



SYRJÄISTEN ALUEIDEN HYBRIDIJÄRJESTELMÄT

Hybrid power in isolated areas

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Riikka Rautio

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Riikka Rautio

Syrjäisten alueiden hybridijärjestelmät

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

35 sivua, 8 kuvaa ja 3 taulukkoa

Ohjaaja ja tarkastaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

Avainsanat: hybridijärjestelmä, energiantuotanto, syrjäinen alue, arktinen alue, trooppinen alue, saaret

Ilmastonmuutoksen, kasvavan energiantarpeen sekä öljyn hinnan nousun myötä on alettu kiinnittämään yhä enemmän huomiota myös syrjäisten alueiden sekä saarien energiamurrokseen. Tällaiset alueet sijaitsevat yleensä kaukana sähköverkoista. Siksi syrjäisten alueiden energiantuotanto perustuu usein kalliiseen tuontidieseliin, joka joudutaan kuljettamaan alueelle esimerkiksi ilma- tai meriteitse nostaan polttoaineen hintaa entisestään. Hybridijärjestelmät voivat olla ratkaisu syrjäisten alueiden energiaomavaraisuuden saavuttamiseen sekä dieselriippuvuuden katkaisemiseen.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää miten syrjäisillä alueilla ja saarilla tuotetaan energiaa sekä tutkia hybridijärjestelmien käyttömahdollisuuksia. Työ on kirjallisuuskatsaus aiheeseen, ja se pohjautuu olemassa oleviin tieteellisiin tutkimuksiin sekä artikkeleihin hybridivoiman hyödyntämisestä syrjäisillä alueilla. Työssä tarkastellaan kylmien ja kuumien syrjäisten alueiden sekä saarien energiantuotannon nykytilaa, hybridijärjestelmiä sekä tulevaisuutta. Näiden perusteella käsitellään hybridijärjestelmien keskeisimmät komponentit sekä alueiden ominaisuudet tuuli- ja aurinkovoiman kannalta. Lisäksi esitellään kehittyviä teknologioita, joilla voitaisiin parantaa hybridijärjestelmien kannattavuutta entisestään.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Riikka Rautio

Hybrid power in isolated areas

Bachelor's thesis

2022

35 pages, 8 figures and 3 tables

Examiner: Associate professor Aki Grönman

Keywords: hybrid power, energy production, isolated areas, Arctic, Tropics, islands

With growing energy demand, climate change and rising oil prices, more attention has been paid to the energy production in remote areas and islands. Such areas are usually far from the electricity grid. Therefore, the energy produced in these areas is often based on expensive imported fossil fuels, which must be transported to the areas for example by air or sea, increasing the price even further. Hybrid power could be a solution for remote areas and islands to achieve energy self-sufficiency and tapering off diesel dependence.

The objective of this bachelor's thesis is to examine energy production in remote areas and islands and to study the possibilities of using hybrid power in such areas. The current status and the future of energy production and hybrid power in remote areas is examined by exploiting articles and scientific papers. The most important components of hybrid power systems are described and the characteristics of the regions in terms of wind and solar power are discussed. In addition, advanced technologies that have the potential to further improve the feasibility of hybrid power in isolated areas are introduced.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

C_{Ah} akun ampeerituntikapasiteetti [Ah]

Lyhenteet

AC vaihtovirta

DC tasavirta

HOMER Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables

LCOE tasoitettut energiakustannukset (Levelized Cost of Energy)

LOLP kuorman menetyksen todennäköisyys (Loss of Load Probability)

LPSP virransyötön katoamisen todennäköisyys (Loss of Power Supply Probability)

OTEC meren lämpömuunnosprosessi (Ocean Thermal Energy Conversion)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Energiantuotanto syrjäisillä alueilla	7
2.1	Arktinen alue	7
2.2	Trooppiset alueet	10
2.3	Saaret.....	13
3	Hybridijärjestelmät	15
3.1	Dieselgeneraattorit	16
3.2	Tuulivoimajärjestelmät	17
3.2.1	Tuuliolosuhteet	18
3.2.1	Tuuliturbiinin lapojen jäätyminen	19
3.3	Aurinkovoimajärjestelmät.....	20
3.3.1	Aurinko-olosuhteet	21
3.3.2	Arktisen alueen erityishaasteet	22
3.4	Energiavarastot.....	23
3.5	Optimointi	24
4	Tulevaisuuden näkymät.....	27
4.1	Vetyvarasto osana hybridijärjestelmää	28
4.2	Hilineutraali dieselgeneraattori	29
4.3	Uusia teknologioita	29
5	Yhteenveto.....	31
	Lähteet	32

1 Johdanto

Vaikka uusiutuvan energian määrä kokonaisenergiantuotannossa kasvaa jatkuvasti, monet syrjäiset alueet ovat vaarassa jäädä kehityksestä jälkeen. Syrjäisille alueille ominaista on, että ne ovat kaukana kasvukeskuksista ja siten myös energiaverkoista: Arviolta yli 1,7 miljardia ihmistä asuu sähköverkkojen ulkopuolella (Conservation Institute 2018). Energia- ja sähköverkkojen laajentaminen tällaisille alueille voi olla kallista ja epäluotettavaa tai jopa mahdotonta. Siksi syrjäisille alueille voi olla kannattavinta luoda valtakunnanverkon ulkopuolinen energiantuotantojärjestelmä. (Sen, R. & Bhattachryya, S.C. 2013.) Uusiutuvaan energiaan perustuvien hybridijärjestelmien suosio on tasaisessa kasvussa niin kehitysmaissa kuin kehittyneissä maissa. Hybridijärjestelmien odotetaan korvaavan tai täydentävän energiantuotantoa syrjäisillä alueilla sekä saarilla uusiutuvien energianlähteiden teknologian sekä energianvarastointimenetelmien kustannusten laskiessa ja niiden suorituskyvyn parantuuessa. (IEEE 2017.)

Öljyn hinnannousun ja saannin epävakauden, energiatarpeen lisääntymisen ja ilmastonmuutoksen vuoksi uusiutuvan energian lisääminen energiantuotannossa on välttämätöntä. Erilaisia hybridivoimasovelluksia on kokeiltu useilla syrjäisillä alueilla viimeisten vuosien aikana, sillä monilla alueilla ja valtioilla on korkeat tavoitteet saavuttaa energiaomavaraisuus ja vähentää päästöjä. Syrjäisten alueiden sähköistämisen avulla voidaan nostaa kehittymättömien alueiden elintasoja niin sosiaalisesta, ekonomisesta kuin ympäristöllisestä näkökulmasta. Syrjäisten alueiden sekä saarten sähköistämiseen ja uusiutuvan energian lisäämiseen voi kuitenkin olla vaikeaa löytää rahoitusta. Pienten yhteisöjen energiamurros on hidasta, sillä suuret projektit ovat kustannustehokkaampia, kun ne koskevat kerralla useampaa ihmistä.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää syrjäisten alueiden energiantuotannon sekä hybridijärjestelmien nykytilaa ja tulevaisuutta arktisilla ja trooppisilla syrjäisillä seuduilla sekä saarilla. Tarkasteltavien alueiden käytännön hybridijärjestelmien pohjalta käsitellään keskeisimmät järjestelmän komponentit. Lisäksi perehdytään tuuli- ja aurinkoenergiantuotantoon arktisen, trooppisten alueiden sekä saarien ominaisuuksien kannalta. Lopuksi pohditaan hybridijärjestelmien tulevaisuutta sekä esitellään tulevaisuuden ratkaisuja, joilla hybridivoiman kannattavuus syrjäisillä alueilla voisi parantua entisestään.

2 Energiantuotanto syrjäisillä alueilla

Syrjäisillä alueilla sekä saarilla on tullut yhä yleisemmäksi hyödyntää hybridivoimaa energiantuotannossa. Hybridivoiman avulla voidaan yhdistää useampi energiantuotantotapa, jolloin ne vahvistavat toistensa vaihtelevuutta, ja järjestelmän teho kasvaa. Uusiutuvat hybridijärjestelmät mahdollistavat energiantuotannon sähköverkon ulkopuolella, sillä alueille voidaan luoda itsenäisiä energiantuotantojärjestelmiä. Usein systeemiin tarvitaan uusiutuvan energian lisäksi energiavarasto ja/tai fossiilista polttoainetta. Monenlaisia hybridijärjestelmiä on jo kokeiltu, kuten aurinko- ja/tai tuulivoima yhdistettynä akkuun tai vetyyn ja dieseliin. Uusiutuvista energialähteistä tuuli- ja aurinkovoimaa pidetään lupaavimpina vaihtoehtoina syrjäisillä alueilla. (Zhang, W. & Maleki, A. & Rosen, M.A. & Liu, J. 2019.)

Syrjäisiä alueita on eri puolella maapalloa. Niillä voi vallita erilaiset ilmasto- ja sääolosuhteet, mikä vaikuttaa alueen uusiutuvan energian resursseihin. Esimerkiksi arktisilla alueilla ja toisaalta myös sademetsissä ja aavikoilla asutus on harvaa, ja ilmastot eroavat toisistaan paljonkin. Alueiden eristyneisyyden vuoksi tuontipolttoaineet voidaan joutua tuomaan kaukaa meri- tai ilmaitse. Koska saarilla tilanne on sama, nämä haasteet tuovat saarille syrjäisten alueiden ominaisuuden. Lisäksi syrjäisillä alueilla voi olla enemmän sosioekonomisia haasteita johtuen esimerkiksi palveluiden ja koulutuksen puutteesta.

2.1 Arktinen alue

Arktinen alue käsittää ne pohjoisen pallonpuoliskon alueet, joilla aurinko-olosuhteet muuttuvat vuoden ajan mukaan niin, ettei aurinko laske keskikesällä lähes ollenkaan ja talvisin on kaamos (kuva 1). Lisäksi kuukauden keskilämpötila jää tyypillisesti alle tietyn pisteen vuodenajasta riippumatta. Arktisella alueella asuu noin neljä miljoonaa sähköä tarvitsevaa asukasta. Arktinen alue käsittää kahdeksan valtiota: Suomi, Ruotsi, Norja, Islanti, Tanska (Grönlanti), Venäjä, Yhdysvallat (Alaska) ja Kanada. (Arktinen keskus 2022.)



Kuva 1. Arktinen ja subarkkinen alue (Arktinen keskus 2022).

Suuri osa Arktisesta alueesta on hajautetun energiantuotannon alueella. Kylmästä ilmastosta johtuen energiankulutus on etenkin talvisin suurta. Ominaista arktisella on hajanaisesta asutuksesta johtuva heikko infrastruktuuri, pitkät välimatkat sekä sähköntuotanto dieselvoimalaitoksissa. Suurin ongelma sähkön toimittamisessa syrjäseuduilla on korkeat logistiset kustannukset niin polttoaineen kuin laitoksen huoltovarmuuden kannalta unohtamatta muutenkin korkeita polttoainekustannuksia. Lisäksi dieselvoimalaitoksen käyttökustannukset ja polttoaineen ominaiskulutus ovat korkeat. (Elistratov, V. & Konishchev, M. & Denisov, R. & Bogun, I. & Grönman, A. & Turunen-Saaresti, T. & Lugo, A.J. 2021.) Talvisin suuret lumimäärät voivat aiheuttaa lumivalleja, haittoja sähkökaapeleille, ja hankaloittaa kulkeamista esimerkiksi huoltotoimenpiteitä varten. Lisäksi kovat pakkaset asettavat lisähaasteita uusiutuvan energian tekniikalle.

Vuonna 2019 syrjäisistä arktisista yhteistöistä 80 % oli riippuvaisia tuontidieselistä energiantuotannossa (de Witt, M & Stafansson, H & Valfells, A. 2019). Dieselin käyttäminen arktisilla alueilla perustuu sen luotettavuuteen: se takaa varman energiantuotannon kylmässä ja vaihtelevassa ilmastossa sekä eri vuodenaikoina. Ongelmatonta se ei kuitenkaan ole, sillä kalliiden kustannusten lisäksi fossiiliset polttoaineet edistävät ilmastonmuutosta, ja niistä voi

koitua pahoja ympäristötuhoja. Myös siksi uusiutuvan energian osuutta halutaan lisätä, ja samalla tehdä alueista omavaraisempia. (WWF 2015.) Monessa arktisessa valtiossa suuri osa energiasta saatetaan tuottaa uusiutuvasti, mutta syrjäinen osa maata jää jalkoihin. Esimerkiksi Grönlannissa isoin osa sähköstä tuotetaan uusiutuvasti vesivoiman ja aurinkopaneelien avulla, mutta tuotanto on keskitetty isompiin asutuskeskuksiin, jolloin syrjäiset yhteisöt ovat edelleen täysin riippuvaisia kalliista dieselistä uusiutuvan energian rahoituksen puuttuessa (Nature 2022). Esimerkiksi Venäjän arktisilla alueilla on keskimäärin 900 dieselvoimalaa, jotka tuottavat noin 3 miljardia kWh vuosittain. Siten energiakustannukset (LCOE) voivat vaihdella arktisella 0,25 – 2,0 €/kWh välillä. (Elistratov, V. et. al. 2021.) Arktisilla syrjäisillä alueilla on tehty erilaisia hybridivoimakokeiluja, joissa energiaa pyritään tuottamaan muun muassa yhdistämällä tuuli- tai aurinkovoimaa dieselgeneraattoreihin. Muutamia esimerkkejä on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. Energiantuotantoa hybridijärjestelmien avulla arktisella.

Paikka	Asukas-luku	Hybridijärjestelmä	Sähköntuotanto	Muuta
Alaska, Nome (Pike, C. & Green, N. 2017).	3700	Tuulivoiman yhteiskapasiteetti 2,3 MW, kaksi 5,2 MW dieselgeneraattoria	Tuulivoima n. 15-25 %, suurimmillaan 40 %; vuonna 2015 tuotanto 1,75 milj. kWh.	Vuoden 2015 tuulivoiman tuotannolla 116 000 gallonan (537 000 l) dieselsäästöt.
Kanada, Colville-järvi (WWF 2015)	160	132,5 kW vaihtovirta-aurinkojärjestelmä, yli 200 kWh akkukapasiteetti, dieselgeneraattorit	Alle 20 % aurinkosähköä, loput dieselgeneraattoreilla. Aurinkokennojen taattu tuotavan vähintään 80 % nimelistehosta 25 vuoden ajan.	Parhaimmillaan 35 000 l dieselsäästöt/a. Paneelit asennettu moduuleihin, jolloin ikiroudalla ei vaikutusta asennukseen ja tosinpäin.
Kanada, Old Crow, Yokun (Vuntut Gwitchin Government 2021)	250	2160 aurinkopaneelia (940 kW DC ja 480 kW AC), 616 kW akkukapasiteetti, dieselgeneraattorit, mikroverkko-ohjain	Aurinkovoiman osuus 24 %, dieselgeneraattorit voidaan sulkea kokonaan aurinkoisina päivinä. Alueen tuuliolosuhteita arvioidaan keinona syrjäyttää dieseltuotanto talvikuukausina.	Dieselsäästöt 189 000 l vuodessa. Projektista seuraavien 25 vuoden aikana arviolta yli 10 milj. € tulot, jotka sijoitetaan uusiin hankkeisiin.
Sarfanguaq, Grönlanti (IEEE Xplore 2017)	116	220 kVA ja 135 kVA dieselgeneraattorit, 6 kW tuuliturbiini	Tuuliturbiinin myötä ongelmia muuntajan ja invertterin kanssa. Tasasuuntaaja paloi, minkä jälkeen tuulituotanto ollut alhaalla.	Järjestelmän korjaamiseen ei paikallista osaamista, korjaaajan lennättäminen paikalle erittäin kallista.

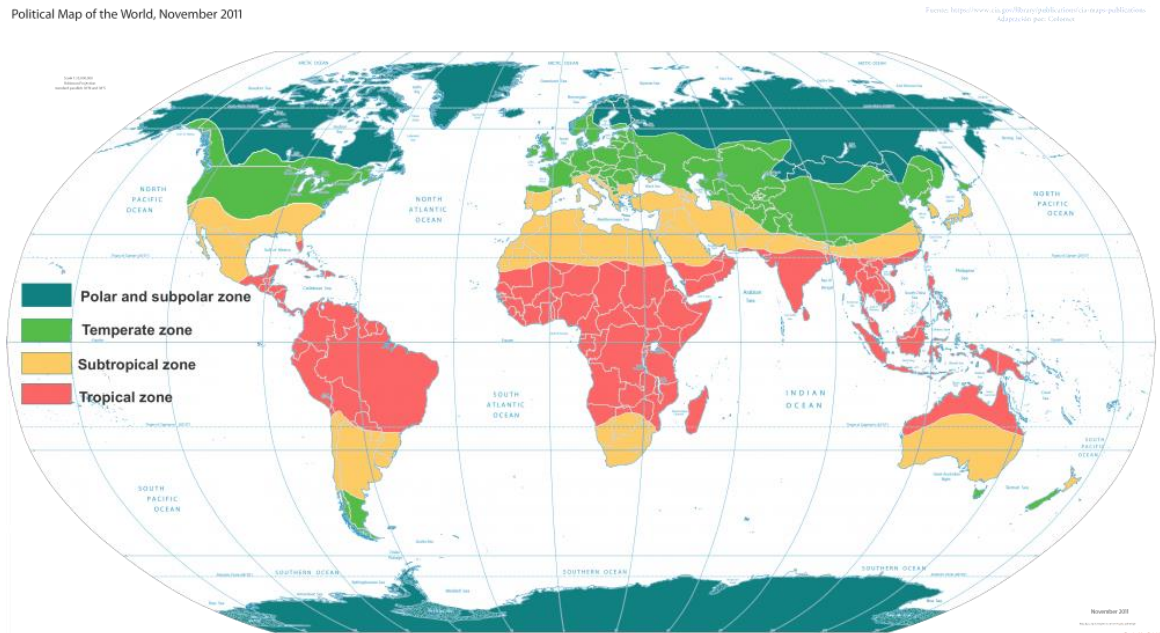
Colville-järven aurinkohybridijärjestelmässä on Internet-pohjaiset ohjausjärjestelmät, jotka mahdollistavat etäohjaamisen sekä aurinkovoiman tuotannosta saatavan datan keräämisen. Alueen syrjäisyyden vuoksi uusi järjestelmä esikoneisteettiin etukäteen Ontariossa ja kuljettiin sieltä talvella jääteitä pitkin, jolloin työmaalla tehtäväksi jäi vain järjestelmän kokoaminen. Järjestelmässä ei ole liikkuvia eikä nopeasti kuluvia osia, mikä takaa huoltovapauden. (WWF 2015.) Projektin myötä on opittu, että kylmästä ilmastosta johtuen optimaalisinta on, että akkua ei ladata täyteen asti muttei myöskään kuluteta loppuun. Tämän myötä alkuperäinen tavoite, jonka mukaan aurinkosähköllä saataisiin tuotettua 20 % Colville-järven sähköntarpeesta ei täyty täysin. (CBC News 2021.)

Taulukon 1 esimerkeissä hybridijärjestelmän uusiutuvan energian osuus on 15–25 % järjestelmästä riippumatta, kun tavoitteena on maksimoida uusiutuvan energian hyödyntäminen. Kun aurinko- tai tuuliolosuhteet eivät riitä tuottamaan tarvittavaa määrää sähköä, dieselgeneraattoreilla ja mahdollisella akulla taataan tasaisempi energiantuotanto. Energiantuotantoa pyritään optimoimaan muun muassa sääolosuhteiden sekä sähkön kysynnän mukaan. Parhaimmassa tapauksessa aurinkoisina päivinä aurinkovoiman ja akkujärjestelmän avulla dieselgeneraattorit voidaan kytkeä kesäisin pois päältä ajoittain kokonaan, kun taas tuulivoiman epätasaisuuden vuoksi tämä ei ole tuulidieseljärjestelmissä välttämättä mahdollista. Tuulivoiman etuna kuitenkin on, että energiaa voidaan tuottaa uusiutuvasti ympäri vuoden. Aurinkopaneeleilla tuotanto katkeaa kaamoksen vuoksi talvisin. Toisaalta Sarfanguaqissa Grönlannissa järjestelmään tuli vikaa, jota syrjäisen alueen haasteista johtuen ole päästy korjaamaan.

2.2 Trooppiset alueet

Trooppinen alue käsittää noin 40 % maapallon pinta-alasta (kuva 2). Trooppisella alueella, eli päivän tasaajan läheisyydessä, on kuumaa kosteaa sademetsää, kuumia ja kuivia savanneja ja aavikoita kuin lumisia vuoria. Suuri osa trooppisen alueen maista voidaan luokitella kehitysmaiksi ja vähiten kehittyneiksi maiksi. Siksi trooppiselle alueelle on ominaista köyhyys, rajoitettu sähkön saatavuus, juomaveden puute, heikko infrastruktuuri ja koulutustaso

sekä monet muut matalan elintason ongelmat. (Sulaiman, S.A. 2021.) Koska tässä kandidaatin työssä pyritään tutkimaan kuumia syrjäisiä alueita, käsittelyssä otetaan huomioon myös subtrooppinen alue (kuva 2).



Kuva 2. Ilmastoalueet (Meteoblue 2011).

Osa trooppisista maista on kehittyneempiä valtioita, joissa ei ole välttämättä niin perustavanlaatuisia haasteita kuin kehitysmaissa. Siten energiantuotanto eri alueilla voi olla hyvin toisistaan vaihtelevaa. Kehittyneemmissä valtioissa syrjäisemmillä alueilla voidaan jo hyödyntää uusiutuvaa energiaa, tai energiaa voidaan tuottaa esimerkiksi dieselgeneraattorien avulla. Siten haasteeksi voi muodostua lähinnä uusiutuvan energian lisääminen, hybridivoimalaitoksen kustannukset ja ammattitaidon puute.

Vuonna 2017 fossiiliset polttoaineet käsittivät 81 % trooppisten alueiden energiantuotannosta: öljy 32 %, hiili 27 % ja maakaasu 22 %. Alueilta kuitenkin löytyy kaikkia tunnettuja uusiutuvia energiaressursseja ja -teknologioita johtuen alueen laajuudesta. Uusiutuvista energialähteistä suosituimpia ja potentiaalisimpia trooppisilla alueilla ovat aurinkovoima (23 000 TWy eli terawatti vuotta), tuulivoima (130 TWy) sekä biomassa (6 TWy). Vesivoiman hyödyntämistä taas saatetaan vältellä johtuen sen haasteista maankäytön sekä ekosysteemien kannalta. Koska trooppiset alueet kattavat niin suuren osan maapallosta, ympäristöjä on erilaisia, ja siten resurssien saatavuus riippuu lopulta maasta sekä projektin kustannusten suuruudesta. (Sulaiman, S.A. 2021.)

Trooppisten alueiden hybridiratkaisuista on huomattavasti vaikeampaa löytää käytännön ratkaisuja kuin esimerkiksi arktiselta, mutta optimointitutkimuksia eri alueille sen sijaan löytyy. Tämä voi johtua siitä, että trooppisilla alueilla on enemmän kehitysmaita, joille hybridiprojekteja voi olla vaikeampi toteuttaa kehitysmaiden haasteiden vuoksi. Taulukossa 2 on esitetty muutamia trooppisten alueiden ratkaisuja eri puolilta maailmaa.

Taulukko 2. Hybridiratkaisuja trooppisilla alueilla.

Paikka	Asukas- luku	Hybridijärjestelmä	Sähkön tuotanto	Muuta
Kenia (Kaldellis, J.K. 2010)	-	Kolme 7,5 kW tuuliturbiinia, akkujärjestelmä, DC/AC-invertterit	Dieselsäästöt jopa 70-95 %	Tuuliturbiinien korkeus 24 m
Oiapoque, Brasilia (Votalia 2022)	24 000	12 MW lämpövoimalaitos, 4 MW aurinkovoimala, vuonna 2024 käyttöön 7,5 MW vesivoimalisäys	Uusiutuvan sähkön osuus 90 % vesivoiman myötä	Projektin myötä kylään saatu uusiutuvasti tuotettua sähköä
Laguna Grande, Ica, Peru (Canziani, F. et. al. 2021)	90	6 kW aurinkopaneelit, kaksi 3 kW tuuliturbiinia, kaksi 4 kW invertteriä, 800 Ah / 48 V akkupankki	Tuottaa keskimäärin 23 kWh/päivä 1-2 kW teholla, LCOE 0,267 USD/kWh	Tuulen keskinopeus 8 m/s ja auringon säteilyteho 6,4 kWh/m ² /päivä. Järjestelmän käyttöikä 20 vuotta.
Jabiru, Australia (Energy Storage News 2022a)	-	3,9 MW aurinkovoima, 4,5 MW dieselgeneraattorit, 3 MW / 5 MWh akkujärjestelmä	Päivisin 100 % uusiutuva energiantuotanto, öisin akku ja dieselgeneraattori	Pohjoisterritorion hallinto rahoittanut projektin

Esimerkiksi Laguna Grande Perussa (taulukko 2) sijaitsee kansallisella suojelualueella, mihin on ollut mahdotonta saada sähköverkkoa. Osa asukkaista käyttää valaistukseen kerosiinia, kynttilöitä sekä taskulamppuja sekä generaattoreita matkapuhelimen lataamiseen ja ruoan jäädyttämiseen. (Canziani, F. & Vargas, R. & Gastelo-Roque, J.A. 2021)

Kuten arktisella, myös trooppisilla alueilla energiaa pyritään tuottamaan yhdistämällä tuulitai aurinkovoimaa dieselgeneraattoreihin. Taulukossa esitetyistä esimerkeistä kolmessa on aurinkovoimaa, minkä selittää auringon korkea säteilyteho päiväntasaajalla. Dieselgeneraattorien käyttäminen osana järjestelmää on vähäisempää, kun taas akkujärjestelmiä hyödynnetään melkein jokaisessa.

2.3 Saaret

Maailmassa on yli 50 000 saarta, joilla asuu yli 740 miljoonaa ihmistä. Saarten ja mantereiden välillä ei yleensä ole sähköverkkoa johtuen merenalaisten kaapeleiden korkeista kustannuksista. Siksi useimpien saarten sähköntuotanto perustuu fossiilisiin polttoaineisiin, vaikka öljyn hinta saarilla on moninkertaisesti suurempi kuin mantereella. Kalliista kustannuksista, energiansaannin epävakaudesta ja ilmastonmuutoksen tuomista haitoista johtuen uusiutuvien energioiden osuutta saarilla halutaan lisätä. (Kuang, Y. & Zhang, Y. & Zhou, B. & Li, C. & Cao, Y. & Li, L. & Zeng, L. 2016.)

Esimerkiksi Karibian saarilla 90 % energiantuotannosta on riippuvaista tuontiöljystä. Öljyntuontikustannukset ovat saarille korkeat, ja jotkut niistä käyttävät jopa yli 30 % BKT:staan öljyn tuomiseen. Hallitsevia uusiutuvan energian muotoja saarilla on aurinkovoima, tuuli-voima, vesivoima ja biomassa. Kuitenkin useimmilla saarilla uusiutuvan energian osuus on alle 10 %. Uusiutuvan energian vaihtelevuuden vuoksi erilaisia energianvarastointimenetelmiä on hyödynnetty tasaamaan sähkönjakelua. Saarten syrjäisillä alueilla sekä monilla pienillä ja keskikokoisilla saarilla on alhainen sähkönkattavuus, ja siksi hajautettuja dieselgeneraattoreita käytetään usein öisin muutaman tunnin ajan. Esimerkiksi Tyynenmeren saarilla 70 % kotitalouksista ei ole sähköistetty. (Kuang, Y. et. al. 2016.)

Saarten energiantuotannon nykytilaan sekä tuotannon mahdollisuuksiin voi vaikuttaa myös saaren sijainti. Lisäksi joillekin saarille on voitu vetää sähkökaapelit mantereen sähköverkosta tai käytössä on muita ratkaisuja. Saarien hybridiratkaisuista löytyy useampia hankkeita, joista on esitetty esimerkkejä taulukossa 3. Etenkin viime vuosina saarilla on alettu hyödyntää hybridiratkaisuja enemmän.

Taulukko 3. Hybridiratkaisuja eräillä saarilla.

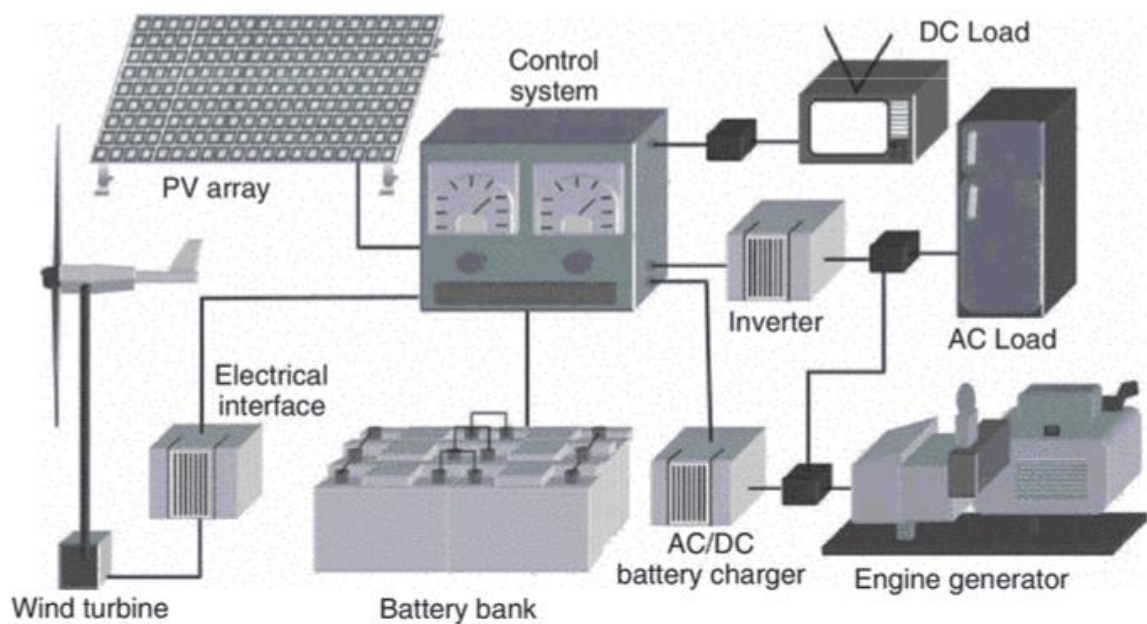
Saari	Hybridijärjestelmä	Sähköntuotanto	Muuta
Graciosa, Portugali (Wärtsilä 2022)	4,5 MW tuulivoimala, 1 MW aurinkopuisto, 6 MWh energiavarasto, GEMS-digitaalinen energiajärjestelmä	Uusiutuvan energian osuus 63 % (2021)	Aiemmin kaikki tuotanto perustui fossiilisiin polttoaineisiin
Tilos, Kreikka (Eunice Energy Group 2021)	Aurinkopaneelit 160 kWp, tuulivoima 800 kW, 2,8 MWh akkujärjestelmä, 20 kW invertterit	Saari on hybridivoiman myötä energiaomavarainen	Sähköverkko oli aiemmin liitetty Kosin saareen, mistä aiheutui säännöllisiä sähkökatkoja
Alaminos, Laguna, Filippiinit (Energy Storage News 2022b)	120 MW aurinkovoima, 40 MW / 60 MWh akkukapasiteetti	80 % sähköntuotannosta uusiutuvaa	\$42,8 milj. investoinnit
King Island, Australia (Hydro Tasmania 2022)	Tuulivoima 2,45 MW, aurinkopaneelit 470 kW, 3 MW / 1,5 MW akku, kaksi 1 MVA vauhtipyörää, 1,5 MW dynaaminen vastus, yht. 6 MW dieselgeneraattorit	Olosuhteiden ollessa suotuisat saavutetaan 100 % uusiutuvan energian tuotanto, dieseltuotanto keskimäärin 20 % vuodesta	\$18 milj. projekti, reaaliaikaisen tuotannon näkee projektin Internet-sivuilta
Eigg, Skotlanti (Green Eigg 2013)	Vesivoimageraattorit n. 110 kW, 24 kW tuulivoima, 50 kW aurinkojärjestelmä, kaksi 70 kW dieselgeneraattoria, akkuvarasto	Uusiutuvan energian osuudeksi on suunniteltu 95 %	Jokaisella taloudella kerrallaan 5 kW käyttörajoitus, yrityksillä 10 kW

Taulukon esimerkeissä saarilta löytyy erilaisia hybridiratkaisuja, joissa korostuu tuuli- ja aurinkoenergia sekä akkuvarastot. Taulukon hybridijärjestelmillä on saavutettu hyvä uusiutuvan energian käyttöaste verrattuna esimerkiksi arktisen alueen hybridijärjestelmiin. Tähän voi vaikuttaa energiavarastojen hyödyntäminen, mutta toisaalta myös saarten sijainnit lämpimämmillä alueilla.

Saarten syrjäisillä alueilla uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön osuus voisi olla yli 50 % hybridiratkaisujen avulla. Kuang Y. et. al. analyysissä dieselgeneraattorilla varustetussa tuuliaurinkohybridisysteemissä uusiutuvalla energialla voitiin tuottaa jopa 94 % sähköntarpeesta matalilla operointi- ja ylläpitokustannuksilla. Koska saaret voivat olla haasteellinen ja syrjäinen ympäristö, hybridijärjestelmien lisääminen voi tuoda mahdollisuuksia uusiutuvan energian lisäämiseen ja dieselriippuvuuden vähentämiseen. (Kuang, Y. et al. 2016.) Taulukon 3 esimerkkisaaret vahvistavat näitä väitteitä.

3 Hybridijärjestelmät

Hybridivoiman tarkoitus on yhdistää eri energiantuotantotapoja (kuva 3). Näin voidaan pienentää yksittäisen energiamuodon kustannuksia, lisätä uusiutuvan energian osuutta energiantuotannosta sekä tehostaa energiantuotantoa vaihtelevissa sääolosuhteissa. Syrjäisillä ja vaikeakulkuisilla alueilla suositaan juuri tällaisia energiantuotantotapoja. (Zhang et al. 2019.) Sähköverkon ulkopuolisten järjestelmien luominen on houkuttelevaa myös siksi, että pienjännitelinjosten verkkoalaajennuskustannukset ovat jopa yli 10 000 € verkkojohtokilometriä kohden, ja hinta voi olla syrjäisillä alueilla vielä korkeampi (Kaldellis, J.K. 2010).



Kuva 3. Tyypillinen tuuliaurinkohybridijärjestelmä (Kaldellis, J.K. 2010).

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvan hybridijärjestelmän asentaminen vaatii suhteellisen korkeita kustannuksia alussa, mutta toisaalta käytön aikana kustannukset ovat yleensä matalat, koska polttoainekuluja ei synny. Mikäli käyttökustannukset ovat korkeat, niitä voidaan vähentää yhdistämällä useampi uusiutuva energialähde toisiinsa tai lisäämällä energiavarausta järjestelmään. Tämä myös vahvistaa järjestelmän luotettavuutta. Toisaalta erilaisten teknologioiden hyödyntäminen syrjäisellä alueella aiheuttaa haasteita asennuksessa ja huollossa, jos paikallista ammattitaitoa ei ole. (Kaldellis, J.K. 2010.) Optimaalinen tuuliaurin-

kohybridijärjestelmä tarjoaa korkeamman järjestelmän suorituskyvyn kuin kumpikaan yksittäinen järjestelmä samoilla kustannuksilla ja akun varastointikapasiteetilla. Kustannukset huomioitaessa aurinkoenergian osuus on järjestelmässä pieni verrattuna tuulienergian osuuteen. (Deshmukh, M.K. & Deshmukh, S.S. 2006.)

Syrjäisillä alueilla on pyritty hyödyntämään hybridivoiman tuomia mahdollisuuksia tutkimusten perusteella jo vuosien ajan. Sopivan hybridijärjestelmän valitsemisessa on otettava huomioon alueen kaikki olosuhteet uusiutuvan energiantuotannon kannalta. Tässä kandidaattityössä keskitytään käsittelemään aiemmin esiteltyjen käytännön hybridijärjestelmien perusteella keskeisimmät teknologiat ja järjestelmän komponentit: dieselgeneraattorit, tuuli- ja aurinkojärjestelmät, energiavarastot sekä optimointi.

3.1 Dieselgeneraattorit

Jos uusiutuva energiajärjestelmä tai järjestelmän mahdolliset akut tai muut energiavarastot eivät riitä täyttämään kuormitusvaatimuksia, tuotantoa voidaan paikata dieselgeneraattoreilla (Deshmukh, M.K. et. al. 2006). Siten dieselgeneraattorin sisältävässä verkon ulkopuolisessa hybridijärjestelmässä uusiutuva energiantuotanto on tyypillisesti etusijalla. Tällaisessa järjestelmässä dieselgeneraattorien on kuitenkin yleensä käytävä jatkuvasti vähintään minimikuormalla, koska uusiutuva energianlähde ei ole välttämättä riittävän vakaa energianlähde, ja dieselgeneraattorit tarvitsevat tietyn ajan käynnistykseen. (The Energy Innovation Market.)

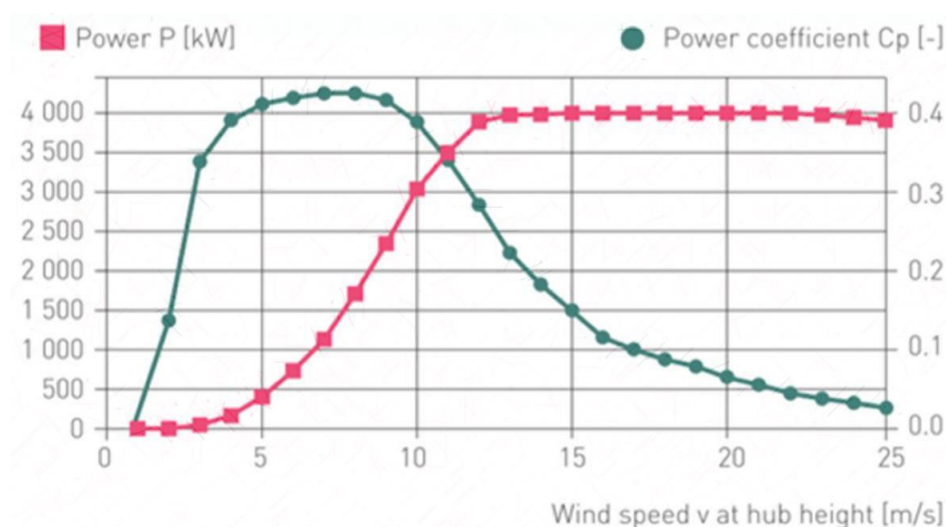
Generaattorin valinta riippuu kuorman tyypistä ja luonteesta. Asennettavan dieselgeneraattorin nimelliskapasiteetin määrittämisessä on huomioitava kaksi asiaa: 1) Jos dieselgeneraattori on kytketty suoraan kuormaan, sen nimelliskapasiteetin on oltava vähintään yhtä suuri kuin maksimikuorma, ja 2) jos dieselgeneraattoria käytetään lataamaan akkuja, generaattorin tuottama virta ei saa olla suurempi kuin $C_{Ah}/5$ A, jossa C_{Ah} on akun ampeerituntikapasiteetti. (Deshmukh, M.K. et. al. 2006.) Esimerkiksi verkon ulkopuolisessa tuulidieselhybridijärjestelmässä dieselgeneraattoria ei usein hyödynnetä tehokkaasti, mikä vaarantaa sen käyttöään. Useinkaan nyrkkisääntö, jonka mukaan dieselgeneraattoria käytetään yli 40 % sen nimellis-

kapasiteetista, ei täyty johtuen tuulenopeuden ja tehontarpeen vaihtelusta. Lisäksi dieselgeneraattorin toistuva käynnistäminen ja pysäyttäminen lisää sen mekaanista kulumista ja polttoainehukkaa. (Gan, L.K. & Shek, J.K.H & Mueller, M. A. 2016.)

Dieselmootoreilla voidaan säätää tehoa sähköverkon tarpeiden mukaan ja operoida jännitettä ja taajuutta. Dieselin edut korostuvat etenkin arktisilla alueilla, sillä se kestää jopa $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloja, ja vaatii vain muutaman minuutin kylmäkäynnistykseen. Diesel on kuitenkin itsessään kallista ja sen kuljettaminen etenkin ilma- ja meriteitse syrjäisille alueille lisää sen hintaa entisestään. Dieselin käytöstä ja kuljetuksesta koituu runsaasti kasvihuonepäästöjä, mikä on ilmastopimuksia vastaan. Lisäksi sen käytössä vapautuu mustaa hiiltä, joka absorboi auringonsäteitä sulattaen mahdollisen lumen ja jään nopeammin. (de Witt, M. et al. 2019.)

3.2 Tuulivoimajärjestelmät

Nykyaikaiset tuuliturbiinit voivat toimia $4 - 25\text{ m/s}$ tuulenopeuksissa. Heikommat tuulet eivät riitä energian tuottamiseen, ja korkeammat tuulet taas ovat turbiinin rakenteille haitallisia lisääntyneestä tärinästä johtuen. Alueen sääolosuhteilla on suuri merkitys tuulienergian tuotantoon. (Hämäläinen, K. 2021.) Kullekin tuuliturbiinille voidaan luoda tehokäyrä, josta nähdään turbiinin teho sekä tehokerroin tuulenopeuden funktiona. Tyypillinen turbiinin tehokäyrä on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Tyypillinen turbiinin tehokäyrä (Goncalves, A. & Liberato, M.L.R. & Nieto, R. 2021).

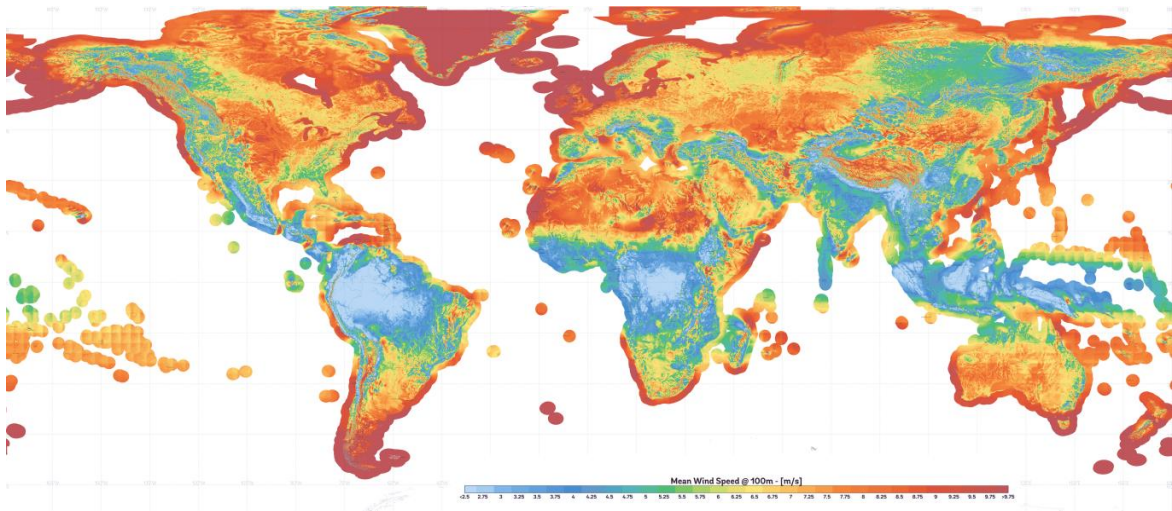
Tuulivoiman vaihtelevuutta voidaan tasata yhdistämällä siihen muita energialähteitä. Olemassa olevan tiedon perusteella voidaan löytää erilaisia tuulihybridiratkaisuja, kuten tuulivoima yhdistettynä dieseliin, aurinko- tai vesivoimaan, biomassaan tai energianvarastointijärjestelmiin. (Kaldellis, J.K. 2010.)

Tuulihybridijärjestelmä sisältää tyypillisesti tuuliturbiinin, muuntajan, dieselgeneraattorin ja/tai energiavaraston (akkupankki tai muu) ja/tai muita uusiutuvia energianlähteitä, ohjausjärjestelmän, AC/DC tasasuuntaajan, DC/AC-invertterin sekä akun lataussäätimen (kuva 3). Valittujen tuuliturbiinien nimellisteho riippuu järjestelmän sähköntarpeesta, tuulipotentialista sekä turbiinin käyttömahdollisuuksista. Energiavaraston liittäminen järjestelmään perustuu käytävissä olevan energiaylijäämän keräämiseen, joka voidaan hyödyntää riittämättömän tuulen tai liian suurten tuulen nopeuksien aikana energiatarpeen tasaamiseen sekä energiatuotantokustannuksien pienentämiseen. Toisaalta alueen ominaisuuksista riippuen esimerkiksi yleisimmin käytetyn energiavaraston, lyijyakun, kokoa voidaan pienentää, jos tuulivoimaa täydennetään aurinkosähkön avulla. (Kaldellis, J.K. 2010.)

3.2.1 Tuuliolosuhteet

Päiväntasaajalla on yleisesti heikommat tuulennopeudet, ja tuulivoima on yleensä vahvempaa lauhkeammilla vyöhykkeillä (Sulaiman, S.A. 2021). Arktisilla alueilla tuuliolosuhteet ovat hyvät ympäri vuoden. Kylmällä ilmastolla on positiivinen vaikutus tuulivoiman tuotantoon, sillä US Department of Energy:n mukaan tuuliturbiinin maksimiteho nousee jopa 20 % noin -37 °C lämpötilassa. (de Witt, M. et. al. 2019.) Esimerkiksi Suomessa noin 70 % tuulisähköä tuotetaan kuuden kylmimmän kuukauden aikana, sillä talvisin tuulee enemmän ja ilman tiheys on korkeampi (Vattenfall 2022). Toisaalta ilmakehän jäätyminen hankaloittaa ennusteita ja optimointia, sillä ilmakehän jäähavainoja on saatavilla heikosti (Hämäläinen, K. 2021).

Kuvassa 5 esitetään keskimääräinen tuulennopeus maailmanlaajuisesti. Kuten kuvasta huomaa, tuulen nopeudet ovat keskimäärin korkeammat rannikoilla ja saarilla sekä viileämmillä alueilla, ja päiväntasaajan alueilla taas pienemmät. Lämpötilan lisäksi tuuliolosuhteisiin vaikuttaa kuitenkin esimerkiksi myös ilman tiheys (The World Bank 2019).



Kuva 5. Keskimääräinen tuulen nopeus 100 m korkeudella meren pinnasta. Korkeampien tuulen nopeuksien alueilla on todennäköisesti paremmat tuulivoimaresurssit. (The World Bank 2019a.)

Tuulen keskimääräinen nopeus saarilla on 3 – 10 m/s ja maksiminopeus 40 – 50 m/s. Tuulienergiaa hyödynnetään useimmilla saarilla runsaasti, ja arvioiden mukaan yli 55 % saarilla tuotetusta uusiutuvasta energiasta on tuulienergiaa. Kuitenkin monet saaret kohtaavat ongelmia tuulienergian hyödyntämisessä: yksi suurimmista ongelmista on tuulivoimaloiden maanomistus, ja siksi useat projektit ovat viivästyneet tai kokonaan lopetettu. Lisäksi haasteellista saarilla on tuulivoiman potentiaalin arviointi sekä voimalan sijainnin valitseminen. (Kuang, Y. et al. 2016.)

3.2.1 Tuuliturbiinin lapojen jäätyminen

Kylmä ilmasto aiheuttaa tuuliturbiineille erikoishaasteita, joista merkittävin on jään kertyminen tuuliturbiinin lapoihin heikentäen sähkötehoa ja lisäten roottorin kuormaa. Lisäksi haasteita tuo energiantuotannon lopettaminen laitevikojen estämiseksi liian kylmässä säässä sekä rajoitettu pääsy huoltotoimenpiteisiin. (Government of Canada 2017.)

Tuulivoimalan materiaalien on kestävä arktisen matalia lämpötiloja. Tuuliturbiinin lapojen jäätyminen seurauksena turbiinin suorituskyky voi laskea keskimäärin 17 % nimellistehosta, ja sähkötehon häviöt voivat olla jopa 30 % (Elistratov, V. et al. 2021). Mittausten perusteella turbiinin lavoissa voi esiintyä jäätä jopa 20 % ajasta marraskuun ja huhtikuun välillä. Jäänkertymisen rajoittamiseksi käytetään tällä hetkellä erilaisia jäänpoisto- sekä

jäänestomekanismeja, kuten lapojen lämmittämistä, vedenpitävän pinnoitteen lisäämistä lapoihin tai erilaisia toimintastrategioita. Tutkimukset parhaasta metodista ovat vielä kesken, sillä mekanismit on yleensä räätälöitävä esimerkiksi alueen sekä turbiinien valmistajien mukaan. Kanadassa suoritettujen tutkimusten mukaan vuosina 2011-2016 sähköntuotannon häviöiden arvioitiin olevan 956 GWh vuodessa eri puolilla maata. (Government of Canada 2017.) Esimerkiksi Nomessa Kanadassa (taulukko 1) ongelmaa oli pyritty ratkaisemaan turbiineilla, joissa on suorakäyttöiset kestopagneettigeneraattorit sekä mustat siivet, jotka on suunniteltu absorboimaan lämpöä päivänvalon aikaan ja näin vähentämään siipien jäätymistä (WWF 2015).

3.3 Aurinkovoimajärjestelmät

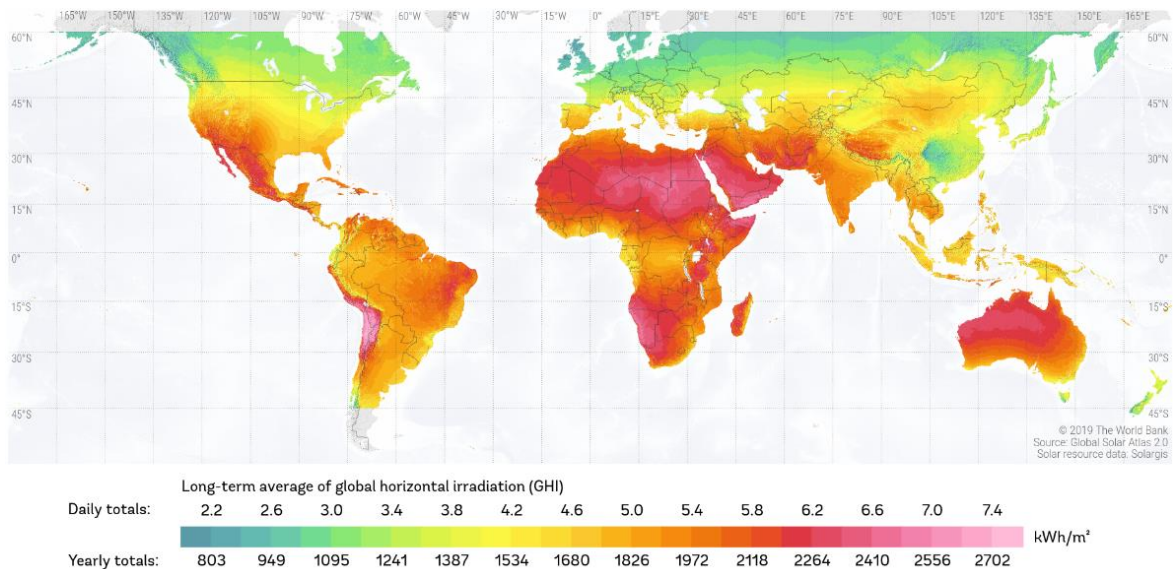
Aurinkojärjestelmien optimoinnin ja suorituskyvyn ennustamisen kannalta olennaista on tietää auringon säteilytehon määrä tietyllä alueella. Aurinkojärjestelmä ei yksinään riitä tarjoamaan jatkuvaa energiantuotantoa, sillä aurinko ei paista koko ajan sääolosuhteista, vuorokaudenajasta sekä vuodenajasta riippuen. (Kaldellis, J.K. 2010.) Siksi aurinkovoimasta on kannattavaa tehdä hybridijärjestelmä. Esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoima sekä akkuvarasto tasapainottavat ja tukevat tuotantoa (kuva 3).

Aurinkohybridijärjestelmässä on tyypillisesti aurinkopaneelien lisäksi useimmiten dieselgeneraattori ja/tai akkuvarasto (tai muu energiavarasto), muuntaja, AC/DC tasasuuntaaja sekä DC/AC-invertteri, muita uusiutuvia energianlähteitä, ohjausjärjestelmä sekä akun lataussäädin (kuva 3). Jos energiavarasto on energiansaannin tasaamiseen liian suuri investointi, dieselgeneraattorin suurempi painottaminen systeemissä voi olla houkutteleva vaihtoehto. Mikäli tuotantokapasiteettia halutaan lisätä, hybridijärjestelmään voidaan asentaa lisää aurinkopaneeleita suhteellisen helposti, sillä paneelit voidaan asentaa usein moduuleina. Aurinkopaneelien pääomakustannukset ovat korkeat suhteessa dieselgeneraattoreihin, mutta sen käyttökustannukset taas ovat hyvin matalat dieseliin verrattuna (Kaldellis, J.K. 2010). Aurinkosähköjärjestelmien alkuvaiheessa tarvitaan suuria investointeja, ja järjestelmät voivat vahingoittua äärimmäisten ilmasto-olosuhteiden vuoksi. Siksi esimerkiksi monilla saarilla ei kehitetä aurinkovoimaa välttämättä ollenkaan, vaikka etenkin päiväntasaajalla sijaitsevilla saarilla aurinko-olosuhteet olisivat hyvät aurinkovoiman hyödyntämiselle. (Kuang, Y. et al. 2016.)

Lämpötila on tärkeä parametri aurinkosähköjärjestelmien suunnittelussa. Kun lämpötila on alhainen (alle 25 °C kennossa), järjestelmä toimii yli nimellisjännitteen, mikä voi aiheuttaa ylijännitettä DC-puolella ja sähköriskejä järjestelmään. Korkeissa lämpötiloissa (yli 25 °C kennossa) järjestelmä toimii alle nimellisjännitteen ja siten pienemmällä teholla. (Canziani, F. et al. 2021.) Aurinkokennojen energiantuotannon tehon kasvuun vaikuttaa arktisen viileämpi ympäristön lämpötila, kun paneelit pysyvät viileämpiä.

3.3.1 Aurinko-olosuhteet

Aurinkovoiman avulla energiaa saadaan etenkin aurinkoisilla alueilla juuri silloin kuin sitä useimmiten eniten tarvitaan eli päivisin. Auringon säteilytehosta, alueesta sekä vuodenajasta riippuen tuotanto voi olla hyvinkin vaihtelevaa. Toisaalta aurinkopaneelien tehoon vaikuttaa myös ympäristö, sillä esimerkiksi aavikolla hiekka ja lika sekä arktisella lumi voivat peittää paneelit heikentäen niiden tehoa. Kuvassa 6 esitetään auringon horisontaalinen säteilyteho [kWh/m^2] lähes maailmanlaajuisesti. Auringon säteilyteho on voimakkaampaa päiväntasaajan läheisyydessä ja heikkenee arktiselle mentäessä. Vaikka säteilyteho on pohjoisemmalla pallon puoliskolla huomattavasti heikompi, aurinkovoima on silti useimmiten kannattavaa. Lisäksi tuotanto kasvaa arktisella kesäisin, kun aurinko ei laske ollenkaan.



Kuva 6. Maailmanlaajuinen auringon horisontaalinen säteilyteho [kWh/m^2] (World Bank Group 2019b).

Vaikka säteilyteho on arktisella heikompi, aurinkokennot ovat tehokkaampia alhaisemmissa ympäristön lämpötiloissa. Normaalisti noin 1/3 tulevasta auringon säteilyenergiasta imeytyy ilmakehään ennen kuin se saavuttaa maanpinnan. Koska kylmä ilma on kuivempaa, ja kuivassa ilmassa on vähemmän vesihöyryä, auringon säteilyenergiaa pääsee tunkeutumaan pohjoisen kylmässä ilmastossa enemmän maan pinnalle ja siten aurinkokennoihin. (WWF 2015.) Vaikka auringon säteilyintensiteetti on matalampi arktisella alueella kuin lämpimillä alueilla, näillä alueilla albedo-ilmiö on voimakkaampaa lumen peittämien alueiden vuoksi. Ilmiötä voidaan hyödyntää kaksipuolisilla aurinkopaneelilla, jolloin paneelin takapinta kerää heijastunutta säteilyä. Erään tutkimuksen mukaan albedo-ilmiön säteily vaikuttaa lähtötehoon lineaarisesti, jolloin teho kasvaa lumen myötä jopa 43 % verrattuna vihreään ruohon. (Temiz, M. & Dincer, I. 2021.)

3.3.2 Arktisen alueen erityishaasteet

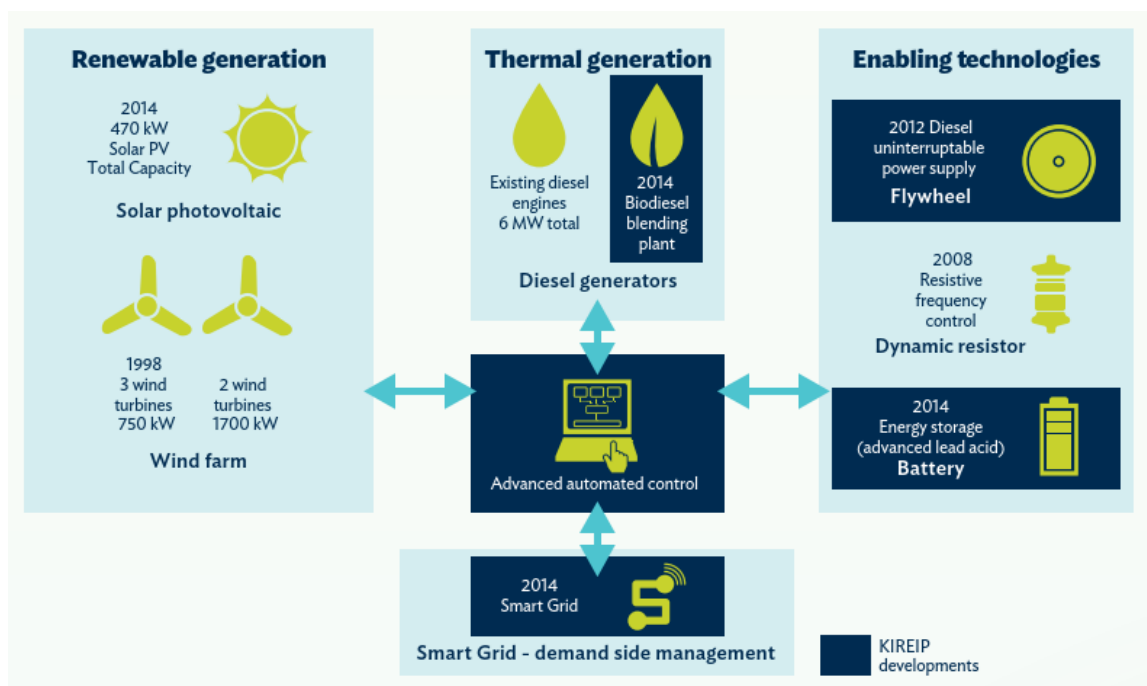
Teoreettisesti paras energiantuotannon hyötysuhde arktisella saadaan, jos paneelien kulmaa muutetaan vuodenajan (ts. auringon kulman) mukaan jyrkemmäksi talvella ja tasaisemmaksi kesällä. Kylmemmässä ilmastossa aurinkopaneelien päälle voi kertyä talvisin paljon lunta, mikä estää energiantuotannon. Seinälle asennetut paneelit ovat ihanteellinen vaihtoehto aurinkoenergiantuotantoon talvella ja keväällä, sillä ne eivät lumetu välttämättä niin paljon. Kaksipuolisten paneelien käyttö voi parantaa energiatehokkuutta talvisin albedo-ilmiön myötä. Syksyisin on yleensä sateisempaa ja pilvisempää, mikä vähentää aurinkoenergian tuotantoa. Lisäksi aurinkopaneelien voi muodostua kosteuden myötä huurrekerros, mikä voi vahingoittaa niitä. (Oulun yliopisto 2021.)

Keskitettyä aurinkovoimaa voidaan käyttää muuttamaan auringon säteily lämmöksi. Keskitetyllä aurinkovoimalla on kuitenkin haittoja arktisessa ilmastossa johtuen pienemmästä säteilytehosta sekä matalammasta ympäristön lämpötilasta muuhun maailmaan verrattuna. Keskitetystä aurinkovoimasta parabolinen kouru on paras vaihtoehto, sillä sen avulla saadaan vähennettyä lämpöhäviöitä: sen ulkopinta on pienempi, jolloin säteily keskitetään fokuksimalla valo parabolisten peilien läpi, ja lisäksi siinä on tyhjiörengas. Keskittämällä säteily voidaan tuottaa lämpöä, joka on useimmissa tapauksissa yli 150 °C. (Temiz, M. & Dincer, I. 2021.)

3.4 Energiavarastot

Uusiutuvalla energialle on ominaista luontainen vaihtelevuus sekä satunnaisuus. Energiavarastointitekniikat on keino tasata uusiutuvan energiantuotannon arvaamattomuutta, kun ylimääräenergia saadaan varastoitua myöhempää käyttöä varten tasaamaan kysyntää. Ylimääräinen energia voidaan muuttaa mekaaniseksi-, sähkömagneettiseksi- tai kemialliseksi energiaksi. Uusiutuvan energian varastoiminen voisi tarjota jopa noin 71 % uusiutuvien tuotosten, kun ilman varastointia se olisi vain noin 46 % (Kuang, Y. et al. 2016.)

Syrjäisillä alueilla käytettyjä energiavarastoja ovat muun muassa akut, pumppuvesivarasto, paineilmaparasto sekä vauhtipyörä ja vety energiavarastoina. Näistä käytetyimpiä ovat akut, vety sekä pumppuvesivarastot. Energiavarastot voidaan määrittää varastointikapasiteetin, lataus- ja purkuajan, sijaintivalinnan, maantieteellisten olosuhteiden sekä investointi- ja käyttökustannusten mukaan. Lyijyakku on näistä edistynein tekniikka, ja sitä voidaan käyttää laajasti luotettavaan virransyöttöön yhdessä dieselgeneraattoreiden ja uusiutuvan energian kanssa. (Kuang, Y. et al. 2016.) Akkuvarasto mitoitetaan vastaamaan kuormituksen tarvetta, kun uusiutuva energialähde ei voi tuottaa energiaa (Deshmukh, M.K. et al. 2006). Esimerkiksi Australiassa King Islandilla järjestelmässä on akku ja vauhtipyörä (kuva 7) yhdessä uusiutuvan energian kanssa (taulukko 3).



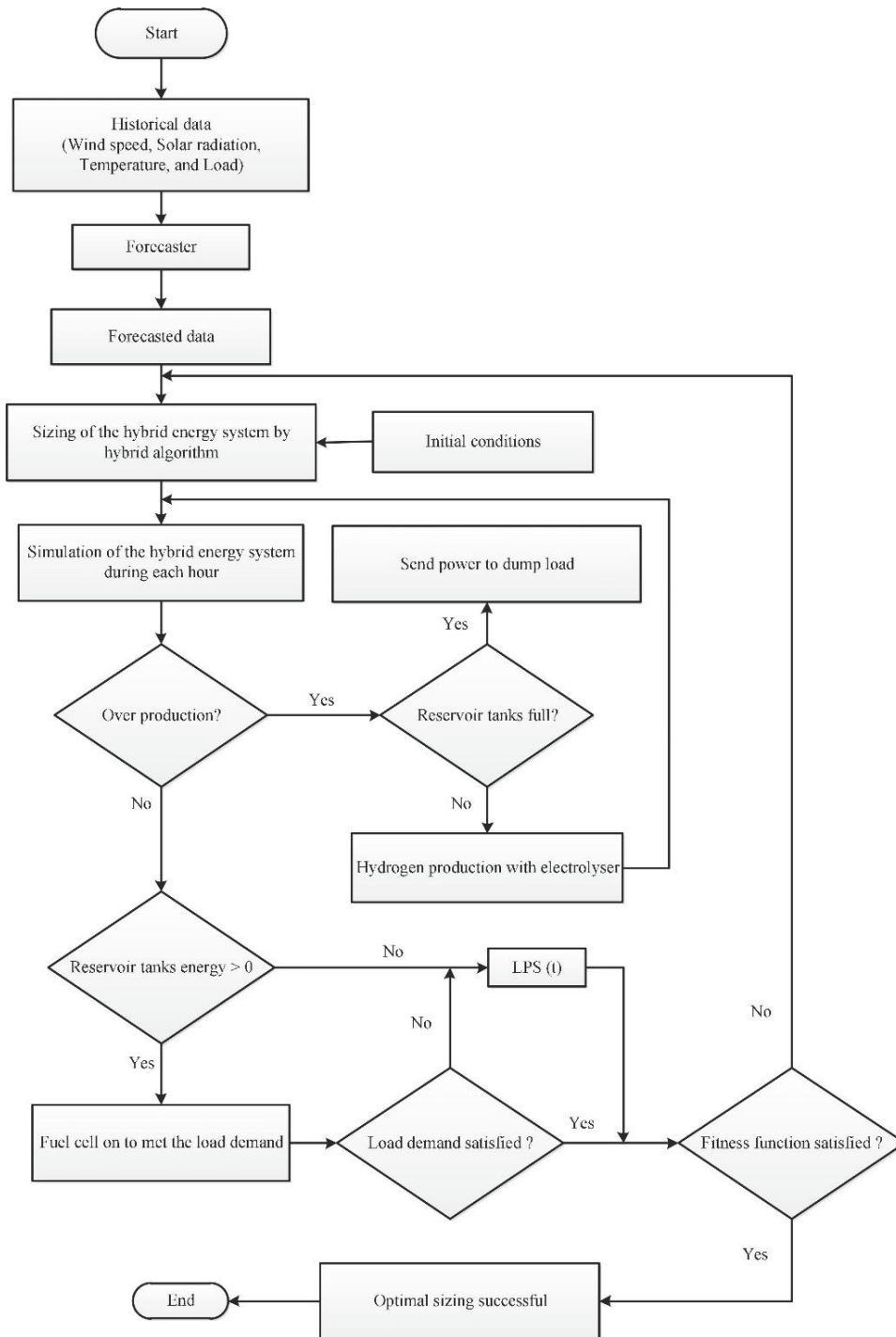
Kuva 7. Australiassa sijaitsevan King Islandin hybridijärjestelmä (Hydro Tasmania 2022).

Energiavarastojen merkitys hybridijärjestelmissä on suuri. Niiden avulla saadaan hyödynnettyä muutoin hukkaan menevä energia, jolloin uusiutuvan energian koko potentiaali saadaan hyödynnettyä paremmin. Energiatehokkuus kasvaa ja energiansaanti on luotettavampaa. Myös dieselgeneraattoreiden polttoainekustannukset laskevat, kun uusiutuvan energian potentiaali hyödynnetään tehokkaasti varastoinnin avulla. Lisäksi päästöjä saadaan vähennettyä optimoimalla energiajärjestelmien tuotantoa. (Kaldellis, J.K. 2010.) Energiavarastoilla on siis suuri vaikutus syrjäisen alueen energiaomavaraisuuteen sekä päästöjen vähentämiseen. Parhaassa tapauksessa hybridijärjestelmän dieselgeneraattorit voidaan sammuttaa kokonaan pidemmäksi aikaa, kuten esimerkiksi kuvassa 7 esitetyssä King Islandin hybridijärjestelmässä.

3.5 Optimointi

Useissa tapauksissa hybridienergiajärjestelmä on ylimitoitettu. Tällä pyritään siihen, että jokainen järjestelmän komponentti voisi kattaa kuormituksen tarpeen ilman muiden komponenttien osallisuutta. Ylimitoittaminen on kuitenkin osoittautunut ongelmaksi, minkä vuoksi hybridienergiajärjestelmissä suositaan erilaisia optimointialgoritmeja. (Kaldellis, J. K. 2010.) Hybridijärjestelmien kannattavuuden ja kustannustehokkuuden varmistamiseksi alueelta on saatava riittävän tarkkoja säätietoja energiantuotannon optimoimiseksi. (Zhang, W. et al. 2019.)

Optimoinnin avulla hybridijärjestelmän eri komponenteista voidaan saada mahdollisimman energia- ja kustannustehokkaita. Hybridijärjestelmien optimaaliselle suunnittelulle ei ole yleistä mallia tai ratkaisumenetelmää, mutta erilaisia työkaluja on kehitetty. Monet tutkimusryhmät hyödyntävät joko omia algoritmejaan tai kaupallisia sovelluksia kuten HOMER. (Kaldellis, J. K. 2010.) Hybridijärjestelmän sähköntuotannolle voidaan luoda simulaatioanalyysi esimerkiksi lyhyelle ajanjaksolle. Zhang et. al. tutkimuksessa luotiin simulaatio (kuva 8), jossa on järjestelmän toimintastrategia jokaiselle tunnille, kun järjestelmässä halutaan yhdistää tuuli- ja aurinkovoima sekä vetyvarasto. Tutkimus perustui Itä-Iranissa sijaitsevaan kaupunkiin. (Zhang et. al. 2019.)



Kuva 8. Optimoidun hybridijärjestelmän toimintaperiaate (Zhang, W. et. al. 2019).

Hybridijärjestelmien optimoinnin avulla voidaan selvittää muun muassa sähkötehon luotettavuusanalyysi sekä järjestelmän kustannusanalyysi. Sähkötehon luotettavuusanalyysissä otetaan huomioon esimerkiksi alueen uusiutuvan energian resurssit, kuorman menetyksen todennäköisyys (LOLP) ja virransyötön katoamisen todennäköisyys (LPSP). Kustannusana-

lyysi selvitetään esimerkiksi määrittämällä tasoitetut energiakustannukset (LCOE), mikä ottaa huomioon kaikki järjestelmän elinkaaren aikana aiheutuvat kustannukset alkuinvestoinneista ja pääomakustannuksista käyttö- ja ylläpitokustannuksiin (esim. polttoaine) ja rahoituskustannuksiin. (Kaldellis, J. K. 2010.) Useiden tutkimusten ja käytännön ratkaisujen perusteella voidaan todeta, että syrjäisillä alueilla pyritään luomaan optimoinnin avulla sellainen hybridijärjestelmä, jossa riippuvuus dieseliin olisi mahdollisimman vähäinen tai jopa olematon, ja uusiutuvan energian osuus mahdollisimman suuri.

4 Tulevaisuuden näkymät

Useassa tapauksessa seuraava askel uusiutuvan energian kapasiteetin lisäämiseen hybridi-järjestelmässä voisi olla tuuli- ja aurinkovoiman yhdistäminen toisiinsa sekä dieselgeneraattoreiden ja/tai akkujen tai muiden energiavarojen lisääminen järjestelmään. Myös muita uusiutuvan energianlähteitä, kuten vesivoimaa, voidaan hyödyntää hybridijärjestelmissä. Energiavarojen kehittyessä niiden hinnat alkavat todennäköisesti laskea samaan tapaan kuin aurinko- ja tuulivoimateknologian hinnat ovat laskeneet. Aurinko- ja tuuliprojektit tulevat todennäköisesti halventumaan entisestään teknologian kehittyessä. Esimerkiksi vuosien 2010 ja 2019 välillä sähköntuotantokustannukset laskivat aurinkopaneelien kohdalla 88 % ja maalla tuotettavan tuulivoiman kohdalla 71 % (Sulaiman, S.A. 2021). Lisäksi tekniikan kehittyessä tulevaisuudessa voitaisiin hyödyntää yhä enemmän myös tekoälyä järjestelmien hallintaan.

Yksittäisillä henkilöillä ei välttämättä ole hybridijärjestelmän aluille saamiseen tarvittavia suuria kustannuksia. Sijoittajia voi olla hankala saada projekteihin, koska niiden onnistumisesta ei ole takeita. Myös lainsäädäntö sekä ammattitaidon puute voivat estää hankkeiden tapahtumisen. Valtioiden ja suurten yritysten uusiutuvan energian lisäämiseen perustuvien rahoitusohjelmien avulla syrjäisten alueiden omavaraisuutta voidaan saada parannettua nopeammin. Ilmastonmuutoksen myötä valtioilla on korkeita tavoitteita hiilineutraaliuden saavuttamisessa, mikä näkyy myös rahoitusohjelmien ja siten esimerkiksi hybridiprojektien lisääntymisessä. Tämä ratkaisee myös rahoitusongelmaa, sillä usein valtio tai muu taho rahoittaa projektin. Samaan tapaan myös koulutusta aiheesta voidaan viedä eri alueille. Esimerkiksi Colville-järvellä Kanadassa hybridijärjestelmän kokoaminen paikan päällä koulutti samalla asukkaita järjestelmän käytöstä ja huoltamisesta (taulukko 1).

Teknologian kehittyminen ja kustannusten madaltuminen mahdollistavat uusiutuvan energian sekä energiavarojen teknologioiden hyödyntämisen hybridijärjestelmissä tulevaisuudessa paremmin. Esimerkiksi vetyvarastojen kehitys voisi taata hybridijärjestelmille vakaan, energia- ja kustannustehokkaan tulevaisuuden. Toisaalta myös dieselgeneraattorit ovat hyvä energiansaannin takaaja, minkä vuoksi tällaisissa järjestelmissä voitaisiin hyödyntää biodieseliä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Uusiakin teknologioita silti tarvitaan.

4.1 Vetyvarasto osana hybridijärjestelmää

Vety tunnetaan ympäristöystävällisenä vaihtoehtoisena polttoaineena ja energiavarastona. Sitä voidaan valmistaa helposti veden elektrolyysillä käyttämällä uusiutuvaa sähköä tai muita ympäristöystävällisiä tekijöitä kuten lämpöä, valoa ja biologisia ja kemiallisia prosesseja. Esimerkiksi arktiset yhteisöt voisivat hyödyntää vetyä kuljetuspolttoaineena, energiavarastona ja energiansiirtovälineenä sekä muissa teollisissa prosesseissa. Vetyä voidaan tuottaa ylimääräsähköstä matalan sähkönkysynnän aikaan, jolloin energiaa ei kulu hukkaan. Polttokennoja tai polttomoottoreita voidaan käyttää sähköntuotantoon tai mekaanisen energian tuotantoon eri tarkoituksiin. (Temiz, M. & Dincer, I. 2021.)

Syrjäisiin kohteisiin kilpailukykyinen ja kustannustehokas yhdistelmä voisi olla vetyvaraston ja akun yhdistelmä. Vetyvarastot ovat osoittautuneet taloudellisesti kannattaviksi aurinkon ja tuulen kausiluontoisen vaihtelun alueilla. Vetyvarasto on akkuun nähden järkevämpi vaihtoehto silloin kun sähkönkulutus on öisin paljon korkeampaa. Mikäli järjestelmässä on akku ja vetyvarasto, ensin ladataan akku, ja sen jälkeen ylijäämänsähkö muunnetaan elektrolyysillä vedyksi vetytankkeihin. Kyseessä on Power-to-X-tekniologian hyödyntäminen. Polttokennoa taas käytetään akun purkamisen aikana, jottei akku laske lataustilan vähimmäisrajan alle. Saarilla uusiutuviin perustuvat hybridijärjestelmät ovat osoittautuneet useissa analyysissä dieselpohjaisia järjestelmiä paremmiksi. Esimerkiksi Italian Strombolin saarelle Ginostran kylään perustuvan mitoitusmenetelmän tuloksena hybridijärjestelmän LCOE oli noin 0,51 €/kWh, kun dieselpohjaisessa järjestelmässä se oli 0,86 €/kWh johtuen korkeista polttoainekustannuksista. Malesian saarilomakohteissa hinnat olivat vielä korkeampia dieselpohjaisissa järjestelmissä. Siten öljyn hinnan noustessa ja aurinkopaneelien hintojen laskeessa aurinkovetyhybridijärjestelmistä voisi tulla taloudellisesti kilpailukykyisiä dieselgeneraattoreihin verrattuna. Tällaiset järjestelmät ovat myös huomattavasti ympäristöystävällisempiä. Toisaalta mitoitusmenetelmän mukaan joillekin saarille pelkkä vetyvarasto energiavarastona ilman akkua oli järkevin vaihtoehto. (Shahid, Z. et al. 2022.)

4.2 Hiilineutraali dieselgeneraattori

Vaikka hybridijärjestelmässä olisi käytössä dieselgeneraattorit, järjestelmästä voisi saada hiilineutraalin hyödyntämällä biodieseliä. Eräässä HOMER-ohjelmiston avulla Intian maalaiskylään suoritettussa analyysissä järjestelmässä hyödynnettäisiin aurinkovoiman lisäksi pienvesivoimaa sekä biodieseliä (30 kW pienvesivoima, 10 kW biodiesel ja 20 kW aurinkosähkö), minkä ansiosta järjestelmä olisi hiilineutraali. Kun vuosittaiseksi sähköntarpeeksi arvioitiin 2560 kW, LCOE olisi 0,42 USD/kWh (2013). Kuitenkin käytännön toteutuksessa toistuu tässä esimerkissä samat haasteet, mihin useissa tapauksissa törmätään: rahoituksen hankinta, sillä alueella ei ole kehittynyt sähkömarkkinoita, ammattitaidon puute, logistiset ongelmat, ja kysyntää koskevat arviot ovat vain oletuksia. Lisäksi sääntely ja hallinto voivat tuoda haasteita liiketoimintaan. (Sen, R. & Bhattacharyya S.C. 2013.) Biodiesel voisi kuitenkin olla tulevaisuuden vaihtoehto dieselgeneraattorin sisältävissä hybridijärjestelmissä, mikäli järjestelmän kustannustehokkuus pysyy.

4.3 Uusia teknologioita

SINN Power kehitti kelluvan merihybridialustan (eng. Ocean Hybrid Platform), jolla voidaan yhdistää aurinko-, tuuli- ja aaltoenergia (kuva 9). Meressä kelluva rakenne kestää jopa on 27 m/s tuulennopeuden sekä 12 m aallonkorkeuden. Alustaa voidaan käyttää myös myrskyisillä makean veden alueilla. Testialustaa (80 kW aurinkomoduulikapasiteetti, 6 m x 12 m) on kokeiltu Heraklionissa Kreetalla, minkä jälkeen merihybridialusta on tuotu maailmanmarkkinoille. Alusta on modulaarinen, ja sillä voidaan saavuttaa yhteensä 10 MW aurinkovoimakapasiteetti. Jokaiseen moduulin kulmaan voidaan asentaa Saksalaisen Luvsiden toimittamia erikokoisia pieniä tuuliturbiineja. Olosuhteista sekä energiatarpeesta riippuen alustaan voidaan lisätä myös aaltoenergiamuuntajia. Sen taloudellinen suorituskyky on hyvä, ja sitä voidaan hyödyntää saarilla ja syrjäisillä alueilla korvaamaan dieselgeneraattoreita. (PV magazine 2021.)



Kuva 9. Vedessä kelluva merihybridialusta, jolla voidaan yhdistää aurinko-, tuuli- ja aaltoenergia. (PV magazine 2021).

Temiz, M. et. al. tutkimuksessa kehitettiin arktiselle yhteisölle, Kanadan Nunavutiin, uusiutuvan energiajärjestelmä vedyn tuotantoon sekä lämpöenergian varastointiin. Tutkimuksessa kehitetään myös meren lämpömuunnosprosessi (eng. Ocean thermal energy conversion OTEC). OTEC-järjestelmä hyödyntää ympäristön ilman ja valtameren/veden lämpötilaeroa. Sen muunnostehokkuus on alhaisempi verrattuna muihin teknologioihin, mutta energialähde on lähes rajaton. Käytännön tutkimuksen mukaan suurin teoreettinen energiatehokkuus on 9,2 %. Ammoniakkia on ehdotettu yhdeksi vaihtoehtoiseksi lämmönsiirtonesteeksi OTEC-järjestelmiin, sillä ammoniakkin kolmipuolinen Rankine-sykli voi hyödyntää energiaa alemmissa lämpötiloissa verrattuna veden Rankine-sykliin. Tutkimuksessa oli tarkoituksena kehittää tapa tuottaa ympäristöystävällisesti lämpöä, sähköä, vetypolttoainetta, kuumaa sekä makeaa vettä ja ruokaa yhteisölle yhdistämällä kaskadilämpöpumppu, OTEC, kolmipuolinen Rankine-sykli, keskitetty aurinkovoima sekä kaksipuolisia aurinkopaneeleita (albedoilmion hyödyntämiseen), suolanpoisto, polymeerielektrolyyttikalvo sekä elektrolysaattori ja polttokennojärjestelmä vedyntuotantoon ja -käyttämiseen sekä lämpöenergiavarastojärjestään. Tutkimuksen tuloksena energiatehokkuus oli 16,3 % ja eksergiatehokkuus 36,4 %. Sillä tuotettiin 25 GWh sähköä vuosittain sähkön kulutuksen ollessa 5691 MWh, ja vetyä 283 tonnia vuodessa. Lämpöenergiaa hyödynnetään kylän palveluiden sekä asutusalueiden lämmittämiseen. (Temiz, M. & Dincer, I. 2021.)

5 Yhteenveto

Energiajärjestelmien kehittyessä tuuleen ja aurinkoon perustuvat dieselhybridijärjestelmät ja niihin liitetyt dieselgeneraattorit sekä energiavarastot ovat osoittautuneet houkuttelevaksi vaihtoehdoksi omavaraiselle sähköntuotannolle syrjäisillä alueilla sekä saarilla. Hybridijärjestelmien avulla voidaan lisätä uusiutuvaa energiantuotantoa, energiajärjestelmän tehokkuutta ja tasapainoa sekä energiaomavaraisuutta. Hybridijärjestelmistä syrjäisillä alueilla löytyy paljon tutkimuksia, mutta vähemmän käytännön kohteita johtuen muun muassa investointien suuruudesta. Etenkin alkuinvestoinnit voivat olla niin suuria, että sijoittajia voi olla vaikeaa löytää siitäkkin huolimatta, että käyttökustannukset ovat uusiutuvan energian tapauksessa hyvin matalat. Kustannuksia voi tulla myös huoltotoimenpiteistä, jos osaamista ei löydy lähialueilta tai paikalle pääseminen vaatii erikoisjärjestelyjä, kuten helikopterin. Hybridijärjestelmän energiantuotannon kannalta kustannuksissa voidaan säästää oikeanlaisella järjestelmän optimoinnilla, kun uusiutuvien energianlähteiden tuotannosta saadaan mahdollisimman suuri hyöty.

Syrjäisten alueiden kannalta keskeisimmät haasteet ovat:

- Uusiutuvan energian kapasiteetin lisääminen ja dieselgeneraattoreista luopuminen
- Kustannusten kattaminen hybridijärjestelmien rakentamiseksi

Trooppisilla alueilla käytännön esimerkkejä hybridivoimasta löytyy huomattavasti vähemmän kuin arktiselta alueelta, jolla hybridijärjestelmät ovat jo kasvattaneet suosiotaan. Tähän voi vaikuttaa se, että trooppisella alueella on huomattavasti enemmän valtioita kuin arktisella alueella, ja moni niistä on kehitysmaita, mikä voi vaikuttaa energiamurroksen hitaaseen kehitykseen. Koska saaria on ympäri maapalloa, niillä voi olla täysin erilaisia ratkaisuja energiantuotannossa. Saarten syrjäisillä alueilla voidaan saavuttaa jopa parempi uusiutuvan energian käyttöaste kuin urbaaneilla alueilla, jos saaren verkkoon kuulumaton syrjäinen yhteisö tuottaa sähkönsä esimerkiksi hybridivoiman avulla. Myös pienemmillä saarilla voi olla isoja saaria parempi tilanne omavaraisuuden kannalta, sillä hybridijärjestelmän ei tarvitse olla niin suuri kattaakseen koko energiantarpeen. Haasteista huolimatta hybridijärjestelmät ovat osoittautuneet kannattavaksi vaihtoehdoksi syrjäisten alueiden energiantuotannossa.

Lähteet

Arktinen Keskus. 2019. Lapin yliopisto. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.2.2022]. Saatavilla: <https://www.arcticcentre.org/FI/arktinenalue>

Canziani, F. & Vargas, R. & Gastelo-Roque, J.A.. 2021. Hybrid Photovoltaic-Wind Microgrid With Battery Storage for Rural Electrification: A Case Study in Perú. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 24.5.2022]. Saatavilla: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.528571/full>

CBC News. 2021. Northern climate poses challenge for Colville Lake's hybrid power system. [Verkkouutinen]. [Viitattu 8.5.2022]. Saatavilla: <https://www.cbc.ca/news/canada/north/colville-lake-hybrid-power-system-1.6132488>

Conservation Institute. 2018. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 26.3.2022.] Saatavilla: <https://www.conservationinstitute.org/off-the-grid-food-guide/>

Deshmukh, M.K. & Deshmukh, S.S.. 2006. Modeling of hybrid renewable energy systems. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 6.5.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.011>

de Witt, M & Stafansson, H & Valfells, A.. 2019. Energy security in the Arctic: Policies and technologies for integration of renewable energy. Arctic Yearbook 2019. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 26.3.2022]. Saatavilla: https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2019/Briefing-Notes/6_AY2019_BN_De_Witt.pdf

Energy Storage News. 2022a. Hybrid projects enable 50+% renewable energy use at remote Australian locations. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavilla: <https://www.energy-storage.news/hybrid-projects-enable-50-renewable-energy-use-at-remote-australian-locations/>

Energy Storage News. 2022b. Philippines' first hybrid solar-plus-storage plant comes online through Ayala Group energy subsidiary. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavilla: <https://www.energy-storage.news/philippines-first-hybrid-solar-plus-storage-plant-comes-online-through-ayala-group-energy-subsiary/>

Eunice Energy Group. 2021. TILOS Project. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavilla: <https://eunice-group.com/projects/tilos-project/>

Elistratov, V. & Konishchev, M. & Denisov, R. & Bogun, I. & Grönman, A. & Turunen-Saaresti, T. & Lugo, A.J.. 2021. Study of the Intelligent Control and Modes of the Arctic-Adopted Wind–Diesel Hybrid System. MDPI. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 21.2.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/en14144188>

Gan, L.K. & Shek, J.K.H & Mueller, M. A.. 2016. Optimised operation of an off-grid hybrid wind-diesel-battery system using genetic algorithm. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 6.5.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.062>

Goncalves, A. & Liberato, M.L.R. & Nieto, R.. 2021. Wind Energy Assessment during High-Impact Winter Storms in Southwestern Europe. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 5.6.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/atmos12040509>

Government of Canada. 2017. Wind Energy in Cold Climates. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 21.2.2022]. Saatavilla: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/energy-sources-distribution/renewables/wind-energy/wind-energy-cold-climates/7321>

Green Eigg. 2013. The Isle of Eigg. [Verkkosivu]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavilla: <https://islandsgoinggreen.org/about/eigg-electric/>

Hydro Tasmania. 2022. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavilla: https://www.hydro.com.au/docs/default-source/clean-energy/hybrid-energy-solutions/king_island.pdf?sfvrsn=f3ad4828_2

Hämäläinen, Karoliina. 2021. Meteorological Solutions to Support Wind Energy Production in Finland. Helsingin yliopisto. Väitöskirja. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 6.5.2022]. Saatavilla: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/336052/Dissertation_H%c3%a4m%c3%a4l%c3%a4inen_Karoliina.pdf?sequence=1&isAllowed=y

IEEE. 2017. Remote Off-Grid Solutions for Greenland and Denmark: Using smart-grid technologies to ensure secure, reliable energy for island power systems. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 23.5.2022]. Saatavilla: doi: 10.1109/MELE.2017.2685959.

Kaldellis, J.K.. 2010. Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems - Technology, Energy Storage and Applications. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavilla:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0098P7X7/stand-alone-hybrid-wind/description-stand-alone>

Kuang, Y. & Zhang, Y. & Zhou, B. & Li, C. & Cao, Y. & Li, L. & Zeng, L.. 2016. A review of renewable energy utilization in islands. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 10.4.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>

Meteoblue. 2011. Climate zones. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.5.2022]. Saatavilla: <https://content.meteoblue.com/en/meteoscool/general-climate-zones>

Nature. 2022. This Arctic town wants to make renewable energy work at the top of the world. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 22.5.2022]. Saatavilla: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-01189-x>

Oulun yliopisto. 2021. Potentiality of solar energy in the Arctic. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 6.5.2022]. Saatavilla: <https://www oulu.fi/blogs/science-with-arctic-attitude/solar-energy>

Pike, C. & Green, N. 2017. Nome Wind-Diesel System Overview. ACEP Technical Report. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 4.5.2022]. Saatavilla: https://acep.uaf.edu/media/288908/Pike-Green_Nome_Wind-Diesel_Final.pdf

PV magazine. 2021. Pilot floating platform for offshore hybrid wind-solar-wave projects. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 28.5.2022]. Saatavilla: <https://www.pv-magazine.com/2021/11/24/pilot-floating-platform-for-offshore-hybrid-wind-solar-wave-projects/>

Shahid, Z. & Santarelli, M. & Marocco, P. & Ferrero, D. & Zahid, U. 2022. Techno-economic feasibility analysis of Renewable-fed Power-to-Power (P2P) systems for small French islands. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115368>

Sen, R. & Bhattachryya, S.C.. 2013. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 26.3.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028>

- Sulaiman, S.A.. 2021. Clean Energy Opportunities in Tropical Countries. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 13.5.2022]. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=V6kWEAAQ-BAJ&lpg=PR5&ots=-SxnCiazvx&dq=s.a.%20sulaiman%202021%20tropical&lr&hl=fi&pg=PA1#v=onepage&q=s.a.%20sulaiman%202021%20tropical&f=false>
- The Energy Innovation Market. Hybrid power plants (wind- or solar-diesel). [Verkkosivu]. [Viitattu 13.4.2022.]. Saatavilla: <https://www.th-energy.net/english/platform-renewable-energy-and-mining/hybrid-power-plants/>
- The World Bank Group. 2019a. Wind resource map. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 4.6.2022]. Saatavilla: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/globalwindatlas3/HR_posters/ws_World.pdf
- The World Bank Group. 2019b. Global Solar Atlas. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 4.6.2022]. Saatavilla: <https://globalsolaratlas.info/download?c=11.350797,8.613281,3>
- Temiz, M. & Dincer, I.. 2021. A unique ocean and solar based multigenerational system with hydrogen production and thermal energy storage for Arctic communities. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 6.5.2022]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122126>
- Vattenfall. 2022. Miten tuulesta tehdään sähköä. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.5.2022]. Saatavilla: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/tuulivoima/>
- Vuntut Gwitchin Government. 2021. Sree Vyah Advances the Transition to Clean Energy in Canada's North. Media Release. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.5.2022]. Saatavilla: https://www.vgfn.ca/pdf/NEWS_RELEASE_Sree_Vyah_07_09_2021.pdf
- WWF. 2015. Renewable energy in the Arctic. The Circle 03.15. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 21.2.2022]. Saatavilla: https://wwf.panda.org/wwf_news/?250991/The-Circle-0315
- Wärtsilä. 2022. Energy storage improves energy security in remote island in northern Azores, Portugal. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavilla: <https://www.wartsila.com/energy/learn-more/references/utilities/graciosa-island-portugal>
- Zhang, W. & Maleki, A. & Rosen, M.A. & Liu, J.. 2019. Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.2.2022]. ISSN 0196-8904. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.102>