samalla jäljelle jää hajoamaton aines, mädätysjäännös. Biokaasun tuottamiseen käytettävä biomassaa voi olla hyvin monesta lähteestä: nestemäistä lantaa, teurasjätteitä, satojäännöksiä, hakkuujätteitä, jätevesilietettä ja kotitalouksien biojätteitä. Suurin energiapotentiaali Suomessa on kuitenkin peltobiomassassa. Hapetonta hajoamista tapahtuu myös kaatopaikoilla niiden ollessa merkittävä metaanin lähde. Kaatopaikalla metaani kerätään talteen ja hyödynnetään energiana. EU:n jätteiden hyötykäyttöä edistävien säädösten takia kaatopaikkakaasu vähenee kuitenkin tulevaisuudessa. [10]

Biojätteistä voidaan saada biokaasuprosessissa jopa 60 % enemmän energiaa kuin suorassa poltossa, koska esimerkiksi yhdyskuntien biojäte on yleensä suhteellisen märkää. Mahdollisuus biojätteen ravinteiden hyötykäyttöön yleensä menetetään suorassa poltossa, kun typpi muuntuu palaessa NO_x -päästöiksi (typen oksideiksi) sekä kalium, fosfori ja muut ravinteet päätyvät tuhkaan, jonka hyödyntäminen voi olla hankalaa. Tuotettaessa energiaa biojätteistä, myös niiden sisältämien ravinteiden kierrätys kasvintuotannon tarpeisiin on tärkeää. Ravinteita voidaan käyttää esimerkiksi peltobiomassan viljelyyn. [10]

Biojätteiden energiapotentiaali on pieni tuotettaessa biokaasua toisin kuin peltobiomassan. Peltobiomassa Suomen olosuhteissa voisi tuottaa vuodessa hehtaaria kohden jopa 20-40 MWh metaania. Vuotuisella puun kasvulla voidaan tuottaa vuodessa vajaa 10 MWh metaania per hehtaari. Peltobiomassaa hyödyntäessä biokaasun raaka-aineena on tärkeää tutkia tuotantoprosessin elinkaaren kestävyys eli ympäristövaikutukset ja energiataseet eli käytännössä tuotannon kasvihuonepäästöt sekä energiankulutus. Useimmissa tapauksissa biokaasun tuotanto on kestävämmällä pohjalla kuin nestemäisiä biopolttoaineita, kuten bioetanolia ja biodieseliä, tuotettaessa. Kestävyyteen vaikuttaa erityisesti energiakasvin viljely sekä kuljetus, ja biopolttoaineiden tuotannon täytyykin täyttää EU:n kestävyyskriteerit. [10]

3.3.1 Biokaasun puhdistus ja jalostus

Kun raakaa biokaasua puhdistetaan, siitä poistetaan epäpuhtauksia eli komponentteja, jotka estävät laitteiden toiminnan tai tuottavat ympäristöön haitallisia päästöjä. Puhdistuksen avulla pidennetään energiasovelluksessa käytettävän laitteiston huoltovälejä ja käyttöikää sekä huolehditaan siitä, että energiantuotannon päästöt pysyvät säädetyissä rajoissa. Jalostuksessa biokaasun jalostusarvoa ja siten energiatiheyttä kasvatetaan

poistamalla hyödyntämisen kannalta tarpeettomia komponentteja eli inerttikaasuja, kuten hiilidioksidia ja typpeä, jotka eivät kuitenkaan ole haitallisia. Nykyaikainen biokaasun hyödyntäminen vaatii biokaasun puhdistuksen. Jalostus ei ole teknisessä mielessä tarpeen energiasovelluksissa, mutta suuremman energiatiheyden ansiosta sen kuljettaminen ajoneuvoissa ja kaasuverkoissa on helpompaa. Puhdistusta ja jalostusta yleensä yhdistetään energiankulutuksen ja hankintakustannusten minimoimiseksi, jos se on mahdollista. [10]

Jalostettu biokaasu eli biometaani voidaan syöttää kaasuverkkoon tai käyttää sitä moottoripolttoaineena. Kaasumoottoreissa, erityisesti liikennekäytössä, vaaditaan polttoaineelta korkeaa energiapitoisuutta tilanpuutteen vuoksi ja siten jalostettua biokaasua eli biometaania käytetään kaasujoneuvoissa. Sähkön ja lämmön tuotantoon riittää puhdistettu biokaasu, sillä tilankäyttö ei stabiileissa ratkaisuissa ole ongelma, mutta myös jalostettua biokaasua voidaan käyttää. Kuinka puhdasta biokaasun täytyykään olla, riippuu sen käyttökohteesta. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että mitä paremmin biokaasu puhdistetaan käyttökohteen kannalta epäedullisista partikkeleista, sitä vähemmän huoltoa käyttökohteelle vaatii. Epäedullisia partikkeleita ei kuitenkaan voida tarkastella yksittäin näiden reagoimissa muiden partikkeleiden kanssa. Esimerkiksi hiilidioksidi ja rikkivety muodostavat veden kanssa reagoimissaan happoja, jotka aiheuttavat käyttökohteessa, esimerkiksi polttomoottorissa, korroosiota. Moottorisovelluksissa erityisesti rikkivedyt ja siloksaanit ovat ongelmallisia. [7, 10]

Puhdistuksessa poistetaan aina vähintään vesihöyry sekä rikkivety (H_2S), koska näitä on aina raakakaasussa ja yhdessä reagoimissaan ne muodostavat korrosoivaa rikkihappoa. Puhdistusprosessiin vaikuttaa aina raakakaasun koostumus sekä energiasovelluksessa käytettävien laitteiden laatuvaatimukset. Jalostuksessa poistetaan aina hiilidioksidia ja joskus myös typpikaasua. Hiilidioksidia ei ole tarkoitus kokonaan poistaa, koska se ei haittaa moottoreiden toimintaa. Hiilidioksidi parantaakin biokaasun moottoritekniistä laatua oktaanilukua nostamalla. Jalostuksessa ei ole tarkoitus puhdistaa biokaasua epäpuhtauksista, mutta esimerkiksi yleisin jalostusteknologia vesipesu on samanaikaisesti erittäin tehokas rikkivedyn puhdistusteknologia. [10]

Kaupallisia jalostusteknologioita ovat mm. fysikaalinen absorptio (vesipesu), fysikaalinen adsorptio (aktiivihili), kalvojalostus sekä kryojalostus. Fysikaalisessa absorptiossa kaasua liuennetaan nestemäiseen väliaineeseen, kuten veteen. Fysikaalisessa adsorptiossa kaasukomponentteja poistetaan kiinteän huokoisen väliaineen, adsorbentin, esimerkiksi aktiivihillen, avulla. Kalvojalostuksessa kaasumolekyylit erotetaan niiden molekyylikoon perusteella ohjaamalla biokaasu useiden kalvoerottimien läpi. Kryojalostuksessa hyödynnetään kaasumaisten, nestemäisten ja kiinteiden olomuotojen erottelua. Jalostusteknologioilla biokaasun metaanipitoisuus saadaan ainakin 98 %:n tasolle. [10]

3.4 Nestekaasu (LPG)

Nestekaasu on pääosin nesteytettyjen C_3 - ja C_4 -hiilivetykaasujen seos, sisältäen esimerkiksi propaania (C_3H_8), butaania (C_4H_{10}) ja isobutaania (C_4H_{10}). Nestekaasun koostumus vaihtelee merkittävästi jalostamon mukaan. Jotkut laadut voivat sisältää lähes pelkästään propaania tai butaania. Nestekaasu ei sisällä tyydyttymättömiä hiilivetyjä (kaksois- tai kolmoissidoksia hiiliatomien välillä), mikä tekee siitä hyvin laadukasta ja kemiallisesti stabiilia polttoainetta. [9, 26]

Nestekaasua saadaan pääosin seuraavista lähteistä sivutuotteena: raakamaakaasun puhdistuksesta ennen sen kuljetusta, raakaöljyn stabiloinnista (ylimääräisen propaanin ja butaanin poistaminen) öljynporauskentillä ennen sen kuljetusta sekä jalostamoista öljynjalostuksessa. Nestekaasua saadaan siis sivutuotteena raakaöljyn ja maakaasun jalostuksessa, joten nestekaasun on oltava halpaa. Mikäli öljylle tai maakaasulle ei olisi kysyntää, niin nestekaasua täytyisi tuottaa mahdollisesti muista lähteistä. Moottoripolttoaineeksi soveltuakseen nestekaasusta täytyykin vähentää vain rikkipitoisuutta päästöäädösten vuoksi. [9, 26]

Nestekaasu sopii myös ottomoottorin ja dieselmoottorin polttoaineeksi. Nestekaasun sisältämällä propaanilla on korkeampi oktaaniluku kuin korkealaatuisella bensiinillä. Tämä tarkoittaa, että propaanikäyttöiset moottorit voivat saavuttaa korkeamman puristussuhteen ja siten toimia paremmalla hyötysuhteella. Nestekaasulla ottomoottorin sytytys on tasaisempaa ja öljyn tarve on puolet tai vain kolmasosa siitä, mitä bensiinikäyttöinen ottomoottori tarvitsee. Propaania polttoaineenaan bensiinin sijasta käyttävä auto saavuttaa kuitenkin vain 0,88 kertaa sen kilometrimäärän per polttoainelitra kuin bensiiniä käyttävä auto. Hiilipohjaiset päästöt kuitenkin ovat propaania käyttävällä moottorilla merkittävästi pienemmät kuin bensiinikäyttöisellä moottorilla. [9]

Dieselmootto-reissa nestekaasua ei kuitenkaan voi käyttää ainoana polttoaineena sen komponenttien matalan setaaniluvun takia, minkä vuoksi puhtaalla nestekaasulla ei tapahdu sytytystä moottorissa. Tämän takia nestekaasu ei täysin voi korvata dieseliä polttoaineena vaan nestekaasua käytetään vain täydentävänä polttoaineena dieselmootto-reissa. Liiallinen helposti syttyvän nestekaasun puristus johtaa vain ennenaikaiseen sytytykseen ja moottorin nakutukseen. Dieselpolttoaineen puristussuhde on merkittävästi korkeampi kuin nestekaasun, joten nestekaasun lisäämistä dieselpolttoaineen sekaan on rajoitettava. Yleisesti on hyväksytty n. 40 %:n raja dieselin korvattavuudessa nestekaasulla. Tämän rajan ylityttyä moottori alkaa mm. nakuttaa ja käydä epätasaisesti. [9]

3.5 Polttoaineiden koostumus ja ominaisuudet Suomessa

Edellä käsitellyjä kaasumaisia moottoripolttoaineita (maakaasu, LNG, biokaasu, LPG) on kaikkia saatavilla Suomen markkinoilta. Niiden koostumus ja siten niiden ominaisuudet vaihtelevat maailmanlaajuisesti niiden tuotantoalkuperän ja käsittelyhistorian perusteella. Liitteen 1 taulukossa 1 on esitetty Suomessa yleisesti saatavilla olevien kaasulajien koostumuksia ja ominaisuuksia.

Suomeen tuleva maakaasu on peräisin Venäjän Siperian kaasukentiltä, mistä se tulee Imatran vastaanottoaseman kautta Suomen kaasuverkoston (ks. Kuva 2) [14]. Kaasuverkoston syötettävän maakaasun osalta rajoituksia on hiilidioksidin, hapen sekä rikkiyhdisteiden osalta. Muiden kaasukomponenttien osalta rajoituksia raja-arvoineen ei ole annettu vaan niiden rajoitukset perustuvat suhteelliseen tiheyteen, Wobbe-indeksiin ja metaanilukuun. Tarkat tiedot rajoituksista on annettu standardissa EN 16726:2015. Kaasuverkoston syötettävä maakaasu käy sellaisenaan CHP-sovelluksiin sekä liikennepolttoaineeksi. [27]

Porissa sijaitsee Suomen ensimmäinen LNG-terminaali. Suurin osa Poriin saapuvasta LNG:stä on peräisin Norjasta. LNG:tä voidaan kuljettaa myös Euroopan suurista välivarastoista, kuten Belgiasta, joihin LNG on tuotu esimerkiksi Lähi-idästä ja Yhdysvalloista. [28] Vuonna 2017 Norjasta saapui Poriin 47 tuhatta tonnia LNG:tä ja Belgian välivaraston kautta 7 tuhatta tonnia [29].

Suomessa käytettävän biokaasun koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat paljon biokaasun raaka-aineiden perusteella. Biokaasun komponenteista metaani ja vety ovat energiakaasuja, hiilidioksidi ja typpi inerttikaasuja. Loput komponentit ovat epäpuhtauksia. Maakaasulle on olemassa standardi liikennepolttoainekäyttöön (ISO 15403), mutta biokaasulle ei ole vielä vastaavaa standardia [10, 30]. Suomessa kaasuverkoston syötettävän biometaanin laadun on täytettävä maakaasun laatuvaatimukset edellä mainitun standardin EN 16726:2015 mukaisesti siltä osin, kuin niitä ei ole tarkennettu biometaanille. Tämän lisäksi biometaanin laadun on täytettävä standardin SFS-EN 16723-1 laatuvaatimukset. [27] Kaasuverkkoon syötettävä jalostettu biokaasu eli biometaani kelpaa sellaisenaan liikennepolttoaineeksi sekä CHP-sovelluksiin. Liitteen 1 taulukossa 1 olevan biokaasun lämpöarvo on ilmoitettu puhdistetulle biokaasulle, kun taas koostumus on ilmoitettu raaka-alle reaktoribiokaasulle. Puhdistuksessa poistetaan vain epäpuhtaudet kaasusta ja niiden osuuden ollessa pieni, ei puhdistuksella ole juurikaan vaikutusta lämpöarvoon [10].

Nestekaasua saadaan Suomessa Porvoon öljynjalostamolta. Öljynjalostamolle tuodaan nestekaasun raaka-aineita junalla Venäjältä. [31] Suomessa nestekaasu sisältää suurimmaksi osaksi propaania sekä pienen määrän butaania. Vuonna 2016 Suomessa kulutettiin 12338 terajoulea (TJ) nestekaasua energiamääränä mitattuna [32].

3.5.1 Polttoaineiden verotus yhdistetyssä sähkön- ja lämmön-tuotannossa Suomessa

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannon verotuksessa peruseriaatteena on, että sähkön tuotannossa kulutettu polttoaine on verotonta, mutta lämmön tuotannossa kulutettu polttoaine on verollista. Lämpöä verotetaan yhdistetyssä tuotannossa sen lämpömäärän osalta, joka saadaan kertomalla 0,9:llä kulutukseen luovutettu hyötylämpömäärä. Eri polttoaineiden osalta lämpöä verotetaan niiden kulutussuhteen mukaan. Polttoaineiden verotus koostuu kolmesta osasta: energiasisältöverosta, hiilidioksidiverosta sekä huoltovarmuusmaksusta. Vuoden 2019 alusta lähtien yhdistetyssä tuotannossa polttoaineiden energiasisältöveroa alennetaan 100 %:lla eli energiasisältöveron osuus laskee nolnaan. Aiemmin hiilidioksidivero on puolitettu yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineiden verotuksessa. Kaasumaiset ja kiinteät biopolttoaineet ovat kuitenkin täysin verottomia ja huoltovarmuusmaksuttomia yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 1) on koottu tässä kappaleessa (Kappale 3) esille tuotujen polttoaineiden verotus yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa tuotetun lämmön osalta, sillä tuotetun sähkön osalta polttoaineet ovat verottomia. [33-35]

Taulukko 1. Bio-, maa- ja nestekaasun verotus yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa lämmön osalta. Koottu lähteistä [33-37].

Polttoaine	Energiasisältö- vero	Hiilidioksidi- vero	Huoltovarmuus- maksu	Yhteensä
Biokaasu, €/MWh	0	0	0	0
Maakaasu, €/MWh	0	12,94	0,084	13,02
Nestekaasu snt/kg	0	18,09	0,11	18,20

Nesteytetyn maakaasun osalta se oletetaan höyrystyneeksi, eli kaasumaiseksi maakaasuksi, ennen sen käyttöä polttoaineena yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa.

4. ENERGIAVARASTOT

Hyötyenergian kulutus ja tuotanto on oltava joka hetki tasapainossa. Poikkeamia normaaliin tuotanto- ja kulutusyksiköiden toimintarytmiin kuitenkin ilmenee, mikä tarkoittaa energian tuotantoon ja kulutukseen puuttumista sekä näiden takia syntyviä lisäkustannuksia. Ongelmia saattavat aiheuttaa käytettävän polttoaineen saatavuuden ennustamattomat vaihtelut sekä kulutuksen riippuvuus sääolosuhteista. Myös uusiutuvien energialähteiden, kuten auringon säteilyintensiteetistä ja pilvisyydestä riippuvan aurinkovoiman, käyttö lisää energian tuotannon ennustamattomuutta. [38, 39]

Tuotetun energian varastointi energiavarastoihin ennen loppukäyttöä lisää joustavuutta kysynnän ja tarjonnan välille. Ylimääräistä tuotettua energiaa voidaan varastoida matalan kysynnän tunteina ja tätä varastoitua energiaa voidaan käyttää täyttämään energian tarvetta korkean kysynnän tunteina. Yleisiä varastoituja energiamuotoja ovat sähkö ja lämpö. Sähköä ja lämpöä varastoitaessa, osa varastoidusta energiasta yleensä menetetään. Näiden lisäksi varastointi aiheuttaa investointi- ja ylläpitokustannuksia. Tämän takia varastosta otettavan energian arvo energiayksikköä kohti on oltava merkittävästi suurempi kuin varastoitavan energian tuotantokustannukset energiayksikköä kohti. [38, 39] Esitellään seuraavaksi sähkön ja lämmön varastointia sekä näiden sovelluksia.

4.1 Sähkövarastot

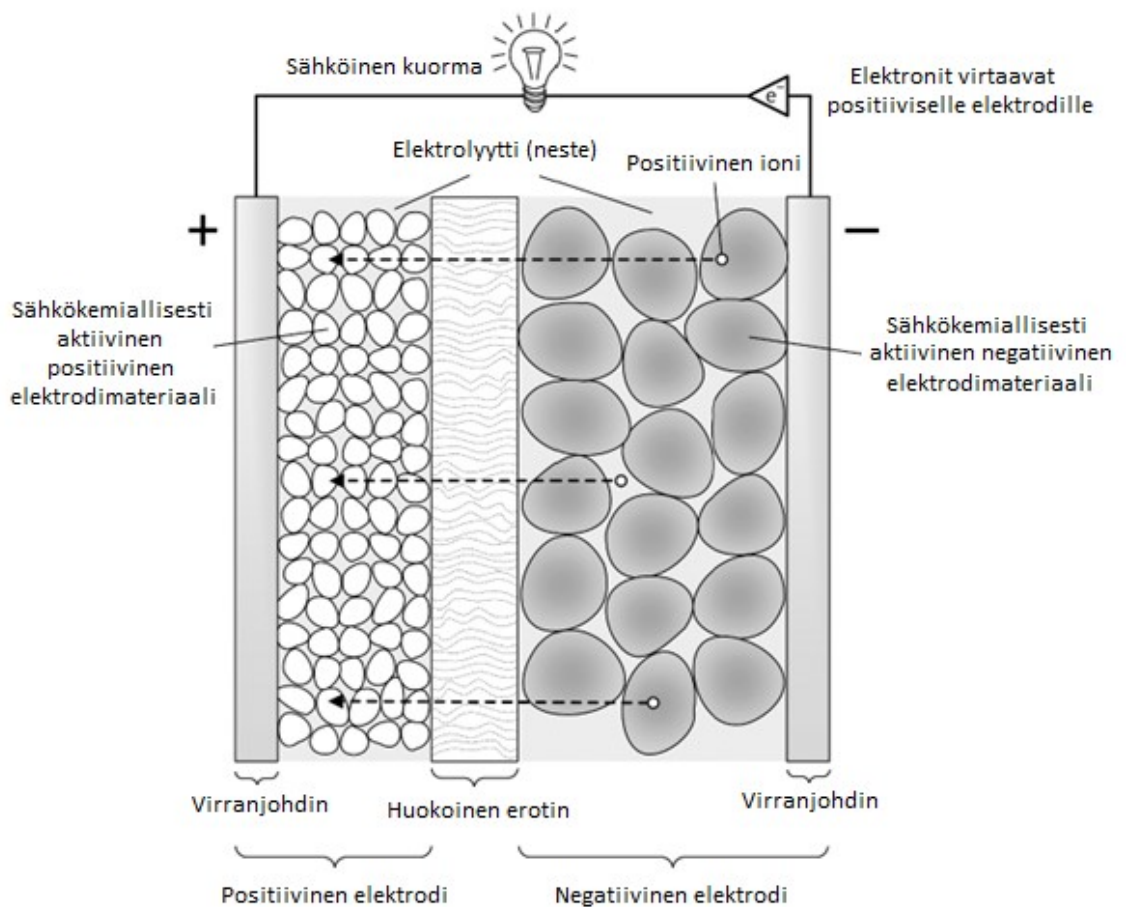
Sähköverkoissa sähköenergian tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa joka hetki. Tällä hetkellä sähköverkkoon kytkettyjä sähkön varastointisovelluksia on melko vähän, joten sähköenergian tuottajien on joka hetki säädeltävä sähkön tuotantoa vastaamaan kulutusta. Sähkövarastojen avulla tätä jokahetkistä tuotannon ja kulutuksen tasapainoa voidaan muuttaa, mikä lisäksi sähköverkon toimitusvarmuutta sekä pienentäisi sähkön tuotantoon käytettyä polttoainemäärää ja siten hiilijalanjälkeä. [40]

Sähkövarastoihin lähes poikkeuksetta sähkö muutetaan joksikin toiseksi energiamuodoksi varastoimista varten ja purettaessa energia muutetaan takaisin sähköksi. Tämän energiamuutoksen takia osa alkuperäisestä energiasta menetetään. [38]

Sähkövarastoista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä akkuja ja paristoja. Akuista puhuttaessa ne mielletään yleensä ladattaviksi eli sekundäärisiksi sähkövarastoiksi ja paristojen tapauksessa tarkoitetaan ei-ladattavia eli primäärisiä sähkövarastoja. Nämä ovat laitteita, joihin sähkö on varastoitu kemialliseksi energiaksi. Tällaisen sähkövaraston tehtävänä on muuttaa siihen varastoitu kemiallinen energia sähköenergiaksi sähkökemiallisten hapettumis-pelkistymisreaktioiden kautta. Ladattaessa sähkövarastoa tämä prosessi

on käänteinen. Tämä reaktio sisältää elektronien siirtymistä materiaalista toiseen virtapiiriin kautta. [40]

Usein puhuttaessa paristoista ja akuista, on sähkökemiallinen yksikkö kuitenkin kenno. Akut ja paristot muodostuvat näiden kennojen sarjaan- ja rinnankytkennöistä halutun jännitteen ja kapasiteetin aikaansaamiseksi. [40] Kennot koostuvat neljästä pääkomponentista: positiivisesta (usein kutsutaan katodiksi) ja negatiivisesta elektrodista (usein kutsutaan anodiksi), elektrolyytistä sekä erottimesta (separaattori). Näiden osien toimintaa on kuvattu seuraavassa kuvassa (Kuva 4) kennon varausta purettaessa. [41]



Kuva 4. Sähkökemiallisen kennon rakenne ja toiminta, kun kennon varausta puretaan. Muokattu lähteestä [41].

Kuvassa (Kuva 4) oikealla on negatiivinen elektrodimateriaali, vasemmalla positiivinen elektrodimateriaali, näiden välissä huokoinen erotin sekä elektrodit yhdistävä virtapiiri kuvan yläosassa. Purettaessa sähkökemiallista kennoa elektronit siirtyvät virtapiiriä pitkin negatiiviselta elektrodilta positiiviselle elektrodille luovuttaen sähköenergiaa kuormana olevalle lampulle. Samanaikaisesti positiiviset ionit siirtyvät negatiiviselta elektrodilta positiiviselle elektrodille elektrolyytissä huokoisen erottimen läpi, jotta kennon varaus pysyy tasapainossa. [41]

Akut voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: energia- ja tehoakkuihin. Energia-akkujen tuotannossa on painotettu suurta energian varastointikapasiteettia, kun taas lataus- ja purkausteho on vähemmän tärkeää. Tehoakkujen tapauksessa tilanne on päinvastainen. Sähköverkkoon kytkettynä energia-akuilla on potentiaalia varastoitaessa suuria määriä sähköä sähkömarkkinoiden arbitraasitilanteiden hyödyntämiseksi. Yksinkertaisesti sanottuna tämä tarkoittaa energia-akun lataamista halvan markkinasähkön tunteina ja sen purkamista kalliimpina markkinasähkön tunteina, jolloin tuotto saadaan näiden hintojen erotuksena. Tehoakkuja voidaan käyttää suuren lataus- ja purkaustehonsa ansiosta sähköverkon taajuuden ja jännitteen säätöön. [40]

4.1.1 Litiumioniakku

Litiumioniakkuja käytetään, kun tilavuus ja massa ovat mitoitusperusteina. Litium on erittäin elektropositiivinen sekä kevyt alkuaine, jolla saadaan akustoihin korkea jännite sekä korkea energiasisältö massayksikköä kohden (Wh/kg) eli korkea energiatiheys. Negatiivinen elektrodi on yleensä grafiittista hiiltä ja positiivinen elektrodi on litiumkoolttioksidia (LCO) tai -rautafosfaattia (LFP). Elektrolyytinä toimii litiumheksafluorofosfaatti, (LiPF₆) orgaanisen liuottimen kanssa, sillä litium on käyttökelpoton yleisesti käytetyn elektrolyytin, veden, kanssa yhdisteenä. Palamisherikän orgaanisen elektrolyytin sekä litiummetallin takia turvallisuusnäkökulmat ovatkin haaste litiumioniakuissa. [41]

Litiumioniakun toimintaperiaate on seuraava: Litiumionit kulkevat negatiivisen ja positiivisen elektrodin välillä. Kun akkua ladataan, litiumionit pakotetaan sähkövirralla negatiiviselle elektrodille, jossa niiden energiasisältö on korkea. Akun purkamisen aikana litiumionit kulkevat positiiviselle elektrodille, jossa niiden energiasisältö on matala. Energiasisältöjen erotus, häviöt mukaan lukien, menee kuormalle, esimerkiksi sähkömoottorille, joka liikuttaa sähköajoneuvoa. Litiumionien saavuttaessa negatiivisen tai positiivisen elektrodin, ne tunkeutuvat syvälle elektrodin kristallimaiseen kemikaaliseen rakenteeseen. Litiumionit eivät juurikaan vuorovaikuta elektrodimateriaalien kanssa verrattuna muihin akustomateriaaleihin, minkä takia litiumioniakut kestävät tuhansia lataus-purkaussyklejä. [41]

Litiumioniakkujen valmistus, kuljetus ja käyttö sisältävät aina riskejä. Elektrodit sekä elektrolyytti ovat vaarallisia. Positiivisen elektrodin rakenne voi romahtaa ylikuormituksesta vapauttaen happea johtaen hallitsemattomaan lämpötilan nousuun (engl. thermal runaway) ja polttaen paloherkän elektrolyytin. Negatiivinen elektrodi voi esimerkiksi pienestään latausvirheestä johtuen koota metallista litiumia elektrodin pinnalle. Tämä metallinen litiumi voi läpäistä erottimen (separaattorin) ja oikosulkea negatiivisen ja positiivisen elektrodin johtaen lämpötilan nousuun ja sytyttää elektrolyytin palamaan. Myös kennojen koko ja muoto tulee valita tarkoin, valmistusolosuhteet täytyy olla riittävät sekä on käytettävä kehittynyttä akun hallintajärjestelmää (engl. BMS = Battery Management

System), jotta välttyttäisiin yli-, alikuormitukselta, ylivirralla sekä yli- ja alilämpötilalta, jotta litiumioniakun turvallisuutta saadaan parannettua. [41]

Litiumioniakut hallitsevat akustomarkkinoita seuraavista niille tyypillisistä ominaisuuksista johtuen [41, 42]:

- korkea kennojännite, 3,2...3,7 V litiumin ja grafiitin yhdistelmän takia,
- korkea energiatiheys (Wh/kg tai Wh/l) osittain edellisen ja litiumin keveyden takia,
- korkea tehotiheys (W/kg tai W/l),
- korkea hyötysuhde 92...96 %,
- hyvä varastointikestävyys (engl. shelf life) sekä
- laaja käyttölämpötila-alue, (-20 °C...+60 °C) joka on tyypillinen myös muille akustoille.

Energia- ja tehoakuille voidaan käyttää erilaisia elektrodimateriaaleja sekä litiumioniakustojen rakennetta voidaan muokata sopivaan tarkoitukseen. Energia-akut optimoidaan maksimaaliseen energiaan (Wh/kg tai Wh/l), jolloin akun materiaalit valitaan jännitteen (V) ja kapasiteetin (Ah) maksimoimiseksi, mutta haittapuolena voi olla huonontunut turvallisuus sekä käyttöikä. Tehoakuissa priorisoidaan tehoa (W/kg tai W/l), joten akun materiaalit pitää valita nopean reaktiokyvyn kannalta. Nikkelimangaanikobalitti (NMC)/grafiitti -elektrodimateriaaliyhdistelmä on suosittu, sillä sitä pidetään kompromissina sen antaman keskimääräisen energian, tehon ja turvallisuuden kannalta ja onkin tuotetuin litiumioniakkutyyppejä. [41]

Energia-akuille tyypillisiä ominaisuuksia ovat:

- paksu kerros sähköaktiivista materiaalia eli elektrodimateriaalia virtajohtimissa, jolloin saadaan kennoon enemmän elektrodimateriaalia sekä vähemmän kuparia ja alumiinia virtajohtimiin,
- elektrodit tiivistetään suurella voimalla, jotta tilavuusyksikköä kohden saadaan maksimaalinen määrä elektrodimateriaalia,
- virranjohtamista lisäävien aineiden määrä minimoidaan, jotta elektrodimateriaalia mahtuu enemmän kennoon,
- elektrodimateriaalien partikkelikokoa kasvatetaan ja samalla niiden yhteenlasketua reaktiopinta-alaa pienennetään, jotta haittareaktioiden määrä pienenee ja siten kennon käyttöikä kasvaisi erityisesti korkeammassa lämpötiloissa.

Tehoakuissa edellä kuvatut ominaisuudet ovat päinvastaisia. [41]

4.2 Lämpövarastot

Lämpöenergiaa voidaan varastoida nostamalla tai laskemalla väliaineen lämpötilaa, muuttamalla sen olomuotoa esimerkiksi kiinteästä nestemäiseksi tai käyttämällä jotakin

yhdistelmää näistä kahdesta menetelmästä. Lämpövarasto on väliaikainen varasto korkean tai matalan lämpötilan energialle myöhempää käyttöä varten. Varaston sisältämän lämpöenergian lämpötila määrittääkin sille potentiaalisen käyttökohteen. Lämpövarastoihin voidaan varastoida esimerkiksi auringosta saatavaa lämpöä yön yli käytettävään lämmitykseen tai kesällä saatua lämpöä talvikauden tarpeisiin. Yhden kilowattitunnin lämpöenergian varastoiminen voidaan tehdä esimerkiksi lämmittämällä tonni vettä 0,86 °C:lla tai lämmittämällä 10 kg vettä 86 °C:lla. Näistä jälkimmäinen on kuitenkin yleensä hyödyllisempi lämmitystarkoituksiin. [39]

Peruseriaate kaikissa lämpövarastoissa on sama: energiaa varastoidaan lämpövarastoon sen myöhempää käyttöä varten. Mikä kuitenkin vaihtelee, on lämpövarastojen varastointimenetelmä sekä kokoluokka. Lämpövarastot perustuvat kolmeen eri varastointimenetelmään: tuntuvan lämmön varastointi, latenttilämmön varastointi sekä termokemiallinen varastointi. Tuntuvan lämmön muutokset materiaalissa riippuvat sen ominaislämpökapasiteetista sekä lämpötilan muutoksesta. Tuntuvan lämmön lämpövarastot käyttävät useimmiten kiviä tai vettä lämmön varastoinnin väliaineena. Latenttilämmön muutokset liittyvät materiaalin olomuodon muutoksiin lämpötilan ollessa vakio. Yleensä materiaalin olomuoto muuttuu kiinteästä nestemäiseksi latenttilämpösovellutuksissa. Esimerkiksi yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa tuotettu lämpö on tuntuvaa lämpöenergiaa ja siten sen varastoimiseen käytetään yleensä vettä väliaineenaan käyttäviä tuntuvan lämmön varastointisovelluksia. [39, 43, 44]

Tuntuvan lämmön lämpövarastoon varastoitua energiaa voidaan kuvata seuraavasti. Väliaineen lämpötilaa nostamalla sen energiasisältö myös kasvaa. Väliaineen massan m lämmittämiseen tarvittavaa energiaa E lämpötilasta T_1 lämpötilaan T_2 voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä (2) [39]:

$$E = mC(T_2 - T_1) \quad (2)$$

jossa C on väliaineen ominaislämpökapasiteetti. Esimerkiksi veden korkea ominaislämpökapasiteetti (n. 4,2 kJ/kg °C) tekee siitä loogisen väliaineen lämpövarastoille, joiden toimintalämpötila on suunniteltu kiinteistöjen lämmitys- ja viilennystarpeisiin. Toisaalta yhtälö kuvaa myös kuinka paljon energiaa väliaineen massaansa sitoutuu, kun sen lämpötila kohoaa. Käänteisesti sama lämpöenergia saadaan väliaineesta sen lämpötilan laskeessa. Lämmön ollessa varastoituneena väliaineeseen siitä on kuitenkin lämpövirta ympäröivään tilaan, mikä aiheuttaa häviöitä eli kaikkea varastoitua energiaa ei voida hyödyntää. [39]

Käytön, kokoluokan ja kapasiteetin kannalta energiavarastot voidaan jakaa lyhytaikaisiin varastoihin, joiden tarve on tunneista viikkoihin (esimerkiksi pientalojen lämminvesivaraaja) sekä pitkäaikaisiin tai kausivarastoihin, joihin lämpöä varastoidaan valtavaan ka-

pasiteettiin kuukausien tarpeiksi (esimerkiksi kallioluolat). Näiden kahden välille on vaikea määrittää selkeää rajaa, mutta kaikki varastointimenetelmät ja -tekniikat soveltuvat pääosin molempiin tarkoituksiin. Päivittäiseen käyttöön tarkoitetuilla lämpövarastoilla on selviä etuja: investointikustannukset ja energiahäviöt ovat yleensä pieniä sekä ne ovat kokonsa puolesta helposti liikuteltavissa. Kausivarastojen investoinnit ovat suuria niiden vaatiessa suuren varastointitilan ja kalliin energianjakelujärjestelmän. Kausivarastojen kannattavuuteen liittyy myös huomattavia riskejä. [38, 39]

4.2.1 Kaukolämpöakku

Lämpövarastojen avulla lisätään energiantuottajan lämmönjakelun joustavuutta poistamalla lämmön tuotannon ja kulutuksen eriaikaisuudesta aiheutuvia rajoituksia. Suuri osa Suomessa sijaitsevista lämpövarastoista on rakennettu osaksi CHP-laitoksia. Euroopassa CHP-laitosten yhteydessä noin 15 % CHP-laitoksista sisältää lämpövarastojärjestelmän [45]. CHP-tuotannossa lämpövarastojen avulla voidaan maksimoida sähkön tuotantoa varastoimalla tuotettu lämpö lämpövarastoon, jos sähkön tuotanto on kyseisellä hetkellä kannattavampaa kuin lämmön tuotanto. Jos kyseessä on kaukolämpöverkkoon liitetty lämpövarasto, lämpövarastoon varastoidaan lämpöä alhaisen kaukolämmön tuotantokustannusten tai kysynnän aikana ja lämpöä puretaan varastosta korkean kaukolämmön tuotantokustannusten tai kysynnän aikana. Näin saadaan tasoitettua hinta- ja kulutuspiikkejä. Esimerkiksi ilmasto-olosuhteiden vuoksi lämmön kysyntä vaihtelee Suomessa vuodenajan mukaan voimakkaasti, mikä lisää lämmön tuotantokustannuksia. [38, 44]

Kaukolämpöverkkoon kytketyistä lämpövarastoista käytetään nimitystä kaukolämpöakku, jollainen löytyy käytännössä kaikista Suomen suurista kaupungeista. Kaukolämpöakkuun voidaan varastoida lämpöä ja purkaa sitä tarvittaessa. Väliaineena näissä lämpöakuissa toimii yleensä vesi. Kaukolämpöakuilla saadaan nostettua kaukolämmön perustuotantolaitoksen vuotuista käyttöastetta ja pienennettyä öljykattiloiden käyttöä huippukysyntätunteina, jolloin peruskuormalaitoksen kapasiteetti ei ole riittävä. Lämpövarastoa voidaan myös hyödyntää vikatilanteissa: tuotantohäiriöissä tehoreservinä, putkivauriotapauksissa vesireservinä, mikäli kaukolämpöakku on suoralla kytkennällä kaukolämpöverkossa sekä verkoston paineen säädössä paineensäätöjärjestelmän osatekijänä tai paisuntasäiliönä. [46]

Kaukolämpöakut ovat yleensä suuria sylinterinmuotoisia paineistettuja tai paineettomia terässäiliöitä. Akku liitetään kaukolämpöverkkoon joko suoralla tai epäsuoralla (lämmönvaihtimen kautta) kytkennällä. Suurin osa Suomessa olevista kaukolämpöakuista on suoralla kytkennällä liitetty kaukolämpöverkkoon, jolloin kaukolämpöverkossa ja -akussa kiertää sama vesi. Akun sisääntulolle asennetaan kuristusventtiili ja ulostulolle pumppu, jolloin saadaan kaukolämpöverkon ja -akun paine-ero hoidettua. Epäsuorasti kytketyssä akussa lämmönvaihdin aiheuttaa merkittäviä lisäinvestointikustannuksia sekä häviöitä ja

akkua ei myöskään voida käyttää vesireservinä. Epäpuhtauksien pääsy kaukolämpöverkkoon kuitenkin estetään ja akun puhtausvaatimuksista voidaan tinkiä. [46] Fortumin Suomenojan yhteistuotantolaitokselle suunniteltu kaukolämpöakku on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 5) [47].



Kuva 5. Fortumin Suomenojan voimalaitokselle suunniteltu kaukolämpöakku. Vesisäiliön tilavuus 20000 kuutiota, johon voidaan varastoida 800 MWh lämpöenergiaa. Korkeus 43 metriä ja leveys 26 metriä. [47]

Suoran kytkennän kaukolämpöakkuja ladattaessa säiliön yläosaan päästetään kuumaa menovettä ja alaosasta pumpataan jäähtynyttä vettä paluujohtoon. Purettaessa akkuja säiliön alaosaan päästetään jäähtynyttä paluuvettä ja vastaava määrä kuumaa menovettä pumpataan kaukolämpöverkkoon. Kuuman ja jäähtyneen veden välille syntyy lämpötilan gradienttikerros. Tässä kerroksessa lämpötila muuttuu nopeasti ja se onkin pidettävä mahdollisimman ohuena, jotta lämpöakun hyötysuhde olisi mahdollisimman suuri. Tyhjennyksen ohessa osa gradienttikerroksesta poistetaan sen kasvaessa ajan kuluessa. Kuuman ja jäähtyneen veden sekoittumista estetään erillisillä virtauksenohjaimilla hidastaen sisäänvirtausta, kun akkuja ladataan ja puretaan. Tämä edelleen parantaa lämpöakun hyötysuhdetta. [46]

Terässäiliöllä toteutettuun lämpöakkuun voidaan varastoida lämpöä riittämään aamuisin ja iltaisin syntyviä kuormahuippuja varten. Ne ovatkin tarkoitettu lämmön lyhytaikaisvarastointiin ja niiden kapasiteetti kestänee normaalisti 6-12 tunnin kulutusta. Pitkäaikaiseen varastointiin sopisivat kallioluolat. Kaikki akkuvaihtoehdot on kuitenkin sijoitettava lähelle kaukolämpöverkon runkoputkea tai voimalaitosta, koska pitkät siirtoetäisyydet lisäävät rakennuskustannuksia sekä lämpöhäviöitä. [48]

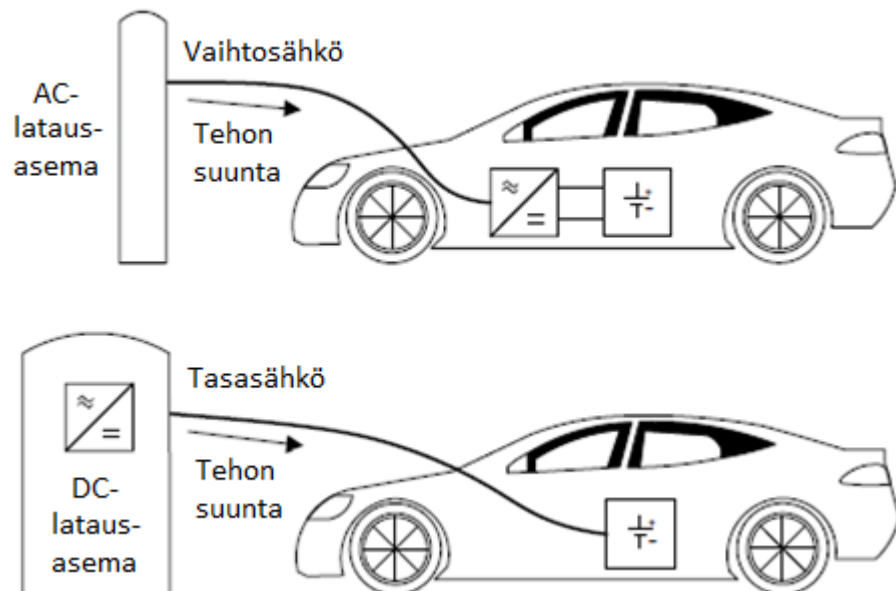
Myös kaukolämpöverkkoa voidaan käyttää lyhytaikaisen kulutuksen kasvua ennakoiden lämpövarastona kulutuspiikkien leikkaamiseen. Lämpöä varastoidaan kaukolämpöverkoon nostamalla menoveden lämpötilaa, yleensä 5...15 °C, mikä kestää yleensä 2-3 tuntia. Tämän ajan verran voidaan tuottaa CHP-laitoksissa esimerkiksi sähköä primäärituotteena korkean sähkön hinnan tunteita varaten samanaikaisesti tuotettu lämpö kaukolämpöverkkoon. [48]

5. SÄHKÖLATAUS JA KAASUTANKKAUS

Tässä kappaleessa esitellään yleisiä lataus- ja tankkausvaihtoehtoja sähkö- ja kaasuajoneuvoille, näiden julkiset lataus- ja tankkauspaikat sekä muita sovellutuksia. Tässä kappaleessa käytettävällä termillä sähköajoneuvo tarkoitetaan lähtökohtaisesti samaa kuin termillä sähköauto eli sähköistä henkilöautoa, ellei asiayhteydessä ole muuta mainittu. Sähköajoneuvolla voidaan yleisesti kuitenkin tarkoittaa myös kevyttä (esimerkiksi sähköskootteri) tai raskasta (esimerkiksi sähkökuorma-auto) liikennevälinettä.

5.1 Sähköajoneuvojen lataus

Sähköajoneuvojen (engl. EV = Electric Vehicle) akusto voidaan ladata joko latausasemalla tai pistorasian kautta. Sähköajoneuvojen lataus voidaan jakaa tasa- (engl. DC = Direct Current) ja vaihtosähköllä (engl. AC = Alternating Current) tapahtuvaan lataukseen. Vaihtosähkölatauksen ja tasasähkölatauksen eroa on havainnollistettu seuraavassa kuvassa (Kuva 6) [41].



Kuva 6. Vaihto- ja tasasähkölataus. Muokattu lähteestä [41].

Vaihtosähkölatauksessa (Kuva 6 yläosa) laturina käytetään sähköajoneuvojen omaa laturia ja vaihtosähkö syötetään latausaseman kautta sähköajoneuvoon. Tasasähkölatauksessa (Kuva 6 alaosa) laturina käytetään latausaseman omaa laturia, joka syöttää tasasähköä sähköajoneuvoon. Tasasähkölatauksessa latausaseman laturi voidaan mi-

toittaa suuremmaksi kuin sähköajoneuvojen oma laturi, sillä latausasemaa ei tarvitse liikuttaa ja siten sen koko ei koidu ongelmaksi. Suurempi laturi tasasähkölatausasemalla mahdollistaa suuremman lataustehon verrattuna vaihtosähkölataukseen.

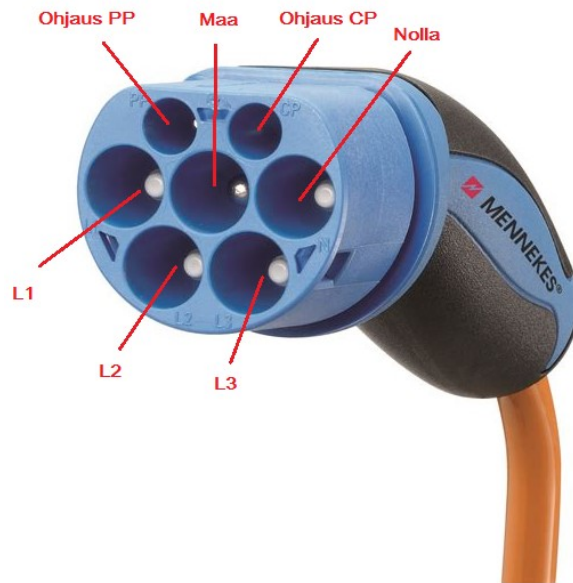
5.1.1 Lataustavat 1, 2, 3 ja 4

Kansainvälinen standardi IEC 61851-1 määrittelee neljä erilaista lataustapaa: tapa 1, tapa 2, tapa 3 ja tapa 4. Lataustapaa 1 käytetään kevyille sähköajoneuvoille kuten mopuille ja skoottereille pienellä virralla ja/tai lyhyellä latausajalla. Lataustapoja 2, 3 ja 4 käytetään pääosin sähköisille henkilöautoille. Lataustavat 1, 2 ja 3 käyttävät vaihtosähköä ja lataustapa 4 käyttää tasasähköä. [41]

Lataustapaa 1 käytetään kevyiden sähköajoneuvojen pienitehoiseen vaihtosähkölataukseen. Laturia syötetään tavanomaisesti maadoitetusta 230 V kotitalouspistorasiasta, joka on suojattu 30 mA vikavirtasuojalla. [49]

Lataustapa 2 on tilapäinen lataustapa hitaaseen lataukseen sähköautoille, jos lataustapaa 3 ei ole saatavilla. Sähköautoa syötetään joko kotitalouspistorasiasta tai teollisuuspistorasiasta. Pitkäaikainen virta täytyy rajoittaa kotitalouspistorasiasta ladattaessa 8 ampeeriin mahdollisen pistokkeiden ja sähköasennusten ylikuumentumisen vuoksi, koska kotitalouspistorasiat on suunniteltu kestämään 16 ampeerin täyttä virtaa vain kaksi tuntia yhtäjaksoisesti. Teollisuuspistorasioilla ei ole samankaltaisia rajoituksia. Sähköauto on liitettävä latauspisteeseen vaatimukset täyttävällä latausjohdolla, joka sisältää ohjaus- ja suojalaiteyksikön. [41, 49]

Lataustapa 3 on suositeltavin lataustapa jokapäiväiseen lataukseen sähköautolle ja sitä kutsutaankin peruslataukseksi. Sähköajoneuvossa sijaitsevaa laturia syötetään sähköajoneuvoille suunnitellulla latausjohdolla ja latausvirta voi olla yksivaiheisesta 6 ampeerista kolmivaiheiseen 63 ampeeriin. Suurimmalla virralla voidaan saavuttaa maksimissaan 43 kW latausteho, mutta latausteho on yleensä rajoitettu sähköajoneuvon oman laturin mukaan. Tyypillisesti sähköajoneuvoissa on yksivaiheinen laturi, millä saadaan suunnilleen 25 ampeerin latausvirta ja noin 6 kW latausteho. Joissain sähköajoneuvoissa on myös kaksi- tai kolmivaiheinen laturi, jolla saadaan suurempi latausteho jopa 22 kW 3x32 ampeerin virralla. Euroopassa on laajasti käytössä IEC 62196-2 mukaiset latauspistokkeet ja ajoneuvovastakkeet. Suomessa vastaava kansallinen standardi on SFS-EN 62196-2. Latausjärjestelmään kuuluu myös väylä tiedonsiirtoa varten, jolla varmistetaan ajoneuvon oikea ja turvallinen kytkentä sekä sillä voidaan ohjata kuormaa ja virran syöttöä molempiin suuntiin. [41, 49] Vaihtosähkölataukseen käytettävä MENNEKES-pistoke on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 7) [50].



Kuva 7. MENNEKES-pistoke vaihtosähkölataukseen. Perustuu lähteeseen [50].

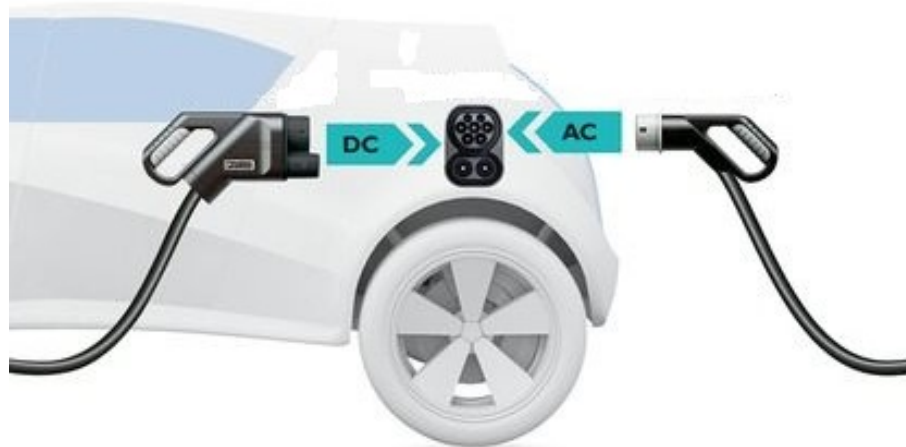
Kuvassa (Kuva 7) esitetty pistoke liitetään latausasemaan. Se sisältää liittynät kaikille kolmelle vaihtosähkön vaiheelle (L1, L2 ja L3), maadoituksen, nollajohtimen sekä kaksi ohjausliityntää (Ohjaus PP = Proximity Pilot ja Ohjaus CP = Control Pilot) tiedonsiirtoa varten. Näillä ohjausliitynnöillä kommunikoidaan auton ja latausaseman välillä. MENNEKES-pistoketta voidaan käyttää lataustavoissa 2 ja 3. [41]

Lataustapa 4 eli teholataus tai pikalataus lataa sähköajoneuvon akustoa tasasähköllä suurella virralla latausaseman tasasähkölaturin (ks. Kuva 6 alaosa) kautta. Laturin sijaitessa latausasemassa eli auton ulkopuolella, mahdollistaa tämä erittäin suurien latausvirtojen ja siten lataustehon käytön. Tyypillisesti lataustavan 4 lataustehot ovat nimellisesti 50 kW, mutta kaupallisesti on myös saatavilla 150 kW:n ja 20 kW:n latureita. Lataustehoja ollaan kasvattamassa jopa 450 kW saakka [51]. Yleensä suurimmat tehot lataukseen otetaan latausjakson alussa ja tämän jälkeen käytettävä latausteho laskee latausjakson jatkuessa eli akkua ladataan suhteellisesti eniten latausjakson alussa ja vähemmän latausjakson loppupuolella. Pikalataus on erityisen hyödyllinen suuren akustokapasiteetin lataukseen, jos lataukseen ei ole esimerkiksi tuntia kauempaa aikaa. Euroopassa lataustapaan 4 käytettäviä latauspistokkeita ja ajoneuvovastakkeita on kuvattu standardissa IEC 62196-3. Kuvassa (Kuva 8) [52] on Euroopassa yleisesti käytetty ”Combo 2” -latauspistoke ja -ajoneuvovastake. Tämä mahdollistaa yhdistelmä latauksen (engl. CCS = Combined Charging System). [41, 49]



Kuva 8. CCS-tyypin latauspistoke ja ajoneuvovastake. [52]

Kuvassa (Kuva 8) vasemmalla on esitetty sähköajoneuvoon liitettävä latauspistoke tasasähkölatausta varten. Pistokkeessa kolme ylintä liityntää ovat samat kuin MENNEKES-pistokkeessa (ks. Kuva 7) eli ohjausliitynnät (CP ja PP) sekä maadoitusliityntä. Alemmat isommat liitynnät ovat tasasähkölatausliityntöjen plus- ja miinusnavat. Kuvassa (Kuva 8) oikealla on ajoneuvovastake eli sähköajoneuvossa sijaitseva latausliityntä. Kuten huomataan, tämä vastake on sopiva yhdistelmäpistokkeella käytettäväksi tasasähkölatausta (Lataustapa 4) varten sekä vaihtosähkölatausta (lataustavat 2 ja 3) varten. [41] Yhdistelmä latauksen idea on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 9) [53].



Kuva 9. Yhdistelmä lataus DC- ja AC-latausvaihtoehdoilla. Perustuu lähteeseen [53].

Kuvassa (Kuva 9) on esitetty, kuinka yhdistelmä lataus toimii. Vaihtosähkölatausta käytettäessä (Kuva 9 oikealla) MENNEKES-pistoke liitetään ajoneuvovastakkeen ylempään

osaan. Tasasähkölatausta (Kuva 9 vasemmalla) käytettäessä ajoneuvovastaketta käytetään siten, että kolmea ylintä liityntää (ohjaukset CP ja PP sekä maa) käytetään sekä kahdella alaosassa olevalla liitynnällä kuljetetaan tasasähkö latausta varten. [41]

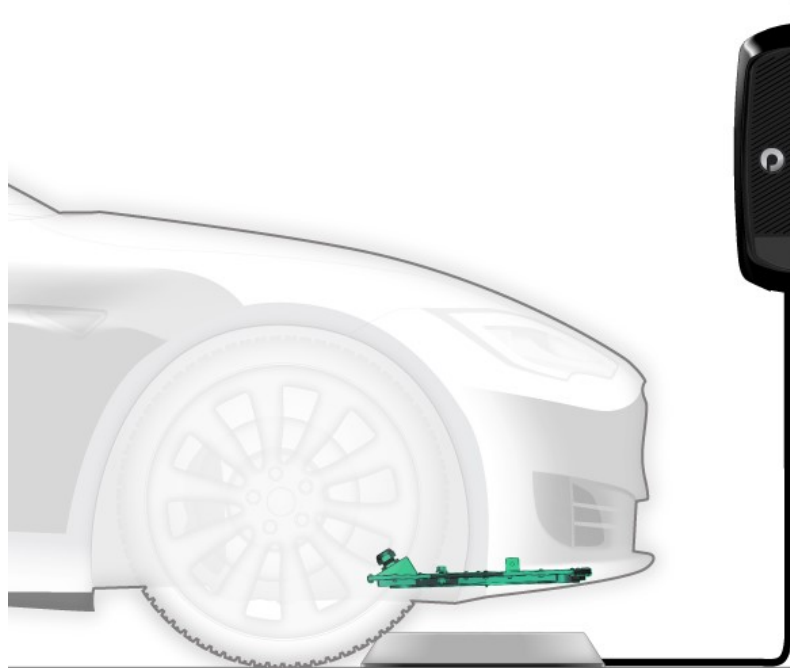
5.1.2 Julkiset sähköajoneuvojen latauspisteet Suomessa

Chargemap:n tarjoaman palvelun [54] mukaan Suomessa on sähköajoneuvoille lähes 800 julkista latauspaikkaa, joissa on reilu 3000 latauspistettä. Näistä suurin osa on keskittynyt suurimpien kaupunkien: Helsingin, Tampereen, Oulun ja Turun läheisyyteen. Suomen julkiset sähköajoneuvojen latauspisteet on esitetty liitteen 2 kuvassa 1. Noin 56 % julkisista latauspisteistä on lataustyyppin 3 (Kappaleessa 5.1.1 selostettu tarkemmin lataustyyppit) peruslatauspisteitä, reilu 20 % lataustyyppin 4 pikalatauspisteitä ja loput lataustyyppin 1 ja 2 latauspisteitä. [54]

5.1.3 Johdoton lataus

Edellä esitettyjen johdollisten lataustapojen lisäksi, myös johdoton lataus on kehittyneessä. Johdoton lataus on mahdollista esimerkiksi sähkömagneettisella induktiolla käyttämällä kahta käämiä sähköenergian siirtoon. Lähettävä käämi magnetoidaan korkeaataajuisella vaihtovirralla, yleensä väliltä 10...150 kHz. [55] Turvallisuusvaatimuksia johdottomalle lataukselle on kuvattu standardisarjassa IEC 61980 [49].

Yhdysvalloissa on saatavilla kaupallinen ratkaisu, jossa sähköajoneuvoon asennettava sovitin mahdollistaa induktiivisen latauksen. Kun sähköajoneuvon etuosa ajetaan latausalustan yläpuolelle, sähköverkkoon kytketty ohjauspaneeli lataa ajoneuvoa latausalustan ja ajoneuvossa olevan sovittimen kautta. Tätä lataussovellusta tarjoaa johdottomien latauslaitteiden valmistaja Plugless. Edellä kuvattua induktiivista latausta on havainnollistettu seuraavassa kuvassa (Kuva 10). [56]



Kuva 10. Induktiivinen lataussovellus. [56]

Kyseistä lataussovellusta on saatavilla täyssähköautomalleille, kuten Tesla Model S ja BMW i3 jatkuvalla latausteholla 7,2 kW [56]. Edellä kuvattu johdottoman latauksen sovellus sopisi esimerkiksi kotitalouksiin ja liikekeskuksiin säästämällä latauspistokkeen kiinnittämisen vaivan erityisesti lyhyillä pysähdyksillä sekä samalla välttämällä latauspistokkeen kiinnittämisen unohtamiselta, kunhan sähköajoneuvo on ajettu latausalustan yläpuolelle.

5.2 Vehicle-to-Grid (V2G)

Tässä kappaleessa on aikaisemmin kuvattu, kuinka sähköajoneuvojen akustoja voidaan ladata sähköverkon kautta saatavalla sähköenergialla. Tässä alikappaleessa käsitellään sitä, kuinka sähköajoneuvon akuston varastoimaa kemiallista energiaa voitaisiin siirtää sähköverkkoon ja hyödyntää eri puolilla sähköverkkoa erilaisille kuormille. V2G-konsepti tarkoittaa sähköajoneuvojen akustojen käyttöä hajautettuna sähköenergiavarastona ja lähteenä osana sähköverkkoa [57].

Useita sähköajoneuvoja voitaisiin käyttää hajautettuna energiavarastona sähköverkon tarpeisiin. Sähköajoneuvojen akustot sisältävät suhteellisen paljon sähköenergiaa ja niistä saatava teho on melko suuri. Esimerkiksi, jos Suomessa on miljoona sähköajoneuvoa, ja näistä 50 % saatavilla energiavarastona sekä olettaen, että yhdestä autosta saatava energiamäärä olisi 7 kWh, niin yhteensä saatavilla oleva energiamäärä olisi 3,5 GWh. Toisaalta, jos yhden sähköajoneuvon purkausteho olisi 3,5 kW niin kokonaisuudessaan kaikkien sähköajoneuvojen samanaikainen purkausteho olisi 1,75 GW. Edellä

mainittu energiamäärä vastaa reilun kahden tunnin Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 -laitosyksiköiden tuotantoa vuoden 2017 nettosähkötehoilla ja käyttökertoimella laskettuna. Edellä mainittu sähköteho vastaisi suunnilleen Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 -laitosyksiköiden nykyistä yhteenlaskettua nettosähkötehoa (1,77 GW). [41, 58] Edellä kuvatun sähköajoneuvomäärän hyödyntämisellä sähköenergiavarastona olisi siis merkittävä vaikutus sähköjärjestelmään.

V2G-konseptia voidaan hyödyntää erityisesti uusiutuvien sähköenergiälähteiden yleistyessä, sillä suuren osan vuorokaudesta, jopa 95 %, sähköajoneuvot ovat pysäköitynä sekä mahdollisesti verkkoon kytkettyinä hajautettuina energiavarastoina. Tämä kuitenkin edellyttäisi, että sähköajoneuvo olisi liitetty kaksisuuntaiseen latausjärjestelmään. Uusiutuvien sähköenergiälähteiden, esimerkiksi aurinkosähkön ja tuulienergian, tuotanto vaihtelee olosuhteiden mukaan, mutta jos kysyntä oletetaan vakioksi, on tätä tuotannon ja kysynnän eroa jotenkin kompensoitava sähköverkon taajuuden tasapainottamiseksi. Sähköajoneuvojen akustoista sähköenergia on nopeasti saatavilla sähköverkon stabiloinniksi ja siksi olisi mainio ratkaisu verkon tehotasapainon hallintaan. Akustojen käyttö lisää verkon luotettavuutta ja vähentää huippuvoiman käyttöä kysyntäpiikkien tyydyttämiseen. [57, 59, 60]

Jotta sähköenergiaa voitaisiin siirtää sähköverkosta sähköajoneuvoon ja toisinpäin, on olemassa olevan latausinfrastruktuurin sekä sähköajoneuvojen latureiden tuettava tätä ominaisuutta. Vaihtosähköä käytettäessä tehoelektroniikkasuuntaaja sijaitsee sähköajoneuvossa, joten suuntaajan pitäisi tukea sähköenergian siirtoa molempiin suuntiin: sähköajoneuvoon ja sähköverkkoon. Tätä varten sähköajoneuvot pitäisi varustaa invertterillä, jonka kautta voidaan syöttää sähköä myös verkkoon. Tasasähköä käytettäessä suuntaaja sijaitsee latausasemassa ja latausasemalta tulee suora galvaaninen liityntä sähköajoneuvon akustoon. Tässä tapauksessa latausaseman täytyisi tukea sähköenergian kulkua molempiin suuntiin. Standardoidut lataustapojen 3 (MENNEKES) ja 4 (CCS) latauspistokkeet ja ajoneuvovastakkeet tukevat kahdensuuntaista sähköenergian siirtoa. [41]

Toisaalta sähköajoneuvon käyttäjän täytyisi hyväksyä, että akustoon varastoitua kemiallista energiaa käytettäisiin muihinkin tarpeisiin kuin sähköajoneuvon liikuttamiseen. Akuston varaustaso saattaisi siis olla pienentynyt, vaikka sähköajoneuvo olisi kytkettyinä latausasemaan. Lisääntynyt akun käyttö ja varaus-purkaussyklit kuormittavat akustoa ja pienentävät sen käyttöikä. Kuitenkin, jos oletetaan esimerkinomaisesti, että sähköajoneuvon akuston kapasiteetti on 60 kWh ja sillä saataisiin 300 km ajomatka sekä jos akuston käyttöikä olisi 2000 täyttä lataus-purkaussykliä, vastaisi tämä 600000 km ajomatkaa. Päivittäisen ajomatkan ollessa 50 km, vuotuinen ajomatka olisi 18000 km, jolloin koko akuston käyttöiän aikainen ajomatka kulutettaisiin noin 33 vuodessa olettaen, että kaikki sähköajoneuvon ajamat matkat ajettaisiin sähköllä. Kuitenkin tiedetään, että säh-

köajoneuvojen akustojen käyttöikä ei ole lähellekään 33 vuotta, joten osa tästä käyttöiästä jää joka tapauksessa käyttämättä edellisen laskelman perusteella. Näillä perusteilla V2G-käyttöön käytettävän akuston lisääntynyt kuormituskustannus voidaan olettaa nollassa käyttämällä akustolle nollan euron jäännösarvoa. [41]

Sähköajoneuvojen akustojen kannattavuutta on tutkittu V2G-tarkoituksiin litiumioni-, lyijy- sekä nikkelimetallihydridiakustoilla (NiMH). Akustoon suurimmiksi käyttöikää lyhentäviksi vaikutuksiksi todettiin lataus-purkaussyklien syvyys (engl. DoD = Depth of Discharge) ja ympäristön lämpötila käytettäessä akustoa V2G-tarkoituksiin. Näiden tekijöiden vaikutus litium-ioniakustoon oli kuitenkin merkittävästi pienempi kuin lyijy- ja nikkelimetallihydridiakustoihin Ympäristön lämpötilan vaikutusta akuston käyttöikään saadaan kuitenkin pienennettyä akuston jäähdytys- ja lämmityslaitteistolla tarpeen mukaan. Lataus-purkaussyklien syvyyden kasvaminen vaikutti kasvattavan logaritmisesti litium-ioniakuston käyttöiän lyhentymisestä johtuvia kustannuksia. Kuitenkin, litium-ioniakuston käyttö todettiin tietyissä tapauksissa kannattavaksi olettaen riittävän korkea akuston V2G-käytöstä saatava hinta ja akuston lataukseen käytettävän sähkön riittävän alhainen hinta. [60] Sähköajoneuvon omistajan saattaisi siis olla kannattavaa käyttää akustoaan V2G-tarkoituksiin tästä maksettavien tuottojen takia akun lisääntyneestä kulutuksesta huolimatta, jos sähköajoneuvon akuston käyttöikänsä aikana mahdollistamaa kilometrimäärää ei tule ajettua.

5.3 Kaasuajoneuvojen tankkaus

Polttoaineita käyttäviä ajoneuvoja on erilaisia: mono-, bi- ja dualfuel -tyyppisiä. Monofuel -ajoneuvo käyttää yhtä polttoainetta, kuten bensiiniä, dieseliä tai kaasua. Bifuel -ajoneuvo voi käyttää polttoaineenaan esimerkiksi joko bensiiniä tai kaasua. Bifuel -ajoneuvojen käyttämää polttoainetta voidaan vaihtaa napin painalluksella ja käynnistystä lukuun ottamatta ne ovat täysin kaasukäyttöisiä. Dualfuel -ajoneuvo käyttää samanaikaisesti kahta eri polttoainetta, kuten dieseliä ja kaasua. Dieseliä ei polttoaineena voi korvata täysin kaasulla ja ajoneuvoa voi käyttää myös pelkällä dieselpolttoaineella. Bensiini- ja dieselmääräisiin autoihin voidaan tehdä myös kaasukonversio, jolloin ajoneuvosta saadaan bi- tai dualfuel -ajoneuvo. Bensiinin ja dieselin jälkeen metaani, eli käytännössä maa- tai biokaasu, on seuraavaksi käytetyin globaali polttoaine eli se on käytetyin vaihtoehtoinen polttoaine bensiinille ja dieselille. [10, 61]

Käyttötarkoituksesta riippuen maa- tai biokaasu voidaan tankata paineistettuna kaasuna tai nesteytettynä. Kevyemmät ajoneuvot, mm. henkilö- ja pakettiautot käyttävät yleensä paineistettua kaasupolttoainetta, kun taas raskas liikenne käyttää pitkillä matkoilla nesteytettyä kaasua, sillä sitä saadaan kolminkertainen energiasisältö samaan tilavuuteen verrattuna paineistettuun kaasuun. Biokaasua käytettäessä polttomoottoriajoneuvoissa on raaka biokaasu vähintäänkin puhdistettava epäpuhtauksista. Kuitenkin jalostettua

biokaasua eli biometaania käytetään yleensä ajoneuvokäytössä sen korkeamman energiatiheyden vuoksi puhdistettuun biokaasuun verrattuna. Tehdasvalmisteiset metaanijoneuvot on aina suunniteltu käytettäväksi jalostetulla biokaasulla tai jalostetulla maa-kaasulla. Puhdistettua biokaasua käytettäessä on moottori säädettävä vastaamaan sen käyttöä. [10, 61]

Henkilöautoissa käytettävä paineistettu biokaasu (engl. CBG = Compressed Biogas) varastoidaan standardin mukaan 200 barin paineeseen ja raskailla ajoneuvoilla standardi on 250 baria. Nesteytettyä biokaasua (engl. LBG = Liquefied Biogas) käytetään puolestaan raskaan liikenteen polttoaineena. CBG-tankkausasemia on hidas- ja nopeatankkausasemia. Julkisista tankkauspaikoista kaikki ovat nopeatankkausasemia sekä myös osa yksityisistä. Nopeatankkausasemilla tankkaus kestää vain minuutteja, koska kaasu syötetään suoraan korkeapaineisesta varastosta. Joillain tankkausasemilla biokaasu on nesteytettyä (LBG) päävarastossa, josta sitä höyrystetään (CBG) välivarastoon. Näitä tankkausasemia kutsutaan LCBG-tankkausasemiksi. LBG-tankkausasemat ovat puolestaan aina nopeatankkausasemia, joista osa sisältää myös CBG-tankkausmahdollisuuden. Hidastankkausasemilla tankkaus kestää useita tunteja, sillä paineistus tehdään tankkauksen yhteydessä. Hidastankkausasemilla tankkaus suoritetaan yleensä yön yli. [10]

5.3.1 Julkiset kaasutankkausasemat Suomessa

Suomessa kaasujoneuvoja voidaan tankata maa- tai biokaasulla. Tankkausasemia Suomessa on tällä hetkellä reilu 40, joista osa on Gasumin ja osa muiden toimijoiden tankkausasemia. Suurin osa tankkausasemista on kytkeytynyt Etelä-Suomessa sijaitsevaan kaasuverkkoon (ks. Kuva 2). Kaasuverkosto onkin mahdollistanut kaasuautoilun jo pidemmän aikaa Etelä-Suomessa. Kaasuverkon ulkopuolisia tankkausasemia löytyy mm. Oulusta, Porista sekä Turusta. Suomen julkiset kaasutankkausasemat on esitetty liitteen 3 kuvassa 1, jossa punaisella merkityt tankkausasemat ovat poistettu käytöstä tai tulossa käyttöön ja sinisellä merkityt ovat käytössä olevia tankkausasemia. [61, 62] Liitteen 3 kuvasta 1 nähdään, että suurin osa tankkausasemista on keskittynyt kaasuverkoston alueelle. Kaasuverkoston ulkopuolella kaasutankkausinfrastruktuuria vahvistavat LNG-terminaalit sekä biokaasulaitokset, joista tankattavaa kaasua on saatavilla.

6. TULEVAISUUSTARKASTELU

Tässä kappaleessa tarkastellaan teoriaosuudessa esille tulleiden kaasumaisten polttoaineiden (ks. Kappale 3), energiavarastojen (ks. Kappale 4) sekä CHP-laitoksen (ks. Kappale 2) tuottamaan sähköön ja lämpöön kohdistuvia vaikutustekijöitä esimerkiksi hinnan osalta. Myös sähkö- ja kaasujoneuvojen yleistymistä ja näiden latausinfrastruktuurin (ks. Kappale 5) kehittymiseen vaikuttavia hankintatukia on tarkasteltu.

6.1 Kaasumaisen polttoaineen hinta

Tässä diplomityössä esille tuodut fossiiliset polttoaineet: maakaasu, nestekaasu ja nesteytetty maakaasu altistuvat kansainväliselle polttoainekaupalle ja niiden hinta määräytyy sen perusteella. Tutkituista kaasumaisista polttoaineista pelkästään biokaasua voidaan tuottaa täysin kotimaisesti, joten sen hintaan vaikuttavat tekijät ja riskit saadaan suurimmaksi osaksi rajattua kotimaan rajojen sisäpuolelle. Fossiilisten polttoaineiden hinnan ennustamiseen liittyy kuitenkin aina merkittävää epävarmuutta pitkällä aikavälillä [63].

Suomessa maakaasun hinta muodostuu energia- ja siirto-osuudesta, aivan kuten sähkön hintakin. Maakaasun hinnan energiaosuus on raakaöljyn ja kivihillen hintaindeksiin sekä Tilastokeskuksen kotimaiseen energiahintaindeksiin sidottu. Maakaasun hinta tarkistetaan joka kuukausi. Siirron hinnoitteluun vaikuttaa verkostoon sitoutuneen pääoman määrä, verkoston operointikustannukset sekä kohdekohtainen kulutus. Tasainen kulutus takaa maakaasuverkoston asiakkaalle edullisemman maakaasun siirto- ja energiahinnan. [64]

Suomen maakaasumarkkinat ovat pienet ja eristäytyneet, sillä Suomesta ei ole muihin EU-maihin fyysisiä kaasuyhteyksiä vielä tällä hetkellä, vaan lähes kaikki kaasu tuodaan Venäjältä. Kotimaisella biokaasulla voidaan kattaa pieni osa kaasun kokonaistarpeesta. Järjestelmävastaavana siirtoverkonhaltijana toimii tällä hetkellä Gasum, joka vastaa kaasun korkeapaineisesta siirrosta, maahantuonnista ja tukkumyynnistä. Kaasumarkkinat eivät siis ole avoimet niin kuin esimerkiksi sähkömarkkinat. Kaasun jakelusta vastaavat kaasun jakeluyhtiöt ja paikalliset energiayhtiöt. [65]

6.1.1 Kaasumarkkinoiden avautuminen

Maakaasumarkkinat avautuvat Suomessa vuoden 2020 alusta. Avoimeen kaasumarkkiinaan kuuluvat maakaasu, biokaasu sekä LNG. Näiden tuotteiden markkinoille luodaan uudet, syrjimättömät ja kustannustehokkaat markkinasäännöt ja järjestelmät. Avautu-

neessa markkinassa siirtoliiketoiminta eriytetään Gasumista omaksi yhtiökseen, Gas-Grid Finlandiksi, vuoden 2020 alusta. Tällä hetkellä maakaasuverkoston kaasu tulee Imatran syöttöpisteestä Venäjältä (ks. Kuva 2). Vuoden 2020 alusta Suomen ja Viron välinen maakaasuputki Balticconnector mahdollistaa Suomen markkinoiden avautumisen. Tällöin Suomessa sijaitsevat markkinatoimijat pääsevät käsiksi Balticconnectorin avulla esimerkiksi Klapeidan LNG-terminaaliin Liettuassa ja Baltian maiden Venäjän syöttöpisteiden kautta tuotavaan kaasuun liittyessään eurooppalaisille kaasumarkkinoille. [66-68]

Suomen avautuva kaasumarkkina perustuu EU:n maakaasumarkkinalainsäädännön syöttö-otto-järjestelmään. Syöttöpisteissä kaasua syötetään järjestelmään sisään ja ottopisteissä ulos järjestelmästä. Avautuvassa markkinassa on kaksi tuotetta, joilla käydään erikseen kauppaa [68]:

- kaasuenergia eli tietty määrä kaasua sekä
- kapasiteetti eli oikeus siirtää tietty kaasumäärä.

Myös siirtotariffirakenne tulee muuttumaan. Avoimessa markkinassa siirrosta veloitetaan edellä mainittu kapasiteettimaksu sekä hyödykemaksu. Kapasiteettimaksulla varataan tietty siirtokapasiteetti ja hyödykemaksu peritään toteutuneesta kaasun siirrosta, millä katetaan siirtokustannukset. Kapasiteettituotteen hinnoittelun kannalta ei ole väliä, mikä loppukäyttäjän kulutusmäärä on, vaan hinnoittelu perustuu kapasiteettituotteen keston. Keston ollessa pidempi, on yksikköhinta pienempi. Siirron hinnoittelu perustuu postimerkkihinnoitteluun, jossa siirto on samanhintaista riippumatta syöttö- tai ottopisteen sijainnista siirtoverkossa. [69]

Kaasumarkkinoiden integroitua Euroopassa on siitä saatavat hyödyt oltava kustannuksia suurempia. Integroinnin seurauksena saadaan kaasun jakelusta toimitusvarmempaa, hinnasta kilpailukykyisempää ja kaasumarkkinoille uusia toimijoita, joka johtaa kaasun käytön kasvuun. Näiden tekijöiden seurauksena tulevaisuudessa Euroopan avoimista kaasumarkkinoista saadaan tehokkaammat ja likvidimmät kuin nykyisin Suomessa olevasta monopolimarkkinasta. Vapaiden markkinoiden ennustetaan laskevan kaasun hintaa pitkällä aikavälillä. Kilpailun lisääntyminen millä tahansa markkinalla laskee yleensä hintoja. [65, 70]

Vapaiden markkinoiden hintaa nostavia tekijöitä alkuun ovat ainakin investoinnit uuteen infrastruktuuriin sekä hallintoon, mikä nostaa hintoja lyhyellä aikavälillä oletettavasti. Avoimilla markkinoilla myyjä on useita, minkä takia kaasunhankintaa täytyy suunnitella uudelleen nykyiseen, yhden myyjän, tilanteeseen verrattuna. Sähkömarkkinoiden avauttua hintaheilunta kasvoi ja samaa on odotettavissa kaasumarkkinoidenkin tapauksessa. [65, 70]

6.2 Sähkön tuotanto

Sähkön tuotantoon yksi suurimmista vaikuttavista tekijöistä on tuotetusta sähköstä saatava hinta. Suomi on osa yhteis pohjoismaista sähkömarkkinaa, Nord Poolia, jolla sähkön markkinahinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan perusteella sekä Suomessa aluehintaan vaikuttaa myös Suomen ja Ruotsin välisten siirtolinjojen pullonkaulat yleensä nostaten Suomen aluehintaa, joka tällöin eroaa systeemihinnasta.

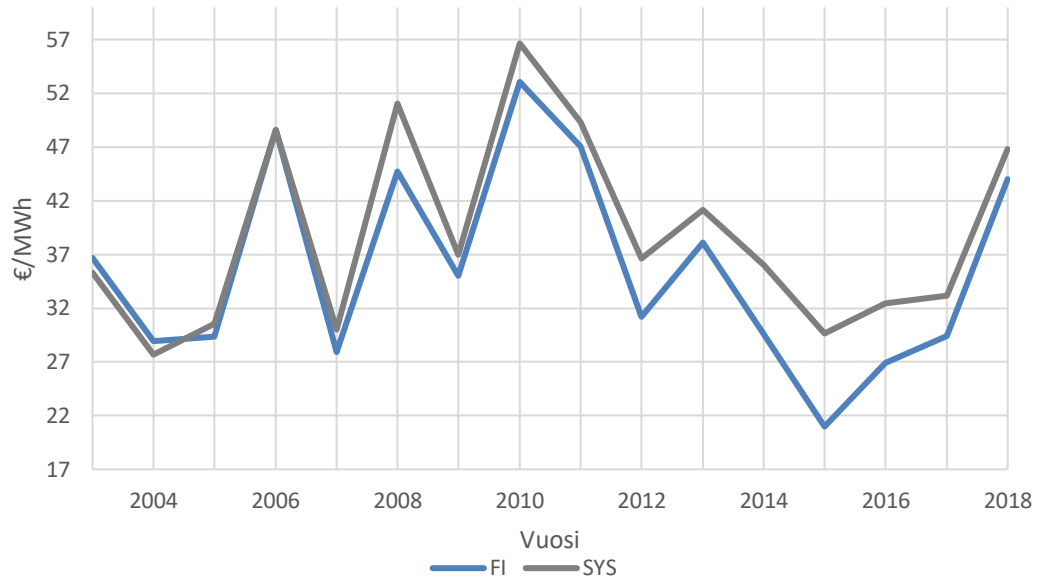
Markkinasähkön hintaan vaikuttavia tekijöitä ovat [71, 72]:

- sähköntuotannossa käytettyjen polttoaineiden hintojen muutokset,
- sää- ja ilmasto-olosuhteet vaikuttaen erityisesti vesivoimalla ja tuulivoimalla tuotetun sähkön tarjontaan sekä alhaiseen sähkön kysyntään kesäaikoina, mutta nousevaan kysyntään talviaikoina ja
- päästöoikeuksien hinta.

Kuivina ja kuumina kesinä sademäärät ovat alhaisia, minkä takia vesivoimaa on yleensä vähän saatavilla, koska vesivoimaloiden vesialtaat pysyvät tyhjemminä. Ilmastolla on myös vaikutusta tuulivoimaan, koska kuivina ja kuumina kesinä ilmamassat liikkuvat hitaasti, mikä tarkoittaa heikkoa tuulta ja pientä tuulivoiman tuotantoa. Kesäaikaan yleensä tuulivoiman tuotanto on vaihtelevampaa ja pienempää kuin muina vuodenaikoina. Hitaasti liikkuva kuiva ja kuuma ilmamassa myös lisää sähkön kysyntää suuremman viilennyksen ja ilmastoinnin tarpeen takia. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä suurempi osuus maan sähköstä tuotetaan uusiutuvilla tuotantomuodoilla, niin sitä enemmän ne vaikuttavat hinnan epävakaisuuteen. [71]

Lämpövoimakoneisiin perustuvien voimalaitosten käyttämä jäähdytysveden lämpötila nousee kuivana ja kuumana aikana alentaen voimalaitosten sähkön tuotantoa ja nostaten tuotantokustannuksia. Ilmaston ääri-ilmiöt ovat seurausta ilmastonmuutoksesta, millä on roolinsa myös sähkön hinnan määräytymisessä. [71]

Seuraavassa kuvassa (Kuva 11) on esitetty Nord Poolin Elspot-vuorokausimarkkinan systeemihinta ja Suomen aluehinta vuosittaisina keskihintoina vuosina 2003–2018 [73].



Kuva 11. Nord Poolin Elspot-vuorokausimarkkinan vuosittainen keskihinta sähkön systeemihinnalle (SYS) ja Suomen aluehinnalle (FI). [73]

Vuosien 2014-2017 aikana sähkön hinta on uusiutuvien energiantuotantomuotojen tukemisen takia johtanut sähkön ylitarjontaan ja siten sähkön systeemihinta on painunut keinoitekoisen alas (Kuva 11). Kansalliset tukijärjestelmät uusiutuville sähköntuotantoteknologioille ovat laskeneet kysyntää päästöoikeuksille ja siten päästökaupan kautta tuleville päästövähennyksille, sillä tukien avulla tehdyt investoinnit uusiutuvaan sähköntuotantoon on itsessään jo lisännyt päästövähennyksiä. Toisaalta vuonna 2008 alkanut taloudellinen taantuma on laskenut teollisuuden päästöoikeuksien kysyntää ja siten päästöoikeuksien hinta on laskenut. Samaan aikaan päästöoikeuksia on ennalta ollut jo ylimäärin tarjolla alhaiseen hintaan. [74, 75]

Kansalliset tukijärjestelmät ovat laskeneet ei-tuettujen sähköntuotantomuotojen kannattavuutta merkittävästi, mikä on johtanut taajuuden säätöön kykenevän kapasiteetin poistumiseen kannattamattomuuden takia. Tukijärjestelmät tietyille sähköntuotantoteknologioille vääristää kilpailua, sillä pohjoismaisilla yhteismarkkinoilla tukien vaikutukset näkyvät valtiorajoista huolimatta. Päästökauppamekanismi on teknologianeutraali ja sen sannaankin olevan kustannustehokkain ohjaustapa vähähiiliseen energiantuotantoon. [75] Tuulivoimaloille ei kuitenkaan ole enää jatkossa suunnitteilla tuotantotukia, sillä tuulivoimasta sähköntuotantomuotona on tullut markkinaehtoisesti kannattavaa. [76]

Eryteisesti vuonna 2018 sähkön pörssihintaa (Kuva 11) nosti Pohjoismaiden heikko vesivoimaloiden vesialtaiden varaustilanne sekä päästöoikeuksien pörssihintojen nousu. Vuotuinen sähkön hinta vuonna 2018 oli 49 % korkeampi kuin edellisenä vuonna 2017. [72]

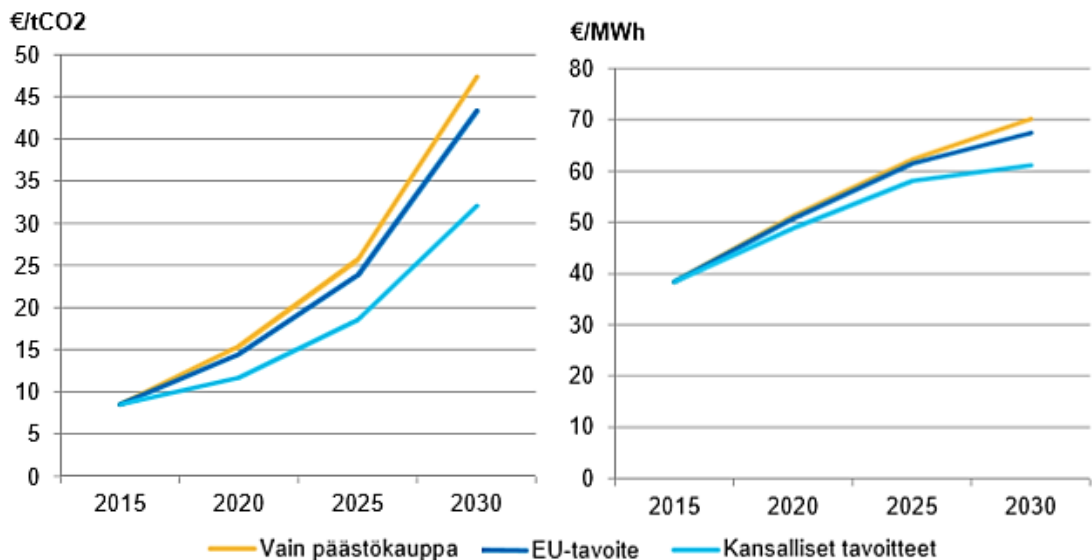
6.2.1 Hintaskenaarioita pörssisähkölle

Tulevaisuudessa sähkön hinnan ennustetaan nousevan. Sähkön hintaan tulee vaikuttamaan suuresti ilmastopolitiikka ja se, millä tavalla ilmastonmuutos huomioidaan sähkön tuotannon kustannuksissa. Vähän ympäristöä kuormittavia sähköntuotantomuotoja voidaan tukea, ympäristöä kuormittavia tuotantomuotoja voidaan rangaista tai vaihtoehtoisesti näitä kahta menetelmää voidaan yhdistellä. Suomen sähkön hinta määräytyy pohjoismaisilla ja eurooppalaisilla sähkömarkkinoilla, joiden toimintaan Euroopan Unionin lainsäädäntö sekä toiminta keskeisesti vaikuttavat. Siten EU:n ilmastolinjauksilla on suuri vaikutus tulevaisuudessa sähkön hintaan myös Suomessa.

Pöyryn tekemässä selvityksessä [63] tutkitaan kolmea skenaariota ja niiden vaikutusta sähkön hintaan siten, että EU:n asettamat päästötavoitteet saavutetaan vuoteen 2030 mennessä. Nämä skenaariot ovat:

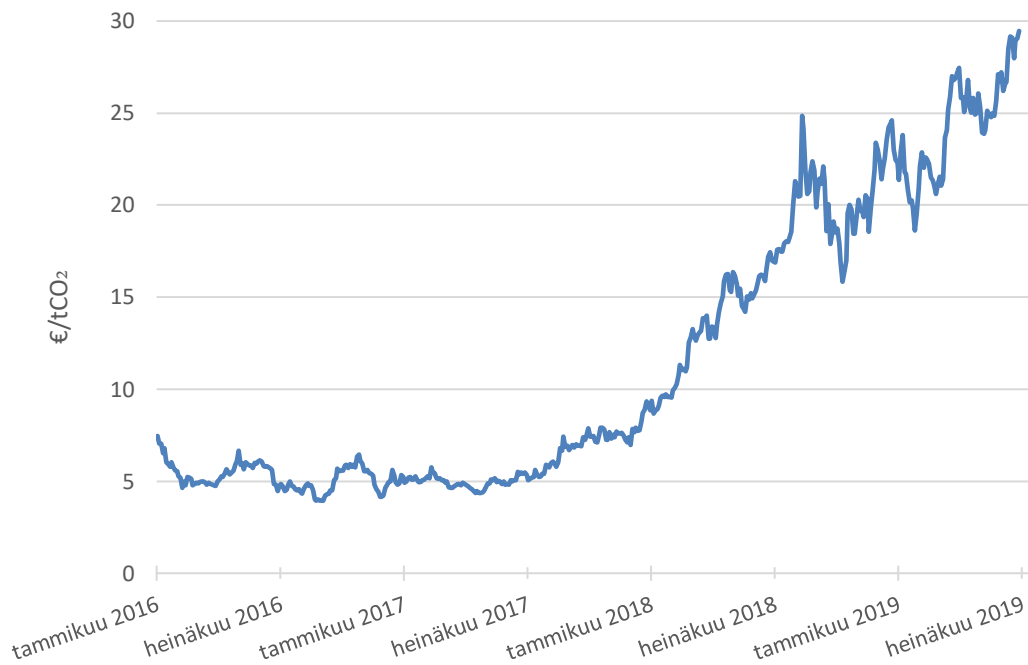
- Vain päästökauppa, (päästökauppa ainoana ohjauskeinona)
- EU-tavoitteet (päästökaupan lisäksi mahdollisesti EU-tason tukijärjestelmät)
- ja Kansalliset tavoitteet (päästökaupan lisäksi kansalliset tavoitteet, joita edistetään kansallisilla tukijärjestelmillä)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 12) on esitetty mallinnetut markkinasähkön sekä mallinnuksessa käytettyjen päästöoikeuksien hinnat Euroopassa vuoteen 2030 asti eri skenaarioissa [63]:



Kuva 12. Pöyryn selvityksessä mallinnetut päästöoikeuksien hinnat (vasemmalla) sekä Euroopan markkinasähkön hinnat (oikealla) eri skenaarioissa vuoteen 2030 asti.

Kuvasta (Kuva 12) nähdään, että markkinasähkön sekä päästöoikeuksien hinnan ennustetaan nousevan vuoteen 2030 mennessä merkittävästi. Nouseva trendi markkinasähkön hinnassa johtuu polttoaineiden sekä päästöoikeuksien kohoavista hinnoista. Kuvassa näkyvät hinnat ovat vuotuisia keskihintoja, joten niissä ei näy vuoden sisäiset hinnan muutokset. Markkinasähkön hintavaihtelun ennustetaankin kasvavan erityisesti aurinkosähkön ja tuulivoiman kapasiteetin kasvaessa. Nämä tuotantomuodot ovat riippuvaisia sääoloista ja nostavat sähkön hintaa alhaisen tuotannon aikoihin ja vastaavasti laskevat sähkön hintaa korkean tuotannon aikoihin. [63] Pöyryn selvityksessä kuitenkin oletetaan, että päästöoikeuden hintakehitys (ks. Kuva 12) olisi maltillisempaa kuin toteutunut päästöoikeuden hintakehitys. Seuraavassa kuvassa (Kuva 13) on esitetty Euroopan yleisten päästöoikeuksien toteutuneet huutokauppahinnat [77].



Kuva 13. Euroopan yleisten päästöoikeuksien huutokauppahinnat tammi-kuusta 2016 heinäkuuhun 2019. [77]

Kuvasta (Kuva 13) nähdään, että vuoden 2019 heinäkuussa päästöoikeuden hinta on ollut jo lähes 30€/tCO₂, kun taas Pöyryn ennusteen mukaan (ks. Kuva 12) tämä päästöoikeuden hinta saavutettaisiin vasta vuoden 2027 tienoilla skenaarioissa, joissa päästöoikeuksien nouseva hintakehitys on voimakkainta.

Päästöoikeuden hinnan nousua selittää se, että päästöoikeuksien määrä pienenee joka vuosi, eli päästöoikeuksien tarjonta pienenee. Vuodelle 2019 on otettu käyttöön markkinavakauserasto, jonka avulla on tarkoitus rajoittaa päästöoikeuksien ylijäämää sekä saada järjestelmä paremmin mukautumaan epätasapainoa tuottaviin tekijöihin. Markkinavakauserastoon varastoidaan tuplasti päästöoikeuksia väliaikaisesti vuoteen 2023

saakka. [74] Myös päästöoikeuksien määrän vähennystä kiihdytetään 2,20 %:iin vuosittain verrattuna nykyiseen vähennystähtiin 1,74 %/a [78].

Nämä edellä mainitut tekijät vähentävät päästöoikeuksien tarjontaa, jolloin päästöoikeuden yksikköhinta on kasvanut ja tulee todennäköisesti kasvamaan entisestään. Täten päästökaupan piiriin luettavan sähköntuotannon tuotantokustannukset tulevat kasvamaan. On siis mahdollista, että vuoteen 2030 mennessä päästöoikeuden hinta tulee olemaan merkittävästi suurempi kuin Pöyryn ennusteessa (ks. Kuva 12). Täten markkinasähkön hinnan kasvukin voi olla selvästi Pöyryn selvityksessä ennustettua nopeampaa ainakin päästöoikeuksien hintojen puolesta. Päästöoikeuden hinta ei kuitenkaan ole ainoa pörssisähkön hintaan vaikuttava tekijä (ks. Kappale 6.2) ja pörssisähkön hinnan ennustaminen monimutkaisilla markkinoilla on vaikeaa, joten luotettavien hintaennusteiden laatiminen on hyvin haastavaa.

6.3 Lämmön tuotanto

Kaukolämpöverkoissa yleensä lämmöntuotantolaitoksen ja kaukolämpöverkoston omistaa sama, yleensä kunnallinen, yhtiö. Useissa verkoissa kuitenkin käytetään paljon kolmansia osapuolia, jotka toimivat lämmöntuottajina. Nykyisessä markkinamallissa kolmas osapuoli voi myydä lämpönsä kaukolämpöyhtiön kaukolämpöverkon alueella. Lämpö siirretään joko meno- tai mahdollisesti kaukolämmön paluuputkeen lämmöntarpeesta riippuen. Jos kolmannen osapuolen tuottama lämpö on edullisempaa kaukolämpöyhtiölle kuin sen itsetuottama lämpö, niin kolmannen osapuolen lämpöä käytetään. Kolmas osapuoli ja kaukolämpöyhtiö solmivat kahdenvälisen sopimuksen, jossa sovitaan esimerkiksi sopimuksen kesto ja lämpötilavaatimukset kolmannen osapuolen toimittamalle lämmölle sekä kaukolämpöverkoston laajennus- ja vahvennuskustannusten jako kolmannen osapuolen ja kaukolämpöyhtiön välillä. [79]

Lämpötilan ollessa korkeampi kaukolämmön menoputkessa, on siitä saatava hinta myös korkeampi kolmannelle osapuolelle. Saatavaan hintaan vaikuttaa myös lämmöntarve. Esimerkiksi lämmityskautena tarpeen kasvaessa myös lämmöstä saatava hinta kasvaa verrattuna kesäkauteen, jolloin lämmöntarve on pieni ja mahdollisesti kesäaikaan kolmannen osapuolen tarjoamaa lämpöä ei tarvitse käyttää ollenkaan kaukolämpöyhtiön näkökulmasta. Kuitenkin, lähes kolmasosa Suomessa ostetusta kaukolämmöstä on kolmansien osapuolien tuottamaa, joten kolmansien osapuolien panostus kaukolämpömarkkinoilla on merkittävä. Jotta kolmas osapuoli voisi toimia kaukolämpöverkossa, on sen tarjottava kaukolämpöyhtiölle kannattavaa lämmöntoimitusta, sillä kaukolämpöyhtiö hankkii lämmön asiakkailleen sieltä, missä sitä on edullisimmin saatavilla. [79]

Kaukolämpöyhtiöiden lämmön hankintaa ja lämmön tuottajien liittämistä verkkoon ei ole säännelty vaan kaukolämpöyhtiöt toimivat täysin liiketoiminnan kannalta. Kuitenkin mää-

räävässä asemassa olevaa toimijaa, yleensä kaukolämpöyhtiötä, aina valvotaan. Valvonnalla varmistetaan esimerkiksi kohtuullinen hintataso sekä hinnan perustuminen lämmön kustannusrakenteeseen [79-81]

Kaukolämmön tulevaisuuden kulutuksessa arvioidaan tapahtuvan muutoksia. Energiateollisuuden hiilineutraalia visiota vuonna 2050 avaava raportti [82] ennustaa, että rakennusten energiankäyttö tehostuu merkittävästi ja siten kaukolämmön tarve pienenee tulevaisuudessa. Lämmöntarpeen ennakoitaan pienentyvän 32 prosentilla vuoteen 2050 vuodesta 2007. Tämä siitä huolimatta, että väestön ennakoitaan kasvavan reiluun 6 miljoonaan ja asumisväljyyden 36,6m²:stä 48m²:iin asuinkunnan keskikoon pienentymisen myötä vuonna 2050. Edellä mainitut ovat lämmöntarvetta lisääviä tekijöitä. Lämmöntarvetta pienentäviä tekijöitä ovat esimerkiksi energiatehokkuuden kasvu tiukentuvien rakennusmääräysten ja korjausrakentamisen takia sekä ilmaston lämpeneminen ilmastomuutoksen myötä. Suuri osa rakennuksista on kaukolämmityksen piirissä ja tämän osuuden ennakoitakin kasvavan vuoden 2007 arvosta 44% vuoden 2050 arvoon 56%. Myös ÅF-Consulting olettaa skenaarioissaan [83], että kaukolämmön kysyntä laskee vuonna 2030 7% ja vuonna 2050 20% vuoden 2015 lämpötilakorjattuun tasoon nähden. Vaikuttavat tekijät ovat samanlaisia kuin Energiateollisuuden raportissa eli ilmaston lämpeneminen ja rakennusten eristysvaatimusten kasvu. Edellä mainittujen raporttien pohjalta voidaan siis olettaa, että vuotuinen lämmitystarve kiinteistö-pinta-alaa kohti (kWh/m²,a) tulee laskemaan tulevaisuudessa.

6.3.1 Kaukolämpömarkkinoiden avautuminen

Kaukolämpömarkkinoita on suunniteltu avattaviksi, jolloin nykyisen markkinamallin osapuolien toiminta tulisi muuttumaan. Nykyisessä järjestelmässä asiakas ostaa kaukolämpönsä kaukolämpöyhtiöltä ja kaukolämpöyhtiö puolestaan tuottaa lämmön itse tai hankkii sen kolmansilta osapuolilta kahdenvälisin sopimuksin. Pöyry on tutkinut kaukolämpömarkkinoiden avautumisen seurauksia ja vaikutuksia useissa uusissa markkinamalleissa. Pöyryn tutkimuksessa tutkittiin kolmea erilaista markkinamallia [79]:

- (1) Yksittäinen ostaja avoimella ja läpinäkyvällä markkinasäätelyllä
- (2) Yksittäinen ostaja ja säädely tukkukauppa
- (3) Network access -malli

Malli (1) on näistä lähellä nykyistä markkinamallia. Tässä mallissa kaukolämpöyhtiö toimisi yksittäisenä ostajana ja markkinasäätelyä tehtäisiin avoimempaa julkistaen ehdot ja hinnat, joilla kolmas osapuoli voi liittyä kaukolämpömarkkinoille. Nykymallissa ehdot ja hinnat eivät ole julkisia. Mallissa (2) kaukolämpöyhtiö hoitaisi verkkotoiminnan ja vähittäismyyntin asiakkaille eli kaukolämpöyhtiö olisi yksittäinen ostaja, joka hankkii lämmön lämmöntuottajilta. Tuotanto täytyisi eriyttää kuitenkin verkko- ja vähittäismyyntitoiminnasta. Mallissa (3) lämmöntuottajat voisivat tehdä sopimuksia lämmöntoimituksesta suoraan asiakkaiden kanssa. Kaukolämpöyhtiö vastaisi verkkoyhtiönä verkon käytöstä

ja kunnossapidosta sekä kysynnän ja tarjonnan kohtaamisesta. Malli on verrannollinen sähkömarkkinoihin. [79]

Kolmannen osapuolen kannalta kiinnostavinta markkinoiden avautumisessa, mallissa (3), olisi pääsy toimimaan markkinoilla muiden kuin kaukolämpöyhtiön kanssa. Kolmas osapuoli voisi esimerkiksi tehdä lämmön toimitussopimuksen suoraan asiakkaan kanssa ja siten käyttää lämpöverkkoa alustana lämmön toimitukselle ja palveluille. Kolmannen osapuolen näkökulmasta myös läpinäkyvyys markkinoilla lisääntyisi, mikä voisi johtaa parempiin investointeihin ja sopimuksiin kaukolämpöyhtiön kanssa. Kolmannen osapuolen kannalta network access -malli antaa eniten vapauksia ja mahdollisia asiakkaita on eniten. Hinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan mukaan dynaamisesti eli markkinat ohjaisivat hinnoittelua yksittäisen ostajan sijaan.

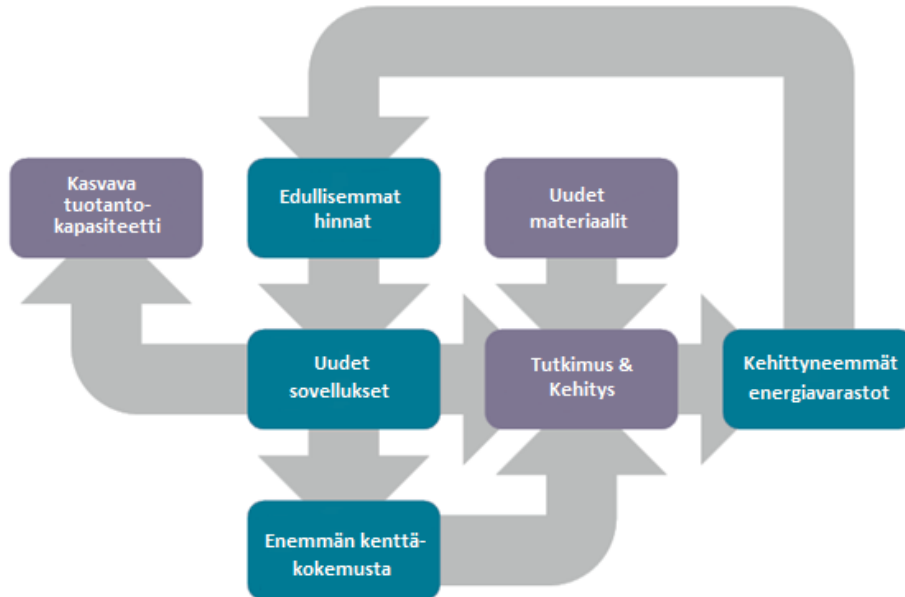
Network access -mallin, mallin (3), ei kuitenkaan ennusteta toteutuvan yhtä tehokkaasti kuin sähkömarkkinoilla, sillä kaukolämpöverkkojen luonne sähköverkkoihin on merkittävästi erilainen. Kaukolämpöverkot ovat paikallisia eikä maanlaajuista verkostoa ole, jolloin yksittäisessä verkostossa olevien toimijoiden määrä on pieni. Yleensä kaukolämpöyhtiöt ovat kunnallisia, joille riittää kaupallisiin yhtiöihin verrattuna pienempi voitto ja myös vaadittavat investoinnit kaukolämmön tuotantoon ovat suuria pitkin takaisinmaksuaikoihin. Avoin malli vaatii myös eniten sääntelyä, mikä aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Lämmön tuotannon ja jakelun arvioidaan kasvattavan hallintokustannuksia kymmenkertaisiksi. Pöyryn mukaan pienimmät kustannukset sekä suurimmat hyödyt tuottaisi malli (1), joka muistuttaa eniten nykyisin käytössä olevaa markkinamallia. Tämä malli voisi Pöyryn mukaan olla kannattava. Se toisi enemmän kilpailua läpinäkyvyytensä vuoksi. [79]

6.4 Energiavarastot

Energiavarastojen määrä liittyy erityisesti uusiutuvien sähköntuotantoteknologioiden yleistymiseen. Sähkö- ja lämpövarastot yleistyvät sitä mukaan, kun esimerkiksi aurinko- ja tuulisähkön tuotannon määrä kasvaa, sillä näiden tuottama sähkö on sääolosuhteista riippuvaa ja siten vaihtelee voimakkaasti. Myös sähköajoneuvojen yleistymisen ajaa voimakkaasti sähkövarastojen yleistymistä. Erityisesti verkkoihin liitetyt yksittäiset energiavarastot voivat toimia useissa sovelluksissa näiden sovellusten mahdollistajana myymällä sisältämänsä energiaa useisiin eri kohteisiin. Esimerkiksi sähköverkkoon kytkeytyn sähkövaraston omistaja hyötyy tuottamalla useita eri palveluja juurikaan riippumatta sähkövaraston koosta, sillä pienempiä yksiköitä voidaan yhdistää suuremmiksi kokonaisuuksiksi esimerkiksi kolmannen osapuolen avulla. Näitä monipuolisia palveluita mahdollistamaan tarvitaan kuitenkin muutoksia markkinarakenteeseen sekä regulaatioon. [42]

6.4.1 Litiumioniakustot

Litiumioniakustot ovat suhteellisen uutta teknologiaa ja niiden hinnanalennemispotentiaali onkin suuri. Litiumioniakustojen hinnat ovatkin viime vuosina olleet rajussa laskussa. Esimerkiksi sähköajoneuvojen litiumioniakustojen hinnat ovat pudonneet vuodesta 2010 vuoteen 2016 73 %:lla. Myös Saksassa kotitalouksille tarjottavien litiumioniteknologiaan perustuvien pienakustojen hinnat ovat laskeneet vuoden 2014 lopusta vuoden 2016 loppuun 60 %:lla. Tuotantoa on lisätty voimakkaasti, sillä akustojen valmistajat uskovat, että sähköajoneuvojen ja muiden akustosovellusten määrä tulee kasvamaan merkittävästi tulevaisuudessa. Litiumioniakustojen hankintahinta on vielä kuitenkin korkea verrattuna lyijyakustoihin, mutta putoaa jatkuvasti massatuotannon takia [41]. Tuotannon lisääminen on myös lisännyt kilpailua, joka taas on johtanut akustojen hinnan alenemiseen. Litiumioniakustojen hinnan alenemiseen on johtanut myös litiumioniakustojen käytön monipuolisuus eri sovelluksissa, mikä tuo synergiaetuja tehon, energian ja turvallisuuden kannalta. Tämän takia litiumioniakustojen hinnat ovat yhä kilpailukykyisempiä muihin akustoteknologioihin verrattuna. Myös parannukset käytettävien materiaalien, toimitusketjujen ja suorituskyvyn osalta ovat laskeneet hintoja. [42, 84] Seuraavassa kuvassa (Kuva 14) on esitetty ajureita sähkövarastojen, mutta myös yleisesti energiavarastojen hintojen laskemiseen [42].

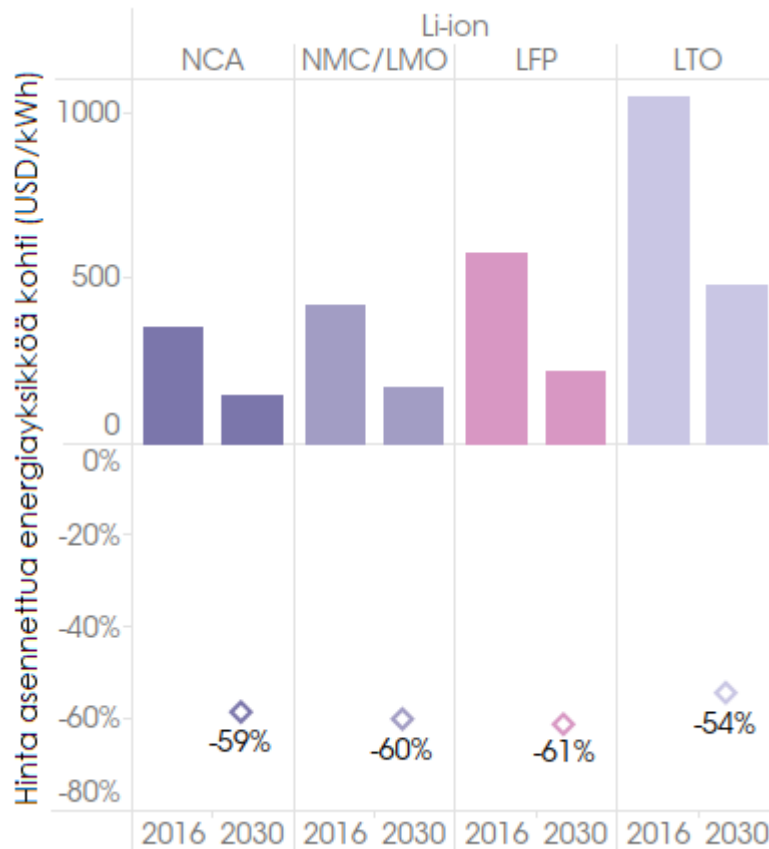


Kuva 14. Akustojen ja yleisesti energiavarastojen hintaa laskevat ajurit. Muokattu lähteestä [42].

Kuvassa (Kuva 14) hinnan laskun ytimessä on tutkimus ja kehitys. Uusia materiaaleja tutkimalla ja kehittämällä akustot kehittyvät ja hinnat laskevat luoden uusia sovelluksia tarkoittaen enemmän tuotantoa ja enemmän kokemusta akustoista. Tätä kokemusta voidaan taas käyttää hyväksi tutkimuksessa ja kehityksessä.

Akustojen hinnan osuus akkuenergiavarastojärjestelmässä (engl. BESS = Battery Energy Storage System) vaihtelee järjestelmän koon mukaan. Akustojen hinnan osuus on yleensä pienempi, kun järjestelmän koko kasvaa, sillä tehoelektronikan ja oheislaitteiden hinnasta tulee merkittävämpi osa järjestelmän kokonaishintaa. Pelkän akuston hinta akustojärjestelmän kokonaishinnasta on yleensä n. 35 % suuremmissa kaupallisissa järjestelmissä verrattuna n. 46 % osuuteen kotitalousjärjestelmissä. [42]

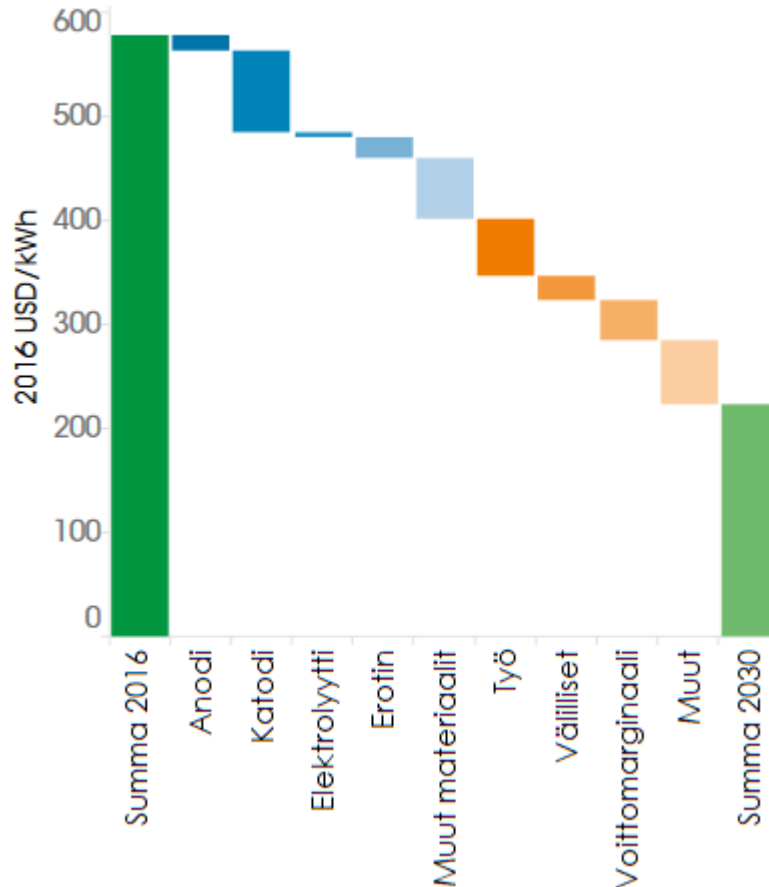
Litiumioniakustojen hinta asennettua energiayksikköä kohti (€/kWh) vaihtelee akustomateriaalien mukaan. Asennettu hinta energiayksikköä kohti sisältää itse litiumioniakuston, tehoelektronikan ja näiden tarvitseman ohjauksen sekä hallintajärjestelmät. Seuraavassa kuvassa (Kuva 15) on esitetty vuoden 2016 asennetut hinnat (USD/kWh) sekä niiden hinnanalennemispotentiaali vuoteen 2030 neljälle eri litiumioniakustomateriaalille. [42]



Kuva 15. Litiumioniakustojen hinnat asennettua energiayksikköä kohti (USD/kWh) neljälle eri materiaalille vuosina 2016 ja 2030. Muokattu lähteestä [42].

Kuvasta (Kuva 15) nähdään, että litiumioniakustojen hinnat asennettua energiayksikköä kohti tulevat laskemaan reilusti vuoteen 2030 mennessä. Esimerkiksi LFP-materiaaliin perustuvan litiumioniakustojen hinnan asennettua energiayksikköä kohti arvioidaan laskevan reiluun kolmasosaan vuodesta 2016 vuoteen 2030. Seuraavassa kuvassa (Kuva

16) on esitetty potentiaaliset säästökohteet hinnan alenemisessa LFP-materiaaliin perustuvassa litiumioniakustossa vuodesta 2016 vuoteen 2030. [42]



Kuva 16. LFP-materiaaliin perustuvan akuston arvioitu hinnan alennus osatekijöineen vuodesta 2016 vuoteen 2030 asennettua energiayksikköä kohti. Muokattu lähteestä [42].

Kuvasta (Kuva 16) nähdään, että LFP-akustojen hinnan ennustetaan laskevan noin hinnasta 600 USD/kWh noin hintaan 200 USD/kWh. Suurina osatekijöinä hinnan alenemiseen ovat mm. katodimateriaalin halpeneminen sekä työkustannusten pieneneminen.

6.4.2 Tuntuvan lämmön varastot

Vettä väliaineenaan käyttävät tuntuvan lämmön varastot (engl. STES = Sensible Thermal Energy Storage) ovat pitkälle kehittyntä teknologiaa. Erityisesti kotitalouksissa vettä väliaineena käyttävät lämminvesivaraajat ovat erittäin suosittuja Euroopassa ja ympäri maailmaa. Näiden polttoaineena toimii yleensä sähkö, kaasu, öljy tai puu. Kuitenkin aurinkoenergian ja lämpöpumppujen hyödyntäminen veden lämmityksessä on kasvava ilmiö. [45]

Lämpövarastojen osalta kuumaa vettä väliaineenaan käyttävien tuntuvien lämpövarastojen hankintahinnat vaihtelevat suuresti koon mukaan. Niiden hinta vaihtelee välillä 0,1...10 €/kWh sisältäen hyvin suuria ja pienempiä lämpövarastoja. Hinta-arviot sisältävät varastointimateriaalit, varaamista ja purkamista vaativan tekniikan sekä käyttökustannukset. Tuntuvat lämpövarastot ovat melko edullisia, sillä ne vaativat vain säiliön, jossa olevaan väliaineeseen varastoidaan lämpöä, sekä laitteiston varaamista ja purkamista varten. Väliaineena vesi on edullista, mutta säiliön vaatima lämpöeristys saattaa olla suuri kuluerä lämpövarastojärjestelmässä. Useimmat kausittaiseen lämmönvarastointiin suunnitellut järjestelmät sisältävät 5000...10000 m³ vettä. Niiden energiasisältö on luokkaa 70...90 kWh/m³ ja tilavuuden mukaan investointikustannukset vaihtelevat välillä 50...200 €/m³, millä saadaan investointikustannuksiksi energiamäärää kohti 0,5...3,0€/kWh. Todelliset kustannukset lämpövarastojärjestelmille vaihtelevat merkittävästi riippuen kyseisestä sovelluksesta ja sen käyttötarpeista sisältäen varastointisykliä määrän ja taajuuden. Hinta on kuitenkin yhä esteenä joillekin sovelluksille. Sovellukset vaativat räätälöintiä, jotta lämpövarastojärjestelmä täyttää tietyt vaatimukset ja reunaehdot. [45]

6.5 Sähkö- ja kaasuaajoneuvojen yleistyminen

Nolla- ja vähäpäästöiset ajoneuvot eli käytännössä sähkö- ja kaasuaajoneuvot yleistyvät nykypäivänä nopeasti ympäri maailmaa. Poliittiset toimenpiteet esimerkiksi tukijärjestelmien ja verotuksen kautta, sekä sähkö- ja kaasuaajoneuvojen madaltunut hankintahinta ja näiden tekniikan kehittyminen vaikuttavat voimakkaasti ajoneuvokannan muutokseen sekä ajoneuvojen myyntilukuihin. [85] Tutkitaan tässä kappaleessa kahden raportin sisältämiä erilaisia tavoitteita sähkö- ja kaasuaajoneuvojen osalta sekä niitä toimenpiteitä, joilla tavoitteisiin päästään.

6.5.1 Liikenne- ja viestintäministeriön raportti

Liikenne- ja viestintäministeriö (LVM) on selvittänyt, kuinka liikenteen kasvihuonepäästöt voidaan vuoteen 2045 mennessä poistaa kokonaan. Suomen liikenteessä pyritään pääsemään kokonaan fossiilisista polttoaineista eroon viimeistään vuonna 2045, jolloin kaikki nestemäiset polttoaineet olisivat biopolttoaineita. Biopolttoaineiden raaka-aineita on kuitenkin saatavilla vain rajoitetusti huomioimalla niiden kestävä tuotanto Suomessa saatavilla olevan biomassan kannalta, joten pääpaino kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä on käytettävissä liikennevälineissä. [86]

Suomessa liikennevälineiden kannalta tavoitteena on, että liikennevälinekannan uusiutuminen nopeutuisi huomattavasti nykyisestä ja että nolla- ja vähäpäästöisten ajoneuvojen osuus ajoneuvokannasta kasvaisi muutamasta prosentista sataan. Tavoitteena on 670 000 sähköautoa ja 130 000 kaasuautoa vuonna 2030, ja vuonna 2045 tavoitteena

on 2 miljoonaa sähköautoa ja 250 000 kaasuautoa. Edellä esitetyt ajoneuvojen lukumäärät ovat arvioita. Tavoitteena on myös kokonaan lopettaa bensiini- ja dieselkäyttöisten uusien henkilöautojen myynti Suomessa vuonna 2035 sekä tätä seuraten fossiilisten polttoaineiden myynti vuodesta 2045 lähtien. Raportin mukaan tieliikenteen tarpeisiin riittäisi n. 7 TWh biokaasua sekä saman verran nestemäisiä biopolttoaineita vuonna 2045. Lähtökohdiana on, että puolet korvattavasta fossiilisten polttoaineiden energiamäärästä korvataan biokaasulla. [86] Fossiilisten polttoaineiden myyntikielto ohjaisi kehitystä uusiutuviin polttoaineisiin ja vaihtoehtoihin liikennevälineiden käyttövoimiin, kuten sähkö- ja kaasuajoneuvoihin.

Liikennevälineiden tavoitteiden saavuttamisessa on huomioitu seuraavat oletukset: otetaan käyttöön biokaasua niin paljon, kuin se on teknistaloudellisesti mahdollista, oletetaan, että ajoneuvokilometrien kasvu taittuu ja kääntyy laskuun 2025 sekä pysäytetään nestemäisten biopolttoaineiden absoluuttisen määrän kasvu tieliikenteessä 2030 mennessä. Loput tavoitteesta katetaan liikennevälineisiin vaikuttamalla, esimerkiksi regulaation avulla. Raportin mukaan vaikuttavimmat toimenpiteet regulaation kannalta ovat polttoaineverotuksen korottaminen ja hankintatuet nolla- ja vähäpäästöisille autoille. EU:n autovalmistajia sitovaan CO₂-raja-arvoon pyritään myös vaikuttamaan mahdollisimman paljon näitä raja-arvoja tiukentavasti. Myönnetään myös vanhoille henkilöautoille romutuspalkkio autokannan uudistamiseksi sekä jatketaan henkilöautojen kaasu- ja etanoli-käyttöiseksi konvertoimista. Liikenteen päästöihin liittyen aiotaan soveltaa saastuttaja maksaa -periaatetta. Myös jakeluinfrastruktuurin rakentamisen tukiin on ainakin alussa tarvetta. [86]

6.5.2 GASELLI-raportti

VTT, Motiva ja Suomen Kiinteistöliitto ovat tutkineet sähkö- ja kaasuautojen kustannus-tehokkaita edistämiskeinoja GASELLI-loppuraportissa. Noin vuonna 2025 täyssähköautojen odotetaan saavuttavan saman hankintahintatason kuin polttomootoriautoilla. Hankintahintaa pidetäänkin autoilijoille tärkeimpänä yksittäisenä vaikuttavana tekijänä auton ostopäätöstä tehdessä. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi auton lataus- ja tankkausmahdollisuudet, käyttökustannukset, jotka voivat vaihdella merkittävästi auton voimantuotantotavasta riippuen sekä automallin maine. [87]

Tällä hetkellä täyssähköautojen osuus kaikista sähköautoista on n. 16 % Suomessa, mutta kansainvälisesti n. 60 %. Voimakkainta kasvu on ollut viime vuosina ladattavissa bensiinihybrideissä. Jos kasvu jatkuu edellisvuosien tapaan, on Sipilän hallituksen asettama 250 000 sähköauton tavoite mahdollinen vuonna 2030. Tämä tavoite jää kuitenkin kauas liikenne- ja viestintäministeriön tavoitteen 670 000 sähköautosta. Täyssähköautojen pieni määrä johtuu tällä hetkellä mm. rajallisesta täyssähköautovalikoimasta. Valikoimasta puuttuvat kokonaan Suomessa suosittu farmarimalliset autot. Suurin osa valikoimasta on pieni- ja keskikokoisia viistoperämalleja. Ladattavista hybrideistä Suomen kysyntään löytyykin enemmän tarjontaa, mikä selittää niiden suosiota. [86, 87]

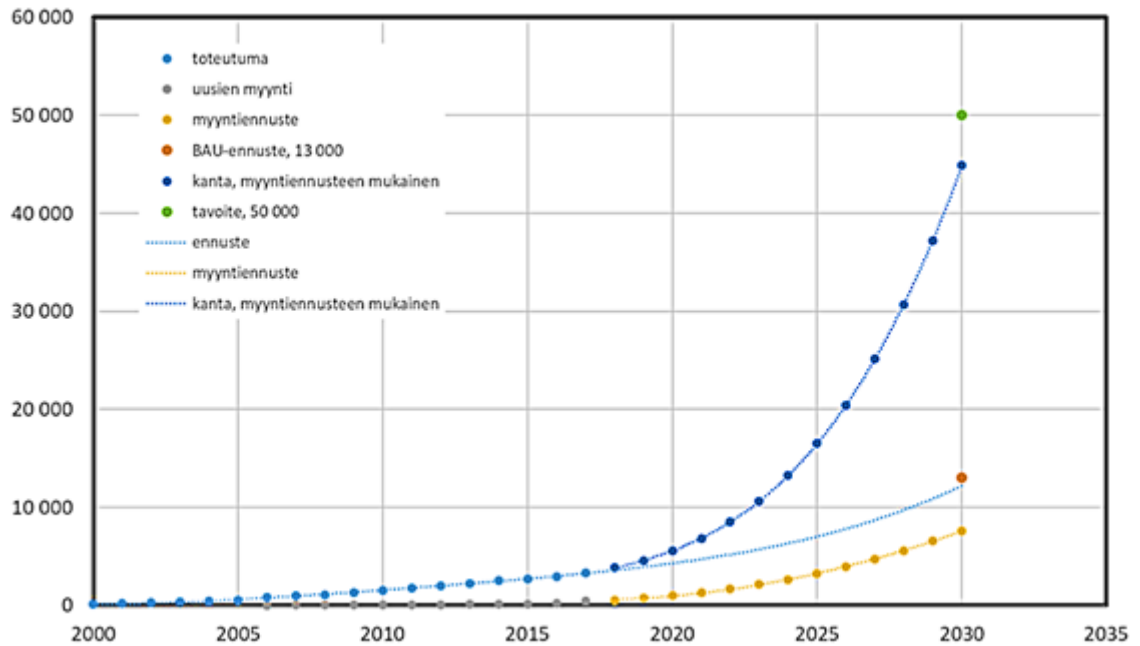
Lähitulevaisuudessa myyntiin tulevat täyssähköautot tulevat kiihdyttämään markkinan kasvua. Uusissa malleissa olevat ominaisuudet alkavat vastata asiakkaiden odotuksia esimerkiksi toimintamatkan osalta. Farmarikorimallia ei kuitenkaan ole vielä lähitulevaisuudessa saatavilla. Suurimpana haasteena tulee olemaan täyssähköautojen saatavuus Suomessa, sillä autoja viedään enemmän niihin maihin, kuten Norjaan, joissa sähköautoja tuetaan voimakkaammin. Täyssähköautojen tuotantomäärät ovat vielä rajattuja, mikä johtuu valmistettavasta akkukapasiteetista. Autovalmistajat kuitenkin panostavat voimakkaasti tällä hetkellä akkukapasiteetin valmistuksen lisäämiseen. [87]

Myös raskaassa liikenteessä on näkyvillä kehitystä sähköistyksen osalta. Erityisesti jakelu- ja joukkoliikenteessä Suomessa on pilotteja käynnissä, mihin syynä on ajoneuvojen korkea käyttöaste, suuret päivittäiset kilometrit ja joissain tapauksissa ennustettavat ajoreitit. [87]

Suurin este sähköautojen yleistymiselle on autoilijoille kynnysehtona pidetty auton hankintahinta, mihin hankintatuki ei vielä ole riittävä kaventamaan sähköauton ja polttomoottoriauton hankintahinnan eroa. Autoilijoiden on myös vaikea arvioida käyttö- ja ylläpito-kustannuksia, jotka sähköautolle ovat edullisemmat. Paljon ajaville sähköauto kuitenkin saattaa pidemmällä tähtäimellä osoittautua kannattavaksi hankinnaksi verrattuna polttomoottoriautoon. [87]

Tukitoimia tarvitaan vielä vuoteen 2025 asti sähköautokannan vahvistamiseksi hankintahintaa alentamaan. Hankintatukea pitäisikin nostaa nykyisestä 2000 eurosta 4000-6000 euroon, jotta ostopäätös olisi yhä edullisempi sähköautojen näkökulmasta. Sähköautoihin liittyy myös paljon tietämättömyyttä esimerkiksi autojen lataamisen osalta. Autoilijoiden tietämystä sähkö- ja kaasuautoista on lisättävä monipuolisesti. [87]

Kaasuautojen osalta niiden markkinoita on pitänyt kurissa aikaisemmin voimassa ollut kaasuautoille oleva 20-kertainen käyttövoimavero, mikä ei kannustanut kaasuauton hankintaan. Nykyään tämä verotus on bensiniikäyttöisten autojen tasolla, mikä on lisännyt kaasuautojen hankintaa. Tosin yleistyminen Suomessa alkoi vasta vuoden 2005 tienoilla, kun taas Euroopassa, esimerkiksi Saksassa ja Italiassa kaasuautokanta on hyvin vahva ja vakiintunut. Myös tankkausasemien laajeneminen ja kaasupolttoaineen edullisuus on edistänyt kaasuautojen hankintaa viimeisen viiden vuoden aikana. Kaasuautojen hankintaa edistää myös edullisten käytettyjen kaasuautojen tuonti esimerkiksi Saksasta ja Ruotsista. Seuraavassa kuvassa (Kuva 17) on esitetty CNG-käyttöisten eli painestettua maa-/biokaasua käyttävien henkilöautojen myyntiennuste ja kanta Suomessa vuoteen 2030 asti. [87]



Kuva 17. CNG-käyttöisten henkilöautojen myyntiennuste (keltainen) ja myyntiennusteen mukainen autokanta (tumman sininen) Suomessa vuoteen 2030 asti.

[87]

Kuvasta (Kuva 17) nähdään, että henkilökaasuautoja on ennustettu olevan noin 45000 kappaletta vuonna 2030 sekä niiden myynnin ennustetaan kasvavan noin 8000 kappaaleeseen vuodessa vuoteen 2030 mennessä. [87]

Kaasun saatavuus on suurin rajoite kaasuauton hankinnalle, vaikka kaasuauto ei juuri tekniikan kannalta eroa tavanomaisesta nestemäisellä polttoaineella kulkevasta polttomoottoriautosta. Nestemäistä polttoainetta käyttävä auto on myös mahdollista konvertoida kaasuautoksi asentamalla olemassa olevan polttoainejärjestelmän rinnalle kaasun ruiskutusjärjestelmä. Konversioon on saatavilla Traficomilta tukea 1000 euroa vuoteen 2021 asti. [87] Konversioita teetetään muutaman tuhannen euron hintaan [88].

Kaasuautojen tankkausasteiden painopiste sijaitsee Etelä-Suomessa kaasuverkoston alueella. Nykyään kuitenkin biokaasun tuotannon sekä LNG-tekniikan ja LNG-terminaalien ansiosta kaasua on saatavilla myös muualtakin kuin kaasuverkoston alueelta Etelä-Suomesta. Yleensä raskaan liikenteen käyttämien LNG-tankkausasemien yhteyteen lisätään CNG-tankkausasema henkilö- ja pakettiautoille. Tankkausasemia ja biokaasulaitoksia perustetaan jatkuvasti lisää. [87]

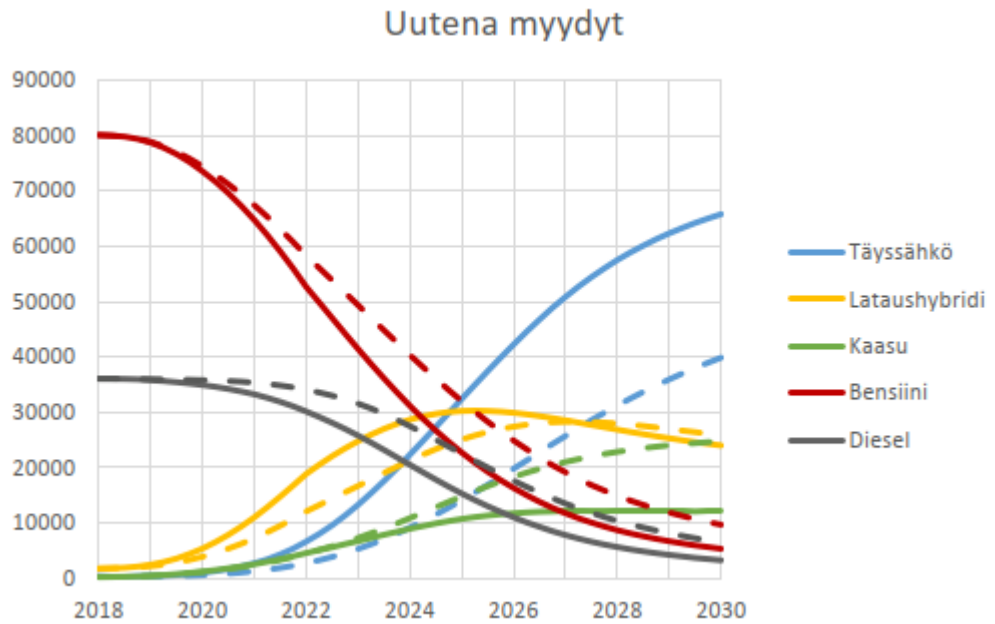
Yhtenä haasteena on myös kaasuautojen markkinatarjonta, joka rajoittuu Suomessa lähinnä saksalaisten ja italialaisten valmistajien malleihin. Autonvalmistajien kannattaa kuitenkin valmistaa kaasumalleja, sillä 20 % pienemmät CO₂-päästöt auttavat keskipäästö-tavoitteissa. [87]

Kaasuajoneuvojen markkinoiden kasvamista edesauttavia tekijöitä ovat bensiini- ja dieselkäyttöisiä ajoneuvoja pienemmän verot, kuten autoveron veroprosentti, ajoneuvoveron perusosa sekä käyttövoimavero. [87]

GASELLI-loppuraportissa esitetään myös useita simulointiskenaarioita ja näiden mallinuksen tuloksia autokannan ja autojen myynnin kehittymiselle vuoteen 2030 asti. Referenssiskenaariona käytetään hinnan lasku -skenaariota, jossa eri autotyypit (täyssähkö, ladattava hybridi, kaasu, diesel ja bensiini) saavuttavat saman hinnan vuonna 2026 ja sen jälkeen pysyvät samana. Ennen vuotta 2026 sähköautot halpenevat lähinnä tuotantomäärien kasvun myötä ja muut kallistuvat mm. tiukkenevien päästövaatimusten takia. Sähköautojen hankintatuki on aluksi 2000 €, mutta vähenee tämän jälkeen lineaarisesti sähköautojen halpenemisen myötä nolnaan. Referenssiskenaarion lisäksi muita skenaarioita ovat [87]:

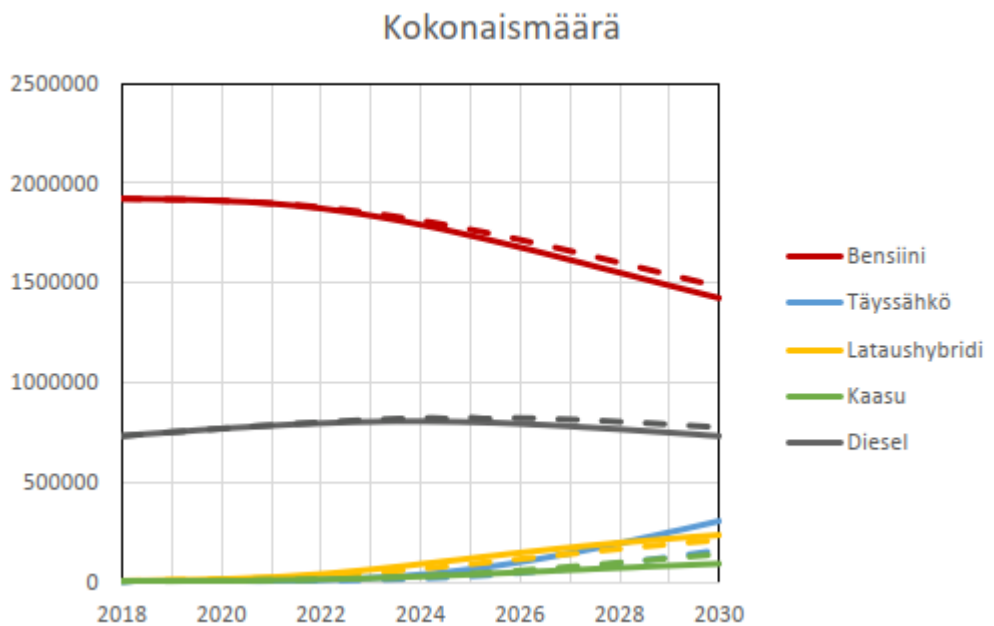
- autoveroskenaario, jossa autoverokäyrää jyrkennetään siten, että täyssähköauton vero putoaa nolnaan
- ajoneuvoveroskenaario, jossa sähköautojen käyttövoimavero pudotetaan nolnaan
- kerrostalolatausskenaario, jossa latausinfrastruktuurin rakentamiseen panostaminen kolminkertaistuu nykyisestä
- pientalolatausskenaario, jossa panostetaan pientalolataukseen
- yritysautot -skenaario, jossa täyssähköautojen houkuttavuus kasvoi 20 %
- markkinointiskenaario, jossa täyssähköautojen houkuttavuus kasvoi 10 %
- nollaskenaario, jossa parametrit autojen verottoman hinnan, hankintatuen (2000 €), verojen ja polttoainehintojen osalta pysyvät samana.

Kaikki nämä skenaariot on tarkoitettu lisäämään täyssähköautojen ja osaltaan ladattavien hybridien myyntiä ja markkinaosuutta. Seuraavissa kuvissa (Kuva 18 ja Kuva 19) on esitetty kaikkien skenaarioiden vaikutus uusien autojen myyntiin ja autokantaan. Referenssinä on katkoviivalla pelkkä hinnan lasku -skenaario. [87]



Kuva 18. Kaikkien skenaarioiden vaikutus autotyyppien myyntiin. [87]

Kaikkien skenaarioiden vaikuttaessa (Kuva 18) nähdään, että täyssähköautot valtaavat uusien autojen markkinat selkeästi vuoteen 2030 mennessä ensin polttomoottoriautoilta ja lopulta myös ladattavilta hybrideiltä, kun niiden myynti kääntyy laskuun 2020-luvun puolivälissä. Seuraavassa kuvassa (Kuva 19) on esitetty kaikkien skenaarioiden vaikutus autokantaan.



Kuva 19. Kaikkien skenaarioiden vaikutus autokantaan. [87]

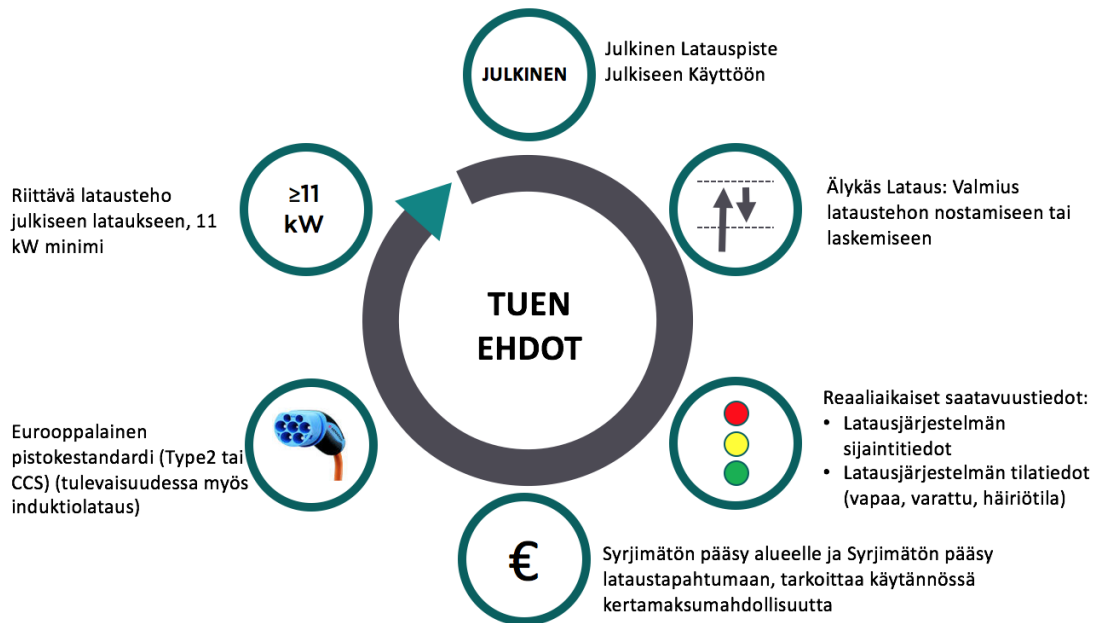
Kuvan (Kuva 19) perusteella dieselautojen osuus autokannasta ei ensin vähene vaan jopa nousee. Tämä johtuu dieselautojen suuresta tuontimäärästä, joka on pidetty vakiona vuoden 2018 tietojen perusteella. Kaasuautot menettävät markkinaosuutta sähköautoille referenssiin verrattuna, mutta tämä ei ole realistista, sillä vaikutusta on skenaarioissa ohjattu nimenomaan pelkästään täyssähköautojen yleistymistä varten. Tästä huolimatta kaasuautojen osuus nousee noin sadantuhannen lähetyville. Kaasuautoja suosittaessa esimerkiksi markkinoinnilla ja veroeduilla, niiden myynti todennäköisesti lisääntyisi. Lataushybridejä on tässä skenaariossa noin 230 000 ja täyssähköautoja 300 000 vuoteen 2030 mennessä.

GASELLI-loppuraportissa tehtyjen simulointien perusteella suurimmiksi vaikuttaviksi tekijöiksi sähkö- ja kaasuautoilua edistämään ovat auto- ja ajoneuvovero, latausinfrastruktuuri sekä markkinointi. Ohjaustekijöiden keskinäistä vaikutusta on kuitenkin vaikea arvioida. Kokonaisuudessa sähköautojen yleistymistä kannattaa tukea tarkastelujakson alkupäässä. Kustannustehokkaimmiksi ohjauskeinoiksi osoittautuivat autojen hankintahintaan vaikuttavat ohjauskeinot kuten hankintatuki ja autoveron muutos, sekä rivi- ja kerrostalolatausinfrastruktuurin edistävät toimenpiteet. Näiden lisäksi kannattaa panostaa viestintään ja markkinointiin yleisen tietouden levittämiseksi. [87]

6.6 Sähkölataus- ja kaasutankkauspisteiden hankintatuet

Sähköajoneuvojen latauspisteiden ja kaasuaajoneuvojen tankkauspisteiden hankinta ja rakentaminen halpenee sähkö- ja kaasuaajoneuvojen yleistyessä sekä tukijärjestelmien kautta niistä tehdään houkuttelevampia. Nämä tukijärjestelmät ovat seurausta poliittisista päätöksistä osana energia- ja ilmastopoliittikkaa.

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) tukee sähköajoneuvojen julkisen latausinfrastruktuurin kehittämistä yhteensä 4,8 miljoonalla eurolla vuosina 2017–2019 osana Sipilän hallituksen biotalous ja puhtaat ratkaisut -kärkihanketta. Päämääränä on saada noin 15 miljoonan euron investoinnit julkiseen lataukseen ja kolminkertaistaa julkinen latausverkosto vuosien 2017-2019 kuluessa. Tukea jaetaan joko 35 % tai 30 % riippuen onko investointi pikalatausjärjestelmä vai normaali latauspiste. Merkittävä osa tästä tuesta on jo kuitenkin jaettu. Seuraavassa kuvassa (Kuva 20) on esitetty tuen saamisen ehdot. [89]



Kuva 20. TEM:n tuen ehdot julkisen latausinfrastruktuurin kehittämiseen.

Myös asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus (ARA) tarjoaa tukea sähköajoneuvojen latausinfrastruktuurin rakentamiseen asuinrakennusten omistajille 1,5 miljoonan euron edestä jatkuvalla hakuajalla. Valtionyhtiö Motivan selvityksen mukaan yksittäisen sähköajoneuvon latauspisteen rakentaminen on helppoa, eikä vielä vaadi mittavia muutoksia taloyhtiön sähköjärjestelmiin kuten sähköliittymän kokoon. Sähköjärjestelmän olemassa oleva kapasiteetti kuitenkin osoittautuu yleensä riittämättömäksi latauspisteiden määrän kasvaessa. [90, 91] Myös Kiinteistöliitto on tehnyt taloyhtiöiden latauspisteiden hankinnasta kyselyn, josta selviää, että latauspisteille ei ole vielä riittävästi kysyntää. Ladattavia hybrideitä ja täyssähköautoja ei ole vielä siis riittävästi. Joka neljäs sähköautoileva taloyhtiöasukas ei ollut kuitenkaan saanut järjestettyä sähköajoneuvolleen latauspistettä. Kyseessä on muna-kana -ongelma, eli toisaalta latauspisteitä pitäisi lisätä, mutta toisaalta niille ei ole tarpeeksi kysyntää. Edellä mainittuihin ongelmiin ARA kuitenkin myöntää valtionrahoitteista tukea taloyhtiöille latauspisteiden rakennusta varten. [92]

Kaasuajoneuvojen tankkauspisteille puolestaan jaetaan mm. EU-tukea. Kaasuoyhtiö Gasum on saanut 14 kaasutankkauspisteeseen tukea 2,9 miljoonaa euroa. Tuella on tarkoitus vastata kasvavan kaasuajoneuvokannan myötä kasvaneeseen tankkauspisteiden kysyntään. [93] Kaasuajoneuvojen tankkauspisteitä rakennetaan Suomeen jatkuvasti lisää Gasumin ja muiden toimijoiden toimesta.

Energiavirasto kilpailuttaa liikenteen infrastruktuuritukea kaasutankkausasemille ja sähköisen liikenteen latausjärjestelmille vuosille 2018-2021 yhteensä 16 miljoonaa euroa. Taustalla on tavoite puolittaa liikenteen päästöt vuodesta 2005 vuoteen 2030, mikä on

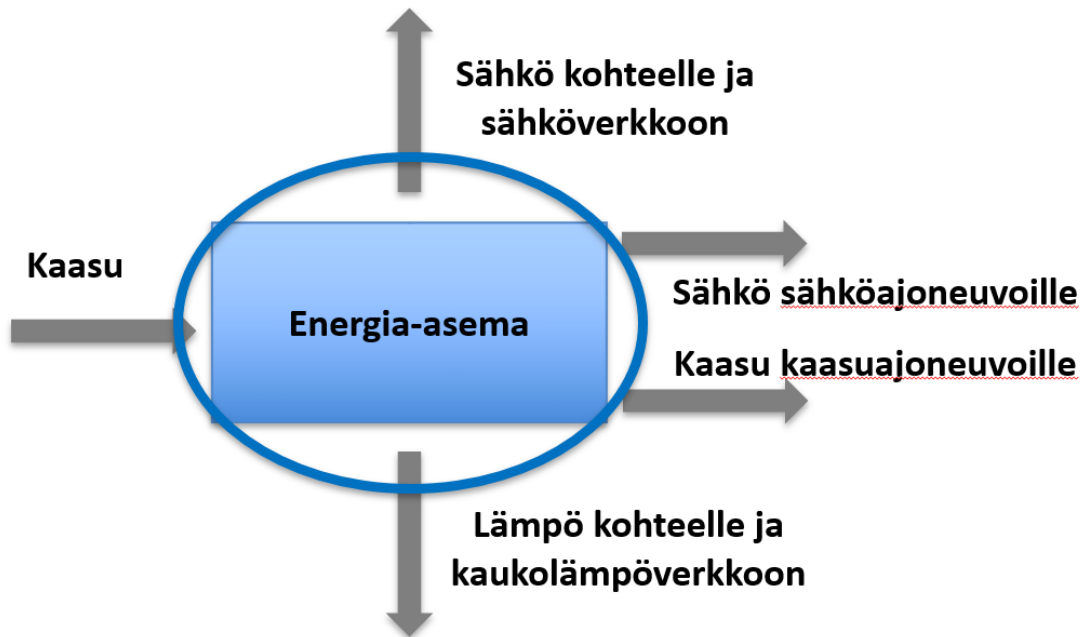
osa kansallista energia- ja ilmastostrategiaa. Tieliikenteessä on suurin päästövähennyspotentialiaali ja tavoitteena onkin nopeuttaa ajoneuvokannan uusiutumista sekä lisätä vaihtoehtoisia käyttövoimia tieliikenteessä. Energiavirastolle tehdyt hakemukset pisteytetään ja hankkeille lasketaan vertailuluku. Tukirahalla on tarkoitus kattaa osa investointien kustannuksista. Energiaviraston tarjouskilpailussa kilpaillaan neljässä ryhmässä [94, 95]:

1. Kaasutankkausasemat, ensi sijassa biokaasulle, kaasuverkon ulkopuolella
2. Paikallisen joukkoliikenteen latausjärjestelmät linja-autoille
3. Ajoneuvojen suuritehoiset latausjärjestelmät, yli 22kW tasavirralla sekä
4. Ajoneuvojen peruslatausjärjestelmät, vähintään 3,7 kW vaihtovirralla.

Ensimmäisellä kierroksella hakemuksia tuli vain ryhmiin 1 ja 3, joihin jaettiin noin 1,5 miljoonaa euroa, joka on puolet budjetoidusta tukimäärästä. Tukea saaneet suurtehoiset latauspisteet (ryhmä 3) rakennetaan viidelle paikkakunnalle, joihin jokaiseen rakennetaan yksi latausjärjestelmä. Tukea saaneita kaasutankkausasemia on yhteensä 10 kappaletta, jotka rakennetaan kuudelle paikkakunnalle. Liitteen 4 kuvassa 1 on esitetty ensimmäisen tukikierroksen jälkeen Suomessa olevat ja Suomeen rakennettavat julkiset kaasutankkauspisteet. [94] Liitteen 4 kuvassa 1 vihreällä on merkitty tulevat, tukea saaneet kaasutankkauspisteet, sinisellä olemassa olevat tankkauspisteet sekä punaisella rakenteilla olevat tai käytöstä poistetut tankkauspisteet (vrt. Liite 3 kuva 1). Seuraava ajankohta tarjouksille on syyskuussa 2019, jolloin hakemuksille on jaossa myös yhteensä 3 miljoonaa euroa. [94, 95]

7. ENERGIA-ASEMA

Tässä diplomityössä tarkastellaan energia-asemaa, joka tuottaa kaasumaisesta polttoaineesta sähköä, lämpöä ja kaasua kohteen ja liikenteen energiatarpeisiin. Kohteena voi olla esimerkiksi sairaala, koulukampus tai kauppakeskus, jolle energia-asema tuottaa sähköä ja lämpöä kohteen kysynnän mukaan. Liikenteen energiatarpeisiin energia-asema tuottaa sähköä sähköajoneuvoille ja kaasua kaasuajoneuvoille. Energia-asema tuottaa myös sähköä sähköverkkoon ja lämpöä kaukolämpöverkkoon myytäväksi. Energia-aseman joustavuutta ja käytettävyyttä lisätään sähköakustolla ja lämpövarastolla, jolloin sähköä ja lämpöä voidaan varastoida myöhempää käyttöä varten. Energia-aseman toimintaperiaate on havainnollistettu seuraavassa kuvassa (Kuva 21).



Kuva 21. Energia-aseman toimintaperiaate polttoaineesta energiatuotteiksi.

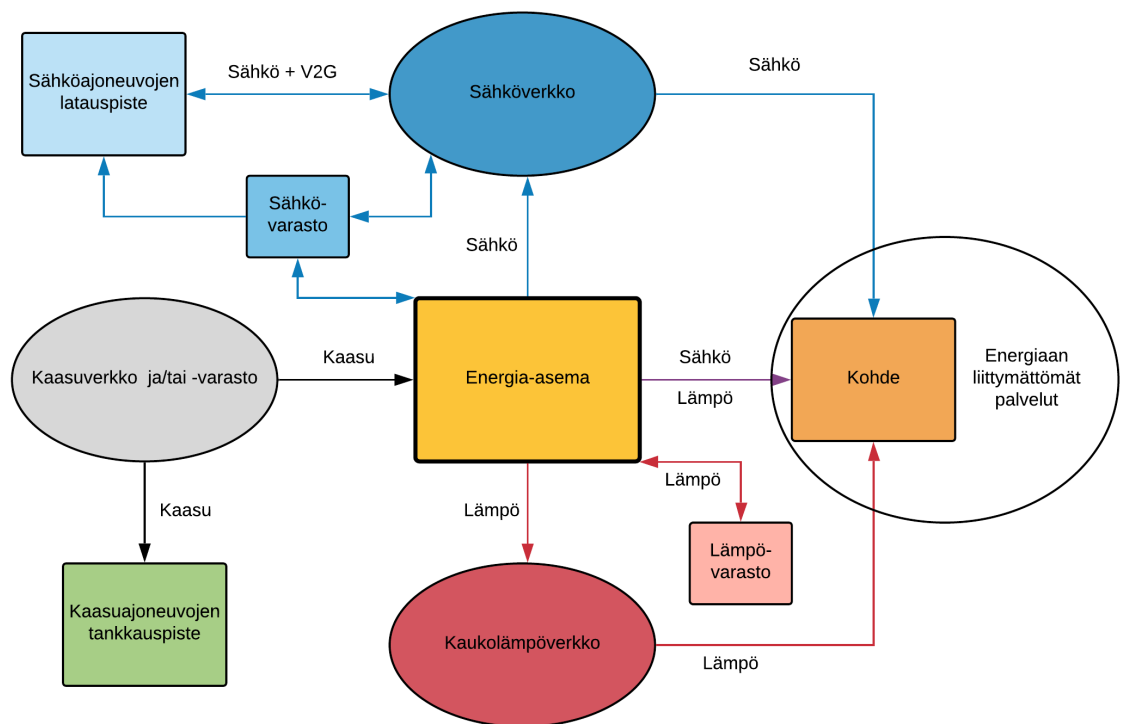
Verrattuna perinteiseen CHP-laitokseen, jossa pelkästään sähköä ja lämpöä tuotetaan samanaikaisesti, energia-asema tuottaa sähkön ja lämmön lisäksi useampia tuotteita ja palveluita, kuten tyydyttää liikenteen energiatarpeita.

Energia-asemaa muistuttavia voimalaitoksia on tutkittu aiemmin nimellä kokonaisenergialaitos, joka käyttää polttoaineenaan kaasua ja tuottaa polttomoottorilla sähköä ja lämpöä. Sähköä tuotetaan moottorin kanssa samalla akselilla olevalla generaattorilla ja lämpö otetaan talteen polttomoottorin pakokaasuista sekä jäähdytys- ja voitelujärjestelmistä. Kokonaisenergialaitosta on suunniteltu käytettäväksi mm. uimahallien, koulujen, sairaaloiden, asuma-alueiden, tavaratalojen yms. lämpö- ja sähköhuoltoa varten. Suuremmat kokonaisenergialaitokset on myös suunniteltu soveltuvan kaukolämpöverkon ja

sähköverkon osaksi. Kokonaisenergiailaitoksen suurimmiksi takaisinmaksuaikaan vaikuttaviksi tekijöiksi herkkyytarkastelussa ja siten kannattavuuteen eniten vaikuttaviksi tekijöiksi nousee: sähkön hinta, laitoksen kokonaisinvestointi sekä polttoaineen hinta. [1] Energia-asemasta poiketen, kokonaisenergiailaitos ei kuitenkaan tyydytä liikennevälineiden, kuten sähkö- ja kaasuajoneuvojen energiatarpeita.

7.1 Energia-aseman ekosysteemi

Energia-asemaa ja siihen liittyneiden tekijöiden ja komponenttien yhteyksiä voidaan kuvata selkeästi ekosysteemin avulla. Tässä ekosysteemissä eri tekijöiden ja komponenttien välisiä suhteita voidaan kuvata energiavirtojen avulla. Energia-aseman ekosysteemiä energiavirtoineen on havainnollistettu seuraavassa kuvassa (Kuva 22).



Kuva 22. Energia-aseman ekosysteemi ja sen sisältämät energiavirrat.

Kuvasta (Kuva 22) nähdään, että energia-aseman ekosysteemi sisältää monia tekijöitä ja komponentteja sekä niiden välisiä energiavirtoja. Eri tekijöitä ja komponentteja tässä ekosysteemissä ovat:

- Energia-asema (CHP-laitos)
- Sähköajoneuvojen latauspiste
- Kaasuajoneuvojen tankkauspiste
- Sähkövarasto

- Lämpövarasto
- Kaasuverkko ja/tai -varasto
- Sähköverkko
- Kaukolämpöverkko
- Kohde sisältäen myös energiaan liittymättömät palvelut

Energia-aseman on tarkoitus olla kokonaisvaltainen sekä kohteen että liikenteen energiatarpeiden täyttävä kokonaisuus. Kohteen tarkoitus energia-aseman ohella on täyttää asiakkaiden energiaan liittymättömät tarpeet, jotka voivat olla moninaisia vihteestä aina asiointipalveluihin.

Energia-asema tuottaa sähköä ensisijaisesti kohteelle, joka voi olla esimerkiksi sairaala, yliopistokampus tai asuinalue, sekä sähköajoneuvojen latausta varten, mutta voi myös myydä ylijäämänsähkönsä sähköverkkoon. Tätä varten energia-asema tarvitsee liitännän sähköverkkoon. Energia-aseman sähköverkkoliitynnän tulee ensisijaisesti määrittämään energia-aseman kokoluokka sekä se, mikä on energia-aseman kohteen, esimerkiksi kauppakeskuksen sähkönkysynnän suuruus.

Energia-asema voidaan sijoittaa kohteeseen, jossa on paikallista lämmön tarvetta. Kohteen lämmön kysyntää varten energia-asema tuottaa lämpöä ja ylijäämälämpö voidaan myydä kaukolämpöverkkoon, mitä varten tarvitaan liityntä kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkon liityntä tulee mitoittaa energia-aseman kokoluokan ja lämmön tarpeen mukaan. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi kohteet, jotka lämpöä tarvitsevat, tulisi sijoittaa mahdollisimman lähellä energia-asemaa.

Energia-asemalta voi olla myös suorat yhteydet kohteelle sähkön ja lämmön tarpeiden tyydyttämiseksi käymättä yleisen sähkö- tai kaukolämpöverkon kautta. Mikäli energia-asema on esimerkiksi liittynyt sähköverkkoon sekä kohteelle omalla liitynnällä, on energia-asema kytketty rinnan yleisen sähköverkon kanssa. Samoin toimittaisiin kaukolämpöverkon tapauksessa. Kohteen tyyppi sekä sen energiatarpeet tulevat merkittävästi määrittämään energia-aseman ja sen ympäröivän ekosysteemin toimintaa.

Energia-aseman polttoaineen tarve voidaan tyydyttää liitynnällä kaasuverkostoon (ks. Kuva 2) tai erillisellä kaasun varastointimenetelmällä. Polttoaineina käytetään kaasumaisia polttoaineita (ks. Kappale 3): maakaasua, biokaasua, LNG:tä ja nestekaasua. Näiden käyttöä voidaan varioida olosuhteiden ja mahdollisuuksien mukaan. Esimerkiksi säiliössä olevaa LNG:tä voidaan hyödyntää, mikäli kaasuverkostosta ostettava maa- tai bio-kaasu on tietyllä hetkellä korkeasti hinnoiteltu.

Energia-asema sisältää sähkön ja lämmön tuotantoa varten lämpövoimakoneeseen perustuvan CHP-voimalaitoksen, joka voi perustua esimerkiksi kaasumoottorivoimalaitokseen (ks. Kappale 2.1). Vaihtosähkön tuotantoa varten mekaaninen energia muutetaan tahtigeneraattorissa (ks. Kappale 2.2) sähköksi.

Sähkö- ja lämpövarastoilla lisätään energia-aseman joustavuutta ja käytettävyyttä sähkön ja lämmön tuotannossa. Energia-aseman näkökulmasta sähkövarastoon varastoitaisiin sähköenergiaa silloin, kun esimerkiksi sähköakun lataaminen sähköverkosta olisi edullisempaa kuin sähkön ja lämmön yhteistuotannolla. Edellyttäen kuitenkin, että mahdollisesti samanaikainen lämmön kysyntä saadaan tyydytettyä muulla tavoin, esimerkiksi lämpövarastoon varastoidulla lämmöllä. Näin säästettäisiin yhteistuotantoon tarvittavaa polttoainetta. Sähkövarastoon varastoitu sähköenergia voitaisiin purkaa vaikkapa sähköajoneuvojen latausta varten. Jos sähköajoneuvojen latauksesta tai kohteen sähkötarpeesta johtuvaa sähkön kulutusta voidaan ennustaa, niin sähkövarastoa olisi kannattavaa ladata halvemman markkinasähkön tunteina, kuin esimerkiksi ostaa sähköverkosta suoraan sähköä korkeampina markkinasähkön tunteina. Samaa menetelmää voidaan käyttää lämpövaraston tapauksessa eli ladata sitä halvemmillä tunneilla ja purkaa kalliimmilla tunneilla.

Kuvassa (Kuva 22) sähkövarastoa voidaan käyttää monipuolisesti. Sitä voidaan ladata energia-aseman tuottamalla sähköllä, mutta myös purkaa energia-aseman kautta suoraan kohteelle. Sähkövaraston kautta voidaan purkaa sähköä sähköverkkoon ja sieltä esimerkiksi suoraan kohteelle taikka ladata sähkövarastoa sähköverkosta otettavalla sähköllä. Sähkövarastosta voidaan myös purkaa sähköä sähköajoneuvojen latausta varten.

Erityisesti sähköajoneuvojen lataus vie aikaa, joten erillisille, energiaan liittymättömille palveluille on autoilevilla asiakkailta kysyntää kohteella. Esimerkiksi kauppakeskuksessa asiakkaat voisivat hoitaa ostoksensa sähköajoneuvojensa latauksen aikana ja siten aikaa tulisi käytettyä tehokkaammin asiakkaiden kannalta. Energiaan liittymättömillä palveluilla saattaakin olla suuri rooli siinä, kuinka paljon asiakkaita saadaan esimerkiksi sähköajoneuvojen latauspisteille. Asiakkaiden käyttäessä lyhytkestoisia energiaan liittymättömiä palveluita, kuten parturi-, kauppa-, pankki- ja vakuutuspalveluja, voisi sähköajoneuvon ladata osittain tai jopa täyteen, sillä aikaa, kun asiakas käyttää aikaansa edellä mainituissa palveluissa.

7.2 Energia-aseman tulevaisuuden näkymät

Investointi energia-asemaan on pitkän aikavälin sijoitus, jolloin on myös luontevaa tutkia investoinnin mielekkyyttä tulevaisuudessa. Tulevaisuuden näkymiä varten on tutkittava, kuinka energia-aseman ekosysteemin muutokset ja sen sisältämät riskit vaikuttavat energia-aseman tuottamiin tuotteisiin ja palveluihin sekä sitä kautta investoinnin kannattavuuteen esimerkiksi takaisinmaksuajan osalta. Energia-aseman polttoaine voi vaihdella sekä energia-asema tuottaa useita tuotteita, joten energia-asemaan vaikuttaa laaja kirjo eri tekijöitä, joiden kehityksellä voi olla positiivisia tai negatiivisia seurauksia energia-aseman kannalta.

Energiatoimialan poliittisten vaikutusten suuruus on suurempi kuin muilla toimialoilla ja energiayhtiöt joutuvat toimimaan näille asetettujen rajoitusten mukaisesti. Energiapolitiikka on samanaikaisesti laajentunut globaalin ilmastopolitiikan osaksi. Erinomainen esimerkki tästä on Pariisin ilmastopöytäkirja ja sen tuomat toimenpiteet energiatoimialalla. Euroopan Unioni asettaa omat päästökiintiöt, minkä pohjalta myös Suomi asettaa omat kansalliset tavoitteet ja tämän pohjalta energiayhtiöt tekevät lopulta investointipäätöksiä. [17]

Energia-aseman käyttäessä tässä diplomityössä esille tuotuja fossiilisia polttoaineita: maakaasua, nestekaasua ja nesteytettyä maakaasua (ks. Kappaleet 3.1, 3.2, ja 3.4) alituu energia-aseman polttoaineen hinta kansainvälisen polttoainekaupan hinnan vaihteluille. Tutkituista kaasumaisista polttoaineista pelkästään biokaasua (ks. Kappale 3.3) voidaan tuottaa täysin kotimaisesti, joten sen hintaan vaikuttavat tekijät ja riskit saadaan suurimmaksi osaksi rajattua kotimaan rajojen sisäpuolelle. Fossiilisten polttoaineiden hinnan ennustamiseen liittyy kuitenkin aina merkittävää epävarmuutta pitkällä aikavälillä [63]. Kaasumaisten polttoaineiden hintaan vaikuttavia tekijöitä (ks. Kappale 6.1) sekä kaasumarkkinoiden avautumisen vaikutusta (ks. Kappale 6.1.1) on tutkittu teoriaosuuden tulevaisuusnäkymissä. Esimerkiksi nouseva maakaasun hinta tuo lisäkustannuksia energia-asemalle sen tuottaessa lämpöä ja sähköä lämpövoimakoneen avulla. Toisaalta kaasujoneuvoilta perittävää polttoainehintaa voidaan nostaa, mikäli niiden käyttämän kaasumaisen moottoripolttoaineen markkinahinta nousee.

Kaasumarkkinoiden avautumisen (ks. Kappale 6.1.1) ennustetaan nostavan kaasuverkoston polttoaineiden hintoja lyhyellä aikavälillä kohonneiden infrastruktuuri-investointien takia, mutta pitkällä aikavälillä kaasumarkkinoiden avautumisella olisi polttoaineiden hintaa laskeva vaikutus. Laskeva polttoaineen hinta laskisi energia-aseman tuottaman sähkön ja lämmön kustannuksia suoraan ja parantaisi siltä osin kannattavuutta. Toisaalta kaasujoneuvojen tankkaama polttoaine myös halpenee, mikä puolesta energia-asema menettää tuloja, mikä heikentää osaltaan kannattavuutta. Kaasumarkkinoiden avautumisen myötä myös kaasun hinnan volatilitteetti tulee kasvamaan, mikä vaikeuttaa kaasun hinnan ennustamista. Tämä edellyttää älykkyyttä energia-asemalta, jolloin polttoainetta voidaan esimerkiksi vaihdella hetkellisesti kalliimman putkikaasun ja säiliössä olevan hetkellisesti halvemmän kaasun välillä. Kaasuntoimittajia tulee kuitenkin olemaan useita, jolloin energia-asema voi kilpailuttaa kaasun hankintansa.

Teoriaosuuden tulevaisuusnäkymissä on tutkittu myös sähkön hintaan vaikuttavia tekijöitä (ks. Kappale 6.2) sekä esitetty tulevaisuusskenaarioita pörssisähkön hinnalle (ks. Kappale 6.2.1). Suurin hinnan nousu pörssisähkölle ennustetaan olevan skenaarioissa, joissa ilmastotavoitteet huomioidaan priorisoidusti. Tällöin esimerkiksi pörssisähkön hintaan vaikuttava päästöoikeuden hinta nousee nykyisestä merkittävästi. Päästöoikeuden hinta onkin noussut ennustettua nopeammin (ks. Kuva 13). Energia-aseman kannalta

nouseva sähkön hinta vaikuttaa suotuisasti kannattavuuteen, sillä tuotetusta sähköstä saadaan siten parempi hinta. Tämä kuitenkin nostaa vaihtoehtoisesta sähkön hankintavasta, ostosähköstä, maksettavaa hintaa esimerkiksi kohteen sähköntarpeen tyydyttämiseksi. Kuitenkin energia-aseman käyttämästä sähköstä suurin osa tulee tuotettua itse, jolloin ostosähkön osuus ja siten myös sen vaikutus jää pieneksi, kunhan sähkön myyjälle maksettava marginaali säilyy kohtuullisena.

Lämmön tuotannon osalta on tarkasteltu lämmön tarvetta tulevaisuudessa sekä kolmannen osapuolen toimimista kaukolämpöverkossa (ks. Kappale 6.3). Lämmitysenergian tarpeen ennustetaan pienevän tulevaisuudessa esimerkiksi ilmaston lämpenemisen ja rakennusten energiatehokkuuden kasvun myötä, mikä osaltaan heikentää energia-aseman näkymiä. Mahdollisesti tulevaisuudessa kaukolämpöliiketoiminnassa on käytössä avoin markkinamalli (ks. Kappale 6.3.1), jolloin energia-asema voisi myydä lämpönsä suoraan asiakkaalle ilman välikäsiä kaukolämpöverkon kautta.

Nykytilanteessa energia-asema voi tehdä kahdenvälisen lämpösopimuksen kohteen, esimerkiksi sairaalan, kanssa siten, että kaukolämpöverkko ei ole osa jakelutietä. Parhaimmassa tapauksessa kohde, jolle energia-asema tuottaa lämpöä, ostaa kaiken tuotetun lämmön. Kaukolämpöverkkoon voidaan kuitenkin myydä ylijäämälämpö minkä lisäksi lämpövarasto tuo joustavuutta kaukolämpöverkon ja kohteen lämmöntarpeen välille. Ylijäämälämmön osalta energia-asema voisi toimia kolmantena osapuolena lämmöntuottajana kaukolämpöyhtiölle. Myös kohde voi olla liitetty kaukolämpöverkkoon energia-aseman lisäksi, jolloin kaukolämpöverkon lämmön hinta mahdollisesti kilpailee energia-aseman tuottaman lämmön hinnan kanssa. Kohde voi myös hyödyntää erilaisia lämmöntuotantotapoja, kuten lämpöpumppuja, tyydyttääkseen lämmöntarpeensa, jolloin kilpailua on vielä enemmän. Energia-aseman täytyy siis tarjota kilpailevia lämmöntuottajia ja lämmöntuotantotapoja edullisempaa ja houkuttelevampaa lämpöpalvelua. Energia-asema voisi tehdä esimerkiksi sopimuksen kohteen kanssa ensisijaisesti sähkön toimintusta varten eli sähkö olisi primäärituotteena, jolloin energia-aseman tuottama lämpö voidaan myydä alhaiseen hintaan, esimerkiksi kaukolämpöä halvemmalla, kohteelle ns. sekundäärisenä tuotteena.

Energiavarastoja on tarkasteltu kappaleessa 6.4. Erityisesti litiumioniakustojen osalta hinnat ovat pudonneet jyrkästi viime vuosina sekä hinnan laskun odotetaan jatkuvan (ks. Kuva 15). Tuntuva lämmön lämpövarastot ovat jo pitkälle kehittyneitä teknologiaa eikä niiden osalta odoteta enää suurta hinnan laskua. Energia-aseman osalta energiavarastojen tuoma joustavuus energian hankinnassa täytyy olla arvokkaampaa kuin energiavarastojen kustannukset, mikä oikeuttaa energiavarastojen käytön niiden ollessa kannattavia. Erityisesti litiumioniakustojen aleneva hinta parantaa niiden kannattavuutta vuosi vuodelta.

Suomessa valtiolta vaikuttaa voimakkaasti tulevaisuuden liikennöintiin ja liikennevälineisiin (ks. Kappale 6.5). Nolla- ja vähäpäästöisten ajoneuvojen eli täys- ja hybridisähköajoneuvojen sekä kaasuajoneuvojen kasvava absoluuttinen määrä sekä kasvu autokannassa (ks. Kuva 17, Kuva 18 ja Kuva 19) ovat energia-asemalle aina hyvä asia, sillä siten energia-aseman tarjoamille sähkölatauspisteille ja kaasutankkausasteille on enemmän potentiaalista asiakaskuntaa. Tulevaisuudessa todennäköisesti siis yksittäinen sähkölatauspiste ja kaasutankkausaste saa myytyä enemmän polttoainetta kuin nykyäänä. Sähkö- ja kaasuajoneuvojen yleistymisellä on vielä esteitä kuten hankintahinta, kapea automallien tarjonta sekä lataus- ja tankkausasteiden pieni lukumäärä ja levinneisyys, mutta näiden esteiden odotetaan helpottavan tulevaisuudessa.

Investointituet sähköajoneuvojen latauspiste- ja kaasuajoneuvojen tankkausasemainfrastruktuurin kehittämiseen (ks. Kappale 6.6) tukevat osaltaan näitä polttoaineita käyttävien ajoneuvojen kannan kasvua ja siten tuovat energia-asemalle kasvavaa potentiaalista asiakaskuntaa. Tihenevä sähkölataus- ja kaasutankkausverkosto vaikuttaa siis positiivisesti energia-aseman kannattavuuteen. Energia-aseman kannalta kattava latauspisteinfrastruktuuri on aina hyvä asia, mikäli olemassa olevia latauspisteitä voidaan hyödyntää esimerkiksi taloyhtiöiden tapauksessa, jolloin energia-aseman investointitaakka kevenee latauspisteiden osalta. Tällöin energia-asema voisi tarjota asuinkiinteistöjen tarvitseman sähkön ja lämmön sekä itse latauspisteiden tarvitseman sähkön. Myös julkisille lataus- ja tankkausasteille jaettava investointituki helpottaa energia-aseman kokonaisinvestoinnin taakkaa merkittävästi, mikäli energia-aseman lataus- ja tankkausasteiden hankintaa varten tällainen tuki myönnetään.

Tässä kappaleessa on tarkasteltu energia-aseman tulevaisuutta sen käyttämien energiamuotojen ja ekosysteemin komponenttien osalta. Tulevaisuudennäkymiä voidaan kuvata positiivisiksi, sillä lähes kaikilla tarkastelluilla osa-alueilla on positiivista kehitystä havaittavissa niin hintojen, markkinoiden rakenteen kehityksen ja teknologian levinneisyyden osalta. Positiiviset näkymät vahvistavat energia-aseman liiketoimintapotentiaalia sekä toteutuessaan parantavat energia-aseman kannattavuutta.

7.3 Potentiaaliset sijoituskohteet energia-asemalle

Energia-asemalle potentiaalisia sijoituskohteita ovat kohteet, joissa on mahdollisimman paljon kysyntää energia-aseman tuottamille palveluille sekä tuotteille. Sijoituskohteen energiakysyntä täytyy siis olla monipuolista. Tällaisia suurempia kohteita ovat esimerkiksi kauppaja messukeskukset, toimistorakennukset sekä sairaalat. Pienempiä kohteita ovat esimerkiksi huoltoasemat.

Energia-aseman ekosysteemin sisältäessä liittynyt eri energiaverkkoihin (sähkö-, lämpö- ja kaasuverkko) voidaan energia-aseman sijoituskohdetta rajata merkittävästi. Sähköverkko on käytännössä koko Suomen alueella, kaukolämpöverkot kaupungeissa

ja kunnissa, mutta kaasuverkko löytyy vain Etelä-Suomesta (ks. Kuva 2). Siten energia-asema on mielekästä sijoittaa Etelä-Suomeen kaasumaisen polttoaineen saatavuuden turvaamisen kannalta. Lataus- ja tankkauspisteiden kannalta potentiaalista asiakaskuntaa on myös oltava riittävästi.

Liikenneviraston julkaisemassa ”Valtakunnallinen tieliikenne-ennuste 2030” -raportissa [96] on esitetty tieliikenteelle ennusteita vuoteen 2030 asti. Vuoteen 2012 verrattuna raportissa on laskettu vuonna 2030 liikennemäärien kasvukertoimien olevan n. 1,3-kertaisia kaikilla tärkeimmillä yhteysväleillä. Liikenteen kasvu tällä aikavälillä tulee olemaan siis merkittävää. Liitteen 5 kuvassa 1 on esitetty tärkeimpien valtateiden ennustetut liikennemäärät vuonna 2030 kevyen liikenteen osalta ja kuvassa 2 raskaan liikenteen osalta. Kuvista nähdään, että suurissa kaupungeissa ja näiden välillä liikennemäärät ovat suuria. Kevyelle liikenteelle liitteen 5 kuvassa 1 värien liikennettä kuvaavat määrät ovat kymmenkertaisia verrattuna kuvaan 2, jossa esitetään raskaan liikenteen liikennemäärät. Suurimpia liikennemäärät ovat pääkaupunkiseudun ja lähikaupunkien, Lahden, Hämeenlinnan ja Porvoon, välillä. Liikenneviraston raportti tukee energia-aseman sijoittamista Etelä-Suomeen edellä mainituille tärkeille yhteysväleille, jotta sähköajoneuvojen latauspisteille ja kaasujoneuvojen tankkauspisteille olisi mahdollisimman paljon potentiaalista asiakaskuntaa sekä kevyen että raskaan liikenteen puolesta.

Sähköinen liikenne -hankkeessa on tutkittu sähköajoneuvojen levinneisyyttä sähköajoneuvokannan ja latausinfrastruktuurin kehittyessä. Hankkeessa Työ- ja elinkeinoministeriön energiatuen piiriin kuuluviin sähköajoneuvoihin on asennettu tiedonkeruulaitteistot keräämään tietoa mm. ajetusta matkasta ja latauksista. Sähköajoneuvojen kulkemia matkoja ja levinneisyyttä on esitetty karttamuodossa liitteen 6 kuvassa 1. Kuvasta 1 nähdään, että sähköajoneuvot ovat levinneet käytännössä koko maahan. Tämä tapahtui jo vuonna 2015. Suurin esiintymistiheys on suurissa kaupungeissa, erityisesti pääkaupunkiseudulla, ja näiden välisillä yhteyksillä. Potentiaalisia asiakkaita sähköajoneuvojen latauspisteille löytyy siis eniten näistä edellä mainituista paikoista, mikä energia-aseman kannalta vahvistaa sen sijoittamista Etelä-Suomeen. [97]

7.3.1 Olemassa olevan lataus- ja tankkausinfrastruktuurin hyödyntäminen

Mikäli käytetään olemassa olevaa infrastruktuuria sähköajoneuvojen latauksen tai kaasujoneuvojen tankkauksen suhteen, voidaan energia-asema perustaa yhteistyössä lataus-/tankkausoperoijan kanssa edellyttäen, että kaikille energia-aseman tuottamille tuotteille ja palveluille on riittävä kysyntä. Energia-asematoimija säästäisi lataus-/tankkausinfrastruktuurin hinnan, mutta myös menettäisi ainakin osan tuotoista, joita sähköajoneuvojen latauksesta ja kaasujoneuvojen tankkauksesta saataisiin. Sähköajoneuvojen latausta varten energia-aseman sähkövarastosta voitaisiin ottaa sähköenergiaa, jos sillä hetkellä oleva markkinasähkön hinta sähköverkosta otettuna olisi kalliimpaa.

Energia-asematoimija siis myisi sähkövarastossaan olevan sähköenergian sähköajoneuvojen latausoperoijalle. Tämä nostaisi sähkövaraston käytettävyyttä ja lyhentäisi sen takaisinmaksuaikaa, mikäli mahdollisilla muilla energia-aseman ekosysteemissä olevilla toimijoilla ei ole kyseisellä hetkellä tarvetta sähkövaraston sisältämälle sähköenergialle eivätkä olisi valmiita maksamaan siitä korkeampaa hintaa kuin latausoperoija.

7.4 Energia-aseman älykäs käyttö

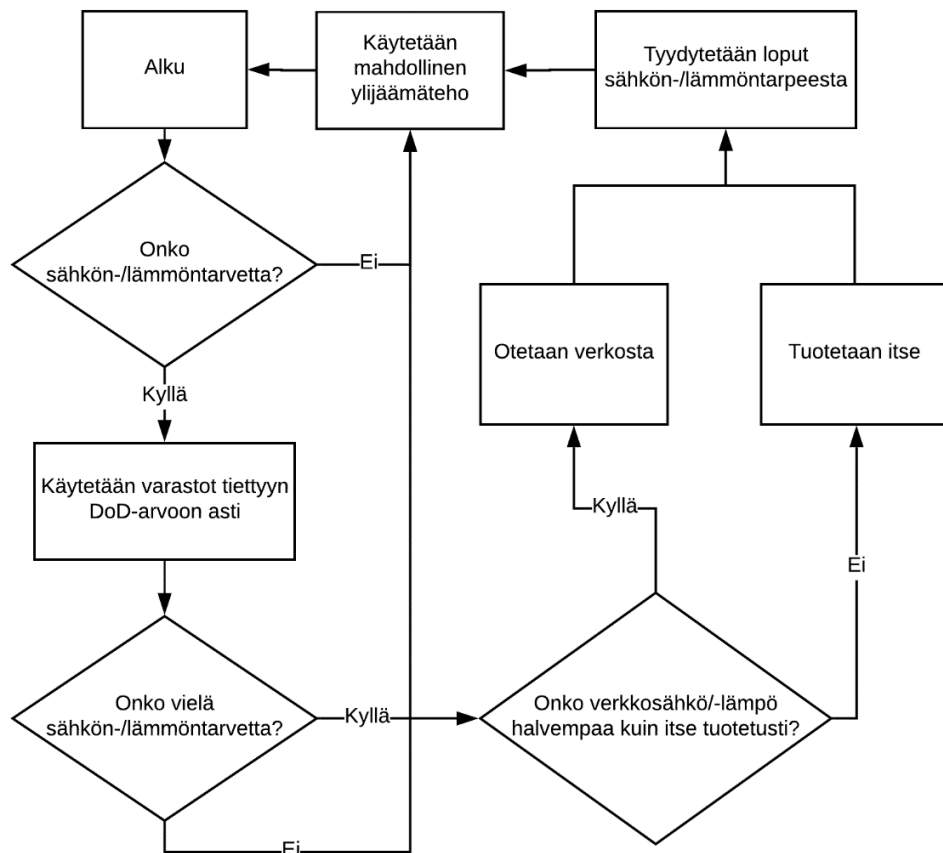
Älykkyyden integroiminen mahdollistaa energia-asemalle paremman kannattavuuden, kuin esimerkiksi perinteisesti yksinkertaisella käyttöperiaatteella käytettäville yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotantolaitoksille. Energia-aseman on jatkuvasti optimoitava käyttöään, eli tuotettavien tuotteiden hankintatapojen suhdetta toisiinsa, markkinoiden ja olosuhteiden mukaan. Toisaalta älykkyys itsessään jopa mahdollistaa monipuolisten tuotteiden tarjonnan, mikä ei ilman älykästä käyttöä olisi välttämättä kannattavaa. On ensisijaisen tärkeää, että energia-asemaa käytetään mahdollisimman optimaalisesti ja siten kannattavasti, sillä väärin ja kannattamattomien päätösten tekeminen pidentää energia-aseman takaisinmaksuaikaa ja huonontaa kannattavuutta. Esimerkiksi kalliin sähköverkosta ostetun sähkön määrä kannattaa pitää pienenä ja tuottaa sähkö yleensä mieluummin itse lämpövoimakoneen avulla.

Energia-aseman tuotteiden kysynnän olosuhteet asettavat älykkäälle käytölle reunaeh-toja. Esimerkiksi, jos liikennevälineiden lataukseen on akuuttia kysyntää, niin tähän kysyntään on vastattava tuottamalla sähköautoille ladattavaa sähköä sekä kaasuautoille kaasumaista polttoainetta. Paikalla olevan autoilijan liikennevälineelle on siis aina käytännössä varattava resursseja tuotantokapasiteetista. Liikennevälineiden lataukseen siis priorisoidaan kapasiteettia, mikä toisaalta voi kuitenkin olla vähemmän kannattava päätös kuin jonkin toisen tuotteen tuotanto hetkellisesti.

CHP-laitoksilla, johon energia-asemakin perustuu, on perinteisesti tuotettu lämpöä päätuotteena ja sähköä sivutuotteena. Nykyään kuitenkin sähkö on yleensä päätuotteena erityisesti hajautetussa tuotannossa. [98] Hajautetussa tuotannossa olisi optimaalisinta tuottaa paikallisesti vain se sähkö ja lämpö, joka tarvitaan. Ongelmaksi kuitenkin tulee sähkön ja lämmön erilainen ja risteävä paikallinen tarve. Esimerkiksi sähkön tarve voi olla ajoittain korkea ja samanaikaisesti lämmön tarve matala. Näin voi erityisesti olla kesäaikaan. Paikallinen energia-asema ei siis voisi tyydyttää molempia tarpeita optimaalisesti samaan aikaan, koska esimerkiksi päätuotteena tuotetun sähkön sivutuotteena syntyy myös aina lämpöä. Tähän ratkaisuna ovat energiavarastot eli lämpö- tai sähkövarastot. Älykkään ohjauksen avulla energia-asema vastaisi korkeaan sähkön tarpeeseen samalla ladaten lämpövarastoa, jos lämmön tarvetta ei sillä hetkellä muuten ole. Toisaalta, jos energia-asema on liitetty sähköverkkoon, voidaan ylimääräinen tarvittava sähkö ottaa sähköverkosta tai ylimääräinen tuotanto syöttää sähköverkkoon.

Hajautetun tuotannon optimointia yhdessä energiavarojen kanssa on tutkittu soveltamalla matemaattisia malleja. Näillä malleilla ajoitetaan CHP-laitosten käyttöä ja optimoidaan tuotettavan sähkön ja lämmön määrää. Näin saadaan vähennettyä käyttökustannuksia sekä kasvatetaan laitoksen hyötysuhdetta. Hajautettujen CHP-laitosten on myös todettu saavuttavan käytön optimoinnilla suurempia tuottoja. [98]

Energia-aseman käyttöperiaate on esitetty yleisellä tasolla seuraavassa kuvassa (Kuva 23). Kuvassa sähköntarve sisältää sekä kohteen oman sähkön tarpeen, että sähköajoneuvojen lataustarpeen. Näistä sähköajoneuvojen sähköntarvetta priorisoidaan eli sähköajoneuvoille on aina oltava saatavilla lataukseen tarvittavaa sähköä. Energiaa käytetään aina ensin energiavaroista ja sen jälkeen joko tuotetaan itse lämpövoimakoneen avulla tai ostetaan verkosta. Päätös energianhankintatavasta tehdään itsetuotettavan ja verkosta hankittavan energian hintoja vertailemalla. Käyttöperiaatteessa ei tarvitse huomioida kaasujoneuvojen tankkausta, sillä niille oletetaan aina olevan saatavilla kaasumaista polttoainetta eli kysyntä kohtaa aina tarjonnan. Oikein mitoitettu kaasuliittymä ei siis aiheuta pullonkaulaa kaasun tarjonnalle eikä kaasumaisen polttoaineen tankkaamisen oleteta vaikuttavan energia-aseman käyttöperiaatteeseen.



Kuva 23. Energia-aseman käyttöperiaate yleisellä tasolla.

Kuvassa (Kuva 23) energia-aseman käyttöperiaatteessa yksi kierros "Alku"-lohkosta nuolien osoittamina takaisin "Alku"-lohkoon on yksi aika-askel. Aika-askeleen pituinen energia-aseman käyttö

1. alkaa vasemman yläkulman "Alku" -lohkosta, jonka jälkeen
2. tutkitaan seuraavassa lohkoissa, onko kyseisellä aika-askeleella sähkön-/lämmöntarvetta:
 - a. Jos sähkön-/lämmöntarvetta on ("Kyllä"), niin priorisoidaan energiavarastoja energian käytössä siten, että ne tyhjenetään määritettyyn DoD-arvoon asti ja edetään seuraavaan lohkoon (kohta 3).
 - b. Mikäli energiantarvetta kohteella ei ole ("Ei") kyseisellä aika-askeleella, niin edetään kohtaan 4.
3. Tutkitaan, onko energiavarastojen käytön jälkeen vielä sähkön-/lämmöntarvetta:
 - a. Jos energiavarastojen varaus ei riittänyt kaikkiin energiatarpeisiin ("Kyllä"), niin jäljelle jäänyt sähkön-/lämmöntarve täytyy tyydyttää verkkosähköllä ja -lämmöllä tai itse tuotetulla sähköllä ja lämmöllä. Näitä kahta vaihtoehtoa vertaillaan hinnan perusteella ja valitaan niistä halvempi. Hinnan vertailu perustuu seuraavaan yhtälöön (3):

$$Hinta_{ostettu\ energia} \leq Hinta_{tuotettu\ energia} \quad (3)$$

Yhtälössä (3) ostetulle energialle hinta lasketaan verkoenergian hinnan perusteella sisältäen energian myynti- ja siirtohinnat. Itsetuotetun energian hinta määritetään polttoainekustannusten perusteella. CHP-laitoksen tuottaessa aina sähköä sekä lämpöä, näiden toisen ollessa kyseisellä aika-askeleella tarpeeton, voidaan tämä tarpeettoman energiamuodon kustannus vähentää kokonaiskustannuksesta esimerkiksi käyttämällä myyntihintaa. Tällä tavalla molemmat tuotetut energiamuodot tulee hyödynnettyä myös taloudellisessa mielessä.

Jos yhtälö on tosi ("Kyllä"), niin energia ostetaan sähkö- ja kaukolämpöverkoista, muussa tapauksessa ("Ei") energia tuotetaan itse lämpövoimakoneen avulla. Edetään kohtaan 4.

- b. Mikäli energiatarpeet on tyydytetty energiavarastojen varauksen hyödyntämisen jälkeen ("Ei"), niin edetään kohtaan 4.
4. Kyseisen aika-askeleen mahdollinen energiantarve on tyydytetty ja lopuksi ladataan energiavarastoja lämpövoimakoneen ylijääneellä teholla, ja tuotettu energiamäärä, joka ei mahdu energiavarastoihin myydään sähkö- ja kaukolämpöverkkoihin. Palataan "Alku" -lohkoon ja edetään seuraavaan aika-askeleeseen ja aloitetaan kierros alusta kohdasta 1.

Edellä kuvattu energia-aseman käyttöperiaate toistuu määritetyn aika-askeleen välein niin kauan, kuin energia-asemaa käytetään eli esimerkiksi koko pitoajan.

8. ENERGIA-ASEMAN SIMULOINTI JA KANNATTAVUUS

Simulointimallissa energia-asemaa ja sen ekosysteemiä simuloidaan kappaleessa 7.4 kuvatun älykkään käyttöperiaatteen mukaisesti. Simulointimalli on toteutettu python-ohjelmointikielellä. Simuloitava energia-asema sekä sen ekosysteemi ja energiavirrat on esitetty kappaleen 7.1 kuvassa (Kuva 22). Simuloinnissa oletetaan, että energia-asema tuottaa kaiken kohteen ja liikenteen tarvitseman energian mukaan lukien kohteen sähkön ja lämmön sekä sähköajoneuvojen latauspistokkeiden sähkön sekä kaasujoneuvojen tankkauspisteiden kaasun. Näille kaikille energiatarpeille on mallinnettu kuormitusprofiilit (ks. Kappale 8.1) tunnin tasolla, eli simuloinnin aika-askeleena käytetään yhtä tuntia. Energia-asema tuottaa energiaa siten, että kuormitusprofiilien mukaiset energiatarpeet tulevat tyydytetyksi hyödyntäen lämpövoimakoneen tuottamaa sähköä ja lämpöä, sähköverkosta saatavaa sähköä, kaukolämpöverkosta saatavaa lämpöä, sähköakustosta saatavaa sähköä, lämpövarastosta saatavaa lämpöä ja kaasuverkosta saatavaa kaasua. Näille tuotteille on määritetty osto- ja myyntihinnat sekä älykkään käyttöperiaatteen mukaisesti energia-asema optimoi energian tuotantoa siten, että se olisi mahdollisimman edullista ja joustavaa energia-asemalle, jolloin kannattavuus olisi mahdollisimman suuri. Käyttöperiaatteen mukaisesti (ks. Kappale 7.4) esimerkiksi verkkosähkön ja itsetuotetun sähkön hintaa vertaillaan ja sen perusteella päätetään edullisempi vaihtoehto. Myös mahdollinen aika-askelen aikainen lämpövoimakoneen ylijäämäteho hyödynnetään tuottamalla sillä sähköä ja lämpöä. Lämpövoimakoneen ylijäämäteholla tuotettu sähkö ja lämpö varataan ensisijaisesti energiavarastoihin ja energiamäärä, joka ei mahdu energiavarastoihin, syötetään sähkö- ja kaukolämpöverkkoon. Yhdistetyssä tuotannossa sähköä ja lämpöä tulee aina tuotettua yhtäaikaaisesti, jolloin toista energiamuotoa voi tulla tuotetuksi liikaa. Energia, jota ei saada käytetyksi tai varastoiduksi, oletetaan saavan myydyksi sähkö- ja kaukolämpöverkkoihin.

Simulointia varten käytetään kolmea eri teholuokkaa energia-asemalle: *pieni*, *keskikoko* ja *suuri*. Skenaarioita simuloidaan useita, joista referenssiskenaariota (ks. Kappale 8.3.1) tarkastellaan tarkemmin kokoluokassa *pieni*. Muissa skenaarioissa (ks. Kappale 8.3.2) varioidaan esimerkiksi sitä, käytetäänkö energiavarastoja vai ei, nouseeko energian hinta tai käytetäänkö vaihtoehtoista polttoainetta. Simuloinnin pohjalta saadaan energia-asemalle simulointitulokset (ks. Kappale 8.3), minkä pohjalta voidaan laskea eri investointitapauksissa kannattavuutta kuvaavat tunnusluvut energia-asemalle nettonykyarvon, sisäinen korkokannan sekä takaisinmaksuajan osalta (ks. Kappale 8.5.1).

Simulointimallin aika-askel on yksi tunti, mikä kuvaa keskimääräisiä arvoja esimerkiksi sähköajoneuvojen latausteholle sekä kohteen energiatarpeille sähkön ja lämmön osalta.

Keskiarvoistava aika-askel ei ota siis huomioon tunnin sisäisiä heilahduksia energiatarpeiden suhteen. Tunnin sisäiset heilahdukset saattavat olla todellisuudessa merkittäviäkin ja siten voivat myös vaikuttaa merkittävästi energia-aseman kannattavuuteen.

8.1 Kohteen valinta ja kuormitusprofiilit

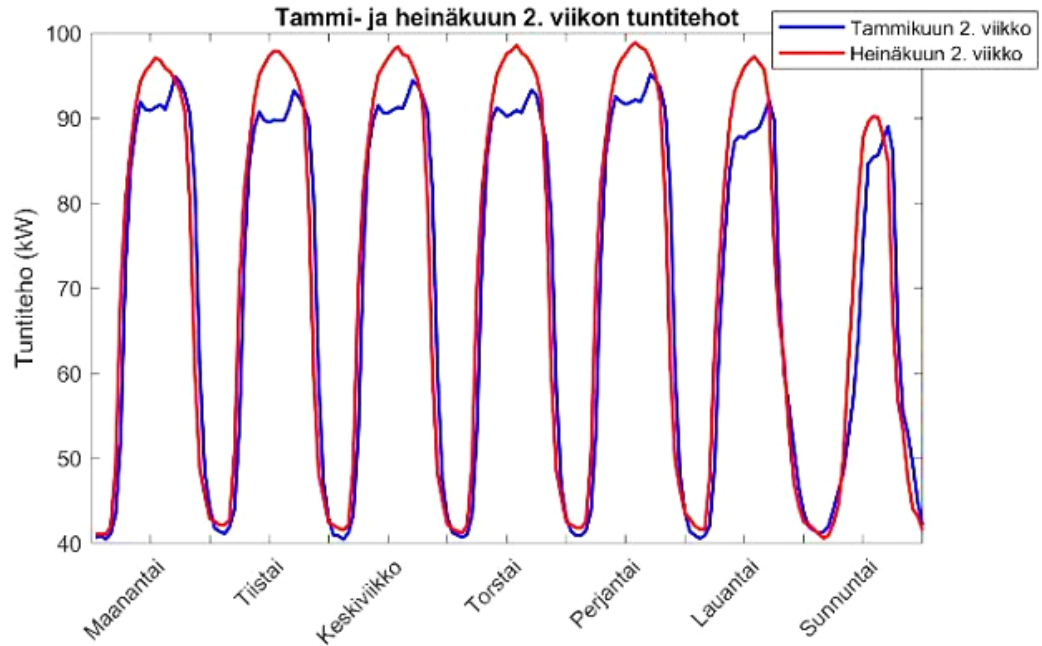
Kohde, jolle energia-asema tuottaa energiaa on määritetty sijaitsevan Etelä-Suomessa. Tälle perusteluja on esitetty kappaleessa 7.3. Energia-aseman oletetaan olevan lähellä kohdetta häviöiden minimoimiseksi. Kohde on liike-elämän kiinteistö, jonka aukioloajat ovat klo 8 - 23 maanantaista sunnuntaihin eli viikon jokaisena päivänä. Kohde voidaan mieltää esimerkiksi kauppakeskukseksi, jossa on monipuolisia palveluita kuten päivittäistavarakauppoja, ravintoloita ja kahviloita, kauneus- ja hyvinvointipalveluita sekä viihde- ja vapaa-ajan palveluita.

Kuormitusprofiilit kohteen sähkön ja lämmön, sähköajoneuvojen latauspisteiden sähkön ja kaasujoneuvojen tankkauspisteiden kaasun osalta on määritetty tunnin tarkkuudella pitoajan jokaiselle tunnille eli kuormat on mallinnettu jokaiselle simuloinnin aika-askellelle. Kohteen ja energia-aseman oletetaan sijaitsevan Etelä-Suomessa, joten myös kohteen kuormitusprofiilit on määritetty sopiviksi Etelä-Suomen olosuhteisiin. Kuormitusprofiilit kohteelle on mallinnettu kohteen aukioloaikojen pohjalta siten, että sähkön osalta päivän sisäinen kuormitus on yksihuippuinen. Ajoneuvojen latauksen ja tankkauksen sekä lämpimän käyttöveden osalta kuormitusprofiili on määritetty erilaiseksi arkipäiville, lauantaille ja sunnuntaille, ja nämä kuormitusprofiilit kuvaavat ihmisten vaikutusta kohteessa eli energian tarve on suhteessa ihmismäärään kohteessa. Kauppakeskuksessa olevien monipuolisten palveluiden ansiosta oletetaan kauppakeskuksessa vierailevien ihmisten määrä suureksi aukioloaikoina ja siten tästä seuraavan energian tarpeen olevan merkittävä kokonaisenergian tarpeen kannalta. Lämmitysenergian osalta lämmitys-kuorma on tavoitelämpötilan (20 °C) ja ulkolämpötilan erotus eikä ole siten riippuvainen aukioloajoista tai ihmismäärästä. Tässä kappaleessa esitettyjä kuormitusprofiileja käytetään simuloinnissa kokoluokalle *pieni*. Muille kokoluokille (*keskikoko* ja *suuri*) nämä kuormitukset ovat suurempia.

8.1.1 Sähkön kuormitusprofiili

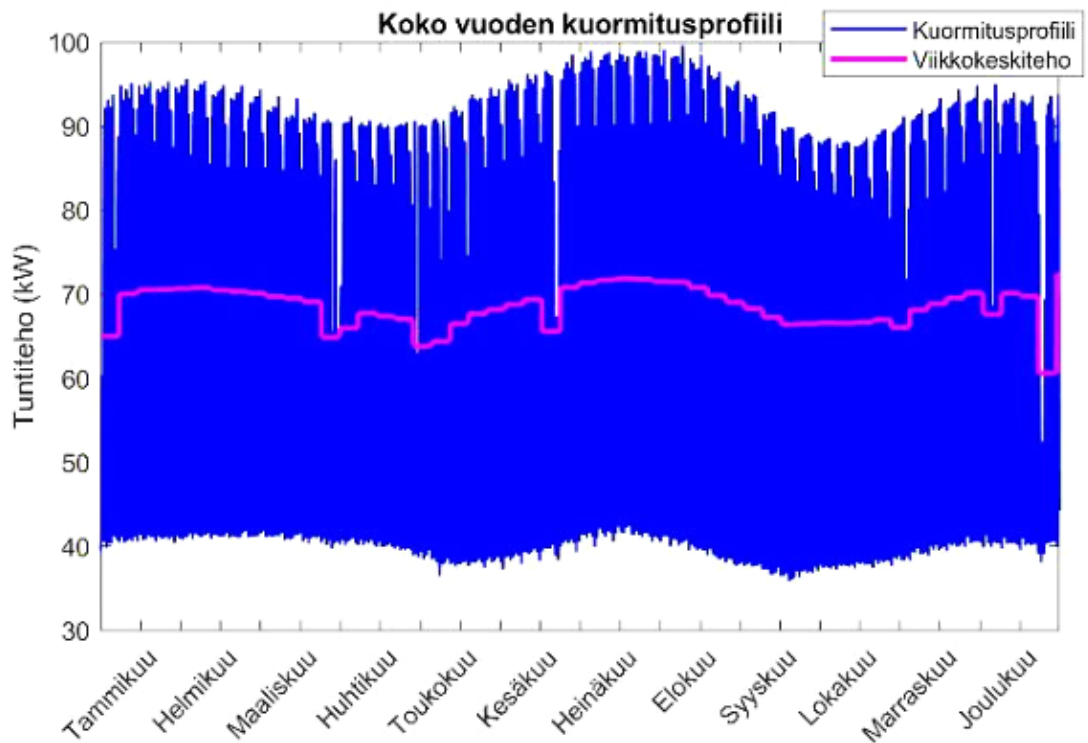
Kohteen sähkön kuormitusprofiili perustuu Tampereen yliopiston sähkötekniikan yksikön raportissa [99] käytettävään liike-elämän tyyppikäyttäjään numero 12, jonka vuosittainen energiantarve on 600 MWh. Raportin tyyppikäyttäjien kuormitusprofiilit on mallinnettu ja klusteroitu perustuen etäluettavien sähkömittareiden todellisiin tuntienenergiamittauksiin usean vuoden ajalta. Mittaukset on mallinnusta ja klusterointia varten saatu kymmeneltä eri verkkoyhtiöltä edustaen 51 % Suomen sähkönkäyttöpaikoista. Mittausdatan määrä

on siis hyvin kattava, joten sen pohjalta tehtyjen kuormitusprofiilien voidaan olettaa edustavan hyvin valtakunnallisia tyyppikäyttäjiä. Seuraavassa kuvassa (Kuva 24) on esitetty tyyppikäyttäjän 12 kuormitusprofiili tammi- ja heinäkuun 2. viikon tuntitehoina.



Kuva 24. Tyyppikäyttäjän 12 sähkön kuormitusprofiili tammi- ja heinäkuun 2. viikon tuntitehoina. [99]

Kuvasta (Kuva 24) nähdään, että päivittäisen kuormituksen voidaan sanoa olevan yksihuippuista saavuttaen arkena noin 95...100 kW:n huipputehon, mutta huippukuormitus pienenee lauantaina ja edelleen sunnuntaina. Koko vuoden kuormitusprofiili tunnin tasolla ja viikkokeskiteholla tyyppikäyttäjälle 12 on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 25).

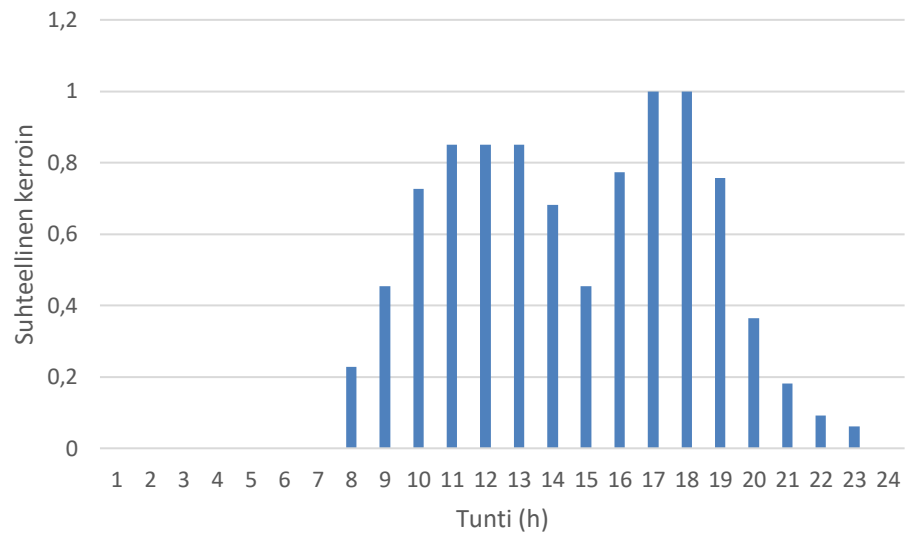


Kuva 25. Tyypikäyttäjän 12 sähkön kuormitusprofiili tunnin tasolla ja viikkokeskitehona vuoden aikana. [99]

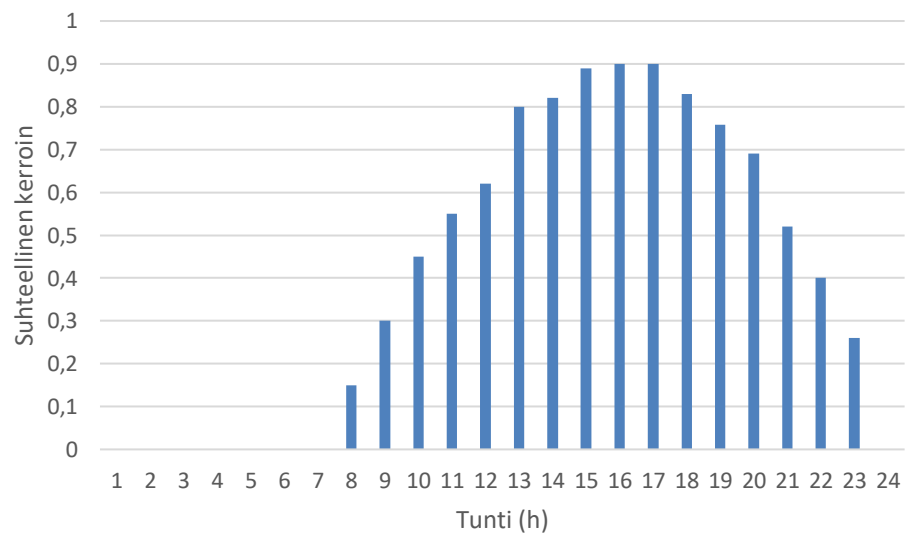
Kuvasta (Kuva 25) nähdään, että vuoden aikainen viikkokeskiteho pysyy melko tasaisena koko vuoden läpi viikkokeskitehon suuruuden muuttuessa vain noin 10 kW verran koko vuoden aikana.

8.1.2 Ihmisistä johtuva kuormitus

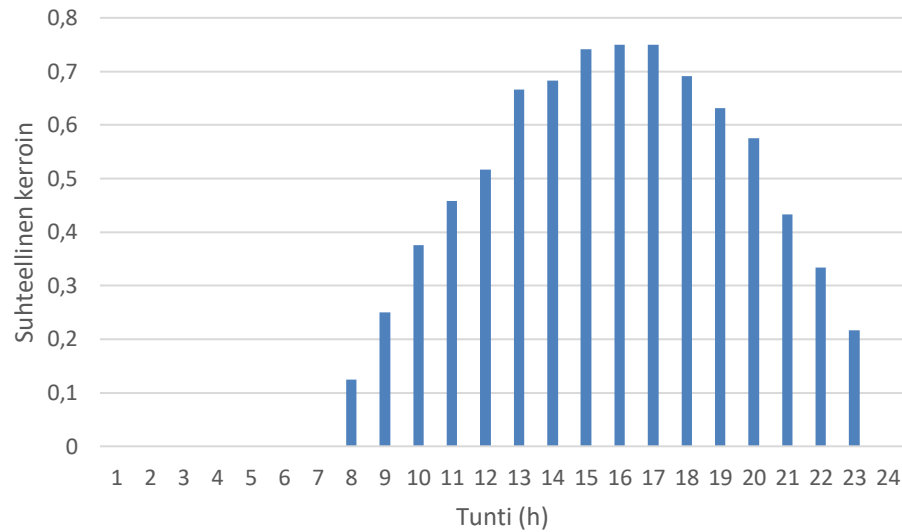
Lämmin käyttövesi sekä ajoneuvojen tankkaus- ja latauskuormat määritetään kohteen aukioloaikoja mukailien käyttäen apuna Googlen Popular times -ominaisuutta [100] suomalaisille kauppakeskuksille. Nämä kuormitukset kuvaavat ihmisten vaikutusta kohteessa eli kuormitukset vaihtelevat ihmismäärän mukaan. Nämä kuormat määräytyvät seuraavissa kuvissa (Kuva 26, arki; Kuva 27, lauantai; Kuva 28, sunnuntai) olevien suhteellisten kertoimien mukaan.



Kuva 26. Suhteelliset kertoimet kuvaamaan lämpimän käyttöveden sekä ajoneuvojen tankkaus- ja latauskuormia päivän sisäisesti arkipäivänä.



Kuva 27. Suhteelliset kertoimet kuvaamaan lämpimän käyttöveden sekä ajoneuvojen tankkaus- ja latauskuormia päivän sisäisesti lauantaina.



Kuva 28. Suhteelliset kertoimet kuvaamaan lämpimän käyttöveden sekä ajo-neuvojen tankkaus- ja latauskuormia päivän sisäisesti sunnuntaina.

Edellä olevien kuvien perusteella nähdään, että huippukuormaksi viikonpäiville on määritetty suhteellinen kerroin 1 (Kuva 26), joita on tunneilla 17 ja 18 arkipäivänä. Arkena on myös toinen pienempi huippu kuormituksella 0,85 tunneilla 11, 12 ja 13. Arkipäivien kuormitus on siis kaksihuippuinen ja kuvaa ihmisten kuormitusta ensin lounasaikana ja sitten työpäivän jälkeisenä aikana. Lauantain ja sunnuntain osalta kuormitukset ovat yksihuippuisia, joista lauantain huippukuorma on 0,9 ja sunnuntain 0,75. Nämä kuormitukset pysyvät samanlaisina vuodenajasta ja viikosta riippumatta.

8.1.3 Lämmön kuormitusprofiili

Kohteen sisätilojen lämmitykseen käytettävän lämpöenergian kuormitusprofiilin määrittämisessä on käytetty Ilmatieteenlaitoksen raporttia [101] apuna. Raportissa on määritetty vuoden 2012 testivuosi rakennusten energialaskentaa varten. Kohteen lämmön kuormitusprofiilin taustalla käytetään Vantaalle [102] muodostettua testivuoden tunnitista sääaineistoa, joka on muodostettu vuosina 1980-2009 tehtyjen säähavaintojen perusteella. Näistä säähavainnoista valittiin testivuodelle jokainen kuukausi sellaiselta vuodelta, jonka aikana kyseisen kuukauden sääolot olivat mahdollisimman lähellä ilmastollista keskimääräistä tilaa. Kohteen lämmön kuormitusprofiilin määrittämisessä käytettävä mittausdata perustuu pitkän ajan mittaushistoriaan, jonka puolesta lämmölle määritetyn kuormitusprofiilin voidaan olettaa olevan luotettava.

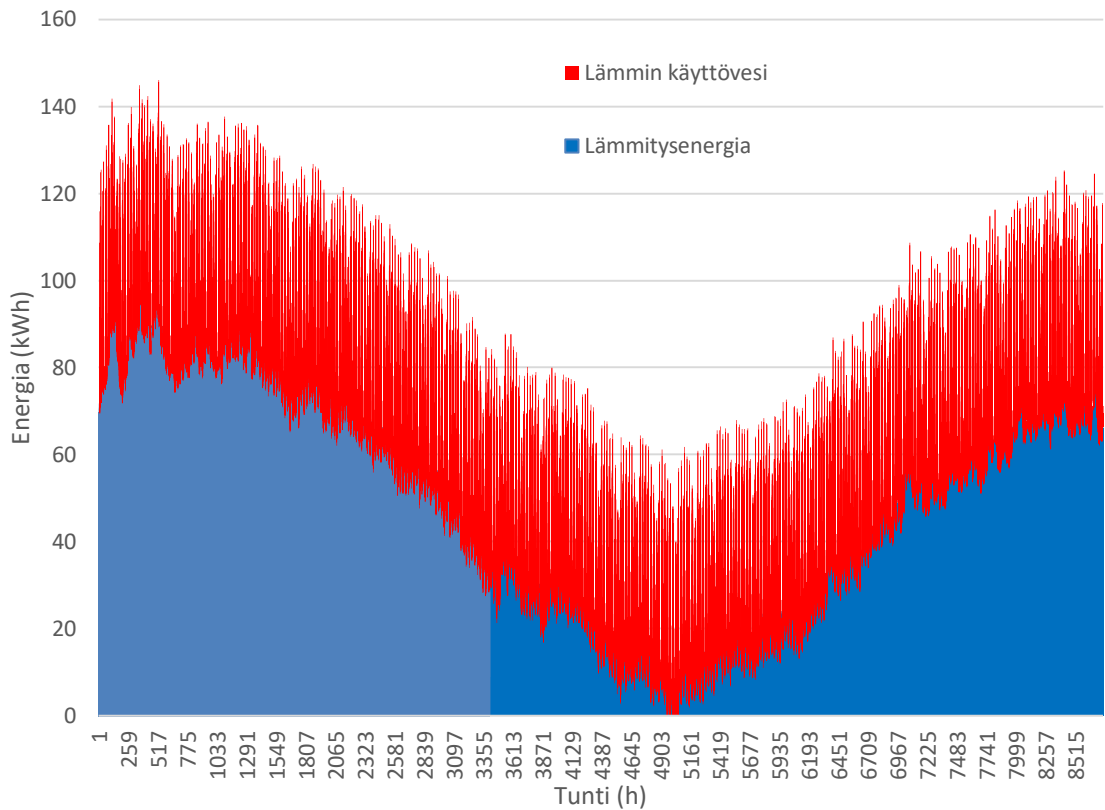
Lämmön kuormitusprofiilin määrittämisessä käytetään Vantaalle Ilmatieteenlaitoksen raportissa muodostettua ulkoilman tunnitista lämpötilaa, jota verrataan kohteelle määritettyyn tavoitelämpötilaan (20 °C) vuoden jaksolta. Tarvittava lämmitysenergiämäärä jo-

kaista tuntia kohti määräytyy siis tavoitelämpötilan (sisälämpötilan) ja ulkolämpötilan erotuksena. Tätä erotusta voidaan kutsua lämmitystarveluvuksi. Lämmitystarveluvun suuruus jokaiselle tunnille määrittää tarvittavan lämmitysenergian siten, että vuosittaisesta kokonaislämmitysenergiasta osa jakautuu lämmitystarveluvun suuruuden mukaan seuraavan kaavan (4) mukaisesti:

$$\text{Tunnin lämmitysenergia} = \frac{\text{Tunnin lämmitystarveluku}}{\text{Koko vuoden lämmitystarveluku}} \cdot \text{Koko vuoden lämmitysenergia} \quad (4)$$

Kaavan (4) mukaan määritettyyn lämmitysenergiamäärään ei kuulu lämpimän käyttöveden kuormitusprofiili, sillä se määräytyy kohteessa vierailevien ihmismäärien mukaan (ks. Kappale 8.1.2).

Kohteen sisätilojen lämmitysenergian ja lämpimän käyttöveden osalta on oletettu, että kohteen tarvitsemasta kokonaislämmitysenergiasta 70 % kuluu kohteen sisätilojen lämmitykseen (määritetty Ilmatieteenlaitoksen raportin avulla saadun lämmitystarveluvun perusteella, ks. Kappale 8.1.3) ja 30 % lämpimään käyttöveteen (määritetty ihmisistä johtuvan kuormituksen avulla, ks. Kappale 8.1.2). Vuosittainen kohteen tarvitsema kokonaislämmitysenergian määrä on taas määritetty kohteen sähkön vuotuisen kokonaiskulutuksen kanssa samansuuruiseksi. Seuraavassa kuvassa (Kuva 29) on esitetty vuoden ajalta tunnittaiset sisätilojen lämmitysenergian sekä lämpimän käyttöveden tarpeet kilowattitunteina. Kuten kappaleessa 8.1.2 olevista kuvaajista nähdään, niin ihmisistä johtuva kuormitus ja siten myös lämpimän käyttöveden kuormitus on kauppakeskuksen aukioloaikojen ulkopuolella nolla. Tämä ei kuitenkaan käy selvästi ilmi seuraavasta kuvasta (Kuva 29, punaisella) piirtoalueen rajallisuuden vuoksi, mutta todellisuudessa lämpimän käyttöveden tarve on nolla jokaisena vuorokautena kauppakeskuksen aukioloaikojen ulkopuolella.



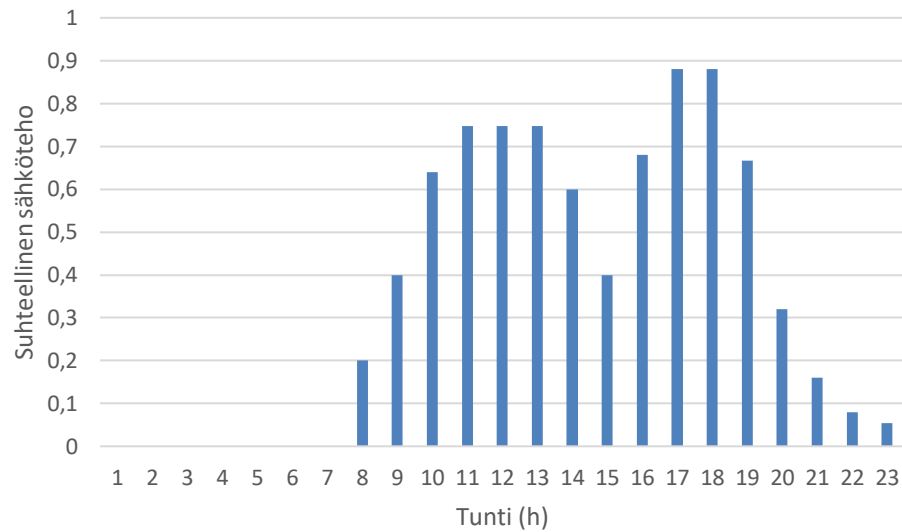
Kuva 29. Kohteen tunnitainen lämpimän käyttöveden ja sisätilojen lämmitysenergian tarve kilowattitunteina vuoden ajalta.

Kuvasta (Kuva 29) nähdään, että lämpimän käyttöveden tarve ei riipu vuodenajasta vaan sen vaihtelu on samanlaista koko vuoden aikana. Lämmitysenergia puolestaan laskee kesäaikana jopa nolnaan, jolloin sisätiloja ei tarvitse lämmittää lainkaan. Lämmitysenergian tarve saavuttaa huippunsa tammikuussa.

8.1.4 Ajoneuvojen lataus- ja tankkauskuormat

Sähköajoneuvojen ja kaasujoneuvojen lataus- ja tankkauskuormat on mallinnettu kuvissa (Kuva 26, Kuva 27 ja Kuva 28, ks. Kappale 8.1.2) olevien suhteellisten kertoimien mukaan. Lataus- ja tankkauskuormat noudattavat näitä ihmismäärää kuvaavia kertoimia.

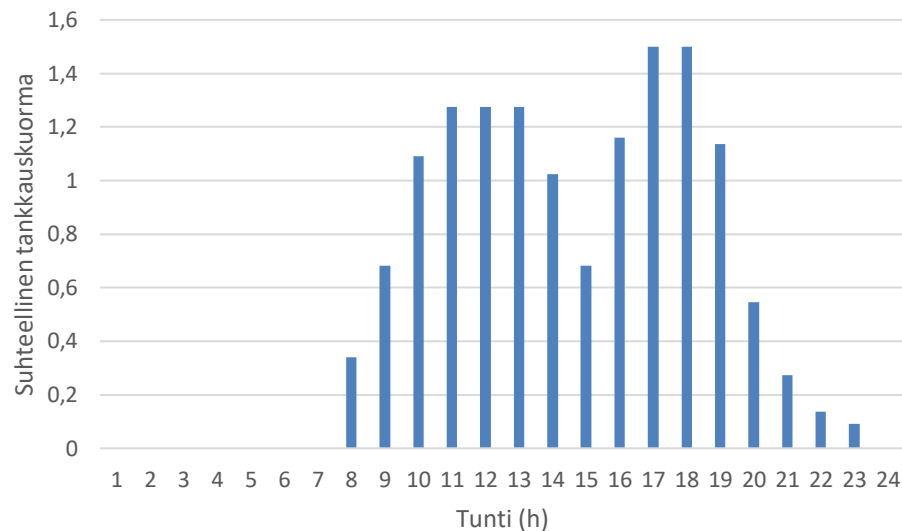
Ilmoitetaan sähköajoneuvojen latausteho suhteellisena sähkötehoon, joka määräytyy lataustehon ja energia-aseman käyttämän lämpövoimakoneen nimellisen sähkötehon suhteena. Sähköajoneuvojen lataustehon perusyksikkö on suhteellisena sähkötehoon 0,22 vaihtosähköä, kun käytetään lataustavan 3 (ks. Kappale 5.1.1) vaihtosähköllä toimivia normaalilatauspisteitä. Tämä suhteellinen latausteho kerrotaan ihmisistä johtuvan kuormituksen suhteellisilla kertoimilla (ks. Kappale 8.1.2), joiden tulona määräytyy itse lataustehon tunnitainen jakauma kaikille vuoden päiville. Esimerkiksi nelinkertainen lataustehon perusyksikkö kerrottuna ihmisistä johtuvan kuormituksen kertoimilla tuottaa arkipäivälle seuraavan kuvan (Kuva 30) mukaisen kuorman.



Kuva 30. Nelinkertainen lataustehon perusyksikkö kerrottuna ihmisistä johtuvan kuormituksen kertoimilla esitettynä suhteellisena sähkötehona.

Kuvasta nähdään, että arkipäivänä latauskuorman huippu (0,88) saavutetaan iltapäivällä ja pienempi huippu (0,748) puolenpäivän aikoihin. Latauskuorman huipputuntien aikana (tunnit 17 ja 18) oletetaan saavan ladatuksi neljän keskikokoisella akustolla varustetun sähköajoneuvon akustot täyteen tunnin aikana. Arkipäivän aikana tarvittava sähköenergia sähköajoneuvojen latausta varten saadaan integroimalla latausteho koko päivän ajalta. Lauantain (Kuva 27) ja sunnuntain (Kuva 28) osalta sähköajoneuvojen lataustehot noudattavat myös suhteellisten kertoimien tuottamia kuormituksia vastaavalla tavalla.

Kaasuajoneuvojen tankkauskuorman osalta oletetaan, että yhden kaasuajoneuvon tankkaukseen kuluu aikaa noin 5 minuuttia, jolloin kaasuajoneuvoja voidaan tankata arkipäivän huipputuntin (suhteellinen kerroin 1, ks. Kuva 26) aikana 10 kappaletta. Yhteen kaasuajoneuvoon tankattavan kaasun määrä on tyypillinen kaasuhenkilöauton kaasutankin koko. Muina kuin huipputunteina kaasua tankataan kaasuajoneuvoihin vähemmän eli tällöin tankattuja kaasuajoneuvoja on vähemmän kuin 10 kappaletta tunnin aikana. Esitetään kaasuajoneuvojen tankkauskuorma suhteellisena arvona, joka määräytyy tunnin aikana tankattavien kaasukilojen ja energia-aseman käyttämän lämpövoimakoneen nimellisen sähkötehon suhteena. Kun edellä kuvattu huipputuntien tankkauskuorma kerrotaan ihmisistä johtuvan kuormituksen suhteellisilla kertoimilla (ks. Kappale 8.1.2), saadaan kaasuajoneuvojen tankkauskuorman jakauma jokaiselle tunnille. Seuraavassa kuvassa (Kuva 31) on esitetty kaasuajoneuvojen tankkauskuorman jakauma arkipäivän jokaiselle tunnille suhteellisina arvoina.



Kuva 31. Kaasuajoneuvojen tankkauskuorma suhteellisina arvoina arkipäivän jokaiselle tunnille.

Lauantain (Kuva 27) ja sunnuntain (Kuva 28) osalta kaasuajoneuvojen tankkauskuormat noudattavat myös suhteellisia kertoimia vastaavalla tavalla.

8.2 Alkuinvestointi

Alkuinvestoinnin hintaa ja sen sisältämiä parametreja tulee määrittämään pääosin energia-aseman kokoluokka (*pieni, keskikoko tai suuri*). Kokoluokka määrittää esimerkiksi lämpövoimakoneen teholuokan, energiavarastojen kokoluokan sekä ajoneuvojen lataus- ja tankkauspisteiden lukumäärän. Mitä suurempi kokoluokka on kyseessä, niin sitä suurempi alkuinvestointi luonnollisesti on. Kuitenkin, suurempi kokoluokka mahdollistaa myös suuremmat vuotuiset tuotot energia-asemalle sekä skaalaedun takia esimerkiksi energiavarastot halpenevat mitattuna yksiköllä euroa per varastoitava energiayksikkö (€/kWh). Energia-aseman kokoluokka tulee määrittämään vaadittavia rakennuskustannuksia, sillä esimerkiksi energiaverkkoliityntöjen osalta hinnoittelumallit muuttuvat kokoluokan kasvaessa.

Simulointia varten energia-aseman valitaan perustuvan kaasumootorivoimalaitokseen, joka tuottaa sähköä ja lämpöä (ks. Kappale 2.1.) kaasumootorilla (ks. Kappale 2.1.1) ja siihen kytketyllä tahtigeneraattorilla (ks. Kappale 2.2). Kaasumootori käyttää polttoaineenaan diplomityössä esille tulleita kaasumaisia polttoaineita (ks. Kappale 3). Investointi kaasumootorivoimalaitokseen sisältää myös sähkön tuotantoa varten generaattorin. Kaasumootorivoimalaitos tuottaa tasaisessa suhteessa sähköä ja lämpöä eli tuotetusta energiasta 50 % on sähköä ja 50 % lämpöä. Kaasumootorivoimalaitoksen hyötysuhteeksi on määritetty 90 %, jolloin hyötyenergiana saadaan sähköä 45 % ja lämpöä

45 %. Kaasumoottorivoimalaitoksen hinta ja teholuokat on määritetty Höyrytys Oy:n luottamuksellisen aineiston pohjalta kullekin kolmelle kokoluokalle.

Kaasumoottorivoimalaitoksen lisäksi energia-aseman alkuinvestointi sisältää mahdollisesti energiavarastot sähkölle ja lämmölle, liittynät kaukolämpö-, sähkö- ja kaasuverkkoon sekä sähköajoneuvojen latauspisteet sekä kaasujoneuvojen tankkauspisteet. Energiavarastojen hinnan määrittämisessä tukeudutaan kansainvälisiin hintatutkimuksiin [42, 45] ja niiden hintaa arvioidaan energiayksikköä kohti (€/kWh) huomioiden kokoluokan tuoma skaalaetu. Hinnat energiayksikköä kohti energiavarastoille eri kokoluokille on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 2). Energiavarastojen hintoihin sisältyy koko energiavarastojärjestelmä, johon kuuluu itse energiavarasto mittaus- ja ohjausjärjestelmineen sekä asennuksineen.

Taulukko 2. Energiavarastojen hinnat eri kokoluokissa varastoitavaa energiayksikköä kohti.

<i>Kokoluokka</i>	<i>Pieni</i>	<i>Keskikoko</i>	<i>Suuri</i>
<i>Sähkövaraston hinta (€/kWh)</i>	450	394	338
<i>Lämpövaraston hinta (€/kWh)</i>	15	10	5

Kohteen ja energia-aseman oletetaan sijaitsevan Etelä-Suomessa, joten myös liittymiskustannukset energiaverkkoihin ovat Etelä-Suomelle tyypillisiä. Liityntä kaukolämpöverkkoon määritetään Vantaan Energia Oy:n hinnaston [103] mukaan, sähköverkkoliittymän hinta Caruna Espoo Oy:n hinnaston [104] ja heidän antamien hintatietojen mukaan sekä kaasuverkkoliittymän hinta määritetään Suomen Kaasuenergia Oy:n ja Auris Kaasunjakelu Oy:n hinnaston [105] mukaan. Sähköajoneuvojen latauspisteiden hinnat perustuvat Liikennevirta Oy:n (Virta Ltd) hinnastoon [106] ja heiltä saatuihin hintatietoihin. Kaasujoneuvojen tankkauspisteiden hinnat perustuvat alan ammattilaisen arvioon kokonaiskustannuksista. Kaikkia alkuinvestoinnin hintatietoja ei ole julkisesti saatavilla ja ne ovatkin luottamuksellisia liikesalaisuuksia. Tämän takia kaikkia hintatietoja ei voida esittää tässä diplomityössä.

Liittynät energiaverkkoihin on määritetty sopiviksi kokoluokan määräämän nimellistehon perusteella. Liittymöissä on optimoitu liittymiskoko nimellistehon mukaan siten, että on minimoitu energiaverkkoihin liittymisestä johtuvat kustannukset.

Sähkövarastoille sähköteho on määritetty olevan puolet (0,5) vastaavasta energiamäärästä (kW/kWh) tutkimalla markkinoilla yleisesti saatavilla olevien litiumioniakustojen ominaisuuksia. Sähkövarastoille määritetty teho/energiasuhde on siis 0,5. Lämpövarastojen osalta teho/energiasuhde on määritetty käyttämällä Suomeen asennettujen kaukolämpöakkujen energia-(kapasiteetti) ja tehotietoja [46]. Näiden tietojen perusteella on laskettu keskiarvoinen teho/energiasuhde. Keskiarvoiseksi teho/energiasuhteeksi saadaan 0,15. Käytetään näitä teho/energiasuhteiden arvoja energia-aseman energiavarastoille simuloinnissa. Sähkövaraston hyötysuhteeksi on määritetty 0,95 ja lämpövaraston hyötysuhteeksi 0,90 kaikissa kokoluokissa. Eri kokoluokissa olevien energiavarastojen teho- ja energialuokat jokaisen kokoluokan kaasumoottorin nimellissähkötehoon verrattuna suhteellisina arvoina sekä sähköajoneuvojen latauspisteiden ja kaasujoneuvojen tankkauspisteiden lukumäärät on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 3). Sähkölatauspisteiden lukumäärä taulukossa tarkoittaa lataustavan 3 (ks. Kappale 5.1.1) vaihtosähköllä toimivia normaalilatauspisteitä.

Taulukko 3. Eri kokoluokissa olevien komponenttien ominaisuuksia ja lukumääriä. Tehot ja kapasiteetit esitetty suhteellisina arvoina verrattuna jokaisen kokoluokan kaasumoottorin nimellissähkötehoon.

<i>Kokoluokka</i>	<i>Pieni</i>	<i>Keskikoko</i>	<i>Suuri</i>
<i>Sähkövaraston teho (suht.)</i>	0,5	0,5	0,5
<i>Sähkövaraston kapasiteetti (suht.)</i>	1,0	1,0	1,0
<i>Lämpövaraston teho (suht.)</i>	0,5	0,5	0,5
<i>Lämpövaraston kapasiteetti (suht.)</i>	3,33	3,33	3,33
<i>Sähkölatauspisteiden lkm</i>	4	20	80
<i>Kaasutankkauspisteiden lkm</i>	1	5	20

Eri kokoluokissa käytettävien lataus- ja tankkauspisteiden lukumäärä on optimoitu energia-aseman kokoluokasta johtuvan nimellistehon ja edelleen energiaverkon (sähkö- tai kaasuverkon) liittymän koon mukaan.

8.3 Simulointi ja simulointitulokset

Simuloinnissa energia-asemaa ja sen ekosysteemiä simuloidaan pitoajan verran. Pitoajan jokaiselle tunnille saadaan käyttöhistoria energia-asemalle ja sen ekosysteemille. Käyttöhistoriasta selviää kaikkien komponenttien käyttöhistoria, jonka perusteella voidaan laskea pitoajan tuotot ja kustannukset energia-asemalle ja edelleen energia-aseman kannattavuus pitoajalle. Pitoajan käyttöhistoriasta selviää tunnin tasolla:

- Kaasumoottorin polttoainekulutus kohteen sähkön ja lämmön, sähköajoneuvojen lataustehon ja ylijäämäteholla sähkön ja lämmön tuottamiseen,
- Kaasumoottorilla tuotettu sekä energiavarastoista hankittu sähkö ja lämpö kohteen kysyntää varten
- Kaasumoottorilla sähköajoneuvojen lataustehoa varten tuotettu sähkö sekä samalla tuotettu lämpö kohteelle, varastoon tai myytäväksi kaukolämpöverkkoon
- Sähköajoneuvojen lataustehoa varten sähköverkosta ja sähkövarastosta hankittu sähkö
- Kaasuajoneuvoille myyty kaasumainen polttoaine
- Sähköverkosta ostettu sähkö kohteelle
- Kaukolämpöverkosta ostettu lämpö kohteelle
- Sähkö- ja lämpövarastojen varaustilanne
- Sähköverkkoon myyty sähkö
- Kaukolämpöverkkoon myyty lämpö
- Kaasumoottorin ylijäämäteholla tuotettu sähkö ja lämpö varastointia varten sekä myytäväksi

Näiden käyttöhistoriatietojen avulla voidaan muodostaa kuusi erilaista kuvaajaa, joihin on ryhmitelty saman aiheryhmän tietoja. Kuvaajien aiheoryhmät ovat:

- Kohteen sähkön kuormitusprofiili ja sähkön hankinta eri lähteistä
- Kohteen lämmön kuormitusprofiili ja lämmön hankinta eri lähteistä
- Polttoaineen kulutus eri käyttökohteisiin luokiteltuna
- Energiavarastojen varaustilanne
- Verkkoon myydyt energiamuodot
- Sähköajoneuvojen lataustehon kuormitusprofiili ja lataustehon hankinta eri lähteistä

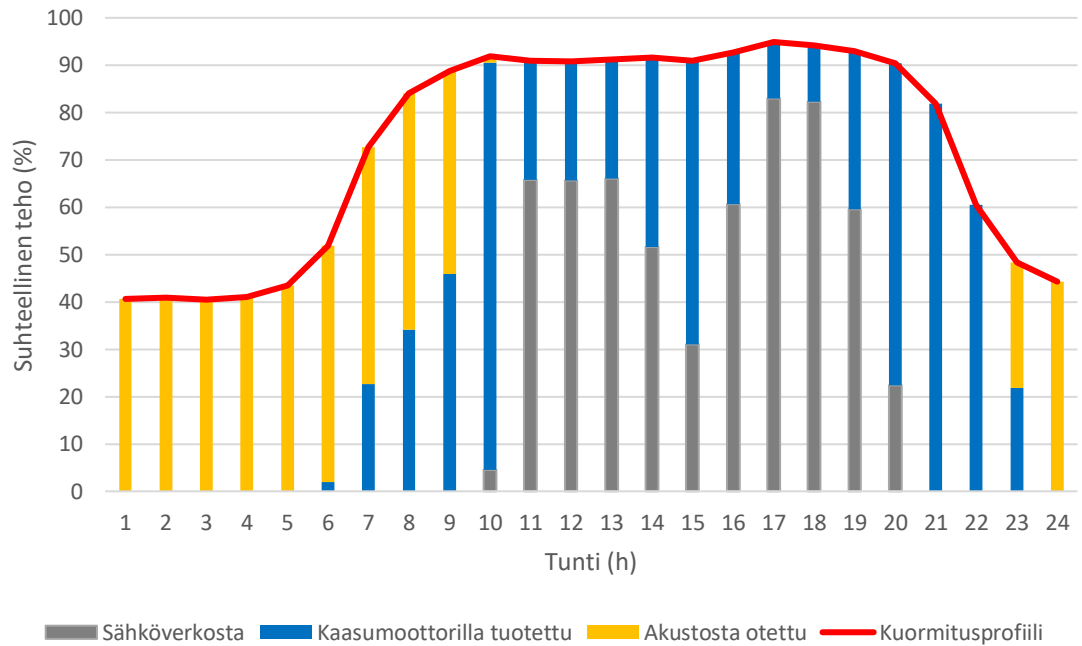
Näistä kuvaajista nähdään selkeästi, kuinka energia-asemaa käytetään ja miten energian hankinta on toteutettu eri energialähteistä, jotta energiatarpeet tulee tyydytetyksi mahdollisimman edullisesti energia-aseman näkökulmasta.

8.3.1 Referenssiskenaario

Asetetaan referenssiskenaarioksi (*Ref*) kolmelle kokoluokalle energia-asetat, jotka sisältävät kaasumoottorin, sähkö- ja lämpövaraston, liittynät sähkö-, kaukolämpö- ja kaasuverkkoon sekä sähköajoneuvojen latauspisteet ja kaasujoneuvojen tankkauspaikat. Energia-aseman komponenttien ominaisuuksia ja lukumääriä on esitetty taulukossa (Taulukko 3) energiavarastojen sekä lataus- ja tankkauspaikoiden osalta. Referenssitapahtumassa energia-asetat ja sen ekosysteemi on kuvattu 7.1 kuvan (ks. Kuva 22) mukainen ja energia-asettaa käytetään käyttöperiaatteen mukaisesti (ks. Kappale 7.4). Energia-asetat tuottaa kohteelle sen tarvitsemat energiakuormat kuormitusprofiilien mukaan (ks. Kappale 8.1). Kappaleessa 8.1 esitetyt absoluuttiset kuormitusprofiilien arvot käytetään kokoluokalle *pieni* referenssiskenaariossa. Muille kokoluokille nämä ovat suurempia. Kaasumoottori käyttää referenssiskenaariossa polttoaineenaan maakaasua ja kaikki kaasujoneuvoille myytävä polttoaine on maakaasua. Muut referenssitapahtuman parametrit on kuvattu tässä kappaleessa ja sen alikappaleissa (ks. Kappale 8).

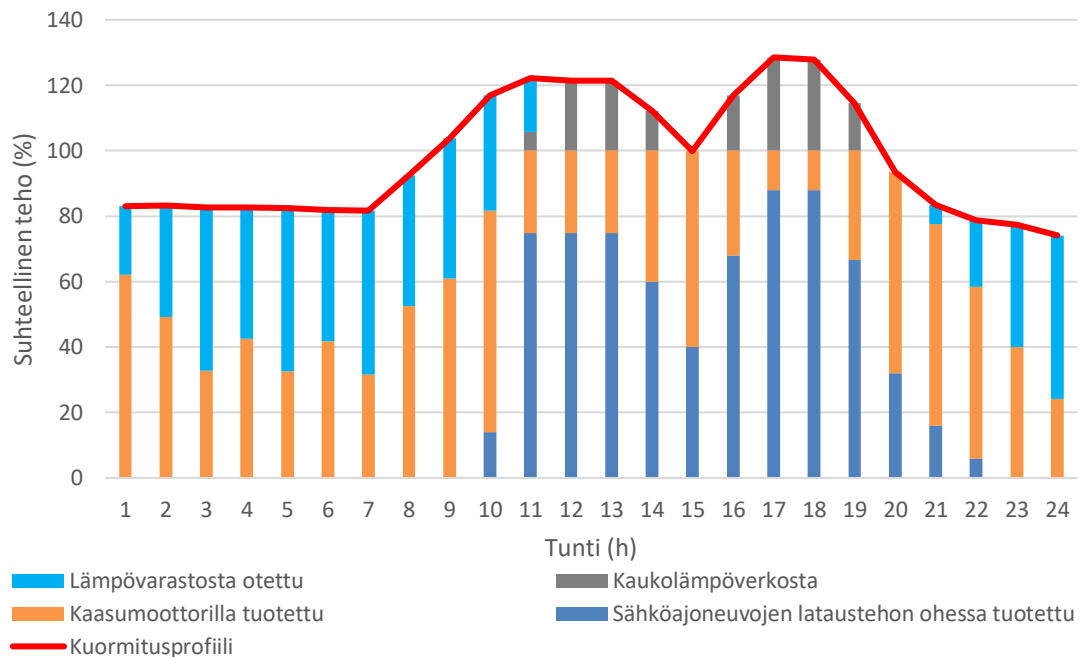
Referenssiskenaariossa oletetaan parametrit vakioiksi simuloinnin ajaksi eli ne eivät muutu simuloitavien vuosien välillä pitoajan aikana. Referenssiskenaariota muuttamalla saadaan simuloitua erilaisia skenaarioita (ks. Kappale 8.3.2) energia-aseman ekosysteemille. Voidaan varioida esimerkiksi sitä, onko energia-aseman käytössä energiavarastoja vai ei tai muuttuuko energia hinta, kuten kaasumaisen polttoaineen, sähkön tai kaukolämmön hinta, jollain vuotuisella kasvuprosentilla.

Tarkastellaan referenssiskenaariossa saatuja simulointituloksia ja käyttöhistoriaa. Koko pitoajan ajalta joka tunnin simulointitietoja ei ole mielekästä tarkastella, koska nämä ovat suhteellisen samanlaisia joka päivä ottaen kuitenkin huomioon lämmön kausittaisesta kysynnästä johtuva suuri vaihtelu. Otetaan tarkempaan tarkasteluun tammikuun 2. viikon maanantai, jonka osalta esitetään kaikki kappaleessa 8.3 mainitut kuusi eri aihe ryhmien kuvaajaa. Kuvaajissa esitetään y-akselin arvot suhteellisina arvoina verraten niitä kaasumoottorin nimellissähkötehoon. Seuraavassa kuvassa (Kuva 32) on kohteen sähkön kuormitusprofiili ja sähkön hankinta eri lähteistä.



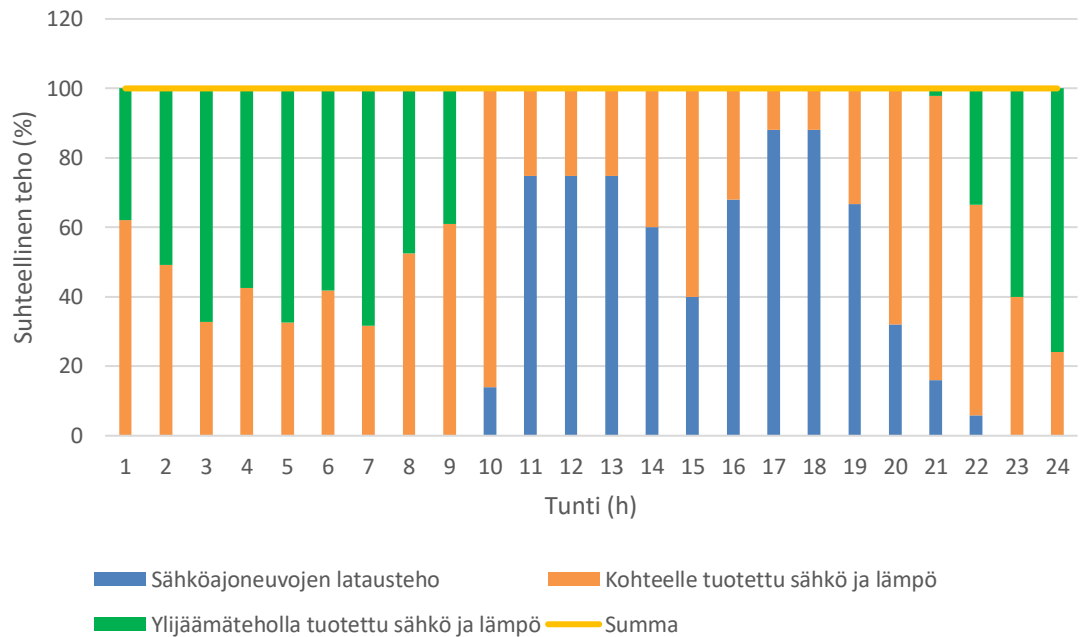
Kuva 32. Kohteen sähkön kuormitusprofiili ja sähkön hankinta suhteellisena tehona eri lähteistä tammikuun 2. viikon maanantaina.

Kuvassa (Kuva 32) kohteen sähkön kuormitusprofiili on merkitty punaisella viivalla, jonka alle jää sähkön hankintalähteet eri värisillä pylväinä kuvattuna. Keltaisella akustosta otettu, sinisellä kaasumootorilla tuotettu ja harmaalla sähköverkosta hankittu sähkö. Sähköntarve saadaan vuorokauden alussa sekä lopussa tyydytettyä suurelta osin akustosta, mutta sähköajoneuvojen lataustehon huipputuntien aikana ja niiden ympärillä täytyy myös muita hankintatapoja hyödyntää sähkölle. Tässä tapauksessa kaasumootorilla on tuotettu ensin sähköä halvempana hankintatapana, mutta sen tehon ollessa riittämätön on myös sähköverkosta ostettu merkittävä osa kalliimpaa verkkosähköä. Kaikilla hankintatavoilla on hankittu keskenään pitkälti saman verran sähköä eli mikään hankintatapa ei nouse merkittävästi suurimmaksi. Seuraavassa kuvassa (Kuva 33) on kohteen lämmön kuormitusprofiili ja lämmön hankinta eri lähteistä.



Kuva 33. Kohteen lämmön kuormitusprofiili ja lämmön hankinta suhteellisena tehona eri lähteistä tammikuun 2. viikon maanantaina.

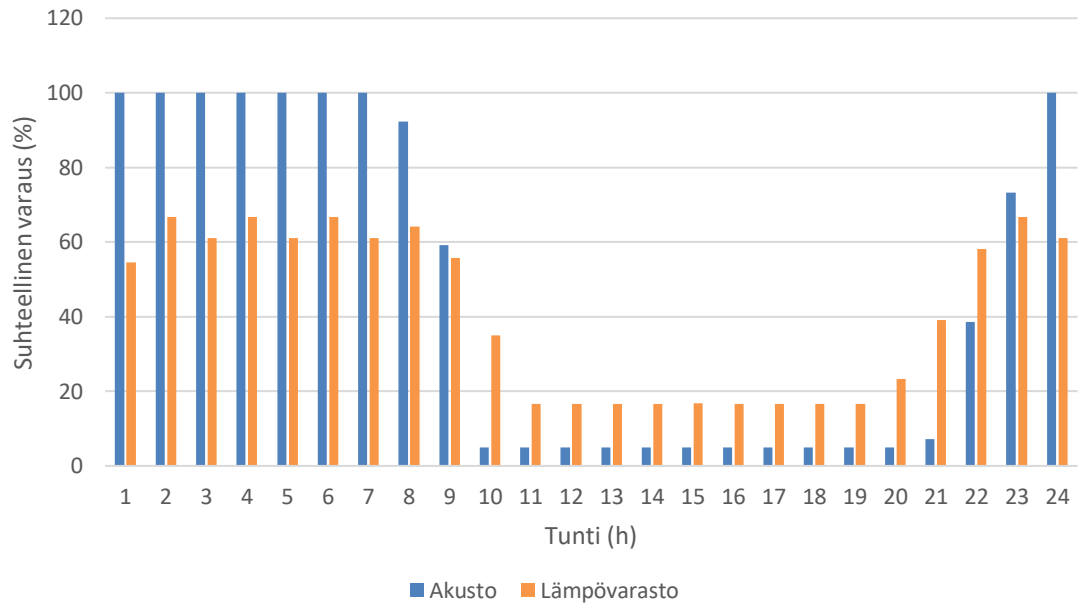
Kuvassa (Kuva 33) kohteen lämmön kuormitusprofiili on punainen viiva, jonka alle jää lämmön hankinta eri lähteistä. Hankintalähteet väreineen on merkitty kuvaan. Kuvasta nähdään, että kohteen lämmön tarve saadaan suurilta osin hyödynnettyä lämpövarastosta, tuotettua kaasumootorilla yhdistetyllä sähkön ja lämmön tuotannolla sekä sähköajoneuvojen lataustehon tuotannon yhteydessä. Kuitenkin lämmön huippukuormitustunteina, lämpimän käyttöveden tarpeen kasvun takia, täytyy lämpöä hankkia pieni osuus kaukolämpöverkosta ostamalla. Lämpimän käyttöveden ja sähköajoneuvojen lataustehon huipputuntien ajoituksessa samoille tunneille saadaan hyvin hyödynnettyä sähköajoneuvojen lataustehon tuotannon ohessa tuotettu lämpö kohteen lämmitystarpeisiin. Lämpimän käyttöveden ja sähköajoneuvojen lataustarpeen huipun keskittyessä samoihin aikoihin saadaan synergiahyötyjä kustannusmielessä. Jos nämä huiput olisivat eri aikaan, olisi myös kaukolämpöverkosta ostettava kalliimman kaukolämmön osuus suurempi verrattuna halvempaan itse tuotettuun lämpöön. Kuvasta nähdään myös, että suhteellisen tehon ylittäessä 100 % vuorokauden aikana, ei kaikkea lämpöenergiaa voida tuottaa pelkästään kaasumootorilla vaan täytyy hyödyntää myös lämpövaraston sisältämää lämpöä sekä kaukolämpöverkosta ostettavaa lämpöä. Seuraavassa kuvassa (Kuva 34) on esitetty kaasumootorin polttoaineen kulutus eri käyttötarpeisiin kaasumootorin tehona. Kuva siis esittää, mihin tarpeisiin kaasumootorin tehoa on käytetty, minkä perusteella voidaan laskea kunkin tarpeen aiheuttama polttoaineen kulutus kaasumootorin hyötysuhteen avulla.



Kuva 34. Kaasumoottorin polttoaineen kulutus eri käyttötarpeisiin suhteellisenä tehoana tammikuun 2. viikon maanantaina.

Kuvassa (Kuva 34) on esitetty kaasumoottorin polttoaineen kulutus suhteellisena tehoana eri käyttötarpeisiin. Tehotarpeet väreineen on merkitty kuvaan. Mihinkään tarkoitukseen polttoainetta ei kulu selvästi eniten kuvan perusteella. Vuorokauden alussa suurin osa polttoaineesta kuluu ylijäämäteholla tuotettuun sähkөөn ja lämpөөn, sillä energiavarastoista saadaan tällöin suuri osa energiasta kohteen ja latauspistokkeiden energiatarpeisiin. Tämä ylijäämäteholla tuotettu sähkö ja lämpö varastoidaan ensisijaisesti sähkö- ja lämpövarastoihin hyödynnettäväksi kohteen sähkөөn (ks. Kuva 32) ja lämmön (ks. Kuva 33) sekä sähköajoneuvojen lataustehon (ks. Kuva 37) tarvetta varten. Energiämäärä, jota ei saada varastoitua energiavarastojen tehon tai kapasiteetin (ks. Taulukko 3) rajoituksen takia myydään sähkö- ja kaukolämpöverkkoon. Vihreä palkki kuvaa siis yhteensä sitä tunnin aikana tuotettavaa energiaa, joka ensisijaisesti varastoidaan ja toissijaisesti myydään verkkoihin, mikäli sitä ei saada varastoitua. Sähköajoneuvojen lataustehon tarpeen kasvaessa menee suuri osa polttoaineesta kuitenkin lataustehon tuottamiseen aina iltaan asti, jolloin lataustehon tarve pienenee. Kaasumoottorin tehoa priorisoidaankin sähköajoneuvojen lataustehoa varten ja vasta sitten kohteen sähkөөn ja lämmön tuotantoa varten. Lataustehon tarpeen kasvaessa loput polttoaineesta kuluu kohteelle tuotettavaa sähkөөn ja lämpөөn varten. Näinä tunteina kaasumoottorin tehoa ei jää yli ylijäämäteholla tuotettavaa sähkөөn ja lämpөөn varten. Tästä seuraa myös, että näinä tunteina verkoista ostettavan energian määrä kasvaa (ks. Kuva 32 ja Kuva 33). Kaasumoottori on optimoitu toimimaan nimellisteholla jokaisella tunnilla, jolloin myös jokaisen tunnin yhteenlaskettu polttoaineen kulutus on tasainen. Tämän optimoinnin avulla kasvatetaan energia-aseman kannattavuutta minimoimalla kalliimman verkoista ostettavan energian

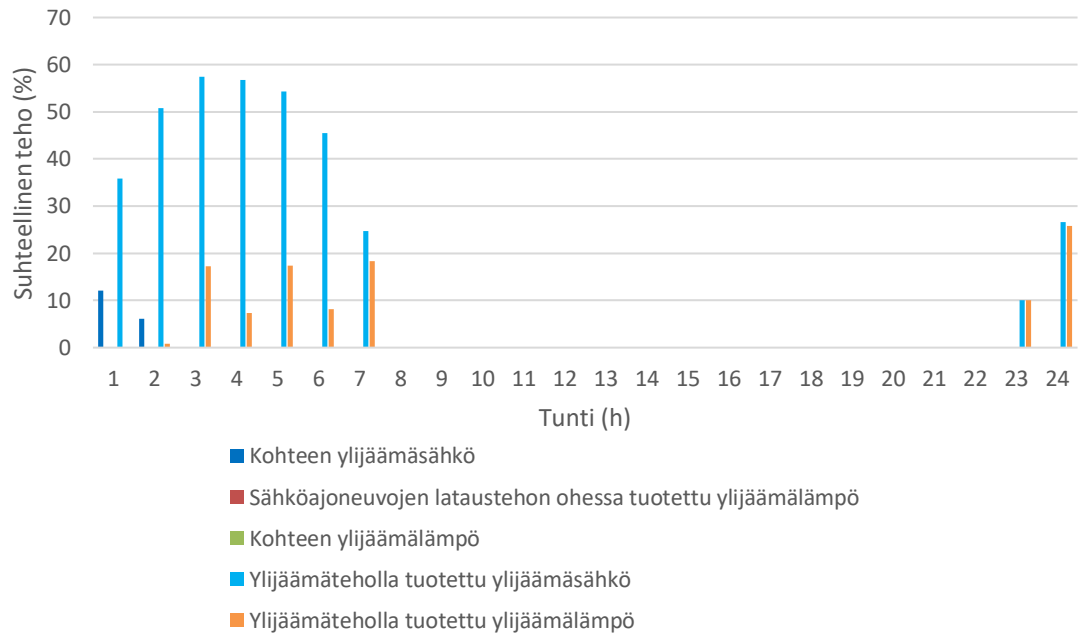
osuutta ja kasvattamalla halvemmän itsetuotetun energian osuutta. Seuraavassa kuvassa (Kuva 35) on esitetty energiavarastojen varaustilanteet kaasumoottorin nimellis-sähkötehoon suhteutettuna.



Kuva 35. Energiavarastojen varaustilanne suhteellisena varauksena tammi-kuun 2. viikon maanantaina.

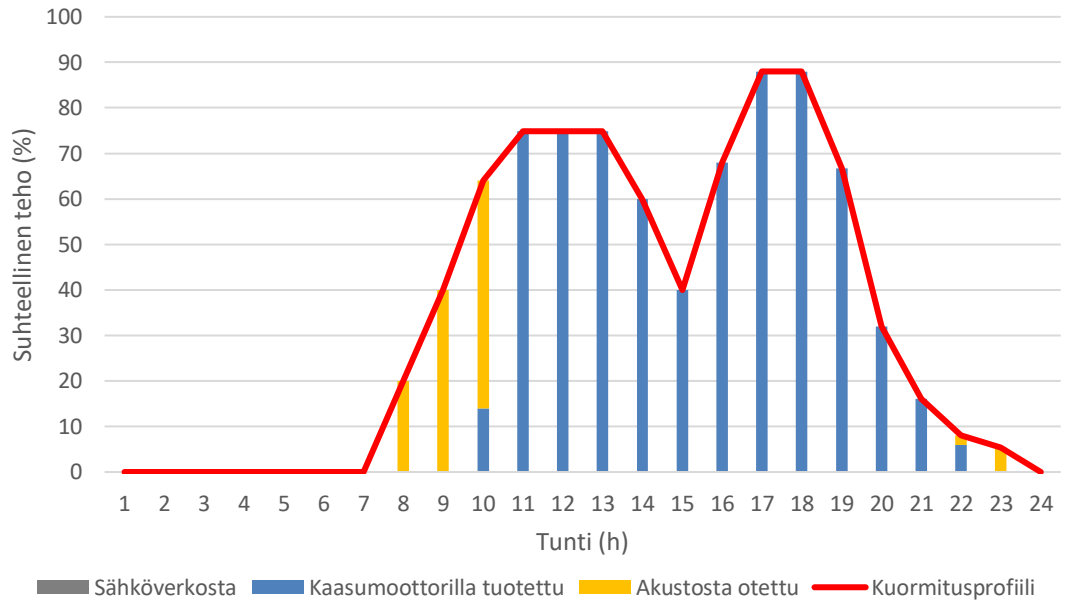
Kuvassa (Kuva 35) akuston varaustilanne on sinisellä ja lämpövaraston oranssilla värillä. Energiavarastojen kapasiteetit ja tehot on esitetty kappaleen 8.2 taulukossa (Taulukko 3) suhteellisina arvoina. Kuvasta nähdään, että sähköakuston varaustilanne vaihtelee päivän aikana täydestä lähes tyhjään, jolloin akustossa ei ole ylimääräistä kapasiteettia, joten sähköakustoa ei ole mitoitettu ainakaan liian suureksi, mikä kasvattaisi turhaan investointikustannuksia. Lämpövarasto ei tarkasteltavalla ajanjaksolla saavuta korkeaa varaustilannetta, mutta sen varaustilanne kuitenkin vaihtelee ja sen sisältämää lämpöenergiaa hyödynnetäänkin tehokkaasti kohteen lämmöntarvetta varten (ks. Kuva 33). Kesäaikaan tilanne on huomattavasti erilainen, koska lämmöntarvetta on paljon vähemmän verrattuna talviaikaan. Tällöin lämpövarasto varautuu paljon enemmän.

Seuraavassa kuvassa (Kuva 36) on esitetty verkkoihin myydyt ylijäämäiset energiamuodot suhteellisena tehona. Ylijäämäenergiaa tulee myytyä verkkoon, mikäli se ei mahdu varastoitavaksi energiavarastoihin kapasiteetin puolesta tai mikäli energiavarastojen teho ei riitä kaiken saatavilla olevan energian varastoitamiseen. Energia-aseman käyttämä CHP-laitos tuottaa aina sähköä sekä lämpöä ja näiden tuotantoa ei voida eriyttää. Esimerkiksi lämmön kysynnän ollessa korkea ja sähkön kysynnän matala, tulee tuotettua ylijäämäisähköä sähkön kysynnän yli, mikä voidaan myydä sähköverkkoon, mikäli sitä ei saada varastoiduksi sähköakustoon.



Kuva 36. Verkkoihin myydyt ylijäämäiset energiamuodot suhteellisena tehona tammikuun 2. viikon maanantaina.

Kuvasta (Kuva 36) nähdään, että kaasumoottorin ylijäämäteholla tuotettua ylijäämä sähköä tulee myytyä eniten sähköverkkoon tarkasteltavan vuorokauden aikana erityisesti vuorokauden alussa. Tästä voidaan päätellä, että sähköakuston kapasiteetti (ks. Kuva 35) pitäisi olla suurempi, jotta kaikki tämä ylijäämä sähkö saataisiin varastoitua. Kapasiteetin kasvattaminen nostaa kuitenkin merkittävästi akuston investointihintaa. Myös ylijäämäteholla tuotettua lämpöä tulee myytyä kaukolämpöverkkoon. Vaikka lämpövaraston kapasiteetin puolesta lämpövarastossa olisi tilaa vielä varastoitavalle lämmölle niin tehon puolesta kaikkea ylijäämäteholla tuotettua lämpöä ei voida varastoida, joten se täytyy syöttää kaukolämpöverkkoon. Kohteelle tuotetun lämmön ohessa tuotetaan myös hieman ylijäämä sähköä vuorokauden alussa ja tämä sähkö myydään sähköverkkoon akuston ollessa täynnä. Seuraavassa kuvassa (Kuva 37) on esitetty sähköajoneuvojen lataustehon kuormitusprofiili ja hankinta.



Kuva 37. Sähköajoneuvojen lataustehon kuormitusprofiili ja hankinta tammi-kuun 2. viikon maanantaina.

Kuvasta (Kuva 37) nähdään, että lataustehon tarpeen kasvaessa se saadaan tuotettua alkuun akustosta otettavalla sähköllä, mutta käytännössä lähes kaikki latausteho vuorokauden aikana tulee tuotettua seuraavaksi edullisimmalla tavalla eli kaasumootorilla. Kuitenkaan sähköverkosta ei tarvitse ostaa sähköä sähköajoneuvoille toisin kuin kohteelle hankittavassa sähkössä, (ks. Kuva 32) sillä sähköajoneuvojen tarvitsemaa lataustehoa priorisoidaan kohteen sähköntarpeen edelle. Eli akustosta otettava sähköenergia sekä kaasumootorin teho varataan ensisijaisesti sähköajoneuvoja varten.

8.3.2 Muut skenaariot

Referenssiskenaarion lisäksi simuloidaan energia-asemaa vaihtelemalla parametreja ja komponenttien ominaisuuksia käyttäen hyväksi kappaleessa 6 esitettyä tulevaisuustarkastelua. Simuloidaan energia-asemaa näissä skenaarioissa kaikissa kolmessa kokoluokassa (*pieni*, *keskikoko* ja *suuri*). Valitaan seuraavat skenaariot tulevaisuustarkastelun pohjalta, sekä niille lyhenteet, simuloitiin referenssiskenaarion lisäksi:

- Nouseva energian hinta (Energia+)
- Maakaasun hiilidioksidivero tuplaantuu ($2xCO_2$)
- Biokaasu (Bio)
- Huoltamoratkaistu (Huoltamo)
- Ei energiavarastoja (Varastoton)
- Tukihyöty (Tuki)
- Pikalatausasemat (DC)

Skenaariossa *Nouseva energian hinta* oletetaan, että maakaasun hinta nousee voimakkaasti sekä sähkön ja lämmön hinta nousevat. Määritetään vuosittaiseksi hinnannousuksi maakaasulle 6 %, sähkölle 3 % sekä lämmölle 1,5 %. Oletetaan energian hinnan kasvavan mm. päästöoikeuksien hinnan kasvun takia. Tiukentuvalla energia- ja ilmasto-politiikalla on vaikutusta päästöoikeuden hintaan, joka vaikuttaa suoraan polttoaineiden hintaan ja sitä kautta tuotettavan sähkön ja lämmön hintaan, mikäli näitä tuotetaan fossiililla polttoaineilla. Sähkön ja lämmön hinnan nousu vaikuttaa sekä myytävään että ostettavaan hintaan.

Skenaariossa *Maakaasun hiilidioksidivero tuplaantuu* oletetaan, että vuoden 2019 tasta vuoteen 2029 yhdistetyssä tuotannossa maakaasun hiilidioksidivero on lineaarisesti tuplaantunut arvosta 12,94 €/MWh arvoon 25,88 €/MWh, jolloin vuotuinen hiilidioksidiveron kasvu on n. 7,2 %. Tällä on vaikutusta vain lämmön tuotannossa käytettävään polttoaineeseen, sillä sähkön tuotannossa käytetty polttoaine yhdistetyssä tuotannossa on verotonta (ks. Kappale 3.5.1).

Skenaariossa *Biokaasu* käytetään energia-aseman kaasumoottorin polttoaineena biokaasua, joka on myyntihinnaltaan kalliimpaa kuin maakaasu, mutta verotonta. Kaikki myytävä polttoaine kaasujoneuvoille on myös biokaasua, mikä on autoilijalle kalliimpi polttoaine kuin maakaasu.

Skenaariossa *Huoltamotkat* energia-asema sisältää vain kaasujoneuvojen tankkauspisteitä sekä sähköajoneuvojen latauspisteitä. Kaikki tarvittava energia ja polttoaine ostetaan sähkö- sekä kaasuverkosta, joihin on energia-asemalla liitännät. Energia-asemalla ei tällöin olisi ns. kohdetta, jonka energiatarpeiden mukaan energia-asema tuottaisi sähköä ja lämpöä kohteelle. Tällainen huoltamotkat voisi olla mahdollinen esimerkiksi osana liike-elämän rakennusta erityisesti isommassa mittakaavassa. Pienessä kokoluokassa huoltamo voisi olla sellaisenaan kylmäasema.

Skenaariossa *Ei energiavarastoja* energia-asema ei sisällä energiavarastoja tuomaan joustavuutta energian kysynnän ja tarjonnan välille, mutta tällöin energia-aseman alkuinvestointi pienenee energiavarastojen verran.

Skenaariossa *Tukihyöty* energia-asema saa tukea kaasujoneuvojen tankkauspisteille ja sähköajoneuvojen latauspisteille 30 % investointikustannuksesta. Tämäntapainen tukijärjestelmä on Suomessa jo olemassa (ks. Kappale 6.6)

Skenaariossa *Pikalatausasemat* energia-aseman sisältämät sähköajoneuvojen latauspisteet ovat tasasähköllä toimivia korkeatehoisia pikalatausasemia. Pikalatausaseman teho on 0,5 suhteellisenä tehona verrattuna kaasumoottorin nimellissähkötehoon kokoluokassa pieni. Tällä teholla ladataan huipputuntina kahden sähköajoneuvon akustot. Lataustehon kuormitus noudattaa samanlaista jakaumaa kuin peruslatausasemillakin

(ks. Kappale 8.1.4). Yksi pikalatausasema korvaa kaksi vaihtosähköllä toimivaa peruslatauspistettä eli latauspisteiden määrä puolittuu. Esimerkiksi kokoluokassa pieni huipputunnin kuormitus on 1,0 suhteellisen lataustehona, koska pikalatausasemia on kaksi kappaletta ja huipputunnin aikana ladataan siis yhteensä neljän sähköajoneuvon akus-
tot.

Simuloidaan energia-asemaa kaikissa edellä mainituissa skenaarioissa yksitellen sekä simuloidaan myös seuraavat yhdistelmäskenaariot:

- Nouseva energian hinta ja Huoltamoratkaistu (Energia+ & Huoltamo)
- Biokaasu ja Tukihyöty (Bio & Tuki)
- Maakaasun hiilidioksidivero tuplaantuu ja Pikalatausasemat (2xCO₂ & DC)

Energia-asemalle määritettyjen skenaarioiden pohjalta oletetaan saavan kattava kuva energia-aseman tulevaisuuden liiketoimintapotentialista. Kaikkien skenaarioiden ja niiden yhdistelmien kannattavuus on esitetty kannattavuusmittareilla kappaleen 8.5.1 taulukossa (ks. Taulukko 4).

8.4 Simuloinnin perusteella syntyvät tuotot ja kustannukset

Energia-aseman tuomat tuotot ja kustannukset määräytyvät käyttöperiaatteen (ks. Kuva 23), kohteen kuormitusprofiilien (ks. Kappale 8.1) ja energiatuotteille määritettyjen hintojen mukaan.

Energia-asema saa tuottoja kohteelle myytävästä sähköstä ja lämmöstä, sähköajoneuvoille myytävästä sähköstä sekä kaasuaajoneuvoille myytävästä tankattavasta kaasumaisesta polttoaineesta. Mikäli mahdollista, energia-asema pyrkii hankkimaan nämä tuotteet mahdollisimman edullisesta saatavilla olevasta lähteestä. Esimerkiksi sähköajoneuvoille myytävää sähköä kannattaa ensisijaisesti tuottaa itse halvemalla polttoaineella kuin ostaa kalliimpaa verkkosähköä. Ylimääräinen tuotettu sähkö siirretään sähköverkkoon ja ylimääräinen tuotettu lämpö kaukolämpöverkkoon. Näistä energia-asema saa myös tuottoja.

Energia-asema myy kohteelle tuottamaansa sähköä ja lämpöä, joita laskutetaan vain energian osalta eli hintayksikkö on €/MWh. Kohteelle myytävästä sähköstä saadaan pohjoismaisen pörssisähkön mukainen Elspot-vuorokausimarkkinan vuoden 2018 Suomen aluehinnan tunnittainen hinta [107], johon on lisätty energia-aseman sähkön myyntimarginaali:

$$\text{Myytävän sähkön hinta kohteelle} = \text{Pörssisähkön tuntihinta} + \text{marginaali}$$

Käytettävä myyntimarginaali perustuu sähkön myyjien nykyaikana käyttämään pörssisähkösopimusten myyntimarginaaliin ja sen suuruus on kohtuullinen.

Kohteelle myytävästä lämmöstä energia-asema perii maksun, joka perustuu paikallisen kaukolämpöyhtiön kuukausittain vaihtelevaan hintaan:

$$\text{Myytävän lämmön hinta kohteelle} = \text{Kaukolämmön kuukausihinta}$$

Myytävän lämmön hinta määräytyy Vantaan Energia Oy:n kaukolämmön kuukausittaisen myyntihinnan mukaan [108].

Sähköajoneuvoille myytävästä sähköstä energia-asema veloittaa yleisen hinnoittelumallin mukaan vaihtosähkölatausta (AC) kilowattituntiperusteisesti (€/kWh) ja tasasähkölatausta (DC) minuuttiperusteisesti (€/min). Hitaammasta AC-latauksesta peritään siis energian mukaan ja nopeasta DC-latauksesta latauspistoketta käytettävän ajan mukaan. Kaasuajoneuvojen tankkauksesta energia-asema perii tyypillisesti maakaasusta ja biokaasusta oman hintansa, joista biokaasu on hieman kalliimpaa. Kaasujen tankkaushintoina käytetään Gasumin hinnastoa [109]. Kaasun tankkausta veloitetaan tankattavan kilomäärän (€/kg) mukaan. Sähkö- ja kaasuajoneuvoille myydään sähköä ja kaasua aina kuormitusprofiiliin (ks. Kappale 8.1.4) mukaisesti eli kysyntä kohtaa aina tarjonnan.

Sähköverkkoon myytävästä sähköstä saadaan sama hinta kuin kohteelle myytävästä sähköstä, paitsi verkkoon myydystä sähköstä vähennetään paikalliselle jakeluverkkoyhtiölle maksettava oman tuotannon siirtomaksu. Oman tuotannon siirtomaksu määräytyy Caruna Espoo Oy:n sähköntuotannon verkkopalveluhinnaston [110] mukaan. Kaukolämpöverkkoon myytävästä lämmöstä saadaan kaukolämpöyhtiölle myytävän lämmön hinta. Tästä kaukolämpöverkkoon syötetystä lämmöstä saatava hinta on yleensä pienempi kuin kaukolämpöverkosta ostettavan lämmön hinta. Kaukolämpöverkkoon myytävälle lämmölle käytetään Vantaan Energia Oy:n kaukolämmön ostohinnastoa [111].

Kustannuksia energia-asemalle simuloinnin perusteella syntyy ostetusta sähköstä ja lämmöstä, käytetystä kaasumaisen polttoaineen määrästä sekä huollosta ja kunnossapidosta. Ostetusta sähköstä energia-asema maksaa paikalliselle jakeluverkkoyhtiölle siirtohintaa, sisältäen sähköveron, perusmaksun ja kulutusmaksun, sekä sähköenergian myyjälle pörssisähkön mukaisen tuntihinnan ja tähän lisätyn sähkön myyjän marginaalin. Ostetun sähkön siirron hinta määräytyy Caruna Espoo Oy:n verkkopalveluhinnaston [112] mukaan. Pörssisähkölle käytetään vuoden 2018 Elspot-vuorokausimarkkinan tuntihintaa. Myyntimarginaali on määritetty kohtuullisen suuruiseksi nykypäivän hintatason mukaan. Ostetusta kaukolämmöstä energia-asema maksaa paikalliselle kaukolämpöyhtiölle vuosittaisen perusmaksun ja energiamaksun energiamäärän mukaan. Ostetun kaukolämmön hinnastona käytetään Vantaan Energia Oy:n hinnastoa. Kaasuverkosta ostettavasta kaasusta energia-asema maksaa paikalliselle kaasuyhtiölle kaasun energiasisällön ja siirron mukaan. Kaasun energiasisällön osalta energia-asema maksaa energiamaksun ja energian myyntitehomaksun. Siirron osalta maksetaan kohde-, tilausteho-

ja kulutusmaksu. Ostettavan kaasun energian ja siirron hinta määräytyy Suomen Kaasuenergia Oy:n ja Auris Kaasunjakelu Oy:n hinnaston mukaan. [105]. Huolto- ja kunnossapitokustannuksiin lasketaan lämpövoimakoneen huoltoa ja kunnossapitoa vaativat kustannukset. Näitä kustannuksia tulee merkittävästi määrittämään energia-aseman käyttöperiaate ja siitä seurannut energia-aseman käyttöhistoria. Energia-asemaa simuloidaan tunnin tarkkuudella, joten on luontevaa käyttää myös käyttökustannusta tunnin tasolla (€ per käyttötunti). Valitulle lämpövoimakoneelle eli kaasumootorille simuloinnissa on määritetty tuntitasolle tyypillistä kokoluokkaa oleva käyttökustannus. Muille komponenteille ei ole määritetty huolto- ja kunnossapitokustannuksia vaan niiden oletetaan sisältyvän investointikustannuksiin.

Polttoainetta verotetaan Suomessa yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa vain tuotetun lämmön osalta siten, että verollinen osuus on 0,9-kertainen tuotetusta hyötylämpömäärästä. Polttoaineverot tässä diplomityössä esille tulleille kaasumaisille polttoaineille yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa on esitetty kappaleen 3.5.1 taulukossa (Taulukko 1).

Kaasumootorin hyötysuhteen ollessa alle 100 % kuluu polttoainetta enemmän kuin yhden yksikön verran, jos sähköä ja lämpöä tuotetaan yhteensä yhden yksikön verran. Kaasumootorivoimalaitoksen hyötysuhteeksi on määritetty 90 %, jolloin polttoainetta kuluu $1/0,9 = 1,11$ yksikköä, kun sähköä ja lämpöä molempia tuotetaan yhteensä yhden yksikön verran.

8.5 Kannattavuus

Kannattavuuslaskenta perustuu energia-aseman käyttöperiaatteeseen (ks. Kappale 7.4) ja sen kautta syntyviin simulointituloksiin (ks. Kappale 8.3) ja edelleen energia-aseman kustannuksiin ja tuottoihin (ks. Kappale 8.4). Käyttöperiaate on ohjelmoitu malli, jonka simulointitulosten eli energia-aseman käyttöhistorian perusteella voidaan muodostaa laskelmat energia-aseman kustannuksista ja tuotoista. Näiden perusteella voidaan laskea kannattavuus energia-asemalle nettonykyarvomenetelmällä, sisäisen korkokannan menetelmällä sekä takaisinmaksuajan avulla.

Energia-aseman investoinnilta odotetaan vähintään kohtuullista tuottoa, joten tuottovaatimukseksi on valittu $i = 10\%$. Käytetään siis laskentakorkokantana tuottovaatimusta. Investoinnin pitoajaksi on määritetty $N = 10$ vuotta, sillä tämän jälkeen esimerkiksi kaasumootorin sekä litiumioniakuston tekninen käyttöikä tulee tiensä päähän. Investoinnin hankintamenoksi I määritetään kaikki energia-aseman investointiin liittyvät kustannukset (ks. Kappale 8.2). Investoinnin jäännösarvoksi asetetaan nolla euroa eli investoinnin jälkeen ei oleteta saavan mitään tuottoja energia-asemaan investoiduista komponenteista.

Tämä on huomioitu seuraavaksi esitettävissä kannattavuutta laskevissa kaavoissa. Todellisen jäännösarvon määrittäminen vaatisi tarkempia tutkimuksia laitteiden ja komponenttien teknisestä käyttäjästä.

Nettonykyarvo on tulovirtojen ja menovirtojen nykyarvojen erotus, millä lasketaan tulevaisuuden kassavirtojen nykyarvo diskonttaamalla ne käytettävällä korkokannalla. Nettonykyarvo (engl. NPV = Net Present Value) lasketaan seuraavalla kaavalla (5):

$$\begin{aligned}
 NPV &= PV(\text{tulovirta}) - PV(\text{menovirta}) \\
 &\Leftrightarrow \\
 NPV &= -I + \sum_{t=1}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \tag{5}
 \end{aligned}$$

jossa I on energia-aseman investoinnin hankintameno ja siksi negatiivisena. N on pitäjän vuosien lukumäärä eli tässä tapauksessa 10 vuoden kassavirrat R_t lasketaan yhteen. Jakajana kassavirroilla R_t summalausekkeessa on diskonttaustekijä, joka diskonttaa kassavirrat R_t nykypäivään tuottovaatimuksen i mukaan joka vuodelle t .

Investointi on nettonykyarvon mukaan kannattava, mikäli $NPV \geq 0$ eli tuottovaatimuksella diskonttatut tulevaisuuden kassavirrat R_t ovat yhteensä arvokkaampia kuin investoinnin hankintameno I . Investointeja vertaillessa kannattavin investointi on se, jolla saadaan suurin nettonykyarvo.

Sisäisen korkokannan (engl. IRR = Internal Rate of Return) menetelmässä etsitään korkokanta tai tuottovaatimus i , jolla nettonykyarvoksi saadaan nolla eli $NPV = 0$. Tällöin investoinnin tulovirtojen ja menovirtojen nykyarvojen erotus menee nolaksi eli investointi on juuri ja juuri kannattava. Korkokanta i saadaan ratkaistuksi ratkaisemalla se nettonykyarvon kaavasta (5) asettamalla nettonykyarvo nolaksi. Investointi on sisäisen korkokannan menetelmän mukaan kannattava, mikäli laskettu sisäinen korkokanta on vähintään määritellyn korkokannan tai tuottovaatimuksen suuruinen eli tässä tapauksessa 10 %. Investointeja vertaillessa kannattavin investointi on se, jolla saadaan suurin sisäinen korkokanta.

Nettonykyarvo sekä sisäisen korkokannan menetelmä huomioivat rahan aika-arvon diskonttaustekijän kautta. Takaisinmaksuaika ei kuitenkaan huomioi rahan aika-arvoa eikä takaisinmaksuajan jälkeen tulevia tuottoja. Takaisinmaksuaika lasketaan yksinkertaisesti jakamalla investoinnin suuruus vuotuisilla kassavirroilla seuraavan kaavan (6) mukaisesti:

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{I}{\sum_{t=1}^N R_t} \tag{6}$$

Tässä kaavassa (6) vuotuisten tuottojen vaihtelu vuosien välillä on huomioitu. Vuotuinen tuotto ei siis aina ole vakio. Vaihtelua tähän tuo esimerkiksi energiahinnoille asetettavat vuotuiset kasvuprosentit referenssiskenaariosta poiketen. Investointeja vertaillen kannattavin investointi on se, jossa saadaan lyhyin takaisinmaksuaika.

8.5.1 Skenaarioiden kannattavuus

Esitetään tässä kappaleessa kaikkien edellä kuvattujen skenaarioiden (ks. Kappaleet 8.3.1 ja 8.3.2) kannattavuus edellä esitellyillä kannattavuusmittareilla (ks. Kappale 8.5) kaikissa kokoluokissa (*pieni* (P), *keskikoko* (K) ja *suuri* (S)). Nettonykyarvoa (NPV) verrataan alkuinvestointiin eli suhdeluku NPV/Investointi kertoo investoinnin nettonykyarvon ja alkuinvestoinnin euromäärien osamäärän. Sisäinen korkokanta (IRR) esitetään normaalisti prosentteina ja takaisinmaksuaika vuosina. Eri skenaarioiden kannattavuus kannattavuusmittareiden avulla on koottu seuraavaan taulukkoon (Taulukko 4).

Taulukko 4. Energia-aseman kannattavuus eri mittareilla kaikissa skenaarioissa kokoluokkiin eriteltynä: pieni (P), keskikoko (K), suuri (S).

Skenaario	Kannattavuusmittari								
	NPV/Investointi			IRR (%)			Takaisinmaksuaika (vuotta)		
	P	K	S	P	K	S	P	K	S
Ref	1,16	1,29	1,44	33,13	35,39	38,19	2,85	2,69	2,52
Energia+	0,542	0,660	0,782	24,00	26,71	29,54	3,29	2,99	2,79
2xCO ₂	1,10	1,23	1,38	32,42	34,70	37,51	2,87	2,71	2,54
Bio	0,488	0,605	0,715	20,45	22,76	24,90	4,13	3,83	3,58
Huoltamo	1,83	1,94	1,95	44,91	46,80	47,02	2,17	2,09	2,08
Varastoton	1,26	1,38	1,53	34,90	37,07	39,68	2,72	2,58	2,43
Tuki	1,88	2,07	2,34	45,83	49,09	53,59	2,13	2,00	1,84
DC	1,98	2,13	2,31	47,60	50,02	53,18	2,03	1,96	1,85
Energia+ & Huoltamo	1,26	1,36	1,38	38,51	40,55	40,83	2,35	2,26	2,25
Bio & Tuki	0,985	1,16	1,34	29,94	33,12	36,43	3,10	2,85	2,62
2xCO ₂ & DC	1,93	2,07	2,26	47,06	49,50	52,66	2,07	1,97	1,86

Taulukosta (Taulukko 4) nähdään, että kaikista skenaarioista DC -skenaario on kaikkein kannattavin kokoluokissa *pieni* ja *keskikoko* kaikilla kannattavuusmittareilla mitattuna. DC -skenaariossa sähköajoneuvojen latauspisteet ovat tasasähköllä toimivia pikalatausasemia, kun taas *referenssiskenaariossa* latauspisteet ovat vaihtosähköllä toimivia normaalilatausasemia. Vaikka sähköajoneuvojen pikalatausasemiin (DC) tehtävä investointi on suurempi kuin normaalilatausasemiin (AC) niin pikalatausasemien aikaperuste-

nen hinnoittelu (€/min) verrattuna normaalilatausasemien energiaperusteiseen hinnoitteluun (€/kWh) kasvattaa merkittävästi enemmän kannattavuutta kuin mitä alkuinvestointi sitä pienentää. Kokoluokassa *suuri* on *Tuki* -skenaario kannattavin kaikilla kannattavuusmittareilla mitattuna. *Tuki* -skenaariossa oletetaan saavan 30 % hankintatuki sähköajoneuvojen latauspisteiden ja kaasujoneuvojen tankkauspisteiden hankintaan, kun taas *referenssiskenaariossa* hankintatukea ei saada. *Suuressa* kokoluokassa sähköajoneuvojen latauspisteitä on 80 kappaletta ja kaasujoneuvojen tankkauspisteitä 20 kappaletta, jolloin hankintatuen vaikutus näiden investointiin on suurin verrattuna muihin kokoluokkiin, mikä tekee *Tuki* -skenaariosta suuressa kokoluokassa kannattavimman.

Referenssiskenaarioon verrattuna skenaariot *Bio ja Energia+* heikentävät energia-aseman investoinnin kannattavuutta merkittävästi. Vaikka skenaariossa *Energia+* myytävästä sähköstä ja lämmöstä saadaan korkeampi hinta kuin referenssiskenaariossa, niin nouseva maakaasun hinta kuitenkin peittoaa kasvavilla polttoainekustannuksilla kasvaneet myyntitulot energiasta, jolloin nettovaikutus kannattavuuteen on merkittävästi negatiivinen. Myös ostettavasta sähköstä ja lämmöstä joudutaan maksamaan suurempaa hintaa, mikä myös alentaa kannattavuutta. *Bio* -skenaariossa energia-aseman käyttämä biokaasu polttoaineena on suhteellisen kallista maakaasuun verrattuna, vaikka biokaasun verotusaste on 0 %. Vaikka kaasujoneuvoille polttoaineena myytävästä biokaasusta saadaan maakaasua korkeampi hinta, niin silti energia-aseman omat polttoainekustannukset ovat suhteessa suuremmat biokaasulla kuin maakaasulla ja nettovaikutus kannattavuuteen on merkittävästi negatiivinen. *Tuki* biokaasua käyttäville CHP-laitoksille parantaisi energia-aseman kannattavuutta. Mikäli tulevaisuudessa maakaasun hinta nousee merkittävästi, mutta biokaasu halpenee esimerkiksi ilmasto- ja energiapoliittisin seurauksin, voisi tässä käännekohdassa polttoaineen vaihtaminen maakaasusta biokaasuun olla kannattavaa.

Skenaariossa $2xCO_2$ vaikutus kannattavuuteen on hyvin maltillinen referenssiskenaarioon verrattuna. Maakaasun hiilidioksidiveron tuplaantuminen 10 vuodessa on siis hyvin pieni ongelma energia-asemalle. Myös yhdistelmäskenaarion $2xCO_2$ & *DC* ja skenaarion *DC* kannattavuuksia vertailemalla nähdään, että yhdistelmäskenaarion kannattavuuteen hiilidioksidiveron tuplaantumisella ei ole suurta huonontavaa vaikutusta.

Skenaario *Varastoton*, jossa energia-asema ei sisällä energiavarastoja, on kannattavampi kuin referenssiskenaario eli energiavarastoista saatava hyöty energianhankinnan joustavuudessa ei ole yhtä arvokasta kuin energiavarastojen tuomat kustannukset. Energiavarastojen mahdollistamalla joustavuudella saadaan siis vähennettyä (kallista) ostettavan energian osuutta ja tuotettua sekä käytettyä enemmän energiaa, jonka hankintakustannus on (halpa) polttoaineella tuotettu energia. Ostettava energia on kuitenkin nykypäivänä tarpeeksi halpaa, joten energiavarastot eivät ole kannattavia. Energiavarastojen kannattamattomuus toteutuu kaikilla energiavarastojen kokoluokilla eli energiavarastojen pitäisi olla investointikustannuksiltaan vielä halvempia energiayksikköä kohti

verrattuna niiden edellä kuvattuun joustavuushyötyyn kuin tänä päivänä. Erityisesti litiumioniakustojen hinnat ovat olleet voimakkaassa laskussa lähihistoriassa ja tämän trendin oletetaan jatkuvan, joten energia-asemalle litiumioniakustot voivat olla kannattavia jo muutaman vuoden kuluttua. Myös hankintatuki energiavarastoille kasvattaisi energia-aseman kannattavuutta.

Yhdistelmäskenaariossa *Energia+ & Huoltamo* energia-asema sisältää vain lataus- ja tankkauspaikat, mutta ostettava kaasu ja sähkö myytäviksi polttoaineiksi kallistuvat vuosittain. Siten kannattavuus on vain hieman parempi kuin *referenssiskenaariossa*. Kuitenkin kokoluokassa *suuri* suhteellinen nettonykyarvo (NPV/Investointi) on pienempi kuin *referenssiskenaariossa*. Yksittäisenä skenaariona *Huoltamo* on selkeästi *referenssiskenaariota* kannattavampi, sillä *Huoltamo* -skenaarion alkuiinvestointi on huomattavasti kevyempi sekä myytävästä sähköstä sähköajoneuvoille ja kaasumaisesta polttoaineesta kaasujoneuvoille saadaan suhteellisen hyvät tuotot. *Huoltamo* -skenaarion kannattavuus on kuitenkin paljon sen varassa kuinka suurat määrätetyt lataus- ja tankkauskuormat ovat.

Bio & Tuki -skenaariossa energia-asema käyttää pelkästään polttoaineenaan biokaasua ja myy kaasujoneuvoille pelkkää biokaasua saaden kuitenkin 30 % hankintatuen lataus- ja tankkauspaikoille. Skenaarion kannattavuus on kuitenkin selvästi huonompi kuin *referenssiskenaariossa* eli edes hankintatuella toteutettu biokaasua käyttävä ja myyvä energia-asema ei ole kannattavampi kuin *referenssiskenaariossa*.

8.6 Jatkokehitys

Laskennan tuloksia tarkastellessa täytyy huomioida, että laskenta perustuu osittain tulevaisuutta ennustaviin arvioihin ja analyysiin, jotka ovat aina sitä epätarkempia, mitä pidemmälle tulevaisuuteen ilmiöitä yritetään ennustaa. Arvioiden pohjalla olevat skenaariot eivät välttämättä toteudu siinä laajuudessa kuin on ennustettu ja tulevaisuudessa voi tulla vastaan yllättäviäkin vaikutuksia skenaarioihin esimerkiksi poliittisten päätösten kautta.

Energia-asema tuottaa energiaa kohteen ja liikenteen tarvitsemien energiamuotojen kuormitusprofiilien mukaan. Erilaisilla kuormitusprofiileilla saadaan luonnollisesti erilaisia tuloksia, millä on suora vaikutus energia-aseman kannattavuuteen. Yksittäisen kohteen ja liikenteen lataus- ja tankkauspaikkojen todellisiin mittauksiin perustuvia kuormitusprofiileja, kaikkien energiamuotojen osalta, käyttämällä oltaisiin realistisessa tilanteessa siuloitaessa energia-aseman toimintaa ja sen pohjalta laskettua kannattavuutta. Sopivia kohteita on kuitenkin erittäin paljon tosielämässä ja niiden energiatarpeiden kuormitusprofiilit ovat yksilöllisiä kokonaisuuksia, joiden välillä voi olla suuria eroja. Siten jotkut niistä voivat osoittautua hyvinkin kannattaviksi kohteiksi energia-asemalle ja osa erittäin kannattamattomiksi. Tässä diplomityössä onkin pyritty simuloimaan keskivertokohdetta,

joka voisi olla mahdollinen kohde energia-asemalle, eikä ole yritettykään simuloida kaikkien mahdollisten kohteiden osalta energia-aseman toimintaa.

Laskennan aika-askel olisi parempi asettaa aina mahdollisimman tarkasti. Esimerkiksi kohteen energiatarpeet ovat sekuntitasolla tapahtuvia muutoksia, mutta niiden mallintaminen on hankalaa ja erittäin työlästä todellisen, yksittäisen kohteen, mittausdatan puuttuessa. Näin ollen on tyydyttävä keskiarvoiseen aika-askeleeseen energiavirtoja mallintaessa. Tämän takia laskennassa käytettävän aika-askeleen sisällä voi olla merkittäviäkin muutoksia, mikä osaltaan voi vaikuttaa merkittävästi laskennan lopputuloksiin. Jatkokehitystarpeena energia-aseman käyttöperiaatemallin kuvaaminen tarkemmin esimerkiksi todellisen potentiaalisen kohteen mittausdatan avulla tarkempien ja luotettavampien tulosten saavuttamiseksi on välttämätöntä.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia diplomityössä esitellyn energia-aseman liiketoimintapotentiaalia. Energia-aseman liiketoimintapotentiaalia tutkittiin selvittämällä energia-aseman ekosysteemin energiamarkkinoiden tilaa nykytilanteessa ja tulevaisuudessa sekä laskemalla kannattavuus energia-asemalle monipuolisten simulointiskenaarioiden pohjalta.

Energia-aseman ekosysteemin energiamarkkinoiden tilaa tutkittiin kirjallisuuslähteiden pohjalta. Ekosysteemin osalta tutkittiin kaasumaiseen polttoaineeseen sekä sähkön ja lämmön tuotantoon vaikuttavia tekijöitä, energiavarastoja ja sähkö- ja kaasuajoneuvojen yleistymistä sekä näiden lataus- ja tankkausinfrastruktuurin tukijärjestelmiä. Näihin kaikkiin osa-alueisiin on suuri vaikutus ilmastopoliittisilla päätöksillä, jotka ovat nykypäivänä osa energiapolitiikkaa. Tulevaisuudessa ilmastopoliitikassa painotetaan todennäköisesti yhä enemmän puhdasta energiaa päätettäessä suurista energiakysymyksistä. Näillä päätöksillä on suora vaikutus energia-aseman kannattavuuteen. Energia-aseman edustaessa vähähiilisen energian ja puhtaamman liikenteen megatrendejä se saa näistä merkittävää hyötyä.

Kaasumarkkinoiden avautuessa energia-asema saa turvattua polttoaineen saannin yhä paremmin tulevaisuudessa ja todennäköisesti polttoaineen hinta tulee laskemaan Euroopan laajuisilla suuremmilla markkinoilla pitkällä aikavälillä verrattuna nykytilanteeseen. Sähkön hinnan arvioidaan nousevan tulevaisuudessa esimerkiksi päästöoikeuksien hinnan noustessa sekä sähkön hinnan vaihtelun arvioidaan kasvavan esimerkiksi uusiutuvien sähköntuotantotapojen yleistyessä yhä laajemmin. Energia-asema saa tuottamastaan sähköstä todennäköisesti korkeamman hinnan tulevaisuudessa. Lämmön osalta esimerkiksi rakennusten energiatehokkuuden kasvaessa, ei lämmön kysyntä tule merkittävästi kasvamaan tulevaisuudessa. Kuitenkin kaukolämpömarkkinoiden murroksessa energia-asema voi mahdollisesti tulevaisuudessa tuottaa lämpöä useammille asiakkaille läpinäkyvillä ja joustavilla lämpömarkkinoilla. Sähkövarastojen osalta litiumioniakustojen hinnat ovat olleet voimakkaassa laskussa ja tämän arvioidaan jatkuvan tulevaisuudessa. Lämpövarastojen osalta hinnat ovat jo saturoituneet tietylle tasolle. Joustavuutta energian hankinnassa tuovat energiavarastot tulevat olemaan yhä halvempia ja siten energia-aseman älykkäällä ohjauksella saadaan tulevaisuudessa yhä suurempia hyötyjä energiavarastojen hyödyntämisestä. Sähkö- ja kaasuajoneuvojen näkymät ovat erittäin positiivisia puhtaan liikenteen ollessa yhä tärkeämpää esimerkiksi kaupunkialueilla. Nämä liikennemuodot yleistyvätkin vähitellen. Vähähiiliset ja hiilivapaat polttoaineet tulevat olemaan merkittävä osa tulevaisuuden liikennettä ja siten potentiaalista asiakaskuntaa energia-aseman lataus- ja tankkausratkaisuille tulee olemaan yhä enemmän. Kirjallisuuslähteiden pohjalta energia-aseman näkymät ovat positiiviset.

Simulaatiomallin avulla simuloitiin energia-asemaa kolmessa kokoluokassa erilaisissa skenaarioissa, joiden perusteella voidaan muodostaa kattava kuva energia-aseman kannattavuudesta pitkällä pitoajalla. Kannattavuusmittareina käytettiin suhteellista nettonykyarvoa, jossa nettonykyarvoa verrattiin alkuinvestointiin, sisäistä korkokantaa sekä takaisinmaksuaikaa. Perusskenaarioita laadittiin yhteensä kahdeksan kappaletta ja näitä yhdisteltiin vielä kolmeksi uudeksi yhdistelmäskenaarioksi. Simuloituja skenaarioita on siis jokaiselle kolmelle kokoluokalle 11 kappaletta eli yhteensä 33 kappaletta. Näistä kannattavimmaksi osoittautui kokoluokassa *pieni* ja *keskikoko DC* -skenaario, jossa *referenssiskenaarioon* verrattuna sähköajoneuvojen latauspisteet olivat tasasähköllä toimivia pikalatausasemia. Kokoluokassa *suuri* kannattavimmaksi osoittautui *Tuki* -skenaario, jossa sähköajoneuvojen latauspisteille ja kaasujoneuvojen tankkauspisteille myönnetään 30 % hankintatuki. Yhdistelmäskenaarioiden kannattavuus ei ylittänyt perusskenaarioiden kannattavuutta, mutta niiden kannattavuus ei myöskään ollut millään yhdistelmäskenaariolla huonoin verrattuna perusskenaarioihin.

Simulaatiomallissa tehdyillä oletuksilla ja valinnoilla on suuri vaikutus simulaatiotuloksiin ja siten kannattavuuteen ja edelleen energia-aseman liiketoimintapotentialiin. Simulaatiomalli ei perustu suoraan yksittäiseen todelliseen tapaukseen, mutta simulaatiomallin ja energian kuormitusprofiilien laadinnassa pyrittiin joka osa-alueella hyödyntämään todellisia ja tarkoituksenmukaisia mittaustuloksia ja dataa, jotta simulointituloksista saatiin mahdollisimman luotettavat. Simulaatiomalliin liittyy kuitenkin paljon epävarmuutta. On epävarmaa, toteutuuko esimerkiksi sähköajoneuvojen latauspisteiden kautta myyty sähkö ja kaasujoneuvoille myytävä kaasumainen polttoaine simulaatiomallissa oletetun suuruisena. Jatkokehitystarpeena simulointimallia pitääkin kehittää todellisen tapauksen mittaustulosten pohjalta, jotta saadaan luotettavampia tuloksia energia-aseman liiketoimintapotentialille.

Kokonaisuutena tässä diplomityössä tehtyjen kirjallisuusselvityksen ja simulaatiomallin tulosten pohjalta energia-asemalla nähdään olevan liiketoimintapotentialia nykyisillä ja tulevaisuuden energiamarkkinoilla.

10. LÄHTEET

[1] Teollisuussuunnittelu Oy, Maakaasukäyttöinen kokonaisenergialaitos, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, 1986.

[2] K. Sadeharju, Maakaasukäyttöisten polttomoottorivoimalaitosten pakokaasujen lämmöntalteenotto, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, s. 25-39, Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22458/Sadeharju.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

[3] Member State reporting under the Cogeneration Directive - including cogeneration potentials reporting, 2009, Saatavissa: <http://www.code-project.eu/wp-content/uploads/2010/02/290110-CODE-European-summary-report1.pdf>.

[4] S. Kallio, Modelling of a combined heat and power system, Tampere University of Technology, 2012, Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21174/kallio.pdf;sequence=3>.

[5] P.A. Breeze, Power Generation Technologies, 1. painos, Newnes, 2005, s. 62-86, Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=234941>.

[6] Suomen Kaasuyhdistys, Kaasun käyttö, (viitattu 8.3.2019), Saatavissa: <https://www.kaasuyhdistys.fi/kaasu-suomessa/kaasun-kaytto/>.

[7] A. Wellinger, Jerry D Murphy, David Baxter, R. Braun, Biogas Handbook: Science, Production and Applications, Elsevier Science & Technology, 2013, Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1574946>.

[8] O.E. Eerola, Polttomoottorit, 3. painos, Gummerus, 1980, s. 19.

[9] A.F. Williams, W.L. Lom, Liquefied Petroleum Gases: A Guide to Properties, Applications and Usage of Propane and Butane, 1. painos, Ellis Horwood Limited, 1974, ISBN: 853120064.

[10] Maritta Kymäläinen, Outi Pakarinen, Suomen Biokaasuyhdistys ry, Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen, Hämeen ammattikorkeakoulu, 2015, s. 9-171, Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- [11] C.A. Frangopoulos, Cogeneration: technologies, optimisation and implementation, The Institution of Engineering and Technology, 2017, s. 49-73, Saatavissa: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kp49Q60712/viewerType:toc//root_slug:cogeneration-technologies-optimisation?kpromoter=marc.
- [12] J. Bastman, Sähkökoneet, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, s. 6-130.
- [13] M. Kytö, N. Nylund, Neste-, maa- ja biokaasu moottoripolttoaineena: kirjallisuuskatsaus, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1985, ISBN: 951-38-2282-6.
- [14] Suomen kaasuyhdistys ry, Maakaasun käsikirja, 2014, Saatavissa: <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/>.
- [15] Hannah Ritchie, Max Roser, Fossil Fuels, 2017, (viitattu 15.2.2019), Saatavissa: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>.
- [16] A. Bahadori, Natural gas processing: technology and engineering design, Elsevier, 2014, ISBN: 9780124202047, Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1686432>.
- [17] Pia Salokoski, Tulevaisuuden energia 2030...2050, Tekes, 2017, s. 8, (viitattu 13.6.2019), Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2772829/332_2017_Tulevaisuuden+energia_2030_2050.pdf/4f1c0ec0-58fc-4c1c-9297-7f90ac01615b.
- [18] S. Mokhatab, W.A. Poe, G. Zatzman, Handbook of natural gas transmission and processing, 2. painos, Gulf Professional, 2013.
- [19] Åström Leif, Maakaasu, sen siirto ja käyttö, Maakaasun koostumus ja ominaisuudet, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, 1972, s. 1-4.
- [20] Gasum, Suomen kaasuverkosto, 2018, (viitattu 15.2.2019), Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/suomen-kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/>.
- [21] Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David A. Wood, Handbook of Liquefied Natural Gas, 2013, Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1511054>.
- [22] Gasum, LNG - puhdasta energiaa Pohjoismaihin, 2019, (viitattu 20.2.2019), Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/lng/>.
- [23] Haminan Energia, LNG, (viitattu 20.2.2019), Saatavissa: <https://www.hamina-energia.fi/lng>.

[24] Työ- ja elinkeinoministeriö, LNG-terminaalien investointituki, Saatavissa: <https://tem.fi/lng-terminaalien-investointituki>.

[25] AGA, AGA aikoo rakentaa LNG-terminaalin Raumalle, 2019, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: https://www.aga.fi/fi/news_ren/news1/news_20140904a.html.

[26] Maciej Paczuski, Marcin Marchwiany, Ryszard Puławski, Andrzej Pankowski, Kamil Kurpiel, Marcin Przedlacki, Liquefied Petroleum Gas (LPG) as a Fuel for Internal Combustion Engines, Intech, 2016, Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/311979504_Liquefied_Petroleum_Gas_LPG_as_a_Fuel_for_Internal_Combustion_Engines/download.

[27] Kaasunsiirron säännöt, 2019, s. 69; Liite 1, Saatavissa: https://kaasumarkkina.fi/wp-content/uploads/2019/03/Kaasunsiirron-s%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t-2020-LUONNOS-08_03_2019.pdf.

[28] Kaasuviesti 1/2016, Suomen Kaasuyhdistyksen jäsenlehti, 2016, Saatavissa: <https://www.subjectaid.fi/storage/ma/a73f072b43ee4cc8af846e354967c680/d7fa58e0641843b2b3201cbd0c6f4928/pdf/757DAD1598068C78F2F82E8362F9050F3D27160B/kaasuviesti%201-2016.pdf>.

[29] GIIGNL, The LNG industry GIIGNL Annual report 2018, GIIGNL (International Group of LNG Importers), 2018, (viitattu 24.2.2019), Saatavissa: https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/Publications/rapportannuel-2018pdf.pdf.

[30] Saana Ahonen, Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu - esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta, Jyväskylän yliopisto, 2010, s. 14-15, Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/24851/1/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-201008122457.pdf>.

[31] Aluehallintavirasto, Päätös 319/2016/1 ja 320/2016/1, Aluehallintavirasto, 2016, s. 13, (viitattu 2.3.2019), Saatavissa: https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwjM0tqKn-PgAhWR6KYKHchqBoAQFjAlegQIARAC&url=https%3A%2F%2Ftietopalvelu.ahtp.fi%2FLupa%2FAvaaLiite.aspx%3FLiite_ID%3D2812979&usq=AOv-Vaw1qVnSpSa6XATR4f2rZI039.

[32] Tilastokeskus, 1.6 Öljytuotteet energialähteenä, Tilastokeskus, 2018, (viitattu 3.3.2019), Saatavissa: https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2017/data/t01_06.xls.

[33] Valtiovarainministeriö, Energiaverotus, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: <https://vm.fi/energiaverotus>.

- [34] Verohallinto, Energiaverotus, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56206/energiaverotu/>.
- [35] Sipilä Juha, Orpo Petteri, Hallituksen esitys HE 191 2018 vp, 2018, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_191+2018.aspx.
- [36] Nestemäisten polttoaineiden verotaulukot, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/nestemaiset_polttoaineet/nestemäisten_polttoaineiden_verotaulukko/.
- [37] Sähkön ja eräiden polttoaineiden verotaulukot, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/sahko_ja_eraat_polttoaineet/sahkon_ja_eraiden_polttoaineiden_verotaukko/.
- [38] J. Roinisto, Lämpövarastot: taloudellisuus, uusia ratkaisuja, suunnittelu- ja rakentamisolgelmia, Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus INSKO, 1986, ISBN: 951-794-685-6.
- [39] Ibrahim Dinçer, Marc Rosen, Thermal energy storage: systems and applications, 2. painos, Hoboken, N.J. : Wiley 2010, 2010, s. 52-110, Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=589273>.
- [40] D. Linden, T.B. Reddy, Linden's handbook of batteries, 4. painos, New York: McGraw-Hill, 2011, ISBN: 978-0-07-162421-3, Saatavissa: https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/browse/lindens-handbook-of-batteries-fourth-edition/p2001c2f299701_3001#p2001c2f299701_3001.
- [41] Antti Rautiainen, Kai Vuorilehto, Antti Supponen, Jenni Rekola, Jukka Mäkinen, DEE-54206 Electrical Energy Storages and Electric Vehicles Lecture notes v. 1.0, 2018.
- [42] IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency Abu Dhabi, 2017, (viitattu 22.4.2019), Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf.
- [43] Raili Alanen, Tiina Koljonen, Sirpa Hukari, Pekka Saari, Energian varastoinnin nykytila, VTT, 2003, Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>.
- [44] M. Lumme, Lämpövarastot, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2018, Saatavissa: <http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/157005/Matti%20Lumme%20kandidaatinty%C3%B6.pdf?sequence=1>.

[45] Andreas Hauer, Thermal Energy Storage, IEA-ETSAP, IRENA, 2013, (viitattu 29.4.2019), Saatavissa: <https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor AH Jan2013 final GSOK.pdf>.

[46] Jaakko Kaaranka, Kaukolämpöakun mitoitus ja investoinnin kannattavuus Seinäjoen Energialle, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, 2013, Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/65535/Kaaranka_Jaakko.pdf?sequence=1.

[47] Tapio Ikkala, 20 000 kuution vesisäiliöstä tulee Suomen suurin kaukolämpöakku - varastoi 800 MWh, 2015, (viitattu 8.3.2019), Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/2015-03-24/20-000-kuution-ve-sis%C3%A4ili%C3%B6st%C3%A4-tulee-Suomen-suurin-kau-kol%C3%A4mp%C3%B6akku---varastoi-800-MWh-3259630.html>.

[48] Antti Koivuniemi, Kaukolämpöakun kannattavuus yhdistetyssä sähkön- ja lämmön- tuotannossa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2014, s. 9-16, Saatavissa: http://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102224/Koivuniemi_Kau-kol%C3%A4mp%C3%B6akun_kannattavuus_yhdiste-tyss%C3%A4_s%C3%A4hk%C3%B6n- ja_l%C3%A4mm%C3%B6ntuotan-nossa.pdf?sequence=2.

[49] SESKO, Sähköajoneuvojen lataussuositus, 2018, (viitattu 17.2.2019), Saatavissa: https://www.sesko.fi/files/889/Lataussuositus_2018_2018-03-08.pdf.

[50] MENNEKES Type 2 charging plug, (viitattu 17.2.2019), Saatavissa: <https://www.mennekes.co.uk/>.

[51] Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. , Ultra-high-power charging technology for the electric vehicle of the future, 2018, (viitattu 19.2.2019), Saatavissa: <https://newsroom.porsche.com/en/company/porsche-fastcharge-prototype-charging-station-ultra-high-power-charging-technology-electric-vehicle-16606.html>.

[52] CCS - Combined Charging System, 2015, (viitattu 17.2.2019), Saatavissa: <http://tesla.o.auroraobjects.eu/ccs-combo-type2.jpg>.

[53] E-Mobility, 2019, (viitattu 19.2.2019), Saatavissa: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/dk?1dmy&urile=wcm%3Apath%3A/dkda/web/main/solutions/subcategory_pages/E_Mobility/07f38fe8-e1d6-4612-8fd2-777df5227c16.

[54] Charging stations' statistics, (viitattu 13.6.2019), Saatavissa: <https://charge-map.com/about/stats>.

- [55] Kishore Naik Mude, Wireless Power Transfer for Electric Vehicle, University of Padova, Italy, 2015, s. 16-17, Saatavissa: [http://paduaresearch.cab.unipd.it/7477/1/Kishore Mude Thesis.pdf](http://paduaresearch.cab.unipd.it/7477/1/Kishore_Mude_Thesis.pdf).
- [56] Evatran Group, Plugless Power, 2019, (viitattu 18.2.2019), Saatavissa: <https://www.pluglesspower.com/>.
- [57] Christophe Guille, George Gross, A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation, Energy Policy 37 (2009), 2009, s. 4379–4390. Saatavissa: https://ac-els-cdn-com.libproxy.tuni.fi/S0301421509003978/1-s2.0-S0301421509003978-main.pdf?tid=1c4e2d60-3581-458a-b002-04ea6a4b3d27&acdnat=1549915717_fd707672a01522760be6c9838dd2a47e.
- [58] TVO, Tuotanto, OL1 ja OL2, 2019, (viitattu 19.2.2019), Saatavissa: <https://www.tvo.fi/ol1ol2>.
- [59] Yutaka Ota, Haruhito Taniguchi, Tatsuhito Nakajima, Kithsiri M. Liyanage, Jumpei Baba, Akihiko Yokoyama, Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging, IEEE Transactions on smart grid, Vol. 3, No. 1, March 2012, 2012, s. 559-564. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6062663>.
- [60] Chengke Zhou, Kejun Qian, Malcolm Allan, Wenjun Zhou, Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 26, No. 4, December 2011, 2011, pp. 1041-1050. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5958591>.
- [61] Heidi Takalo, Biokaasun liikennekäyttö ja kaasujoneuvojen kannattavuus, lin Micropolis Oy, 2018, s. 7-10, (viitattu 21.2.2019), Saatavissa: http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/Biokaasun-k%C3%A4ytt%C3%B6-liikennepolttoaineena_FINAL.pdf.
- [62] Gasum, Kaasutankkausasemien sijainnit, 2019, (viitattu 21.2.2019), Saatavissa: <https://www.gasum.com/yksityisille/tankkaa-kaasua/tankkausasemat/>.
- [63] Pöyry Management Consulting Oy, EU:n 2030 ilmasto- ja energiapolitiikan linjausten toteutusvaihtoehdot ja Suomen omien energia- ja ilmastotavoitteiden toteuttaminen, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, 2016, (viitattu 27.4.2019), Saatavissa: https://tietokayttoon.fi/documents/10616/2009122/28_EU+2030.pdf/c56de1eb-1790-49a3-ac52-762e2d34bbef/28_EU+2030.pdf.pdf?version=1.0.
- [64] Gasum Oy, Maakaasun hinnan muodostuminen, (viitattu 30.3.2019), Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/maakaasun-hinnoittelu/>.

- [65] Pekka Karinen, Suomen Kaasuenergian kaasumarkkinakatsaus, 2018, (viitattu 2.4.2019), Saatavissa: <https://suomenkaasuenergia.fi/suomen-kaasuenergian-kaasumarkkinakatsaus/>.
- [66] Sofia Virtanen, Maakaasumarkkinat avataan kilpailulle – laki läpi eduskunnassa, 2017, (viitattu 2.4.2019), Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/maakaasumarkkinat-avataan-kilpailulle-laki-lapi-eduskunnassa-6660105>.
- [67] Gasum, Avoimen kaasumarkkinan valmistelu, 2019, (viitattu 2.4.2019), Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/suomen-kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/Kaasumarkkinoiden-avaaminen/>.
- [68] Gasum, Markkinamalli, 2019, (viitattu 2.4.2019), Saatavissa: <https://kaasumarkkina.fi/markkinamalli/>.
- [69] Suomen Kaasunsiirtopalvelut Oy, Suomen kaasumarkkina avataan kilpailulle vuoden 2020 alusta lähtien, 2019, (viitattu 2.4.2019), Saatavissa: <https://figas.fi/kaasumarkkinat/>.
- [70] Vainio Amanda, Maakaasumarkkinoiden integroimiseen vaikuttavat tekijät Suomessa ja Baltiassa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2015.
- [71] Baltic News Network, Electricity prices in European countries up 20-40% this year, 2018, (viitattu 18.3.2019), Saatavissa: <https://bnn-news.com/electricity-prices-in-european-countries-up-20-40-this-year-193234>.
- [72] Tilastokeskus, Energian hinnat nousivat vuonna 2018, Tilastokeskus, 2019, (viitattu 13.3.2019), Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2018/04/ehi_2018_04_2019-03-13_tie_001_fi.html.
- [73] Nord Pool, Market Data - Elspot day-ahead prices, 2019, (viitattu 15.3.2019), Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Yearly/?view=chart>.
- [74] Juha Känkänen, Jenni Patronen, Kari Vilén, Jaakko Saarela, Päästökauppadirektiivin uudistamisen vaikutukset Suomen energiasektoriin ja teollisuuteen, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, 2017, s. 1-2, (viitattu 26.3.2019), Saatavissa: https://tietokayttoon.fi/documents/10616/3866814/56_Loppuraportti_p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kauppa_.pdf/6711dddb-e1a7-42e1-abc3-889886ca7950/56_Loppuraportti_p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kauppa_.pdf.pdf?version=1.0.

- [75] Fingrid Oyj, Sähkömarkkinat korjauksen tarpeessa – mitä voimme tehdä? 2016, (viitattu 18.3.2019), Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahko-markkinat/kehityshankkeet/fingrid-sahkomarkkinat-tulevaisuus-2016-web.pdf>.
- [76] R. Malin, Iso käänös tulossa: Verovarojen ahmatti jäämässä ilman uutta rahaa – "tulevalla hallituskaudella ei enää", 2019, (viitattu 18.3.2019), Saatavissa: <https://www.talouselama.fi/uutiset/iso-kaannos-tulossa-verovarojen-ahmatti-jaamassa-ilman-uutta-rahaa-tulevalla-hallituskaudella-ei-ena-a/e65bb12c-9004-3f5a-8541-91d85aab9db6>.
- [77] Energiavirasto, Päästöoikeuksien huutokauppa, (viitattu 27.8.2019), Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/huutokauppa>.
- [78] EU:n päästökauppajärjestelmän uudistus: neuvosto hyväksyi uudet säännöt kaudelle 2021–2030, 2018, (viitattu 27.4.2019), Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2018/02/27/eu-emissions-trading-system-reform-council-approves-new-rules-for-the-period-2021-to-2030/>.
- [79] Pöyry Management Consulting Oy, Third-party access to district heating networks, Finnish Energy, 2018, (viitattu 29.3.2019), Saatavissa: https://energia.fi/files/2634/Third-Party_Access_to_District_Heating_Networks_FINAL_REPORT_20180509.pdf.
- [80] Asianajotoimisto Krogerus Oy, Kaukolämpöyhtiöiden lämmön ostaminen ja määrävän markkina-aseman asettamat kilpailuoikeudelliset reunaehdot, Energiateollisuus ry, 2018, (viitattu 29.3.2019), Saatavissa: https://energia.fi/files/3593/Selvitys_lammon_ostamisesta.PDF.
- [81] Suomalainen kaukolämmitys, Mikkelin ammattikorkeakoulu, 2015, Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf>.
- [82] Energiateollisuus ry, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto, Turun kauppakorkeakoulu, Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Haasteista mahdollisuuksia - sähkön ja kaukolämmön hiilineutraali visio vuodelle 2050, Energiateollisuus ry, 2010, s. 13-23, (viitattu 14.6.2019), Saatavissa: https://energia.fi/files/238/Hiili-neutraali_visio_vuodelle_2050.pdf.
- [83] Juha Känkänen Jaakko Jääskeläinen, Energiamarkkinaskenaariot vuosille 2020-2050, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2016, (viitattu 27.4.2019), Saatavissa: [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/909-Final_Energiamarkkinaskenaariot_vuosille_2020-2050_\(loppuraportti_20161014\).pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/909-Final_Energiamarkkinaskenaariot_vuosille_2020-2050_(loppuraportti_20161014).pdf).

[84] Claire Curry, Lithium-ion Battery Costs and Market, Bloomberg New Energy Finance, 2017, (viitattu 22.4.2019), Saatavissa: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>.

[85] Simolin Toni, Sähköajoneuvojen latausjärjestelmän ja -keskuksen kehittäminen, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/26006/Simolin%20Toni.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

[86] Liikenne- ja viestintäministeriö, Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045, 2018, Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161210/LVM_13_18_Toimenpideohjelma%20hiilettomaan%20liikenteeseen%202045%20Liikenteen%20ilmastopolitiikan%20tyoryhman%20loppuraportti.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[87] Mikko Pihlatie, Marko Paakkinen, Juhani Laurikko, Mikko Laurikkala, Peter Ylén, Vesa Peltola, Petri Pylsy, Sähkö- ja kaasuautojen kustannustehokkaat edistämiskeinot - GASELLI loppuraportti, Valtioneuvoston kanslia, 2019, (viitattu 15.4.2019), Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161364/3-2019-GASELLI_loppuraportti_.pdf.

[88] Terragas, Asennukset, 2019, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: <https://terragas.fi/asennukset/>.

[89] Korkia, Yritysten investointituki sähköautojen julkisille latauspisteille, 2017, (viitattu 28.4.2019), Saatavissa: <http://lataustuki.fi/index.html>.

[90] Kiinteistöjen latauspaikat -esiselvitys, Motiva Oy, 2015, (viitattu 27.4.2019), Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/10869/Kiinteistojen_latauspaikat_esiselvitys.pdf.

[91] ARA, Avustus sähköautojen latausinfraan rakentamiseen, 2018, (viitattu 7.4.2019), Saatavissa: https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat_ja_avustukset/Sahkoautojen_latausinfraavustus.

[92] Suomen kiinteistölehti, Taloyhtiöiden päätöksentekoa sähköautojen latauspisteiden rakentamisessa helpotettava, 2018, (viitattu 27.4.2019), Saatavissa: <https://www.kiinteistolehti.fi/taloyhtioiden-paatöksentekoa-sahkoautojen-latauspisteiden-rakentamisessa-helpotettava/>.

[93] Gasum, Jopa 14 uutta kaasutankkausasemaa – Gasum on saanut EU:lta 2,9 miljoonan euron tuen uusien asemien rakentamiseen, 2018, Saatavissa: <https://www.ga->

[sum.com/gasum-yrityksena/medialle/uutiset/2018/jopa-14-uutta-kaasutankkausasema-gasum-on-saanut-eulta-29-miljoonan-euron-tuen-uusien-asemien-rakentamiseen/](https://www.sum.com/gasum-yrityksena/medialle/uutiset/2018/jopa-14-uutta-kaasutankkausasema-gasum-on-saanut-eulta-29-miljoonan-euron-tuen-uusien-asemien-rakentamiseen/).

[94] Energiavirasto, Sähköisen liikenteen ja biokaasun liikennekäytön infrastruktuurituki, 2019, (viitattu 13.6.2019), Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12796249/Info%2013.6.%20Helsinki%20-%20S%C3%A4hk%C3%B6isen%20liikenteen%20ja%20biokaasun%20liikennek%C3%A4yt%C3%B6n%20infrastruktuurituki%E2%80%8B/1aa85e00-c93d-defc-d46b-5e5317912b43>.

[95] Anja Liukko, Valtioneuvoston asetus sähköisen liikenteen ja biokaasun liikennekäytön infrastruktuurituen myöntämisen yleisistä ehdoista vuosina 2018-2021, 2018, (viitattu 11.6.2019), Saatavissa: https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahU-KEwid457vu7PhAhUZwsQBHaxSDrsQFjA-HegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.lausuntopalvelu.fi%2FFI%2FProposal%2FDownloadProposalAttachment%3FAttachmentId%3D8681&usg=AOv-Vaw3hMrL6dZYV_E2sPhdObjtR.

[96] Pekka Iikkanen, Juha Tervonen, Tuomo Lapp, Valtakunnallinen tieliikenne-ennuste 2030, 2014, s. 45-53, (viitattu 28.8.2019), Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2014-13_valtakunnallinen_tieliikenne-ennuste_web.pdf.

[97] Sähköinen liikenne Suomessa, 2016, s. 38-39, Saatavissa: <https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/S%C3%A4hk%C3%B6inen%20Liikenne%202011%20-%202016.pdf>.

[98] Christine Widmann, Daniel Lödige, Ajit Toradmal, Bernd Thomas, Enabling CHP units for electricity production on demand by smart management of the thermal energy storage, 2016, Saatavissa: https://ac-els-cdn-com.lib-proxy.tuni.fi/S1359431116314193/1-s2.0-S1359431116314193-main.pdf?_tid=e0866ca0-df7b-41fe-904d-7436bba51484&ac-dnat=1549476302_75303ca33349086a04489ae92c4eebdd.

[99] Antti Mutanen, Kimmo Lummi, Pertti Järventausta, Valtakunnallisten tyyppikäyttäjämäärittelyiden päivittäminen ja hyödyntämisen periaatteet verkkopalvelumaksuihin liittyvissä tarkasteluissa, Tampereen yliopisto, 2019, s. 1-36, (viitattu 28.8.2019), Saatavissa: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahU-KEwi4u-uPkKXkAhXQIYsKHbGbBtMQFjACegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fenergiavirasto.fi%2Fdocuments%2F11120570%2F12862527%2FLoppuraportti-verkkotoi>

[minta-Tyypikayttajat-2019.pdf%2F585042fc-c377-09bb-5e4d-b330a6dfa1bb%2FLop-puraportti-verkkotoiminta-Tyypikayttajat-2019.pdf.pdf&usg=AOvVaw2uR5nxlpbsvC-UHTwCKxC.](#)

[100] Google, Popular times, wait times, and visit duration, 2019, (viitattu 28.8.2019), Saatavissa: <https://support.google.com/business/answer/6263531?hl=en>.

[101] Kirsti Jylhä, Targo Kalamees, Hanna Tietäväinen, REFI-A Kimmo Ruosteenoja, Juha Jokisalo, Reijo Hyvönen, Simo Ilomets, Seppo Saku, Asko Huttila, Rakennusten energianlaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista, Ilmatieteen laitos, 2011, (viitattu 28.8.2019), Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/33069/2011nro6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

[102] Energialaskennan testivuosi tuntiaineisto, vyöhykkeet I ja II, Ilmatieteen laitos, 2011, (viitattu 28.8.2019), Saatavissa: https://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=10e5d4a5-72cc-4755-8cd3-1b60328dfce6&groupId=30106.

[103] Vantaan Energia Oy, Kaukolämmön liittymishinnasto, (viitattu 26.6.2019), Saatavissa: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/vantaanenergia/uploads/20171220132059/KL-liittymishinnasto_01.01.2018_alkaen.pdf.

[104] Caruna Espoo Oy, Liittymismaksuhinnasto, 2014, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: https://images.caruna.fi/liittymismaksuhinnasto_caruna-espoo-oy_1.4.2018_web.pdf?ltUEc8S8zTNxch1cgoubPqM2PvpTJSS9.

[105] Suomen Kaasuenergia, Kaasun hinnat teollisuudelle, 2019, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: <https://suomenkaasuenergia.fi/tuotteet-ja-palvelut/hinnasto-teollisuudelle/>.

[106] Virta, Virta Public packages, 2019, (viitattu 20.8.2019), Saatavissa: https://www.virta.global/ev-charging-points/pricing?_hstc=51530422.71836a9cca9d69cc3df8b9adc3c7fd7b.1566304900393.1566304900393.1566304900393.1&_hssc=51530422.1.1566304900393&_hsfp=2149722629&hsutk=71836a9cca9d69cc3df8b9adc3c7fd7b.

[107] Nord Pool, Historical Market Data - Elspot Prices in EUR/MWh, 2018, (viitattu 26.8.2019), Saatavissa: https://www.nordpoolgroup.com/globalassets/marketdata-excel-files/elspot-prices_2018_hourly_eur.xls.

[108] Vantaan Energia Oy, Kaukolämmön myyntihinnasto, 2019, (viitattu 26.6.2019), Saatavissa: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/vantaanenergia/uploads/20190527114026/Kaukol%C3%A4mm%C3%B6n_myyntihinnasto_01072019.pdf.

[109] Gasum, Maa- ja biokaasun hinnat tankkausasemilla, 2019, (viitattu 28.8.2019), Saatavissa: <https://www.gasum.com/yksityisille/tankkaa-kaasua/tankkaushinnat/>.

[110] Caruna, Sähköntuotannon verkkopalvelu- ja liittymismaksuhinnasto jakeluverkossa, 2019, (viitattu 26.8.2019), Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=2ahUKEwiK_4-wwbbkAhVc6qYKHTcSAR0QFjAEegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fimages.caruna.fi%2Fsahkontuotannon_verkkopalvelu- ja_liittymismaksuhinnasto_jakelu-verkossa_1.1.2019.pdf%3F86KqOrs7s6nu2.FAKrwmjnK588NLgVBG&usg=AOv-Vaw0dWrwJnKsNskAKzgs9YcPd.

[111] Vantaan Energia Oy, Hukkalämmön ehdot ja hinnat, (viitattu 26.6.2019), Saatavissa: <https://www.vantaanenergia.fi/lampo/myy-hukkalampo-eteenpain-avoimeen-kaukolampoverkkoomme/hukkalammon-ehdot-ja-hinnat/>.

[112] Caruna Espoo Oy, Verkkopalveluhinnasto, 2018, (viitattu 26.8.2019), Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=2ahUKEwiG9vXwlsvkAhVmyqYKHW01DGEQFjAEegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fimages.caruna.fi%2Fverkkopalveluhinnasto_caruna-oy_1.7.2018_web.pdf%3FpAyl.7xmKIGqt3PDPKpj3e4PQu1VEWE&usg=AOv-Vaw2WMsgtLrK2aYRMAPAOwhIW.

[113] Statistics Finland, Energy in Finland, Statistics Finland, 2016, s. 36, Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/yene_efp_201600_2016_15894_net.pdf.

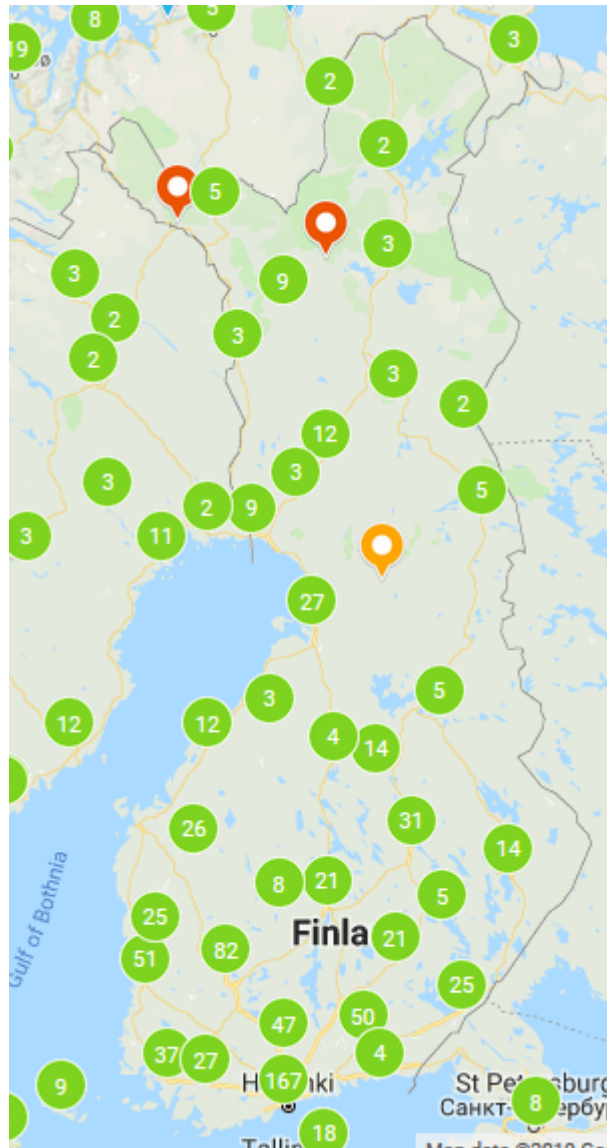
LIITE 1: KAASUMAISTEN POLTTOAINEIDEN KOOSTUMUKSET JA OMINAISUUDET

*Taulukko 1. Kaasumaisten polttoaineiden koostumukset ja ominaisuudet.
Koottu lähteistä [10, 14, 29, 113].*

Kaasu	Maakaasu	LNG (Norja)	Biokaasu (raaka reaktori- kaasu)	Jalostettu biokaasu	Nestekaasu
Koostumus					
Metaani CH₄	98 %	92,03 %	45...75 %	95...99 %	-
Etaani C₂H₆	0,8 %	5,75 %	0	0	-
Propaani C₃H₈	0,2 %	1,31 %	0	0	~100 %
Butaani C₄H₁₀	0,02 %	0,45 % (C ₄ -hii- livedyt)	0	0	-
Typpi N₂	0,9 %	0,46 %	0...2 %	0...4 %	-
Hiilidiok- sidi CO₂	0,1 %	0	20...55 %	1...5 %	-
Hiilimonok- sidi CO	-	-	0...0,2 %	-	-
Rikkivety H₂S	-	-	< 0,8 %	-	-
Happi O₂	-	-	0...1 %	<1 %	-
Vety H₂	-	-	0...0,5 %	-	-
Ominaisuudet					
Tiheys	0,72 kg/m ³	0,78 kg/m ³ (kaasu) 448,39 kg/m ³ (LNG)	-	-	510 kg/m ³ (neste)
Ylempi lämpöarvo (kalorimet- rinen)	55,3 MJ/kg 39,8 MJ/m ³ n	42,69 MJ/m ³ n	-	-	-

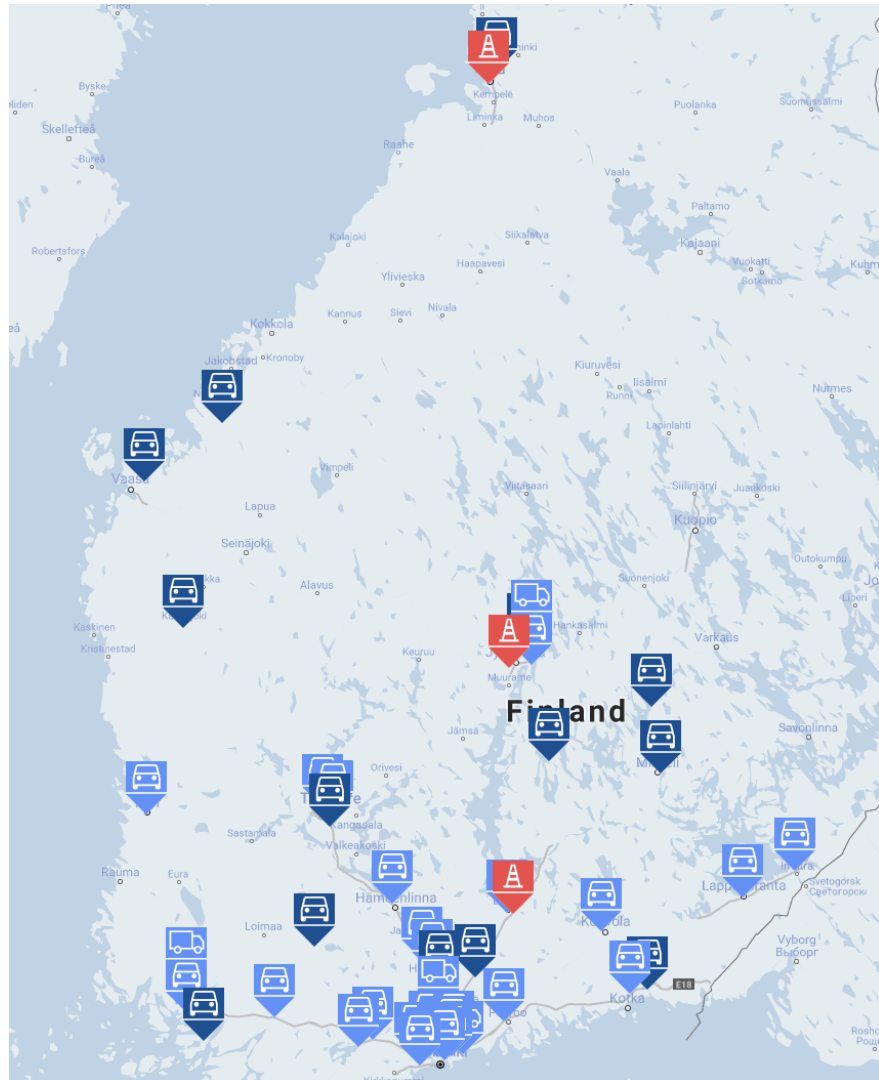
Alempi lämpöarvo (tehollinen)	50,0 MJ/kg 36,0 MJ/m ³ n	-	20...30 MJ/m ³ n (puhdistettu biokaasu)	50,0 MJ/kg 34...36 MJ/m ³ n	46,3 MJ/kg 12,9 kWh/kg
--	---	---	---	--	---------------------------

LIITE 2: JULKISET SÄHKÖAJONEUVOJEN LA- TAUSPISTEET SUOMESSA



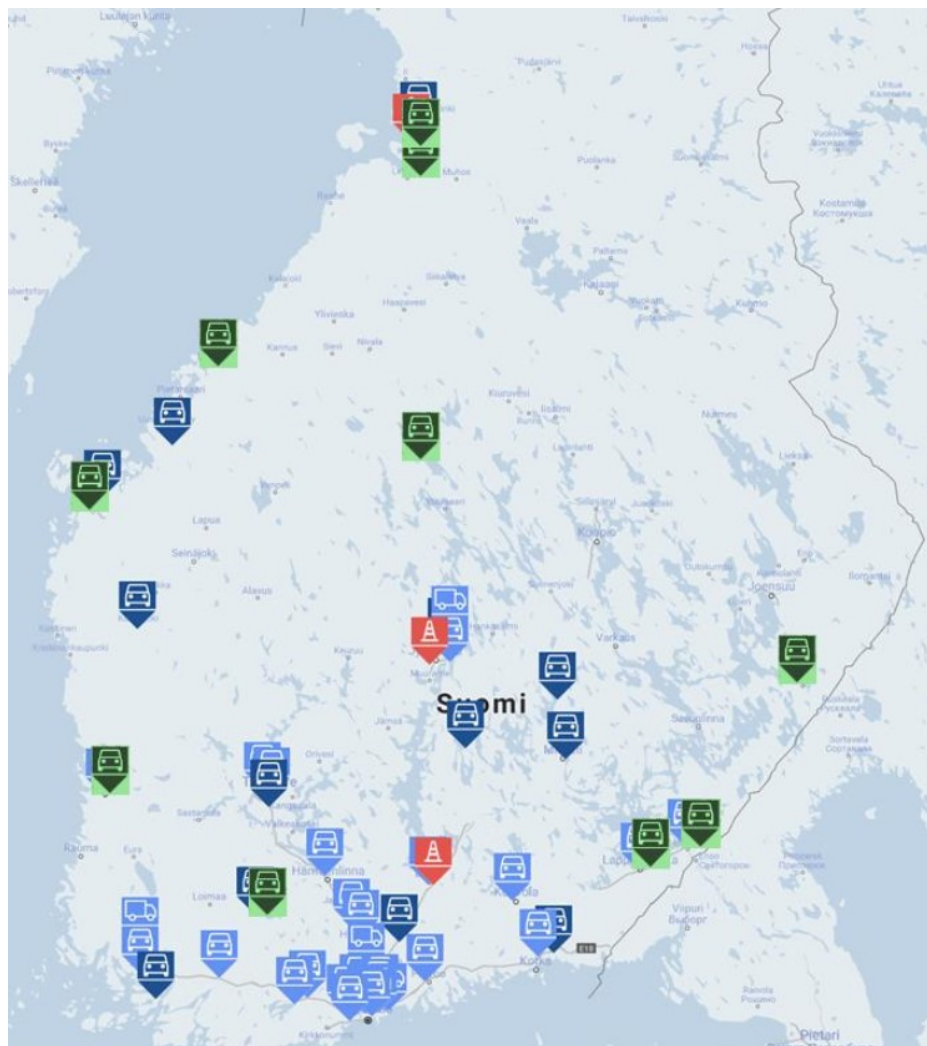
Kuva 1. Julkiset sähköajoneuvojen latauspisteet Suomessa. [54]

LIITE 3: JULKISET KAASUTANKKAUSASEMAT SUOMESSA



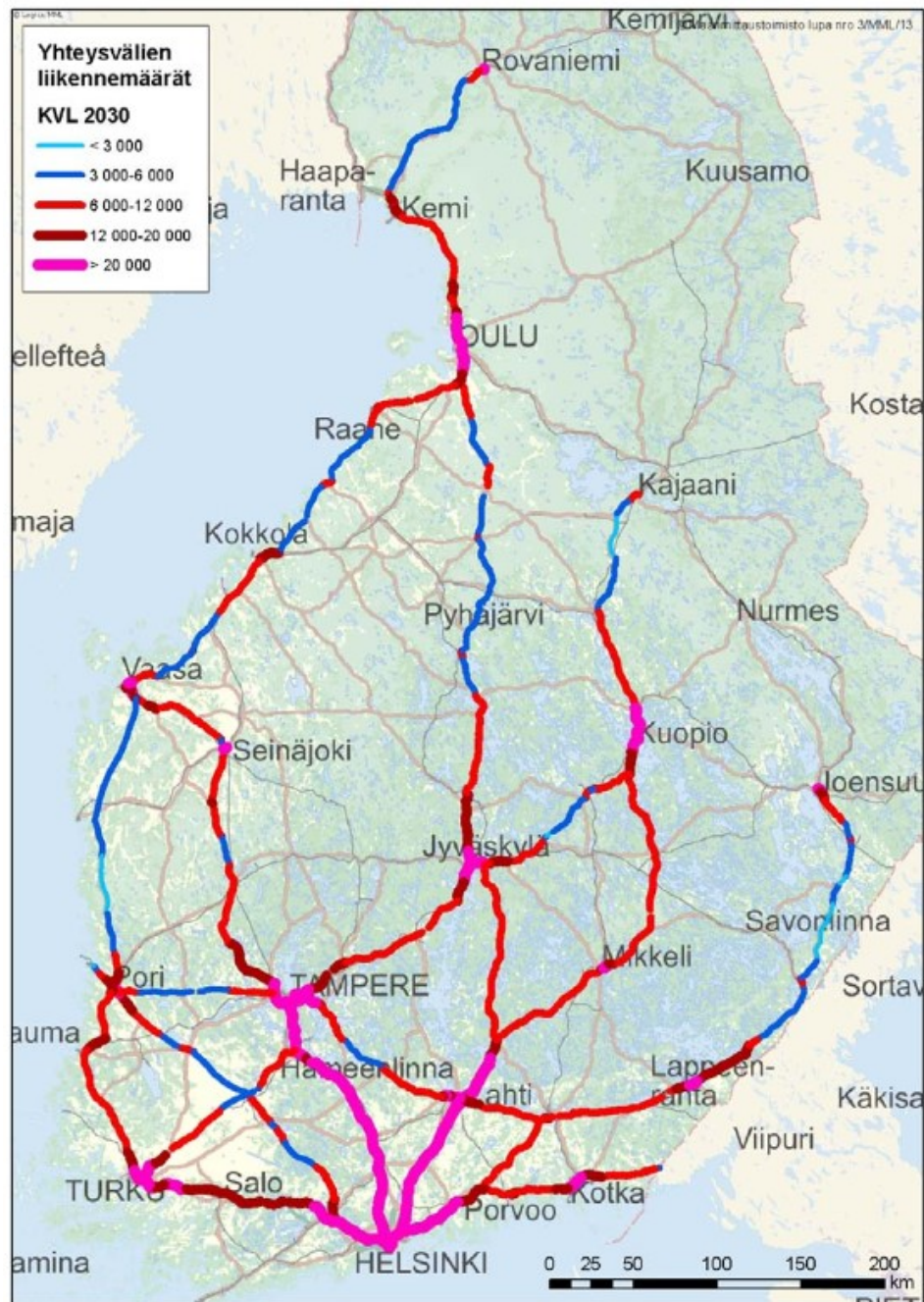
Kuva 1. Julkiset maa- ja biokaasutankkausasemat Suomessa. [62]

LIITE 4: ENERGIIVIRASTON ENSIMMÄISEN TUKI-KIERROKSEN JÄLKEEN SUOMESSA OLEVAT JA TULEVAT JULKISET KAASUTANKKAUS-PISTEET



Kuva 1. Energiaviraston ensimmäisen tukikierron jälkeen Suomessa olevat ja tulevat julkiset kaasutankkauspiisteet. [94]

LIITE 5: TÄRKEIMPIEN VALTATEIDEN ENNUSTETUT LIIKENNEMÄÄRÄT VUONNA 2030



Kuva 1. Tärkeimpien valtateiden ennustetut liikennemäärät vuonna 2030 kevyen liikenteen osalta. [96]



Kuva 2. Tärkeimpien valtateiden ennustetut liikennemäärät vuonna 2030 raskaan liikenteen osalta. [96]

LIITE 6: SÄHKÖAJONEUVOJEN LEVINNEISYYS



Kuva 1. Sähköajoneuvojen levinneisyys. [97]