Tampereen yliopisto

Eino Niittymäki

KESÄMÖKIN ENERGIANTARPEEN KATTAMINEN UUSIUTUVALLA ENERGIALLA

Teknis-taloudellinen analyysi

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kari Lappalainen
Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Eino Niittymäki: Kesämökin energiantarpeen kattaminen uusiutuvalla energialla
Eino Niittymäki: Covering the energy consumption of a summer house with renewable energy
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2020

Työn tarkoitus on tuottaa perusteltu ratkaisu kesämökin energiantarpeen kattamiselle uusiutuvilla energiamuodoilla. Eri teknologioita tarkastellaan toiminnallisuuden, käytettävyyden sekä taloudellisten vaikutusten näkökulmista. Työssä tarkastellaan aurinkoenergian sovelluksista erilaisia aurinkopaneeleja, esimerkiksi kiteisiä piikennopaneeleja, jotka tuottavat sähköenergiaa pn-liitoksen avulla. Aurinkoenergian sovelluksiin kuuluu myös aurinkokeräimet, jotka hyödyntävät auringon säteilyenergian muuttamalla sen lämpöenergiaksi. Taloudellisen tarkastelun jälkeen aurinkoenergia havaitaan parhaaksi ratkaisuksi sähköenergiantuotantoon. Aurinkoenergian käyttö kuitenkin edellyttää akustoa sähkönsaannin turvaamiseksi, joten se otetaan huomioon kokonaiskustannuksissa.

Tuulienergian sovelluksista tarkastellaan muuttuvanopeuksisia ja vakionopeuksisia tuulivoimaloita ja niiden toimintaa. Tuulivoimala voidaan toteuttaa monella tavalla. Suurissa tuulivoimaloissa käytetään pääosin epätahti- ja tahtigeneraattoreita. Pienissä tuulivoimaloissa puolestaan käytetään useampia erilaisia ratkaisuja. Pienet ja suuret tuulivoimalat kuitenkin toimivat samoilla perusperiaatteilla. Tuulivoimalan sähköntuotto todetaan kesämökin sijainnissa huonoksi, joten voimaloita tarvitaan useita energiantarpeen täyttämiseksi. Useampi voimala kuitenkin vie enemmän asuintilaa ja hankintakustannukset kasvavat suuriksi. Taloudellisen tarkastelun jälkeen todetaankin tuulienergia huonommaksi ratkaisuksi kuin aurinkoenergia.

Seuraavaksi tarkastellaan maalämpöä vaihtoehtona energiantuottamiseen. Erityisesti tutkitaan maalämpöpumppua ja sen toimintaa. Maalämmössä hyödynnetään maan pinnan alle sitoutunutta energiaa. Pääosa energiasta sitoutuu auringon säteilystä mutta myös geoterminen energia voi olla maalämmön alkuperänä. Maalämmössä hyödynnetään lämpöä matalasta syvyydestä toisin kuin geotermisessä energiassa, joka hyödyntää syvältä maan sisältä johtuvaa lämpöenergiaa. Maan pinnan lisäksi maalämpöä voidaan hyväksikäyttää pohjavedestä tai pintavesistä. Tarkastelun tuloksena maalämpö todetaan epäkannattavaksi ratkaisuksi jo ennen taloudellista tarkastelua. Tämä johtuu siitä, että kesämökin tarpeet ja maalämmön hyödyt eivät kohtaa.

Polttokennoja tutkitaan vedyn näkökulmasta eli polttokennon polttoaineena toimii vety. Lisäksi polttokenno tarvitsee hapettimen. Sähkökemiallisen reaktion tuloksena polttokenno tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa sekä vettä. Lisäksi polttokenno tuottaa lopputuotteita niin kauan kuin sille syötetään polttoainetta ja hapetinta. Niin kuin maalämpö, vetypolttokenno havaitaan epäkannattavaksi ratkaisuksi ennen taloudellista tarkastelua. Vetypolttokennon kohdalla suurin ongelma on vetykaasun hankkiminen eli vetyinfrastruktuurin puute.

Viimeisenä teknologiana käsitellään bioenergiaa ja sen sovelluksia. Bioenergiaa voidaan hyödyntää monella tavalla. Esimerkiksi polttamalla biomassaa voidaan tuottaa lämpöenergiaa tai sähköenergiaa esimerkiksi höyryturbiinin avulla. Biokaasua puolestaan voidaan tuottaa mätänemisreaktion tuloksena ja kaasua voidaan käyttää esimerkiksi kaasuautojen polttoaineena. Biokaasulla voi lisäksi tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa biokaasulla toimivalla voimalalla, joka käyttää biokaasua lähtöaineena vetykaasulle. Voimala käyttääkin vetypolttokennoa energian tuottamiseen. Taloudellisessa tarkastelussa voimala havaitaan hankintakustannuksiltaan liian kalliiksi, eikä se siksi sovellu ratkaisuksi. Varaava puuliesi puolestaan todetaan taloudellisesti ja toiminnallisesti toimivaksi ratkaisuksi.

Työn lopputuloksena ratkaisuksi energiantarpeen kattamiseksi todetaan sähköenergiatuotannossa aurinkoenergia, tarkemmin akustollinen aurinkopaneelijärjestelmä. Lämpöenergian tuottamiseksi ratkaisuksi esitetään bioenergialla toimiva varaava puuliesi.

Avainsanat: Aurinkoenergia, tuulienergia, maalämpö, polttokenno, bioenergia, kesämökki

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. AURINKOENERGIA 2
2.1 Pn-liitoksen toimintaperiaate 2
2.1.1 Piikennon ja ohutkalvokennon ominaisuuksia 3
2.1.2 Aurinkokennon käytettävyys 4
2.2 Aurinkoenergiasta lämpöenergiaa 5
2.2.1 Lämpöenergiaan perustuvia sovelluksia 5
2.2.2 Lämpöenergiaan perustuvien sovelluksien käytettävyys 6
3. TUULIENERGIA 8
3.1 Vakionopeuksiset tuulivoimalat 8
3.2 Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat 9
3.3 Tuulienergian käytettävyys yksityiskäytössä 11
4. MAALÄMPÖ 12
4.1 Maalämpöpumpun toimintaperiaate 12
4.2 Maalämmön käytettävyys yksityisessä energiantuotannossa 14
5. POLTTOKENNO JA VETY 15
5.1 Polttokennon toiminta ja vety polttoaineena 15
5.2 Vetypolttokennon käytettävyys yksityiskäytössä 16
6. BIOENERGIA 18
6.1 Bioenergian tuottaminen ja hyödyntäminen palamisreaktiolla 18
6.2 Biokaasun tuottaminen ja hyödyntäminen 18
6.3 Nestemäisen biopolttoaineen tuottaminen ja hyödyntäminen 19
6.4 Bioenergian käytettävyys yksityisessä energiantuotannossa 20
7. TEKNOLOGIOIDEN TALOUDELLINEN TARKASTELU 23
7.1 Teknologioiden hankintakustannukset 23
7.2 Takaisinmaksuajat teknologioille 25
8. RATKAISU ENERGIANTUOTANTOON 28
9. YHTEENVETO 30
LÄHTEET 32

1. JOHDANTO

Vuosittain julkisuudessa nousevat keskustelunaiheeksi korkeat sähkön siirtohinnat, lisäten kansalaisten kriittisyyttä perinteisiä sähkönhankintamenetelmiä kohtaan. Lisäksi ilmastonmuutos ja sen torjuntatyö luovat lisäpainetta erilaisten ja puhtaampien menetelmien käyttöön energiantarpeen kattamisessa. Erityisesti kesämökeillä siirtomaksut voivat olla korkeita suhteessa muuhun sähkön hintaan. Tämä kannustaa edelleen irtautumaan kiinteästä sähköverkosta ja kattamaan niin sähkön kuin muun energian tarpeet uusiutuvalla energialla.

Tässä työssä vertaillaan ja analysoidaan eri uusiutuvia energiamuotoja, joilla voitaisiin toteuttaa kesämökin energiantarpeen kattaminen yhdellä tai useammalla energiamuodolla. Työssä tarkastellaan eri vaihtoehtoina aurinkoenergiaa, tuulienergiaa, maalämpöä, bioenergiaa sekä vedyn ja polttokennon hyödyntämistä. Kesämökin energiantarpeen kattamisen vaihtoehtoja tutkitaan toiminnallisuuden, käytettävyyden sekä taloudellisuuden kannalta.

Työssä tarkasteltavana kesäasuntona toimii hirsimökki, jonka vuosittainen sähkönkulutus on noin 2000 kWh. Kesämökki on noin 65 m^2:ä pinta-alaltaan ja sijaitsee Pälkäneellä järven rannalla. Työssä tarkasteltava kesämökki on pääosin kesäkäytössä ja tässä työssä tällä tarkoitetaan toukokuusta syyskuuhun olevaa ajanjaksoa. Toisin sanoen energiankulutus jakautuu noin 150 päivän väliselle ajanjaksolle.

Työn alussa tarkastellaan jokaista vaihtoehtoa energiantuotannon kattamiseen. Ensin tarkastellaan aurinkoenergiaa, sen toimintaperiaatteita, sovelluksia ja käytettävyyttä. Tämän jälkeen jokaista vaihtoehtoa energiantarpeen kattamiseen tarkastellaan erikseen. Kun eri teknologioiden tarpeelliset teoriat ja toimintaperiaatteet on selvitetty, siirrytään tarkastelemaan vaihtoehtojen talouspuolta. Lasketaan tarvittavat laskelmat ja vertaillaan tuloksia keskenään. Viimeisenä muodostetaan ratkaisu, joka on paras niin käytettävyyden kuin taloudenkin kannalta. Tämän jälkeen on yhteenveto.

2. AURINKOENERGIA

Auringossa tapahtuvien fuusioreaktioiden seurauksena syntyy energiaa, jota aurinko säteilee avaruuteen. Tästä säteilystä osa saapuu maan pinnalle, jolloin säteily voidaan hyödyntää aurinkovoiman eri sovelluksilla energiantuotannossa.

Auringon säteilemää energiaa voidaan hyödyntää laitteilla, jotka käyttävät hyväkseen valosähköistä ilmiötä tai laitteilla, jotka muuttavat säteilyn energian lämmöksi [1, s. 15,103,183]. Valosähköiseen ilmiöön perustuvat laitteet ovat yleisesti tunnetumpia sähkön tuotannossa kuin laitteet, jotka muuttavat säteilyn energian ensin lämmöksi.

2.1 Pn-liitoksen toimintaperiaate

Tyypillisesti valosähköiseen ilmiöön perustuvat laitteet toimivat hyödyntämällä pn-liitosta, joka koostuu n- ja p-tyypin puolijohteista. P-tyypin puolijohde voidaan muodostaa esimerkiksi seostamalla booria piihin, jolloin boori vastaanottaa yhden elektronin jättäen jälkeensä positiivisesti varautuneen elektroniaukon. N-tyypin puolijohde puolestaan voidaan muodostaa esimerkiksi seostamalla fosforia piihin, jolloin fosfori luovuttaa yhden elektronin. P-tyypillä varauksenkuljettajina siis toimivat elektroniaukot ja n-tyypillä elektronit. Molemmat puolijohteet ovat kuitenkin kokonaisvaraukseltaan neutraaleja. [1, s. 103–104]

Kun puolijohteet liitetään toisiinsa, muodostuu liitoskohtaan tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia. Tyhjennysalueessa vaikuttaa sähkökenttä, joka syntyy, kun tyhjennysalueen toisella puolella kokonaisvaraus on negatiivinen ja toisella puolella positiivinen. Tämä on seurausta siitä, kun p-tyypin puolijohteen elektroniaukot vastaanottavat n-tyypin puolijohteelta elektroneja. [1, s. 104] [2, s. 70–72] Muodostettua materiaalia voidaan hyödyntää sähköntuotannossa valosähköisen ilmiön avulla.

Sähköntuotanto pn-liitoksellisella materiaalilla perustuu siihen, että valohiukkanen eli fotoni osuu materiaaliin ja se virittää elektronin. Virittynyt elektroni liikkuu materiaalissa pn-liitoksessa muodostuneen sähkökentän määräämään suuntaan. Vastaavasti elektroniaukko liikkuu vastakkaiseen suuntaan materiaalissa elektroniin verrattuna. [1, s. 104] Koska erimerkkiset varaukset kerääntyvät materiaalissa vastakkaisiin päätyihin, syntyy niiden välille potentiaaliero eli jännite. Kun päädyt eli navat yhdistetään kuormaan, saadaan aikaiseksi sähkövirta. Koska muodostunut sähkövirta on kuitenkin tasavirtaa, joka ei sellaisenaan sovellu käytettäväksi, täytyy tasavirta siis vielä muuttaa vaihtovirraksi.

2.1.1 Piikennon ja ohutkalvokennon ominaisuuksia

Alaluvussa 2.1 käsiteltyä pn-liitosta käytetään muun muassa aurinkokennoissa. Useasta kennosta muodostettua kokonaisuutta kutsutaan aurinkopaneeliksi. Tunnetuimmat teknologiat ovat yksi- ja monikiteiset piikennot. Fraunhofer ISE:n raportin [3] mukaan kaikista vuonna 2019 tehdyistä aurinkokennoista noin 95 % olikin kiteisiä piikennoja. Vaikka kiteisten piikennojen prosenttiosuus vaihtelee vuosittain, on niiden osuus vuosittaisesta aurinkokennojen tuotannosta pysynyt yli 80 %:n viimeisen 25 vuoden ajan. Jäljelle jäävä prosenttiosuus koostuu lähinnä ohutkalvoaurinkokennoista. Vaikka maailmanmarkkinoita hallitsevatkin kiteiset piikennot sekä ohutkalvokennot, eivät ne ole ainoat aurinkokennoteknologiat. Nousevia teknologioita ovat muun muassa orgaaniset kennot sekä polymeeri-, perovskiitti- ja kvanttipistekennot [4]. Näitä teknologioita ei kuitenkaan tarkastella tässä työssä, sillä ne ovat vielä kehitysvaiheessa ja niiden saatavuus yksityiseen käyttöön on hankalaa. Tässä alaluvussa tarkastellaan kiteisten piikennojen sekä ohutkalvokennojen ominaisuuksia.

Sähköntuotannossa yksi tärkeistä ominaisuuksista on laitteen hyötysuhde, joka on kaupallisilla aurinkokennoilla ja -paneeleilla suhteellisen heikko. Kaupallisella puolella kiteisillä piikennoilla toteutetut aurinkopaneelit saavuttavat noin 18–23 %:n hyötysuhteen ja ohutkalvoteknologialla toteutetut noin 15–18 %:n hyötysuhteen [3, s. 29]. Ohutkalvokennot ovat nimensä mukaan hyvin ohuita, muutamista nanometreistä kymmeniin mikrometreihin. Lisäksi ohutkalvokennot ovat joustavia ja ne ovat kevyempiä kuin kiteiset piikennot. [3] Kiteiset piikennot puolestaan ovat noin 180 µm paksuja sekä jäykkiä [3, s. 32]. Ohutkalvokennoja ja -paneeleja voidaan siis käyttää monipuolisemmin hyödyntämällä niiden joustavuutta ja keveyttä.

National Renewable Energy Laboratoryn tutkimuksen [5] mukaan 78 % tutkimuksen kiteisistä piikennopaneeleista saavutti alle 1 %:n vuosittaisen suorituskyvyn heikkenemisen. Jos hyvänä suorituskykynä pidetään 80 %:a alkuperäisestä tehosta, voitaisiin olettaa kiteisen piikennopaneelin käyttöiäksi vähintään 20 vuotta. Ohutkalvopaneelien vuosittainen heikkeneminen oli lähempänä 1 %:a kuin piikennoilla, joten ohutkalvopaneelien käyttöikä ei ole yhtä pitkä. Tutkimuksessa oli mukana ennen 2000-lukua valmistettuja paneeleita, ja tutkimuksen aikana huomattiin selkeää kehitystä molemmissa teknologioissa. Tutkimus päättyi vuonna 2014, joten voidaan olettaa, että nykyaikaisten aurinkopaneelien käyttöikä on pidempi kuin 20 vuotta.

2.1.2 Aurinkokennon käytettävyys

Tämän alaluvun tarkoituksena on tutkia, miten aurinkoenergia sopii sähköntuottamiseen kesämökillä käytettävyyden näkökulmasta. Alaluvuissa 2.1 ja 2.1.1 tarkasteltiin sähköntuotantoa valosähköisen ilmiön avulla eli aurinkopaneeleilla. Käytettävyyteen vaikuttaa aurinkoenergiaa hyödyntäessä esimerkiksi kesämökin maantieteellinen sijainti, maaston muodot ja metsäisyys. Etelä-Suomessa aurinko-olosuhteet vastaavat Saksan olosuhteita mutta pohjoisessa Suomessa olosuhteet aurinkoenergian hyödyntämiseen ovat jo heikommat. Eteläisen Suomen säteilymäärä on noin 1100–1200 kWh/m^2/a ja Pohjois-Suomessa noin 900–1000 kWh/m^2/a. [6]

Aurinkopaneelien käytettävyys heikkenee, jos ne joudutaan asentamaan varjoiseen paikkaan, esimerkiksi runsaan puuston takia. Olosuhteiden ollessa hyvät, on paneelien käytettävyys korkea. Aurinkopaneelit voidaan asentaa rakennuksen katolle, jolloin ne eivät vie ylimääräistä asuintilaa. Myös muut komponentit, joita tarvitaan vaihtosähkön tuottamiseen aurinkopaneeleilla, esimerkiksi invertteri, ovat pienikokoisia. Lisäksi aurinkopaneelien saatavuus on Suomessa korkealla tasolla ja vaihtoehtoja on useita. Käytettävyyden astetta lisää myös helppokäyttöisyys ja huoltotarpeen vähyys, korkeintaan paneeleiden pinnat täytyy puhdistaa tarvittaessa. Lisäksi paneelit ovat äänettömiä eikä niissä ole liikkuvia osia, joista voisi koitua meluhaittoja.

Aurinkopaneeleiden käytettävyyttä heikentää kuitenkin se, että ne eivät tuota sähköä ympäri vuorokauden. Joko paneelit tarvitsevat akuston tai toisen energianlähteen rinnalle. Akusto lisää kustannuksia ja huollon määrää, sillä akkujen käyttöikä ei vastaa paneelien käyttöikää. Myös rinnalla oleva energianlähde lisää kustannuksia sekä järjestelmän kompleksisuutta.

Aiemmin mainittiin, että eteläisen Suomen säteilymäärä on noin 1100–1200 kWh/m^2/a. Tämä on kuitenkin koko vuoden säteilymäärä ja kesämökki on pääosin kesäkäytössä. Hämeenlinna sijaitsee lähellä työssä tarkasteltavaa kesäasuntoa, joten käytetään Hämeenlinnan tilastotietoja säteilymäärästä. Vuosien 2005–2016 aikana säteilymäärä toukokuusta syyskuuhun on ollut keskimääräisesti noin 640 kWh/m^2 [6]. Säteilymäärä on laskettu käyttämällä GHI-arvoja eli säteilymäärää, jonka pinta vastaanottaa ollessaan vaakatasossa. Näitä arvoja käytetään, koska oletetaan aurinkopaneelit liikkumattomiksi. Esimerkiksi jos käytettäisiin optimaalisen kulman arvoja, olisi säteilymäärä suurempi kuin paneelien vastaanottama.

Luvussa 2.1.1 kerrottiin piikennopohjaisten aurinkopaneelien saavuttavan 18–23 %:n hyötysuhteen. Lasketaan tarvittava paneelipinta-ala käyttämällä hyötysuhteen keskiarvoa sekä Hämeenlinnan keskimääräistä säteilymäärää toukokuusta syyskuuhun.

Sähköntarpeen ollessa 2000 kWh, hyötysuhteen 20,5 % ja säteilymäärän 640 kWh/m^2, saadaan tarvittavaksi paneelipinta-alaksi noin 15,25 m^2. Pinta-ala saadaan selville, kun kerrotaan säteilymäärä hyötysuhteella, jolloin saadaan selville energia, joka säteilystä saadaan hyödynnettyä. Seuraavaksi sähköntarve jaetaan saatavalla energialla, jolloin saadaan pinta-ala, joka kattaa tarpeen. Ottaen huomioon, että paneelista koko pinta-ala ei ole sähkötehoa tuottavaa kennoa, on todellinen paneelien pinta-ala hieman suurempi kuin 15,25 m^2. Hukkaan menevä pinta-ala on kuitenkin pieni, eikä vaikuta suuresti käytettävyyteen.

Aiemman kappaleen laskussa aurinkopaneeli oletettiin liikkumattomaksi. On kuitenkin olemassa myös seurantaa hyödyntäviä aurinkopaneeleja ja esimerkiksi Suomen markkinoilla myydään kaksiakselista seurantaa hyödyntäviä paneeleja [7]. Kun aiemman kappaleen lasku lasketaan optimaalisen kulman säteilymäärällä 697 kWh/m^2, saadaan pinta-alaksi noin 14 m^2. Suomessa auringon seurannasta saatava hyöty jää siis pieneksi.

2.2 Aurinkoenergiasta lämpöenergiaa

Auringosta saatava energia voidaan muuttaa lämpöenergiaksi ja hyödyntää suoraan, esimerkiksi käyttöveden lämmityksessä. Vaihtoehtoisesti lämpöenergian voi edelleen muuttaa sähköenergiaksi.

Toisin kuin valosähköiseen ilmiöön perustuvassa sähköntuotannossa, ei säteilyn energiaa voida muuttaa suoraan sähköenergiaksi, vaan se täytyy muuttaa ensin lämpöenergiaksi. Sähköntuotanto tällä menetelmällä onkin lähempänä perinteistä sähköntuotantomuotoa, kuten hiilivoima, sillä lämpöenergian muuttaminen sähköenergiaksi vaatii turbiinin ja generaattorin käyttöä. [1, s. 183]

2.2.1 Lämpöenergiaan perustuvia sovelluksia

Aurinkoenergian sovellukset, jotka tuottavat sähköä lämpöenergian avulla, voidaan jakaa esimerkiksi yksi- tai kaksiakselista seurantaa käyttäviksi. Lisäksi on olemassa matalan lämpötilan sovelluksia, mutta niitä käytetään pääosin veden lämmityksessä. [8, s. 19] Kuten luvussa 2.1.2 mainittiin, myös seurantaa käyttäviä aurinkopaneeleita on olemassa. Tässä luvussa tarkastellaan kuitenkin vain lämpöenergiaa hyödyntäviä sovelluksia.

Yksiakselisen seurannan systeemissä käytetään esimerkiksi peiliä, joka on kaareva yhden akselin suhteen. Peili heijastaa auringon säteet vastaanottimeen ja vastaanottimena toimii esimerkiksi yksittäinen putki, joka sisältää lämpöä johtavaa nestettä. Vastaanotin voi koostua myös useammasta putkesta. Koska peili on kaareva

yhtä akselia pitkin, heijastuvat rinnakkaiset auringon säteet akselin suuntaisessa suorassa linjassa. Säteet voidaan hyödyntää tehokkaasti, sijoittamalla vastaanotinputki kohtaan, johon säteet kohdistuvat. [8, s. 22] Auringon säteiden tulokulma kuitenkin vaikuttaa kohtaan, johon heijastuneet säteet kohdistuvat. Tämän takia peilit seuraavat auringon liikettä yhtä akselia pitkin, esimerkiksi pohjois-etelä suunnassa. [9, s. 74–76] On olemassa myös muita yksiakselisia järjestelmiä, mutta nekin perustuvat auringon seuraamiseen yhtä akselia pitkin [8, s.22].

Myös kaksiakselista seurantaa käyttävät järjestelmät perustuvat samaan perusperiaatteeseen auringon seuraamisesta ja säteiden kohdistamisesta vastaanottimeen. Toteutus on erilainen kuin yksiakselisissa järjestelmissä, mutta taustalla on sama idea auringon energian muuttamisesta lämpöenergiaksi. [8, s. 23–24] Esimerkiksi on olemassa kaksiakselinen järjestelmä, jossa maassa olevilla peileillä heijastetaan auringon säteet yhteen korkeaan pylvääseen. Säteet lämmittävät pylväässä olevan nesteen, esimerkiksi suolaliuoksen, usean sadan asteen lämpötilaan näin höyrystäen sen. Kuumaa höyryä käytetään edelleen turbiinin pyörittämisessä. [8, s. 24–25] [10, s. 53–54]

Auringon energia muutettuna lämpöenergiaksi on myös mahdollista hyödyntää suoraan. Auringon energialla voidaan esimerkiksi lämmittää käyttövettä aurinkokeräinten avulla. Aurinkokeräimen sisällä on säteiden energian absorboiva levy, joka on kosketuksissa lämmitettävän veden kanssa. Aurinkokeräimessä on eristysmateriaalia takaosassa ja reunoilla, mikä pienentää lämpöhäviöitä. Lisäksi keräimen etuosa on lasia, joka päästää säteet lävitseen absorboivalle levylle. Myös lasi pienentää lämpöhäviöitä ja toimii kasvihuoneen lasien tavoin. [1, s. 156]

2.2.2 Lämpöenergiaan perustuvien sovelluksien käytettävyys

Lämpöenergiaan perustuvat sovellukset, joilla tuotetaan sähköä eivät sovi yksityiseen käyttöön Suomessa. Yksi- ja kaksiakselista seurantaa käyttävät järjestelmät ovat suurikokoisia eikä niitä myydä yksityiskäyttöön. Ne myös sopivat paremmin sähkön tuotantoon teollisessa mittakaavassa. Lisäksi kyseiset järjestelmät sopivat paremmin maihin, jotka saavat vuodessa suuremman määrän auringon säteilymäärästä. [11]

Aurinkokeräimen käyttö, esimerkiksi hyötyveden lämmityksessä, puolestaan on mahdollista. Keräimiä on saatavilla yksityiseen käyttöön eivätkä ne vie enempää asuintilaa kuin aurinkopaneelitkaan. Tarkastellaan yhden markkinoilta löytyvän aurinkokeräimen energiantuottoa. Valmistaja lupaa, että keräin tuottaa vähintään 525 kWh/m^2/a. Kyseisen energiamäärän tuotanto-olosuhteista ei kerrota. Keräimen

hyötysuhdetta ei voi laskea, koska se vaihtelee ilman lämpötilan ja keräimen sisäisen nesteen lämpötilaerotuksen funktiona. [12] Lasketaan kuinka paljon vettä ilmoitetulla 525 kWh:lla voitaisiin lämmittää. Lämmitettävän veden määrä voidaan laskea veden ominaislämpökapasiteetista, jonka kaava on

$$c = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T}. \tag{1}$$

Kaavassa *m* on veden massa, ΔQ lämpömäärän muutos, *c* ominaislämpökapasiteetti ja ΔT lämpötilan muutos. [13, s. 562–563] Lämpömäärä Q voidaan muuttaa muotoon

$$Q = P\Delta t, \tag{2}$$

koska 1 J vastaa samaa energia määrää kuin 1 Ws [13, s.193]. Muuttamalla wattisekunnit wattitunneiksi saadaan muunnoskaava

$$1\ \mathrm{Wh} = 3{,}6\ \mathrm{kJ}. \tag{3}$$

Edelleen muuttamalla wattitunnit kilowattitunneiksi saadaan muunnoskaava muotoon

$$1\ \mathrm{kWh} = 3{,}6\ \mathrm{MJ}. \tag{4}$$

Yhdistämällä kaavat 1, 2 ja ratkaisemalla massan, saadaan

$$m = \frac{P\Delta t}{c\Delta T}. \tag{5}$$

Kaavalla 5 laskettuna saadaan, että 525 kWh:lla voidaan lämmittää noin 3132 litraa vettä 40 asteella. Tulos on kuitenkin vain suuntaa antava, sillä todellista energiantuottoa ei voida tietää.

3. TUULIENERGIA

Tuulen energia voidaan muuttaa sähköenergiaksi tuulivoimaloilla. Toisaalta tuulivoimaloita voidaan käyttää myös esimerkiksi veden pumppaamiseen. Tässä työssä käsitellään kuitenkin vain sähköntuotantoa tuulivoimalla.

Sähköntuotanto tuulivoimalalla perustuu siihen, että ilmavirtaus kohdistaa roottorin lapoihin voiman, joka saa roottorin pyörimään. Roottoriin on kiinnitetty akseli, joka on joko suoraan tai vaihdelaatikon kautta yhteydessä generaattoriin. [14, s. 40–45] Tuulivoimalat voidaan jaotella eri tavoin. Tässä työssä ne on jaettu muuttuva- ja vakionopeuksisiin tuulivoimaloihin.

3.1 Vakionopeuksiset tuulivoimalat

Vakionopeuksissa tuulivoimaloissa voimalan roottori pyörii lähes vakionopeudella ja sähkö tuotetaan epätahtigeneraattorilla. Tarkastellaan ensin epätahtikoneen toimintaperiaatetta. Epätahtikoneessa roottorikäämitykset ovat oikosuljetut ja staattorikäämeihin syötetään vaihtovirtaa, yleensä sähköverkosta. Staattorikäämitykseen syötetty vaihtovirta aiheuttaa ajan suhteen muuttuvan magneettikentän, jonka roottorikäämitys kokee. Staattorikäämityksen aiheuttama magneettikenttä on pyörivä. Koska roottorikäämitys on oikosuljettu ja se kokee muuttuvan magneettikentän, indusoituu siihen vaihtojännite ja -virta. [15, s. 66–68] [16, s. 44–45]

Staattori- ja roottorikäämityksen välinen magneettinen vuorovaikutus aikaansaa roottorin pyörimisliikkeen. Staattorikäämityksen napapari ja virran taajuus määräävät tietyn tahtinopeuden. Roottori kuitenkin pyörii hieman tätä tahtinopeutta jäljessä, koska roottorin pyöriessä staattorin määräämällä tahtinopeudella, se ei koe muuttuvaa magneettikenttää. Näin ollen vääntömomentti syntyy vain, jos roottori on jättämän verran jäljessä tahtinopeudesta. Nyt epätahtikone on moottorikäytössä ja jättämä on positiivinen. Kun roottori pyörii ulkoisen voiman seurauksena nopeammin kuin tahtinopeus, alkaa epätahtikone syöttää verkkoon sähköä. Nyt epätahtikone on generaattorikäytössä ja jättämä on negatiivinen. [15, s. 66–68] [16, s. 44–45]

Vakionopeuksissa tuulivoimaloissa voimalan roottori on yhdistetty vaihteiston välityksellä epätahtigeneraattoriin, joka on yhdistetty muuntajan välityksellä sähköverkkoon. Vaihteisto tarvitaan, koska roottorin pyörimisnopeus on hidas, luokkaa 20 rpm. Generaattorin tahtinopeus puolestaan on napaparista riippuen yleensä 3000 rpm tai

1500 rpm 50 Hz:n verkossa. Kun roottorin pyörimisnopeus ja vaihteisto mitoitetaan oikein, tuottaa generaattori aina verkon kanssa samassa taajuudessa olevaa sähköä. [16, s. 41–42]

3.2 Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat

Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala voidaan toteuttaa epätahtigeneraattorilla tai tahtigeneraattorilla. Myös vakionopeuksinen voidaan toteuttaa molemmilla generaattorityypeillä, mutta epätahtigeneraattori sopii paremmin tarkoitukseen. Muuttuvanopeuksinen voimala voi olla rajoitetusti tai aidosti muuttuvanopeuksinen. Rajoitetusti muuttuvanopeuksisissa käytetään epätahtigeneraattoreita ja aidosti muuttuvanopeuksisissa yleensä tahtigeneraattoria. [14, s. 65–69]

Kaksoissyötetyn epätahtigeneraattorin tuulivoimalassa staattorikäämitys on kytketty suoraan sähköverkkoon. Lisäksi roottorikäämitys on yhdistetty suuntaajien kautta sähköverkkoon. Staattorikäämityksen virta otetaan sähköverkosta kuten luvussa 3.1 käsiteltiin, mutta roottorikäämitykseen indusoidaan vaihtojännite ja edelleen vaihtovirta suuntaajan avulla. Nyt jättämää voidaan kasvattaa ja siitä seuraava teholisäys voidaan siirtää sähköverkkoon suuntaajien välityksellä. [15, s. 68–69] [17, s. 73] Tällä tavalla voidaan saavuttaa noin ±30 %:n vaihteluväli pyörimisnopeuteen staattorin määrittämään tahtinopeuteen verrattuna [16, s. 45]. Roottori voi siis pyöriä myös hitaammin kuin tahtinopeus, jolloin suuntaajat syöttävät roottorikäämitykseen tehoa. Myös tässä tapauksessa staattorikäämitys syöttää verkkoon sähkötehoa suuntaajakäytön mitoituksen mukaan. Koska pyörimisnopeuden vaihteluväli on rajoitettu, on kyseessä rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. [15, s. 68–69]

Ennen kuin tarkastellaan aidosti muuttuvanopeuksista tuulivoimalaa, perehdytään tahtigeneraattorin toimintaperiaatteeseen. Tahtigeneraattorissa magnetoitua roottoria pyöritetään staattorin sisällä, jolloin staattoriin indusoituu jännite. Roottori voidaan magnetoida esimerkiksi syöttämällä tasavirtaa sen magnetointikäämitykseen. Vaihtoehtoisesti roottorissa voidaan käyttää myös kestomagneetteja. [14, s. 67–70] [15, s. 69–70]

Tasavirtaa käytettäessä virta voidaan johtaa magnetointikäämeihin esimerkiksi hiiliharjoilla tai liukurenkailla. Koska magneettikenttä muodostetaan tasavirralla tai kestomagneeteilla, ei se vaihtele ajan mukaan. Roottoria pyöritettäessä staattorin ankkurikäämitys kuitenkin kokee muuttuvan magneettikentän. Tämä johtuu siitä, että magneettikenttä luonnollisesti pyörii roottorin mukana. Staattorin käämitys on kytketty

suoraan sähköverkkoon, joten verkon taajuus ja generaattorin napapari määräävät roottorin pyörimisnopeuden. [15, s. 69–70]

Aidosti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan voi toteuttaa epätahtigeneraattorilla mutta yleensä käytetään tahtigeneraattoria. On myös mahdollista toteuttaa aidosti muuttuvanopeuksinen voimala vaihteistolla tai ilman eli suoravetoisena. [15, s. 69–70] [17, s. 78] Tarkastellaan esimerkkinä kuitenkin suoravetoisia voimaloita, sillä ne esiintyvät kirjallisuudessa useammin kuin vaihteelliset. Suoravetoisissa voimaloissa generaattorin roottori ja voimalan roottori pyörivät samalla nopeudella. Aiemmin todettiin, että suurilla voimaloilla roottorin pyörimisnopeus on hidas. Tämän takia generaattorin roottori pyörii hitaasti, mistä seuraa staattorin suuri koko suoravetoisissa voimaloissa [14, s. 67]. Aidosti muuttuvanopeuksisen voimalan mahdollistaa täystehoinen suuntaajakäyttö. Kaikki generaattorin tuottama teho muutetaan ensin vaihtosähköstä tasasähköksi ja takaisin vaihtosähköksi, joka voidaan syöttää sähköverkkoon. Kun suuntaajat on mitoitettu generaattorin nimellisteholle, voidaan sähköä tuottaa verkkoon laajalla roottorin pyörimisnopeuden vaihteluvälillä. [14, s. 67–68] [15, s. 69–70] [17, s. 78]

Tähän asti on tarkasteltu suurien tuulivoimaloiden toimintaperiaatteita ja teknologioita. Vaikka pienet yksityiseen käyttöön suunnitellut tuulivoimalat eroavat suurista, käyttävät ne hyödyksi samoja periaatteita ja teknologioita. Pienten tuulivoimaloiden määritelmä vaihtelee lähteestä riippuen. [16, s. 67] Tässä työssä pienellä voimalalla tarkoitetaan alle 100 kW voimalaa. Suurin osa pienistä tuulivoimaloista on vaaka-akselisia ja kolmilapaisia niin kuin suuretkin. Myös yksityiskäyttöön suunnitellut voimalat voivat olla suoravetoisia tai vaihteistollisia. Teollisissa tuulivoimaloissa muutamat generaattoriteknologiat hallitsevat markkinoita, kun taas pienissä voimaloissa generaattorityypit vaihtelevat laajasti. Yleisimmät generaattoriteknologiat pienillä voimaloilla ovat epätahtigeneraattorit ja kestomagneeteilla toteutettu tasavirtageneraattori eli PMDC-generaattori (Permanent magnet direct current). [16, s. 69–72] Epätahtigeneraattoreita käytetään yleensä yli 5 kW voimaloissa ja kuten luvussa 3.1 todettiin, sen staattori yhdistetään sähköverkkoon. Koska staattori yhdistetään verkkoon, ei epätahtigeneraattorilla toteutettu voimala sovi off-grid sijainteihin. Tahtigeneraattoreita ei käytetä yleensä pienissä voimaloissa. [18, s. 57–60]

PMDC-generaattori toimii kuten perinteinen tasavirtageneraattori, erona toimii staattorin magnetoinnin toteutus kestomagneeteilla magnetointikäämityksen sijaan. PMDC-generaattorin staattorissa on kestomagneetteja, jotka luovat paikallaan pysyvän magneettikentän. Roottorissa puolestaan on käämitys, johon virta indusoituu sen pyöriessä. Roottorin käämityksen vyyhdenpäät on kytketty kommutaattorin liuskoihin.

Roottorin pyöriessä vyyhdenpäät kytkeytyvät vuorotellen hiiliharjoihin kommutaattorin avulla. Toisin sanoen roottorikäämitykseen indusoituu vaihtojännite ja edelleen virta, jonka kommutaattori tasasuuntaa. [19, s. 61–68]

3.3 Tuulienergian käytettävyys yksityiskäytössä

Tuulienergialla tuotetaan sähköä suuressa mittakaavassa mutta myös pienempi tuotanto on mahdollista. Käytettävyyteen vaikuttaa sijainnin tuuliolosuhteet sekä voimalan koko ja sähköntuotantokyky. Lisäksi käytettävyyteen vaikuttaa oleellisesti laitteiston saatavuus.

Suomen tuuliatlaksesta [20] nähdään, että kesämökin sijainnissa toukokuusta syyskuuhun keskimääräinen tuulennopeus on 50 metrin korkeudella 4,8 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Yksityiskäyttöön Suomessa myytävien voimaloiden tornit ovat kuitenkin yleensä 10 metrin luokkaa. Toisaalta tornin kokoa voi tarvittaessa lisätä mutta tämä kuitenkin heikentää käytettävyyttä. Suurempi torni vie enemmän asuintilaa, aiheuttaa suuremman näköhaitan ja saattaa vaatia erillisiä lupahakemuksia.

Tuuliatlaksesta nähdään, että laskeuduttaessa 100 metristä 50 metriin, laskee keskimääräinen tuulennopeus noin (0,7–0,8) $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ [20]. Oletuksella, että tuulennopeus laskee 10 metriin laskeuduttaessa saman verran, saataisiin keskimääräiseksi tuulennopeudeksi 10 m korkeudella noin (4,0–4,1) $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Tuulivoimaloiden teho ilmoitetaan nimellisessä tuulennopeudessa. Kun tarkastellaan kahta markkinoilta löytyvää 1,5 kW:n ja 400 W:n voimalaa, tuottavat ne nimellistehollaan sähköä 11 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ tuulennopeudella. Noin 4 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ tuulennopeudella suurempi voimala tuottaa noin 200 W ja pienempi noin 50 W laitteiden teknisten tietojen mukaan. Suuremman voimalan tuotelehti on 3,5 kW:n yksikölle mutta valmistajan mukaan laite toimii samoin 7 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ tuulennopeuksiin asti. [21] [22] Kun keskimääräinen tuuli on noin 4 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$, tuottaa suurempi voimala päivässä 4,8 kWh sähköenergiaa ja pienempi 1,2 kWh. Suuremman voimalan päivätuotolla kuluisi noin 417 päivää 2000 kWh:n tarpeen täyttämiseen. Pienemmällä voimalalla kuluisi noin 1667 päivää. Voidaan siis todeta, että pienempi voimala ei pysty täyttämään mökin sähkökulutusta. Voimaloita tarvittaisiin kymmeniä ennen kuin päästäisiin järkevään tuotantoaikaan. 1,5 kW:n voimaloita tarvittaisiin kolme, että tarvittava sähköenergia tuotettaisiin noin 139 päivässä. Voimaloiden määräksi valittiin kolme, koska silloin sähkönkulutus täytetään alle viidessä kuukaudessa. Tällöin ajanjakso on sama kuin aurinkoenergian tarkastelussa. Kolme tuulivoimalaa aiheuttaa kuitenkin jo suhteellisen suuren näköhaitan.

4. MAALÄMPÖ

Maalämpöä ei tule sekoittaa geotermiseen energiaan, sillä ne eroavat toisistaan merkittävästi. Geotermisellä energialla tarkoitetaan maansisäistä energiaa, joka johtuu syvältä maapallon kuoren alta. Sitä voidaan hyödyntää syvien porausreikien avulla tai paikoissa, joissa lämpöenergia johtuu maanpinnalle asti. Maalämmössä puolestaan hyödynnetään matalamman entalpian lämpöä, joka esiintyy lähempänä maanpintaa. Maalämmöstäkin osa voi olla seurausta geotermisestä energiasta, mutta suurin osa johtuu auringon energian absorboinnista ja varastoinnista. [23, s. 1–2, 40–41]

Maanpinnan lämpötila vaihtelee vuoden aikana kymmeniä asteita. Kesällä lämmeten auringon säteilyn seurauksena ja talvella viilentyen. Lämpötilan muutokset eivät kuitenkaan yllä syvälle maan pinnan alle. Esimerkiksi Ruotsissa tutkittiin lämpötilan muutosta 6 metrin syvyydessä, jossa vuodenaikaisen lämpötilanvaihtelun amplitudi oli noin 1 °C verran. Koska maan lämpötila pysyy talvella lämpimämpänä ja kesällä viileämpänä kuin ilma, voidaan maalämpöä hyödyntää lämmittämiseen ja viilentämiseen. [23, s. 51–52] Kun tässä työssä käsitellään maan lämpötilaa, tarkoitetaan maanpinnan alla (subsurface) olevan maan lämpötilaa.

Kun maankuoreen varastoitunutta energiaa eli maalämpöä hyödynnetään, tulee huolehtia, että systeemi kestää tarvittavan rasitusmäärän. Esimerkiksi Kaliforniassa geysirien kuumaa vesihöyryä valjastettiin ihmisen käyttöön, joka johti höyrynpaineen laskuun ja veden puutteeseen geysirien altaissa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi maa-alueen, jota maalämpöjärjestelmä käyttää energianlähteenä ja energianieluna, tulee olla tarpeeksi suuri. Sen tulee pystyä käsittelemään energian kasvu ja lasku ilman liikarasitusta. [24, s. 66]

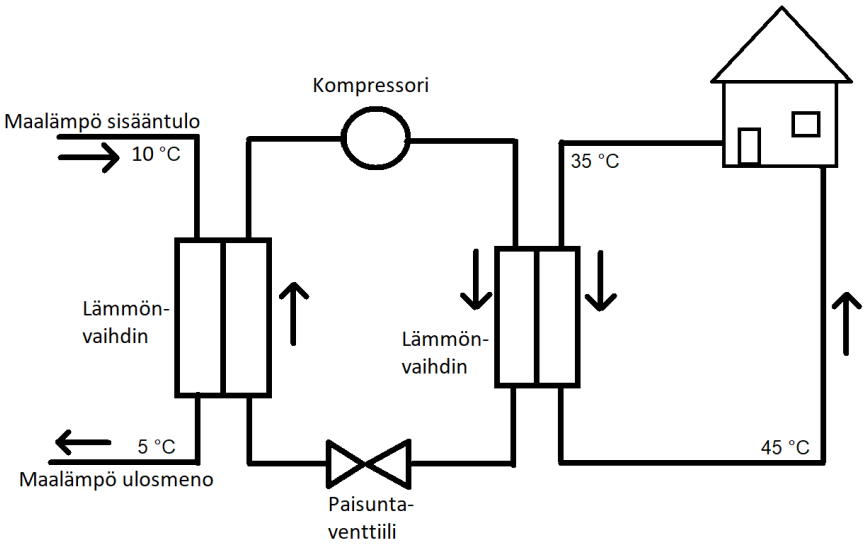
4.1 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Maalämpö on harhaanjohtava termi, sillä sitoutunut energia voidaan hyödyntää myös vedestä. Maalämpöjärjestelmät ottavat energiaa esimerkiksi pohjavedestä, pintavedestä sekä maankuoresta. Järjestelmät voidaan jakaa avoimiin ja suljettuihin systeemeihin. [25, s. 1]

Skandinaviassa maan lämpötila on noin 4–7 °C, joten voidaan olettaa Suomen maan lämpötila samaksi. Jos asuintila halutaan lämmittää 7 °C:lla vedellä, ei se ole mahdollista ilman lämpöpumppua. Jokaiselle tuttu esimerkki lämpöpumpusta on jääkaappi, se ottaa lämpöä sisällöstään ja pumppaa sitä ulkopuolelle. Näin viilentäen jääkaapin sisäpuolta

ja lämmittäen ulkopuolta. Maalämpöpumput toimivat samalla toimintaperiaatteella. [23, 85–87]

Pohjavettä hyödyntävää maalämpöpumppua voidaan havainnollistaa yksinkertaisella rakennekuvalla, joka koostuu silmukoista. Ensimmäinen silmukka on osittain talon sisällä ja toinen silmukka kokonaan ulkona. Ulkona oleva silmukka on kosketuksissa myös kolmannen puolisilmukan kanssa. [23, 91–93] Kuvassa 1 on esitetty kyseinen rakenne.



Kuva 1 Rakennekuva pohjavettä hyödyntävästä maalämpöjärjestelmästä [23, s. 93]

Kuvassa lämpötilat ovat esimerkillisiä arvoja putkistossa nuolien suuntaan kulkevalle aineelle. Puolisilmukalla on sisääntulo ja ulosmeno, sisääntulo ottaa lämpöä pohjavedestä. Otettu lämpö menee lämmönvaihtimeen, joka on yhteydessä kokonaan ulkona olevaan silmukkaan. Lämmönvaihtimessa lämpöä siirtyy toisessa silmukassa kiertävään nesteeseen, joka kulkeutuu seuraavaksi kompressoriin. Kompressori muuttaa nesteen kaasuksi, jolloin aineen lämpötila nousee. Seuraavaksi kaasu menee silmukkaa pitkin toiseen lämmönvaihtimeen, joka on yhteydessä taloon kulkevaan silmukkaan. Lämpöä siirtyy talon silmukassa kulkevaan aineeseen. Kun aine on kiertänyt talon sisällä lämmittäen asuintilaa ja samalla viilentyen, palaa se taas lämmönvaihtimeen lämpenemään. Keskimmäisessä silmukassa viilentynyt kaasu kulkeutuu lämmönvaihtimen jälkeen paisuntaventtiiliin ja muuttuu takaisin nestemäiseksi. Seuraavaksi aine kulkeutuu ensimmäiseen lämmönvaihtimeen lämpenemään uudestaan. Lämmönvaihtimessa viilentynyt esimerkiksi pohjavesi ohjataan ulosmenoon.

Yllä tarkasteltiin maalämpöpumpun toimintaperiaatetta asuintilan lämmitykselle. Maalämpöpumpuilla on kuitenkin mahdollista myös viilentää asuintilaa, jolloin lämpöä

pumpataan rakennuksesta pois, esimerkiksi pohjaveteen [25, s. 1–2]. Käsitellään seuraavaksi erilaisia maalämpösysteemejä.

Kuvassa 1 esitettiin rakennekuvaesimerkki pohjavesisysteemistä mutta se ei ole ainoa mahdollinen rakenne. Perustoimintaperiaate pysyy kuitenkin samana kaikissa järjestelmissä. Yksi mahdollinen rakenne on pystysuuntainen porausreikä tai porausreiät. Reikä tai reiät muodostavat U-muotoisen putkiston, jota pitkin lämmönvaihtoon käytettävä neste kiertää. Kyseinen järjestelmä hyödyntää maanpinnan lämpöä. Porattavien reikien määrä ja syvyys riippuvat lämmityksen ja jäähdytyksen energiantarpeesta. [24, s. 139–140] Toisin kuin aiemmin käsitelty pohjavesisysteemi, porausreikiäjärjestelmä on suljettu. Toisin sanoen porausreiässä kiertävä neste ei pääse kosketuksiin maa-aineksen kanssa. Putkistossa kiertäessä neste joko luovuttaa tai vastaanottaa lämpöä, riippuen lämmitetäänkö vai jäähdytetäänkö asunota. Putkisto voidaan myös asentaa vaakatasoon, jolloin järjestelmän syvyys on pienempi pystysuuntaiseen verrattuna. Perustoimintaperiaate pysyy kuitenkin samana. [25, s. 3–4]

Pintavettä eli järviä, meriä tai jokia hyödyntävät systeemit voivat olla avoimia, suljettuja tai hybridejä avoimen ja suljetun väliltä. Kaikki systeemit hyödyntävät kuitenkin veteen sitoutunutta suurta lämpömäärää. Avoimessa systeemissä vettä voidaan pumpata esimerkiksi suoraan rakennukseen rakennettuun putkistoon. Näin järjestelmä ei tarvitse lämpöpumppuja. Tällaista järjestelmää käytetään yleensä viilentämiseen. Vaihtoehtoisesti lämpöpumppua voidaan käyttää, jolloin toimintaperiaate on sama kuin aiemmin käsitellyillä järjestelmillä. [24, s. 246–256]

4.2 Maalämmön käytettävyys yksityisessä energiantuotannossa

Suomen markkinoilta löytyy useita maalämpöjärjestelmiä, joten voidaan todeta, että saatavuus on hyvä. Teknologiana maalämpö soveltuu kesämökeille ja mitoittamalla järjestelmä oikein, saadaan katettua haluttu energiamäärä. Maalämpöjärjestelmä ei kuitenkaan tuota sähköä, vaan kuluttaa sitä. Tästä syystä maalämpöjärjestelmä ei sovi yksin kattamaan energiantarvetta.

Vaikka lämmitysenergiantarve voidaan kattaa maalämmöllä, ei se ole järkevä ratkaisu työssä tarkasteltavalle kesämökille. Jos kesäasunto olisi kokovuotisessa käytössä ja sähkönkulutus olisi suurempi, voisi maalämpö olla paras ratkaisu lämmitykseen ja viilentämiseen. Kuitenkin kun otetaan huomioon vuoden aikana hukkaan menevä lämmityspotentiaali, ei maalämpö ole järkevä ratkaisu työssä tarkasteltavalle kesämökille. Tästä syystä maalämpöä ei tarkastella enää luvussa 7 tai sen alaluvuissa.

5. POLTTOKENNO JA VETY

Polttokenno tuottaa sähköenergiaa suoraan polttoaineesta sähkökemiallisen reaktion seurauksena. Edellä mainittu on polttokennon toimintaperiaate tiivistettynä. Polttokenno tarvitsee toimiakseen polttoaineen lisäksi hapetinta. Koska polttokennot toimivat sähkökemiallisen reaktion avulla, vaikuttaa niiden toimintaa niin sähköiset kuin kemialliset seikat. [26, s. 1]

Ensimmäinen vetyä polttoaineena käyttävä polttokenno valmistettiin vuonna 1839. Polttokenno käytti happea hapettimena ja onnistui tuottamaan sähköä. Cambridgen yliopistossa tehtiin 50-luvulla tutkimus, jonka avulla kehitettiin toimiva 5 kW alkalipolttokenno. Tämä toimi käännekohtana polttokennoteknologian kehitykselle. Ensimmäinen polttokennovoimalaitos aloitti toimintansa helmikuussa 2001. [27, s. 1–2] Polttokenno on siis suhteellisen kauan sitten kehitetty teknologia sähkötekniikan mittakaavassa. Seuraavassa alaluvussa käsitellään polttokennon toimintaperiaatetta ja erityisesti vetyä polttoaineena.

5.1 Polttokennon toiminta ja vety polttoaineena

Luvussa 5 mainittiin, että polttokenno tarvitsee polttoainetta ja hapetinta tuottaakseen sähköä. Polttokenno tuottaakin sähköä jatkuvasti niin kauan, kun sille syötetään molempia aineita. Tässä suhteessa polttokenno eroaa toisesta yleisestä laitteesta, joka käyttää sähkökemiallista reaktiota hyödykseen, paristosta. Polttokennoon syötetään tarvittavat aineet ulkopuolelta, kun taas paristossa sähkökemiallisen reaktion lähtöaineet ovat systeemin sisällä. Kun reaktio loppuu, ei paristo tuota enää sähköä, eikä siihen voi syöttää lisää reaktioaineita. [26, s. 1]

Polttokennorakenteet eroavat keskenään mutta jokainen polttokenno sisältää seuraavat asiat: elektrolyytti, anodi, katodi, solujen sähköinen kiinnitys toisiinsa sekä tiivisteet, jotka pitävät kaasut erossa toisistaan. Jokainen polttokenno sisältää elektrolyytin mutta käytettävä aine vaihtelee. Elektrolyytin täytyy sisältää ioneja mutta se voi olla esimerkiksi nestemäinen tai kiinteä, esimerkiksi happo käy elektrolyytiksi. Polttokennon anodi ja katodi sisältävät katalyytin, joka nopeuttaa reaktiota. [28, s. 7–11]

Anodilla tapahtuu joko polttoaineen suora hapettuminen tai epäsuora hapettuminen. Katodilla tapahtuu hapen pelkistyminen. [26, s. 1] Reaktiot riippuvat esimerkiksi siitä, mitä elektrolyyttiä käytetään [28, s. 7]. Polttokennot jaetaankin yleensä käytetyn elektrolyytin perusteella. Polttokennotyyppejä ovat esimerkiksi: AFC (Alkaline fuel cell),

PEMFC (Proton-exchange membrane fuel cell) eli PEM-polttokenno (Polymer electrolyte membrane), PAFC (Phosphoric acid fue cell), MCFC (Molten carbonate fuel cell). AFC käyttää elektrolyyttinä alkalielektrolyyttiä, PEMFC käyttää polymeeristä kalvoa, PAFC fosforihappoa ja MCFC käyttää sulatettuja karbonaatteja. [29, s. 8–9]

Tarkastellaan esimerkkinä PEM-polttokennon toimintaperiaatetta ja rakennetta, koska PEM-polttokenno on hyvin tunnettu [28, s. 69]. Kuten aiemmin mainittiin PEM-polttokenno käyttää polymeeristä kalvoa elektrolyyttinä. Kalvo ei päästä elektroneja lävitseen, mutta toimii hyvänä johtimena vetyioneille eli protoneille. Tämä on tärkeä ominaisuus, sillä reaktion aikana anodilla syntyvät protonit kulkevat kalvon läpi katodille. Kun vetykaasu hajoaa protoneiksi anodilla, vapautuu kaksi elektronia. Koska elektrolyyttikalvo ei päästä elektroneja lävitseen, kulkeutuvat ne ulkoista johdinta pitkin katodille. Näin johtimeen syntyy virta reaktion seurauksena. Katodilla happi ja elektrolyytin läpi kulkeutuneet vetyionit muodostavat vesimolekyylejä reaktiotuloksena. [27, s. 4–6]

5.2 Vetypolttokennon käytettävyys yksityiskäytössä

Vetypolttokenno on houkutteleva energiantuotantomuoto, sillä sen lopputuotteet ovat sähkön lisäksi vesi ja käyttämättä jäänyt happi. Toisin sanoen energiantuotanto vetypolttokennolla olisi päästötöntä. Vetyä ei kuitenkaan esiinny luonnossa suoraan hyödynnettävässä muodossa. Vetyä voidaan tuottaa esimerkiksi veden elektrolyysillä tai reformoimalla hiilivetypolttoaineita, mistä syntyy päästöjä. [29, s. 10–13] Energiamuodon päästöttömyys riippuukin usein tarkastelun rajauksesta, esimerkiksi tuulienergia voidaan lukea päästöttömäksi. Toisaalta voimalan rakentamisesta aiheutuu päästöjä, jolloin energiantuotantoon kohdistuu epäsuoria päästöjä.

Vetypolttokennon suosio myös autojen tehonlähteenä on kasvussa, sillä sen hyötysuhde on paljon parempi kuin perinteisen polttomoottorin. Vetypolttokennojen houkuttelevuutta lisää myös niiden yksinkertaisuus, ne koostuvat toistuvista kerroksista, eivätkä sisällä liikkuvia osia. Lisäksi ne ovat modulaarisia. [29, s. 14–15] Yhtenä ongelmana vetypolttokennojen laajemmalle käytölle pidetään vetyinfrastruktuurin puuttumista [26, s. 356].

Markkinoilta löytyy useita vetykäyttöisiä polttokennoja aina 5 W:n tehoisesta yli 5 kW:n nimellistehoiseen polttokennoon. Suomen markkinoilla saatavuus on huono ja tarjolla on vain veneilyyn ja matkailuautoihin tarkoitettuja polttokennoja. Koska polttokennoja löytyy suurelta tehoväliltä, löytyy myös tarkasteltavan kesämökin energiantarpeen kattava

malli. Teknologian puolesta polttokenno sopii hyvin sähköntuottamiseen mökkiolosuhteissa.

Käytettävyyttä kuitenkin heikentää vedyn saatavuus ja jakeluinfrastruktuurin heikko tila. On myös olemassa vetygeneraattoreita, jotka tuottavat vetykaasua, esimerkiksi vedestä. Osa laitteista käyttää PEM-polttokennoja, joissa reaktio tapahtuu toiseen suuntaan kuin sähköä tuottavassa polttokennossa. [30] Nämä vetygeneraattorit ovat kuitenkin tarkoitettu laboratoriokäyttöön ja suurin osa tuottaa vain alle litran tai muutamia litroja vetykaasua minuutissa. Markkinoilla on myös vetygeneraattori, joka pystyy tuottamaan 10 litraa vetykaasua minuutissa [30]. Esimerkiksi markkinoilta löytyvä 2 kW:n vetypolttokenno kuluttaa hieman yli 20 litraa vetykaasua minuutissa [31]. Tämän takia vetygeneraattoreita tarvittaisiin vähintään kaksi, että päästäisiin edes lähelle nimellistä sähköntuotantoa.

Vetygeneraattorin teknisistä tiedoista nähdään, että se tarvitsee 5,8 kWh:n verran energiaa kuutiometriä vetykaasua kohden [30]. Voidaan siis todeta, että vetygeneraattori ei sovellu yhteistoimintaan vetypolttokennon kanssa ilman ulkoista sähköenergian lähdettä. Vedyn tuottaminen kuluttaa enemmän energiaa kuin polttokenno tuottaa, muuten systeemi olisi ikiliikkuja.

Yllä mainittujen seikkojen takia voidaan siis todeta, että vety ei sovellu energiantuotantoon työssä tarkasteltavalla kesämökillä. Tästä syystä polttokennoa ei tarkastella luvussa 7 tai sen alaluvuissa.

Luvussa 6.4 kuitenkin tarkastellaan biokaasulla toimivaa voimalaa, joka muuttaa biokaasun ensin vedyksi. Voimala käyttää vetyä PEM-polttokennon polttoaineena. Riippuen määrittelytavasta, kyseinen voimala voisi siis toimia esimerkkinä myös vetypolttokennosta. Voimalaa kuitenkin käsitellään bioenergian kanssa, koska se käyttää biokaasua alkuperäisenä polttoaineena.

6. BIOENERGIA

Bioenergia on hyvin monipuolinen energianlähde. Se voidaan muuttaa esimerkiksi polttoaineeksi, lämpö- sekä sähköenergiaksi. Bioenergia onkin ollut tärkeä energianlähde ihmiskunnalle pisimpään kaikista energianmuodoista. [32, s. 1]

Kasvit tuottavat biomassaa fotosynteesin avulla. Biomassaan sitoutunutta energiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi polttamalla biomassaa. Kehittyvissä maissa bioenergiaa hyödynnetään pääosin ruoanlaitossa, tilojen lämmityksessä ja valaistuksessa. Muissa maissa biomassasta tuotetaan lämmitys -ja sähköenergiaa esimerkiksi biojätettä polttamalla. Biokaasuja tuotetaan esimerkiksi biojätteestä anaerobisissa olosuhteissa ja nestemäisiä biopolttoaineita puolestaan esimerkiksi öljysiemenistä. [33]

6.1 Bioenergian tuottaminen ja hyödyntäminen palamisreaktiolla

Bioenergiaa on hyödynnetty polttamalla jo tuhansia vuosia. Yksinkertaisesti esitettynä, biomassaa poltettaessa siihen sitoutunut kemiallinen energia muuttuu lämpöenergiaksi, joka voidaan edelleen hyödyntää. Biomassan ominaispiirteet vaikuttavat prosesseihin, jolla siitä tuotetaan bioenergiaa. Kuivaan biomassaan on esimerkiksi sitoutunut huomattavasti pienempi määrä energiaa kilogrammaa kohden kuin hiileen. Kuivalla biomassalla arvo on 14–21 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$ ja hiilellä 23–28 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$. Koska kuivan biomassan energiasisältö on pienempi, vie se enemmän varastointitilaa kuin hiili, sillä biomassaa tarvitaan enemmän kattamaan sama energiamäärä. [32, s. 101–103]

Biomassasta voidaan tuottaa sähköenergiaa polttamalla. Esimerkiksi vesihöyryä voidaan tuottaa polttamalla biomassaa. Vesihöyry pyörittää höyryturbiinia ja edelleen generaattoria. Lisäksi polttamalla biomassaa luodaan lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi lämmityksessä tai ruoanlaitossa. [34, s. 388]

6.2 Biokaasun tuottaminen ja hyödyntäminen

Biopolttoaineet ovat neljänneksi suurin energianlähde öljyn, maakaasun ja hiilen jälkeen. Biopolttoaineista merkittävän osuuden muodostavat biokaasut. [32, s. 145] Biokaasua voidaan tuottaa esimerkiksi mädättämällä biojätettä. Esimerkiksi jatkuvan sekoituksen systeemiä käytetään mädätysprosessissa ja biokaasun tuotannossa. Systeemissä mädätinsäiliön sisältöjä eli substraatteja sekoitetaan jatkuvasti keskenään, jolloin aineiden konsentraatiot tasoittuvat. Substraatit ovat tässä kontekstissa lähtöaineina

käytettyä biomassaa, esimerkiksi biojätettä. Koska konsentraatiot tasoittuvat, laimentuvat eri substraattiaineet. Tämän takia systeemi on vähemmän herkkä myrkyllisyydelle. [34, s. 338–340]

Mädätyssysteemejä on monenlaisia, mutta perustoimintaperiaate pysyy samana. Substraatista saadaan biokemiallisenreaktion tuotteena biokaasuja, jotka edelleen kerätään ja säilötään. Biokaasuista noin 60 % on metaania, joka on merkittävin ja energiarikkain biokaasuista, joita prosessissa syntyy. Biokaasun tuotantosysteemejä on myös kotikäyttöön. Ne noudattavat samoja periaatteita kuin suuremmat teolliset vaihtoehdot. [34, s. 338–352]

Biokaasulla voidaan tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa esimerkiksi polttokennolla. Vaihtoehtoisesti biokaasua voi käyttää esimerkiksi ruoanlaitossa suoraan polttamalla biokaasua. Biokaasua käytetään myös ajoneuvojen polttoaineena. Biokaasua pidetään ympäristöystävällisempänä vaihtoehtona bensiini- ja dieselpolttomoottoreille, koska metaania polttavan moottorin päästöt ovat pienemmät. [35, s. 200]

6.3 Nestemäisen biopolttoaineen tuottaminen ja hyödyntäminen

Biomassasta voidaan tuottaa nestemäisiä biopolttoaineita, esimerkiksi etanolia ja biodieseliä [36, s. 6–7]. Yhdysvaltojen vuosittainen tuotantokapasiteetti on etanolille $(17378*10^6)\ \frac{\mathrm{gal}}{\mathrm{a}}$ eli $(65{,}783*10^9)\ \frac{\mathrm{l}}{\mathrm{a}}$ eli 65,783 miljardia litraa etanolia vuodessa [37]. Biopolttoaineita voidaan tuottaa eri lähtöaineista ja eri prosesseilla [36, s. 6–7]. Tarkastellaan esimerkkinä etanolin tuotantoa ja hyödyntämistä.

Etanolin raaka-aineena käytetään esimerkiksi selluloosaa, joka on yksi sokerin polymeereistä, tarkemmin yksi glukoosin polymeereistä. Jokainen elävä kasvi tuottaa selluloosaa, joten se on erinomainen raaka-aine kapasiteetin puolesta. Etanolia voidaan valmistaa myös tärkkelyksestä, jolloin käytetään esimerkiksi maissia. Suurin ero valmistusprosesseissa on alkuvaiheet. Valmistusprosessi koostuu viidestä päävaiheesta: esikäsittely, hydrolyysi, käymisreaktio, tislaus ja etanolin keräys. Ainoastaan esikäsittely ja hydrolyysi prosessit eroavat tärkkelyksen ja selluloosan käytön välillä. [36, s. 193–196]

Selluloosa sijaitsee kasvisolun soluseinässä. Esikäsittelyn tarkoitus on tehdä selluloosasta helpommin saavutettavaa entsyymeille, joita käytetään hydrolyysissä. Käsittelemättömässä kasvisolussa selluloosa on hemiselluloosan ja ligniinin ympäröimänä, jolloin entsyymit eivät pääse kontaktiin selluloosan kanssa. Esikäsittely voidaan toteuttaa esimerkiksi mikrobeilla, jotka hajottavat ligniiniä. Raaka-ainetta

voidaan myös käsitellä esimerkiksi laimealla hapolla, joka hajottaa hemiselluloosaa. Myös muita esikäsittelytapoja on olemassa. [34, s. 201–209]

Hydrolyysin tarkoitus on muuttaa selluloosa sokereihin, jotka sopivat käymisreaktioon. Hydrolyysi voidaan toteuttaa eri tavoilla, esimerkiksi happojen avulla. Entsyymit sopivat tarkoitukseen kuitenkin hyvin, sillä entsyymihydrolyysin tuloksena on korkea sokeripitoisuus ja kemikaaleja tarvitaan vähän. [34, s. 243]

Seuraavaksi hydrolyysistä saadut sokerit fermentoidaan eli sokereista tuotetaan käymisreaktion avulla alkoholia. Käymisreaktiosta saatu etanoli on noin 10–15 % vahvaa. Tislaamalla etanolin alkoholipitoisuus saadaan 93 % ja edelleen poistamalla vettä liuoksesta päästään yli 99 % alkoholipitoisuuteen. Etanolia voidaan tuottaa pienessä tai suuressa teollisessa mittakaavassa. [34, s. 250–252, 270–274] On kuitenkin huomioitava, että Suomessa alkoholilain mukaan vain käymisreaktiolla saa valmistaa alkoholia ilman valmistuslupaa [38].

Etanolin tunnetuimmat käyttötarkoitukset ovat alkoholijuomat. Lisäksi etanolia käytetään teollisuudessa liuottimena. Energian tuotannossa etanolia käytetään autojen polttoaineena. [39, s. 419] Suomessa myytävässä E10-bensiinissä on enintään 10 % etanolia [40].

6.4 Bioenergian käytettävyys yksityisessä energiantuotannossa

Bioenergian sovelluksilla pystytään tuottamaan sekä sähkö- että lämpöenergiaa teollisessa sekä pienemässä mittakaavassa. Bioenergiaa pystytäänkin käyttämään kesämökin energiantarpeen täyttämiseen. Tässä luvussa tarkastellaan eri sovelluksia ja niiden käytettävyyttä.

Polttamalla biomassaa voidaan tuottaa sähköenergiaa mutta sen käytettävyys on heikolla tasolla. Julkisia hakukoneita käyttämällä pienimmätkin voimalat tuottavat useita kymmeniä kilowatteja. Vaikka onkin mahdollista rakentaa itse voimala, joka käyttää polttoaineena biomassaa, vie se liikaa ajallisia ja energisiä kustannuksia. Esimerkiksi höyryturbiinia käyttävän voimalan rakennus onnistuu kotioloissakin mutta edellytyksenä on korkea osaamistaso aiheesta.

Biomassaa polttamalla sen sijaan voidaan tuottaa lämpöenergiaa. Esimerkiksi varaavalla takalla voidaan lämmittää kesämökki. Kesäkäytössä olevaan mökkiin varaava takka on kuitenkin ylimitoitettu. Esimerkiksi kamiina riittää nostamaan lämpötilan tarpeeksi korkealle, jonka jälkeen rakennuksen eristys pitää lämpötilan tarpeeksi

korkeana. Hämeenlinnan, joka on lähin mittauspiste tarkasteltavasta kesämökistä, keskilämpötila toukokuusta syyskuuhun on noin 13 °C. Kesäkuusta heinäkuuhun keskilämpötila on noin 15 °C. [41] Lisäksi tulee huomioida myös auringon säteilyn lämmitysvaikutus rakennuksen sisälämpötilassa. Biomassalla on siis mahdollista lämmittää asuintilat tarvittaessa. Lisäksi biomassalla on mahdollista lämmittää kiuas ja saunatilat. Biomassan polttamista on lämmityksen lisäksi mahdollista hyödyntää ruoanlaitossa, esimerkiksi puuliedellä. On olemassa varaavia puuhelloja, joilla voi myös lämmittää asuintiloja [42].

Biokaasua voidaan käyttää yksityiseen sähkön ja lämmön tuotantoon. Markkinoilta löytyy CHP-voimala, joka pystyy tuottamaan 5 kW:a sähkötehoa ja 7 kW:a lämmitystehoa [43]. Lämmitystehon voimala antaa kuumana vetenä eli sillä voi lämmittää esimerkiksi käyttöveden. Lämmitettävän veden määrä voidaan laskea veden ominaislämpökapasiteetista samalla tavalla kuin luvussa 2.2.2 eli kaavalla 5. Tulokseksi saadaan, että 7 kW:lla pystytään lämmittämään 40 asteella noin 150 litraa vettä tunnissa.

Nimellistehollaan toimiessaan voimala täyttää vuosikulutuksen 16,7 päivässä. Lisäksi voimalan sähköntuotantokapasiteettia voidaan säätää asteikolla 40–100 %, jolloin sähkönkulutus ja tuotanto on mahdollista saada kohtaamaan. Kyseinen voimala käyttää biokaasua vain lähtöaineena vetykaasulle, jota se käyttää itse energiantuotannossa. Voimala tuottaa sähkön PEM-polttokennolla, joita tarkasteltiin luvussa 5.1. [43]

Vuosittain tarvittavan biokaasun määrä saadaan laskettua vetykaasun energiasisällöstä ja voimalan hyötysuhteesta. Lisäksi tulee ottaa huomioon biokaasusta saadun vedyn määrä. Tuotesivuilla [43] ilmoitetaan kemiallinen reaktiokaava vedyn tuottamiselle biokaasusta

$$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O. \tag{6}$$

Reaktiokaavasta huomataan, että yhtä metaanimolekyyliä vastaan saadaan 3 vetymolekyyliä. Kertomalla vetykaasun energiasisältö voimalan hyötysuhteella saadaan selville, kuinka paljon energiaa vedystä hyödynnetään yhtä kiloa kohden. Kun vuosittainen energiantarve jaetaan vedystä saatavalla energialla, saadaan vuodessa tarvittava kilomäärä vedylle ja edelleen biokaasulle. Lasku on yksinkertainen eikä anna tarkkaa arvoa, sillä esimerkiksi voimalan hyötysuhteeksi ilmoitettiin tuote-esitteessä [43] vähintään 35 %. Tuloksesta saadaan kuitenkin selville tarvittavan biokaasumäärän suuruusluokka. Laskussa käytetään huonointa mahdollista hyötysuhdetta, jotta saadaan epäedullisimman tilanteen tulos.

Vetykaasun energiasisältö 119 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$ [44, s. 39]. Se saadaan muunnoskaavalla 4 muotoon 33 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{kg}}$. Kun jaetaan vuosittainen energiantarve vetykaasun energiamäärällä kiloa kohden, saadaan vuosittain tarvittava vetykaasumäärä kilogrammoissa 100 %:a hyötysuhteella. Kun otetaan huomioon voimalan hyötysuhde 35 %:a, saadaan voimalan vaatima vetykaasumäärä kiloissa. Tulokseksi saadaan noin 173 kg vetykaasua. Reaktiokaavaa 6 tarkastelemalla ja ottamalla huomioon aineiden atomimassat, saadaan tarvittavan biokaasun massaksi noin 458 kg.

Biokaasua voi ostaa tankkausasemilta, joita on Suomessa kymmeniä. Asemat ovat suunniteltu kaasuautojen tankkaamiseen, mutta kaasua voi tankata muihinkin säiliöihin. [45] Olettaen tietysti, että säiliön venttiili on oikeanlainen tankkauspistooliin nähden. Vaihtoehtoisesti biokaasua voi tuottaa itse, esimerkiksi biojätteestä tai lannasta, esimerkiksi markkinoilla on kotikäyttöön suunniteltu mädätysjärjestelmä [46]. Valmistaja lupaa, että tuote tuottaa parhaimmillaan 600 litraa biokaasua päivittäin. Kyseinen tuotanto vaatii, että systeemiin syötetään päivittäin 6 litraa ruokajätettä tai 20 litraa eläinperäistä lantaa. Valmistajan mukaan 600 litraa biokaasua vastaisi 4,4 kWh, joten biokaasun energiasisältöön verrattaessa se vastaisi hieman yli puolta kiloa. Täytyy kuitenkin huomioida, että 6 litraa on merkittävä määrä ruokajätettä. Lisäksi biokaasua täytyy tuottaa satoja litroja tarkasteltavan kesämökin energiantarpeen kattamiseksi.

Biomassa ja biokaasua voidaan siis molempia käyttää kesämökin energiantarpeen kattamiseen. Nestemäisiä biopolttoaineita sen sijaan ei voi käyttää yhtä laajasti. Esimerkiksi etanolin käyttötarkoitus on lähinnä liikenteen polttoaineena, esimerkiksi E10-bensiinissä. Koska työssä ei tarkastella energiantuotantoa siirtymisissä kesämökille ja sieltä muualle, ei nestemäisillä biopolttoaineilla voida kattaa energiantarvetta.

7. TEKNOLOGIOIDEN TALOUDELLINEN TARKASTELU

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan vaihtoehtoisten teknologioiden taloudellisia vaikutuksia ja tunnuslukuja kuten takaisinmaksuaikaa. Aikaisemmin jokaisen teknologian kohdalla on tarkasteltu käytettävyyttä fyysisten ja toiminnallisten ominaisuuksien puolesta.

Jokaisen teknologian ja laitteiston kohdalla käytettävät luvut ja arvot on saatu selville julkisia hakukoneita käyttämällä. Pois lukien Helbion [43] voimalan hinta, joka on kysytty suoraan valmistajalta. Tarvittaessa teknologian hankintahinta ja muut tiedot on haettu ulkomaiden markkinoilta, jos Suomesta ei ole mahdollista hankkia kyseistä teknologiaa.

7.1 Teknologioiden hankintakustannukset

Hankintakustannuksissa huomioidaan vaadittavan laitteiston kustannukset sekä mahdolliset asennuskustannukset, jos ne on mahdollista selvittää. Hankintakustannukset on valittu laitteille, jotka pystyvät täyttämään energiantarpeen. Vaadittavat laskut on suoritettu jokaisen teknologian omissa luvuissa. Esimerkiksi luvussa 2.1.2 laskettiin tarvittava paneelipinta-ala. Laskujen pohjalta on valittu tarkasteluun taulukossa 1 esitetyt järjestelmät, jotka täyttämät vaatimukset.

Taulukko 1 Hankintakustannukset energiantarpeen täyttäville järjestelmille

Aurinkoenergia	
Ralos 4,01 kW [47]	6 400 €
Tiiri Oy 3,3 kW [48]	6 190 €
FixSun 3 kW [49]	3 659 €
Ensol aurinkokeräin [12]	3 530 €
Ralos 2-akselinen 4,56 kW [7]	9999 €
Tuulienergia	
WindSpot 1,5 kW [21]	7 590 €
3 kpl WindSpot 1,5 kW	22 770 €
Bioenergia	
Helbio H_2PS-5 5kW [43]	60 000 €
HomeBiogas 2 [46]	735 €
Varaava puuliesi [42]	949 €

Aurinkoenergian kohdalla on 5 järjestelmää, joista Raloksen, Tiirin ja Ensolin hinnat sisältävät asennuksen. FixSunin järjestelmä sisältää kaiken tarvittavan systeemin

käyttöön muttei sisällä asennusta. Muut ovat aurinkopaneelijärjestelmiä paitsi Ensolin aurinkokeräin. Raloksen alempi järjestelmä [7] on kaksiakselistaseurantaa hyödyntävä aurinkopaneelijärjestelmä. Tästä eteenpäin aurinkopaneelijärjestelmistä tarkastellaan vain Raloksen järjestelmiä, jotka sisältävät systeemin käyttöä varten oleelliset tarvikkeet: invertterit, kaapelit, telineet yms. Tämä johtuu siitä, että Raloksen järjestelmien tiedoista löytyy tarvittavat tiedot aurinkopaneeleista, joilla voidaan varmistua sähköntuotannon riittävyydestä. Myös FixSunin järjestelmästä löytyi tarvittavat tekniset tiedot mutta tässä työssä tarkastellaan järjestelmiä, joihin kuuluu asennus. Tarvittaessa kuitenkin tarkastellaan järjestelmää, johon ei kuulu asennuskustannuksia, jos niitä ei löydy. Esimerkiksi bioenergian kohdalla tarkastellaan tällaista järjestelmää.

Taulukossa 1 on laskettu WindSpot-tuulivoimalan hankintakustannus kolmelle yksikölle. Määräksi on valittu kolme yksikköä luvun 3.3 laskujen perusteella. Voimalapakettiin ei kuulu mastoa eikä asennusta, joten ne lisäävät hintaa entisestään.

Bioenergian sovelluksista taulukossa 1 on esitettynä CHP-voimala ja biokaasun tuotantolaitos HomeBiogas 2, joita tarkasteltiin luvussa 6.4. Lisäksi taulukossa on varaavan puulieden hankintahinta [42]. Kuten taulukosta huomataan, CHP-voimalan hankintakustannus on hyvin suuri. Kyseinen puuliesi on lämmitysteholtaan 6,3 kW ja mitoitettu lämmittämään 65 m^2 tilaa. Puulieden hankintahinnassa on oletettu, että kesämökissä on valmiiksi savupiippu ja hormi.

Taulukossa 1 ei ole nähtävissä maalämmön tai vetypolttokennojen hankintakustannuksia. Tämä johtuu siitä, että jo aiemmin luvuissa 4.2 ja 5.2 todettiin, etteivät teknologiat sovi työssä tarkasteltavan kesämökin energiantarpeen täyttämiseen. Maalämmön kannalta kyse on teknologian sopimattomuudesta juuri kyseisen kesämökin energiantuottoon. Vetypolttokennon kannalta kyse taas on teknologian toiminnallisuudesta yksityisessä käytössä.

Taulukkoa 1 tarkastelemalla huomataan, että sähköntuotannossa pienin hankintakustannus on aurinkopaneelijärjestelmällä. Lämpöenergiantuotannossa pienin hankintakustannus löytyy kuitenkin varaavalta puuliedeltä. Maalämpöä tai vetypolttokennoa ei enää tarkastella vaihtoehtona. Eivätkä ne olisi hankintakustannuksissa päässeet alhaisempiin hintoihin kuin muut vaihtoehdot. Maalämpöjärjestelmien hinnat vaihtelevat asennuspaikan ja urakoitsijan mukaan. Eri lähteiden välillä on eroja mutta suurin osa kustannuksista osuu 12 000–15 000 euron välille [50] [51] [52]. 2 kW:n vetypolttokennon puolestaan voi ostaa noin 9 830 eurolla (ei sisällä veroja). Pidemmälle kehitetty versio puolestaan maksaa noin 17 450 euroa ilman veroja. [53]

7.2 Takaisinmaksuajat teknologioille

Tässä luvussa käsitellään taloudellista takaisinmaksuaikaa, jota ei pidä sekoittaa energian takaisinmaksuaikaan. Takaisinmaksuaika tarkoittaa sitä aikaa, mikä investoinnilta kuluu tuottaa hankintakustannukset [54, s. 127–128]. Esimerkiksi hankintakustannusten ollessa 10 000 € ja vuosittaisten tuottojen 5 000 €, on takaisinmaksu aika 2 vuotta. Investoinnilla tarkoitetaan varojen sijoitusta johonkin toimintaan tai pääomaan, jolta odotetaan tuottoja, esimerkiksi uuden paperikoneen osto [55, s. 190]. Tässä työssä tutkittavat teknologiat ja laitteistot eivät tuota rahallisia tuloja omistajalleen. Tuottona voidaan kuitenkin ajatella säästöä, joka saadaan, kun ei tarvitse maksaa sähköenergiasta tai sähkön siirrosta ulkopuoliselle organisaatiolle. Lasketaan siis vuosittainen tuotto sähkön siirtomaksujen ja sähköenergian hankintamaksujen summana.

Työssä tarkasteltava kesämökki sijaitsee Elenian sähkönsiirtoalueella, joten sähkön siirtomaksut lasketaan Elenian hinnaston avulla [56]. Vuoden ajalta lasketut sähkönsiirtomaksut esitettynä taulukossa 2.

Taulukko 2 Siirtomaksut laskettuna vuodelle [53]

Yleissiirto		
Sähköveroluokka I (€/kWh)	Perusmaksu (€/kk)	Siirtomaksut vuodessa (€/a)
0,08	40,65	396,04

Vuosittaisten siirtomaksujen laskennassa käytettiin yleissiirtoa, koska tarkempia tietoja kulutuksen aikajakaumasta ei ole.

Sähköenergian hankinta kuuluu vapaan kilpailun piiriin, joten vuosittainen maksu riippuu valitusta sähkönmyyjästä. Valinta ei kuitenkaan vaikuta oleellisesti laskuihin, koska takaisinmaksuajat lasketaan kaikille vaihtoehdoille samoilla arvoilla. Eri teknologioiden keskinäinen vertailu on siis silti mahdollista. Sähköenergian myyjänä käytetään laskuissa Vattenfallia. Vuosittainen sähköenergiasta maksettava summa esitettynä taulukossa 3.

Taulukko 3 Sähköenergian vuosittainen hinta [57]

Sähköenergia Vattenfall		
Perusmaksu (€/kk)	Hinta (€/kWh)	Maksut vuodessa (€)
3,70	5,09	146,2

Yhdistämällä molempien taulukoiden tulokset saadaan vuodessa maksettavaksi kokonaissummaksi 542,24 €. Tätä summaa siis käytetään vuosittaisen tuoton

lähtöarvona, josta vähennetään mahdolliset muut kustannukset. Takaisinmaksuajat esitettynä taulukossa 4.

Taulukko 4 Takaisinmaksuajat valituille laitteistoille

Aurinkoenergia	**Hankintakustannus**	**Vuosittainen tuotto**	**Takaisinmaksuaika**
Ralos 4,01 kW [47]	6 400 €	542,24 €	11,80
Ralos 4,01 kW akustolla (4x200 Ah) [47] [58]	7 916 €	542,24 €	14,60
Ralos 2-akselinen 4,56 kW [7]	9 999 €	542,24 €	18,44
Ralos 2-akselinen akustolla (4x200Ah) [7] [58]	11 515 €	542,24 €	21,24
Tuulienergia			
WindSpot 1,5 kW [21]	7 590 €	542,24 €	14,00
3 kpl WindSpot 1,5 kW	22 770 €	542,24 €	41,99
Bioenergia			
Helbio H_2PS-5 5kW [43] (*kaasu ostetaan)	60 000 €	-136,42 € * 542,24 €	∞* 110,65
HomeBiogas 2 [42]	735 €	85,28 €	8,62

Takaisinmaksuajan menetelmä ei ota huomioon rahan aika-arvoa. Jos halutaan ottaa huomioon rahan arvon ajalliset muutokset, täytyy käyttää esimerkiksi nykyarvomenetelmää. Taulukosta kuitenkin nähdään suuntaa antavasti, kuinka kauan kestää ennen kuin teknologia on maksanut itsensä takaisin. Kun takaisinmaksuaika on kymmeniä tai yli sata vuotta, voidaan todeta, ettei tulos anna tarkkaa aikaa. Tuloksien avulla kuitenkin voidaan vertailla teknologioiden suuruusluokkia. Taulukosta puuttuu varaavan lieden takaisinmaksuaika. Tämä johtuu siitä, että ei ole tiedossa pelkästään lämpöenergiankustannuksia.

Koska aurinko- ja tuulivoiman laitteisiin ei tarvitse ostaa esimerkiksi polttoainetta, voidaan käyttää tuottona suoraan vuosittaista säästöä. Todellisuudessa tuottoa pienentävät mahdolliset huoltomaksut tai komponenttien vaihdot. Esimerkiksi akusto joudutaan todennäköisesti vaihtamaan 14 vuoden aikana, mikä pidentää takaisinmaksuaikaa. Taulukossa bioenergian kohdalla on kaksi eri takaisinmaksuaikaa. Ylempi on skenaario, jossa biokaasu ostetaan erikseen ja alemmassa biokaasu tuotetaan itse. Biokaasun vuosittaiseksi kustannukseksi saadaan 679 € ylemmässä skenaariossa Gasumin tankkausaseman kilohinnan perusteella [45]. Kilomääränä on käytetty luvussa 6.4 laskettua vuosittaista biokaasun kulutusta. Kun vuosittainen kustannus vähennetään sähkömaksujen kustannuksista, huomataan vuosittaisen tuoton olevan negatiivinen. Toisin sanoen laitteiston käyttö pelkästään luo kustannuksia. Näin

ollen takaisinmaksuaika on ääretön eikä laite maksa itseään koskaan takaisin nykyisillä hinnoilla ja arvoilla.

Aurinkopaneelijärjestelmiin lisättiin neljä kappaletta 200 Ah:n akkuja akustoksi, jotta sähköä voidaan kuluttaa silloinkin, kun aurinkopaneelit eivät tuota sähköä. Jos akkuja käytetään 12 V:n jännitteellä, saadaan yhden akun energiaksi 2,4 kWh. Näin ollen neljällä akulla voitaisiin kuluttaa sähköä 2,4 kW:n teholla neljä tuntia. Ottaen huomioon, että akustoon joudutaan turvautumaan eniten yöaikaan, riittää akuston koko mökin tarpeisiin.

8. RATKAISU ENERGIANTUOTANTOON

Teknologioita tarkastellessa monet vaihtoehdot sopivat energiantarpeen kattamiseen kesämökillä teoreettisen toiminnallisuuden puolesta. Kuitenkin kun siirrytään teoreettisesta käytännölliseen tarkasteluun, huomataan ettei osa teknologioista käykään energiantuotantoon. Esimerkiksi vetypolttokenno toimii teorian tasolla hyvin ja tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Vetyteknologian tekee kuitenkin epäkäytännölliseksi vetyinfrastruktuurin puuttuminen. Maalämmön kohdalla puolestaan kesämökin tarpeet eivät kohtaa teknologian hyötyjä.

Ottamalla huomioon toiminnallisuuden, käytettävyyden ja taloudelliset vaikutukset, aurinkoenergia on järkevin ratkaisu sähköntuotantoon ja bioenergia lämpöenergiantuotantoon. Aurinkopaneelijärjestelmistä kiinteä järjestelmä eli Raloksen 4,01 kW:n järjestelmä [47] sopii paremmin tarkoitukseen kuin kaksiakselinen. Kaksiakselistaseurantaa käyttävä järjestelmä vaatii yli kaksinkertaisen tilan kiinteään nähden [7]. Vaikka järjestelmältä vaaditaan pienempi paneelipinta-ala kuin kiinteältä järjestelmältä, vaatii markkinoilta löytyvä järjestelmä suuremman tilan. Lisäksi sen hankintakustannus on yli puolet suurempi. Raloksen 4,01 kW:n systeemissä on 9 aurinkopaneelia, joiden yhteispinta-ala on noin 20 m^2. Paneelien hyötysuhde on 20,5 %, joten voidaan todeta, että paneelit tuottavat vähintään vaaditun määrän sähköä luvun 2.1.2 perusteella. Lisäksi kun järjestelmään yhdistetään akusto, turvataan sähkönsaanti myös hetkinä, joina paneelit eivät tuota sähköä.

Lämpöenergiantuotannossa bioenergia sopii parhaiten energiantarpeen täyttämiseen. Varaavan puulieden hankintakustannus on lähes viidesosa aurinkokeräimen hankintakustannuksesta. Lisäksi puuliedestä saatavaa lämpöenergiaa voidaan hyödyntää ruoanlaitossa toisin kuin aurinkokeräimestä saatavaa. Puuliesi pystyy toteuttamaan samat toiminnot kuin aurinkokeräin pienemmällä kompleksisuudella. Aurinkokeräimen hyvä puoli on se, että auringon energia on ilmaista eikä aurinkokeräimeen tarvitse syöttää polttoainetta.

Koska kesämökki on vain kesäkäytössä, voidaan biomassankulutus olettaa suhteellisen pieneksi. Irtokuutiometrillä koivua on noin 1000 kWh energiasisältö [59, s. 90]. Tarkasteltavan puulieden teho on 6,3 kW ja hyötysuhde 79,1 %. Puuliedellä kestää näin ollen täydellä teholla 125 tuntia kuluttaa irtokuutio koivua. Toisin sanoen liettä voidaan ajaa täydellä teholla hieman yli 5 päivää ja 5,5 tuntia. Jos kesämökillä vietetään 150 päivää, voidaan liettä ajaa joka päivä 50 minuuttia. Kesämökillä ei kuitenkaan tulla

todennäköisesti olemaan 150 päivää, sillä se tarkoittaisi melkein jokaista päivää toukokuusta syyskuuhun. 150 päivää käytetään laskuissa, koska se tasoittaa energiantuotannon ajalle, jona mökillä saatetaan olla.

Voidaan todeta, että irtokuutiometri riittää vähintään yhdeksi vuodeksi. Kun koivun hinta 46 €/irto-m^3 [60], kestää hieman yli 56 vuotta ennen kuin puulieden hankintakustannus saavuttaa aurinkokeräimen hankintakustannuksen. Vaikka puunhinta olisi 60 € ja kuluisi kaksi irtokuutiota koivua vuodessa, kestäisi silti 21,5 vuotta hankintakustannusten tasoittumisessa. Näissä tarkasteluissa ei otettu huomioon esimerkiksi tontilla kaatuvia tai kaadettavia puita, jolloin puuta ei välttämättä tarvitse ostaa. Joten vaikka aurinkokeräin tuottaakin merkittävän määrän lämpöenergiaa, kuten luvussa 2.2.2 selvitettiin, ei se ole työssä tarkasteltavalle kesämökille järkevämpi vaihtoehto.

Aurinkoenergia ja bioenergia eivät kuitenkaan ole välttämättä aina parhaimmat vaihtoehdot. Esimerkiksi tuulienergian käytettävyyden heikensi työssä tarkasteltavan kesämökin huonot tuuliolosuhteet. Paremmissa tuuliolosuhteissa tuulienergia olisi voinut olla edullisempi ja järkevämpi vaihtoehto. Lämpöenergiassa puolestaan maalämpö olisi voinut olla järkevin, jos kesämökki olisi kokovuotisessa käytössä. Järkevin vaihtoehto riippuukin aina tarkasteltavasta kohteesta ja olosuhteista.

Työssä tarkasteltavan kesämökin energiantarve katetaan akustollisella aurinkopaneelijärjestelmällä sekä varaavalla puuliedellä. Kokonaishankintakustannukseksi muodostuu 8865 € ja aurinkopaneelijärjestelmän takaisinmaksuaika on noin 14,6 vuotta. Varaavan puulieden vuosittaiset tuotantokustannukset ovat noin 46 €, aurinkopaneelijärjestelmällä vuosittaisia kustannuksia ei ole. Aurinkopaneelit tuottavat säästöä perinteiseen sähkönhankintaa nähden noin 542 € vuodessa.

9. YHTEENVETO

Energiantarpeen voi täyttää usealla eri uusiutuvalla teknologialla ja niiden yhdistelmällä. Tässä työssä tarkasteltiin aurinko-, tuuli- sekä bioenergiaa. Lisäksi tarkasteltiin vetypolttokennoa ja maalämpöä.

Auringosta saapuva säteilyenergia voidaan hyödyntää valosähköisellä ilmiöllä tai muuttamalla säteilyenergia lämpöenergiaksi. Valosähköisessä ilmiössä hyödynnetään puolijohteita ja pn-liitosta. Aurinkokennoja kasataan esimerkiksi materiaaleista, jotka on yhdistetty toisiinsa niin, että pn-liitos syntyy. Kennoista kasataan edelleen aurinkopaneeleja, jotka tuottavat auringon säteilyenergiasta sähköenergiaa. Aurinkopaneelit ovat yleensä kiinteitä mutta myös seurantaa käyttäviä paneeleita on olemassa. Seurantaa hyödyntävät järjestelmät yhdistetään kuitenkin yleensä sovelluksiin, jotka muuttavat säteilyn energian lämpöenergiaksi. Kesämökin olosuhteisiin sopiva aurinkokeräin on kuitenkin kiinteä laite.

Tuulienergiassa tuulen energia hyödynnetään tuulivoimaloiden avulla. Ne voidaan jakaa muuttuvanopeuksisiin ja vakionopeuksisiin. Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat käyttävät yleensä epätahtigeneraattoria sähköntuotannossa. Epätahtigeneraattorin toiminta perustuu roottorin ja staattorin väliseen jättämään. Tahtigeneraattori puolestaan ei tarvitse jättämää toimiakseen. Muuttuvanopeuksisen voimalan voi toteuttaa joko rajoitetusti tai aidosti muuttuvanopeuksisena. Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen toteutetaan yleensä epätahtigeneraattorilla. Siinä osa tehosta viedään sähköverkkoon suuntaajakäytöllä. Aidosti muuttuvanopeuksinen voimala puolestaan toteutetaan yleensä tahtigeneraattorilla ja siinä kaikki teho viedään sähköverkkoon suuntaajien läpi. Pienet yksityiseen käyttöön tarkoitetut tuulivoimalat noudattavat samoja perusperiaatteita kuin suuretkin voimalat. Erona on kuitenkin se, että pienissä voimaloissa on enemmän variaatioita ratkaisuissa.

Maalämmössä hyödynnetään maan pinnan alle varastoitunutta energiaa, joka on pääosin maahan sitoutunutta auringon säteilyenergiaa. Maalämpö on harhaanjohtava nimitys, sillä sitä voidaan hyödyntää myös pohjavedestä tai pinta vesistä. Yleensä maalämpö hyödynnetään maalämpöpumpun avulla, jolloin esimerkiksi asuintila voidaan lämmittää maasta saatavalla lämmöllä. Ilman lämpöpumppua tämä ei onnistuisi, koska maan lämpötila voi olla alhaisempi kuin ilman lämpötila. Maalämmöllä voidaan myös viilentää asuintiloja, lämpöpumpun avulla tai ilman.

Vetypolttokenno käyttää polttoaineena vetyä, josta se tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa. Polttokenno vaatii toimiakseen myös hapetinta. Niin kauan kuin polttokenno vastaanottaa polttoainetta ja hapetinta, energiantuotanto jatkuu. Polttokennon lopputuotteina syntyy energiaa ja vettä, joten se on puhdas energiantuotantomuoto. Ongelmana on kuitenkin vetyinfrastruktuurin puute, joka vaikeuttaa vetypolttokennon hyödyntämistä. Koska vetyä ei esiinny luonnossa suoraan käytettävässä muodossa, täytyy se valmistaa esimerkiksi veden elektrolyysillä tai reformoimalla hiilivedyllisiä polttoaineita.

Bioenergia on ollut ihmiskunnalle tärkeä energianmuoto jo tuhansia vuosia. Polttamalla biomassaa on voitu valmistaa ruokaa ja tätä hyödynnetään vieläkin. Biomassan polttamisesta saadaan myös lämpöenergiaa. Palamisesta saatavalla höyryllä voidaan ajaa höyryturbiinia ja tuottaa sähköä. Bioenergiaa voidaan hyödyntää myös biokaasun muodossa, jota voidaan tuottaa mätänemisreaktion avulla. Biokaasulla puolestaan voidaan tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa voimalalla, joka käyttää biokaasua vetykaasun lähtöaineena. Kaasuautot voivat myös käyttää biokaasua polttoaineena, mikä on vähäpäästöisempää kuin bensiinin tai dieselin käyttö.

Teknologioita tarkasteltaessa taloudellisesta näkökulmasta huomataan, että kannattavin sähköntuotantomuoto on aurinkoenergia, tarkemmin kiinteä akustollinen aurinkopaneelijärjestelmä. Lämpöenergian tuotannossa puolestaan kannattavin on varaava puuliesi, joka hyödyntää bioenergiaa polttamalla biomassaa. Näin ollen työn tarkastelun tuloksena voidaan esittää ratkaisu kesämökin energiantarpeen täyttämiseen.

LÄHTEET

[1] Mackay ME, Solar Energy: An Introduction, Oxford, OUP Oxford, 2015

[2] Kitai A. Principles of solar cells, LEDs and diodes: the role of the PN junction, Chichester, Wiley, 2011

[3] Fraunhofer ISE, Photovoltaics report, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2020

[4] Valkealahti S. Evolving Photovoltaic Solar Sell Technologies -luentodiat, Aurinkosähkö-kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018

[5] Jordan D, Kurtz S. Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review, National Renewable Energy Laboratory, 2012

[6] JRC's Institute for Energy and Transport, PVGIS, https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis

[7] Ralos, 2-akselinen auringon seuraaja, Ralos, https://www.ralos.eco/store/p66/2AXIS.html#/

[8] Mills D. Advances in solar thermal electricity technology, Solar energy, 2004, Volume 76(1-3), p. 19–31.

[9] Häberle A. Linear Fresnel Collectors, Richter C, Lincot D, Gueymard C.A. Solar Energy, Springer, New York, NY, 2013

[10] Alexopoulos S, Hoffschmidt B, Concentrating Receiver Systems (Solar Power Tower), Richter C, Lincot D, Gueymard C.A. Solar Energy, Springer, New York, NY, 2013

[11] Valkealahti S. Concentration Solar Power Production Technologies -luentodiat, Aurinkosähkö-kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018

[12] Ekolämmöx, Ensol aurinkokeräin, https://ekolammox.fi/tuote/ensol-aurinkokerain/

[13] Young F. University Physics with Modern Physics, University Physics with Modern Physics, Pearson Education Limited, 13th edition 2012

[14] Awasthi S. Wind Power, Practical Aspects, Wind Power, New Delhi, Energy and Resources Institute, 2018

[15] Ackermann T. Wind Power in Power Systems, Wind Power in Power Systems, Hoboken, Wiley, 2005

[16] Breeze P. Wind power generation, San Diego, Elsevier Science & Technology, 2016

[17] Fox B. Wind power integration, connection and system operational aspects, Second edition, London, The Institution of Engineering and Technology, 2015

[18] Clark R. Small Wind, Planning and Building Successful Installations, Small Wind, San Diego, Elsevier Science & Technology, 2013

[19] Bastmann J. Sähkökoneet-opintomoniste, Sähkökoneet-kurssi, Tampereen yliopisto, 2019

[20] Suomen tuuliatlas, tuuliatlas-karttaliittymä, Suomen tuuliatlas http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html

[21] WindSpot, WindSpot 1,5 kW-tuulivoimala, WindSpot, https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsd-GRvbWFpbnxrb2RpbnZpaHJlYWVuZXJnaWF8Z3g6MWY1ODMzM2U3NDIwZGY3OA

[22] Sunwind, X400-tuulivoimala, Sunwind, https://www.sunwind.fi/files/userfiles/files/541150%20X400%20Vind%20SV%20FIN%201.pdf

[23] Banks D. An Introduction to Thermogeology, Ground Source Heating and Cooling, An Introduction to Thermogeology New York Wiley 2012

[24] Chiasson A. Geothermal heat pump and heat engine systems, theory and practice, Chichester, England, ASME Press, 2017

[25] Kavanaugh SP, Rafferty KD. Geothermal heating and cooling, design of ground-source heat pump systems, ASHRAE, 2014

[26] Basu S. Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology, Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology, New York, Springer New York 2007

[27] Tong Q. Hydrogen-Air PEM Fuel Cell: Integration, Modeling, and Control, Hydrogen-Air PEM Fuel Cell, Berlin/Boston, De Gruyter Inc, 2018

[28] Dicks AL, Rand DAJ. Fuel cell systems explained, Third edition, Hoboken, New Jersey, Wiley, 2019

[29] Barbir F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice, PEM Fuel Cells, San Diego, Elsevier Science & Technology, 2012

[30] LNI Swissgas, hydrogen generator system, LNI Swissgas, https://www.lni-swissgas.eu/en/product/h2-power-10l/

[31] FuelCellStore, Hydrogen fuel cell, FuelCellStore, https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/high-power-fuel-cell-stacks/g-hfcs-2kw25v-1kw-hydrogen-fuel-cell-power-generator

[32] Yuan M. Bioenergy: principles and technologies, Volume. 2, Bioenergy: principles and technologies, De Gruyter, 2017

[33] Lund B. Advances in Bioenergy: The Sustainability Challenge, Preface, Advances in Bioenergy, New York, John Wiley & Sons Incorporated, 2016

[34] Li Y, Khanal SK. Bioenergy: principles and applications, Hoboken, John Wiley & Sons Incorporated, 2018,

[35] Wall JD, Harwood CS, Demain A. Bioenergy, Washington D.C, ASM Press, 2008

[36] Dahiya A, Dahiya A. Bioenergy, biomass to biofuels, 1st edition, London, Academic Press, 2016

[37] U.S. Energy information Administration, US Fuel ethanol plant capacity, U.S. Energy information Administration, https://www.eia.gov/petroleum/ethanolcapacity/, cited on 5.12.2020

[38] Valvira, Alkoholin valmistus, Valvira, https://www.valvira.fi/alkoholi/alkoholin_valmistus, viitattu 15.12.2020

[39] Ghosh TK, Prelas MA. Energy Resources and Systems Volume 2, Renewable Resources, 1st edition, Dordrecht, Springer Netherlands, 2011

[40] Autoalan tiedotuskeskus, E-10 bensiini, Autoalan tiedotuskeskus, https://www.aut.fi/tieliikenne/polttoaineet_ja_kayttovoimat/bensiini/e10-bensiini, viitattu 1.12.2020

[41] Ilmatieteenlaitos, Lämpötila-tilastoja, Ilmatieteenlaitos, https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961

[42] Netrauta, Varaava puuliesi, https://www.netrauta.fi/puuliesi-svt-alfa-70-lux-lasiovella-6-3-kw-65-m2-musta

[43] Helbio, Combined heat and power system, Helbio, https://helbio.com/5-kw-combined-heat-and-power-system-chp/

[44] Lehtomäki A, Paavola T, Luostarinen S, Rintala J, Biokaasusta energiaa maatalouteen-raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet, Jyväkylä Innovation Oy & Jyväskylän yliopisto, 2007

[45] Gasum, Biokaasun hinta, Gasum, https://www.gasum.com/yksityisille/tankkaa-kaasua/tankkaushinnat/, viitattu 16.12.2020

[46] Homebiogas, Homebiogas 2, Homebiogas, https://www.homebiogas.com/Products/HomeBiogas2

[47] Ralos, Aurinkovoimala S, Ralos, https://www.ralos.eco/store/p88/aurinkovoimala-s.html#/

[48] Tiiri Oy, Aurinkovoimalat, Tiiri Oy, https://www.tiirioy.fi/?gclid=EAIaIQobChMIs-aLLhq3N7QIVC3YYCh1fOwtSEAMYAiAAEgLjE_D_BwE#

[49] Netrauta, Aurinkosähköjärjestelmä FixSun, https://www.netrauta.fi/aurinkosahkojarjestelma-fixsun-3kw

[50] Tomallen Senera, Maalämmö hinta, Tomallen Senera, https://www.tomallensenera.fi/maalampo/maalampo-hinta

[51] Lämpöykkönen, Maalämmön hinta, Lämpöykkönen, https://lampoykkonen.fi/tuotteet/maalampo/maalampopumppu-ja-hinta/

[52] Techeat, Maalämmön hinta, Techeat, https://www.techeat.fi/maalampo/maalammon-hinta/

[53] FuelCellStore, Fuel cells, FuelCellStore, https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/high-power-fuel-cell-stacks, cited on 15.12.2020

[54] Bettner MS. Using accounting & financial information: analyzing, forecasting & decision making, First edition, New York, Business Expert Press, 2015

[55] Martinsuo M, Mäkinen S, Suomala P, Lyly-Yrjänäinen J. Teollisuustalous kehittyvässä liiketoiminnassa, 1. painos, Helsinki, Edita, 2016

[56] Elenia, Verkkopalveluhinnasto 1.9.2020, Elenia, https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/elenia_sulake_hinnasto_2020_A5_v4.pdf

[57] Vattenfall, Sähkösopimukset, Vattenfall, https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/, viitattu 4.12.2020

[58] Electro-tori, Voltronic syväpurkausakku, https://www.electrotori.net/product/315/voltronic-agm-syvapurkausakku--200ah

[59] Alakangas E, Hurskainen M, Laatikainen-Luntama J, Korhonen J, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT, Juvenes Print Tampere, 2016

[60] Mottinetti, Polttopuiden hinnat, Mottinetti, http://www.mottinetti.fi/haku/toimitusalue/hame/, viitattu 15.12.2020