



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# HAJAUTETTU SÄHKÖNTUOTANTO MIKRO- VERKKOYMPÄRISTÖSSÄ

Laura Aarnio

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2017  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka



# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

AARNIO, LAURA:

Hajautettu sähköntuotanto mikroverkkoympäristössä

Opinnäytetyö 55 sivua  
Toukokuu 2017

---

Tämä työ tehtiin Lempäälän Lämpö Oy:lle, joka on sataprosenttisesti Lempäälän kunnan omistama yhtiö. Opinnäytetyö on osa Energiaomavarainen Lempäälä -hanketta, jonka tarkoituksena on edistää kestävästä kehitystä ja luoda uusia tapoja uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämiseen. Rakenteilla oleva Marjamäen yritysalue tulee olemaan pilotti uudesta toimintamallista. Alueelle suunnitellaan uudenlaista energiayhteisöä, jossa huoltovarmuus on taattu.

Marjamäen yritysalue on kokonaisaltaan noin 300 hehtaaria, ja se sijaitsee Tampere-Helsinki-moottoritien varressa. Alueelle on suunniteltu uudenlainen sähköntuotantojärjestelmä, jossa tullaan hyödyntämään hajautettua sähköntuotantoa erilaisista energianlähteistä. Pääasialliset energianlähteet tulevat olemaan aurinko sekä maa- ja biokaasu sekä käytettäviä teknologioita ovat aurinkopaneelit, polttokennot, akustot ja kaasumoottorit. Kokonaisuus muodostaa älykkään mikroverkon, joka voi toimia itsenäisesti saarekkeena tai osana valtakunnallista sähköjakeluverkkoa.

Järjestelmän teknologioiden mitoittamista varten tehtiin laskentamalli ja esimerkkikohteena laskennassa käytettiin Lempäälän jäähallia. Aurinkopaneelien huipunkäyttöaikana käytettiin 808 tuntia, mutta huomattiin myös, ettei huipunkäyttöajan muuttumisella 100 tunnilla suuntaan tai toiseen ollut juurikaan merkitystä kokonaisuuden kannalta. Oleellista mitoittamisessa oli, että ylituotanto pysyy pienenä. Tällä hetkellä ylituotannon seurauksena syntyneen sähköön myyminen ei ole kannattavaa. Mitoittaminen oli helpointa tehdä sellaiseen kohteeseen, jonka sähkönkulutus pysyy melko vakiona ajankohdasta riippumatta.

Mikroverkot tulevat yleistymään, ja ne tuovat mukanaan haasteita, koska niitä koskevaa ohjeistusta ja sääntelyä ei vielä ole. Tällaisesta energiayhteisöstä tulee luoda selkeä kokonaiskonsepti, jotta toiminta on mahdollisimman yksinkertaista kaikille osapuolille. Tuotanto tuodaan lähelle asiakasta, ja tuotantoyksiköt ovat pieniä. Mikroverkossa asiakkaan on mahdollista itse olla aktiivinen ja osallistua kysynnänjoustoon tai energian tuotantoon esimerkiksi omilla aurinkopaneeleilla. Osa teknologiasta on vielä hyvin kallista, ja verkon käyttäytyminen on erilaista kuin perinteisen sähköverkon. Jakeluverkkoyhtiöiden ja mikroverkkojen haltijoiden tulee tehdä yhteistyötä sopivien toimintamallien ja vastuunjaon löytämiseksi. Parhaimmillaan järjestelmällä pystytään takaamaan sähköön saataavuus joka tilanteessa ympäristöystävällisesti ja energiatehokkaasti.

---

Asiasanat: aurinkopaneelit, kaasumoottori, polttokenno, akusto, mikroverkko

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

AARNIO, LAURA:

Distributed energy production in a microgrid environment

Bachelor's thesis 55 pages

May 2017

---

Distributed energy production of renewable energy sources is becoming common. A new kind of energy production that creates microgrid areas, which is energy self-sufficient is needed. The current Electricity Act, however, does not allow such microgrid.

The purpose of this thesis was to study microgrids and to calculate energy production to size energy production units for this kind of system. The system consists of a solar photovoltaic system, gas motors, fuel cells and battery. The main energy sources will be the sun, biogas and natural gas. The theoretical section explores these different technologies. All the technologies need to be cost-effectively sized and for that calculations were needed.

The research suggests that some of the technology are still very expensive. The current regulations do not permit the development of microgrid because of insufficient instructions. There is a need to create pellucid concept of this kind of energy community. That way operation will be as simple as possible for everyone. Energy production is brought close to the customer and production units are small. Micro grid enables the customer to be active and participate demand response business or production of energy for example with own solar panels. The bearers of distribution network and micro grid should cooperate to find proper operations models and sharing of responsibilities. The findings indicate that in the best-case scenario the system can provide environment friendly and energy efficient electricity for the customers in all circumstances.

---

Key words: solar panels, gas motor, fuel cell, battery, micro grid

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SUUNNITELTAVA JÄRJESTELMÄ .....	7
2.1	Suunnittelun lähtökohta .....	7
2.2	Järjestelmän sähköntuotantotavat .....	8
2.3	Cleantech-teknologiat .....	9
3	AURINKOPANEELIKENTTÄ.....	11
3.1	Toimintaperiaate .....	11
3.2	Sähköntuotanto erilaisissa sääoloissa .....	12
3.3	Huolto ja kunnossapito .....	13
4	AKKU .....	14
4.1	Teho- ja energia-akku .....	14
4.2	Akun hyöty .....	14
4.3	Huolto ja kunnossapito .....	15
4.4	Mahdollisuudet sähköverkon kannalta .....	16
5	KAASUMOOTTORI .....	17
5.1	Kaasulla tuotettu energia .....	17
5.2	Kaasuverkot ja biokaasu .....	18
6	POLTTOKENNO.....	20
6.1	Erilaiset polttokennot.....	20
6.2	Polttokennon toiminta.....	21
6.3	SOFC eli kiinteäoksidipolttokenno.....	22
6.4	Huolto ja kunnossapito .....	22
6.5	Tulevaisuudessa vetytalouden mahdollisuus .....	23
7	MIKROVERKKO .....	25
7.1	Määritelmä .....	25
7.2	Mikroverkon haasteet .....	26
8	JÄRJESTELÄN TOIMINTA JA MITOITUS .....	27
8.1	Järjestelmän mitoittaminen .....	27
8.2	Lempäälän jäähallin sähkönkulutus.....	28
8.3	Jäähallille mitoitettu järjestelmä .....	29
8.4	Sähköntuotanto tuntitasolla.....	33
8.5	Sähköntuotanto vuositason tasolla .....	35
8.6	Sähköntuotanto teknologiakohtaisesti .....	38
8.7	Sähköntuotanto eri vuodenaikoina.....	43
9	SÄHKÖMARKKINAT.....	46
9.1	Markkinoihin vaikuttavat tekijät.....	46

9.2 Sähkömarkkinoiden murros .....	48
9.3 Kysyntäjousto .....	49
10 POHDINTA.....	50
LÄHTEET .....	54

## 1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa energiankulutus tulee kasvamaan ja ilmasto lämpenee. Suomessa on suljettu useita suuria säätövoimaloita, joten kulutushuippujen aikana sähköä tuodaan ulkomailta. Sähköntuotannon omavaraisuusastetta tulee lisätä ja yksi mahdollisuus on mikroverkot ja hajautettu sähköntuotanto.

Lempäälään Marjamäen teollisuusalueelle tullaan rakentamaan älykäs ja energiaomavarainen toimintaympäristö, jossa pyritään hyödyntämään uusiutuvia energialähteitä, vaihtoehtoisia sähköenergian tuotantomenetelmiä ja viimeisimpiä alan teknologioita. Alueen tavoitteena on olla kestävä kehityksen mukainen. Pääasiallisina energialähteinä tullaan käyttämään aurinkoenergiaa ja kaasumaisia energialähteitä, kuten biokaasua.

Megawatti-kokoluokan aurinkopaneelikenttä sijoitetaan teollisuusalueen välittömään läheisyyteen. Aurinkopaneelikentän yhteyteen sijoitetaan keskitetty energiavarasto tasamaan tuotannon heilahteluja ja varmistamaan alueen tehotasapainoa.

Kaasumaisista energialähteistä jalostetaan yhteistuotannolla sähkö- ja lämpöenergiaa, jotka hyödynnetään alueen sähkö- ja kaukolämpöverkoissa. Yhteistuotannossa käytettävät tekniikat koostuvat kaasumootoreista ja polttokennoratkaisuista. Poltekennotekniikan hyödyntämisellä luodaan myös pohjaa Power to Gas -hankkeelle, jonka perusajatuksena on sähkön pitkäaikainen varastointi kaasumaiseen muotoon.

Marjamäen alueesta rakennetaan energiaomavarainen saareke. Näin valtakunnan sähköverkon ongelmat eivät juurikaan vaikuta alueeseen ja tuotanto/kulutus on helppo mitoitaa keskenään yhtä suuriksi. Alueelle tulee oma valvomo, josta hallinnoidaan automaattikka ja tarkkaillaan järjestelmän toimintaa. Mikroverkot ovat vielä harvinaisia Suomessa, joten Marjamäki on tärkeä pilottikohde saarekkeiden kehittämisessä ja sääntelyn luomisessa.

Tämä työ käsittelee Marjamäen alueella tulevia erilaisia teknologioita ja niiden mitoittamista. Työhön liittyen on tehty laskentamalli tuotantoyksiköiden sähkötehon mitoittamiseen liittyen tuntisarjaperusteisesti. Laskennassa käytetään esimerkkinä Lempäälän jäähallia.

## 2 SUUNNITELTAVA JÄRJESTELMÄ

### 2.1 Suunnittelun lähtökohta

Tässä työssä mitoitetaan sopivan kokoinen järjestelmä Lempäälän jäähallille. Mitoitusta varten suunnitteellaan laskentamalli, joka sisältää kaikki käytettävät teknologiat. Jäähallin sähkönkulutusprofiili on tiedossa tuntitasolla ja työssä käytetään vuoden 2015 tietoja pohjana sähköntuotannon suunnittelussa ja järjestelmän mitoittamisessa. Jäähallille suunniteltu pienempi malli on skaalautuva, joten sitä voidaan käyttää apuna suunniteltaessa Marjamäen yritysalueelle tulevaa vastaavanlaista järjestelmää.

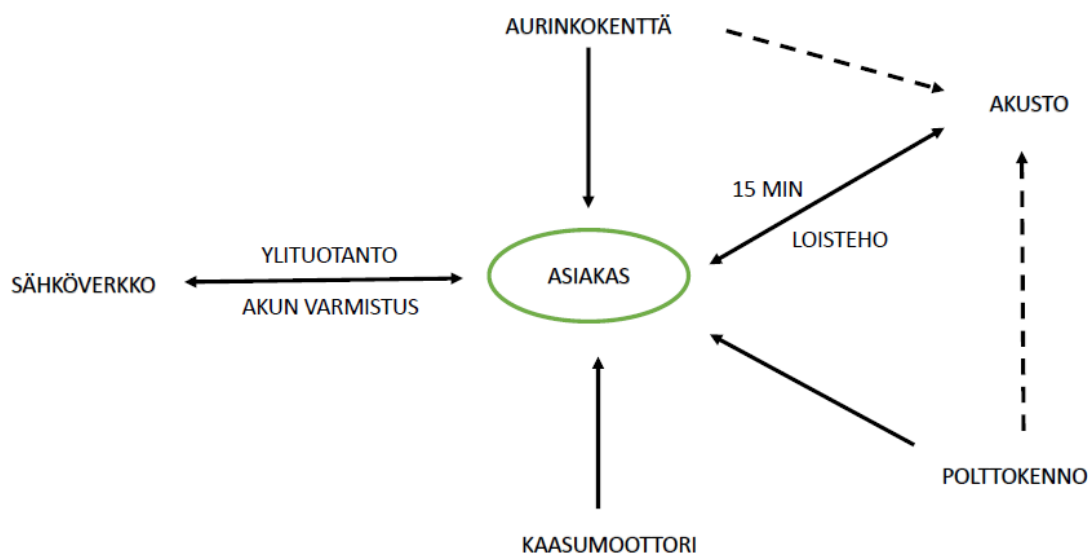
Järjestelmän suunnittelulle ja rakentamiselle on monta syytä, sen avulla halutaan parantaa alueen yritysten kilpailukykyä ja edistää ympäristöystävällisiä energiantuotantotapoja. Järjestelmä tekee alueesta ainakin osittain energiaomavaraisen, joten esimerkiksi valtakunnan sähkönjakeluverkon häiriötilanteissa Marjamäen alueella on sähköt päällä ja toiminta voi jatkua normaalisti. Tulevaisuudessa fossiilisten polttoaineiden varastot ehtyvät ja hinnat kallistuvat, tästä syystä on järkevää kehittää vaihtoehtoisia tapoja sähköntuotantoon. Uusiutuvia energianlähteitä käyttämällä vähennetään hiilidioksidipäästöjä ja hidastetaan ilmastonmuutosta.

Energiaomavarainen järjestelmä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi vuositasolla tuotetaan yhtä paljon energiaa kuin kulutetaan, mutta joinain ajanhetkinä energiaa saatetaan ottaa myös järjestelmän ulkopuolisesta sähköverkosta. Teho-omavarainen järjestelmä taas on sellainen, joka pystyy tuottamaan kulutetun sähköenergian joka hetki, myös suurien tehopiikkien aikana.

Täysin teho-omavaraisen mallin suunnittelu on haastavaa. Sitä varten tulisi olla tiedossa tarkat sähkönkulutusprofiilit pitkältä ajalta ja kulutuksen tulisi pysyä samankaltaisena myös jatkossa. Jos kulutus vaihtelee suuresti eri vuosien välillä, järjestelmä täytyisi mitoitaa korkeimman kulutuksen mukaan ja vähemmän kuluttavana aikana kokoluokka saattaisi olla liian suuri. Edellisen kaltainen suunnittelu ei tuota taloudellisesti järkevää lopputulosta. Tästä syystä päädyttiin siihen, että tässä vaiheessa suunniteltava järjestelmä on suuren osan ajasta energiaomavarainen ja omavaraisuutta tullaan lisäämään tulevaisuudessa.

## 2.2 Järjestelmän sähköntuotantotavat

Suunniteltavassa järjestelmässä on viisi eri lähdettä sähkölle. Järjestelmään kuuluu aurinkopaneelikenttä, akusto, polttokenno, kaasumoottori ja valtakunnan sähkönjakeluverkko. Automaatio hoitaa järjestelmän ohjaamisen ja huolehtii, että sähköä on riittävästi saatavilla. Järjestelmä pyritään suunnittelemaan siten, että ylituotantoa syntyy mahdollisimman vähän. Kuvassa 1 on esitetty järjestelmäkokonaisuus.



**KUVA 1. Järjestelmäkokonaisuus**

Aurinkopaneelikenttä on järjestelmän ensimmäinen osa. Kaikki aurinkosähkö käytetään itse aina sen ollessa mahdollista, koska sähkön myynnistä valtakunnan sähköverkkoon saatavat tulot ovat tällä hetkellä hyvin pienet. Aurinkosähköllä on vain alkuinvestointikulut ja tämän jälkeen sähköntuotannon polttoaine, eli aurinko, ei maksa mitään. Ylituotantotilanteessa kulutuksen jälkeen jäljelle jäävä sähköenergia ladataan akustoon. Jos akusto on täynnä, aurinkosähkön ylituotanto myydään eteenpäin sähköverkkoon.

Akuston koko mietitään aurinkopaneelikentän koon mukaan. Aurinkopaneelien sähköntuotanto voi heilahdella monta kymmentä prosenttia vain sekunneissa. Akustolla tasataan heilahteluja siten, että se ei näy asiakkaalle. Toinen akuston tärkeä tehtävä on toimia varavoimalähteenä sen aikaa, kun kaasumoottorit käynnistyvät. Järjestelmän akusto on sellainen, että sen sisältämä energia saadaan purettua 15 minuutin kuluessa suurella piikkiteholla. Akustolla on tarkoitus lisätä myös aurinkosähköstä saatavaa hyötyä. Akuston rin-



nalle aurinkopaneelientän heilahteluja tasaamaan on mietitty myös superkondensaattoreita. Kondensaattorit hoitaisivat nopeat ja lyhytkestoiset sähköntuotannon laskusta johtuvat piikit, näin akusto ei joudu liian koville ja käyttöikä pidentyy.

Järjestelmässä käytetään korkean lämpötilan vaativia SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) eli kiinteäoksidipolttokennoja. Polttokenno on perustuotantoyksikkö eli koko ajan päällä vähintään 50 % teholla, koska jäähtyminen ja uudelleen lämpeneminen kestää kauan. Polttokennoa säädetään tarpeen mukaan ylöspäin 50 %:sta. Polttokennon sähköenergian ylituotannolla ladataan akustoa, jos akusto ei ole täynnä. Ylituotanto, jota ei voida hyödyntää akun lataamisessa, myydään valtakunnan sähköverkkoon. Polttokenno tuottaa myös lämpöä, joten energiatehokkuuden kannalta on järkevää hyödyntää myös lämpö. Tässä järjestelmässä lämpö ohjataan kaukolämpöverkkoon ja sitä kautta asiakkaille. Kesällä lämmitystarve on vähäisempää kuin talvella mutta jäähdytystarve kasvaa. Kaukokylmän tuottaminen asiakkaille on myös mahdollista. Jos aurinkosähköä on riittävästi, voidaan miettiä polttokennon sammuttamista esimerkiksi kesä- ja heinäkuuksi. Näin voidaan välttyä kesäaikana suurelta ylituotannolta ja samalla voidaan suorittaa tarvittavat huoltotoimenpiteet.

Jos aurinkopaneelientän sähköntuotanto, akusto ja polttokenno eivät riitä kohteen sähkönkulutuksen kattamiseen, käynnistetään kaasumoottori. Esimerkiksi 100 kW kaasumoottorin käynnistyminen kestää joitakin kymmeniä sekunteja. Aikaa käynnistymiselle ja verkkoon tahdistumiselle on varattu 15 minuuttia, jolloin akusto huolehtii sähkön riittävydestä. Kaasumoottoria käytetään vähintään 50 %:n teholla.

### **2.3 Cleantech-teknologiat**

Kaikki käytettävät teknologiat ovat niin kutsuttuja cleantech-teknologioita eli ”puhdasta teknologiaa”. Teknologiat ovat siis ympäristöystävällisiä ja edistävät luonnonvarojen kestäväää käyttöä. Sitran julkaisun ”Cleantech-teknologiat lisäävät työllisyyttä ja parantavat vaihtotasetta” mukaan cleantech-ratkaisujen käyttö energiasektorilla parantaa vaihtotasetta, lisää työpaikkoja ja vähentää päästöjä.

	T&K		DEMONSTRAATIO		ESI- KAUPALLINEN	TUETTU KAUPALLINEN	KAUPALLINEN
	Perus- tutkimus	Soveltava tutkimus	Prototyypit	Toimivat laitteet	Ensimmäiset kaupalliset sovellukset	Kaupallinen käyttöön- otto kohdistetu- in tukimekanisme- in	Kilpailukykyinen ilman tukia
ENERGIAN- TUOTANTO JA ENERGIAN- TUOTANNON POLTTOAINEET		Geoterminen lämpö	Polttokennot Biohiili	Merituulivoima Pientuulivoima Pyrolyysiöljy		Aurinkosähkö Aurinkolämpö Biometaani	Vesivoima Kaasumoottorit Biomassakattilat
ENERGIA- TEHOKKUUS JA KULUTUS				Kotitalouksien ja PK-sektorin kysyntäjousto (sähkö)		Energiatehokas korjausrakentaminen Teollisuuden kysyntäjousto (sähkö)	Lämpöpumput Lämmön talteenotto LED-lamput
ENERGIAN VARASTOINTI			Power to gas	Faasimuutosvarastot		Sähköakut Vesivarastot kaukolämpöjärjestelmässä	Pumppuvoimalat
LIIKENNE JA LIIKENTEEN POLTTOAINEET	MaaS			Dual-fuel, RCCI Vesielektrolyysi (vety) Vetyautojen tankkaus	Sähköautojen lataus Biodiesel	Bioetanoli Biometaani	

**KUVA 2. Cleantech-teknologioiden kehitysasteet (mukaillen Sitra 2016, 4.)**

Kuvasta 2 nähdään eri teknologioiden kehitysasteet. Järjestelmässä käytettävät teknologiat on korostettu keltaisella. Sitran julkaisun mukaan polttokennot ovat vielä demonstraatioasteella. Siitä huolimatta järjestelmän yksi osa on polttokennot, koska niiden kehitystä halutaan tukea ja viedä eteenpäin. Muut käytettävät teknologiat ovat kilpailukykyisiä ilman tukea tai kaupallisesti käyttöönotettavissa kohdistetu- in tukimekanisme- in.

### 3 AURINKOPANEELIKENTTÄ

#### 3.1 Toimintaperiaate

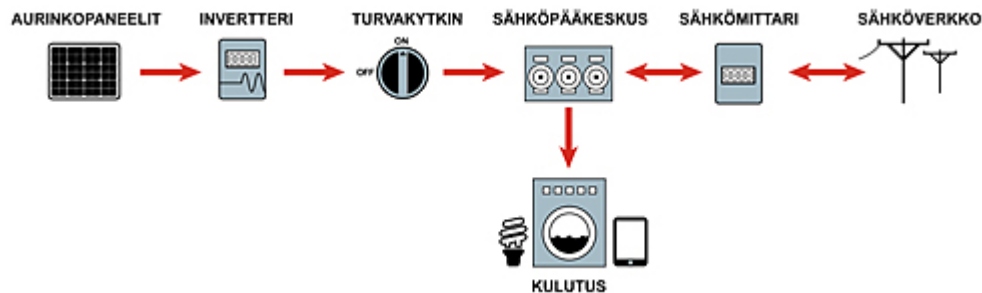
Auringon energiantuotanto perustuu ytimessä tapahtuvaan fuusioreaktioon, jossa vety fuusioituu heliumiksi. Fuusioreaktio vaatii korkean lämpötilan, auringon sisälämpötila on noin 10 miljoonaa astetta. Aurinko säteilee fuusioreaktiossa vapautuvaa energiaa ympäristöönsä ja osa säteilystä saavuttaa maan. (Korpela 2014, 5)

Sähkön tuotanto aurinkokennojen avulla perustuu valosähköiseen ilmiöön. Yleisin kennojen valmistusmateriaali on yksi-, monikiteinen tai amorfinen pii. Aurinkokenno on puolijohdekomponentti, joka valmistetaan kahdesta erilaisesta, p- ja n-tyypin, puolijohdeesta. Useimmiten p-tyypin puolijohde on boorilla seostettua piitä ja n-tyypin puolijohde fosforilla seostettua piitä. Piin seostaminen eri aineilla aiheuttaa kennoon positiivisen ja negatiivisen varauksen pn-liitoksen eri puolille. Varauksen ansiosta pn-liitokseen syntyy sisäinen sähkökenttä, joka toimii auringonsäteilyn virittämiä varauksia erottelevana rakenteena. Kyseessä on laite, joka muuntaa auringon säteilyenergiaa tasasähköksi. (Korpela 2014, 41–42)

Perinteinen piiaurinkopaneeli koostuu sarjaan kytketyistä yksittäisistä aurinkokennoista. Yhden paneelin nimellisteho vaihtelee tavallisesti 200-330 Wp välillä ja hyötysuhde on 15 % luokkaa (Tahkokorpi 2016, 137). Wp (Watt-peak) on aurinkopaneelien nimellistehon yksikkö, joka kertoo kuinka paljon aurinkopaneeli tuottaa sähköä olosuhteissa, joissa lämpötila on +25 °C astetta, auringon säteilyn osuu paneeliin 35° kulmassa ja auringon säteilyteho on 1000 W/m<sup>2</sup>. Tulevaisuudessa ohutkalvopaneelit tulevat yleistymään. Ohutkalvopaneelit ovat hyvin ohuita, taipuisia ja niitä pidetään myös piipaneeleja kestävämpinä.

Aurinkosähköjärjestelmä koostuu yksinkertaisesti aurinkopaneeleista ja invertteristä eli vaihtosuuntaajasta. Invertterin tehtävä on muuttaa tasasähkö vaihtosähköksi. Invertterin jälkeen järjestelmässä on turvakytin, joka mahdollistaa aurinkosähköjärjestelmän erottamisen verkosta. Sähkömittari mittaa, kuinka paljon sähköverkosta otetaan sähköä ja yli-

tuotantotilanteissa, kuinka paljon sähköä syötetään verkkoon. Kuvassa 3 on pientalon aurinkosähköjärjestelmän rakenne. Isompi järjestelmä toimii samanlaisella periaatteella. (Motiva 2016)



**KUVA 3. Verkkoon kytketyn pientalon aurinkosähköjärjestelmän kokoonpano (Motiva 2016).**

### 3.2 Sähköntuotanto erilaisissa sääoloissa

Suomessa aurinkopaneelit tuottavat sähköä vain osan aikaa vuodesta. Kesällä aurinkopaneelit tuottavat sähköä parhaiten, koska päivät ovat pitkiä ja aurinko paistaa hyvästä kulmasta. Talvella tuotanto on lähellä nollaa, koska päivät ovat lyhyitä ja aurinko paistaa matalalta tai esimerkiksi Lapissa ei ollenkaan.

Käytetään esimerkkinä 5 kWp aurinkosähköjärjestelmää ja arvioidaan aurinkopaneelien sähköntuotantoa erilaisina päivinä. Jani Vesan opinnäytetyössä on tehty aurinkosähkön tuotannon tuntitason ennustamista ja lopputuloksia on käytetty pohjana laskennalle tässä työssä. Kesällä hyvänä päivänä auringosta voidaan saada energiaa klo 6-22 välisenä aikana eli 16 tunnin ajan. Jos aurinko paistaa koko päivän kirkkaalta taivaalta, järjestelmä tuottaa sähköenergiaa korkeintaan 35 kWh. Vastaavasti erittäin sateisena ja pilvisenä ke-säpäivänä järjestelmän sähköntuotanto jää huomattavasti alhaisemmaksi, noin 6,5 kWh:iin. Talvella aurinkoisena päivänä aurinkosähköenergiaa tuotetaan noin 3 kWh, mutta olosuhteiltaan huonona päivänä tuotanto jää lähelle nollaa. Kesällä ja talvella on siis huomattava ero, ja lisäksi säätila vaikuttaa erittäin merkittävästi päivän sähköntuotantoon.

Järjestelmän huipunkäyttöaika  $t_h$  saadaan yhtälöstä

$$t_h = \frac{W_{an}}{P_{nim}},$$

jossa  $W_{an}$  on aurinkosähköjärjestelmän vuosituotanto (Wh) ja  $P_{nim}$  (W) on aurinkosähköjärjestelmän nimellinen teho.

Suomessa huipunkäyttöaika  $t_h$  on noin 800-1000 h, kun otetaan huomioon järjestelmässä tapahtuvat häviöt. Suure kertoo, kuinka monta tuntia järjestelmän on toimittava nimellistehollaan, jotta saadaan vuoden aikana järjestelmän tuottama energiamäärä. Vastaavasti Lähi-Idässä voidaan päästä jopa 1800 h huipunkäyttöaikaan.

### 3.3 Huolto ja kunnossapito

Aurinkosähköjärjestelmä on lähes huoltovapaa. Lika ja roskat paneelien päällä heikentävät paneelien toimintaa, joten esimerkiksi oksat ja lehdet on hyvä siivota pois. Usein Suomessa aurinkopaneelit asennetaan 40-45 asteen kulmaan, joten asennuskulma ja Suomen sateisuus pitävät yleensä huolen paneelien puhdistuksesta. Talvisin aurinkopaneelien päälle sataa lunta. Lumi estää aurinkopaneeleita toimimasta mutta talvisin ei ole tuotantoa muutenkaan juuri ollenkaan. Aurinkopaneelien puhdistamisessa tulee olla varovainen, sillä paneelit vaurioituvat helposti. Jos paneelin pintaan tulee murtumia, tulee ne paikata vedenpitäväksi välittömästi.

Aurinkopaneelien käyttöikä voi olla jopa 30 vuotta. Invertterin käyttöikä on lyhyempi kuin aurinkopaneelien, jotkin valmistajat antavat vain 5 vuoden takuun. Tahkokorven mukaan hyvälaatuisen invertterin eliniäksi voidaan kuitenkin olettaa yli 20 vuotta. Invertteri joudutaan todennäköisesti vaihtamaan ainakin kerran järjestelmän elinkaaren aikana. Invertterin vaihto on tärkeä huomioida, kun laskee aurinkosähköjärjestelmän kustannuksia ja takaisinmaksuaikaa.

## 4 AKKU

### 4.1 Teho- ja energia-akku

Akut jaetaan kahteen luokkaan, tehoakkuihin ja energia-akkuihin. Tehoakku voidaan purkaa nopeasti suurella piikkiteholla. Energia-akut puretaan pidemmän ajan kuluessa tasaisesti. Akkutyypin valintaan vaikuttaa akun käyttökohde. (Alanen, Koljonen, Hukari & Saari 2003.)

Akku koostuu kennoista. Yhden kennon varaus on joitakin kymmeniä ampeeritunteja. Kennoja ketjutetaan sarjaan tai rinnan, jotta saadaan haluttu jännite ja kapasiteetti akustolle. Rinnan kytkeminen pitää jännitteen saman suuruisena mutta kasvattaa akuston kokonaisvirtaa. Vastaavasti sarjaan kytkeminen pitää virran vakiona mutta kasvattaa jännitettä. Molemmilla tavoilla saadaan kasvatettua akun kapasiteettia.

Teholuokat kertovat akun ominaisuuksista. C-arvosta käy ilmi nopeus, jolla akun voi purkaa suhteessa akun kapasiteettiin. Akun purkunopeus saadaan, kun jaetaan 60 minuuttia C-arvolla ja purkamisessa käytetty virta taas on nimellinen virta kertaa C-arvo. Esimerkiksi 1C tarkoittaa sitä, että akku tyhjenee yhden tunnin aikana tyhjäksi nimellisellä virralla. Vastaavasti 2C-akussa virta on kaksi kertaa nimellinen virta ja purkamiseen kuluva aika on 30 minuuttia. Mitä isompi C-arvo akulla on, sitä nopeammin akun voi purkaa ja hetkellinen piikkiteho on suurempi. (A Guide to Understanding Battery Specifications 2008.)

### 4.2 Akun hyöty

Järjestelmään on valittu litiumioniakku. Andrea Daviden (2010, 1) mukaan litiumioniaakuissa on kaupallisista akuista korkein energiatiheys ja tehotiheys on korkeimpien joukossa. Li-ioniakussa litiumioni liikkuu kahden elektrodin, anodin ja katodin, välillä. Katodi voi olla valmistettu monesta eri aineesta. Akun nimellinen jännite, energia ja tehotiheys riippuvat käytetystä yhdisteestä. Litiumioniakun resistanssi on matala, joten hukkatehoa lämpenemisen kautta ei juurikaan synny. Akun hyötysuhde latauksen näkökulmasta on lähellä 100 %. (Davide 2010, 6-7.)

Jotta akusta saadaan kaikki mahdollinen hyöty, tulee sen olla sähköisesti tasapainossa eli kaikkien kennojen tulee olla yhtä tyhjiä tai täysiä. Akkua ladattaessa latauksen määrää rajoittaa kenno, joka tulee ensimmäisenä täyteen. Vastaavasti akkua purettaessa ensimmäisenä tyhjentynyt kenno määrää, kuinka tyhjäksi akku voidaan purkaa. Kennojen välillä on eroja latauksessa ja purkautumisessa, tästä syystä akku voi mennä epätasapainoon. Ennen kuin akku on tasapainotettu, latausta ja purkamista rajoittava kenno ei ole sama. Tasapainottamisessa kennojen lataukset asetetaan keskenään yhtä suuriksi, samalla kennoista kennoon tapahtuva vuotovirta tasaantuu. Akun tasapainotus mahdollistaa akun koko kapasiteetin ja latauksen hyödyntämisen. (Davide 2010, 23)

Akustolla pystytään lisäämään aurinkosähköjärjestelmästä saatavaa hyötyä, sillä aurinkonpaiste ja sähkönkulutus eivät läheskään aina osu samaan ajankohtaan. Kun aurinko paistaa ja syntyy sähkön ylituotantoa, ylituotanto voidaan ladata akustoon. Akustosta sähkö voidaan hyödyntää sellaisena hetkenä, kun aurinkosähkö ei yksin riitä kattamaan kulutusta. Jos ajatellaan sähköntuotanto ja -kulutusta, akusto kannattaisi liittää jokaiseen aurinkosähköjärjestelmään tasaamaan kysynnän ja tarjonnan eriaikaisuutta. Akustojen yleistymistä hidastaa pääosin taloudelliset syyt.

### 4.3 Huolto ja kunnossapito

Litiumioniakustot tarvitsevat melko vähän huoltamista. Li-ioniakun SOA (safe operating area) eli turvallinen käyttöalue on tarkka. SOA määrittää ylä- ja alarajan jännitteelle, jolla akkua saa ladata. Lataamisen ja purkamisen tulee tapahtua tiettyjen lämpötilarajojen puitteissa. Akkua ei saa purkaa liian suurella virralla tai ladata liian nopeasti. Jos akkua käytetään turvallisen käyttöalueen ulkopuolella, akun elinikä voi lyhentyä, kennot vahingoitua tai pahimmassa tapauksessa akku ylikuumenee. (Davide 2010, 16.)

Isoja akustoja, kuten Helsingissä sijaitsevaa Helen Oy:n 1,2 MW akustoa, ohjataan akuston hallintajärjestelmällä, joka tarkkailee kennoja ja pyrkii estämään esimerkiksi ylijännitteen ja -virran. Akkuteknologia itsessään ei ole uutta mutta akuston ohjaus lataamisen ja purkamisen osalta on merkittävää. Akun käyttöikä on rajallinen, vaikka käyttö olisi ohjeiden mukaista. Monet akustovalmistajat lupaavat akuston toimivan vielä 10 000 lataussyklin jälkeen 80 % nimellisestä kapasiteetista.

#### 4.4 Mahdollisuudet sähköverkon kannalta

Suomen sähköverkon taajuus on 50,0 Hz. Sähköntuotannon ja -kulutuksen välinen epätasapaino näkyy taajuuden muuttumisena. Fingrid Oyj vastaa Suomen sähköntuotannon ja -kulutuksen välisen hetkellisen tehotasapainon ylläpidosta eli tasehallinnasta. Taajuus saa vaihdella 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Taajuuden ollessa alle 50 Hz, sähköön kulutus on tuotantoa suurempaa. Kun taajuus on yli 50 Hz, sähköä tuotetaan enemmän kuin kulutetaan. Laadukkaan sähköön taajuus on tasainen.

Suomessa on jonkin verran joustamatonta sähköntuotantoa, kuten uusiutuvista energianlähteistä tuotettava sähkö. Tulevaisuudessa aurinko- ja tuulisähkön osuus tulee kasvamaan ja sähkönkulutus vaihtelee jatkuvasti. Jotta sähköntuotanto ja -kulutus voidaan pitää tasapainossa, tarvitaan tehoreservejä. Riittävän suurella akustolla voi osallistua sähkömarkkinoille taajuusohjatun käyttö- tai häiriöreservin muodossa. Taajuusohjatun käyttöreservin säädön vähimmäiskoko on 100 kW ja taajuusohjatun häiriöreservin säädön tulee olla vähintään 1 MW. Reservien tehtävä on pitää taajuus vakaana. Sähkömarkkinoille osallistumalla saadaan tuloja ja akustoon investoinnista tulee taloudellisesti kannattavampaa. (Fingrid 2008.)

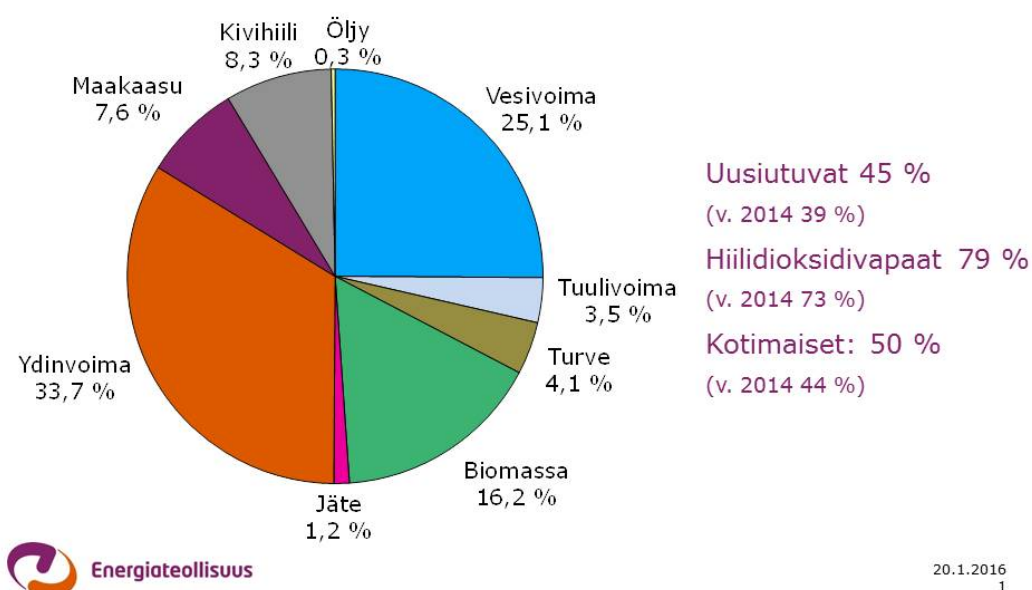


## 5 KAASUMOOTTORI

### 5.1 Kaasulla tuotettu energia

Maakaasu on lähes kokonaan metaanista ( $\text{CH}_4$ ) koostuva vähäpäästöinen fossiilinen polttoaine. Palamistuotteina syntyy hiilidioksidia, vesihöyryä ja typenoksideja. Maakaasu so-  
pii hyvin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon, koska kaasulla on hyvä lämpöarvo, pienet  
siirtohäviöt ja hyvä hyötysuhde. Maailmalla 24 % sähköntuotannosta perustuu kaasuun,  
suurinta kaasun kulutus on Lähi-Idässä. Vuonna 2015 Suomen sähköntuotannosta 7,6 %  
käytti energianlähteenä kaasua (kuva 4). Euroopassa maakaasu työllistää noin 280 000  
ihmistä. Maakaasuvarojen on arvioitu riittävän 60 vuotta nykyisellä käytöllä. (Sähkön-  
tuotanto 2016.)

### Sähköntuotanto energialähteittäin 2015 (66,2 TWh)



**KUVA 4. Sähköntuotanto Suomessa energialähteittäin 2015 (Energiateollisuus 2016)**

Kaasumootoreita löytyy monesta eri teholuokasta. Pienimmät moottorit soveltuvat ajoneuvoihin ja suurimpia käytetään esimerkiksi voimalaitoksissa. Kaasumoottori on polttomoottori, joka käyttää polttoaineena esimerkiksi maakaasua tai biokaasua. Moottori voi olla puristussytytteinen, kipinäsytytteinen tai itsesytytyvä. Kaasumoottorivoimalaitoksissa käytettävät kaasumoottorit voivat olla kaksi- tai nelitahtisia. (Alanen 2014, 3)

Kaasumoottori tulee huoltaa säännöllisesti. Huollossa tarkistetaan moottorin kunto, huolehditaan öljyn ja muiden nesteiden riittävydestä ja koekäytetään moottori. Määräaikaishuolto on nopea eikä aiheuta pitkiä tuotantotaukoja.

## 5.2 Kaasuverkot ja biokaasu

Suomeen luonnonkaasu tuodaan Venäjältä, siirrosta Suomessa vastaa Gasum Oy. Kaasuverkosto kattaa Kaakkois-Suomen, pääkaupunkiseudun ja Pirkanmaan. Puolet suomalaisista asuu kaasuverkon alueella. Kuvassa 5 on Suomen kaasun siirtoverkosto. Suomen ja Viron välille rakennetaan kaasuputki 2019 mennessä. Samalla putkistolla voidaan siirtää maakaasua ja biokaasua. Kasvun kysyntä tulevaisuudessa voi johtaa kaasun hinnan nousuun.



**KUVA 5. Suomen kaasun siirtoverkko (Maakaasun siirtoverkosto Suomessa 2016)**

Biokaasua voidaan valmistaa orgaanisesta aineksesta, esimerkiksi jätteistä, jätevesilietteestä, metsähakkeesta tai energiakasveista, bakteerien avulla mädättämällä. Biokaasu sisältää 40-70 % metaania, 30-60 % hiilidioksidia ja vähän rikkiyhdisteitä. Biokaasu soveltuu jalostettuna käytettäväksi samoissa kohteissa kuin maakaasu. Taulukosta 1 nähdään, että jalostetun biokaasun koostumus on hyvin samanlainen kuin maakaasun koostumus. Biokaasu on kotimaista ja uusiutuvaa energiaa. (Suomen biokaasuyhdistys. Biokaasu.)

**TAULUKKO 1. Kaasujen koostumukset (Huomo 2016.)**

Ainesosa	Biokaasu (raakakaasu)	Biometaani (jalostettu bio- kaasu)	Maakaasu
Metaani	45- 75 %	95- 98 %	98,1 %
Hiilidioksidi	25- 50 %	0- 3 %	0,04 %
Typpi	0- 20 %	0- 2 %	0,8 %
Happi	0-10 %	0- 0,5 %	0,01 %
Rikkivety	0- 1000 mg/m <sup>3</sup>	Jälkiä	-
Siloksaanit	0- 50 mg/m <sup>3</sup>	Jälkiä	-
Kosteus	On	Jälkiä	-
Halogenoidut hiilivedyt	0- 1600 mg/m <sup>3</sup>	Jälkiä	-
Raskaammat hiilivedyt	-	-	1 %

Lempäälän Lämmöllä on Lempäälässä hyvät kaasuverkot, joten kaasun saatavuus ja varastointi eivät edellytä investointeja. Polttoaineena tullaan käyttämään maa- ja biokaasua. Lempäälään suunnitellaan myös omaa biokaasulaitosta.

## 6 POLTTOKENNO

### 6.1 Erilaiset polttokennot

Polttokenno on sähköenergiaa tuottava laite, joka tarvitsee polttoaineekseen vetyä sisältäviä yhdisteitä. Tämän työn kohteena olevassa energiajärjestelmässä polttokennoa käytetään perustuotantoyksikkönä, joka on koko ajan päällä. Polttokennoja on erilaisia ja polttoaineena voidaan käyttää mm. metaania, dieseliä, metanolia ja vetykaasua ( $H_2$ ). Polttokennojen elektrolyytit voivat olla esimerkiksi fosforihappoa tai sulakarbonaattia. Taulukossa 2 on taulukoituna erilaisia polttokennotyyppejä. (Alanen ym. 2003, 54.)

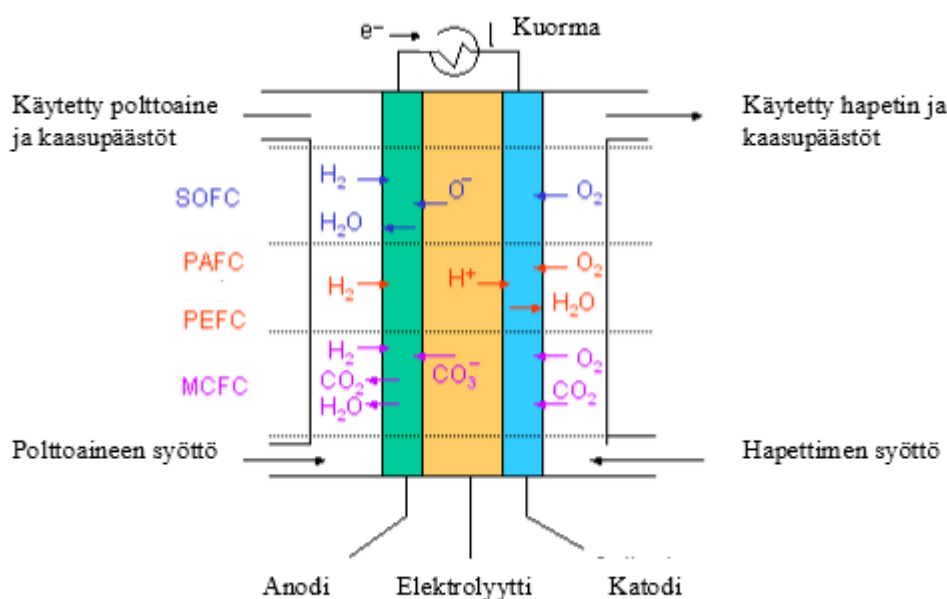
**TAULUKKO 2. Polttokennotyyppien ominaisuuksia (Alanen ym. 2003, 54)**

Tyyppi	PAFC	MCFC	SOFC	AFC	PEMFC	DMFC
Elektrolyytti	Fosforihappo	Sulakarbonaatti	Keraaminen materiaali	KOH	Polymeeri	Polymeeri
Lämpötila	175–200, 190°C	600–1000, 650°C	600–1000, 1000°C	65–220°C	60–100, 80°C	80–100 °C, –20–+50 °C
Polttoaine	$H_2$	$H_2$ , CO	$H_2$ , CO, $CH_4$	$H_2$	$H_2$	Metanoli ( $CH_3OH$ )
Hapetin	$O_2$	$O_2 + CO_2$	$O_2$	$O_2$	$O_2$	$O_2$
Varauksen kuljettaja	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$	$OH^-$	$H^+$	$H^+$
Katalyytti	platina	nikkeli	nikkeli	platina	platina	platina, ruteeni
Teho esim.	–200 kW (11 MW)	–2 MW (100 MW)	–220 kW	300W–5 kW	100W–10 MW	1–100 kW
Hyötysuhde	40–50 %	50–60 %	45–55 %	89 %	40–50 %	–70 %
Käyttökohde	Sähkönjakelu, kuljetus	Sähkönjakelu, CHP-tuotanto	Sähkönjakelu, CHP-tuotanto	Avaruustekniikka, sotatekniikka	Sähkönjakelu, kannettavat, kuljetus, CHP-tuotanto	Kulutus tuotteet, kuljetus
Edut	Jopa 85 % hyötysuhde lämmön ja sähkön yhteistuotannossa, epäpuhdaskin $H_2$ käy	Korkea lämpötila: voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita ja halpaa katalyyttiä	Korkea lämpötila: voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita ja halpaa katalyyttiä	Nopea reaktio	Matala lämpötila, nopea käynnistys, kiinteä elektrolyytti	Ei tarvita erillistä polttoaineen reformeriä, pieni koko, edullinen
Haitat	Iso koko, platina katalyytti, pieni teho ja virta	Korkea lämpötila vaativat komponentit	Korkea lämpötila vaativat komponentit	Ilman $CO_2$ vanhentaa elektrolyytin	Matala lämpötila vaatii kalliin katalyytin, puhdas polttoaine	$CO_2$

## 6.2 Polttokennon toiminta

”Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuntaa polttoaineen sisältämän kemiallisen energian suoraan sähkö- ja lämpöenergiaksi.” (Halinen 2007.) Reaktio ei vaadi palamista. Polttoaine ja hapetin tuodaan polttokennoon ulkopuolelta, joten se toimii niin kauan kuin hapetinta ja polttoainetta on tarjolla.

Yksinkertaistettuna polttokenno koostuu kolmesta osasta, kahdesta elektrodista, anodista ja katodista, sekä elektrolyytistä, joka erottaa elektrodit toisistaan (kuva 6). Polttoaine syötetään anodin puolelle. Polttoaine hapettuu ja samalla vapautuu elektroneja. Ulkoinen virtapiiri yhdistää anodin katodiin. Elektronit kulkevat ulkoista virtapiiriä pitkin katodille synnyttäen sähkövirran. Katodille syötetään hapetinta ja hapetin pelkistyy. Jotta kemialliset reaktiot tapahtuisivat nopeammin, elektrodit sisältävät katalyyttiä. Elektrolyytti estää hapettimen ja polttoaineen sekoittumisen toisiinsa. Kemiallisessa reaktiossa syntyy ioneja ja elektrolyytti päästää ionit kulkemaan lävitse. Ionit kulkevat vastakkaismerkkiselle elektrodille ja tällä tavalla polttokennon varaustasapaino säilyy. (Mitä polttokennot ovat?)



**KUVA 6.** Eri polttokennotyyppien sähkökemiallisia reaktioita (Alanen ym. 2003, 56)

### 6.3 SOFC eli kiinteäoksidipolttokenno

Suunniteltavaan järjestelmään tulee SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) eli kiinteäoksidipolttokennoja. Kiinteäoksidipolttokennon polttoaineeksi soveltuu esimerkiksi maa- ja bio-kaasu.

SOFC on korkean lämpötilan polttokenno, joka toimii monella eri polttoaineella. Toimintalämpötila on 600-1000 °C. Toimintalämpötilan vuoksi CHP-tuotannossa (Combined Heat and Power) eli yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa hyötysuhde on hyvä. Nimensä mukaisesti elektrolyytit ovat kiinteää keraamista materiaalia, anodilla on yttriumilla stabiloitua zirkoniumoksidia ja katodilla lantaanilla seostettua mangaania. Kiinteä elektrolyytti ei aiheuta korroosiota. Kun polttoaineena käytetään metaania, SOFC:n anodireaktiossa syntyy vettä, hiilidioksidia ja vapaita elektroneja. Katodilla happi toimii hapettimena ja pelkistyy, samalla syntyy lämpöä. Kennoreaktiossa metaani reagoi hapen kanssa ja syntyy vettä ja hiilidioksidia. (Sulakarbonaattikenno ja kiinteäoksidipolttokenno (MCFC ja SOFC).)

anodireaktio (metaani):  $\text{CH}_4 + 4 \text{O}_2^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8 \text{e}^-$

katodireaktio:  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$

kennoreaktio (metaani):  $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Järjestelmään tulevan polttokennon teho on 58 kW, sähköinen hyötysuhde 53 % ja kokonaishyötysuhde yli 80 %. Polttokennoa voidaan käyttää puolella teholla ja silti hyötysuhde pysyy hyvänä. Tästä syystä se sopii hyvin vaihteleville kuormille. Lähellä maksimitehoa polttokennon hyötysuhde laskee. Korkean lämpötilan vuoksi kiinteäoksidipolttokenno sietää polttoaineen pieniä epäpuhtauksia. Kiinteäoksidipolttokenno on kallis, sillä korkean lämpötilan vuoksi kennossa täytyy käyttää harvinaisia keraamisia materiaaleja.

### 6.4 Huolto ja kunnossapito

Polttokennon huollot jaetaan kolmeen eri tasoon. 1. tason huollot ovat sellaisia, jotka voidaan suorittaa polttokennon ollessa käytössä normaalisti. 2. tason huollot ovat sellaisia, että ne voidaan suorittaa polttokennon ollessa kuuma mutta tehontuotannon on oltava

nollassa. Esimerkiksi ilmanpuhaltimen hihnan vaihto on 2. tason huoltotoimenpide. 3. tason huollot ovat ns. kuumille komponenteille tehtäviä huoltoja. Kuumille komponenteille tehtävät huollot edellyttävät polttokennon alasajoa ja laitteiston jäähtymistä. Jäähdytymiseen kuluu aikaa noin yksi vuorokausi. Tällaisia huoltotoimenpiteitä suoritetaan yhden tai kahden vuoden välein. Polttokennon uudelleen lämpeneminen jäähdytyksen jälkeen kestää noin 12 tuntia. Pitkän lämpenemisajan vuoksi polttokenno on jatkuvasti päällä.

Kennoston elinikä on 20 000- 30 000 käyttötuntia. Jos polttokennoa käytetään koko ajan, käyttöikä on siis 2,3-3,4 vuotta. Todellisuudessa polttokenno on välillä pois käytöstä esimerkiksi huoltojen takia ja kennostojen vaihtoväli on noin 4-5 vuotta. Kennoissa tapahtuu degradaatiota eli ikääntymistä noin 0,7 % / 1000 h. Ikääntyminen voi johtua muun muassa kennojen myrkyttymisestä eli katalyytit peittyvät epäpuhtauksilla ja sähköä johtavat alueet hapettuvat tai mekaanisista eli valmistusteknisistä syistä. Polttokennon kennostojen ikääntyessä jännite laskee ja tästä seuraa sähköntuotantokyvyn heikkeneminen. Jännitteen laskua voidaan kompensoida nostamalla polttokennon lämpötilaa tai pienentämällä tehoa. Sähköntuotantokyvyn laskiessa polttokennon lämmöntuotantokyky kasvaa, joten jännitteen lasku ei ole välttämättä huono asia. Esimerkiksi talvella lisääntyvä lämmöntuotanto voi olla hyvä asia. (Fontell 2016.)

## **6.5 Tulevaisuudessa vetytalouden mahdollisuus**

Suuremmassa mittakaavassa vety ja polttokennot tarjoavat mahdollisuuden kokonaan uudenlaiselle energiataloudelle, jossa fossiiliset polttoaineet korvataan vedyllä. Kun käytetään vetyä esimerkiksi polttokennon energianlähteenä, energiantuotannossa ei synny haitallisia kasvihuonepäästöjä, kuten hiilidioksidia. Vetytalous on puhdasta ja ilmastonmuutosta hidastavaa toimintaa.

Vety on kevyt, väritön ja hajuton kaasu. Luonnossa vetyä ei esiinny puhtaana alkuaineena vaan erilaisina yhdisteinä. Vety on siis energiankantaja eli vetyä täytyy valmistaa käyttöä varten toisin kuin primäärienergianlähteitä. Vety on erittäin helposti syttyvää, syttymisalue on 4-75,6 %. (Työterveyslaitos 2016.)

Vetyä voidaan valmistaa elektrolyysillä vedestä tai reformoimalla eli hajottamalla hiilivetyjä kuten maakaasua. Elektrolyysissä vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkön avulla. Prosessi on täysin hiilivapaa ja lopputuotteena syntyy vedyn lisäksi vain vesihöyryä. Vedyn valmistaminen vedestä on kuitenkin vielä kallista. Kun valmistetaan vetyä hiilivedyistä, syntyy myös hiilidioksidia mutta prosessi on edullisempi. (Kauranen, Koivula, Laurikko, Solin & Törrönen 2013, 14-15.)

Vetyä on huomattavasti helpompi varastoida pitkäksi aikaa kuin sähköä. Uusiutuvista energianlähteistä sähkön valmistus ei ole tasaista vaan välillä on paljon tuotantoa ja toisinaan ei yhtään. Kulutus ei aina kohtaa tuotannon kanssa ja tätä varten energia täytyy varastoida. Esimerkiksi Suomessa aurinkosähköä ei saada talvella käytännössä ollenkaan ja kesällä sitä olisi tarjolla paljon. Tulevaisuudessa kesällä voidaan tuottaa sähköä yli kulutuksen ja ylituotanto varastoidaan vedyksi. Tuotettu vety varastoidaan esimerkiksi paineistettuna kaasuna suuriin terässäiliöihin. Kun energiaa tarvitaan varastosta, vety muutetaan sähköksi polttokennossa (Kauranen ym. 2016). PEM-polttokenno (proton exchange membrane) soveltuu puhtaan vedyn muuttamiseksi takaisin sähköksi. PEM-polttokennon toimintalämpötila on matala, alle 100 celsiusastetta, ja elektrodit ovat platinaa. Teknologian etuja ovat prosessin vaatima laiha seos, hiljaisuus ja hyvä kokonaishyötysuhde. Tällä hetkellä teknologian käyttöönottoa hidastaa sen korkea hinta. (PEMFC 2016.) Eurooppalaiset Power to Gas- hankkeet pyrkivät edistämään sähköisen energian muuntamista kaasumaisiksi energiankantajiksi, kuten vedyksi, ja sitä kautta helpottamaan energian varastointia.



## 7 MIKROVERKKO

### 7.1 Määritelmä

Mikroverkolla tarkoitetaan alueellista sähköverkkoa, joka on erillään valtakunnan sähköverkosta. Nimensä mukaisesti mikroverkko on melko pieni ja sähkö tuotetaan paikallisesti. Sähköntuotantoon käytetään muun muassa tuulivoimaa, polttokennoja, aurinkopaneeleita ja CHP-laitoksia. Energianlähteet ovat tyypillisesti uusiutuvia tai muuten muulla tavalla perinteisestä keskitetystä tuotannosta poikkeavia. Mikroverkkojen yhteydessä voidaan puhua hajautetusta energiantuotannosta, koska tuotantoyksiköt ovat pieniä. Tavallisesti tuotantoyksiköiden yhteiskoko on pienempi kuin 50 MW. Mikroverkko voi toimia itsenäisenä saarekkeena tai yhdistettynä valtakunnan sähköverkkoon. (Chowdhury, Chowdhury & Crossley 2009, 1.)

Hajautetulla energiantuotannolla on monia etuja. Suurin osa käytetyistä polttoaineista on uusiutuvia ja ne saastuttavat vähemmän kuin fossiiliset polttoaineet. Hukkalämpöä ei juurikaan synny, sillä lämpö pystytään käyttämään hyvin hyödyksi yhteistuotanto- eli CHP-laitoksella. CHP-laitos tuottaa sähköä ja lämpöä samanaikaisesti, lämmöntuotannolla on mahdollista tehdä myös kylmää. Kesällä sähkönkulutus on korkealla, koska tiloja jäähdytetään ilmastoinnilla. Yhdistetty lämmöntuotanto sopii hyvin tällaiseen käyttöön, koska tuotetun lämpöenergian määrä on riippuvainen tuotetun sähkön määrästä. (Chowdhury ym. 2009, 2.)

Tuotantolaitokset sijaitsevat lähellä kulutusta, joten sähkön siirto- ja jakeluhäviöt ovat pieniä. Pienet yksiköt ovat myös nopeampia rakentaa ja sijoituspaikka on helpompi löytää. Myös tehotasapainon hallinta on helpompaa kuin valtakunnan sähköverkossa, joten tuotanto ja kulutus on helppo pitää tasapainossa. Lisäksi mikroverkot vähentävät kanta-verkon kuormitusta. (Sarvaranta 2010, 39.)

## 7.2 Mikroverkon haasteet

Mikroverkoille haasteita asettavat mm. tuotannon riippuvuus säästä, matalaenergiset polttoaineet sekä Suomen laki. Energia tuotetaan monesti teknologialla, joka on vielä melko uutta ja siitä syystä kallista. Suomessa mikroverkot ovat vielä harvinaisia. Verkoja tulisi rakentaa, jotta niiden toimintaa voidaan kehittää ja tutkia. Erityisen tärkeää olisi kehittää taloudellisesti järkevän hintaista teknologiaa, jolla mikroverkko on muutettavissa saarekekäytöstä osaksi valtakunnan verkkoa ja toisin päin. Mikroverkot ovat monimutkaisia järjestelmiä, sillä esimerkiksi vikavirrat ja niiden suunnat käyttäytyvät eri tavalla kuin perinteisessä sähköverkossa. Verkon tulee olla samalla myös älykäs ns. Smart Grid. Mikroverkot voivat tukea valtakunnan sähköverkkoa monella tavalla, esimerkiksi voidaan säädellä taajuutta tai ne voivat toimia tehoreservinä. (Sarvaranta 2010, 39-41.)

Suomen sähköverkossa on jo joitain älykkään verkon piirteitä kuten älykäs energiamittaus, automaattinen vianpaikannus ja -erotus. Tulevaisuudessa hajautettu energiantuotanto aiheuttaa verkolle kuitenkin uusia vaatimuksia, kun energia liikkuu verkosta asiakkaalle ja asiakkaalta verkkoon. Hajautettu energiantuotanto ja älykäs verkko tarjoavat mahdollisuuden kysyntäjousto on mutta vielä tarvitaan kuluttajille taloudellisesti kannattavat markkinat, jotta kysyntäjousto saadaan osaksi sähköverkon tasapainon hallintaa. (Energiateollisuus. Kysyntäjousto 2016.)

## 8 JÄRJESTELÄN TOIMINTA JA MITOITUS

### 8.1 Järjestelmän mitoittaminen

Mitoituksen lähtökohtana käytetään kohteen sähkönkulutusta, jota tutkitaan tuntitasolla. Lisäksi järjestelmälle asetetaan tehorajat, joita ei saa ylittää. Tehorajoilla pyritään leikkaamaan huippukulutuksia ja näin pienennetään sähkölaskua. Sähkönkulutusta tulee säätää siten, että järjestelmän tuottama sähkö riittää joka tilanteessa.

Ensimmäiseksi mitoitetaan aurinkokenttä. Aurinkokenttä tulisi olla sellainen, ettei ylituotantoa juurikaan synny mutta saadaan kuitenkin mahdollisimman suuri hyöty. Aurinkokentän tuotantoa arvioidaan myös tuntitasolla. Apuna käytetään Jani Vesan opinnäyte-työtä ja siinä olevaa mallia aurinkopaneelien tuotannosta erilaisissa sääoloissa eri vuodenaikoina (Vesa 2016, 34-35). Suomessa aurinkopaneelien huipunkäyttöaika on noin 800-1000 h. Tämän vuoksi luodaan sääoloilta erilaisia vuosia siten, että huipunkäyttöaika vaihtelee välillä 750-950 h. Tästä saadaan selville sääolosuhteiltaan hyvän ja huonon vuoden sähköntuotanto. Eri kokoisia aurinkokenttiä simuloimalla löydetään optimaalinen koko kohteen aurinkokentälle.

Polttokenno on päällä koko ajan. Jos kuitenkin näyttää siltä, että kesäaikana tulee paljon ylituotantoa, voidaan miettiä polttokennon sammuttamista esimerkiksi kesä- ja heinäkuun ajaksi. Polttokennoa on käytettävä koko ajan vähintään 50 % teholla. Polttokennon koko tulee valita siten, että jatkuvasti ei ole suurta ylituotantoa.

Akkua ladataan aurinkokentän ja polttokennon ylituotannolla. Akun valinnassa tulee huomioida sen käyttötarkoitus. Esimerkiksi nopeaan toimintaan tai pitkäaikaiseen toimintaan soveltuvat akut ovat erilaisia. Tässä tapauksessa akun on tarkoitus lisätä hyötyä, joka saadaan auringosta sekä tasata aurinkosähkön heilahteluja. Kun akkua ladataan aurinkosähköllä, pystytään aurinkosähköä hyödyntämään myös silloin, kun aurinko ei paista. Myös sähköverkkoon myytävän sähkön osuus pienenee, kun osa ylituotannosta käytetään akun lataamiseen. Tällä hetkellä sähköverkkoon myytävästä ylituotannosta maksetaan niin vähän, että se ei ole kannattavaa toimintaa. Akun tulee olla riittävän suuri, jotta siitä on konkreettisesti hyötyä.

Kaasumoottoria käytetään tilanteissa, jolloin sähköä ei muuten olisi riittävästi. Kaasumoottorin käynnistäminen on suhteellisen nopeaa ja säätö onnistuu helposti. Moottorin kestävyys ja käyttöikä kannalta ei ole kuitenkaan järkevää käynnistää moottoria jatkuvasti lyhyeksi ajaksi. Kaasumoottorin mitoituksessa tulee huomioida myös se, että moottoria käytetään aina vähintään 50 % teholla.

Yhdessä aurinkokennän, akuston, polttokennon ja kaasumoottorin sähköntuotannon tulisi olla sen suuruinen, että kuluttaja pystyy toimimaan koko ajan. Jos kulutus kuitenkin ylittää tehorajat, kuluttaja on itse velvollinen joustamaan.

## **8.2 Lempäälän jäähallin sähkönkulutus**

Lempäälän jäähallia käytetään esimerkkikohteenä sähköjärjestelmän suunnittelussa. Kohteen vuosikulutus vuonna 2015 oli 943,79 MWh pätötehon avulla lausuttuna. Laskelma ei huomio loistehoa, sillä tehokerroin ei ole tiedossa ja täten näennäistehoa ei pystytä laskemaan. Tällä hetkellä verkkopalveluyhtiö Elenia Oy veloittaa tehosiirtoasiakailta loistehomaksua siten, että veloitustoisteho on kuukausittain mitattu suurin 60 minuutin loiskeskiteho, josta vähennetään 16 % laskutettavasta pätötehon määrästä. Kohteeseen voidaan asentaa loistehon kompensointilaitteisto, jollaisena voi toimia esimerkiksi kompensointiin pystyvä akusto. Järjestelmän mitoittamista varten rakennetaan laskentamalli.

Järjestelmän sopiva mitoitus selviää kokeilemalla eri kokoisia järjestelmiä ja tutkimalla tuloksia. Ylituotannon tulee pysyä maltillisena. Jäähallissa on kaksi erillistä kenttää. Kesällä aurinkopaneelien tuottaessa eniten sähköä, jäähallilla on tyypillisesti käytössä vain yksi kenttä ja kulutus alhaisempaa kuin muina aikoina. Toisaalta korkeat ulkolämpötilat lisäävät jäähdytyksen tarvetta ja sitä kautta sähkönkulutus kasvaa. Sähkönkulutus on ollut vuonna 2015 vähäisintä kesä- ja heinäkuussa. Vähäinen sähkönkulutus johtuu siitä, että yksi kenttä on ollut sulana koko kesäkuun ja toinen on sulatettu kesäkuun lopulla. Heinäkuun puolella välissä kentistä ensimmäistä on alettu jäähdyttää ja toisen jäähdytys on aloitettu heinäkuun lopulla. Suurimmillaan sähkönkulutus on ollut elo- ja syyskuussa. Elokuussa molemmat kentät ovat olleet käytössä ja ulkolämpötilat ovat olleet korkeita, joten myös sähkönkulutuksessa näkyy piikki.

Alimmillaan sähkönkulutus on ollut kesäkuussa 2015, jolloin kulutus on ollut vain 44 MWh/kk (taulukko 3). Korkeimmillaan sähkönkulutus on ollut elokuussa 2015, jolloin kulutus on ollut 142 MWh/kk. Mitoitettavan sähköenergiajärjestelmän tulee pystyä vastaamaan korkeaan ja matalaan kulutukseen joustavasti ja taloudellisesti.

**TAULUKKO 3 Jäähallin sähkönkulutus vuonna 2015**

Tammikuu	68	MWh
Helmikuu	64	MWh
Maaliskuu	72	MWh
Huhtikuu	69	MWh
Toukokuu	74	MWh
Kesäkuu	44	MWh
Heinäkuu	55	MWh
Elokuu	142	MWh
Syyskuu	105	MWh
Lokakuu	87	MWh
Marraskuu	84	MWh
Joulukuu	81	MWh

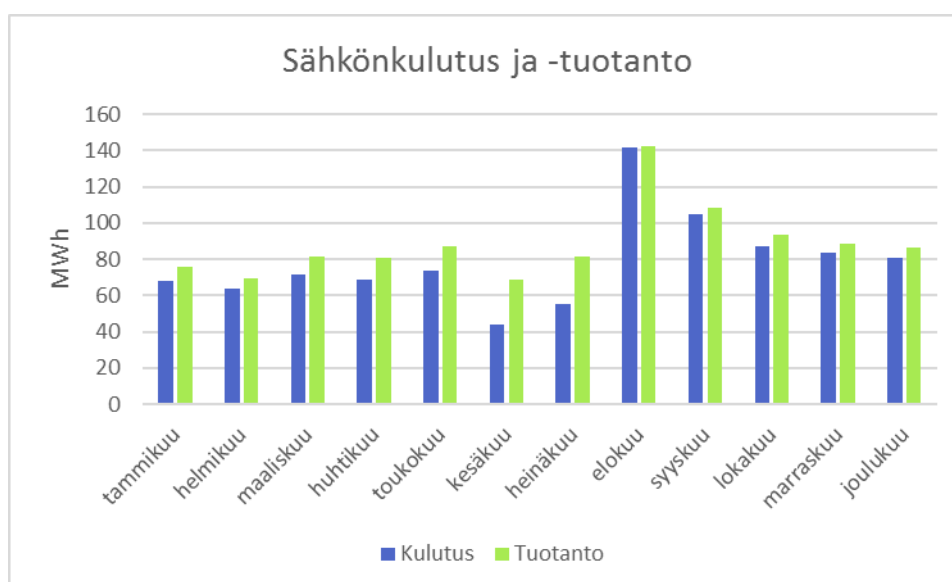
### 8.3 Jäähallille mitoitettu järjestelmä

Järjestelmän mitoittaminen toteutettiin laskentamallilla, jonka perusteella saatiin iteratiivisesti haettua sopivat nimellistehot aurinkosähköjärjestelmälle, polttokennolle, kaasumoottorille ja energiavarastolle (taulukko 4). Aurinkopaneelikentän sopivaksi kooksi tuli 150 kWp, tätä suurempi järjestelmä tuottaa paljon sähköä, jota jäähalli ei pysty kuluttamaan. Polttokennojen kohdalla päädyttiin kahteen 58 kW polttokennoyksikköön, näin polttokennoilla pystytään tuottamaan jatkuvasti jäähallin sähkönkulutuksen peruskuorma ja kaksi yksikköä tuo lisää säädettävyyttä sähköntuotantoon. Kaasumoottorin sopiva koko on 100 kW, sillä pystytään hallitsemaan suuret tehopiikit ilman merkittävää ylituotantoa. Jäähallin kohdalla päädyttiin yksinkertaistamaan järjestelmää siten, että energiavarastona toimii sähköverkko akuston sijaan. Energiavarastosta eli tässä tapauksessa sähköverkosta otettava sähköenergia kaasumoottorin käynnistymisen ajan rajoitetaan 60 kW:iin tuntia kohden. Mitoituksessa ei oteta kantaa järjestelmän kustannuksiin.

**TAULUKKO 4. Lempäälän jäähallille suunniteltava järjestelmä**

Tuotantotapa	Koko	Säätö
Aurinkopaneelit	150 kWp	Ei voida säätää
Polttokennot	116 kW	50-100 %
Kaasumoottori	100 kW	50-100 %
Energiavarasto	60 kW	0-100 %

Kun edellä esitetyn järjestelmän energiantuotanto ennustetaan kuukausitasolla ja verrataan sitä jäähallin kulutukseen, päädytään kuvion 1 mukaiseen tilanteeseen. Kulutuksen ollessa yli 60 MWh/kk, ylituotantoa syntyy vähän. Kesällä, kulutuksen ollessa vähäistä ja aurinkosähkön tuotannon ollessa runsasta, ylituotantoa syntyy enemmän.

**KUVIO 1. Sähkönkulutus ja -tuotanto Lempäälän jäähallilla 2015**

Aurinkopaneelien sähköntuotantoa ei voi säätää. Sähköä tuotetaan silloin, kun aurinko paistaa. Polttokennot ovat päällä koko ajan pois lukien muutaman päivän huoltotauot. Polttokennon voi sammuttaa esimerkiksi kesällä kuukaudeksi, jos sähköntuotanto ilman polttokennoa riittää kohteen kulutuksen kattamiseen. Kaasumoottori on päällä, kun sille on tarvetta. Käynnistykseen varataan aikaa 15 minuuttia mutta todellisuudessa käynnistyminen tapahtuu nopeammin. Kaasumoottorin tehoa voidaan säätää välillä 50-100 %. Energiavarastosta otetaan sähköenergiaa sen verran, että kaasumoottori ehtii käynnistyä, laskentamallissa käynnistymisaika on ylimitoitettu 15 minuuttiin. Jos aurinkopaneelien, polttokennojen, energiavaraston ja kaasumoottorin jälkeen jäähallin sähköntarve ei ole

täytetty, otetaan toistaiseksi sähköenergia sähköverkosta, mutta tulevaisuudessa asiakas säättää kulutustaan niin, ettei vajetta synny.

Laskennasta nähdään eri tuotantotapojen huipunkäyttöajat, käyttötunnit vuodessa ja keskimääräiset käyttötunnit vuorokaudessa (taulukko 5). Polttokennojen huipunkäyttöaika on 6454 tuntia. Tämä johtuu siitä, ettei niitä käytetä koko ajan täydellä teholla. Jos jäähallin sähkönkulutus on alhainen ja aurinkopaneelit tuottavat sähköä, polttokennoja saatetaan käyttää vain puolella teholla. Kaasumoottorista selviää myös käynnistysten määrä vuodessa ja vuorokaudessa, sillä kaasumoottorille ei tee hyvää jatkuva käynnistäminen. Jos moottori käynnistyy ja sammuu koko ajan, mitoitus tulee miettiä uudestaan. Verrtaamalla huipunkäyttöaikaa vuoden käyttötunteihin, saadaan käsitys mitoituksen oikeellisuudesta. Jos huipunkäyttöaika on hyvin pieni verrattuna käyttötunteihin, mitoitus on pielessä. On tärkeää verrata myös tuotetun sähkön kulutusta ja ylituotantoa toisiinsa, koska taloudellisesti ei ole järkevää tuottaa ylimääräistä sähköä.

**TAULUKKO 5. Huipunkäyttöajat ja käyttötunnit****Aurinkopaneelit**

Huipunkäyttöaika	808 h
------------------	-------

**Polttokennot**

Huipunkäyttöaika	6454 h
------------------	--------

**Kaasumoottori**

Huipunkäyttöaika	872 h
Käyttötunnit/a	1308 h
Käyttötunnit/vrk kesk.	4 h
Käyttötunnit/vrk min.	0 h
Käyttötunnit/vrk maks.	16 h
Käynnistykset/a	759 kpl
Käynnistykset/vrk kesk.	2 kpl
Käynnistykset/vrk min.	0 kpl
Käynnistykset/vrk maks.	8 kpl

**Energiavarasto**

Huipunkäyttöaika	1634 h
Käyttötunnit/a	2626 h
Käyttötunnit/vrk kesk.	7 h
1. suurin sähköverkosta otettava tuntikohtainen teho	115 kW
2. suurin sähköverkosta otettava tuntikohtainen teho	106 kW
Laskutusteho	110 kW

Laskutusteho määräytyy tehotariffiperusteisessa hinnoittelussa viimeisen 12 kuukauden kahden suurimman tuntikohtaisen tehon keskiarvona. Tästä syystä on järkevää rajoittaa sähköverkosta otettava teho maltillisesti ympäri vuoden. Jos kesällä otetaan yksi iso piikki, vaikuttaa se sähkölaskuun koko seuraavan vuoden. Esimerkiksi Lempäälän jäähallilla 2015 vuoden laskutusteho on ilman järjestelmää 340 kW ja järjestelmän kanssa 110 kW.



## 8.4 Sähköntuotanto tuntitasolla

Laskenta suoritettiin tuntitasolla, mutta tulokset on käsitelty pääosin kuukausitasolla, koska se on havainnollistavampaa. Sääolot ovat eivät vastaa vuoden 2015 todellista säätä, vaan ne on simuloitu siten, että aurinkopaneelien huipunkäyttöajaksi on saatu 808 tuntia.

Seuraavassa taulukossa 7 on esimerkki elokuun ensimmäiseltä päivältä, sää on ollut huono aurinkopaneelien näkökulmasta. Jäähallin kulutus vastaa todellista 1.8.2015 mitattua sähkönkulutusta. Tulosten yksikkö on kWh. Jäähalli on kuluttanut sähköä päivän aikana 3277,70 kWh. Taulukosta nähdään, kuinka paljon aurinkopaneelit ovat tuottaneet sähköenergiaa kunakin ajan hetkenä. Aurinkopaneelit ovat tuottaneet sähköenergiaa klo 8.00-20.00 ja yhteensä tuotantoa on ollut 196,63 kWh. Polttokennoilla on tuotettu sähköä 2514,07 kWh ja polttokennot ovat olleet suuren osan ajasta täydellä teholla. Energiavara-  
rastosta ollaan otettu 521,30 kWh sähköenergiaa ja kaasumoottori on käynnistetty vain kerran yhden tunnin ajaksi. Sähköverkkoa ei ole tarvittu lainkaan. Päivän aikana ylituotantoa on syntynyt 4,30 kWh polttokennojen sähköntuotannon seurauksena.

**Taulukko 6. Tuntitason esimerkki sääolosuhteiltaan huonolta päivältä**

pvm.	kellonaika	kulutus	aurinkop.	polttokennot	energiavarasto	kaasumoottori	sähköverkko	ylituotanto
1.8.	0:00	102,10	0,00	102,10	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	1:00	167,40	0,00	116,00	51,40	0,00	0,00	0,00
1.8.	2:00	56,70	0,00	58,00	0,00	0,00	0,00	1,30
1.8.	3:00	163,80	0,00	116,00	47,80	0,00	0,00	0,00
1.8.	4:00	88,30	0,00	88,30	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	5:00	109,10	0,00	109,10	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	6:00	145,80	0,00	116,00	29,80	0,00	0,00	0,00
1.8.	7:00	80,60	0,00	80,60	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	8:00	164,90	6,25	116,00	42,65	0,00	0,00	0,00
1.8.	9:00	70,20	6,25	63,95	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	10:00	167,60	5,31	116,00	46,29	0,00	0,00	0,00
1.8.	11:00	168,30	14,07	116,00	38,23	0,00	0,00	0,00
1.8.	12:00	148,20	31,26	116,00	0,94	0,00	0,00	0,00
1.8.	13:00	180,80	21,88	116,00	42,92	0,00	0,00	0,00
1.8.	14:00	183,30	46,89	116,00	20,41	0,00	0,00	0,00
1.8.	15:00	155,40	25,01	116,00	14,39	0,00	0,00	0,00
1.8.	16:00	158,50	18,76	116,00	23,74	0,00	0,00	0,00
1.8.	17:00	222,80	9,38	103,42	60,00	50,00	0,00	0,00
1.8.	18:00	168,50	6,25	116,00	46,25	0,00	0,00	0,00
1.8.	19:00	164,20	5,31	116,00	42,89	0,00	0,00	0,00
1.8.	20:00	114,90	0,00	114,90	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	21:00	111,70	0,00	111,70	0,00	0,00	0,00	0,00
1.8.	22:00	129,60	0,00	116,00	13,60	0,00	0,00	0,00
1.8.	23:00	55,00	0,00	58,00	0,00	0,00	0,00	3,00
Yhteensä		3277,70	196,63	2514,07	521,30	50,00	0,00	4,30

Taulukossa 8 on esimerkki elokuun 29. päivältä, sää on simuloitu erittäin hyväksi aurinkopaneelien näkökulmasta. Jäähallin kulutus vastaa todellista 29.8.2015 mitattua sähkönkulutusta. Tulosten yksikkö on kWh. Jäähalli on kuluttanut sähköä päivän aikana 4328,50 kWh. Taulukosta nähdään, kuinka paljon aurinkopaneelit ovat tuottaneet sähköenergiaa päivän jokaisena tuntina. Aurinkopaneelit ovat tuottaneet sähköenergiaa klo 6.00-21.00 ja yhteensä tuotantoa on ollut 1057,50 kWh. Polttokennoilla on tuotettu sähköä 2531,00 kWh. Energiavarastosta ollaan otettu 593,70 kWh sähköenergiaa ja kaasumoottori on käynnistetty kolme kertaa, jotta on voitu tuottaa 158,30 kWh sähköä. Sähköverkkoa ei ole tarvittu lainkaan. Päivän aikana ylituotantoa on syntynyt 12,00 kWh polttokennojen sähköntuotannon seurauksena.

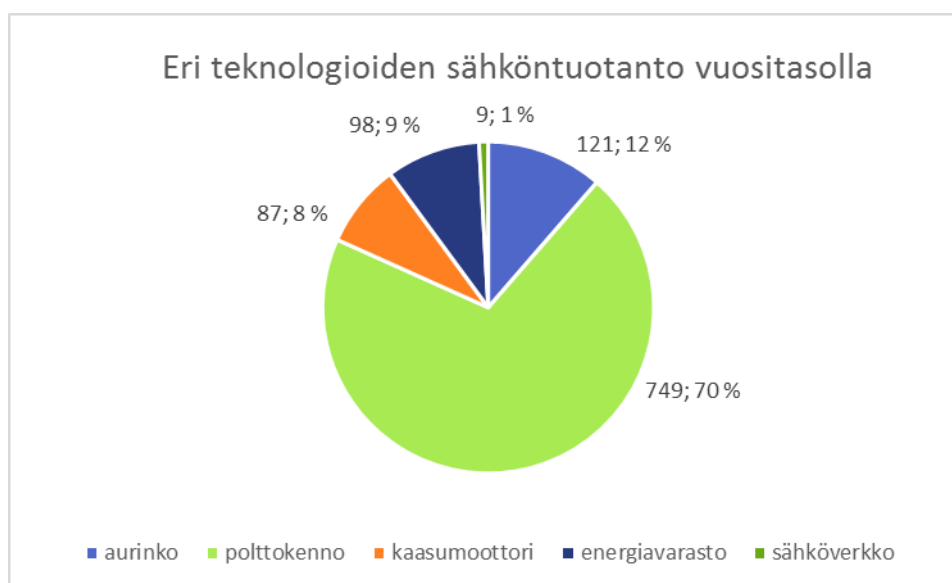
**Taulukko 7. Tuntitason esimerkki sääolosuhteiltaan hyvältä päivältä**

pvm.	kellonaika	kulutus	aurinkop.	polttokennot	energiavarasto	kaasumoottori	sähköverkko	ylituotanto
29.8.	0:00	204,60	0,00	94,60	60,00	50,00	0,00	0,00
29.8.	1:00	46,00	0,00	58,00	0,00	0,00	0,00	12,00
29.8.	2:00	160,80	0,00	116,00	44,80	0,00	0,00	0,00
29.8.	3:00	84,90	0,00	84,90	0,00	0,00	0,00	0,00
29.8.	4:00	144,40	0,00	116,00	28,40	0,00	0,00	0,00
29.8.	5:00	116,30	0,00	116,00	0,30	0,00	0,00	0,00
29.8.	6:00	135,60	3,00	116,00	16,60	0,00	0,00	0,00
29.8.	7:00	103,00	10,50	92,50	0,00	0,00	0,00	0,00
29.8.	8:00	178,40	40,50	116,00	21,90	0,00	0,00	0,00
29.8.	9:00	199,30	76,50	116,00	6,80	0,00	0,00	0,00
29.8.	10:00	179,50	102,00	77,50	0,00	0,00	0,00	0,00
29.8.	11:00	280,20	120,00	116,00	44,20	0,00	0,00	0,00
29.8.	12:00	223,70	130,50	93,20	0,00	0,00	0,00	0,00
29.8.	13:00	291,60	135,00	116,00	40,60	0,00	0,00	0,00
29.8.	14:00	255,90	126,00	116,00	13,90	0,00	0,00	0,00
29.8.	15:00	308,10	114,00	84,10	60,00	50,00	0,00	0,00
29.8.	16:00	251,00	88,50	116,00	46,50	0,00	0,00	0,00
29.8.	17:00	297,30	63,00	116,00	60,00	58,30	0,00	0,00
29.8.	18:00	171,90	30,00	116,00	25,90	0,00	0,00	0,00
29.8.	19:00	153,10	12,00	116,00	25,10	0,00	0,00	0,00
29.8.	20:00	106,50	6,00	100,50	0,00	0,00	0,00	0,00
29.8.	21:00	171,70	0,00	116,00	55,70	0,00	0,00	0,00
29.8.	22:00	105,70	0,00	105,70	0,00	0,00	0,00	0,00
29.8.	23:00	159,00	0,00	116,00	43,00	0,00	0,00	0,00
Yhteensä		4328,50	1057,50	2531,00	593,70	158,30	0,00	12,00

Esimerkkipäivien sähkönkulutuksessa on 1050,80 kWh ero, joten päivät eivät ole suoraan verrattavissa keskenään. Niistä nähdään kuitenkin hyvin aurinkopaneelien sähköntuotannon vaihtelu hyvissä ja huonoissa sääoloissa, sillä kaikkien muiden sähköntuotantotapojen tulokset koko päivästä pysyvät melko samana. Aurinkopaneelien sähköntuotannossa on 860,87 kWh ero. Jotta kahden kulutukseltaan tismalleen samanlaisen ja sääoloiltaan täysin erilaisen päivän sähkönkulutus voidaan kattaa järjestelmällä, tulee järjestelmän olla riittävän joustava.

### 8.5 Sähköntuotanto vuositasona

Lempäälän jäähallille mitoitettu järjestelmä olisi tuottanut vuonna 2015 sähköenergiaa 1065 MWh (kuvio 2) ja jäähallin kulutus on ollut 944 MWh. Suurin osuus, 70 %, sähköenergiasta tuotetaan polttokennoilla. Kaasumoottorilla tuotetaan 8 % ja aurinkopaneelien osuus sähköntuotannosta on 12 %. Energiavaraston osuus on 9 % ja tässä vaiheessa se otetaan sähköverkosta. Toinen vaihtoehto olisi liittää järjestelmään saman kokoinen akusto. Sähköverkon osuus on 1% eli tämän verran asiakkaan tulisi joustaa omassa sähkönkulutuksessaan.



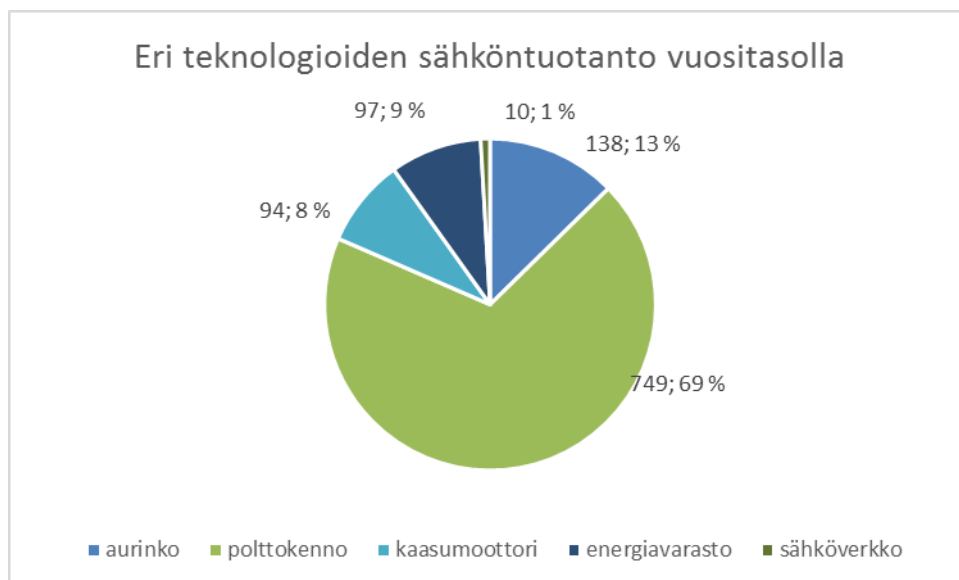
**KUVIO 2.** eri teknologioiden tuottamat sähköenergiamäärät vuoden aikana

Ylituotantoa syntyy aurinkopaneelien, kaasumoottorin ja polttokennojen tuottamasta sähköstä yhteensä 121 MWh eli 11 % (kuvio 3). Tuotetusta sähköstä käytetään yhteensä vuoden aikana 944 MWh eli 89 %. Ylituotantoa voidaan pienentää lisäämällä jäähallille akusto sen sijaan, että käytetään sähköverkkoa energiavarastona. Jos akusto olisi tehollaan laskennassa käytetyn energiavaraston suuruinen, ylituotannosta voitaisiin käyttää akuston lataamiseen 72 MWh. Tämän jälkeen käyttämätöntä ylituotantoa jäisi 49 MWh ja itse kulutetun sähköenergian osuus olisi 95 %.



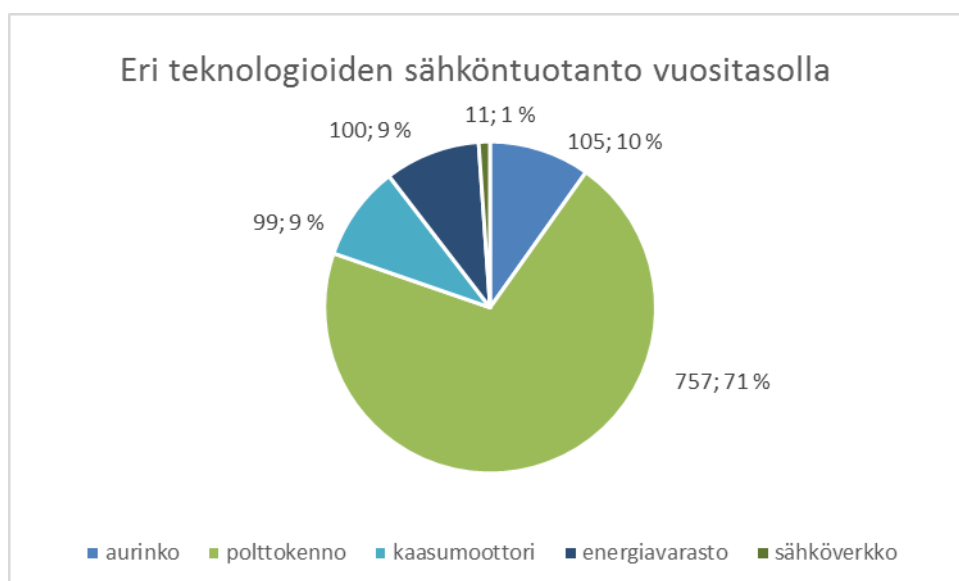
**KUVIO 3. Vuoden 2015 sähkön kulutus ja ylituotanto kokonaisuudessa**

Vertailun vuoksi laskelmat tehtiin myös aurinkosähkön huipunkäyttöajoilla 702 h ja 918 h eli sääolosuhteiltaan hieman huonompana ja parempana vuotena (kuviot 4 ja 5). Kulutuksena käytettiin samaa jäähallin 2015 vuoden sähkönkulutusta. Huipunkäyttöajalla 918 tuntia kokonaisenergiantuotanto nousee 1088 MWh:iin eli 23 MWh suuremmaksi verrattuna 808 tunnin huipunkäyttöaikaan. Suuremmasta sähköntuotannosta 17 MWh on tuotettu aurinkopaneelilla ja 7 MWh kaasumoottorilla, energiavarastosta otetaan 1 MWh vähemmän sähköenergiaa.



**KUVIO 4. Aurinkopaneelienten huipunkäyttöaika 918 H**

Huipunkäyttöajalla 702 tuntia kokonaisenergiantuotanto nousee 1073 MWh:iin eli 8 MWh verrattuna 808 tunnin huipunkäyttöaikaan. Aurinkopaneeleilla tuotetun sähkön määrä laskee 16 MWh, polttokennoilla tuotettu sähköenergian määrä nousee 8 MWh ja kaasumoottorilla tuotettu sähköenergian määrä nousee 12 MWh. Energiavarastosta otettavan sähköenergian määrä nousee 2 MWh ja sähköverkosta otettava sähköenergian määrä nousee 2 MWh. Sähköntuotannon nousu pienemmällä huipunkäyttöajalla selittyy sillä, että kaasumoottori on enemmän päällä ja tuottaa polttokennojen kanssa yhdessä enemmän ylituotantoa.

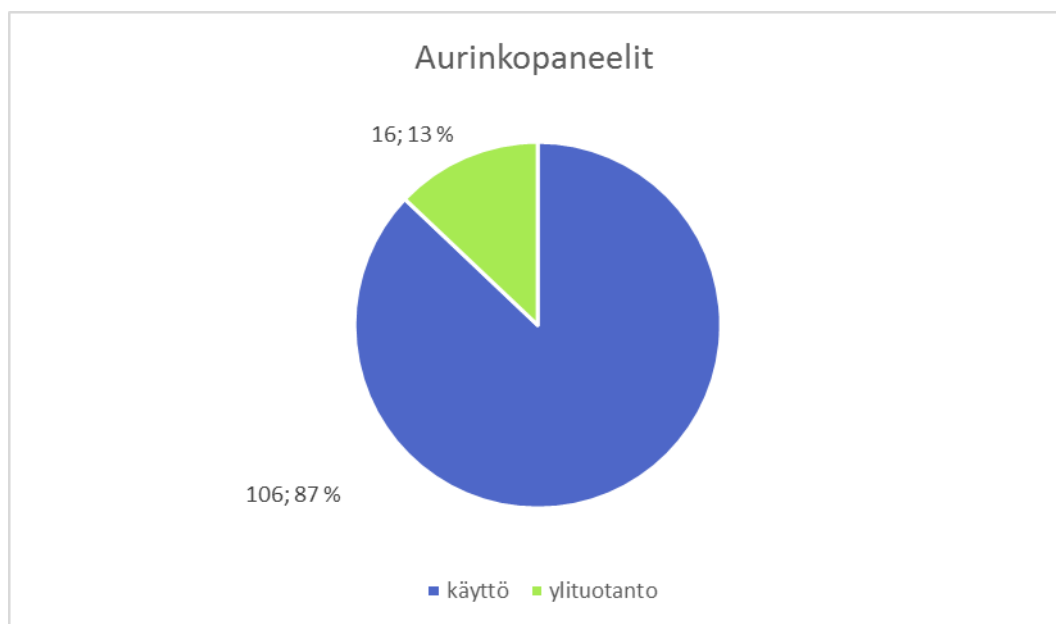


**KUVIO 5. Aurinkopaneelienten huipunkäyttöaika 702 H**

Noin sadalla tunnilla aurinkopaneelien huipunkäyttöajan muuttuminen suuntaan tai toiseen ei vaikuttanut tuotantoon ja eri energianlähteiden suhteisiin merkittävästi. Huipunkäyttöajan tulisi muuttua huomattavasti radikaalimmin, jotta sillä olisi merkitystä kokonaisuuden kannalta.

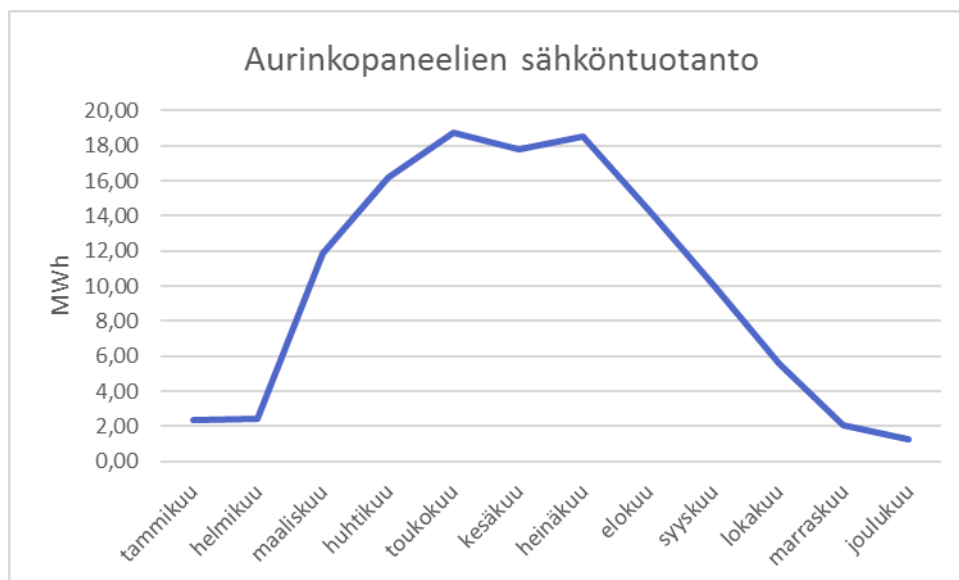
### 8.6 Sähköntuotanto teknologiakohtaisesti

Kun aurinkosähkön huipunkäyttöajaksi oletetaan 808 h, aurinkosähkölaitteiston vuosituotanto on 122 MWh (kuvio 6). Tuotetusta sähköenergiasta 87 %, eli 106 MWh, kulutetaan itse ja 13 %, eli 15 MWh, myydään sähköverkkoon. Ylituotanto selittyy sillä, että aina kulutus ei kohtaa auringonpaisteen kanssa. 2015 jäähallissa oli vain toinen kenttä käytössä kesä- ja heinäkuussa. Jos kumpikin kenttä olisi käytössä koko kesän, ylituotanto olisi paljon pienempi tai sitä ei olisi ollenkaan.



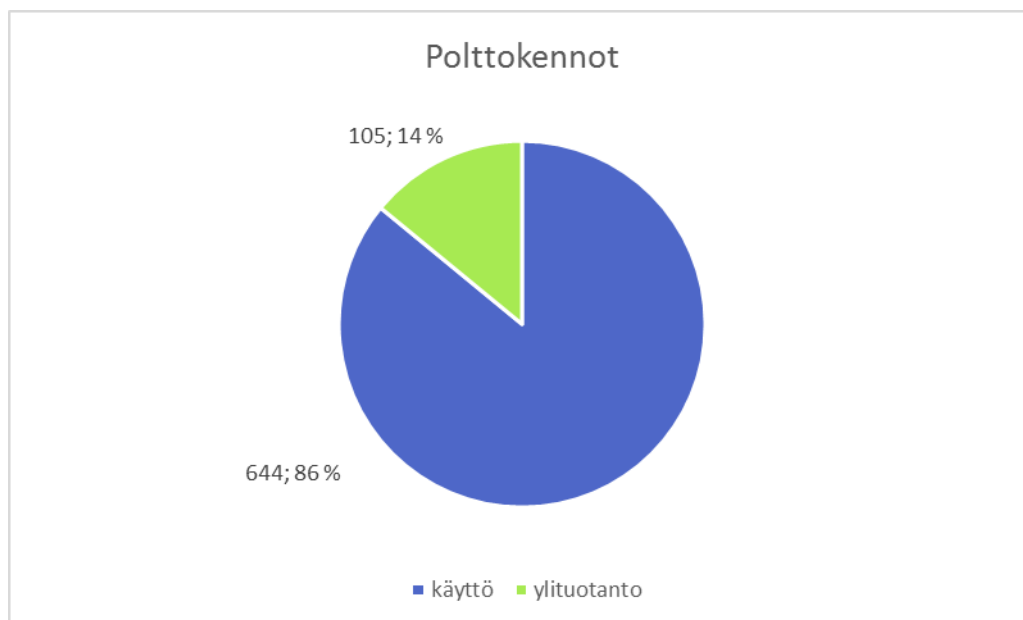
**KUVIO 6. Aurinkopaneelien sähköntuotanto vuoden aikana**

Aurinkopaneelin tuottama sähköenergia on riippuvainen auringonpaisteesta eli sähköntuotantoa ei pysty säätämään millään tavalla. Näin ollen sähköntuotanto ei ole millään tavalla sidoksissa jäähallin sähkönkulutukseen. Aurinkopaneelien sähköntuotanto vuoden ajalta on esitetty kuviossa 7.



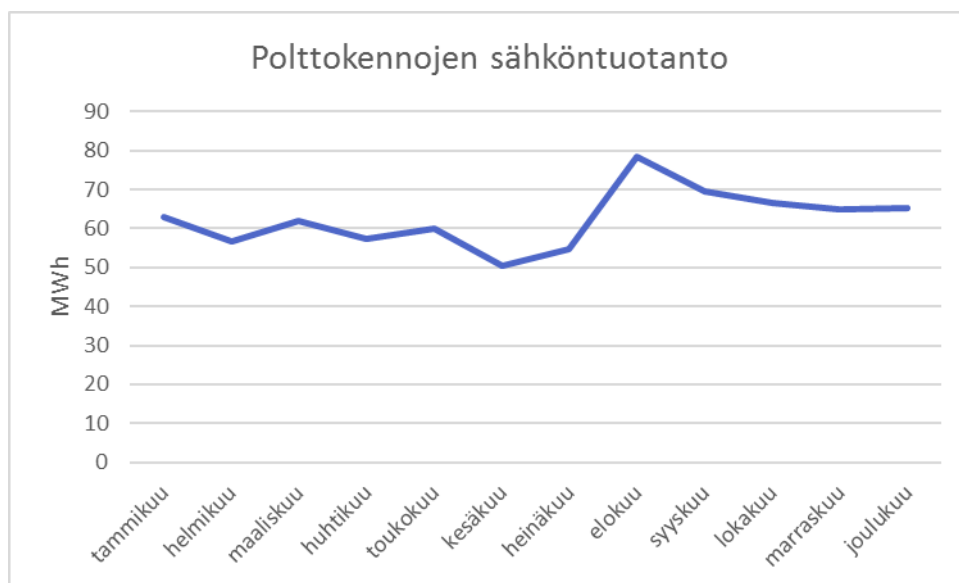
**KUVIO 7. Aurinkopaneelien sähköntuotanto kuukausikohtaisesti**

Polttokennoilla tuotetaan sähköenergiaa 749 MWh (kuvio 8). 86 % tuotetusta sähköenergiasta kulutetaan jäähallilla ja loput 14 % myydään eteenpäin. Polttokennoista syntyy ylituotanto eniten kesä- ja heinäkuussa, kun aurinkopaneelit tuottavat paljon sähköä ja jäähallin kulutus on pienimmillään. Ylituotantoa voidaan pienentää sammuttamalla polttokennot tai toinen niistä siksi aikaa, kun jäähallin sähkönkulutus on pientä.



**KUVIO 8. Polttokennojen sähköntuotanto vuoden aikana**

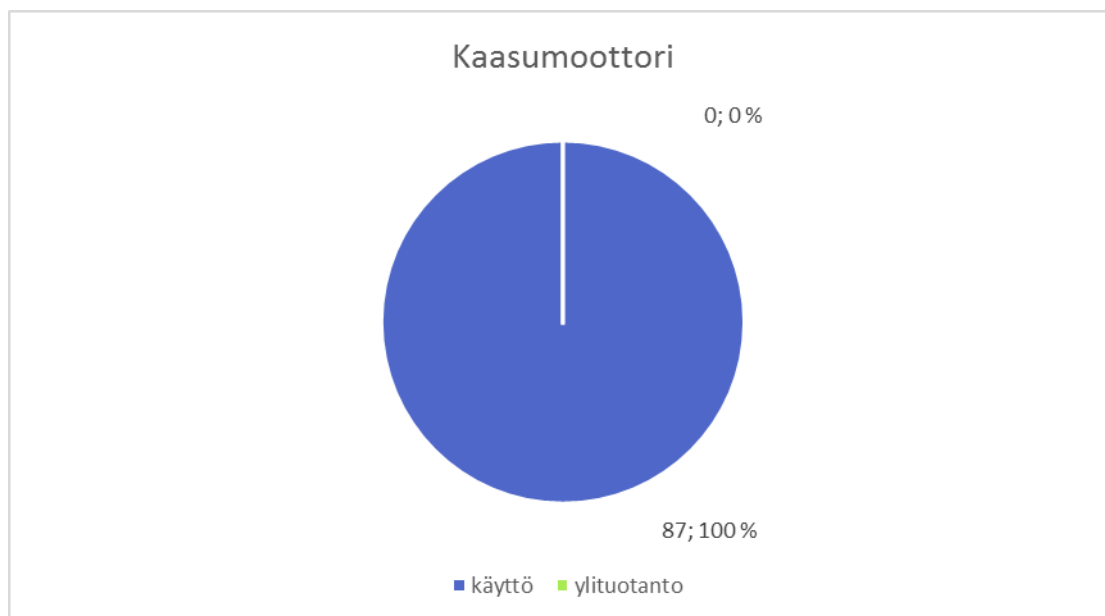
Polttokennot ovat koko ajan päällä vähintään puolella teholla eli jatkuva tuotanto on vähintään 58 kWh. Kuukaudessa, jossa on 30 vuorokautta, tuotanto on vähintään 41 760 kWh eli 41,76 MWh. Kuviosta 9 nähdään, että polttokennoja käytetään jokaisen kuukautena enemmän kuin 50 %:in teholla. Polttokennoja ei käytetä täydellä teholla koko ajan, koska toisinaan aurinkopaneelit kattavat suuren osan jäähallin sähkönkulutuksesta eikä polttokennoilla haluta tuottaa ylimääräistä sähköä. Sähkönkulutuksen elo- ja syyskuun piikki näkyy myös polttokennojen tuotannossa.



**KUVIO 9. Polttokennojen sähköntuotanto kuukausitasolla**

Kaasumoottorin sähköntuotanto on 87 MWh ja 100 % tuotetusta sähköstä käytetään jäähallilla (kuvio 10). Kaasumoottori ei tuota ylituotantoa mitoituksen takia. Polttokennojen yhteisteho on 116 kW ja niitä voidaan käyttää puolella teholla eli säätää alaspäin 58 kW. Kaasumoottorin koko on 100 kW ja sitä voidaan käyttää puolella teholla eli 50 kW, joten polttokennojen tehoa pienentämällä ei synny ylituotantoa, kun kaasumoottori ja polttokennot ovat molemmat käytössä.





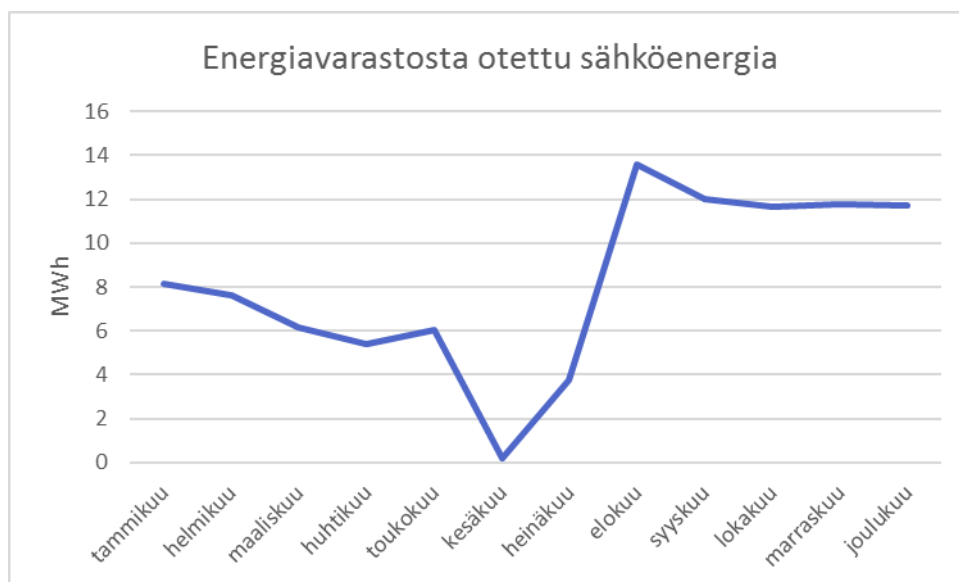
**KUVIO 10. Kaasumoottorin sähköntuotanto vuoden aikana**

Kaasumoottori käynnistetään aina, kun sille on tarvetta. Kaasumoottorin sähköntuotanto seuraa tarkasti sähkönkulutusta (kuvio 11). Kesällä, sähkönkulutuksen ollessa pientä ja aurinkopaneelien sähköntuotannon suurta, kaasumoottoria ei käytetä juuri lainkaan. Elokuussa on käytössä piikki, kun jäähallin sähkönkulutus nousi huomattavasti.



**KUVIO 11. Kaasumoottorin sähköntuotanto kuukausitasolla**

Energiavarastosta otettavan sähköenergian kuvaaja (kuvio 12) on päinvastainen aurinkopaneelien kuvaajalle. Kun aurinkopaneelit eivät tuota sähköä, täytyy käyttää enemmän kaasumoottoria ja kaasumoottorin käynnistyksen ajan sähköenergia otetaan energiavarastosta. Myös sähköenergian tarpeen aurinkopaneelien ja polttokennojen sähköntuotannon jälkeen ollessa alle 60 kW/tunti, käytetään energiavarastoa.



**KUVIO 12. Energiavarastosta otettu sähköenergia kuukausitasolla**

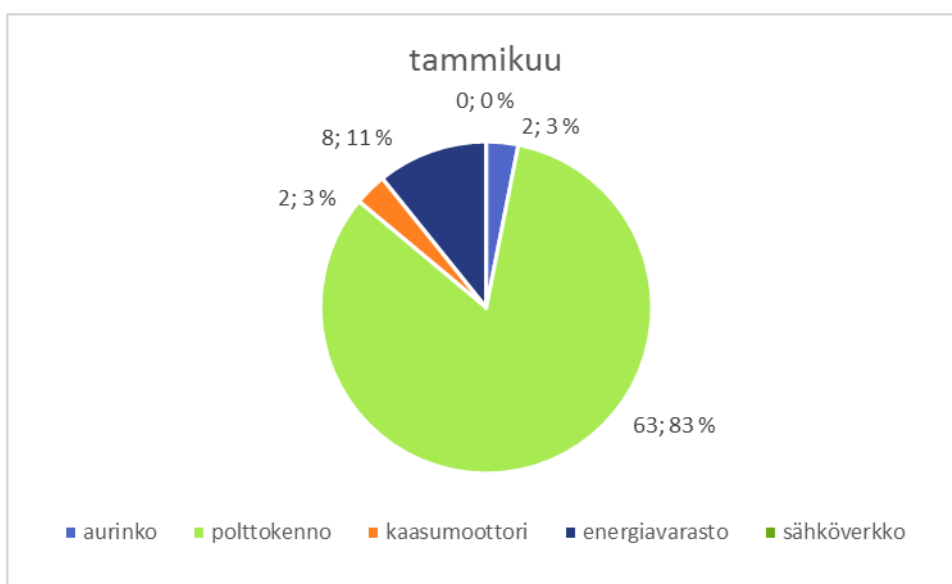
Sähköverkosta otetaan sähköenergiaa hyvin vähän. Käyttöä on lähinnä elo- ja syyskuussa, kun jäähallin sähkönkulutuksessakin on piikki (kuvio 13). Tämä osa sähkönkulutuksesta asiakkaan tulisi pystyä tulevaisuudessa itse joustamaan.



**KUVIO 13. Sähköverkosta otettu sähköenergia kuukausitasolla**

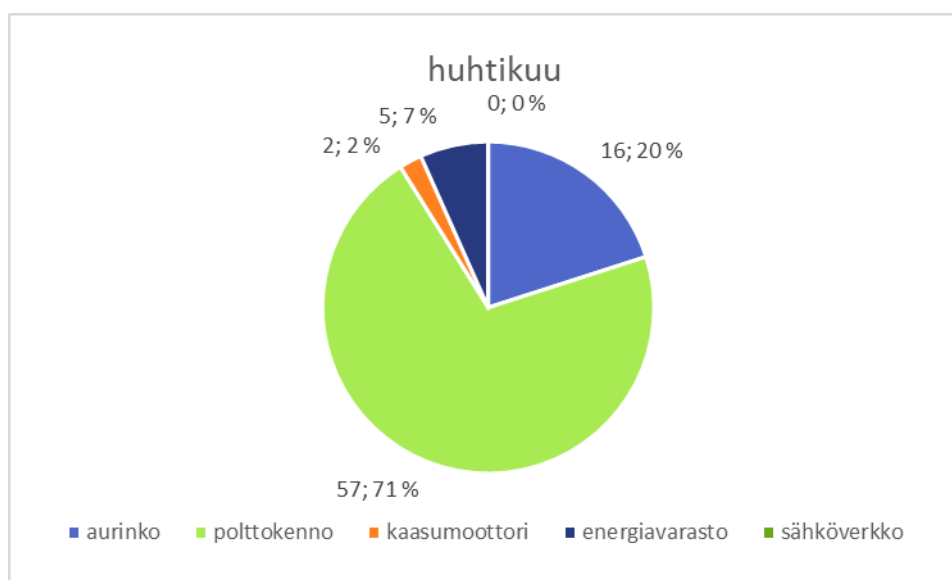
## 8.7 Sähköntuotanto eri vuodenaikoina

Eri vuodenaikoina tuotannon rakenne on hieman erilainen, koska säätilat vaihtelevat. Talven kuukausista otetaan esimerkiksi tammikuu. Tammikuussa jäähallin sähkönkulutus oli 68 MWh ja sähköä tuotetaan 76 MWh (kuvio 14). Tammikuussa vain 3 % sähköenergiasta tuotetaan aurinkopaneeleilla, joten muiden tuotantotapojen osuus on huomattavasti suurempi. Polttokennot hoitavat 83 % sähköntuotannosta ja kaasumoottorin osuus on 3 % sähköntuotannosta, yhteensä 85 % sähköenergiasta tuotetaan siis kaasumaisista energianlähteistä. Energiavaraston osuus on 11 % ja sähköverkon alle prosentin.



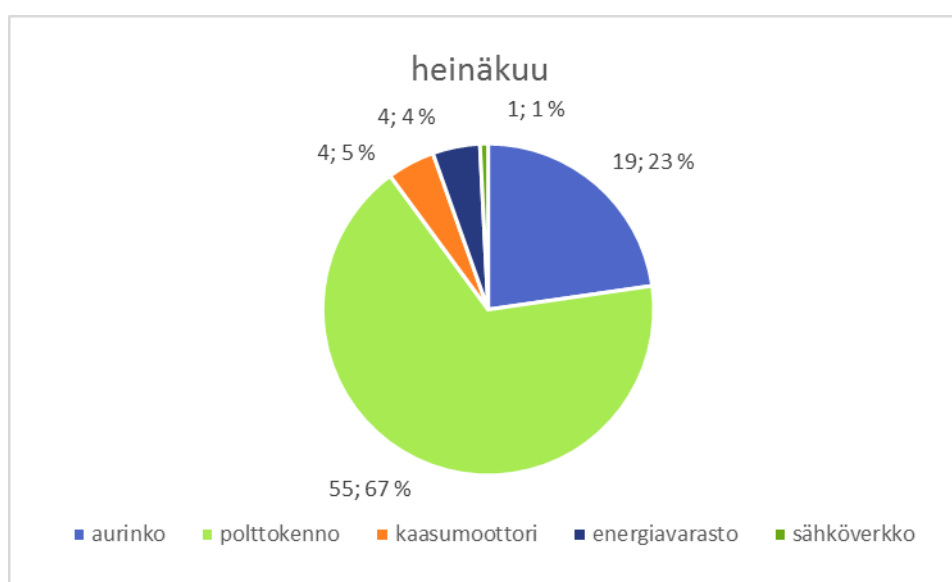
**KUVIO 14. Tammikuun sähköenergian tuotanto tuotantotavoittain**

Kevätkuukausista tarkastellaan huhtikuuta. Huhtikuussa sähkönkulutus oli 69 MWh ja sähköntuotantoa on 81 MWh (kuvio 15). Aurinkopaneeleilla tuotetaan 20 % sähköenergiasta. Polttokennoilla tuotetaan 71 % ja kaasumoottorilla 2 % sähköstä eli kaasulla tuotetun energian osuus on 73 %. Energiavarastosta otetaan 7 % sähköenergiasta ja sähköverkosta alle prosentti.



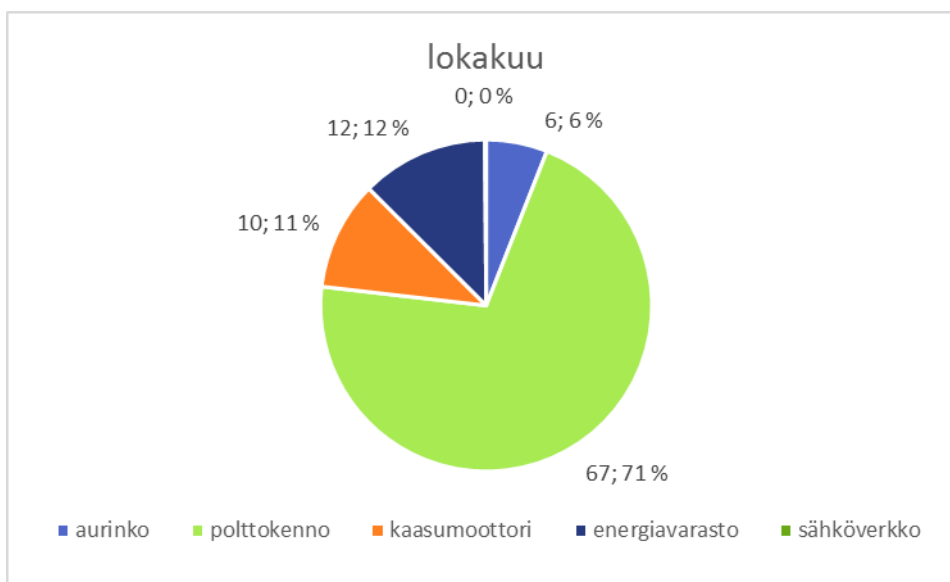
**KUVIO 15. Huhtikuun sähköenergiantuotanto tuotantotavoittain**

Kesäkuukausista tarkastellaan heinäkuuta (kuvio 16). Heinäkuussa jäähallin sähkönkulutus oli 55 MWh ja sähköntuotanto 82 MWh. Aurinkopaneeleilla tuotetaan 23 % sähköenergiasta. Polttokennojen osuus sähköntuotannosta on 67 % ja kaasumoottorin 5 % eli kaasusta tuotetun sähköenergian osuus on yhteensä 72 %. Energiavaraston osuus on 4 % ja sähköverkon 1 %.



**KUVIO 16. Heinäkuun sähköenergiantuotanto tuotantotavoittain**

Syyskuukausista tarkastellaan lähemmin lokakuuta (kuvio 17). Lokakuussa jäähallin sähkönkulutus oli 87 MWh ja sähköntuotanto 94 MWh. Aurinkopaneeleilla tuotetaan 6 % lokakuun sähköntuotannosta. Polttokennoilla tuotetaan 67 % ja kaasumootorilla 11 % sähköenergiasta eli kaasulla tuotetaan 78 % energiasta. Energiavaraston osuus on 12 % ja sähköverkon alle prosentin.



**KUVIO 17. Lokakuun sähköenergiantuotanto tuotantotavoittain**

Jokaiselle vuodenajalle laskettiin tuloksista keskimääräinen tuotanto-osuus kullakin sähköenergiantuotantotavalla (taulukko 6). Tuloksista nähdään, että aurinkopaneelien osuus talvella on hyvin vähäinen ja kesällä huomattavasti suurempi. Yllättävää on se, että keväällä aurinkopaneelien tuotannon prosenttiosuus on suurempi kuin kesällä. Tarkasteltavan vuoden osalta tämä selittyy sillä, että elokuussa kulutus on ollut huomattavasti suurempaa kuin muina kuukausina ja silloin aurinkopaneelien teho ei ole riittänyt vaan on tarvittu enemmän kaasumoottoria.

**TAULUKKO 8. Keskimääräiset tuotanto-osuudet eri vuodenaikoina**

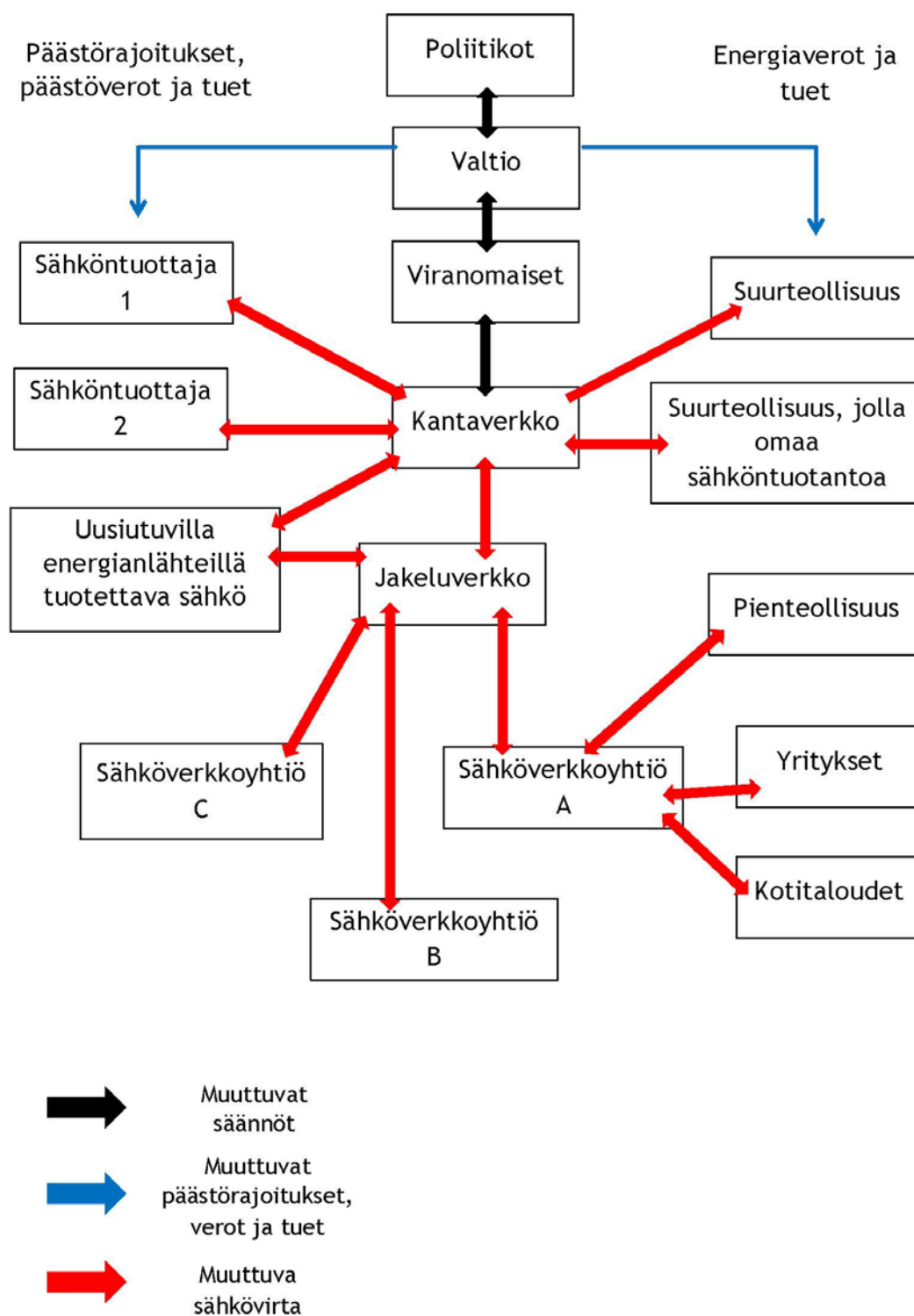
	talvi	kevät	kesä	syksy
aurinkopaneelit	3 %	19 %	17 %	6 %
polttokenno	80 %	72 %	63 %	69 %
kaasumoottori	6 %	2 %	11 %	12 %
energiavarasto	12 %	7 %	6 %	12 %
sähköverkko	0 %	0 %	3 %	0 %

## 9 SÄHKÖMARKKINAT

### 9.1 Markkinoihin vaikuttavat tekijät

Sähkömarkkinat on monimutkaiset ja markkinoihin vaikuttaa useat eri tahot. EU luo osan säädöksistä ja tämän lisäksi poliitikot ja valtio luovat alaa koskevia sääntöjä ja lakeja. Erityisesti sähkömarkkinoita koskevat päästörajoitukset, päästöverot, energiatuet ja -verot. Viranomaiset valvovat sääntöjen noudattamista ja myöntävät lupia erilaisille projekteille.

Markkinoilla toimii useita sähköntuottajia, jakeluverkkoyhtiöitä, sähköyhtiöitä ja asiakkaita. Suomessa on paljon sääntelyä ja eri toimijoita koskevat erilaiset säännöt (kuva 7). Tämä tekee markkinoista jäykät ja uusien sähköntuotantotapojen kehittäminen on vaikeaa. Sääntelyä tulisi purkaa, jotta sähkömarkkinat voisivat kehittyä. Tämä toive käy ilmi myös Suomen kantaverkkoyhtiön, Fingridin, 17.5.2016 julkaisemasta ”Sähkömarkkinat korjauksen tarpeessa – mitä voimme tehdä?” keskustelupaperista. Sähkömarkkinat ovat murroksessa ja myös päättäjien tulee reagoida tähän.



**Kuva 7. Sähkömarkkinoihin vaikuttavat toimijat (mukaillen Power supply challenges, Jacob Klimstra, 2014 s.23)**

Tällä hetkellä Suomessa esimerkiksi tuulivoimaa tuetaan. Tuulivoiman tukeminen alkoi 2011, kun uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuki astui voimaan. Tuotantotuki koskee myös metsähakkeeseen, biokaasuun ja puupolttoaineeseen perustuvaa

sähköntuotantoa. Tämä aiheuttaa sen, että esimerkiksi aurinkosähkölle on haastavaa olla taloudellisesti kilpailukykyinen muihin tuotantotuettuihin uusiutuviin energianlähteisiin perustuviin sähköntuotantotapoihin verrattuna. Sääntely muuttuu jatkuvasti, tukijärjestelmät ja tuettavat tuotantomuodot voivat muuttua. Tämä hankaloittaa investointien tekemistä pitkällä tähtäimellä.

## 9.2 Sähkömarkkinoiden murros

Sähkömarkkinat ovat murroksessa. Koko ajan lisääntyvä hajautettu tuotanto aiheuttaa haasteita nykyiselle järjestelmälle. Aurinko- ja tuulivoima ovat säästä riippuvaisia, joten tuotantoa on hankala ennustaa. Tuulivoimatuottajien täytyy ennustaa tulevan vuorokauden sähköntuotantotasoa tunti tunnilta. Ennustamisessa sääennusteilla on merkittävä rooli, joten tämä on luonut tarpeeksi sääennusteita tarjoaville yrityksille uudet markkinat.

Vaihteleva tuotanto tarvitsee tueksi säädettävää kapasiteettia. Perinteiset tehoreservit, kuten lauhdevoimalat, ovat taloudellisesti kannattamattomia ja voimaloita suljetaan. Tehoreservien väheneminen voi johtaa sähkön hinnan nousuun huippukulutuksen aikana tai jopa sähkökatkoihin. Sähkön toimitusvarmuus tulee turvata jollakin tavalla. Yksi ratkaisu on laskea säätösähkö- ja tehoreservimarkkinoille osallistumisen tehorajaa. Fingridin (2017) mukaan uusi asia markkinoilla on aggregaattorit eli yritykset, jotka keräävät yhteen pieniä yksiköitä ja osallistuvat sitä kautta markkinoille. Aggregaattorien yhteen keräämiä yksiköitä voidaan kutsua virtuaalivoimalaitoksiksi. Esimerkiksi Saksassa vastaavanlainen toiminta on jo yleistä.

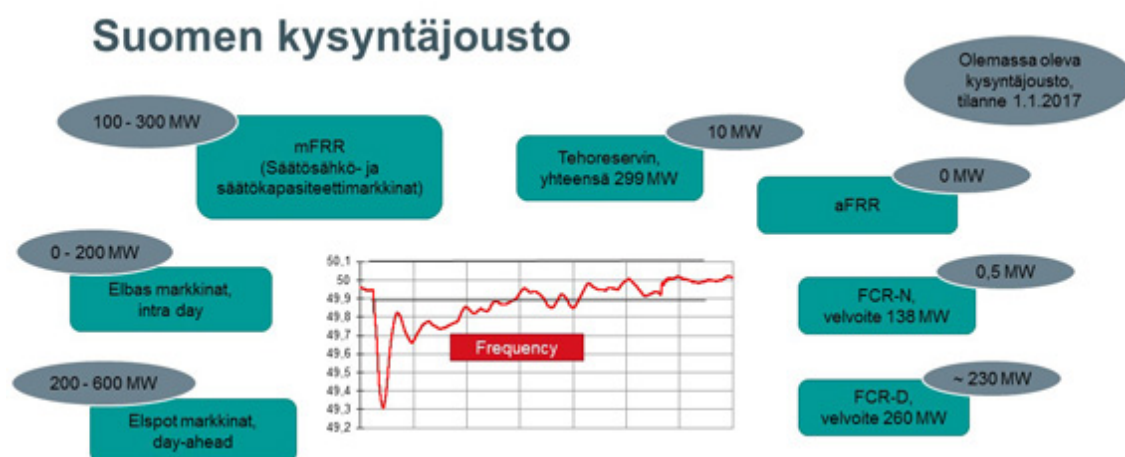
Sähkön toimitusvarmuus voisi olla erilainen eri kuluttajaryhmille ja kohteet voitaisiin priorisoida tärkeyden mukaan. Kuluttajalla voisi olla aiempaa aktiivisempi rooli markkinoilla. Esimerkiksi kulutushuippujen aikana kuluttaja voisi vähentää sähkönkulutusta siten, että lämmitys tai vesivaraaja olisi pois päältä hetken aikaa. Toisaalta jos on omaa sähköntuotantoa, sen voisi syöttää verkkoon. Myymällä sähköä tai olemalla tehoreservinä, saisi tuloja ja sillä tavalla kannustettaisiin kuluttajaa osallistumaan sähkömarkkinoille.



### 9.3 Kysyntäjousto

”Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkönkäytön siirtämistä korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai käytön hetkellistä muuttamista tehotasapainon hallinnan tarpeisiin. ” (Fingrid. Kysyntäjousto 2017.)

Ydinvoima ja uusiutuva energia ovat joustamaton tuotantoa. Kun joustamaton tuotanto verkossa lisääntyy, tarvitaan vastapainoksi joustoa. Aiemmin suurteollisuuden kuormat ovat mahdollistaneet jouston. Nyt kuluttajan oma pientuotanto voidaan ottaa avuksi verkon tasapainottamisessa. Suunniteltavassa järjestelmässä asiakas voisi joustaa esimerkiksi valaistusta tai ilmanvaihtoa säätämällä. Marjamäkeen suunniteltava koko järjestelmä voisi osallistua markkinoille esimerkiksi ison akuston voimin. Kuvassa 8 on esitetty Fingridin erilaiset kysyntäjoustomarkkinat. (Fingrid. Kysyntäjousto 2017.)



**KUVA 8. Fingridin kysyntäjoustomarkkinat (Fingrid. Kysyntäjousto 2017.)**

## 10 POHDINTA

Tavoitteena oli rakentaa toimiva laskentamalli sähköntuotantojärjestelmän mitoittamista varten. Kaikki laskenta tässä työssä on tehty Lempäälän jäähallin kulutustiedoilla mutta samalla on otettu huomioon se, että laskennan voi helposti toteuttaa muillakin kulutustiedoilla, kuten tulevaisuudessa Marjamäen teollisuusalueen sähkönkulutuksella. Sääolot simuloitiin siten, että aurinkopaneelien huipunkäyttöajaksi tuli 808 h. Aurinkopaneelien huipunkäyttöaika on lähellä keskivertoa vuotta. Ilmastomuutoksen vaikutuksesta Suomen sääolot saattavat muuttua radikaalisti ja tällaisessa tilanteessa laskentaa tulee päivittää vastaamaan vallitsevia olosuhteita. Myös jonkin uusiutuvan energiamuodon nykyisestä poikkeava taloudellinen tukemin voi aiheuttaa mitoitukselle päivittämisen tarpeen. Esimerkiksi aurinkopaneelien tukeminen saattaisi muuttaa tilannetta niin, että ylimitoitus olisi järkevää.

Kokeilut erilaisten kohteiden sähkönkulutuksella osoittivat, että mitoitus on helpointa tehdä kohteeseen, jossa sähkönkulutus on tasaista eikä isoja piikkejä esiinny. Akuston hyöty pelkästään aurinkoenergian varastoinnissa huomattiin hyvin pieneksi verrattuna teknologian hintaan. Järkevintä on ladata akustoa kaikista tuotantotavoista syntyvällä sähkön ylituotannolla sekä akuston ollessa riittävän suuri, hyödynnetään sitä sähkömarkkinoilla toimimiseen.

Lempäälän jäähallin sähkönkulutus vuonna 2015 oli 944 MWh. Järjestelmän tuottaman sähköenergian määrä olisi laskennallisesti ollut 1065 MWh eli 121 MWh suurempi kuin energian tarve. Prosentteina ylituotantoa olisi syntynyt 11 %. Jäähallin tapauksessa energiavarastona käytettiin sähköverkkoa mutta esimerkiksi Marjamäen teollisuusalueelle suunnitellaan akustoa. Syntyvällä ylituotannolla voidaan ladata energiavarastoa, jäähallin tapauksessa käyttämättömän ylituotannon osuus olisi pienentynyt 49 MWh:iin eli ylituotannon osuus olisi ollut enää 5 % kokonaisuudesta.

Aurinkopaneelit tuottavat sähköä parhaiten kevät- ja kesäaikana ja sopivat siksi kohteeseen, jossa sähkönkulutus painottuu edellä mainittuihin aikoihin. Jäähallin kohdalla aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa 12 % sähköenergiasta. Ylituotantoa aurinkopaneeleista syntyy 16 MWh eli 13 % niiden sähköntuotannosta. Ylituotanto ajoittuu kesäkuukausille,

kun jäähallin sähkönkulutus on pientä ja aurinkopaneelien sähköntuotanto parhaimmillaan. Jos paneelientän koko kasvatetaan, ylituotannon osuus kasvaa ja tällä hetkellä se ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Tällä hetkellä polttokenno ei hintansa puolesta ole taloudellisesti kannattavin investointi sähköntuotantoon, kuitenkin tulevaisuudessa hinnat todennäköisesti tulevat laskemaan. Tähän järjestelmään on haluttu ottaa polttokenno silti mukaan, koska halutaan tukea polttokennojen teknologian kehitystä ja niiden yleistymistä. Tässä laskennassa käytetty polttokenno on kokoluokaltaan pieni, jos ajatellaan jakeluverkon näkökulmasta. Lempäälän jäähallilla voidaan laskelman mukaan tuottaa noin 70 % sähköenergiasta kahdella polttokennolla. Polttokennojen sähköntuotannosta ylituotantoa on 14 % eli 105 MWh. Ylituotanto johtuu siitä, että polttokennoja tulee käyttää aina vähintään puolella teholla ja sähköenergian tarve ei joka hetki ole niin suuri.

Lempäälästä löytyy kattava kaasuverkosto, joten sen hyödyntäminen nähtiin järkevänä ja luonnollisena. Tästä syystä järjestelmään päätettiin ottaa myös kaasumoottori tasaamaan suuria kulutushuippuja. Kaasumoottorit ovat jo pitkään käytössä ollutta teknologiaa ja sitä kautta toimiviksi todettuja ja taloudellisesti kannattavia sähköenergiantuotannossa. Järjestelmän kaasumoottori on 100 kW suuruinen ja laskelmien mukaan Lempäälän jäähallin tapauksessa suunnitellun järjestelmän osana kaasumoottorilla tuotetaan 8 % sähköenergiasta. Kaasumoottorin mitoitus on niin optimaalinen, ettei ylituotantoa synny lainkaan.

Vuodenaikojen välillä on suuria eroja siinä, missä suhteessa sähköenergiantuotantotapoja käytetään. Aurinkopaneelien osuus koko sähköntuotannosta vaihtelee 3-19 % välillä, suurimmillaan osuus on keväällä ja kesällä. Polttokennojen osuus sähköntuotannosta vaihtelee 63-80 % välillä, suurimmillaan osuus on talviaikaan aurinkopaneelien sähköntuotannon ollessa vähäistä. Kaasumoottoreiden osuus sähköntuotannosta vaihtelee 2-12 % välillä ja suurimmillaan se on syksyllä. Energiavaraston osuus taas on 6-12 % välillä, eniten sitä käytetään syksyllä ja talvella. Sähköverkosta otettavan sähköenergian osuus kokonaisuudesta vaihtelee 0-3 % välillä ja suurin tarve osuu kesälle.

Jos koko järjestelmä rakennetaan yhtä kiinteistöä varten kiinteistön omalle tontille, rakentamisessa ja lupa-asioissa ei pitäisi olla suuria haasteita. Jos taas halutaan rakentaa isompaa aluetta, kuten Marjamäen teollisuusaluetta, palveleva järjestelmä, rakentaminen

edellyttää tiettyjen haasteiden ratkaisemista. Mikroverkkoja koskevia sääntöjä ei vielä ole Suomessa, koska ei ole laajoja mikroverkkojakaan. Tästä syystä on erittäin tärkeää rakentaa pilottikohde ja samalla kehittää mikroverkkoja koskevia sääntöjä. Tällä hetkellä yksi vaihtoehto on hakea suljettua sähköverkkolupaa Energiavirastolta. Vuonna 2016 Suomessa oli kaksi suljettua sähkönjakeluverkkoa, verkkojen haltijoina toimivat Karhu Voima Verkko Oy ja KED Oy.

Järjestelmän hallinta on monimutkaisempaa kuin perinteisessä sähköverkossa. Suunniteltavassa järjestelmässä tehoja liikkuu moneen suuntaan ja monesta eri lähteestä. Vikatilanteissa syntyviä ilmiöitä tullaan tutkimaan yhteistyössä Tampereen Teknillisen yliopiston kanssa.

Tuotantolaitteiden hankintakustannukset ovat suuret. Polttokennojen hinnat eivät ole vielä kilpailukykyisiä. Polttokennojen hankintakustannukset tulevat laskemaan sitä mukaa, kun niitä saadaan myytyä kaupalliseen käyttöön. Kaupallinen käyttö mahdollistaa massatuotannon ja esimerkiksi aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet vastaavista syistä viime vuosina huomattavasti. Kaasumoottoreiden kohdalla taloudellisinta olisi ostaa yksi iso kaasumoottori useamman pienemmän kaasumoottorin sijaan. Monen pienemmän yksikön hankkimista puoltaa järjestelmän parempi säädeltävyys ja hajauttamisen kautta lisääntyvä toimintavarmuus.

Jotta voidaan rakentaa liiketoimintaa suunniteltavan energiantuotantojärjestelmän ympärille, on luotava selkeä kokonaiskonsepti ja hinnoittelu energialle. Konseptia on helppo myydä asiakkaalle ja mahdollisesti viedä myyntiin ulkomaille asti. Energian hinnoitteluperusteet voisivat erota perinteisistä, sillä esimerkiksi aurinkopaneelit eivät aiheuta polttoainekustannuksia, paneeleissa on vain suuri alkuinvestointi.

Sähköverkkoyhtiöiden kanssa tulee miettiä uusia toimintamalleja siten, että järjestelmät tukisivat toinen toisiaan eivätkä kilpailisi keskenään. Mikroverkko voisi toimia varavoimana jakeluverkkojen häiriötilanteissa ja vastaavasti huippukulutuksen aikaan jakeluverkosta voitaisiin ostaa sähköä mikroverkon tarpeisiin.

Toimintavarmuus on järjestelmän ehdoton vahvuus. Sähköntuotantotapoja on kolme erilaista, sähköä varastoidaan akkuun ja erittäin huonossa tilanteessa on mahdollista ostaa

sähköä valtakunnan sähköverkosta. Yhden tuotantoyksikön vikaantumista ei todennäköisesti asiakas edes huomaa. Itse sähköverkko tulee rakentaa siten, ettei sen katkeaminen yhdestä kohtaa haittaa asiakkaita joka puolella verkkoa.

Järjestelmässä energiantuotanto tuodaan lähelle asiakasta. Näin energiatehokkuus paranee ja asiakkaan mahdollinen oma energiantuotanto, esimerkiksi aurinkopaneelit rakennuksen katolla, voidaan hyödyntää järjestelmässä. Pienille tuotantoyksiköille on helppompaa löytää sijoituspaikat. Tuotantoyksiköt ovat liikuteltavissa tarpeen mukaan eikä kiinteitä isoja laitoksia tarvitse rakentaa. Maisemahaitatkin jäävät vähäisemmiksi kuin perinteisessä, isoissa laitoksissa tapahtuvassa energiantuotannossa.

Polttokennojen käyttöönotto tässä mittakaavassa vie osaltaan eteenpäin Power to Gas -hanketta. Tulevaisuudessa aurinkopaneeleilla tuotettu ylimääräinen energia voidaan muuttaa kaasumaiseen muotoon esimerkiksi metaaniksi ja metaania voidaan käyttää polttokennojen energianlähteenä talvella, kun aurinko ei paista. Näin pystytään varastoimaan energiaa pitkäksi aikaa ja hyödyntämään Suomen pitkät kesät energiantuotannossa paremmin.

Toimivan, uudenlaisen ja ympäristöystävällisen energiantuotantojärjestelmän suunnittelu ja rakentaminen edellyttävät sitä, että toimintaa täytyy tukea. Esimerkiksi Suomen valtio tukee vuosina 2016-2018 uusiutuvan energian ja uuden teknologian investointeja yhteensä 100 miljoonalla eurolla. Tuen myöntämisestä päättää Työ- ja elinkeinoministeriö. Seuraava askel järjestelmän kehittämisessä on pilottikohteen rakentaminen ja käyttöönotto.

## LÄHTEET

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S. & Saari, P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. Espoo. VTT Tiedotteita. Luettu 19.7.2016. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Alanen, T. 2014. Kaasumoottorin pakokaasun pienhiukkasten fysikaaliset ominaisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Chowdhury, S., Chowdhury, S. P. & Crossley, P. 2009. Microgrids and active distribution networks. London. Institution of Engineering and Technology.

Davide, A. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs. Boston. Artech House Books.

Energiateollisuus. 2016. Kysyntäjousto. Luettu 13.1.2017. [http://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kysyntajousto](http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kysyntajousto)

Energiateollisuus. 2016. Sähköntuotanto. Luettu 1.8.2016. <http://188.117.57.25/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>

Fingrid Oyj. 2017. Kysyntäjousto. Luettu 2.3.2017. <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Sivut/default.aspx>

Fingrid Oyj. 2008. Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä. Luettu 27.7.2016. [http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCtaajuuden\\_yllapito.aspx](http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCtaajuuden_yllapito.aspx)

Fontell, E. toimitusjohtaja. 2016. Puhelinhaastattelu. 5.8.2016. Haastattelija Aarnio, L.

FuelCellToday. 2016. PEMFC. Luettu 8.8.2016. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>

Gasum Oy. 2016. Maakaasun siirtoverkosto Suomessa. Luettu 3.8.2016. <http://gasum.fi/Kaasutietoutta/Kaasuverkostot/>

Halinen, M. 2007. AS.84-3134 Energiatekniikan automaatio. Polttokennot. Luettu 9.8.2016. <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen107.pdf>

Helsinki University of Technology. n.d. Mitä polttokennot ovat?. Luettu 8.8.2016. <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/fc-kuvaus.html>

Helsinki University of Technology. n.d. Sulakarbonaattipolttokenno ja kiinteäoksidi-polttokenno (MCFC & SOFC). Luettu 8.8.2016 [http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/mcfc\\_sofc.html](http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/mcfc_sofc.html)

Huomo, A. 2016. Kaasun ominaisuudet ja palaminen. Kaasualan perusteet ja käytön valvonta -luentomateriaali. Gasum Oy.

Kauranen, P., Koivula, J., Laurikko, J., Solin, J. & Törrönen, K. 2013. Vetytiekartta – Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle. Tutkimusraportti VTT-R-02257-13. Luettu 9.8.2016. <http://www.tekes.fi/globalassets/global/nyt/uutiset/vetytiekartta.pdf>

Klimstra, J. 2014. Power supply challenges. Vaasa. Arkmedia.

MIT Electric Vehicle Team. 2008. A Guide to Understanding Battery Specifications. Luettu 19.7.2016. [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf)

Motiva. 2016. Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Luettu 14.6.2016. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/jarjestelman\\_valinta/tarvittava\\_laitteisto/verkkoon\\_liitetty\\_aurinkosahkojarjestelma](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma)

Sarvaranta, A. 2010. Selvitys älykkäistä sähköverkoista ja niiden kehityksestä Euroopan unionissa ja Suomessa. Aalto-yliopisto. Energiatekniikan laitos. Diplomityö

Suomen biokaasuyhdistys. 2016. Biokaasu. Luettu 8.8.2016. <http://www.biokaasuyhdistys.net/tietoa-biokaasusta/>

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. 2016. Cleantech-teknologiat lisäävät työllisyyttä ja parantavat vaihtotasetta. Luettu 8.8.2016. [http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/Cleantech-teknologiat\\_lisaavat\\_tyollisyytta\\_ja\\_parantavat\\_vaihtotasetta.pdf](http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/Cleantech-teknologiat_lisaavat_tyollisyytta_ja_parantavat_vaihtotasetta.pdf)

Tahkokorpi, M. 2016. Aurinko energia Suomessa. Helsinki. Into kustannus.

Työterveyslaitos. 2016. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet – turvallisuusohjeet (OVA-ohje). Luettu 8.8.2016. <http://www.ttl.fi/ova/vety.html>

Vesa, J. 2016. Aurinko- ja tuulisähkön tuotantoprofiilit ja aurinkosähkön tuntitason enustaminen. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.