



SAAREKEKÄYTTÖISEN MIKROVOIMALAITOKSEN SUUNNITTELU

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Väinö Räisänen

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen

Tutkijaopettaja Lasse Laurila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Väinö Räisänen

Saarekekäyttöisen mikrovoimalaitoksen suunnittelu

Sähkötekniikan diplomityö

65 sivua, 27 kuvaa ja 6 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen

Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Avainsanat: mikrovoimalaitos, uusiutuva energia, energiavarastointi, vety

Tutkimustyön tavoitteena oli suunnitella saarekekäyttöinen mikrovoimalaitos, jonka sähköntuotanto perustuu uusiutuvan energian tuotantomuotoihin, ja joka kykenee ympärivuotiseen, katkottomaan sähkönsyöttöön. Työssä luodaan linjaukset, joiden avulla mikrovoimalaitos voidaan suunnitella eri maantieteellisiin sijainteihin ja joilla toimintavarmuus voidaan taata. Koska eri kohteissa energiantarve ja tuotannon suuruus voivat vaihdella paljon, suunnittelussa otetaan huomioon myös mikrovoimalaitoksen skaalattavuus.

Saarekekäyttöinen mikrovoimalaitos voidaan sijoittaa kohteisiin, jonne sähköntoimitus on muuten haastavaa, mahdotonta tai kannattamatonta, kuten harvaan asutuille alueille, luodoille ja etäisille tai väliaikaisille sääasemille.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Väinö Räisänen

Design of an Isolated Operation Small-Scale Power Plant

Master's thesis

2022

65 pages, 27 figures and 6 tables

Examiners: Professor Juha Pyrhönen

Associate professor Lasse Laurila

Keywords: small scale power plant, renewable energy, hydrogen, energy storage

The objective of this research was to design a small-scale power plant, which gathers its energy using renewable energy production systems and which is able to operate and supply energy year-round without connection to electric grid. In this work also design criteria, which can be used to design the system to any geographical location are presented. Because annual energy production and energy needs can differ drastically between different locations, also scalability is considered in the design process.

Isolated operational small-scale power plant can be built to places where transferring electricity could else be challenging, impossible or economically unfavourable. These places could be, for example, sparsely populated areas, islets, or distant, temporary weather stations.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhyenteet

MPP	Maksimitehopiste (Maximum Power Point)
MPPT	Maksimitehopisteseuranta (Maximum Power Point Tracking)
FF	Täyttökerroin (Fill Factor)
STC	Standardoidut testiolosuhteet (Standard Test Conditions)
DTC	Suora vääntömomenttisäätö (Direct Torque Control)
LFP	Litium-rautafosfaattiakku
NMC	Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttiakku
LTO	Litium-titanaattiakku
DoD	Purkautumissyvyys (Depth of Discharge)
EDLC	Sähkökemiallinen kaksikerroskapasitanssi (Electrochemical Double Layer Capacitance)
PEM	Protoninvaihtokalvo (Proton Exchange Membrane)
AEM	Ioninvaihtokalvo (Anion Exchange Membrane)
GIS	Paikkatietojärjestelmä (Geographical Information System)
ERA5	Tuntitarkka auringon säteilypaineen ja tuulennopeuden säädädata
PVGIS	Aurinkosähkölaskuri (Photovoltaic Geographical Information System)
LCOE	Elinkaarikustannus (Levelized Cost of Energy)
HAWT	Vaaka-akselinen tuuliturbiini (Horizontal Axis Wind Turbine)
VAWT	Pystyakselinen tuuliturbiini (Vertical Axis Wind Turbine)

Symbolit (aurinkovoima)

E_{fot}	fotonin energia
h	Planckin vakio (6.6261×10^{-34} Js)
c	valonnopeus (299 792 458 m/s)
λ	valon aallonpituus
E_g	elektronin virittämiseen vaadittava kaistarakoenergia
U_{oc}	avoimen piirin jännite
I_{SC}	oikosulkuvirta
I_{MPP}	virta maksimitehopisteessä
U_{MPP}	jännite maksimitehopisteessä
P_{MPP}	teho maksimitehopisteessä

Symbolit (tuulivoima)

Ω	mekaaninen kulmanopeus
P	teho
A	tuuliturbiinin pyörähdyspinta-ala
r	tuuliturbiinin lavan pituus
ρ	ilman tiheys
v	tuulenoisuus
C_p	turbiinin tehokerroin
$C_{p\text{max}}$	suurin saavutettavissa oleva tehokertoimen arvo
β	turbiinin lapakulma
λ	turbiinin lavan kärjen nopeussuhde
λ_n	nimellinen turbiinin lavan kärjen nopeussuhde
c_1-c_6	laskentaparametrit turbiinin tehokertoimen laskemiseksi

α	tuuliväänneparametri
H	korkeus maan pinnasta
H_0	referenssikorkeus
z_0	epätasaisuuskerroin

Symbolit (energiavarastot)

E_{EK}	energiavaraston elinkaaren aikana kerätyn energian määrä
C	energiavaraston kapasiteetti
C_{DoD}	purkautumissyvyys
C_{A1}	lyhytaikaisen energiarvaraston kapasiteetti
C_{A2}	pitkäaikaisen, matalapainevetyvaraston kapasiteetti
C_{A3}	pitkäaikaisen, korkeapainevetyvaraston kapasiteetti
S_{LKM}	syklien määrä energiarvaraston elinkaaren aikana
V	tilavuus
n	kaasun moolimäärä
R	moolinen kaasuvakio (8.314 J/(K×mol))
T	kaasun absoluuttinen lämpötila
p	paine
η_{A1}	lyhytaikaisen energiarvaraston hyötysuhde
η_{A2}	pitkäaikaisen, matalapainevetyvaraston hyötysuhde
η_{A3}	pitkäaikaisen, korkeapainevetyvaraston hyötysuhde

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1. Johdanto	9
2. Tuuli- ja aurinkoenergia sekä energiavarastot	10
2.1 Aurinkoenergia.....	10
2.1.1 Aurinkokenno ja -paneeli.....	10
2.1.2 Maksimitehopiste ja säätö.....	16
2.1.3 Auringon säteilypaineen vaihtelu ja standardoidut testiolosuhteet (STC).....	18
2.2 Tuulivoima	19
2.2.1 Tuuli.....	19
2.2.2 Tuuliturbiinien teoriaa	21
2.2.3 Tuulennopeuden teoreettinen arviointi	24
2.3 Energiavarastot.....	26
2.3.1 Litiumioniakut	26
2.3.2 Superkondensaattorit	30
2.3.3 Vety ja polttokennot.....	31
3 Järjestelmän suunnittelu	33
3.1 Sähköenergian tuotannon ennustaminen ja laskelmat.....	33
3.2 Energiantuotannon kausivaihtelut.....	35
3.2.1 Pienikokoisen tuuliturbiinin kannattavuus.....	37
3.2.2 Aurinkopaneelien kannattavuus	37
3.3 Sesonkituotanto ja energiavarastointi	39
3.3.1 Litiumioniakkujen kannattavuus.....	39
3.3.2 Superkondensaattorien kannattavuus.....	40
3.3.3 Vetyvarastoinnin kannattavuus.....	40
3.4 Pitkä- ja lyhytaikainen energianvarastointi	41
3.4.1 Lyhytaikainen energian varastointi.....	42
3.4.2 Pitkäaikainen energian varastointi	42

3.5	Laitetilan lämmitys.....	43
3.6	Laskenta ja järjestelmän mitoittaminen	44
3.6.1	Laskenta	44
3.6.2	Järjestelmän mitoittamisen perusteet	45
3.6.3	Modulaarisuus.....	50
3.7	Järjestelmän mitoittaminen eri sijainteihin	51
3.7.1	Nordkapp, Norja	52
3.7.2	Nivala, Suomi	55
4	Johtopäätökset.....	58
	Lähdeluettelo	60

1. Johdanto

Ihmiskunnassa energian tarve on toistaiseksi kasvanut jatkuvasti. Vuosien saatossa voimantuotantomuodot ovat lisääntyneet ja varsinkin viime aikoina voimantuotannon kasvihuonepäästöjen merkitykseen on kiinnitetty enenevästi huomiota. Hiilen ja öljyn rooli voimantuotannossa on edelleen erittäin suuri, ja siirtymä puhtaampiin voimantuotannon muotoihin on väistämättä hidaskasvu. Maakohtaisesti energiankulutusta tarkasteltaessa voidaan havaita, että kokonaisenergiankulutus on kehittyneissä maissa laskeva, mutta kehittyvien maiden energiantarve nostaa maailmanlaajuisen kokonaisenergiankulutuksen kasvavaksi. Tähän vaikuttavat monet asiat, kuten muun muassa kehittyvien maiden energiatehokkuuden paraneminen sekä entuudestaan korkea energiankulutus asukasta kohden ja kehittyvien maiden historiallisesti kehittyneisiin maihin nähden matalan energiankulutuksen kasvu asukasta kohden asukkaiden keskiluokkaistumisen johdosta sekä tuotannon lisääntyminen. Myös väestönkasvu on kehittyvissä maissa suurta. (Ritchie & Roser, 2021)

Sähköenergian tarve kasvaa nopeammin kuin uusiutuvan voiman tuotanto, ja globaalisti tätä vajetta paikataan edelleen fossiilisilla polttoaineilla toimivilla voimalaitoksilla. Sähköenergian tarve kasvaa etenkin Kiinassa ja Intiassa. Ajurina on osaltaan erinäisten laitteiden sähköistyminen ja tuotantoprosessien automatisoituminen. (IEA, 2021)

Sähköä tarvitaan siis entistä laajemmin eri kohteissa. Syrjäiset ja hankalakulkuiset sijainnit aiheuttavat omat haasteensa erityisesti sähköntoimituksen osalta. Sähköntoimitus voi olla haastavaa tai kannattamatonta, kun käyttöpaikka sijaitsee esimerkiksi pienellä luodolla, saarella, vuoristossa tai kohteessa, joka muuttuu useasti tai on väliaikainen, kuten esimerkiksi tutkimusasema tai vastaava. Tällaisissa kohteissa paikallinen sähköntuotanto omiin tarpeisiin omalla tuotantolaitoksella voi olla kannattavin ratkaisu.

Tutkimustyössä pyritään kehittämään pienikokoinen sähköntuotanto- ja -varastointijärjestelmä, joka hyödyntää uusiutuvan energian tuotantomuotoja kykenee katkeamattomaan sähkönsyöttöön ympärivuotisesti. Työssä tarkastellaan erilaisten ympäristötekijöiden vaikutuksia ja erilaisten olosuhteiden vaatimuksia. Näiden tarkastelujen pohjalta johdetaan ratkaisu, jolla voidaan kaavanmukaisesti optimoida järjestelmä kohteen vaatimusten mukaiseksi.

2. Tuuli- ja aurinkoenergia sekä energiavarastot

Tämän kappaleen tarkoituksena on antaa lukijalle yksityiskohtainen käsitys tuuli- ja aurinkoenergiasta, sekä niiden talteenotosta. Lisäksi käydään läpi työn kannalta oleellisimpien energianvarastointimuotojen perusteet. Näitä ovat litiumioniakustot ja superkondensaattorit sekä vetyvarastointi.

2.1 Aurinkoenergia

Aurinkoenergialla tarkoitetaan yleensä auringon säteilemää energiaa, joka muutetaan sähkö- tai lämpöenergiaksi aurinkokennojen tai -keräimien avulla. Tarkastelemme aurinkoenergiaa tässä vain sähköenergian tuotannon näkökulmasta, jolloin aurinkoenergiasta puhuttaessa tarkoitetaan aurinkokennoilla tuotettua sähköenergiaa.

Maan pinnalle jatkuvasti kohdistuva Auringon säteilyteho on noin 173 000 TW, joka vastaa 10 000-kertaisesti koko maailman energiankulutusta. Yhdelle neliömetrille kohtisuoraan tulevien säteiden teho on noin 1050 W, kun taivas on kirkas. Pinta-alalle kohdistuva säteilyenergia ilmoitetaan säteilypaineena, jonka yksikkö on W/m^2 . (Chandler, 2011) (Explaining Science, 2019) Aurinkoenergia on Maan kannalta puhdas, uusiutuvan energian muoto, jonka suurimmat päästöt Maassa syntyvät aurinkopaneelien tuotannossa. (U.S Energy Information Administration, 2020) Laadukkaiden aurinkopaneelien elinkaari on parhaimmillaan jopa 50 vuotta, eivätkä ne vaadi paljon huoltoa – paneelin pinta tulee kuitenkin silloin tällöin puhdistaa ja kaapelointien kunto tarkastaa. (Powera, 2022) (Motiva, 2022)

2.1.1 Aurinkokenno ja -paneeli

Aurinkokenno on laite, jonka tehtävä on muuttaa auringon säteilyenergiaa sähköksi hyödyntämällä valosähköistä ilmiötä. Valo koostuu kvanteista eli fotoneista, ja kun fotonit osuu puolijohdemateriaalin atomiin ja sen energia on riittävän korkea virittämään elektronin

valenssivyöltä johtavuusvyölle, niin atomin valenssivyölle jää elektronin vajauksesta johtuen elektroniaukko.

Elektronin virittämiseen vaadittavan *kaistarakoenergian* määrä vaihtelee puolijohdemateriaalin mukaan. Jotta elektroni virittyisi pois atomin valenssivyöltä johtavuusvyölle, eli vyöltä, jossa se osallistuu aineen sidosrakenteeseen, kohti vyötä ja tilaa, jossa se liikkuu vapaammin puolijohdemateriaalissa, siihen osuvan fotonin energian suuruuden on oltava suurempi tai yhtä suuri kuin materiaalille määritetty kaistarakoenergia (E_g). Fotonin energia E_{fot} on esitetty yhtälössä

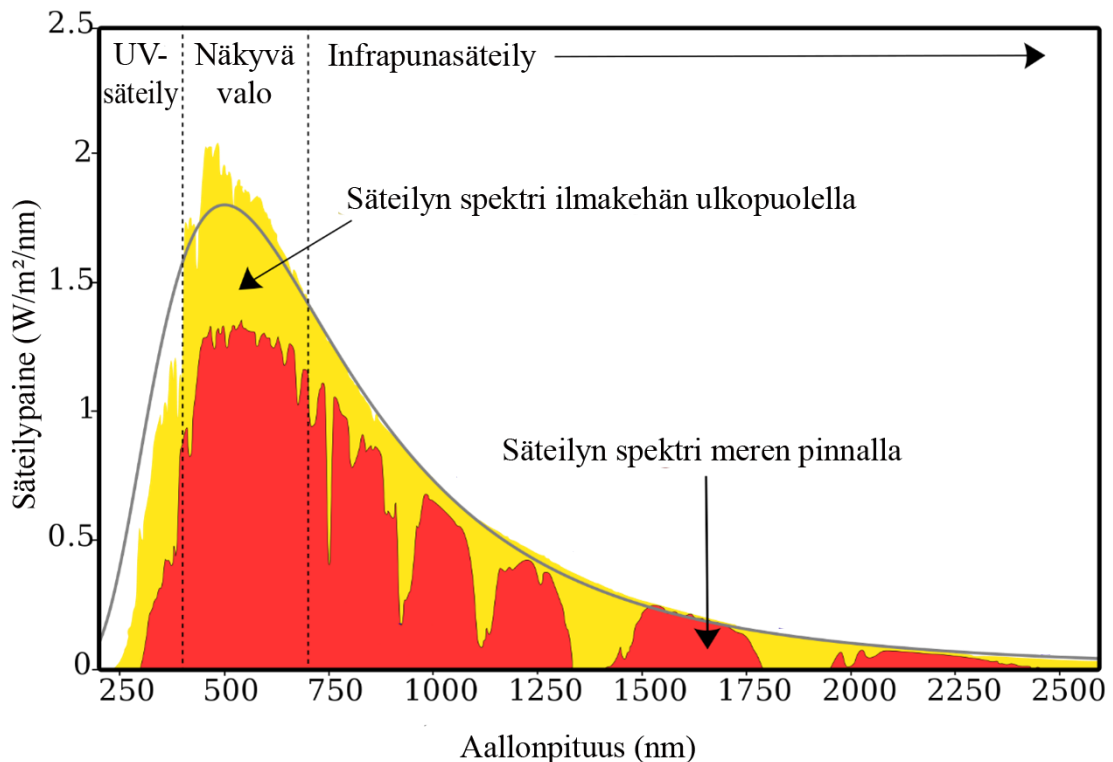
$$E_{\text{fot}} = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Yhtälössä (1) h = Planckin vakio (6.6261×10^{-34} Js), c = valonnopeus (299 792 458 m/s) ja λ = valon aallonpituus. Yhtälöstä voidaan havaita, että fotonin energian määrittää sen aallonpituus ja että energian määrä pienenee aallonpituuden kasvaessa. Jos fotonin energia E_{fot} on suurempi kuin elektronin virittämiseen vaadittava kaistarakoenergia E_g , niin elektroni ”ylivirittyy” tarpeettomasti. Suurin osa ylivirittymisestä haihtuu lämpönä hyvin nopeasti pudottaen elektronin energiatason lähelle johtavuus- ja valenssivyön rajaa. Voidaan siis ajatella, että fotonista saatavan energian hyötysuhde on paras, kun $E_{\text{fot}} = E_g$. (Christiana Honsberg, 2022)

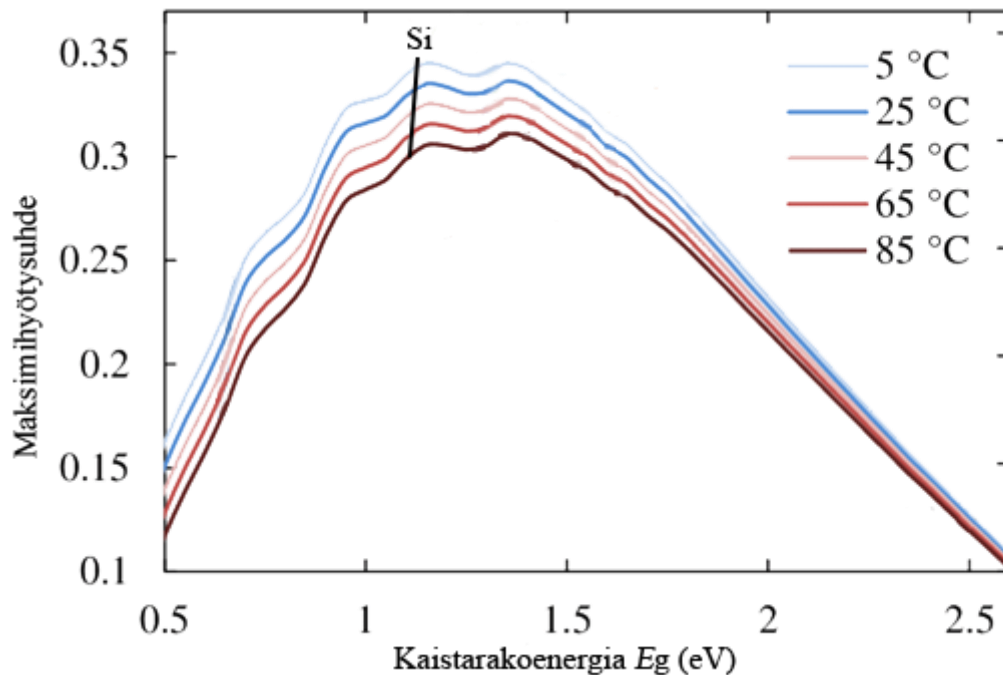
Aurinkokenno koostuu kahdesta vierekkäin olevasta puolijohteesta, jotka on seostettu N- ja P-tyyppisiksi. Seostamisella tarkoitetaan epäpuhtauksien, eli muiden alkuaineiden lisäämistä materiaaliin, jolloin niiden sähköisen johtavuuden ominaisuuksia saadaan muokattua. Aurinkokennojen puolijohteissa käytetään yleensä piitä. N-tyypin puolijohteeseen lisätään tavallisesti fosforiatomeja, joilla on enemmän valenssielektroneja kuin puolijohdemateriaalin atomeilla. Valenssielektronit ovat heikosti kiinni omissa atomeissaan, ja irtoavat kohtalaisen helposti. P-tyypin puolijohteisiin taas lisätään tavallisesti booriatomeja, joilla on vähemmän valenssielektroneja, jolloin elektroneiltaan vajaat atomit eivät osallistu puolijohdemateriaalin sidosrakenteeseen ja syntyy elektroniaukkopareja. Seostetut puolijohteet ovat kuitenkin sähköisesti neutraaleja. (Rantamaula, 2020)

Koska yhtälössä (1) fotonin energian suuruus määräytyy aallonpituuden mukaan, voidaan laskea vaadittava aallonpituus, jolla fotonin energia on riittävä virittämään elektronin

kaistaraon yli. Piillä kaistarakoenergian suuruus on 1.1 elektronivoltia ($1 \text{ eV} = 1.60217662 \times 10^{-19} \text{ J}$), jolloin yhtälöllä (1) minimaallonpituudeksi saadaan noin 1127 nm. Tällä aallonpituudella ideaalinen piiaurinkokenno on hyötysuhteeltaan tehokkain, jolloin sen hyötysuhde on noin 30 %. Hyötysuhteella tarkoitetaan sähköksi muutetun energian määrää suhteessa kennon pinta-alalle kohdistuvaan kokonaissäteilyenergiaan. Tätä lyhyemmillä aallonpituuksilla hyötysuhde heikkenee häviöistä johtuen (Christiana Honsberg, 2022). Kuten kuvasta 1 näkee, suurin osa merenpinnan tasolle osuvasta auringon säteilystä on aallonpituudeltaan alle 1127 nm ja intensiteetti on suurimmillaan näkyvän valon aallonpituuksilla (380–750 nm).



Kuva 1. Maahan kohdistuva säteilypainne aallonpituuden funktiona. Osa auringonsäteilystä absorboituu ilmakehässä, jolloin kaikki aallonpituudet eivät pääse merenpinnan tasolle saakka (punainen kuvaaja). (mukaillen (Rohde, 2013))

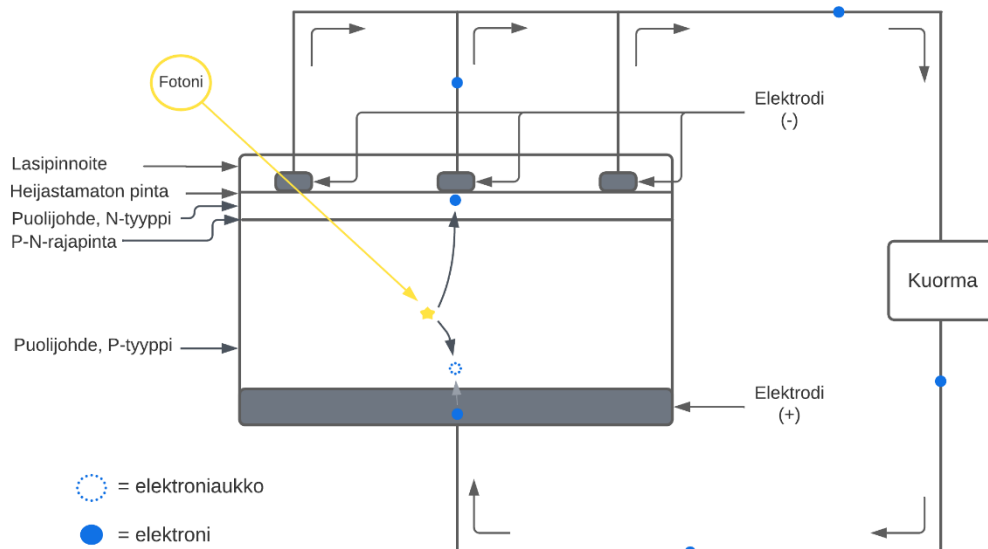


Kuva 2. Shockley-Queisserin raja. Kuvassa on esitetty piin (Si) kaistarakoenergian suuruudet ja teoreettinen maksimihyötysuhde, joka voidaan saavuttaa eri lämpötiloissa. (mukailten (Dupré, 2015))

Aurinkokennon puolijohdeiden ulkopinnoille on asetettu johtimet ja niiden välille voidaan rakentaa piiri, johon sähköinen kuorma liitetään. Kennon uloin pinta suojataan usein lasilla ja sen alle asennetaan mahdollisimman vähän valoa heijastava pinta, jotta mahdollisimman suuri määrä säteilyä saadaan ohjattua puolijohdemateriaalille. Fotonin osuessa aurinkokennoon elektroni virittyy ja muuttuu vapaaksi varauksenkuljettajaksi ja syntyy elektroniaukko. Vastakkain asetetut N- ja P-puolijohdeet luovat suuresta elektronipitoisuuseroista johtuen rajapintaansa niin sanotun tyhjennysalueen, johon syntyy sähkökenttä, joka ohjaa tyhjennysalueella olevat elektronit N-tyyppin puolijohteen puolelle ja elektroniaukot P-tyyppin puolijohteen puolelle. Tällöin puolijohdeiden välille syntyy sähköinen potentiaaliero (jännite), jonka suuruus on kaistarakoenergian suuruinen. Koska puolijohdeiden välille on kytketty johdin, elektroni siirtyy johdinta pitkin positiivisesti varautuneen P-tyyppin puolijohteen puolelle saavuttaen elektroniaukon ja tasaten sähköisen potentiaalieron. Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.

Kuten edellä mainittu, ideaalisen piiaurinkokennon hyötysuhde on optimaalisissa olosuhteissa jopa 30 %. Käytännössä hyötysuhde on kuitenkin matalampi; yksikiteisestä piistä valmistetun aurinkokennon hyötysuhde on nykyisin korkeimmillaan 26.1 % ja

monikiteisen piiaurinkokennon hyötysuhde korkeimmillaan 23.3 % (Ossila, 2021). Ideaalin ja todellisen hyötysuhteen erotuksen selittävät häviöt, jotka syntyvät muun muassa Auringon säteilyn takaisinheijastumisesta, säteilyn riittämättömästä energiasta ($hf < E_g$), kennon johtimien resistanssista sekä elektronien ja elektroniaukkojen enneaikaisesta uudelleenyhdistymisestä, jolloin ne eivät osallistu luomaan sähkövirtaa elektrodien väliseen johtimeen, vaan energia muuttuu lämmöksi. Kuten kuvasta 2 voidaan havaita, hyötysuhteeseen vaikuttaa myös aurinkokennon lämpötila. Hyötysuhde laskee lämpötilan kasvaessa, sillä atomin lämpötilan kasvaessa sen lepoenergia kasvaa, kaistarako pienenee ja kennoon syntyvä jännite tämän seurauksesta laskee. (Rantamäula, 2020) (Solar Energy Research Institute, 1982)

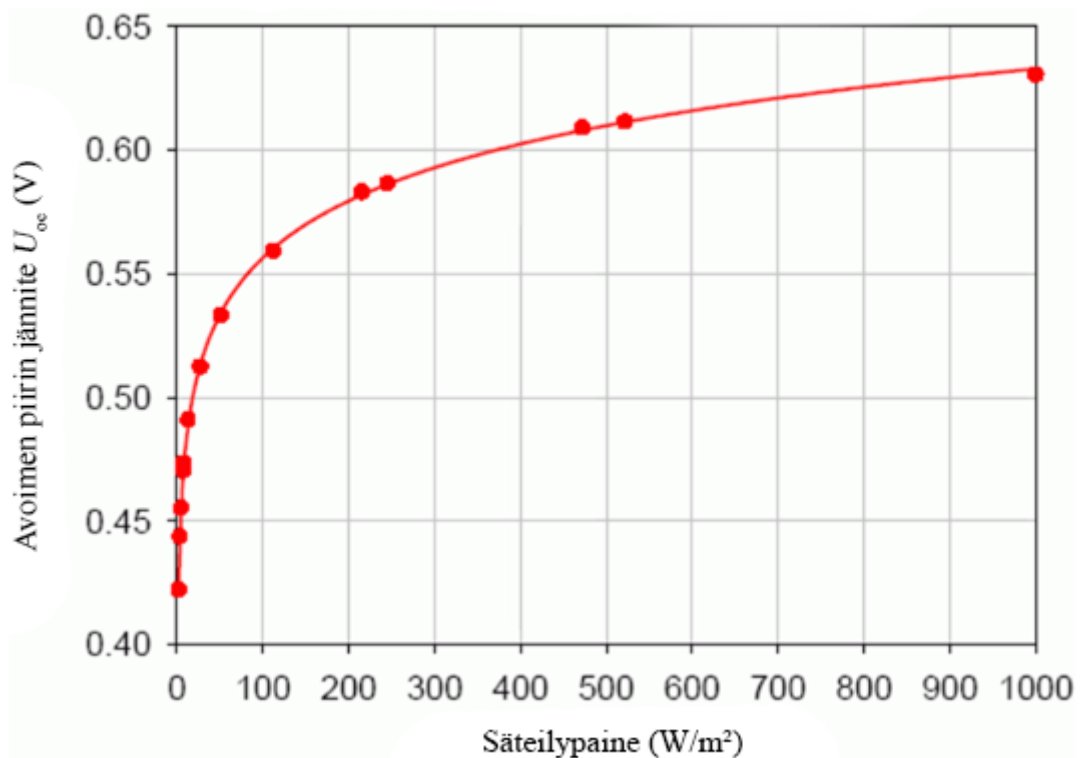


Kuva 3. Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate.

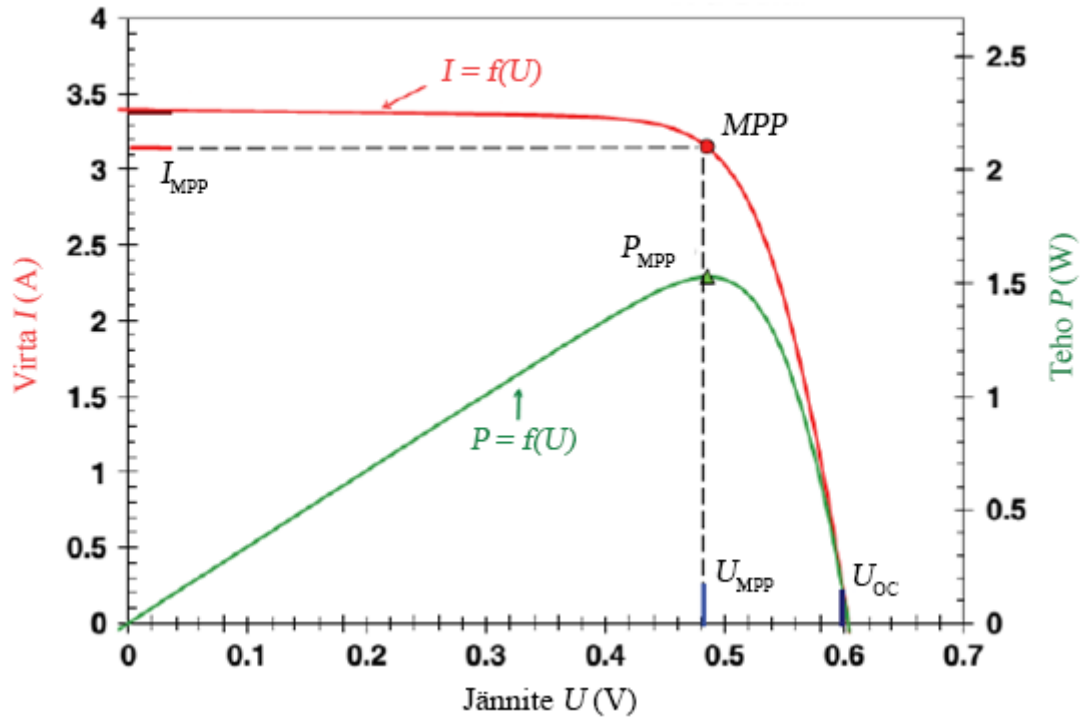
On tärkeää huomata, että valon aallonpituus määrittää elektronin virittymisen, jolloin aurinkokenno tuottaa sähköenergiaa myös erittäin vähäisellä valon intensiteetillä, kunhan aallonpituus on oikea. Valon intensiteetin kasvaessa fotoneita osuu aurinkokennoon enemmän, jolloin puolijohdeiden välinen sähköinen jännite nousee nopeasti lähelle nimellisarvoaan, eli avoimen piirin jännitettä (kuva 4). Piiaurinkokennoilla nimellinen avoimen piirin jännite on tavallisesti 0.6–0.7 V. (Solar Energy Research Institute, 1982)

Aurinkopaneelit koostuvat useista aurinkokennoista. Yksittäisen aurinkokennon jännite on matala, mutta kun kytkentään useita kennoja sarjaan, niin jännite saadaan halutun

suuriseksi. Aurinkokennojen ja -paneelien valmistaja antaa tuotteiden datalehdissä usein sähkötekniset tiedot, joista ilmenee avoimen piirin jännite U_{OC} , oikosulkuvirta I_{SC} , virta maksimitehopisteessä I_{MPP} , jännite maksimitehopisteessä U_{MPP} sekä teho maksimitehopisteessä P_{MPP} . Näiden lisäksi ilmoitetaan usein täyttökerroin FF (fill factor). Täyttökerroin on eräänlainen hyötysuhteen ja laadun mittari, jolla voidaan arvioida paneelista maksimissaan saatavan tehon suhdetta sen oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen tuloon. Mitä suurempi sarjaresistanssi aurinkopaneelissa on, sitä nopeammin oikosulkuvirta laskee jännitteen kasvaessa, jolloin myös täyttökerroin pienenee. (Mustafa Aljumaili, 2019)



Kuva 4. IXYS IXOLAR XOB17 -yksikiteisen piiaurinkokennon avoimen piirin jännite (U_{oc}) säteilypaineen funktiona. (mukaillen (IXYS Semiconductor GmbH, 2009))



Kuva 5. Aurinkokennon I-V- ja P-V-kuvaajat. (mukaillen (Al-Khazzar, 2015))

2.1.2 Maksimitehopiste ja säätö

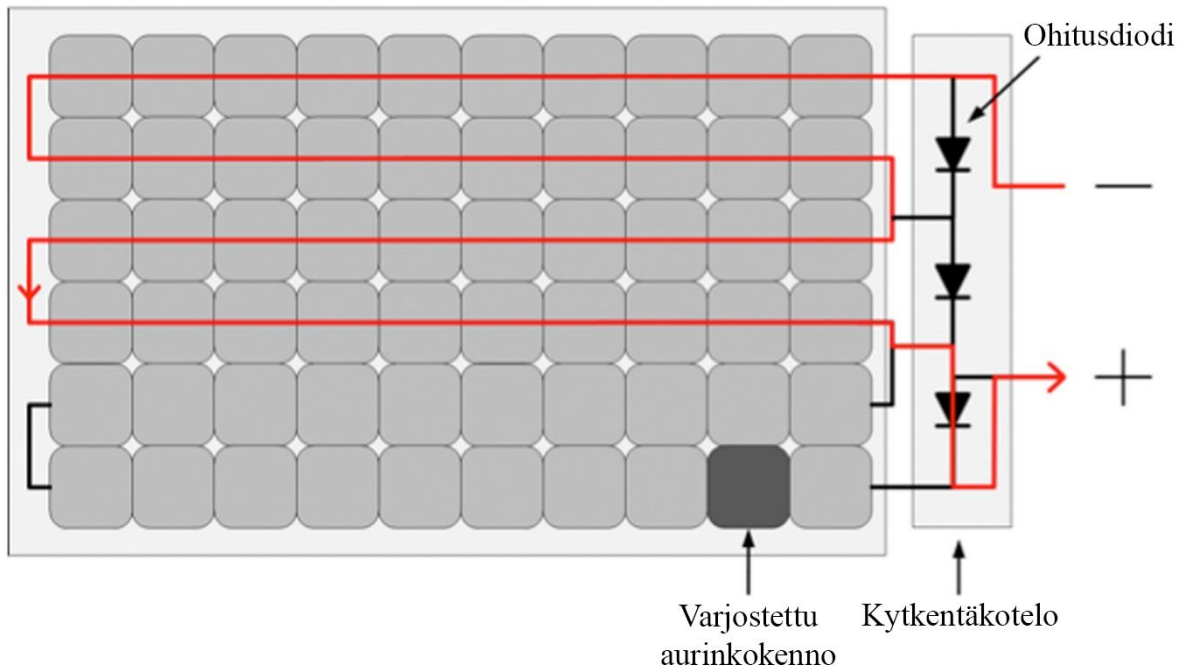
Maksimitehopiste (MPP, Maximum Power Point) on piste, jossa aurinkopaneelistä saatava teho on suurin. Kuten kuva 5 osoittaa, jännitteen kasvattaminen ja laskeminen pisteestä U_{MPP} laskee paneelista saatavaa tehoa, jolloin paneelin navoilla kannattaa pyrkiä säilyttämään maksimipisteen jännite. Valmistajan antama maksimipisteen jännite annetaan standardiolosuhteiden mukaisesta ympäristöstä. Käytännössä maksimitehopisteen jännite kuitenkin eri valon säteilypaineen intensiteeteillä vaihtelee, jolloin paneelin napojen jännitettä tulee säätää parhaan hyötysuhteen takaamiseksi eri olosuhteissa. Tätä varten on luotu erilaisia algoritmeja, jotka osaavat hakea ja säätää jännitteen maksimitehopisteen mukaiseksi. Maksimitehopistettä hakevia säätimiä kutsutaan MPPT-säätimiksi (MPPT, Maximum Power Point Tracking). (Soubhagya Dash, 2015)

Myös paneeliryhmän yksittäisen paneelin pintaan tulevat varjostukset vaikuttavat koko ryhmän maksimitehopisteen jännitteeseen. Aurinkopaneelijärjestelmää suunniteltaessa on

järkevää miettiä, miten paneelit ryhmitellään. Jos valaistusolosuhteet ovat eri paneeliryhmillä poikkeavat, ei molempien ryhmien maksimitehopiste ole sama, vaan tarvitaan kaksi eri MPPT-säädintä. Esimerkiksi eri ilmansuuntiin suunnattujen paneelien tulee olla eri MPPT-säätimien piirissä. (Soubhagya Dash, 2015)

Aurinkokennojen suojaamiseksi ja korkeamman tehontuoton takaamiseksi paneeleissa on tavallisesti ohitusdiodit. Jos esimerkiksi yksi ketjun kymmenestä kennosta joutuu varjoon, tähän yksittäiseen kennoon kohdistuva valon säteilypaineen intensiteetti pienenee ja virta putoaa koko ketjussa. Sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen läpi kulkeva virta on kaikissa sama, jolloin niistä heikoin määrittää virran suuruuden. Kun kaikkiin muihin kennoihin osuu tästä huolimatta suuremman intensiteetin valo, niissä syntyvästä energiasta suuri osa poistuu lämpöhäviöinä varjostuneessa kennossa, jolloin lämpö voi pahimmillaan tuhota aurinkopaneelin. Tavallisesti piiaurinkopaneelissa on noin 36 kappaletta aurinkokennoja sarjassa ja enimmillään 15 piiaurinkokennoa voidaan jakaa yhden ohitusdiodin taakse, jolloin voidaan varmistaa, ettei aurinkopaneelin lämpötila pääse varjostustilanteissa nousemaan niin korkeaksi, että paneeli voisi vaurioitua. Tämä tarkoittaa sitä, että tavallisesti yhdessä aurinkopaneelissa on kolme ohitusdiodia. (Christiana Honsberg, 2022)

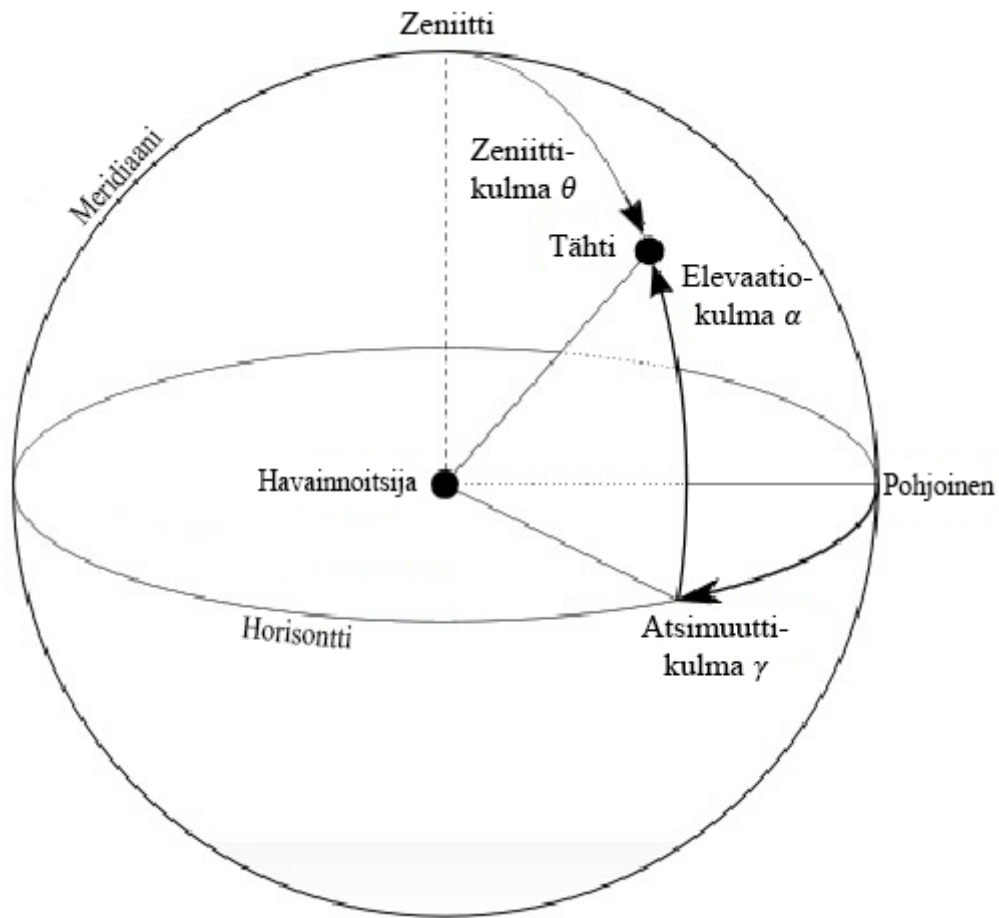
Aurinkopaneelien sijoittelua suunnitellessa kannattaa huomata, että pysty- ja vaakasäsennoissa ohitusdiodit ovat eri kohdassa (kuva 6). Jos esimerkiksi poikittain asennetun paneelin alimmalle kennoketjulle tulee lunta tai lehtiä, niin ketjun virta laskee merkittävästi. Ohitusdiodi kuitenkin takaa kahden muun ketjun toimivuuden. Pystysuuntaan asennetun paneelin alalaitaan tuleva lumi tai lehdet voivat varjostaa jokaista ketjua, jolloin koko paneelin sähköntuotanto romahtaa.



Kuva 6. Ohitusdiodit piiaurinkopaneelissa. (mukaillen (Boudewijn B. Pannebakker, 2017))

2.1.3 Auringon säteilypaineen vaihtelu ja standardoidut testiolosuhteet (STC)

Aurinkokennojen nimelliset arvot annetaan standardoiduissa testiolosuhteissa (STC, Standard Test Conditions), jossa kennon lämpötila on 25 °C, auringonsäteilyn intensiteetti 1000 W/m² eli AM1.5-ilmakehän vaimennuskertoimella. AM0 tarkoittaa, että Auringon säteily ei kulje ilmakehän läpi ja siten vaimene. Ilmakehään osuva säteilypainne on noin 1353 W/m². AM1 tarkoittaa vaimennusta, joka syntyy, kun auringonsäteily tulee kohtisuoraan ilmakehän läpi maata kohti zenittikulman ollessa 0°. Pohjoisemmilla leveyspiireillä AM-arvo ja zenittikulma on luonnollisesti suurempi, jolloin myös säteilypainne on pienempi. Aurinkokennon suuntaamisella on myös suuri merkitys sähköntuotannon kannalta. Tähän vaikuttaa Auringon sijainti taivaalla eri vuodenaikoina, eri maantieteellisissä sijainneissa. Sijainti ilmoitetaan usein horisontaalisessa koordinaatistossa kahtena eri kulmana; atsimuutti- ja elevaatiokulmana. (Christiana Honsberg, 2022)



Kuva 7. Atsimuutti-, zeniitti- ja elevaatiokulmat. (mukaiillen (Iharka Szücs-Csillik, 2015))

2.2 Tuulivoima

Tuulivoimalla tarkoitetaan tuulen liike-energian muuntamista sähköenergiaksi esimerkiksi tuuliturbiinin avulla. Tuuliturbiinin tehtävä on mahdollisimman tehokkaasti muuttaa turbiinin lapoihin osuva ilmavirtaus liike-energiaksi. Liike-energia siirtyy roottorin akselista generaattorille, joka muuttaa liike-energian sähköenergiaksi.

2.2.1 Tuuli

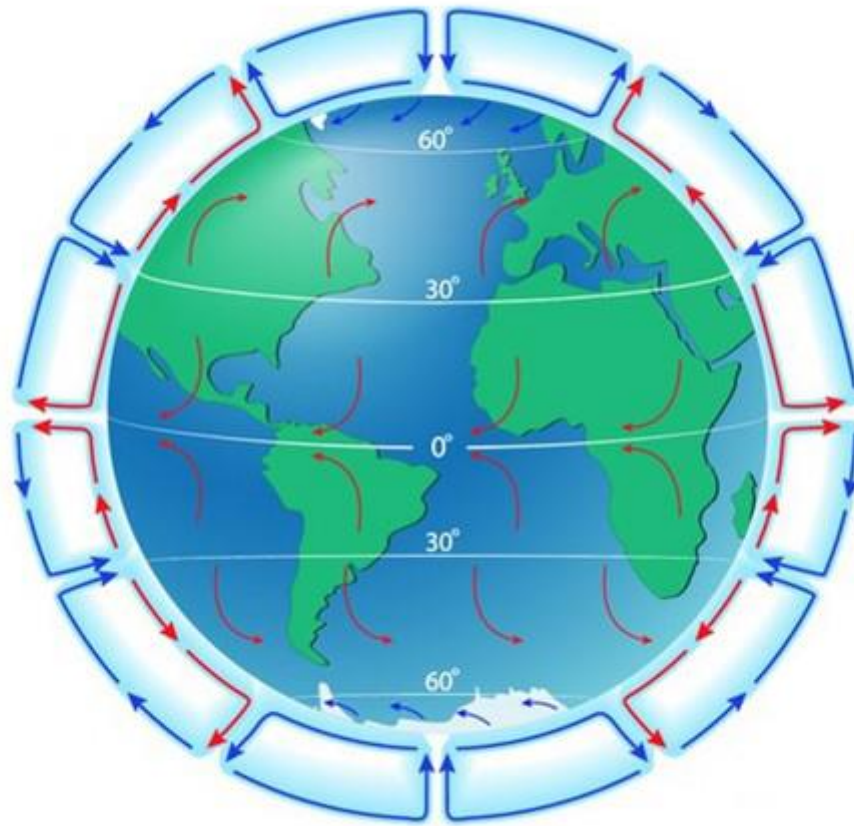
Auringon säteily lämmittää maapalloa epätasaisesti, jolloin syntyy lämpötilaeroja. Epätasainen pintojen lämpiäminen johtuu eri pintamateriaalien ominaisuuksista. Voimakkaasti heijastava, vaalea pinta esimerkiksi sitoo vähemmän säteilyenergiaa

samansuuruudessa Auringon säteilypaineessa kuin tumma, heijastamaton pinta. Lisäksi materiaalin lämmönjohtavuudella on merkitystä, sillä huokoinen, eristävä materiaali lämpenee pinnasta nopeasti, jolloin lämpöenergiaa tasautuu enemmän ilmaan, kun taas hyvin lämpöä johtava materiaali tasaa lämmön itseensä. Lämmin ilma on kylmää ilmaa kevyempää, jolloin syntyy ilmanpaine-eroja. Ilmanpaine pyrkii tasautumaan korkeamman paineen alueelta matalamman paineen alueelle päin luoden ilmavirtauksia, joita kutsutaan tuuliksi. Esimerkiksi vesistön äärellä Auringon säteily saa maan yläpuolella olevan ilman lämpiämään nopeammin kuin veden yläpuolella olevan ilman, jolloin maan yläpuolella oleva ilma pyrkii kohoamaan korkeammalle ja veden yläpuolella oleva viileämpi ilma siirtyy maata kohden luoden ilmavirtauksen. (Lehiugh, 2022)

Planetaariset tuulet tarkoittavat maapallolla eri leveysasteilla vallitsevia tuulia, jotka jakautuvat leveyspiirien välisiin soluihin (kuva 8). Noin 30 asteen välein maapallolla on korkea- ja matalapaineen alueita, joiden sijainti määräytyy Auringon zeniittiaseman mukaan. Auringon zeniittiasema on se kohta maapallolla, jossa auringonpaiste osuu keskipäivällä kohtisuoraan maapallon pintaa päin, eli asettuu taivaan lakipisteeseen. Auringon zeniittiasema vaihtelee vain vähän vuodenaikojen mukaan, jolloin myös planetaaristen tuulien suunta vaihtelee vain vähän. (Vedantu, 2022) (Hamilo, 2011)

Tuulennopeuden SI-järjestelmän mukainen yksikkö on metriä sekunnissa (m/s). Tuulennopeudet vaihtelevat alueellisesti ja vuodenaikojen mukaan. Tämä on ymmärrettävää, sillä myös Auringon säteilypaineen intensiteetti vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Talvisin tuulennopeus on keskimäärin suurempi kuin kesäisin ja Suomessa tuulivoiman tuotanto painottuukin talvikuukausille. Lokakuun ja maaliskuun välisenä aikana tuotetaan keskimäärin 60 % vuoden tuulisähköstä. (Suomen tuulivoimayhdistys, 2022)

Maan pinnalla tuulennopeus on matalampi, kuin korkea- ja matalapaineiden ilmanpaine-ero edellyttäisi. Tämä johtuu osittain siitä, että maanpinnan epätasaisuus luo tuulelle kitkaa, joka hidastaa tuulennopeutta. Epätasaisuuteen vaikuttavat muun muassa maaston muodot, puuston korkeus ja tiheys sekä rakennukset. (Nordlund, 1997)



Kuva 8. Tuulien kiertokulku Maapallolla. (mukaillen (MrSutheran, 2020))

2.2.2 Tuuliturbiinien teoriaa

Tuuliturbiinin tuulesta ottama voima voidaan laskea yhtälöllä. Yhtälössä r on tuuliturbiinin lavan pituus (turbiinin pyörähdyspinta – ala, $A = \pi r^2$), ρ on ilman tiheys, v on tuulen nopeus ja C_p on turbiinin tehokerroin, joka osoittaa turbiiniin kohdistuvan tuulienergian talteenoton suhteen. Tehokertoimen suuruuteen vaikuttavat muuttujat turbiinin lavan kärjen nopeussuhde λ sekä turbiinin lapakulma β radiaaneina. Betzin lain mukaan tuuliturbiinin läpi kulkevan ilman kineettisestä energiasta voidaan ottaa talteen maksimissaan $16/27$ (noin 59,3 %). (Danisk Wind Industry Association, 2003)

$$P = \frac{1}{2} \pi r^2 \rho v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

Turbiinin lavan kärjen nopeussuhde, λ riippuu mekaanisesta kulmanopeudesta Ω .

$$\lambda = \frac{\Omega r}{v} \quad (3)$$

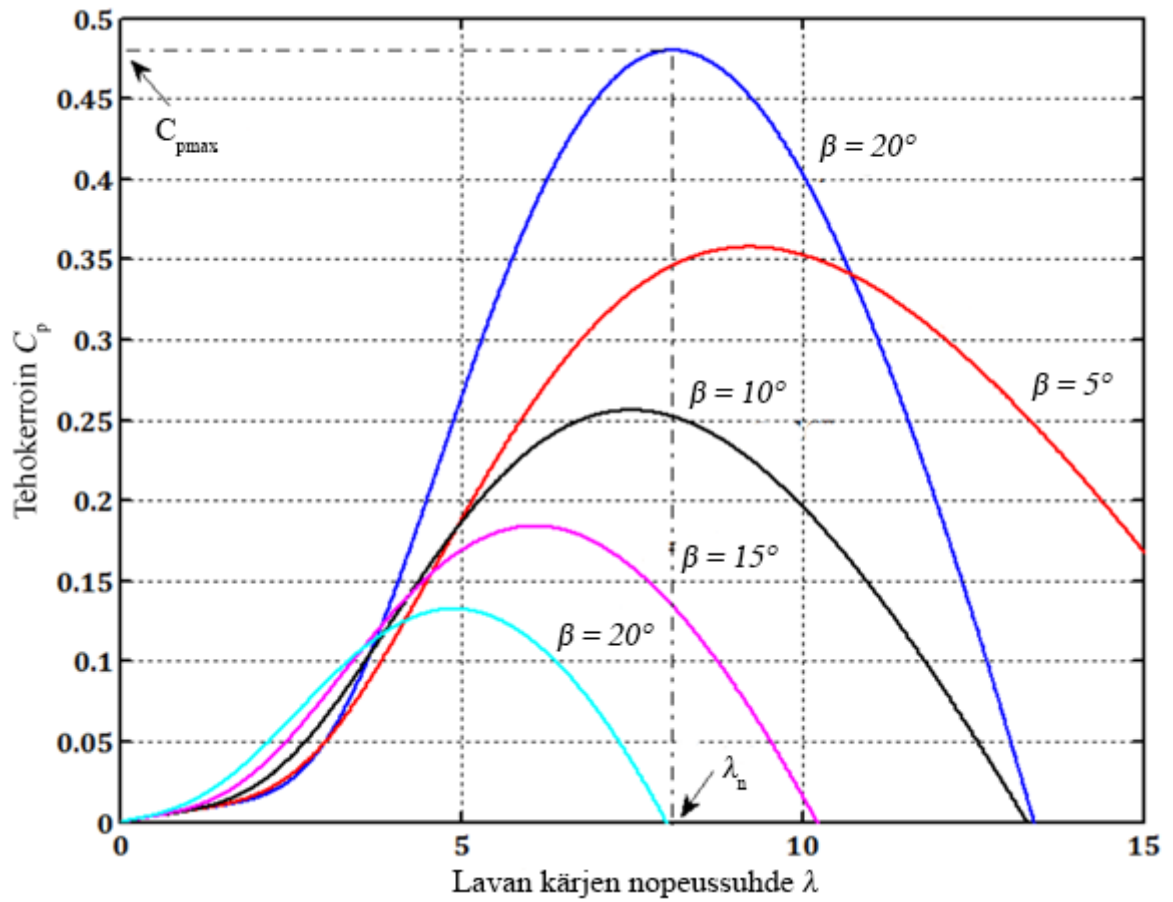
Tehokertoimen C_p approksimaatio voidaan laskea (Mahmoud, 2020)

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \quad (4)$$

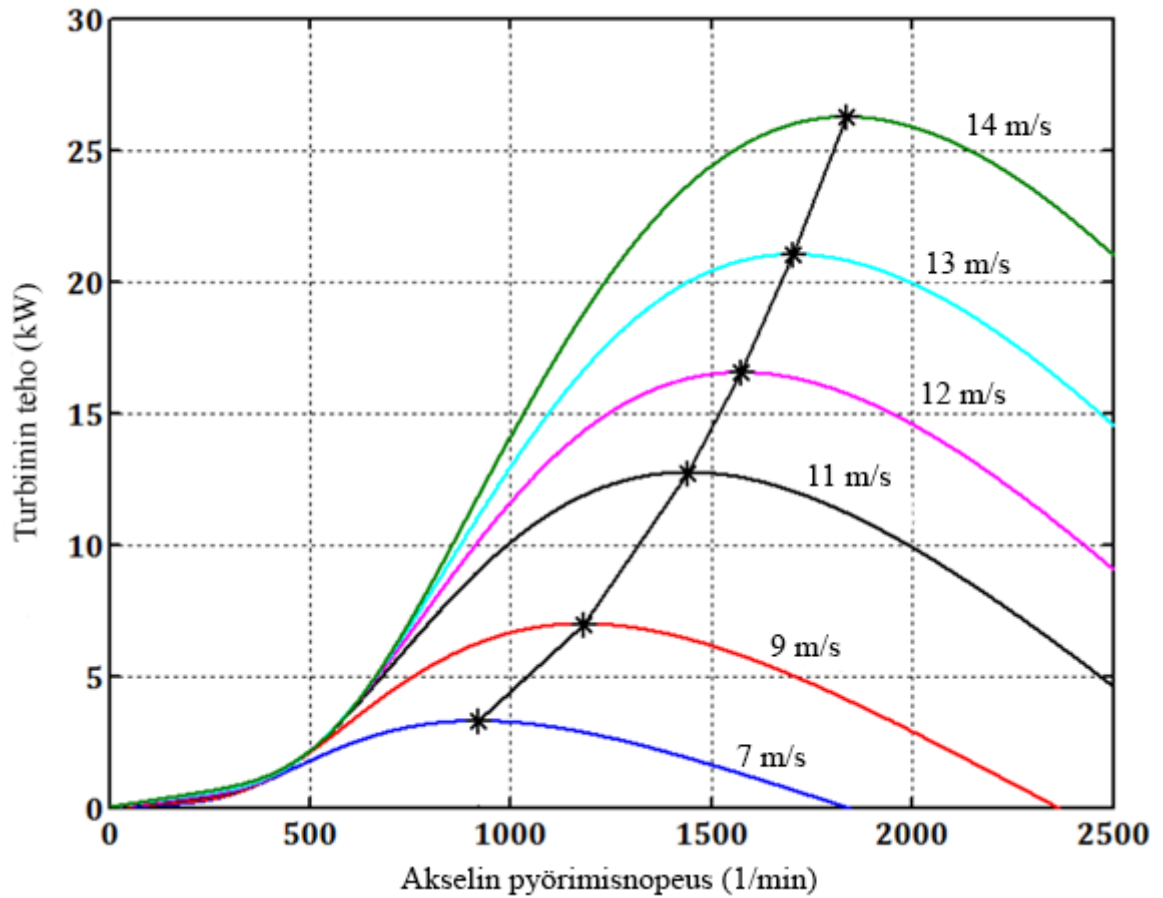
$$\text{jossa } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Parametrit c_1 - c_6 vaihtelevat turbiinityypin mukaan.

Kuvista 9 ja 10 voidaan nähdä, kuinka lavan kärjen nopeussuhde λ ja lapakulma β vaikuttavat tehokertoimeen eri tuulennopeuksilla. Tuuliturbiiniin kohdistuvan tuulen nopeutta voidaan mitata anemometrillä, joka sijoitetaan turbiinin läheisyyteen, esimerkiksi turbiini konehuoneen yläpuolelle, mutta se voidaan myös laskea matemaattisesti turbiinin mitattavista arvoista. Anemometriin voi kohdistua turbiinista syntyviä ilmavirran pyörteitä, jotka vääristävät dataa. Lisäksi on saatava tieto lapakulmasta, jotta sitä voidaan säätää sopivaksi. Tavallisesti matalilla tuulennopeuksilla lapakulma on 0° . Kun turbiinin nimellistehon rajaa lähestytään, lapakulmaa pyritään säätämään siten, että nimellisteho säilyy vakaana. Tämä suojaa turbiinia ja generaattoria sekä takaa vakaan tuotannon myös kovemalla tuulella, jolloin vakiokulmainen turbiini menettää tuotantotehoaan merkittävästi. Kun tuulennopeus kasvaa, niin piste, jossa tuulen kineettisestä energiasta saadaan maksimaalinen määrä muutettua sähköenergiaksi, siirtyy, ja sen saavuttamiseksi lavan kärjen nopeussuhdetta on kasvatettava. Tätä pistettä kutsutaan maksimitehopisteeksi ja tuuliturbiinin pyörimisnopeus pyritäänkin nopeudeltaan säätämään vallitsevan tuulen mukaisesti MPPT-säätimellä (MPPT, maximum power point tracking). MPPT-säätimeen tarvitsee syöttää hetkellinen tuulennopeus, turbiinin lapakulma ja roottorin kulmanopeus, jolloin se laskee oikean pyörimisnopeuden referenssiarvon. Sen jälkeen säädin ohjaa generaattorin pyörimistä esimerkiksi DTC-säädöllä eli suoralla vääntömomenttisäädöllä (DTC, direct torque control).



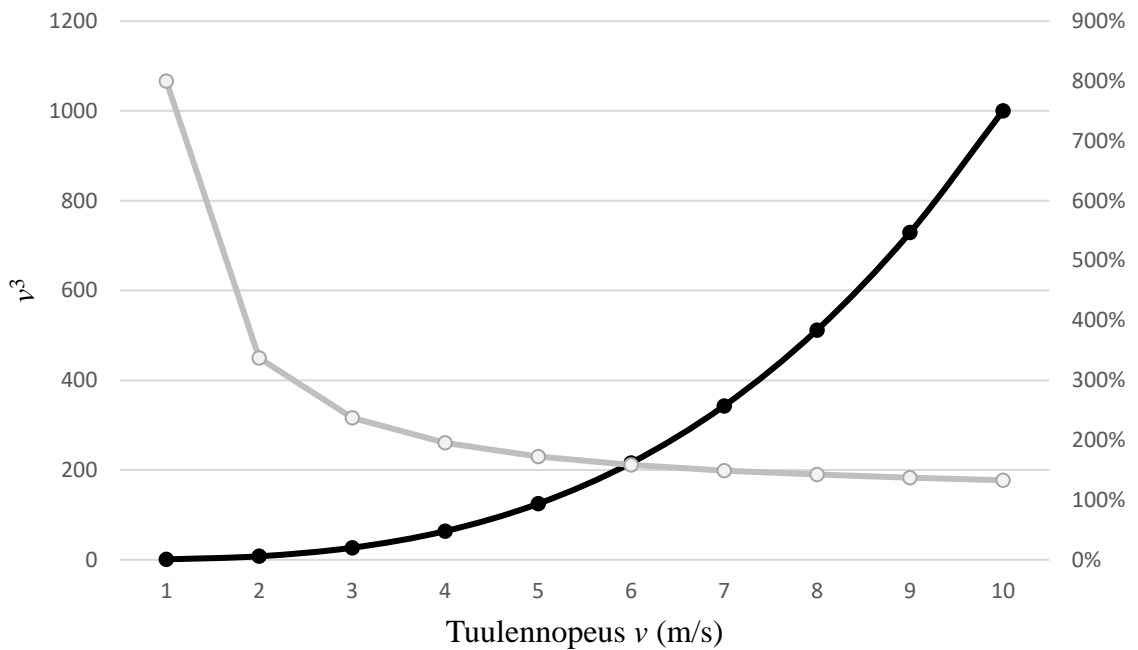
Kuva 9. Turbiinin tehokertoimen C_p ja lavan kärjen nopeussuhteen λ funktio eri lapakulmilla β . Kuvassa $C_{p,max}$ on suurin saavutettavissa oleva tehokertoimen arvo ja λ_n on nimellinen lavan kärjen nopeussuhde, eli piste, jossa suurin saavutettavissa oleva tehokertoimen arvo saavutetaan. (mukaiillen (Makhlouf Laakam, 2014))



Kuva 10. Tuuliturbiinin tehontuotannon suhde akselin pyörimisnopeuteen. (mukailien (Makhlouf Laakam, 2014))

2.2.3 Tuulennopeuden teoreettinen arviointi

Keskimääräinen tuulennopeus kasvaa maanpinnasta korkeammalle noustaessa. Yhtälön (2) mukaisesti tuulienergian määrä kasvaa tuulennopeuden kolmannessa potenssissa. Tällöin etenkin matalilla tuulennopeuksilla jo yhden metrin sekuntinopeuden nosto kasvattaa tuulienergian määrää merkittävästi. Tätä on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Tuulienergian määrä eri tuulennopeuksilla. Musta kuvaaja (v^3) auttaa hahmottamaan energian eksponentiaalisen kasvun tuulennopeuden noustessa ja harmaa kuvaaja (Δv^3) osoittaa energian määrän prosentuaalisen kasvun, kun nopeus kasvaa yhdellä yksiköllä (m/s). Ensimmäinen piste harmaalla kuvaajalla tarkoittaa tuulienergian määrän kasvua, kun tuulennopeus muuttuu nopeudesta 1 m/s \rightarrow 2 m/s ja toinen piste, kun nopeus kasvaa 2 m/s \rightarrow 3 m/s.

Tuulennopeuden arvioimiseksi eri korkeuksissa on kehitetty laskentatapoja.

$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (5)$$

Yhtälössä v on keskituulennopeus korkeudessa H . v_0 on keskituulennopeus referenssikorkeudessa H_0 . α on tuuliväänneparametri, jolle on annettu erilaisien maastotyyppien mukaan arvoja (taulukko 1). (Rasaq, 2015)

Toinen yleisesti käytetty yhtälö on

$$v = v_0 \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (6)$$

Yhtälö on hyvin samanlainen, kuin yhtälö (5), mutta se ottaa matalammissa korkeuksissa tuulen logaritmisen luonteen, jolloin se on hieman tarkempi. Yhtälössä z_0 on

epätasaisuuskerroin, jolle on annettu erilaisten maastotyyppien mukaan arvoja (taulukko 1). (Chaudhry, 2009)

Logaritminen yhtälö (6) on tarkempi alle 20 metrin korkeuksissa, 20–100 metrin korkeuksissa molemmat yhtälöt tuottavat kohtuullisen tarkkoja arvioita ja yli 100 metrin korkeudessa yhtälö (5) antaa logaritmistä kaavaa tarkempia arvioita keskituulennopeudesta. (Cook, 1985)

Taulukko 1. Tuuliväänneparametrin (α) ja epätasaisuuskertoimen (z_0) arvot eri maastotyyppien mukaan. (Saheb Djohra, 2014) (Chaudhry, 2009) (Rasaq, 2015)

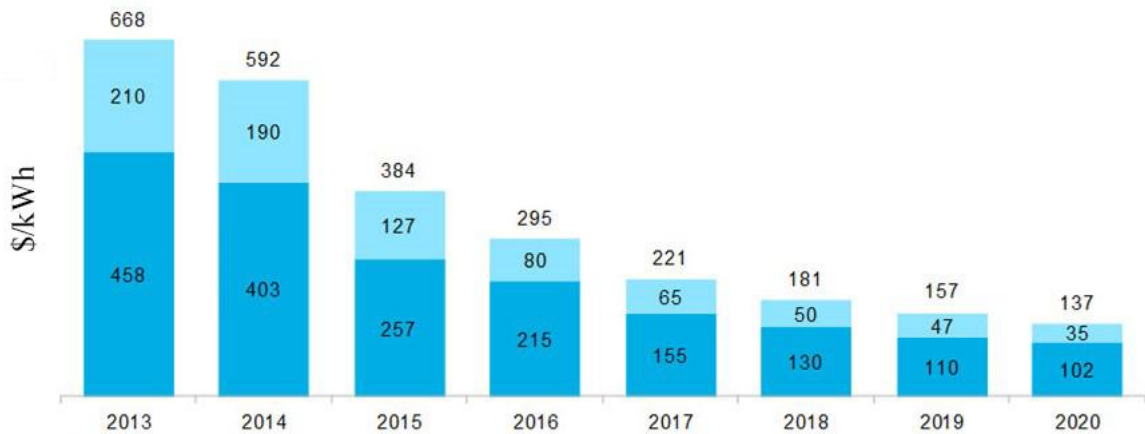
Maaston kuvaus	α	z_0
Tasainen maa, järvi tai meri	0.09–0.13	0.0002–0.0003
Tasainen maa, matala heinikko tai ruohikko	0.13–0.16	0.001–0.010
Epätasainen maa, korkea heinä, joitakin puita	0.16–0.19	0.02–0.10
Korkeaa kasvustoa, pensaita, muutamia puita	0.19–0.22	0.1–0.5
Useita puita ja joitakin rakennuksia	0.22–0.25	0.5–1.0
Metsää, pieni kylä tai esikaupunkialue	0.25–0.32	1.0–2.0
Urbaani alue, korkeat rakennukset	0.32–0.40	2.0–4.0

2.3 Energiavarastot

Energiavarastojen tehtävä järjestelmässä on varastoida tuotettua energiaa ja syöttää sitä tasaisesti kulutusta varten. Tässä kappaleessa tarkastellaan erilaisia energian varastointimuotoja, niiden toimintaa ja yleisimpiä piirteitä.

2.3.1 Litiumioniakut

Litiumioniakut ovat kasvattaneet suosiotaan vuosi vuodelta ja niiden kehittämiseen käytetään merkittävästi rahaa. Litiumioniakkujen kysyntään vaikuttaa myös sähköautojen lisääntyvä kysyntä. Hinnat kilowattia kohden ovat laskeneet vuosien saatossa paljon ja pidemmällä aikavälillä hintojen odotetaan laskevan entisestään.

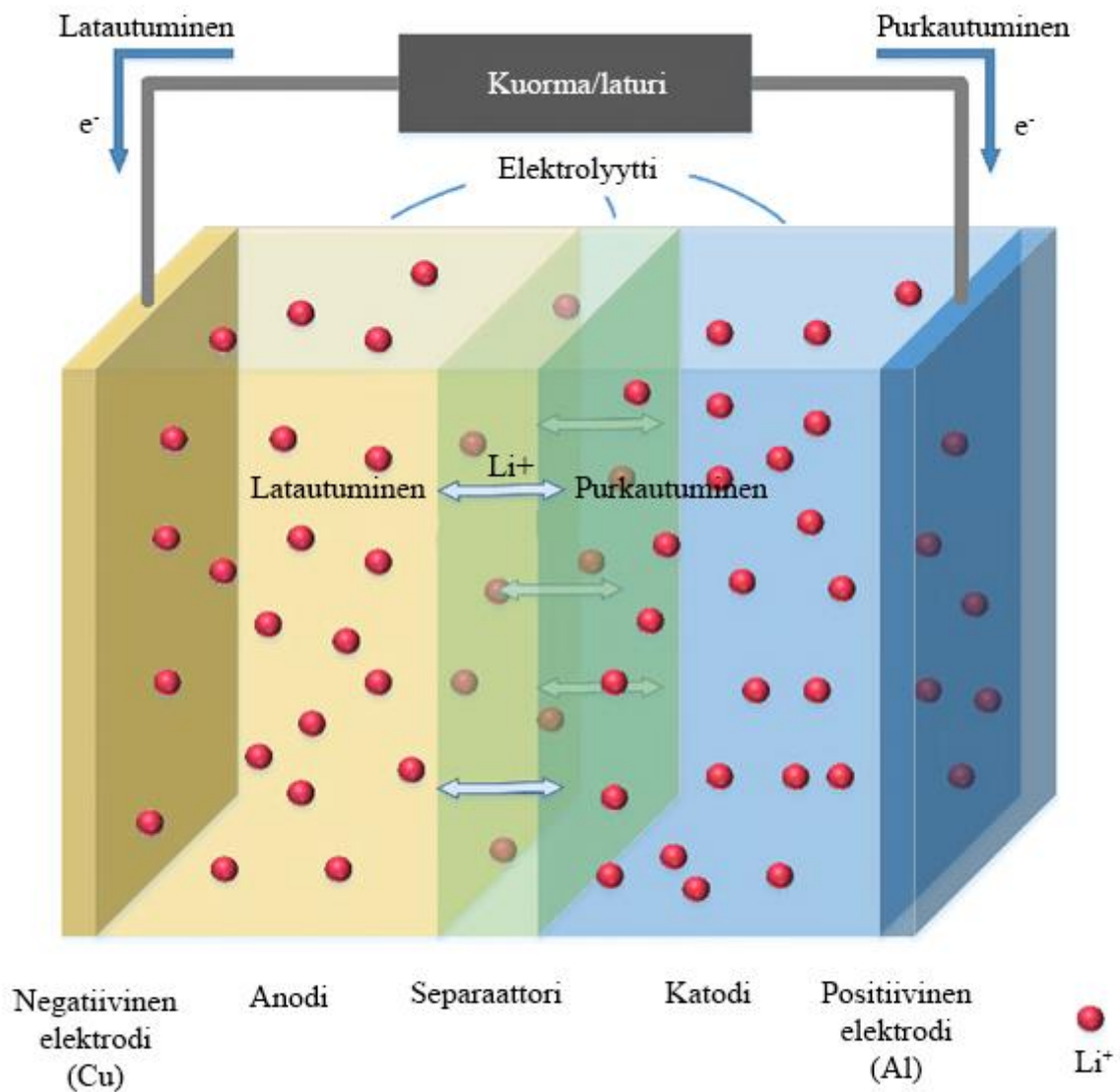


Kuva 12. Litiumioniakustojen kapasiteetin hintojen kehitys vuosina 2013–2020. Kuvassa palkin yläpuolella on litiumioniakun yhden kilowattitunnin hinta dollareissa. Tummansinisellä on esitetty akuston kennojen ja vaaleansinisellä akuston muiden osien dollarimääräinen osuus kilowattitunnin kokonaishinnasta. (mukaiillen (BloombergNEF, 2021))

Litiumioniakku koostuu positiivisesta alumiinielektrodista ja negatiivisesta kuparielektrodista. Negatiivinen elektrodi on yhteydessä anodiin, joka on materiaaliltaan tavallisesti grafeenia. Positiivinen elektrodi on yhteydessä katodiin, jonka materiaali on metallioksidi, kuten litiumrautafosfaatti. Elektrodien välillä on elektrolyytti, joka mahdollistaa litiumionien Li^+ liikkumisen lävitseen elektrodilta toiselle, mutta estää elektronien läpäisyn.

Kun elektrodien välille tuodaan jännitelähde, anodilla hapettumisen yhteydessä irtoaa elektroneja, jotka pyrkivät jännitelähteen johtimien kautta katodille. Samalla litiumionit kulkevat elektrolyytin läpi katodin puolelle ja vastaanottavat elektronit. Kun jännitelähde irrotetaan, jää elektrodien välille jännite. Kytettäessä elektrodien välille johdin, potentiaaliero pyrkii tasautumaan, jolloin litiumionit siirtyvät elektrolyysin läpi ja elektronit siirtyvät johdinta pitkin vastaan. Litium yhdistyy elektronin vastaanottaessaan takaisin litiumrautafosfaattirakenteeseen ja elektrodien välinen potentiaaliero laskee.

Elektrolyytin sekaan elektrodien välille asetetaan usein kalvo, joka suojaa kennoa ylikuumentumisen yhteydessä elektrolyysin haihtumiselta ja elektronien hallitsemattomalta purkautumiselta, joka voi aiheuttaa jopa kennon räjähtämisen. (Jianan Zhang, 2018)



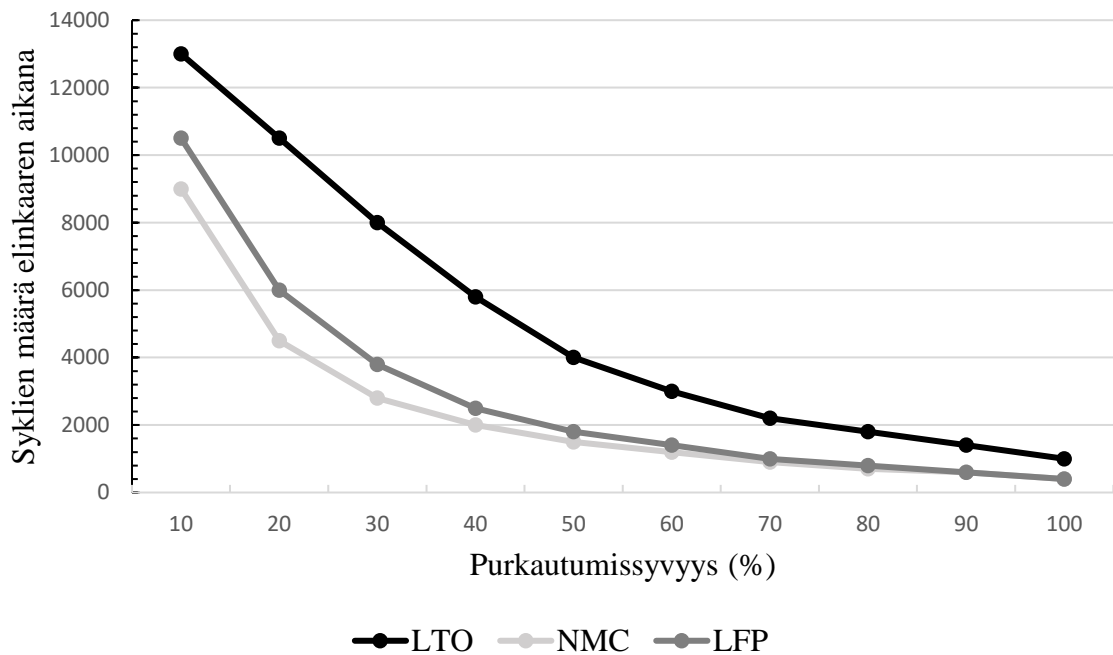
Kuva 13. Litiumioniakun rakenne ja toimintaperiaate. (mukailten (Jianan Zhang, 2018))

Litiumioniakuissa käytetään erilaisia metallioksiedeja, jotka luovat kennolle erilaiset akkutekniset ominaisuudet. Näitä ovat esimerkiksi:

- litium-rauta-fosfaatti (LFP, $LiFePO_4$)
- litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi (NMC, $LiNiMnCoO_2$)
- litium-titanaatti (LTO, Li_2TO_3)

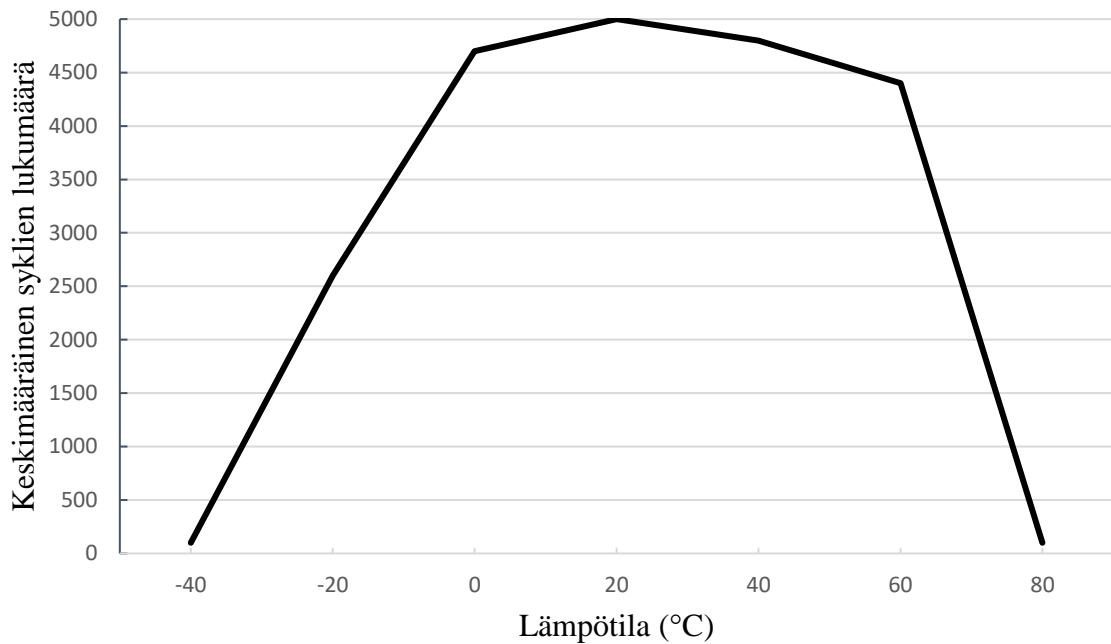
Erityyppisten akkutekniikoiden käyttöikä vaihtelee suuresti. Monesti toinen akkutekniikka voi olla parempi eri käyttötarkoitukseen, esimerkiksi muuttujia ovat nimenomaan tekniikan elinkaari, paino, hinta ja purkautumisnopeus, eli kuinka nopeasti akku kykenee vastaanottamaan ja purkamaan varastoitua energiaa. (Battery University, 2021)

Yhdellä syklillä tarkoitetaan akun yhtä latausta ja purkua. Akkutekniikka vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa akun energiasta kannattaa purkaa; esimerkiksi LFP-litiumioniakun kohdalla suositellaan, että akkua ei purettaisi yli 80 prosenttisesti. Tekninen termi sille, kuinka paljon akun kokonaisenergiasta on käytetty, on purkautumissyvyys (DoD, Depth of Discharge). Sykliä välinen purkautumissyvyys vaikuttaa akun käyttöikäen merkittävästi. (Sepasi, 2014)



Kuva 14. Litiumioniakun elinkaari kasvaa merkittävästi vähäisellä purkautumissyvyydellä. (mukaillen (Sepasi, 2014))

Lisäksi akuston lämpötila vaikuttaa suuresti akun toimintaan ja käyttöikäen. Akuston lämpötilan laskiessa sisäinen resistanssi kasvaa ja kapasiteetti pienenee. Sama täysi akku huoneenlämmössä kykenee antamaan vain puolet energiastaan 20 asteen pakkasessa. Akuston lämpötilan tulisi olla hieman alle 20°C, jotta sen elinkaari voidaan lämpötilan osalta maksimoida. (Muhammad Fahad Zia, 2019) (Battery University, 2021)



Kuva 15. Litiumioniakun elinkaari romahtaa lämpötilan laskiessa alle 0°C ja noustessaan yli 50°C. (Muhammad Fahad Zia, 2019)

2.3.2 Superkondensaattorit

Superkondensaattorit, jotka tunnetaan myös ultrakondensaattoreina, ovat energiavarastoja, jotka kykenevät purkamaan ja varastoimaan energiaa erittäin nopeasti. Superkondensaattoreiden kapasitanssi on tuhansia kertoja suurempi kuin tavallisella kondensaattorilla, jolloin niitä voidaan hyödyntää energiavarastoinnissa. Superkondensaattorien elinkaari on myös oikeissa olosuhteissa erittäin pitkä, huomattavasti pidempi kuin esimerkiksi litiumioniakuilla. Elinkaaren pituuteen vaikuttavat kennojen lämpötila, napojen välinen jännite ja kuormitusvirta. Superkondensaattorit kuitenkin purkavat käyttämättömänä varausta litiumioniakkuja nopeammin, jolloin ne eivät ole vaihtoehto pitkäaikaiselle energianvarastoinnille.

Tavallisen kondensaattorin lataaminen tapahtuu siten, että lähekkäin olevien pintojen välille luodaan staattinen varaus. Superkondensaattorit taas ovat usein sähkökemiallisia, eli niissä on varattavien pintojen välillä myös elektrolyytti ja separaattori. Superkondensaattorit voidaan jakaa kolmeen kategoriaan; kaksikerroksiset (myöhemmin EDL-kondensaattorit, Electrochemical Double Layer Capacitor), pseudo- ja hybridikondensaattorit.

EDL-kondensaattorit ovat tekniikaltaan kovin samanlaisia kuin tavalliset kondensaattorit. Niiden varausominaisuudet perustuvat sähköstaattiseen varaukseen laajalla pinta-alalla, mutta pintojen välillä on elektrolyytti sekä separaattori. Suurin osa markkinoilla olevista superkondensaattoreista on EDL-kondensaattoreita.

Pseudokondensaattorin toiminta perustuu pseudokapasitanssiin, eli se ei varaudu sähköstaattisesti, vaan sähkökemiallisesti varauksenkuljettajien avulla. Pseudokondensaattorin toimintaperiaate on hieman akun kaltainen. Niiden energiatiheys on korkeampi, kuin EDL-kondensaattoreilla, mutta syklien määrä elinkaaren aikana on matalampi.

Hybridikondensaattorin toiminta perustuu EDL- ja pseudokondensaattorin tekniikkoihin. Hybridikondensaattoreiden energiatiheys on EDL- ja pseudokondensaattoreita korkeampi, mutta ainakin EDL-kondensaattoreihin nähden syklien määrä elinkaaren aikana on matalampi. Hybridikondensaattoreita on pidetty EDL- ja pseudokondensaattoreita parempana energiavarastoinnin muotona. (Saarentausta, 2020)

2.3.3 Vety ja polttokennot

Vety on ollut viime vuosien aikana keskiössä päästöttömien energiaratkaisujen keskusteluissa. Vety on normaalissa ilmanpaineessa väritön, hajuton, mauton, erittäin tulenarka ja ilmaa kevyempi kaasu.

Vetyä voidaan tuottaa hajottamalla vettä elektrolyysilaitteiden avulla. Vesi atomi koostuu kahdesta vetyatomista ja yhdestä happiatomista. Kun vesiasiaan asetetaan elektrodit ja näiden välille tuodaan sähköinen jännite, vesiatomi hajoaa. Puhdas vesi ei johda elektroneja, jonka vuoksi veteen on lisättävä epäpuhtauksia tai vaihtoehtoisesti elektrodien väliin laitetaan kalvo, jota myöten ionit voivat liikkua. Kalvo eristää myös atomit erilleen toisistaan; vety syntyy katodin puolella ja happi anodin puolella. Vety johdetaan tämän jälkeen varastoon, josta se voidaan myöhemmin muuttaa sähköenergiaksi.

Sähköenergiaksi muuttaminen tapahtuu polttokennon avulla. Polttokenno on toimintaperiaatteeltaan käänteinen elektrolyysilaitte. Kun vetyä kuljetetaan anodille ja happea katodille, anodin ja katodin välille syntyy sähkövirta ja palamistuotteena syntyy vettä.

Elektrolyysilaitteiden toimintaperiaatteet vaihtelevat. Yksinkertaisin ja samalla vanhin tarjolla oleva tekniikka on veden alkalielektrolyysi, jossa suolaveden upotetaan anodi ja katodi. Elektrodit erotetaan kalvolla, jolloin vety ja happi eivät pääse uudelleen yhdistymään. Alkalielektrolyysin hyötysuhde on noin 60–80 %. Loput energiasta menee hukkaan lämpönä.

Toinen paljon käytetty tekniikka, PEM-elektrolyysi (PEM, Proton Exchange Membrane), pohjautuu elektrodien väliseen kiinteään polymeerikalvoon, joka päästää läpi protoneita. Elektrodit ovat materiaaliltaan arvokkaita metalleja, kuten platinaa ja iridiumia, mutta usein elektrodit valmistetaan siten, että jalometalleista tehdään ohut kalvo polymeerikalvon ja virrankeräimen väliin, jolloin kalliita materiaaleja tarvitaan vähemmän. Virrankeräimet ovat tavallisesti grafiittia ja titaania. Polymeerielektrolyysin avulla voidaan tuottaa hyvin puhdasta vetyä, se kykenee toimimaan suurella virrantiheydellä ja sen hyötysuhde on korkea, jopa yli 80 %. Polymeerielektrolyysin suurin haaste on sen korkea hinta. (S. Shiva Kumar, 2019)

Kolmas kehittyvä tekniikka, AEM-elektrolyysi (AEM, Anion Exchange Membrane), on tekniikaltaan saman tapainen, kuin PEM-elektrolyysi. Tässä kahden elektrodin väliin tulee kalvo, joka päästää läpi ioneja, mutta eristää elektrolyysissä syntyvät hapen ja vedyn toisistaan. AEM-tekniikan etuja on, ettei kalliita metalleja tarvita, jolloin laitteet ovat PEM-laitteita edullisempia. Lisäksi PEM-elektrolyysi vaatii erittäin puhdasta vettä, kun taas AEM-elektrolyysiin kelpaa suodatettu sade- tai hanavesi.

Tuotetun vedyn varastoiminen on haastavaa, sillä se on normaalioloissa kaasumaisessa muodossa ja vaatii tällöin paljon tilaa. Esimerkiksi yhden vetykilon energia-arvo on 33.33 kWh ja se vaatii normaalissa ilmanpaineessa noin 11934 litran säiliön, eli sen tiheys on 0.08382 kg/m^3 . Se voidaan muuttaa nestemäiseksi, jolloin voidaan saavuttaa 71 kg/m^3 tiheys, jolloin sama määrä energiaa mahtuu 14 litran säiliöön. Nestemäinen muoto on kuitenkin haastava saavuttaa, sillä se vaatii kryogeenistä varastointia, jossa vedyn lämpötila pudotetaan alle 33 Kelvin-asteen, eli -240 Celsius-asteen alapuolelle. Tavallisempi vaihtoehto on varastoida vety paineistettuun säiliöön, jolloin vaadittu tilavuus pienenee. (Züttel, 2004)

3 Järjestelmän suunnittelu

Tässä kappaleessa kerrotaan järjestelmän suunnittelun eri vaiheista ja ratkaisuista. Tutkimuksen lähtökohtana on suunnitella järjestelmä, jota ei ole liitetty osaksi kantaverkkoa, ja joka kykenee toimimaan sähköenergian puolesta omavaraisesti ympäri vuoden sijainnista riippumatta. Järjestelmän energiantuotannon tulee pohjautua uusiutuviin energiantuotantomuotoihin. Koska järjestelmän toiminnan kannalta tärkeintä on taata syötettävän järjestelmän katkeamaton energiansaanti, voidaan nähdä kaksi vaihtoehtoa:

- On löydettävä energiantuotannon muodot, joita yhdistelemällä voidaan taata tasainen energiantuotanto ympäri vuoden.
- Korkean energiantuotannon aikaan energiaa varastoidaan mahdollisimman paljon varastoon, jolloin varastoitua energiaa käytetään paikkaamaan energiantuotannon vajetta.

Valintaa ajavat myös kriteerit:

- Hinta
- Skaalattavuus
- Toimintavarmuus
- Mahdollisimman vähäinen huollon tarve

3.1 Sähköenergian tuotannon ennustaminen ja laskelmat

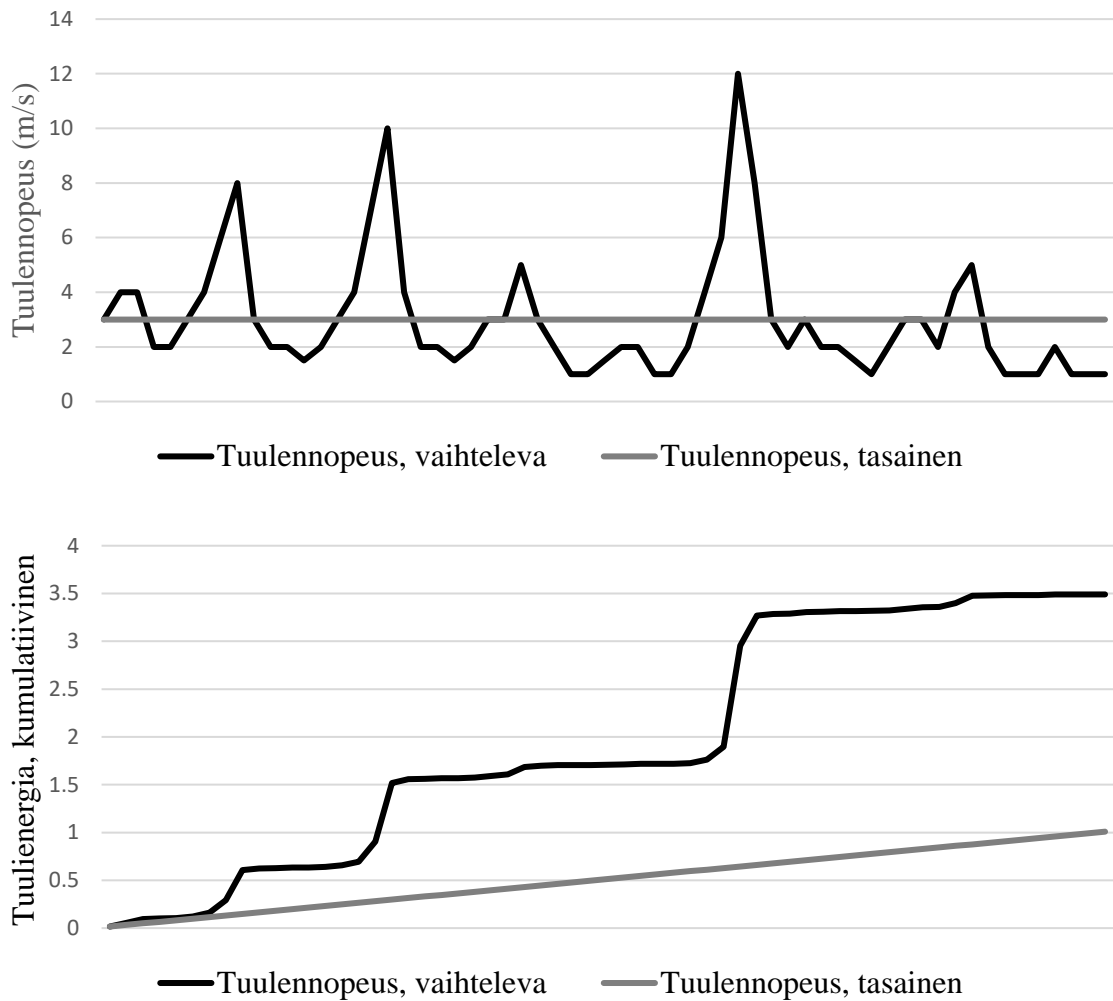
Järjestelmän suunnittelu aloitettiin tarkastelemalla, kuinka aurinko- ja tuulienergian saantoa voidaan ennustaa vuoden sisäisesti. Aurinkoenergian laskentaa varten voidaan laskea Auringon sijainti portaattomasti ja hyvin tarkasti koko vuoden ajalta. Tällöin Auringon säteilypaine on erittäin tarkasti ennustettavissa ilmakehän ulkopuolella minä tahansa ajankohtana. Myös ilmakehän vaimennus (AM) voidaan ottaa huomioon laskennassa, eli kuinka paljon auringon säteilypaine heikkenee matkalla maan pinnalle. Sääolosuhteiden muutokset tuovat laskentaan mukaan niin monta kaoottista muuttujaa, että niiden

ennustaminen on lähes mahdotonta. Pilvet laskevat aurinkoenergian tuotantoa todella paljon ja sen lisäksi pilvipeitteen paksuus vaihtelee.

Sijaintikohtaisen aurinkoenergian tuotannon ennustamiseksi on kuitenkin olemassa kohtuullisen tarkkaa GIS-dataa (GIS, Geographical Information System). Tässä tutkimuksessa hyödynnetään PVGIS-palvelun ERA5-dataa, jossa on yhdistelty mittaus-, laskenta- ja satelliittidataa. PVGIS on ilmainen työkalu, jonka avulla voidaan arvioida aurinkoenergian määrää eri maantieteellisissä sijainneissa. PVGIS antaa optimaalisen atsimuutti- ja elevaatiokulman, johon aurinkopaneelit kannattaa asentaa parhaan tuoton saavuttamiseksi. (Joint Research Centre, 2022) (PVGIS, 2019)

ERA5-dataa on tutkittu ja sen on todettu olevan 7.5 prosenttia optimistisempi, kuin mitattu data. (Krystian Cieslak, 2018) Tämä tulee ottaa huomioon laskelmien varmuusmarginaalissa.

Tuulienergian tuotannon ennustamista varten tarkasteltiin aluksi ERA5-datan keskimääräistä alueellista tuulennopeutta eri vuodenaikoina. Keskimääräinen tuulennopeus osoittautui tuotannon ennustamisen kannalta hyvin epätarkaksi lähtötiedoksi. Tuulesta saatavilla oleva energia kasvaa yhtälön (2) mukaisesti tuulennopeuden kolmannessa potenssissa. Yli sadan metrin korkeudessa tuulen nopeus on melko tasainen ja ennustettava, mutta alle 50 metrin korkeuksissa tuulen nopeus ja suunta vaihtelevat hyvin paljon, eikä yli 50 metriä korkeaa mastoa ole teknisesti helppo, saati halpa rakentaa. Tarkastellaan kahta skenaariota, joissa molemmissa tuulen keskinopeus on 3 m/s:



Kuva 16. Tuulennopeuden vaihtelun vaikutus tuulesta saatavan energian määrään.

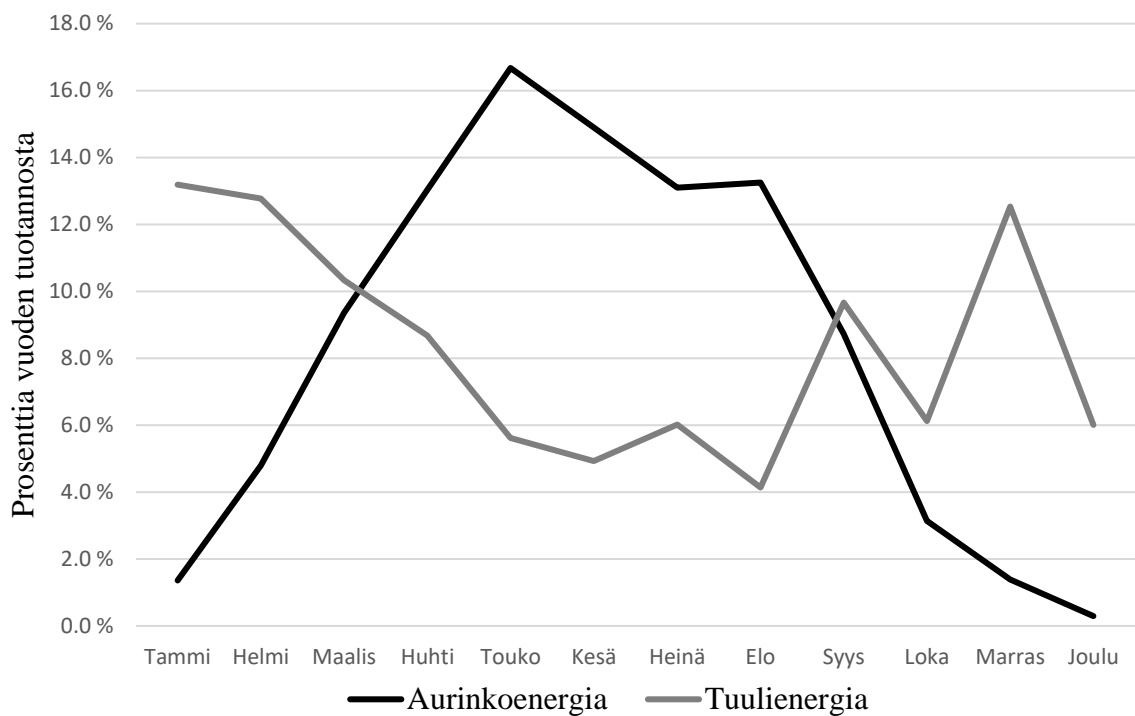
Kuvien mukaisesti suurin tuotanto tapahtuu puuskien aikana ja vaikka tuulen keskinopeus on molemmissa aikaikkunoissa sama, niin ero skenaarioiden välisessä tuotannossa on 3.5 kertainen. Voidaan siis todeta, että tuulen keskinopeus ei ole riittävä lähtötieto tuulienergian tuotannon arvioimiseksi, vaan mittaus on tehtävä aina tapaus- ja sijaintikohtaisesti esimerkiksi vuoden ajan tarkasti juuri siltä kohti ja siltä korkeudelta, johon turbiini olisi tarkoitus rakentaa.

3.2 Energiantuotannon kausivaihtelut

Päiväntasaajalla päivän pituus on noin 12 tuntia ympäri vuoden, jolloin aurinkoenergian tuotanto pysyy hyvin ennustettavana läpi vuoden. Tämän lisäksi Auringon säteet saapuvat

maahan keskipäivällä kohtisuoraan ilmakehän läpi, jolloin se vaimenee ilmakehässä mahdollisimman vähän (AM1).

Päiväntasaajalta pois siirtyessä päivän pituus vaihtelee vuodenajan mukaan, jolloin aurinkoenergian tuotanto painottuu tietyille kuukausille ja joinakin kuukausina aurinkoenergiaa ei ole tarjolla ollenkaan. Tämä luo suuren haasteen järjestelmän suunnittelulle. Kuten aiemmin mainittu ja kuten kuvassa 17 on esitetty, myös tuulienergia on luonteeltaan kausiluonteista.



Kuva 17. Aurinko- ja tuulienergian tuotannon kausivaihtelu Jyväskylässä kuukausitasolla vuonna 2020. Tuotantotiedot luotu PVGIS-ERA5-datan pohjalta.

Talviaikaan keskimääräinen tuulennopeus kasvaa ja kesäaikaan kohti tuulen nopeus laskee. Tästä voisi tehdä johtopäätelmän, että pohjoisemmilla leveyspiireillä järjestelmä voisi tuottaa kesäaikaan tarvitsemansa energian aurinkopaneeleilla ja talvisaikaan tuuliturbiini paikaksi aurinkoenergian puutetta.

3.2.1 Pienikokoisen tuuliturbiinin kannattavuus

Pienikokoisten tuuliturbiinien vuosittaisesta tuotannosta voidaan tehdä karkea arvio hyödyntämällä valmistajien antamia tuotanto-odotuksia sekä hyödyntämällä tuuliturbiinien teoriaa laskennassa.

Taulukko 2. Tuuliturbiinien ominaisuudet sekä LCOE-hinta. LCOE on lyhenne sanoista Levelized Cost of Energy ja tarkoittaa järjestelmän kustannuksia koko elinkaaren aikana. HAWT tarkoittaa horisontaalissuuntaista tuuliturbiinia ja VAWT vertikaalissuuntaista tuuliturbiinia. LCOE on laskettu yksinkertaistaen jakaen hankintakustannukset elinkaaren kokonaistuotantoarviolla. Hankintakustannuksiin on laskettu tuuliturbiini, masto, sekä sähkökeskus. Huoltokustannuksia ei ole otettu huomioon. Elinkaaren pituudeksi on arvioitu 20 vuotta.

Turbiini	Pyyhkäisypinta-ala (m ²)	Paino (kg)	Tuotantoarvio/vuosi 3–8 m/s (kWh)	LCOE (€/kWh)
HAWT 1	11.3	125	1250–9800	0.18–1.44
HAWT 2	14.5	165	1900–17700	0.10–0.95
VAWT 1	2.0	210	572–2000	0.90–3.15
VAWT 2	4.0	800	700–3300	0.55–2.57

Tuuliturbiinin maston rakentamiseksi vaaditaan maaperätutkimukset muutamasta vaihtoehtoisesta kohdasta ja näiltä kohden tulee tehdä yhden vuoden mittaiset tuulitutkimukset tuuliturbiinin asennuskorkeudelta. Mittausten jälkeen rakennettavan maston korkeuden on oltava yli 20 metriä ja sen tulee kantaa turbiinin paino sekä kestää siihen kohdistuva tuulikuorma. Myös maston perustuksia varten on tehtävä maaperätutkimukset. Tuuliturbiinin merkittävä kasvattaminen vaatii luonnollisesti myös maston kestävyuden kasvattamista. Maston ja perustuksen sekä tuuliturbiinin yhteenlaskettu hankintahinta on suhteellisen korkea erityisesti sen tuotto-odotukseen nähden. LCOE-laskelmissa ei ole otettu huomioon huoltokustannuksia. Turbiinit vaativat usein vähintään vuosittain huoltotoimenpiteitä, jolloin muun muassa liikkuvat osat rasvataan.

3.2.2 Aurinkopaneelien kannattavuus

Aurinkopaneelien tuotto-odotus voidaan arvioida kohtalaisen tarkasti hyödyntämällä saatavilla olevaa GIS-dataa. Aurinkosähköjärjestelmä on LCOE-laskelmien mukaan

kustannustehokas vaihtoehto. Lisäksi järjestelmä ei vaadi juuri huoltoa. Järjestelmän skaalaaminen on vaivatonta, sillä paneeleita ja keskuskomponentteja voidaan vain lisätä tarvittava määrä. Energiantuotanto on hyvin ennustettavissa ja energiaa on saatavilla paljon.

Taulukko 3. Aurinkosähköjärjestelmän tuotantoarvio ja LCOE-hinta. Järjestelmän teho arviossa on 10 kWp suuruinen ja hankintakustannuksiin on laskettu myös sähkökeskus. Elinkaaren pituudeksi on arvioitu 20 vuotta. Nordkapp on Euroopan pohjoisin kohta ja Isiolo sijaitsee päiväntasaajalla.

Järjestelmän sijainti	Leveyspiiri	Tuotantoarvio/vuosi 10 kWp (kWh)	LCOE (€/kWh)
Nordkapp, Norja	71°	10060	0.06
Jyväskylä, Suomi	62°	11700	0.05
Isiolo, Kenia	0°	19240	0.03

Järjestelmää suunnitellessa kannattaa huomata, että suuritehoinen aurinkovoimala vaatii paljon tilaa. Suurin ongelma syntyy kuitenkin tuotannon kausiluonteisuudesta päiväntasaajalta pois siirryttäessä. Talvikuukausien aikana aurinkopaneelille satanut lumi vaikuttaa tuotannon suuruuteen, mutta tutkimusten mukaan lumen kasautumista ja siten tuotannon heikentymistä voidaan ehkäistä asentamalla aurinkopaneelit yli 35° elevaatiokulmaan ja yli 80° elevaatiokulmalla lumen kasautuminen on hyvin vähäistä. Yleensä kaukaisemmillä leveyspiireillä tuotannon kannalta optimaalinen elevaatiokulma on kuitenkin poikkeuksetta yli 35°. Aurinkosähköjärjestelmiä suunnittelevat tahot ovat käyttäneet nyrkkisääntöä, jossa lumen vaikutus otetaan huomioon vähentämällä 20 % vuosittaisesta tuotantoarviosta, mutta vuonna 2012 aloitetun kanadalaisen tutkimuksen mukaan tuotanto vähenee vuositasolla vain noin 3 %. (Northern Alberta Institute of Technology, 2018) (Alexander Granlund, 2019) (Loren Powers, 2010) Talvikuukausien tuotantoa voidaan priorisoida kasvattamalla aurinkopaneelien elevaatiokulmaa optimaalista suuremmaksi, mutta tällöin tuotanto muina ajankohtina heikkenee. Yleensä tuotanto on kuitenkin muina aikoina huomattavan ylijäämäistä, jolloin optimaalista suurempi elevaatiokulma voi olla perusteltua. On myös tärkeää asentaa aurinkopaneelit siten, että aurinkopaneelien alalaita on riittävän korkealla, jotta talven aikana satanut lumi (otettava huomioon myös paneelilta maahan valuva lumi) ei yletä paneelille ja siten, että aurinkopaneelien ohitusdioiden aurinkokennokatjut ovat poikittaissuuntaiset, jotta

aurinkopaneelin alalaitaan valuva lumi ei peitä jokaista aurinkokennoketjua ja siten rajoita tuotantoa merkittävästi.

3.3 Sesonkituotanto ja energiavarastointi

Taulukoissa 2 ja 3 on hahmoteltu tuuliturbiinien ja aurinkosähköjärjestelmien elinkaarikustannuksia. Näiden pohjalta voidaan todeta, että aurinkosähköjärjestelmän kustannukset ovat huomattavasti matalammat, jonka lisäksi aurinkoenergian tuotannon ennustettavuus, huoltotarpeiden vähyys ja skaalautuvuus tekee tästä vaihtoehdosta houkuttelevan.

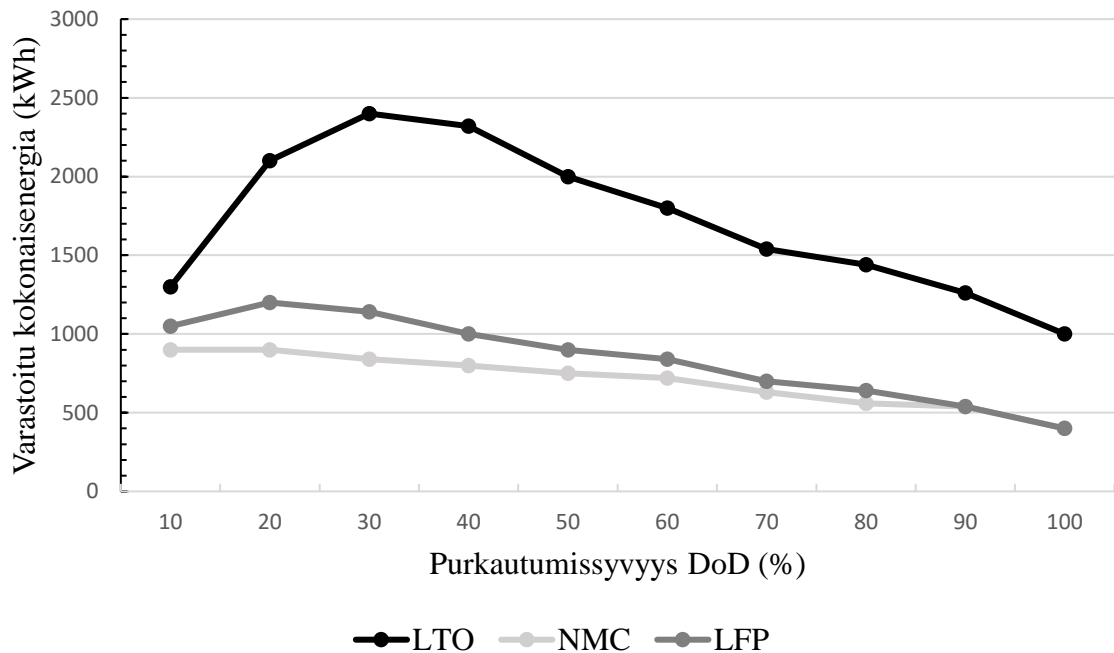
Tarkastellaan siis vaihtoehtoa, jossa tarvittava energia tuotetaan sesonkiaikaan ja varastoidaan talteen myöhemmin käytettäväksi. Energianvarastointi tehdään monesti tämänkaltaisissa ratkaisuissa litiumioniakuilla, mutta myös superkondensaattori- ja vetyratkaisuja kannattaa tarkastella.

3.3.1 Litiumioniakkujen kannattavuus

Litiumioniakkujen tekniikka on kehittynyt ja hinnat ovat laskeneet viime vuosina. LTO, LFP ja NMC ovat yleisesti käytettyjä ja tekniikaltaan turvallisimmiksi todettuja litiumioniakkutyyppejä. Akkutyypin elinkaaren aikaisten syklien määrä vaihtelee purkautumissyvyyden mukaan ja tämä on tärkeää ottaa huomioon järjestelmän suunnittelussa. Kuvassa 18 on esitetty litiumioniakkujen kokonaissykliemäärien muutos purkautumissyvyyksien mukaan. Näistä tiedoista voidaan tehdä laskelma

$$E_{EK} = C \times C_{DoD} \times S_{LKM} \quad (7)$$

Yhtälössä E_{EK} on elinkaaren aikana kerätyn energian määrä, C on akuston kapasiteetti, C_{DoD} on akun purkautumissyvyys prosentteina ja S_{LKM} on syklien määrä akuston elinkaaren aikana. Kun tiedoista tehdään yhtälön mukaan kuvaaja, havaitaan, että LTO-akuilla saadaan paras hyötysuhde, kun akkua puretaan maksimissaan 50 prosenttia. NMC- ja LFP-akut eivät elinkaarensa puolesta pärjää LTO-akuille, mutta ovat huomattavasti edullisempia.



Kuva 18. Eri akkutyypin varauskapasiteetin kokonaisvarastointikyky elinkaaren aikana. Esimerkissä akustojen kapasiteetti on 1 kWh suuruinen.

3.3.2 Superkondensaattorien kannattavuus

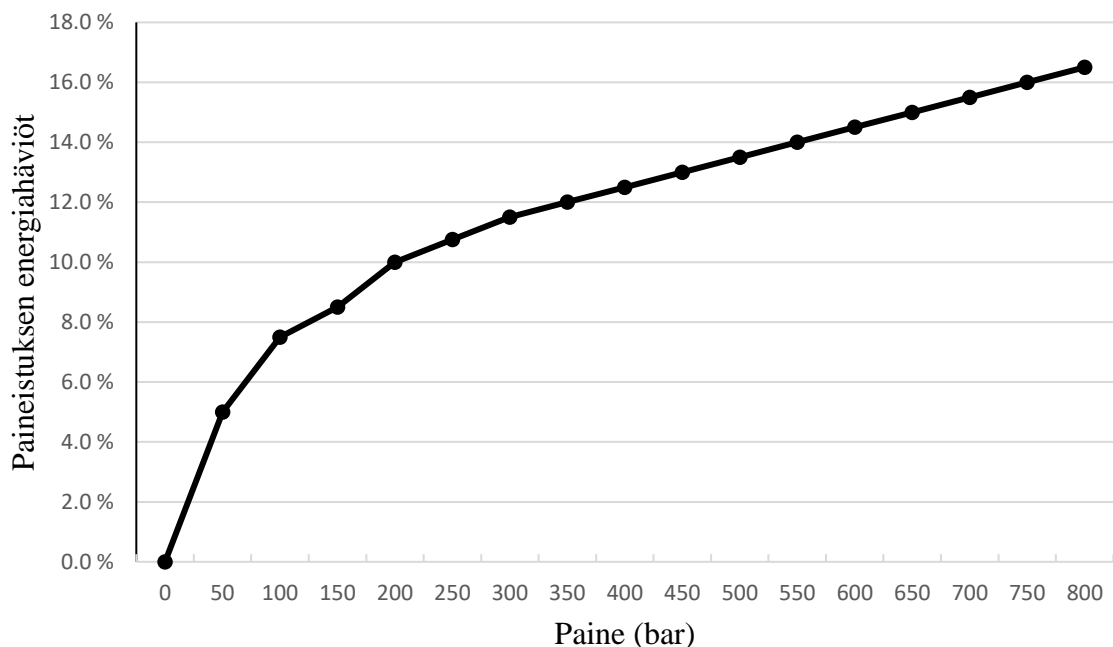
Superkondensaattorit ovat litiumioniakustoja vähemmän käytetty vaihtoehto. Niiden etuna on suuri virrantiheyden sieto ja pieni sisäresistanssi, eli ne kykenevät purkamaan ja varaamaan energiaa nopeasti, eikä energiaa mene hukkaan yhtä paljon kuin esimerkiksi litiumioniakustoissa. Lisäksi niiden elinkaari on huomattavan pitkä, eikä purkautumissyvyys vaikuta niiden elinkaaren pituuteen merkittävästi. Superkondensaattorit kuitenkin purkavat itsestään energiaa litiumioniakkuja nopeammin ollessaan käyttämättömänä, jolloin ne eivät sovellu pitkäaikaiseen energiavarastointiin kovin hyvin.

Superkondensaattorien kilowattituntihinnat vaihtelevat 450–1000 euron välillä ja niiden elinkaaren syklimääräksi on valmistajan mukaan taattu 20000–50000.

3.3.3 Vetyvarastoinnin kannattavuus

Vety energianvarastoinnin muotona on ollut jo vuosia kasvavassa trendissä. Varastoitu vety säilyttää energiamääränsä muuttumattomana, jolloin se soveltuu hyvin pitkäaikaiseen energianvarastointiin. Energiaa menee kuitenkin paljon lämpönä hukkaan vedyksi ja jälleen

sähköksi muutettaessa. Elektrolyysiprosessin hyötysuhde on noin 60–80 % ja polttokennoprocesien hyötysuhde on noin 40–55 %, jolloin vetyvarastoinnin kokonaishyötysuhteeksi saadaan 24–44 %. (Norazlianie Sazali, 2020) Mikäli vetyä varastoidaan edelleen vielä korkeampaan paineeseen, tavallisesti 200–350 bariin, niin kompressorin tyypistä ja varastointipaineesta riippuen paineistuksessa häviöitä syntyy lisäksi 10–12 %, jonka lisäksi häviöitä syntyy kompressorin moottorin pyörimisessä. Erään vetykompressorivalmistajan mukaan heidän pienitehoisten vetykompressoriansa hyötysuhde on noin 70 %. Tällöin kokonaishyötysuhde on 17–31 %, joka on erittäin matala litiumioniakkuihin tai superkondensaattoreihin verrattuna. (Ulf Bossel, 2022)



Kuva 19. Vedyn paineistukseen kuluvan energian määrä suhteessa paineistetun vedyn energiamäärään eri paineissa. (mukaillen (Ulf Bossel, 2022))

Vetyvarasto on kuitenkin helposti skaalattavissa, sillä vety varastoidaan painesäiliöön ja säiliön koko voidaan kustomoida tarpeiden mukaan. Energiavaraston kapasiteetin kasvattaminen on siis erittäin kustannustehokasta. Myös elektrolyysilaitteiden sekä polttokennojen teho voidaan suunnitella tarpeiden mukaan.

3.4 Pitkä- ja lyhytaikainen energianvarastointi

Energian varastoinnin hyvät ja huonot puolet voidaan tehokkaasti yhdistää suunnittelemalla järjestelmään lyhyt- ja pitkäaikainen energiavarasto. Lyhytaikaisen energiavaraston

tehtävänä ottaa vastaan korkeat tuotantopiikit ja olla järjestelmään liitetyn kuorman ensisijainen energianlähde. Pitkäaikaisen energiavaraston tehtävänä on pitää lyhytaikaisen energiavaraston varaustaso riittävällä tasolla ja siten varmistaa järjestelmään liitetyn kuorman toiminta myös ajanjaksoina, jolloin energiantuotanto on vähäistä.

3.4.1 Lyhytaikainen energian varastointi

Lyhytaikainen energiavarasto tulee mitoittaa siten, että se kykenee syöttämään järjestelmään liitettyä kuormaa sekä vastaanottamaan tuotetun energian siirtäen ylijäämän elektrolyysilaittein mahdollisimman tehokkaasti pitkäaikaiseen varastoon. Jos lyhytaikainen energiavarasto alimitoitetaan, varasto täyttyy tuotantopiikeistä usein, ja suurta osaa aurinkoenergiasta ei kyetä varastoimaan pitkäaikaiseen varastoon, vaan se menee hukkaan.

Lyhytaikaisen energiavaraston varaus voi vaihdella suuresti ja lataussyklejä voi syntyä useita vuorokauden aikana, jos esimerkiksi tuotannon suuruus vaihtelee vuorokauden aikana paljon. Tästä johtuen lyhytaikaista energiavarastointia varten kannattaa harkita käytettäväksi superkondensaattoreita niiden pitkän syklielinkaaren vuoksi. Superkondensaattorien elinkaaren pituuteen ei myöskään vaikuta purkautumissyvyys yhtä paljon kuin litiumioniakuilla. Superkondensaattorit tulee kuitenkin ohjelmoida latautumaan täyteen valmistajan ohjeiden mukaisesti tietyin väliajoin, jotta niiden varauskyky säilyy mahdollisimman hyvin ennallaan.

3.4.2 Pitkäaikainen energian varastointi

Pitkäaikaisella energiavarastolla tarkoitetaan tässä tapauksessa vetyvarastointia. Lyhytaikaisen energiavaraston ollessa tietyn varaustason yläpuolella, elektrolyysilaitteisto alkaa tuottaa vetyä pitkäaikaiseen varastoon. Koska erityisesti pohjoisessa energiaa pitää varastoida ympärivuotista käyttöä varten paljon, varastoitava vety vaatii matalassa paineessa hyvin suuren tilan. Tästä syystä pitkäaikainen varasto voidaan jakaa vielä kahteen osaan; matala- ja korkeapaineiseen vetyvarastoon. Matalapaineisessa vetyvarastossa säiliön paine on elektrolyysilaitteen antopaineen suuruinen, vaihtelevasti 20–35 barin suuruinen. Korkeapaineisen vetyvaraston paine on yli 200 baria ja sen saavuttamiseksi varastojen väliin tarvitaan kompressori. Kun vety paineistetaan 10 kertaiseen paineeseen, sen säilömiseen

vaadittava tila pienenee samalla kymmenykseen matalapaineiseen vetyvarastoon nähden. Paineistetun vedyn vaatima tila voidaan laskea ideaalikaasun tilayhtälöllä

$$V = \frac{nRT}{p} \quad (8)$$

jossa V on kaasun tilavuus kuutiometreissä, n on kaasun moolimäärä, R on moolinen kaasuvakio, jonka suuruus on $8.314 \text{ J}/(\text{K} \times \text{mol})$, T on kaasun absoluuttinen lämpötila kelvineinä ja p on kaasun paine pascaleina.

Kohteissa, joissa aurinkoenergiasesonkien välillä on lyhyempi aikaväli, pitkäaikaisesta energiavarastosta voidaan jättää pois korkeapainevarastointi. Mikäli lähestytään päiväntasaajaa, jossa aurinkosähköenergian tuotanto on kohtalaisen tasaista läpi vuoden eikä syötettävän järjestelmän kuormitus vaihtelee suuresti, koko pitkäaikainen energiavarastointi voidaan jättää pois, jolloin kaikki energiavarastointi tapahtuu lyhytaikaista energiavarastoa hyödyntäen.

3.5 Laitetilan lämmitys

Elektrolyysilaitte, polttokenno, superkondensaattori ja litiumioniakusto ei saa jäätyä, minkä vuoksi sisälämpötilaa on seurattava ja se on pidettävä aina nollan celsiusen yläpuolella. Elektrolyysilaitte ja polttokenno tuottavat itsessään lämpöä toimiessaan, minkä lisäksi laitetilaan sijoitetuissa laitteissa syntyy lämpöhäviöitä. Ylimääräisen lämmitystarpeen vähentämiseksi laitetila kannattaa eristää hyvin. Rakennuksen lämpöhäviöt voidaan laskea antamalla laitetilalle ensin mitat, eli korkeus, leveys ja syvyys. Näistä voidaan laskea seinä-, katto- ja lattiapinta-ala. Tämän jälkeen tulee valita eristetyyppi, jota pintojen eristeeksi laitetaan, jotta saadaan eristeen lämmönjohtavuus laskentaan mukaan. Esimerkiksi polystyreenilevyn lämmönjohtavuus on tavallisesti noin $0.035\text{-}0.040 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$. Kun annetaan eristeelle paksuus, voidaan laskea pinnan lämpövastus jakamalla paksuus eristeen lämmönjohtavuudella. Lämpövastusta laskiessa on huomattava, että johtumisen suunnalla on merkitystä. Johtumisen suunta otetaan huomioon lisäämällä ainekerroksen lämmönvastukseen pintavastusarvot R_{SI} (sisäpuolinen pintavastus) ja R_{SE} (ulkopuolinen pintavastus), jotka vaihtelevat suunnan mukaan. Tämän vuoksi laskenta on tehtävä seinä-, katto- ja lattiapinnoille erikseen. Esimerkiksi lämmönjohtavuudeltaan $0.035 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$

suuruisen, 10 senttimetriä paksun polystyreeniseinän (vaakasuora lämpövirta) lämpövastus on noin $3.03 \text{ (K}\times\text{m}^2\text{)/W}$ ($0.1 \text{ m} / 0.035 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K}) + 0.13 + 0.04 = 3.03 \text{ (K}\times\text{m}^2\text{)/W}$)

Taulukko 4. Sisä- ja ulkopuolisten pintavastusten suuruus eri lämpövirran suunnilla. (Ympäristöministeriö, 2003)

Lämpövirran suunta	R_{SI}	R_{SE}
Vaakasuora	0.13	0.04
Ylöspäin	0.10	0.04
Alaspäin	0.17	0.04

U-arvo on lämpövastusarvon käänteisluku. Kun kaikkien pintojen lämpövastusarvot on laskettu, niin otetaan pintojen käänteisluku, joka on yksiköltään $\text{W}/(\text{K}\times\text{m}^2)$. Kun pintojen U-arvo kerrotaan pintojen pinta-alalla ja pintojen ulko- ja sisäpuolen lämpötilan erotuksella, saadaan pinnan laskettua pinnan lämpöhäviöt. Esimerkiksi edellä lasketun seinän U-arvo on $0.33 \text{ W}/(\text{K}\times\text{m}^2)$ ($1 / 3.03 \text{ (K}\times\text{m}^2\text{)/W} = 0.33 \text{ W}/(\text{K}\times\text{m}^2)$). Annetaan ulkolämpötilaksi -10 celsiusta ja sisälämpötilaksi 10 celsiusta, jolloin lämpötilaero on 20 celsiusta. Oletetaan seinän pinta-alaksi 10 m^2 . Tällöin seinän lämpöhäviö on 66 W ($0.33 \text{ W}/(\text{K}\times\text{m}^2) * (10 \text{ }^\circ\text{C} - (-10 \text{ }^\circ\text{C})) * 10 \text{ m}^2 = 66 \text{ W}$). Kun lasketaan koko rakennuksen lämpöhäviöt, jokaisen pinnan lämpöhäviöt lasketaan erikseen ja lopulta summataan yhteen. (Ympäristöministeriö, 2003)

3.6 Laskenta ja järjestelmän mitoittaminen

Tässä osiossa käydään läpi laskennan yksityiskohtia sekä sitä, kuinka järjestelmän mitoittaminen tapahtuu. Mitoittamisesimerkissä selitetään tarkemmin mitoittamisen eri vaiheita ja kuinka laskennan tuloksiin on päästy. Mitoitusesimerkin järjestelmä kootaan edellä tehtyjen päätelmien perusteella.

3.6.1 Laskenta

Laskentaa varten laadittiin Excel-pohjainen työkalu, johon syötetään kohteen mukaan säädataa tunnin tarkkuudella. Kuten aiemmin todettu, ERA5-säädata on todettu mittauksin 7.5% liian optimistiseksi ja se otetaan laskennassa huomioon pudottamalla säädatan säteilypaine oikealle tasolle.

Excel-työkaluun syötetään toivottu aurinkosähköjärjestelmän koko ja järjestelmän aurinkopaneelien hyötysuhde, jonka avulla se laskee säädataan pohjautuen järjestelmän vuosituotannon suuruuden. Tuotanto summataan soluun, joka simuloi lyhytaikaisen energiavaraston toimintaa. Kun lyhytaikaisen energiavaraston varaus on riittävän korkea, varastosta vähennetään tietyn suuruinen määrä ja siirretään pitkäaikaiseen, matalapaineiseen vetyvarastoon. Siirrossa otetaan huomioon elektrolyysilaitteen hyötysuhde. Kun matalapaineisen energiavaraston varaus on riittävällä tasolla, siitä vähennetään tietyn suuruinen määrä korkeapaineiseen energiavarastoon. Siirrossa otetaan huomioon kompressorin hyötysuhde. Kun kaikki varastot ovat täynnä, tuotettu aurinkoenergia jää yli. Aurinkoenergian vähentyessä lyhytaikainen energiavarasto putoaa ensin tietyn asetetun varaustason alapuolelle ja pitkäaikainen, matalapaineinen vetyvarasto alkaa syöttää energiaa. Vetyvarastosta vähennetään lyhytaikaiseen varastoon siirretty energia ja lisätään se lyhytaikaisen varaston soluun. Siirrossa otetaan huomioon polttokennon hyötysuhde. Kun matalapaineisen vetyvaraston paine laskee alle tietyn rajan, korkeapaineisesta vetyvarastosta lasketaan painetta matalapaineiseen vetyvarastoon. Elektrolyysilaitteen, polttokennon ja kompressorin teho voidaan asettaa laskentatyökalun parametreihin. Laskennassa otetaan huomioon laitteiden tehojen rajoitteet, eli energiaa ei voida siirtää varastosta toiseen laitteiden tehoa nopeammin.

Lisäksi työkalu laskee sähkötilan tilavuuden, pintojen lämmönjohtumisarvot, sekä lämmitystarpeen, kun työkaluun syötetään tilan mitat, eristeen lämmönjohtavuus ja paksuus ja toivottu sisälämpötila. Lämmön johtumiseen vaikuttaa eristeen ulko- ja sisäpuolen välinen lämpötilaero, joka voidaan laskea syötetystä sisälämpötilasta ja säädatan ulkolämpötilasta.

3.6.2 Järjestelmän mitoittamisen perusteet

Järjestelmän mitoittaminen aloitetaan syöttämällä arvioitu kuorman keskikulutus. Keskikulutusta arvioidessa on tarkasteltava syötettävän kuorman luonnetta. Jos kuorma koostuu tietoteknisistä laitteista, kuten verkkokytkimistä ja mittalaitteista, joiden kulutus ei suuresti vaihtelee, niin keskikulutus on helppo arvioida. Mikäli kuorma saattaa vaihdella ja vaatia hetkellisesti huomattavan määrän energiaa, on tärkeää arvioida lyhytaikaisen energiavaraston kapasiteetin riittävyttä, ettei käy niin, että hetkellinen kuormitus tyhjentää energiavaraston, eikä polttokenno kykene tuottamaan sähköä riittävästi.

Kulutus arvioidaan laskennassa muuttumattomaksi. Keskikulutuksen pohjalta voidaan laskea vuoden energiankulutus kertomalla keskikulutus vuoden tuntimäärällä. Esimerkin vuoksi arvioidaan keskikulutukseksi 100 wattia, jolloin vuoden kokonaiskulutukseksi saadaan 876 kWh, kun vuodessa on tunteja 8760.

Laitetilan alustava koko, tavoitesisälämpötila, eristeen lämmönjohtavuus sekä paksuus on syötettävä työkaluun, jotta lämmitystarpeet voidaan laskea. Energiavarastojen vaatima tila voi kuitenkin lopulta vaikuttaa laitetilan kokoon, jolloin laskenta on lopulta vielä iteroitava. Laskennassa on otettava huomioon järjestelmän osat, jotka tuottavat laitetilassa toimiessaan lämpöä häviöinä, jolloin erillisen lämmityksen tarve ei ole niin suuri. Tavoitelämpötila kannattaa asettaa laitetilaan sijoitettavien järjestelmien lämpötilavaatimusten mukaan. Laskennassa tavoitelämpötilaksi asetetaan 15 celsiusastetta, eristeen paksuudeksi 20 senttimetriä ja lämmönjohtavuudeksi $0.035 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$.

Varastoitaessa energiaa kuluu myös häviöihin ja niiden laskemiseksi tarvitaan energiavarastoinnin painotettu hyötysuhde η_A , joka ottaa huomioon häviöt eri energiavarastojen välillä energiaa liikutellessa ja samalla energiavarastojen kapasiteetit. Nimetään selkeyden vuoksi varastot seuraavasti ja annetaan niille kuvitteelliset kapasiteetit:

- Lyhytaikainen energiavarasto, A1, kapasiteetti $C_{A1} = 10 \text{ kWh}$
- Pitkäaikainen, matalapainevetyvarasto, A2, kapasiteetti $C_{A2} = 10 \text{ kWh}$
- Pitkäaikainen, korkeapainevetyvarasto, A3, kapasiteetti $C_{A3} = 100 \text{ kWh}$

Lasketaan esimerkiksi energiavarastojen hyötysuhteet asettamalla elektrolyysilaitteelle, polttokennolle ja kompressorille kuvitteelliset hyötysuhteet:

- Elektrolyysilaitteen hyötysuhde = 60 %
- Polttokennon hyötysuhde = 40 %
- Kompressorin hyötysuhde = 70 %

Energiavaraston A1 läpi kulkeva energia, eli energia, joka akkuun varastoidaan ja lopulta käytetään kulutukseen, oletetaan laskennassa häviöttömäksi, eli sen hyötysuhde η_{A1} on 100 %. Energiavaraston A2 läpi kulkeva energia kulkee elektrolyysilaitteen ja polttokennon läpi, jolloin sen hyötysuhde η_{A2} on 24 %. Energiavaraston A3 läpi kulkeva energia kulkee

elektrolyysilaitteen, kompressorin ja polttokennon läpi, jolloin sen hyötysuhde η_{A3} on noin 17 %. Näiden tietojen perusteella voidaan tehdä laskelma painotetulle hyötysuhteelle

$$\begin{aligned}\eta_A &= \frac{C_{A1} \times \eta_{A1}}{C} + \frac{C_{A2} \times \eta_{A2}}{C} + \frac{C_{A3} \times \eta_{A3}}{C} & (9) \\ &= \frac{10 \times 100 \%}{120} + \frac{10 \times 24 \%}{120} + \frac{100 \times 17 \%}{120} \\ &\approx 24.5 \%\end{aligned}$$

Kun järjestelmään syötetyn laitteen vuoden kokonaiskulutus jaetaan painotetulla hyötysuhteella, saadaan tulokseksi noin 3576 kWh. Tämä on arvio kokonaisenergiatarpeesta. Toisin sanoen aurinkosähköjärjestelmä tulee mitoittaa siten, että sen vuosittainen tuotanto ylittää kokonaisenergian tarpeen. Tämä tehdään siten, että laskentatyökalussa aurinkosähköjärjestelmän suuruutta kasvatetaan niin kauan, että säädatasta laskettu tuotanto on riittävä.

Kun aurinkosähköjärjestelmä on mitoitettu, mitoitetaan energiavarasto A1. Energiavarastoille annettiin jo aiemmin alustavat kapasiteetit, mutta laskenta vaatii iterointikierröksen, jotta päästään toivottuun lopputulokseen. Mitoittaminen aloitetaan asettamalla järjestelmälle aktivaatorajat, joissa energiaa aletaan siirtää energiavarastosta toiseen. Akustojen valmistajat antavat usein jonkin prosentuaalisen arvon, jonka alle akuston varausta ei kannata laskea. Esimerkissä käytetään lyhytaikaisena energiavarastona eräänlaista superkondensaattoria, jonka varauksen valmistaja suosittelee pitämään yli 30 % suuruisena. Tätä voidaan pitää akuston alarajana, jolloin akustoon aletaan tuoda lisää energiaa pitkäaikaisesta energiavarastosta. Ylärajan mitoitus on hieman vapaammin asetettavissa, sillä superkondensaattorin purkautumissyvyys ei vaikuta akuston elinkaareen merkittävästi. On kuitenkin suositeltavaa asettaa yläraja 60 % yläpuolelle, jolloin raja-arvojen väliin jää reilusti kapasiteettia eikä energiavarastojen välille synny ylimääräistä energiankierrätystä, joka heikentäisi varastoinnin hyötysuhdetta. Toisin sanoen, mitä ylempi yläraja asetetaan, sitä todennäköisemmin varastoitu energia menee kulutukseen eikä ylimääräistä energiankierrätystä synny. Toisaalta ylärajan asettaminen liian korkealle nostaa laskennallisesti energiavaraston kapasiteetin tarpeettoman suureksi.

Mitoittamista varten voidaan käyttää kiintopisteenä aurinkosähköjärjestelmän kuukausittaisen korkeimman tunninsisäisen tuotannon keskiarvoa koko vuodelta. Ylärajan ylittävä kapasiteetti mitoitetaan tämän mukaan, jolloin varmistutaan, että suurimman osan ajasta akusto on valmis vastaanottamaan energiaa koko hetkellisen tuotannon verran ja tuotettua energiaa menee mahdollisimman vähän hukkaan. Kuukausittaiseksi korkeimman tunninsisäisen tuotannon keskiarvoksi voidaan antaa esimerkiksi 4 kWh. Kun keskiarvo jaetaan akuston ylärajan käsittävällä osuudella, energiavaraston A1 mitoituskapasiteetiksi tulisi noin 10 kWh ($4 \text{ kWh} / (100 \% - 60 \%) = 10 \text{ kWh}$).

Elektrolyysilaitte voidaan mitoittaa ottoteholtaan kuukausittaisen korkeimman tunninsisäisen tuotannon keskiarvon mukaan, jolloin se kykenee siirtämään vetyvarastoon energiaa tuotannon mukaan suurimman osan ajasta. Esimerkissä elektrolyysilaitteen tehoksi asetetaan siis 4 kW. Valmistajat ilmoittavat usein elektrolyysilaitteiden tehon yksikössä kg/h, eli kuinka monta kiloa tunnissa vetyä voidaan tuottaa. Yhdessä kilogrammassa vetyä on 33.33 kWh energiaa, jolloin 4 kW elektrolyysilaitte kykenee tuottamaan hyötysuhde huomioon ottaen 0.07 kg vetyä tunnissa. Lisäksi elektrolyysilaitetta valitessa on tärkeää tarkastella antopaineen suuruus, sillä se määrittää matalapainevetyvaraston toimintapaineen. Oletetaan se tässä tapauksessa 35 barin suuruiseksi. Elektrolyysilaitteen mitoituksessa kannattaa laskennallisen arvon lisäksi tarkastella säädatasta laskettua arviota järjestelmän toimivuudesta myös pienempitehoisella elektrolyysilaitteella. Käytännössä liian tehokas elektrolyysilaitte täyttää varastot nopeasti ja varastojen täytyttyä tuotettu energia menee hukkaan. Elektrolyysilaitteen tehoa voidaan laskea niin, että energiavarastot ehtivät säädatan mukaan täytyttyä ajoissa ennen kuin sesonki päättyy ja tuotanto alittaa kulutuksen.

Polttokenno mitoitetaan siten, että sen sähköntuotantoteho on vähintään syötettävän järjestelmän keskikulutuksen suuruinen. Esimerkissä keskikulutus oli 100 wattia ja polttokennon hyötysuhde 40 %. Tällöin polttokennon on kyettävä polttamaan vähintään 250 watin edestä vetyä, jotta antoteho täyttää keskikulutuksen. Koska laskennassa ei kuitenkaan oteta huomioon järjestelmän muita häviöitä, kannattaa polttokennon nimellisteho laskennassa ylittää esimerkiksi 20 % laskettua suuremmaksi. Esimerkissä polttokennon tehoksi asetetaan 300 W.

Kompressorin mitoitetaan siten, että se kykenee siirtämään elektrolyysilaitteen tuottaman vedyn energiavarastosta A2 energiavarastoon A3. Kompressorin tehon tulee siis olla elektrolyysilaitteen tuotantotehon suuruinen, mikäli maksimaalinen varastointiteho halutaan

saavuttaa. Kuten elektrolyysilaittekin, kompressori voidaan tarvittaessa mitoittaa huomattavasti matalampitehoisemmaksi, jolloin osa energiasta jää varastoimatta, kun kompressori ei välttämättä pysy tuotannon tahdissa, mutta toisaalta sama energia jää kuitenkin myöhemmin yli, kun kaikki varastot täyttyvät tuotantosesonin edetessä. Matalatehoinen kompressori on usein hankintakustannuksiltaan edullisempi, eikä suuritehoisella kompressorilla välttämättä saada tuotannon kannalta mitään etuja. Esimerkissä kompressori suunnitellaan teholtaan sen suuruiseksi, että se kykenee varastoimaan elektrolyysilaitteen tunnissa tuottaman vedyn. Koska elektrolyysilaitteen teho on 4 kW ja hyötysuhde on 60 %, sen tunnissa tuotetun vedyn energiasisältö on 2.4 kWh. Valmistajat ilmoittavat usein kompressorien tehon yksikössä kuutiota per tunti. Ilmoitustapa vaihtelee ja se tulee selvittää valmistajakohtaisesti. Tavallisesti teho ilmoitetaan kuitenkin yksikössä Nm³/h, eli normaali-ilmanpaineisen (noin 1 bar) kaasukuutiometrin kompressio tunnissa. Normaali-ilmanpaineessa 1 kilogramma vetyä vaatii 11.9 m³ tilan. 1 kilogramma vetyä sisältää 33.33 kWh energiaa, jolloin näistä voidaan laskea, että kompressorin olisi oltava teholtaan noin 0.86 Nm³/h ($2.4 \text{ kWh} / 33.33 \text{ kWh} \times 11.9 \text{ m}^3 = 0.86 \text{ m}^3/\text{h}$).

Seuraavaksi mitoitetaan energiavarasto A2. Mitoitus tapahtuu hyvin samalla tapaa kuin energiavaraston A1 mitoitus. Ensin asetetaan ylä- ja alarajat, joissa energiansiirrot aktivoituvat. Koska vetyvaraston varauksen voi laskea hyvin matalaksi ilman, että se vaikuttaa sen toimintaan, alaraja voidaan asettaa matalalle. Lisäksi energiavarastoon saadaan tarvittaessa nopeasti lisää vetyä korkeapainevarastosta A3, sillä energiavarastosta A3 vety siirtyy käytännössä venttiilisäätöisesti suoraan energiavarastoon A2. Asetetaan esimerkiksi alarajan arvoksi 10 %. Matalapainevetyvaraston ylärajalla ei ole suurta merkitystä toiminnan kannalta, joten se voidaan asettaa 50 %:iin. Ylärajan kapasiteetin tulee kuitenkin olla suuruudeltaan riittävä vastaanottamaan elektrolyysilaitteen tuottama vety. Tässä tapauksessa elektrolyysilaitteen tehoksi asetettiin 4 kW ja sen hyötysuhteeksi asetettiin 60 %. Elektrolyysilaitte kykenee siis tuottamaan 2.4 kWh edestä vetyä tunnissa. Ylärajan käsittämäksi kapasiteetiksi asetetaan siis 2.4 kWh, jolloin voidaan laskea energiavaraston A2 kokonaiskapasiteetiksi 4.8 kWh ($2.4 \text{ kWh} / (100 \% - 50 \%) = 4.8 \text{ kWh}$).

Energiavarasto A3 mitoitetaan säädataa hyödyntäen. Kun muut parametrit on syötetty laskentaan, korkeapaine vetyvaraston kapasiteettiä nostetaan, kunnes järjestelmä kykenee syöttämään siihen liitettyä kuormaa katkeamatta ympäri vuoden. Energiavarasto A3 kannattaa kuitenkin mitoittaa siten, että järjestelmän energiavarastojen yhteenlaskettu varaus

ei laske ympärivuotisessa käytössä alle 20 %:n, jolloin saadaan riittävä turvamarginaali sähkönsyötön toimintavarmuuden takaamiseksi ja otetaan huomioon mahdollisen paneeleille satavan lumen vaikutus tuotantoon.

Kun kaikki parametrit on syötetty, laskenta tehdään toisen kerran saaduilla arvoilla. Tällöin kapasiteettien suhteet ja siten energiavarastoinnin painotettu hyötysuhde saadaan laskettua oikeilla arvoilla. Laitetilan kokoa kannattaa tarkastella lopuksi uudemman kerran. Tilaa ei kannata suunnitella tarpeettoman suureksi, koska lämpöhäviöt kasvavat lämmitettävän pinta-alan kasvaessa. Jos lämmitykseen menee normaaliin vuosikulutukseen nähden yli 10 % energiaa, tulee eristetyyppi vaihtaa lämmönjohtavuudeltaan matalampaan, paremmin eristävään vaihtoehtoon tai eristeen paksuutta tulee kasvattaa. Jo yhden senttimetrin lisäeriste voi vähentää lämmityksen tarvetta merkittävästi.

3.6.3 Modulaarisuus

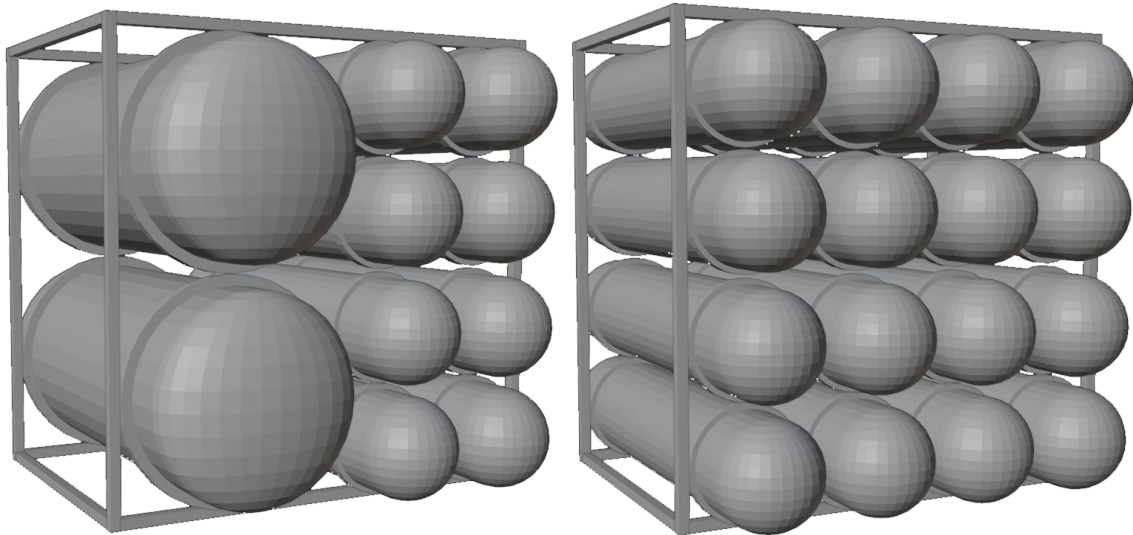
Tehokkaan skaalautuvuuden kivijalkana ovat modulaarisuus, eli suunnittelussa tehtävät ratkaisut voitaisiin koota sujuvasti moduuleista, eikä jokaiselle eri kohteen ratkaisulle tarvitse suunnitella ja rakentaa yksilöllisiä osia. Tällöin suunniteltuja ratkaisuja voidaan sujuvasti huoltaa ja päivittää vain vaihtamalla tai lisäämällä jonkin vakioidun järjestelmän osan, eli moduulin. Lisäksi vakioidun osan tuottaminen on usein halvempaa, kun se, että jokaiseen kohteeseen suunnitellaan erikseen yksilöllinen ratkaisu, joka vaatii oman suunnittelu- ja tuotantoprosessinsa.

Tässä järjestelmässä eniten skaalausta ja modulaarista rakennetta vaativat sähköntuotantoteho ja energiavarastokapasiteetti. Erityisesti vetyvarastojen kapasiteetti vaihtelee suuresti, sillä energiantuotanto painottuu sitä lyhyemmälle ajalle, mitä kauemmaksi päiväntasaajasta siirrytään. Myös aurinkosähköjärjestelmän teho vaihtelee hieman eri leveyspiireillä, kun tuotantojaksojen pituudet vaihtelevat.

Aurinkosähköjärjestelmän skaalaaminen on vaivatonta, sillä tuotantotehoa voidaan kasvattaa lisäämällä aurinkopaneelien määrää. Aurinkopaneeleita voidaan pitää moduuleina itsessään.

Vetyvarastojen kapasiteetin skaalaaminen voidaan toteuttaa rakentamalla vakiokokoisia vetysäiliöitä, joiden määrää lisätään, kunnes vaadittu kapasiteetti täyttyy. Vetysäiliöt pinotaan omaan kehikkoonsa ja tällöin ne asettuvat kuin hyllyyn. Samaan hyllyyn voidaan

asettaa matala- ja korkeapainevetysäiliöt. Matalapainesäiliö liitetään kompressoriin ja elektrolyysilaitteeseen. Korkeapainesäiliöiden päihin tehdään omat venttiilisulut, joiden jälkeen ne yhdistyvät yhteen putkilinjaan tehden säiliöistä yhtenäisen varastokokonaisuuden.



Kuva 20. Kahden modulaarisen vetyvarastovaihtoehdon 3D-mallinnus.

Säiliöiden koko kannattaa suunnitella siten, että niitä voidaan pinota hyllyyn myös eri kokoisina, jolloin suurempien kapasiteettien rakentamiseen tarvitaan vähemmän materiaalia ja liitoksia. Kuvassa 20 olevassa esimerkissä pienikokoinen säiliö voisi olla kokoa 62.5 litraa ja suuri säiliö 250 litraa. Näiden lisäksi voitaisiin valmistaa säiliö, joka on 8x8 moduulin kokoinen, kapasiteetiltaan 1000 litran suuruinen. Tällöin suurimpaan osaan pienikokoisista järjestelmäratkaisuista löytyisi varmasti sopiva säiliöratkaisu.

3.7 Järjestelmän mitoittaminen eri sijainteihin

Tässä osiossa suunnitellaan järjestelmä kahteen erilaiseen maantieteelliseen sijaintiin. Ensimmäinen kohde sijaitsee Manner-Euroopan pohjoisimman niemen kärjessä, Norjan Nordkappissa (leveyspiiri 71.17°), toinen Pohjois-Pohjanmaalla sijaitsevassa Nivalassa (leveyspiiri 63.19°). Säädata on vuoden 2020 ERA5-dataa ja se tuodaan PVGIS-palvelusta. Järjestelmille asetetaan keskimääräiseksi kulutukseksi 150 W.



Kuva 21. Mitoitettavien kohteiden maantieteellinen sijainti kartalla.

3.7.1 Nordkapp, Norja

Laskentatyökalu antaa Nordkappin kohteelle seuraavat mitoitusarvot:

Taulukko 5. Nordkappiin sijoitettavan järjestelmän mitoitustaulukko.

Aurinkopaneelit

Tyyppi:	SunPower Maxeon 3 400 W
Hyötysuhde (%):	22.6
Teho (kWp):	7.2
Paneelien lukumäärä (kpl):	18
Paneelien elevaatiokulma:	53°
Paneelien atsimuuttikulma:	33°

Lyhytaikainen energiavarasto (A1)

Tyyppi:	Superkondensaattori
Kapasiteetti (kWh):	13
Aktivaatioarvot (ylä- ja alaraja, %):	60, 30

Pitkäaikainen energiavarasto, matalapaine (A2)

Kapasiteetti (kWh):	6.15
Säiliön paine (bar):	35
Säiliön tilavuus (litraa):	62.5
Säiliöiden lukumäärä, 62.5 litraa (kpl)	1
Säiliöiden lukumäärä, 250 litraa (kpl)	0
Aktivaatioarvot (ylä- ja alaraja, %):	60, 30

Pitkäaikainen energiavarasto, korkeapaine (A3)

Kapasiteetti (kWh):	1100
Säiliön paine (bar):	350
Säiliön tilavuus (litraa):	1125
Säiliöiden lukumäärä, 62.5 litraa (kpl)	2
Säiliöiden lukumäärä, 250 litraa (kpl)	4

Elektrolyysilaitte

Teho (kg/h):	0.05
Hyötysuhde (%):	60

Polttockenno

Teho (W):	450
Hyötysuhde (%):	40

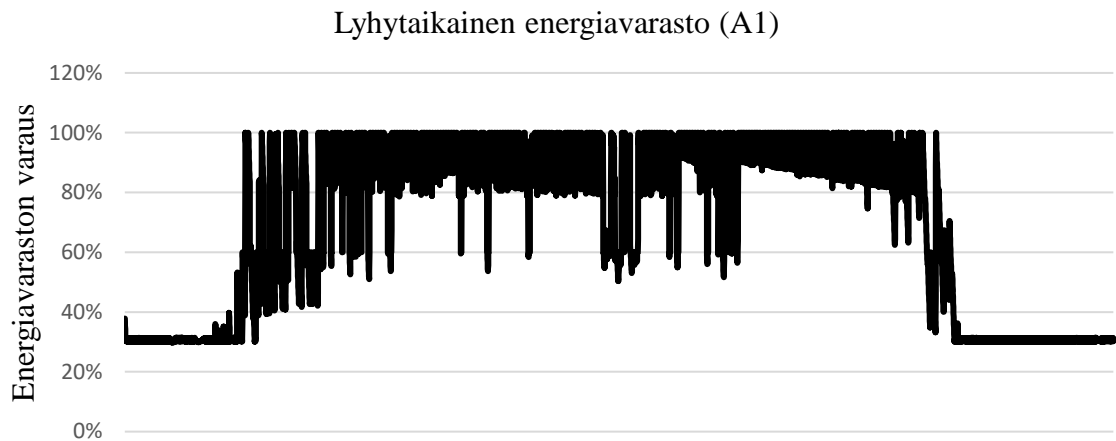
Kompressori

Kompressioteho (Nm ³ /h):	0.18
Keskimäärin kompressiossa hävitty teho (%):	30

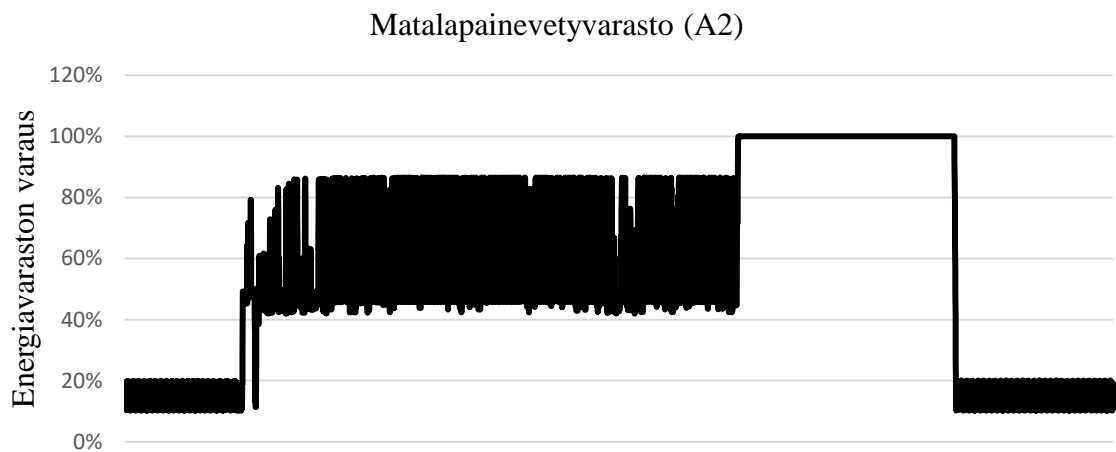
Laitetilan tiedot

Huoneen leveys (m):	2.5
Huoneen korkeus (m):	2.5
Huoneen pituus (m):	3
Eristeen lämmönjohtavuus (W/(m×K))	0.035
Eristeen paksuus (cm)	20

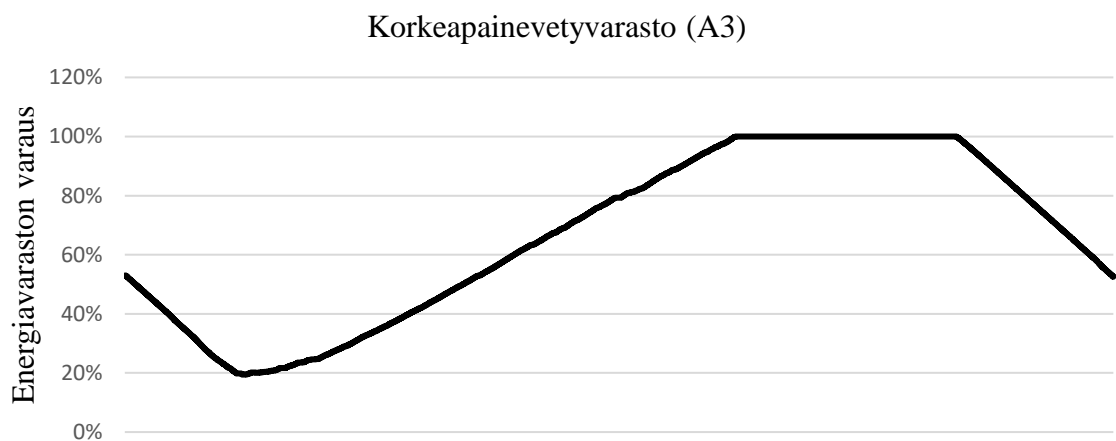
Tällaisella kokoonpanolla järjestelmä pyörii ympärivuotisesti energiavarastojen varauksen pudotessa alimmillaan 20 %:iin. Alla olevat kuvat esittävät energiavarastojen toimintaa vuoden aikana.



Kuva 22. Nordkappiin sijoitetun järjestelmän lyhytaikaisen energiavaraston (A1) varaustaso vuoden ajalta.



Kuva 23. Nordkappiin sijoitetun järjestelmän pitkäaikaisen energiavaraston (A2) varaustaso vuoden ajalta.



Kuva 24. Nordkappiin sijoitetun järjestelmän pitkäaikaisen energiavaraston (A3) varaustaso vuoden ajalta.

3.7.2 Nivala, Suomi

Laskentatyökalu antaa Nivalan kohteeseen seuraavat mitoitusarvot:

Taulukko 6. Nivalaan sijoitettavan järjestelmän mitoitusaulukko.

Aurinkopaneelit

Tyyppi:	SunPower Maxeon 3 400 W
Hyötysuhde (%):	22.6
Teho (kWp):	7.2
Paneelien lukumäärä (kpl):	16
Paneelien elevaatiokulma:	53°
Paneelien atsimuuttikulma:	39°

Lyhytaikainen energiavarasto (A1)

Tyyppi:	Superkondensaattori
Kapasiteetti (kWh):	15
Aktivaatioarvot (ylä- ja alaraja, %):	60, 30

Pitkäaikainen energiavarasto, matalapaine (A2)

Kapasiteetti (kWh):	6.15
Säiliön paine (bar):	35
Säiliön tilavuus (litraa):	62.5
Säiliöiden lukumäärä, 62.5 litraa (kpl)	1
Säiliöiden lukumäärä, 250 litraa (kpl)	0
Aktivaatioarvot (ylä- ja alaraja, %):	60, 30

Pitkäaikainen energiavarasto, korkeapaine (A3)

Kapasiteetti (kWh):	740
Säiliön paine (bar):	350
Säiliön tilavuus (litraa):	750
Säiliöiden lukumäärä, 62.5 litraa (kpl)	0
Säiliöiden lukumäärä, 250 litraa (kpl)	3

Elektrolyysilaite

Teho (kg/h):	0.03
Hyötysuhde (%):	60

Polttockenno

Teho (W):	450
Hyötysuhde (%):	40

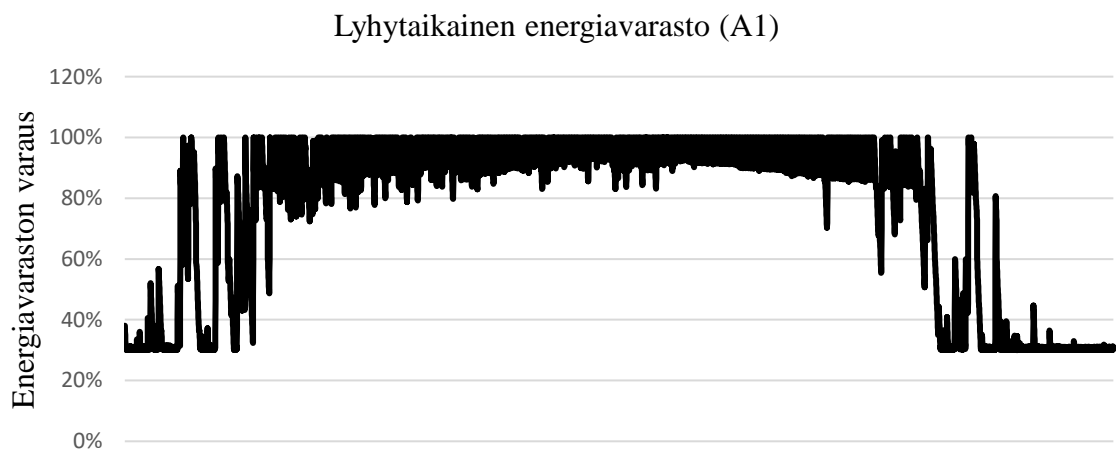
Kompressori

Kompressioteho (Nm ³ /h):	0.18
Keskimäärin kompressiossa hävitty teho (%):	30

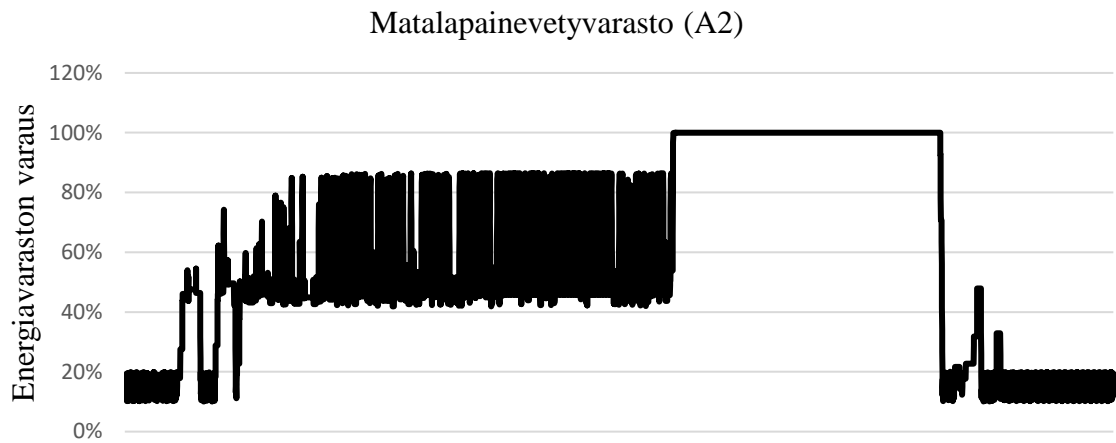
Laitetilan tiedot

Huoneen leveys (m):	2.5
Huoneen korkeus (m):	2.5
Huoneen pituus (m):	3
Eristeen lämmönjohtavuus (W/(m×K))	0.035
Eristeen paksuus (cm)	20

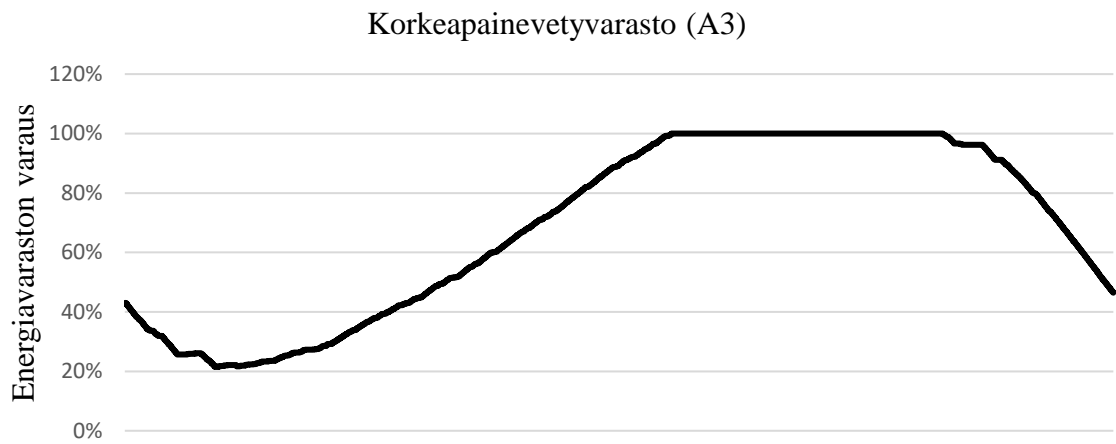
Tällaisella kokoonpanolla järjestelmä pyörii ympärivuotisesti energiavarastojen varauksen pudotessa alimmillaan 22 %:iin. Alla olevat kuvat esittävät energiavarastojen toimintaa vuoden aikana.



Kuva 25. Nivalaan sijoitetun järjestelmän lyhytaikaisen energiavaraston (A1) varaustaso vuoden ajalta.



Kuva 26. Nivalaan sijoitetun järjestelmän lyhytaikaisen energiavaraston (A1) varaustaso vuoden ajalta.



Kuva 27. Nivalaan sijoitetun järjestelmän lyhytaikaisen energiavaraston (A1) varaustaso vuoden ajalta.

4 Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli suunnitella uusiutuvan energian tuotantomuotoihin pohjautuva mikrovoimalaitos, joka voidaan mitoittaa kohteen sähkönkulutuksen sekä sijainnin mukaan, ja joka kykenee katkottomaan sähkönsyöttöön sen maantieteellisestä sijainnista riippumatta. Uusiutuvan energian tuotantomuodoista tarkasteltiin aurinko- ja tuulivoimaa, joista aurinkovoima osoittautui työn kannalta tuulivoimaa käytännöllisemmäksi vaihtoehdoksi.

Vuosittaisen sähköntuotannon määrä tulee arvioida aina sijaintikohtaisesti, ja tuulivoimalan sähköntuotannon arvioimiseksi tulee aina tehdä pitkän aikavälin mittaukset kohteessa turbiinin sijoituskorkeudella ja sijainnilla, kun taas aurinkovoimalan vuosituotannon voi arvioida säädatan avulla. Tämän lisäksi tuulivoimalan skaalaaminen on huomattavasti kalliimpaa ja haastavampaa, sillä tuuliturbiini tulee sijoittaa korkeaan mastoon, ja maston perustusta varten voi joutua tekemään maaperän pohjatutkimukset, kun taas aurinkovoimalan skaalaamiseksi riittää paneelien määrän kasvattaminen. Aurinkovoimala voidaan siis suunnitella mihin tahansa kohteeseen kohtalaisen tarkasti ilman, että paikan päällä tarvitsee käydä maastokatselmuksella, kun taas tuulivoimalan mitoitus vaatii huomattavasti enemmän valmistelua. Kun sähköntuotanto tapahtuu pelkästään aurinkopaneeleilla, tarvitaan kuitenkin paljon pitkäaikaista varastointia, kun taas tuulivoimaa saataisiin myös talvisaikaan.

Ympärivuotiseen tuotantoon pyrkimisen sijaan ylijäämäenergia varastoidaan kaudelle, jolloin energiantuotanto on vähäistä tai olematonta. Energian varastoinnissa hyödynnetään superkondensaattoreita sekä vetyvarastointia. Energiavarastointi jaetaan kahteen käsitteeseen; lyhyt- ja pitkäaikainen energianvarastointi. Superkondensaattorit toimivat lyhytaikaisina energiavarastoina, joista energia voidaan ottaa suoraan kulutukseen nopeasti ja johon kyetään varaamaan korkeaenergiset tuotantopiikit. Superkondensaattorit sopivat lyhytaikaiseksi energiavarastoksi litiumioniakkuja paremmin, sillä lyhytaikaisessa energiavarastossa syntyy paljon lataus- ja purkusyklejä. Vety toimii pitkäaikaisena energianvarastoinnin muotona ja se varastoidaan paineistettuihin säiliöihin. Superkondensaattorit purkavat varaustaan ajan myötä, jolloin ne eivät sovellu pitkäaikaiseen energiavarastointiin, kun taas vety säilyttää energia-arvonsa säilömisajasta riippumatta, jolloin sitä voidaan varastoida käytännössä loputtomiin.

Tuloksien perusteella Auringosta saadaan vuoden aikana valtava määrä energiaa, jolloin järjestelmän sähköistäminen ei varsinaisesti ole ongelma, kunhan energia saadaan talteen. Nykyisin vetyvarastointi saadaan hyvin toimimaan energiavarastona, mutta sen hyötysuhde on kohtalaisen matala, jolloin sähköä on muutettava vedyksi paljon. Erityisesti matalatehoisten polttokennojen hyötysuhteen paraneminen parantaisi vetyvarastoinnin toimivuutta suuresti, jolloin varastoidusta vedystä saataisiin enemmän sähköä, eikä sitä tarvitsisi varastoida niin suuria määriä.

Lähdeluettelo

Alexander Granlund, J. N. A. M. P., 2019. *The Influence of Module Tilt on Snow Shadowing of Frameless Bifacial modules*. [Online]

Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1384575/FULLTEXT01.pdf>
[Haettu 19. 5. 2022].

Al-Khazzar, A. A. A., 2015. *Temperature Effect on Power Drop of Different Photovoltaic Modules*. [Online]

Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/284970252_Temperature_Effect_on_Power_Drop_of_Different_Photovoltaic_Modules
[Haettu 18. 2. 2022].

Battery University, 2021. *Battery University*. [Online]

Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-502-discharging-at-high-and-low-temperatures>
[Haettu 19. 3. 2022].

Battery University, 2021. *Battery University*. [Online]

Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
[Haettu 19. 3. 2022].

BloombergNEF, 2021. *Bloomberg New Energy Outlook 2021*. [Online]

Saatavissa: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook>
[Haettu 19. 3. 2022].

Boudewijn B. Pannebakker, A. C. d. W. G. v. S., 2017. *Photovoltaics in the shade: one bypass diode per solar cell revisited*. [Online]

Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/pip.2898>
[Haettu 19. 2. 2022].

Chandler, D. L., 2011. *MIT News*. [Online]

Saatavissa: <https://news.mit.edu/2011/energy-scale-part3-1026>
[Haettu 14. 2. 2022].

Chaudhry, Q. u.-z., 2009. *An Investigation on Wind Power Potential of Gharo-Sindh, Pakistan*. [Online]

Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/265749384_An_Investigation_on_Wind_Power_Potential_of_Gharo-Sindh_Pakistan
[Haettu 21. 2. 2022].

Christiana Honsberg, S. B., 2022. *PVEducation*. [Online]

Saatavissa: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/the-suns-position>
[Haettu 19. 2. 2022].

Christiana Honsberg, S. B., 2022. *PVEducation*. [Online]

Saatavissa: <https://www.pveducation.org/>

[Haettu 15. 2. 2022].

Cook, N., 1985. *The designer's guide to wind loading of building structures: part 1*. Lontoo: Butterworths.

Danisk Wind Industry Association, 2003. *Danisk Wind Industry Association*. [Online]

Saatavissa: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/betz.htm>

[Haettu 11. 3. 2022].

Dupré, O., 2015. *Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices*. [Online]

Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/288670410_Physics_of_the_thermal_behavior_of_photovoltaiic_devices

[Haettu 15. 1. 2022].

Explaining Science, 2019. *Solar Energy*. [Online]

Saatavissa: <https://explainingscience.org/2019/03/09/solar-energy/>

[Haettu 14. 2. 2022].

Hamilo, M., 2011. *Tiedelevti*. [Online]

Saatavissa: https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/miksi_paiva_pitenee_kiihtyen

[Haettu 20. 2. 2022].

IEA, 2021. *Global electricity demand is growing faster than renewables, driving strong increase in generation from fossil fuels*. [Online]

Saatavissa: <https://www.iea.org/news/global-electricity-demand-is-growing-faster-than-renewables-driving-strong-increase-in-generation-from-fossil-fuels>

[Haettu 20. 1. 2022].

Iharka Szücs-Csillik, D. P., 2015. *The Astro-biblio-students program*. [Online]

Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/287645191_The_Astro-Biblio-Students_program

[Haettu 19. 2. 2022].

IXYS Semiconductor GmbH, 2009. *IXOLAR High Efficiency SolarBIT datasheet rev. Jun. 2009*. [Online]

Saatavissa: https://www.mouser.com/datasheet/2/205/xob17-solar-bit-datasheet_mar-2008-1170629.pdf

[Haettu 18. 2. 2022].

Jianan Zhang, L. Z. F. S. Z. W., 2018. *An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application*. [Online]

Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8353709>

[Haettu 19. 3. 2022].

Joint Research Centre, 2022. *EU Science Hub*. [Online]

Saatavissa: <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-photovoltaic-geographical->

[information-system/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods_en](#)
[Haettu 23. 4. 2022].

Krystian Cieslak, P. D., 2018. *Comparison of the existing photovoltaic power plant performance simulation in terms of different sources of meteorological data.* [Online]
Saatavissa: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900015>
[Haettu 23. 4. 2022].

Lehigh, U., 2022. *Wind.* [Online]
Saatavissa: <https://ei.lehigh.edu/learners/energy/wind1.html>
[Haettu 20. 2. 2022].

Loren Powers, J. N. T. T., 2010. *Measuring and Modeling the Effect of Snow on Photovoltaic System Performance.* [Online]
Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/251963305_Measuring_and_modeling_the_effect_of_snow_on_photovoltaic_system_performance
[Haettu 19. 5. 2022].

Mahmoud, M. M., 2020. *Enhancing the dynamic performance of a wind-driven PMSG implementing different optimization techniques.* [Online]
Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-2439-3>
[Haettu 20. 2. 2022].

Makhlouf Laakam, D. M., 2014. *Study of Induction Generator Isolated Mode.* [Online]
Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Power-coefficient-for-the-wind-turbine-model_fig4_291351489
[Haettu 20. 2. 2022].

Motiva, 2022. *Huolto ja kunnossapito.* [Online]
Saatavissa:
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/huolto_ja_kunnossapito
[Haettu 14. 2. 2022].

MrSutheran, 2020. *The Global Atmospheric Circulation Model – How I have planned to tackle the beast.* [Online]
Saatavissa: <https://mrsutheran.wordpress.com/2020/04/14/the-global-atmospheric-circulation-model-how-i-have-planned-to-tackle-the-beast/>
[Haettu 20. 2. 2022].

Muhammad Fahad Zia, E. E. M. B., 2019. *Optimal Operational Planning of Scalable DC Microgrid with Demand Response, Islanding, and Battery Degradation Cost Considerations.* [Online]
Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/330142356_Optimal_Operational_Planning_of_Scalable_DC_Microgrid_with_Demand_Response_Islanding_and_Battery_Degradation_Cost_Considerations
[Haettu 19. 3. 2022].

Mustafa Aljumaili, A. S. A. M. Q. T., 2019. *Analysis of the Hard and Soft Shading Impact on Photovoltaic Module Performance Using Solar Module Tester.* [Online]

Saatavissa: <http://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/17100>

[Haettu 18. 2. 2022].

Norazlianie Sazali, W. N. W. S. A. S. J. M. N. M. R., 2020. *New Perspectives on Fuel Cell Technology: A Brief Review*. [Online]

Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/5/99>

[Haettu 6. 5. 2022].

Nordlund, G., 1997. *Tiedelehti*. [Online]

Saatavissa: https://www.tiede.fi/artikkeli/kysy/miksi_maalla_ja_merella_tuulee_eri_nopeudella

[Haettu 20. 2. 2022].

Northern Alberta Institute of Technology, 2018. *Solar shines in dead of winter – even in Edmonton, study finds*. [Online]

Saatavissa: <https://www.techlifetoday.ca/articles/2018/solar-shines-in-dead-of-winter-even-in-edmonton>

[Haettu 20. 5. 2022].

Ossila, 2021. *Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement*. [Online]

Saatavissa: <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory>

[Haettu 16. 2. 2022].

Powera, 2022. *Mikä on paneelien elinkaari ja mistä ne valmistetaan?*. [Online]

Saatavissa: <https://www.powera.fi/mika-on-paneelien-elinkaari-ja-mista-ne-valmistetaan/>

[Haettu 14. 2. 2022].

PVGIS, 2019. *Photovoltaic Geographical Information System*. [Online]

Saatavissa: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

[Haettu 23. 4. 2022].

Rantamäula, K., 2020. *Aurinkokennomateriaalit ja -rakenteet*. [Online]

Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202011283216.pdf>

[Haettu 15. 2. 2022].

Rasaq, A. K., 2015. *Assessment of Wind Resource for Possibility of Small Wind Turbine Installation in Ilorin, Nigeria*. [Online]

Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/307803793_Assessment_of_wind_resource_for_possibility_of_small_wind_turbine_installation_in_Ilorin_Nigeria

[Haettu 21. 2. 2022].

Ritchie, H. & Roser, M., 2021. *Our World in Data*. [Online]

Saatavissa: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

[Haettu 20. 1. 2022].

Rohde, R. A., 2013. *Wikipedia*. [Online]

Saatavissa:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e7/Solar_spectrum_en.svg/1920px-Solar_spectrum_en.svg.png

[Haettu 15. 2. 2022].

S. Shiva Kumar, V. H., 2019. *Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review*. [Online]
 Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>
 [Haettu 6. 5. 2022].

Saarentausta, K., 2020. *Selection and Sizing of Electrical Energy Storage for a Hybrid Working Machine Based on the Work Cycle*. [Online]
 Saatavissa:
https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162003/Kari%20Saarentausta_Diplomity%c3%b6_Fi_nal.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 [Haettu 17. 4. 2022].

Saheb Djohra, K. M. S. H., 2014. *Technical and Economic Study of a Stand-Alone Wind Energy System for Remote Rural Area Electrification in Algeria*. [Online]
 Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/316971044_Technical_and_Economic_Study_of_a_Stand-Alone_Wind_Energy_System_for_Remote_Rural_Area_Electrification_in_Algeria
 [Haettu 21. 2. 2022].

Sepasi, S., 2014. *Adaptive state of charge estimation for battery packs*. [Online]
 Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/280886489_Adaptive_state_of_charge_estimation_for_battery_packs
 [Haettu 19. 3. 2022].

Solar Energy Research Institute, 1982. *Basic Photovoltaic Principles and Methods SERI/SP-290-1448*. [Online]
 Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/1448.pdf>
 [Haettu 16. 2. 2022].

Soubhagya Dash, S. N. R. N. D. V., 2015. *A comprehensive assessment of maximum power point tracking techniques under uniform and non-uniform irradiance and its impact on photovoltaic systems: A review*. [Online]
 Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/284750837_A_comprehensive_assessment_of_maximum_power_point_tracking_techniques_under_uniform_and_non-uniform_irradiance_and_its_impact_on_photovoltaic_systems_A_review
 [Haettu 19. 2. 2022].

Suomen tuulivoimayhdistys, 2022. *Talvella tuulee eniten*. [Online]
 Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten>
 [Haettu 20. 2. 2022].

U.S Energy Information Administration, 2020. *Solar explained*. [Online]
 Saatavissa: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-energy-and-the-environment.php>
 [Haettu 14. 2. 2022].

Ulf Bossel, B. E., 2022. *Energy and hydrogen economy*. [Online]
 Saatavissa: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliaison.pdf
 [Haettu 10. 5. 2022].

Vedantu, 2022. *Planetary Winds*. [Online]

Saatavissa: <https://www.vedantu.com/geography/planetary-winds>

[Haettu 20. 2. 2022].

Ympäristöministeriö, 2003. *C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Lämmöneristys, Ohjeet 2003*. [Online]

Saatavissa: <https://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>

[Haettu 11. 5. 2022].

Züttel, A., 2004. *Complex hydrides for hydrogen storage*. [Online]

Saatavissa: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15085273/>

[Haettu 18. 4. 2022].

