

Kyösti Huhtala

# **Energian omavarainen pientuotanto ja sen mitoittaminen**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintutkielma  
Lokakuu 2019

# Tiivistelmä

Kyösti Huhtala: Energian omavarainen pientuotanto ja sen mitoittaminen  
Kandidaatintutkielma  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikka  
Lokakuu 2019

---

Tässä työssä tarkastellaan pienimuotoista, omavaraista energiantuotantoa ja sen mitoittamista ajatellen yksittäisen kotitalouden tai pienehkön tuotantolaitoksen tarpeita. Tarkasteltavan kokonaisjärjestelmän nähdään koostuvan tuotannon ja varastoinnin osajärjestelmistä sekä niitä ohjaavasta järjestelmästä. Työssä luodaan katsaus muutamaa varten otettaviin energian tuotannon ja varastoinnin teknologioihin ajatellen sekä sähkön- että lämmöntuotantoa ja varastointia. Työssä tarkastellaan myös kokonaisjärjestelmän mitoittamista, jossa otetaan huomioon eri tuotantomenetelmien potentiaali ja energiavarastojen tila.

Avainsanat: yhdistetty sähkön ja energian tuotto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# Abstract

Kyösti Huhtala: Small scale self sufficient energy production, and scaling  
Batchelor's Thesis  
Tampere University  
Environment and Energy Techniques  
October 2019

---

In this thesis we consider small scale, self sufficient energy production, which allows, e.g., a household or a small facility to produce the electrical and thermal energy it needs. The system is considered to consist of the subsystems for production and storage, which work together under a control subsystem. A short review of suitable technologies to produce and store electrical and thermal energy is provided. Methods used for scaling the system is considered.

Keywords: combined heat and power

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

## Alkusanat

Vuonna 1997 minut ylennettiin reservissä insinööriylliluutnantin sotilasarvoon – ilman, että takana olisi ollut päivääkään insinööriopintoja. Nyt alkaa olla lähellä se aika, että tuo virhe korjautuu.

Pellettilämmittäjiä olemme vaimoni kanssa olleet omakotitalossamme jo seitsemisentoista vuotta. Aika ajoin on mielessä käynyt, mitä muuta pelletillä voisi tuottaa – ja miten pääsisi vallan irti valtakunnan sähköverkosta. Saahan kaikkea ajatella, mutta tässä työssä syntyy itselleni ensimmäinen katsaus asiaan.

*Helenalleni,  
jota ilman tätäkään ei olisi.*

Lempäälässä, 27. lokakuuta 2019

Kyösti Huhtala

## Sisällysluettelo

1	Johdanto . . . . .	1
2	Järjestelmäkonsepti ja vaatimukset . . . . .	3
2.1	Järjestelmäkonsepti . . . . .	3
2.2	Järjestelmävaatimukset . . . . .	4
3	Energian tuotanto . . . . .	6
3.1	Puukaasumootorigeneraattori . . . . .	6
3.2	Aurinkoenergia ja polttokenno . . . . .	8
3.2.1	Aurinkopaneeli . . . . .	8
3.2.2	Polttokenno . . . . .	9
3.3	Orgaaniseen Rankine-kiertoon perustuva generaattori . . . . .	11
3.4	Muita . . . . .	12
4	Energian varastointi . . . . .	16
4.1	Lämmön massavaraajat . . . . .	16
4.2	Lämmön kemiallinen varastointi . . . . .	18
4.3	Sähkön varastointi . . . . .	19
4.4	Vety varastoinnin välineenä . . . . .	20
5	Järjestelmän mitoittaminen . . . . .	22
6	Yhteenveto . . . . .	24

## Kuvaluettelo

2.1	Esimerkki tarkasteltavasta järjestelmästä: sinisellä sähköntuotto ja ruskealla lämmöntuotto, keltaisella varastointijärjestelmä; vedyn tuotto on myös eräänlainen varasto; ohjausjärjestelmä hallitsee kokonaisuutta poislukien hellaa . . . . .	4
3.1	Periaatekuvat a) myötävirtakaasuttimesta ja b) vastavirtakaasuttimesta (kuvat lähteestä[8]) . . . . .	7
3.2	Polttokennon toimintaperiaate (kuva Wikipediasta) . . . . .	10
3.3	Orgaaniseen Rankine-kiertoon liittyvät laitteet (mukailtu lähteen [21] pohjalta)	11
3.4	a) Märkään, b) isentrooppiseen ja c) kuivaan työaineeseen liittyvät T-S-piirroksat; katkoviiva kuvaa suuretta $dT/dS$ kylmän ja tulistetun alueen rajalla . . . . .	12
3.5	Vuotuinen keskituulennopeus Luhangan alueella 50 m korkeudessa Tuulilattoksen mukaan [24] . . . . .	13
3.6	Potkuriturbiinin rakenne (kuva lähteestä [26]) . . . . .	14
3.7	Lämpösähköisen generaattorin periaate; mustalla on merkitty johtimet ja harmaalla sähköinen eristemateriaali, jolla on kuitenkin hyvä lämmönjohtokyky (kuva mukailien lähteestä [27]) . . . . .	15
4.1	Virtausakun toimintaperiaate; kuva lähteestä [26] . . . . .	20

## Lyhenteet ja merkinnät

$\eta$	Hyötysuhde; varustetaan usein tarkentavalla alaindeksillä
kVA	Kilovolttiampeeri, sähkön näennäistehon mittayksikkö
kWp	Etenkin aurinkopaneelien yhteydessä kertoo paneelin tuottaman huipputehon määritetyissä olosuhteissa
MJ/Nm <sup>3</sup>	Kaasun lämpöarvo ilmaistuna megajouleina kuutiometriä kohti ns. normaaliolosuhteissa eli 1 bar paineessa ja 15 °C lämpötilassa
MVA	Megavolttiampeeri, sähkön näennäistehon mittayksikkö
$c_p$	Aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa
$\rho$	Tiheys; varustetaan usein tarkentavalla alaindeksillä
BMC	Akuston ohjausjärjestelmä; Battery Management System
CHP	Yhdistetty lämmön ja energian tuotto; Combined Heat and Power
ISO	Kansainvälinen standardisointiorganisaatio; International Organization for Standardization
NOCT	Aurinkopaneelin nimelliset käyttöolosuhteet; Nominal Operating Cell Temperature
ORC	Orgaaninen Rankine-kierto; Organic Rankine Cycle
PEMFC	Protoninvaihtopolttokenno; Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SOFC	Kiinteäoksidipolttokenno; Solid Oxide Fuel Cell
STC	Aurinkopaneelin standardoidut testausolosuhteet; Standardized Test Conditions
TEG	Lämpösähköinen generaattori; Thermal Electric Generator

# 1 Johdanto

Vielä 1940-luvulla suomalaiset maatilat olivat varsin omavaraisia niin lämmitysenergian kuin mekaanisenkin energian suhteen. Lämpö tuotettiin polttamalla puuta uunissa tai hellassa. Vesi saatettiin nostaa tuulimoottorin avulla ja viljat jauhettiin vesimyllyllä. Sotien jälkeen omavaraisuus on kuitenkin merkittävästi pienentynyt. Syyt voivat paljolti olla poliittisia, mutta epäilemättä myös ostoenergian käytön helppous on ilmiöön vaikuttanut. [1]

Viime aikoina on uudelleen virinnyt hienoinen kiinnostus omavaraiseen energiantuotantoon. Osaltaan tähän on vaikuttanut teknologinen kehitys, joka tarjoaa uusia ratkaisuja energian tuotantoon, ja toisaalta ostoenergian ja itse tuotetun energian hinnat ovat riittävästi lähentyneet. Esimerkiksi kuuluisaksi tullut Kuittilan tila Pohjois-Karjalassa laskee oman energiantuotantonsa maksavan itsensä kymmenessä vuodessa [2]. Aivan toisenlainen omavarainen sähköntuottaja on Hannukurun sauna Pallas-Yllästunturin kansallispuistossa: saunan katolle on asennettu pieni tuuliturbiini ja seinälle aurinkopaneeli, jotka tuottavat saunaan valaistuksen tarvitseman sähkön [3]. Ratkaisun ei voine ajatella maksavan itseään takaisin, mutta ainakin sillä vältetään erilaiset palovaaraa aiheuttavat kyntilävirytykset saunatiloissa.

Tässä työssä paneudutaan pienimuotoiseen omavaraiseen energiantuotantoon – suomalaisia olosuhteita palvellen tämä tarkoittaa niin lämmön kuin sähkönkin tuotantoa. Teholuokkana käsitellään muutaman kymmenen kilowatin järjestelmiä. Sähkön pientuotannon raja on sähkömarkkinalain (9.8.2013/588) mukaan 2 MVA, mutta nyt siis paneudutaan luokkaan enintään noin 50 kVA.

Omavarainen energiantuotanto Suomessa tarkoittaa luontevasti uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Turve määritellään Suomessa hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttoaineeksi, joka on Euroopan Unionissa sijoitettu päästökauppavelvoitteiden piiriin [4]. Tämän työn puitteissa turve voisi joissain tapauksissa olla kuitenkin käyttökelpoinen energianlähde.

Kokonaan toinen seikka on omavaraisen energiantuotannon tehokkuus. Pienet tuotantoyksiköt eivät useinkaan kykene käyttämään primäärienergiaa yhtä tehokkaasti kuin suuret tuotantoyksiköt, mikä nostaa tuotetun energian hintaa. Tässä työssä kustannukset jätetään pääasiassa tarkastelematta ja keskitytään nimenomaan teknologian tarjoamiin mahdollisuuksiin.

Työn jakautuu lukuihin seuraavasti. Luvussa 2 kuvataan järjestelmän ajateltu käyttökohde ja käyttöolosuhteet sekä asetetaan järjestelmälle joitain järjestelmävaatimuksia. Seuraavaksi luvussa 3 käsitellään järjestelmän energiaa tuottava osajärjestelmä. Vaihtoehtoisia



ratkaisuja on paljon, joten tarkastelu pidetään kuvaavana ja keskitytään vain muutamiin vaihtoehtoihin. Luvussa 4 käsitellään vastaavalla yleisyyden tasolla energian varastoinnin osajärjestelmä. Lopuksi luvussa 5 käsitellään järjestelmän mitoittamista vastaamaan sille asetettuja vaatimuksia.

## 2 Järjestelmäkonsepti ja vaatimukset

*Järjestelmäsuunnittelu* (engl. systems engineering) on toimintatapa, joka auttaa hallitsemaan monimutkaisten kokonaisjärjestelmien suunnittelua. Sen keskeisiä työkaluja ovat konseptointi ja vaatimustenhallinta. Järjestelmäsuunnittelun keskeinen standardi on ISO 15288 *Systems and software engineering – System life cycle processes*, jonka viimeisin versio on vuodelta 2015. Järjestelmäsuunnittelun perusteet ovat kuitenkin ymmärrettäviä tutustumatta itse standardiin.

Tässä luvussa luonnostellaan yksinkertainen kokonaisjärjestelmän käyttötapauskuvauksen eli järjestelmäkonsepti, joka auttaa pitämään järjestelmäkokonaisuuden ja sille asetetut vaatimukset selkeinä.

### 2.1 Järjestelmäkonsepti

Järjestelmän tarkoitus on tuottaa kohteen tarvitsema

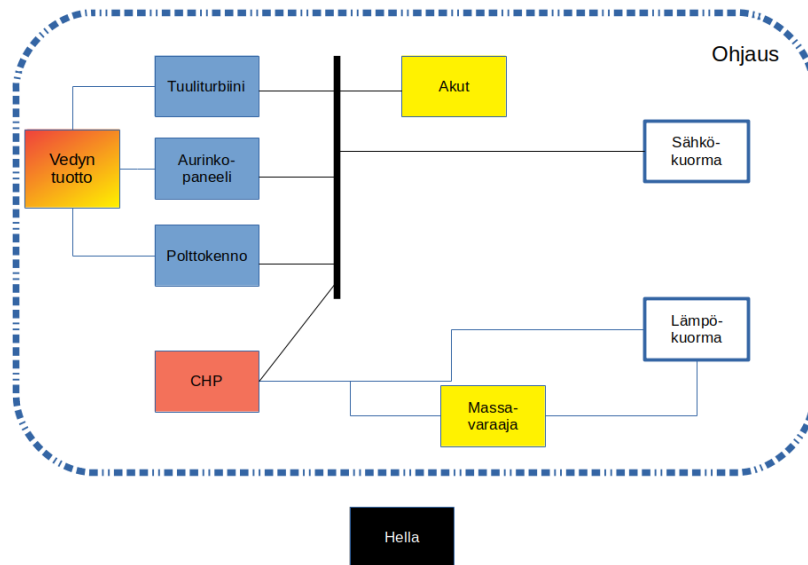
1. sähkö ja
2. lämpö.

Kohteen ajatellaan olevan asuinkiinteistö, maatila, tuotantolaitos tms., tai muutaman tällaisen muodostama kokonaisuus.

Kohteessa saattaa olla laitteisto, joka on pidettävä koko ajan toiminnassa, mikä edellyttää jatkuvaa sähköenergian tuottoa. Kohde voi toisaalta olla asuinkiinteistö tms., jossa energiaa ei ajoittain tarvita lainkaan (kesäyö, ei valaistusta eikä lämmitystä). Kutsuttakoon näitä käyttökohteita vastaavasti

- laitekäyttökohteiksi ja
- talouskäyttökohteiksi.

Järjestelmää käytetään jossain päin Suomea. Sen tulee siis sietää suomalaisia sääolosuhteita, joista keskeisin on lämpötila. Suomen vuotuinen keskilämpötila vaihtelee paikakunnittain pohjoisimman Suomen alle  $-2\text{ °C}$ :sta eteläisen rannikon yli  $+5\text{ °C}$ :een [5]. Tällaiset lämpötilat eivät vielä yleensä aiheuta erityisiä vaatimuksia teknisille laitteille. Olennaisia ovat äärimmäiset lämpötilat ja niitä vastaavien kausien pituus. Suomessa pakkasennätys on  $-51,5\text{ °C}$  ja korkein Suomessa mitattu lämpötila on  $+36\text{ °C}$ . Alin kuukauden keskilämpötila on ollut  $-29,7\text{ °C}$  Kuusamossa ja korkein kuukauden keskilämpötila



**Kuva 2.1.** Esimerkki tarkasteltavasta järjestelmästä: sinisellä sähköntuotto ja ruskealla lämmöntuotto, keltaisella varastointijärjestelmä; vedyn tuotto on myös eräänlainen varasto; ohjausjärjestelmä hallitsee kokonaisuutta poislukien hellaa

taas +23 °C Puumalassa. Kattavasti tietoa kylmistä ja lämpimistä jaksoista löytyy Ilmatieteen laitoksen www-sivustolta <https://ilmatieteenlaitos.fi>.

Järjestelmän käytettävyyden kannalta on tärkeää, että pääosa kunnossapidosta on toteutettavissa käyttäjän toimenpitein. Tässä ei siis tule tarvita erityisosaamista eikä erikoistyökaluja, ja tarvittavat huoltotoimenpiteet tulee voida oppia kohtuullisessa ajassa.

Järjestelmä on pääasiassa irti valtakunnan sähköverkosta, mutta on mahdollista, että ylijäämäenergia voidaan myydä valtakunnan verkkoon. Joka tapauksessa järjestelmä on kyettävä käynnistämään ja sammuttamaan itsenäisesti turvautumatta ulkopuoliseen energiansyöttöön.

Järjestelmä jakaantuu luontevasti seuraaviin osajärjestelmiin (ks. kuva 2.1)

1. energian (sähkö ja lämpö) tuotantojärjestelmä
2. energian (sähkö ja lämpö) varastointijärjestelmä
3. ohjausjärjestelmä.

## 2.2 Järjestelmävaatimukset

Konseptin pohjalta järjestelmälle asetetaan seuraavat vaatimukset:

- V1** Järjestelmän on tuotettava kohteen tarvitsema sähköenergia.
- V2** Järjestelmän on tuotettava kohteen tarvitsema lämpöenergia.

**V3** Laitekäyttökohteessa ei sallita yli XX minuutin sähkökatkoksia<sup>1</sup>.

**V4** Järjestelmän on käynnistytävä itsenäisesti lämpötila-alueella  $-20 \dots + 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**V5** Järjestelmän on toimiessaan siedettävä lämpötiloja alueella  $-40 \dots + 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**V6** Järjestelmä on sammutettuna ja sääsuojattuna voitava jättää tilaan, jossa lämpötila on  $-40 \dots + 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**V7** Järjestelmän käyttäjätason kunnossapito on voitava itsenäisesti oppia yhdessä päivässä.

**V8** Järjestelmän käyttäjätason kunnossapitoon ei tarvita erikoistyökaluja.

**V9** Järjestelmä on ympäristöolosuhteiden salliessa voitava käynnistää sen omin mahdollisuuksin.

**V10** Järjestelmä on voitava sammuttaa sen omin mahdollisuuksin.

---

<sup>1</sup>Tässä ei kiinnitetä numeerista arvoa – riittää ottaa tämä huomioon.

### 3 Energian tuotanto

Järjestelmä tuottaa sekä lämpöä että sähköenergiaa. Kuitenkaan energiaa tuottava osajärjestelmä ei välttämättä tuota vain toista näistä, kuten tullaan pian huomaamaan. Tämän vuoksi tässä luvussa käsittely keskittyy kuvaamaan, kuinka energianlähde (primäärienergia) saadaan muunnetuksi halutuksi energian muodoksi.

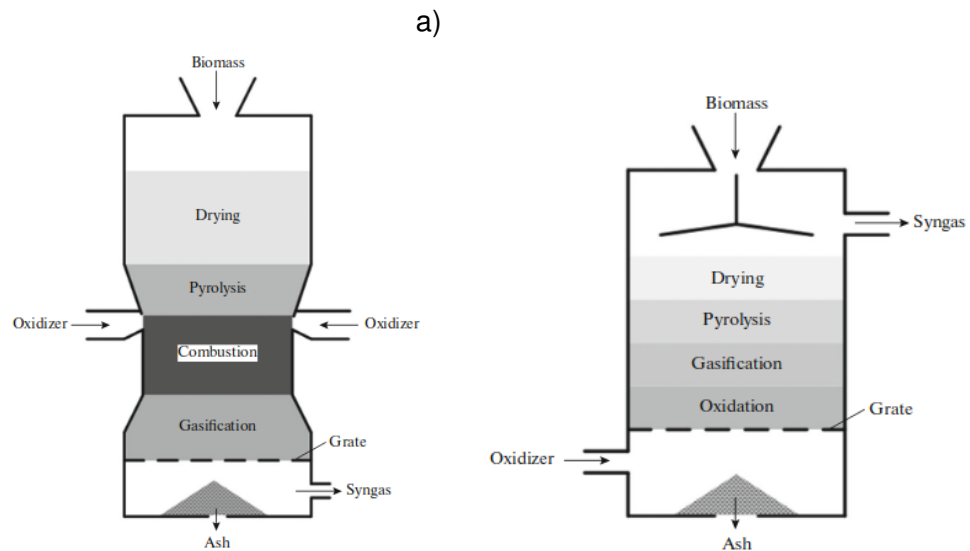
Vaihtoehtoisia energiantuotantotapoja on lukuisia eikä niistä tässä tutkielmassa kyetä käsittelemään kuin vähäinen osa. Käsittely on rajattu muutamaan mielenkiintoiseen vaihtoehtoon, joista osaa voidaan luonnehtia perinteisiksi, osaa nykyaikaisiksi ja osaa tulevaisuuden mahdollisuuksiksi. Tarkastelussa ei mennä yksityiskohtiin, vaan tyydytään kuvaamaan toimintaperiaate ja otetaan esille ko. tuotantotavan hyviä ja huonoja puolia. Lisäksi tullaan huomaamaan, että eräät tuotantotavat suorastaan edellyttävät rinnakkaiskäyttöä jonkin toisen tuotantotavan kanssa.

Tavanomaisia ja jopa perinteisiä lämmöntuotantotapoja, kuten puuhellat, -uunit, klapi-, hake- ja pellettikattilat, ei tässä juuri käsitellä. Kuitenkin esimerkiksi puuhella on vallan erinomainen laite tuottaessaan lämpöä ja mahdollistaessaan samalla ruuanlaiton. Klapi- ja hakekattila taas voi lämmityksen lisäksi tuottaa riittävästi energiaa sähkön tuottamiseksi orgaanisella Rankine-kierroilla (ks. luku 3.3).

#### 3.1 Puukaasumoottorigeneraattori

Kun puuta (tai ylipäätään biomassaa) kuumennetaan vähähappisessa ympäristössä, puhutaan *pyrolyysistä* (engl. pyrolysis), jolloin päätavoitteena on tuottaa bioöljyä yms. Käytettävä lämpötila on noin 400 . . . 600 °C. Kun lämpötilaa nostetaan (noin 700 °C [6]), puhutaan *kaasuttamisesta* (engl. gasification). Tuloksena on *puukaasua* (tai tuotekaasua), josta englanninkielellä käytetään nimitystä wood gas (producer gas) tai teknis-tieteellisessä kielessä nimitystä syngas [7]. Kaasu koostuu pääasiassa vedystä (H<sub>2</sub>, 8–15 %), häästä (CO, 15–22 %), hiilidioksidista (CO<sub>2</sub>, 5–27 %), typestä (N<sub>2</sub>, 44–70 %) ja metaanista (CH<sub>4</sub>, 1–5 %). Kaasussa on yleensä epäpuhtautena mm. tervaa ja tuhkaa [8].

Puukaasua tuottaa *kaasutin*, josta käytetään myös nimitystä kaasutusreaktori, engl. gasifier. Niitä ovat toimintaperiaatteeltaan esimerkiksi *vastavirtakaasutin* (engl. updraft/ counter-current gasifier), *myötävirtakaasutin* (engl. downdraft/cocurrent gasifier), *leijupetikaasutin* (engl. fluidized bed gasifier) ja *monivaihekaasutin* (engl. multistage gasifier). Näistä kaksi ensimmäistä ovat tässä työssä tarkasteltavan tilanteen kokoluokkaan sopivimpia [8].



**Kuva 3.1.** Periaatekuvat a) myötävirtakaasuttimesta ja b) vastavirtakaasuttimesta (kuvat lähteestä[8])

Myötävirtakaasuttimessa (ks. kuva 3.1a) hake, pelletti tms. biomassaa syötetään ylhäältä ja ilma syötetään kaasuttimen keskivaiheille, jonne muodostuu palamisvyöhyke. Palamisvyöhykkeen yläpuolella hake kuivuu ja pyrolysoituu, ja sen alapuolella tapahtuu kaasun muodostuminen niukassa hapessa ja puukaasu (synteesikaasu) poistuu; kaasu virtaa siis polttoainevirran myötäisesti, tästä nimi.

Vastavirtakaasuttimeen (ks. kuva 3.1b) hake syötetään ylhäältä ja ilma alhaalta. Hake aluksi kuivuu ja painuessaan alaspäin pyrolysoituu ja kaasun muodostuu, ja lopulta palaa tuhkakaksi. Muodostuva puukaasu poistuu kaasuttimen yläosasta. Koska kaasu kulkeutuu pyrolyysivyöhykkeen läpi, on kaasussa merkittävästi tervaa ja öljyjä, jotka tulevat poistettua ajatellen kaasun käyttöä moottorissa [8].

Kattava kuvaus muista kaasutinratkaisuista on esimerkiksi [9].

Puukaasu käy hiukkasista ja muista epäpuhtauksista puhdistettuna polttoaineeksi kipinäsytytteiseen moottoriin. Saavutettava teho on pienempi johtuen puukaasun bensiiniä pienemmästä lämpöarvosta: puukaasu-ilmaseoksen lämpöarvo on noin  $2,5 \text{ MJ/Nm}^3$ , kun taas bensiini-ilmaseoksen  $3,7 \text{ MJ/Nm}^3$  [10]. Toisaalta puukaasun puristuskestävyys on parempi, millä tilannetta voidaan kompensoida. Puristuskestävyys on jopa niin hyvä, ettei puukaasu yksin sovi dieselmoottorin polttoaineeksi, vaan vaatii polttoaineseoksen sytyttämiseksi pienen määrän dieselpolttoainetta (ns. dual-fuel -käyttö). [11]

Puukaasu soveltuu myös kaasuturbiinin polttoaineeksi, joskin sen alhainen lämpöarvo saattaa edellyttää joitain rakennemuutoksia etenkin tässä työssä kyseeseen tulevissa pienissä turbiineissa.[12, 13]

Moottori kytketään generaattoriin tuottamaan sähköä. Käytettäessä kaasuturbiinia sen korkea pyörimisnopeus tuottaa korkeataajuisia sähköä, joka saadaan taajuusmuuttajalla muutetuksi tavanomaiseksi 50 Hz vaihtovirraksi.

Moottori tuottaa myös lämpöenergiaa käyttökohteeseen, sillä sen jäähdytyslämpö ja pakokaasujen lämpö voidaan hyödyntää. Moottorin jäähdytysvesi kierrätetään joko suoraan lämmönjakoverkoston tai tavallisemmin varaajaan, jolla lämmitystarpeen hetkelliset huiput saadaan tasatuksi. Pakokaasut johdetaan nesteen lämmittävään lämmönvaihtimeen ja siitä edelleen lämmönjakoverkoston.

Puukaasumoottorigeneraattori on perinteistä, koeteltua tekniikkaa. Kunnossapitotoimet ovat yleensä varsin suoraviivaisia, mutta jatkuvassa käytössä esimerkiksi moottoriöljy joudutaan vaihtamaan muutaman viikon välein. Kaasutin reagoi hitaasti kuormituksen muutoksiin, joten järjestelmään on hyvä liittää jokin (sähkön) varastointi.

## 3.2 Aurinkoenergia ja polttokenno

Auringon Suomen maaperälle tuottama vuotuinen energia on Etelä-Suomessa noin 3 500 MJ/m<sup>2</sup> ja Lapissa noin 2 800 MJ/m<sup>2</sup>, ja suuntaamalla aurinkopaneeli optimaalisesti voidaan tätä kasvattaa jopa 30 % [14]. Jo muutaman neliön alalle saapuu siis tavanomaisen omakotitalon tarvitsema vuotuinen energiamäärä.

Tässä luvussa tarkastellaan lyhyesti, miten tämä energia valjastetaan ja missä määrin se kyetään ottamaan talteen. Lisäksi käsitellään myös polttokenno energian tuottajana, sillä se on hyvin luonteva aurinkoenergiajärjestelmän rinnakkaisjärjestelmä.

### 3.2.1 Aurinkopaneeli

*Aurinkopaneeli* (engl. photovoltaic panel, PV panel, solar panel) koostuu *aurinkokennoista* (engl. PV cell), joita on kytketty rinnan ja sarjaan halutun jännitason ja virrantuottokyvyn aikaansaamiseksi. Yksittäinen aurinkokenno on nykyään tyypillisesti np-puolijohdekenno. n-tyypin puolijohde voi olla esimerkiksi arseenilla tai antimonilla seostettua piitä (SiAs- tai SiSb-puolijohde), joka sisältää vapaita elektroneja. p-tyypin puolijohde taas voi olla galliumilla tai indiumilla seostettua piitä (SiGa- tai SiIn-puolijohde), jonka rakenteesta puuttuu elektroneja eli siinä on ”positiivisia aukkoja”. Kun riittävän energian omaava fotonitörmää np-puolijohdeeseen, saattaa se vapauttaa n-tyypin puolijohdeesta elektronin, joka puolijohdeiden liitospinnassa vallitsevan sähkökentän vuoksi siirtyy p-tyypin puolijohdeeseen ja saa aikaan sähkövirran.[15]

Tällä hetkellä vallitseva aurinkokennoteknologia perustuu juuri piipohjaisiin puolijohdeisiin, joista enemmistönä ovat monikiteistä piitä käyttävät. Yleistymässä ovat yksikiteistä piitä käyttävät kennot. Piihin perustuvan aurinkokennon hyötysuhteena on laboratorioolosuhteissa saavutettu noin 27 %, mutta käytännössä hyötysuhde jää alle 20 %:n [16].

Kerrostamalla erityyppisiä puolijohhteita, jotka reagoivat valon eri aallonpituuksiin saadaan moniliitoskenno (engl. multi-junction cell), jollaisen hyötysuhde voi olla yli 50 % [17].

Aurinkopaneelin teho ilmaistaan yleensä sen antamana *huipputehona* (engl. peak power; yksikkönä kWp, jossa ”p” viittaa huipputehoon), jonka paneeli tuottaa standardoiduissa testausolosuhteissa (Standard Test Conditions, STC):

- säteilyn intensiteetti on  $1\,000\text{ W/m}^2$
- säteily sapuu paneeliin kohtisuoraan
- kennojen lämpötila on  $25\text{ °C}$
- ilmassa (air mass) on 1,5; tämä tarkoittaa, että auringon säteet tulevat ilmakehään sen verran alhaalla, että ne kulkevat puolitoistakertaisen matkan ilmakehässä verrattuna lyhyimpään mahdolliseen.

Toinen tapa on ilmaista huipputeho *nimellisessä käyttölämpötilassa* (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT):

- säteilyn intensiteetti on  $800\text{ W/m}^2$
- kennojen lämpötila on  $45 \pm 3\text{ °C}$
- tuulen nopeus  $1\text{ m/s}$  ja lämpötila  $20\text{ °C}$ .

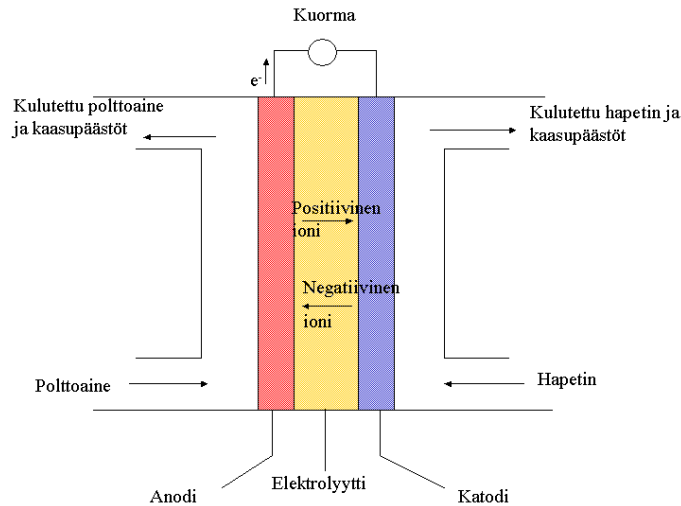
Näistä kahdesta STC-teho on suurempi kuin NOCT-teho. Tämä johtuu paitsi NOCT-olosuhteen alhaisemmasta säteilyn intensiteetistä myös siitä, että kennojen lämpötila valitaan NOCT-olosuhteissa korkeammaksi. Yleisesti voidaan todeta, että aurinkopaneelin teho laskee jopa 0,45 % jokaista yhden asteen lämpötilan kohoamista kohden [18]. Voikin olla hyvä lisätä paneeliin jäähdytys, jolloin puhutaan PV-T-paneelistä (engl. photovoltaic-thermal). Tällainen paneeli paitsi tuottaa tavanomaista paremmin sähköä lämpimissä olosuhteissa myös tuottaa lämpöä vaikkapa käyttöveden lämmittämiseksi. Lisäksi pienempi lämpörasitus lisää paneelin elinikää. Tällainen järjestelmä saattaa olla edullinen myös Suomen oloissa – ainakin leveysasteella 43 on saatu lupaavia tuloksia [19].

### 3.2.2 Polttokenno

Yksinkertaisimmillaan *polttokennossa* on kaksi metallista elektrodia elektrolyytissä. Toisen elektrodin luo ohjataan vetyä  $\text{H}_2$  ja toisen luo happea  $\text{O}_2$ . Vety hajoaa elektrodin ja elektrolyytin rajapinnassa protoneiksi  $\text{H}^+$  ja elektroneiksi  $\text{e}^-$ . Elektronit kulkeutuvat johdinta pitkin toiselle elektrodille, jossa ne yhtyvät protonien ja hapen kanssa vedeksi, ja elektronien liike synnyttää kennon sähkövirran. [20]

Polttokennon hyvinä puolina voidaan pitää, ettei siinä ole (juurikaan) liikkuvia osia, ne voidaan suoraviivaisesti skaalata erilaisiin tehontarpeisiin eikä niissä synny juurikaan haitallisia päästöjä. Merkittävimpiä huonoja puolia on ainakin toistaiseksi käytettävän teknologian hinta ja verrattain alhainen energiatiheys. Ongelmia voi aiheuttaa myös polttoken-



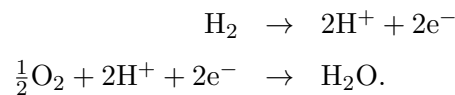


**Kuva 3.2.** Polttokennon toimintaperiaate (kuva Wikipediasta)

nossa syntyvän veden jäätyminen, mikä on mahdollista, jos kenno sammutetaan kylmissä olosuhteissa. [20]

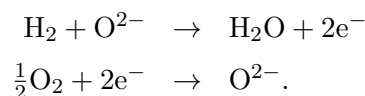
Polttokennojen päätyypeinä voidaan tätä nykyä pitää *protoninvaihtopolttokennoa* (engl. proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) ja *kiinteäoksidipolttokennoa* (engl. solid oxide fuel cell, SOFC), mutta tyyppejä on useita muita; hyvä katsaus on [20].

PEMFC-polttokennossa nimenomaan protonit toimivat varauksensiirtäjinä reaktioiden ollessa



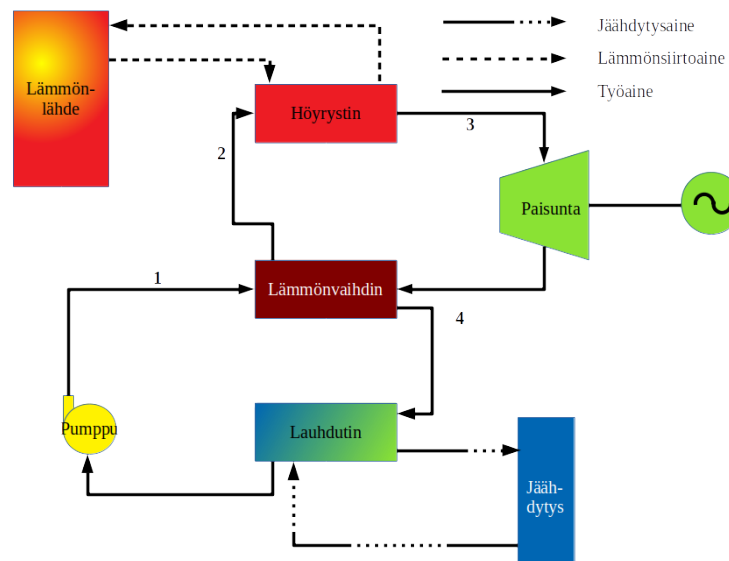
Sen etuina on matala toimintalämpötila ja suurehko tehotiheys. [20]

SOFC-polttokennossa varauksensiirtäjinä toimivat happi-ionit reaktioiden ollessa



Sen käyntilämpötila on tyypillisesti korkea, yli 600 °C, mutta polttoainevalikoima laaja. Polttoaineeksi soveltuvat hiilivedyt, mm. polttoöljy, joka reformaattorissa hajotetaan polttokennolle soveltuvaan muotoon vedyksi. [20]

Tässä työssä tarkasteltavassa järjestelmässä PEMFC-polttokenno voisi olla mielekkäin valinta. Esimerkiksi aurinkopaneelit saattavat tuottaa ylenmäärin sähköä, joka voidaan varastoida tuottamalla sitä käyttäen vetyä hajottamalla vettä elektrolyyttisesti (ks. luku 4.4). Vety varastoidaan ja aurinkopaneelien tuottaman sähkö hiipussa se ohjataan polttokennoon tuottamaan tarvittava sähkö. Toki sähköä voidaan varastoida myös akkuihin, mutta polttokennon pitkä käyttöikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon.



**Kuva 3.3.** Orgaaniseen Rankine-kiertoon liittyvät laitteet (mukailtu lähteen [21] pohjalta)

### 3.3 Orgaaniseen Rankine-kiertoon perustuva generaattori

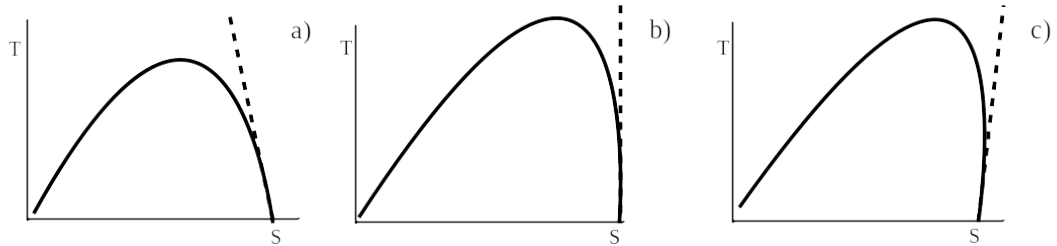
*Rankine-kierto* (engl. Rankine cycle) on tavanomainen höyryvoimaloissa toteutettava periaate:

1. neste tai ylipäätään työaine (engl. working fluid) paineistetaan
2. paineistettu työaine kuumennetaan höyryksi
3. höyry johdetaan esimerkiksi turbiiniin tuottamaan sähköä
4. turbiinissa paisunut höyry lauhdutetaan ja se palaa paineistettavaksi.

Rankine-kierrossa käytettävä työaine on tavallisesti vettä, jolloin käytettävät höyryn lämpötila ja paine ovat korkeat eli jopa 600 °C ja 30 MPa. *Orgaanisessa Rankine-kierrossa* (engl. Organic Rankine Cycle, ORC) käytettävä työaine on nimenmukaisesti orgaanista, kuten jokin hiilivety, kylmäaine tms. Tällöin käytettävät lämpötilat ovat alhaisempia eli välillä 60...350 °C. ORC-prosessin toteutus on esitetty kuvassa 3.3, jossa käytetty numerointi viittaa edellä lueteltuihin Rankine-kierron vaiheisiin. Kuvaan on hahmoteltu myös lämmönvaihdin, jolla työaineesta otetaan paisunnan jälkeen lämpöä paineistetun työai-  
neen esilämmittämiseksi.

Erinomainen katsaus ORC-järjestelmiin on [21], johon tämä yhteenveto perustuu.

Vesi on Rankine-kierrossa ns. *märkä työaine* (engl. wet fluid) eli sille kylläisen ja tulistetun alueen rajalla  $dT/dS < 0$  (ks. kuva 3.4a). Tällainen työaine on syytä tulistaa ennen turbiiniin johtamista, jotta se kuivuu eikä turbiinia kuluttavia pisaroita esiinny. Kun toimitaan alhaisilla lämpötiloilla on edullista käyttää *kuivaa tai isentrooppista työainetta* (engl. dry/



**Kuva 3.4.** a) Märkään, b) isentrooppiseen ja c) kuivaan työaineeseen liittyvät T-S-piirrokset; katkoviiva kuvaa suuretta  $dT/dS$  kylmäisen ja tulistetun alueen rajalla

isentropic fluid), jolle vastaavasti  $dT/dS > 0$  ja  $dT/dS = 0$  (ks. kuvat 3.4b ja c). Tällöin höyrystetty työaine käyttäytyy tulistetun lailla eikä erilliselle tulistukselle ole tarvetta.

ORC-järjestelmän lämmönlähde voi olla hyvin monipuolisesti mikä tahansa suhteellisen alhaisen lämpötilan lähde. Tässä työssä käsiteltävässä tapauksessa lämmönlähde voisi olla aurinkokeräin, moottorin hukkalämpö tai varsinainen lämmityskattila.

Järjestelmän ominaisuudet riippuvat suuresti valitusta työaineesta ja generaattoria pyörittämään valitusta koneesta. Koska käytettävät lämpötilat ovat alhaisia, jää järjestelmän termien hyötysuhde

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (3.1)$$

pieneksi, kun  $T_L$  on lauhduttimen lämpötila ja  $T_H$  höyrystimen lämpötila – tyypillisesti liikutaan noin 10 % lukemissa. Koska järjestelmän teho on etenkin tässä tarkasteltavissa tapauksissa pieni, vain muutama kymmenen kilowattia, on myös isentrooppinen hyötysuhde (vrt. [22, s. 362])

$$\eta_T = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \quad (3.2)$$

usein vain 60–70 %, kun  $h_1$  on työaineen entalpia ennen paisuntaa,  $h_{2a}$  entalpia todellisessa paisunnan jäkeisessä tilassa ja  $h_{2s}$  entalpia isentrooppisen paisunnan jälkeisessä tilassa. Kuitenkin ORC-järjestelmä tarjoaa mielenkiintoisen tavan hyödyntää moninaiset alhaisen lämpötilan lämmönlähteet.

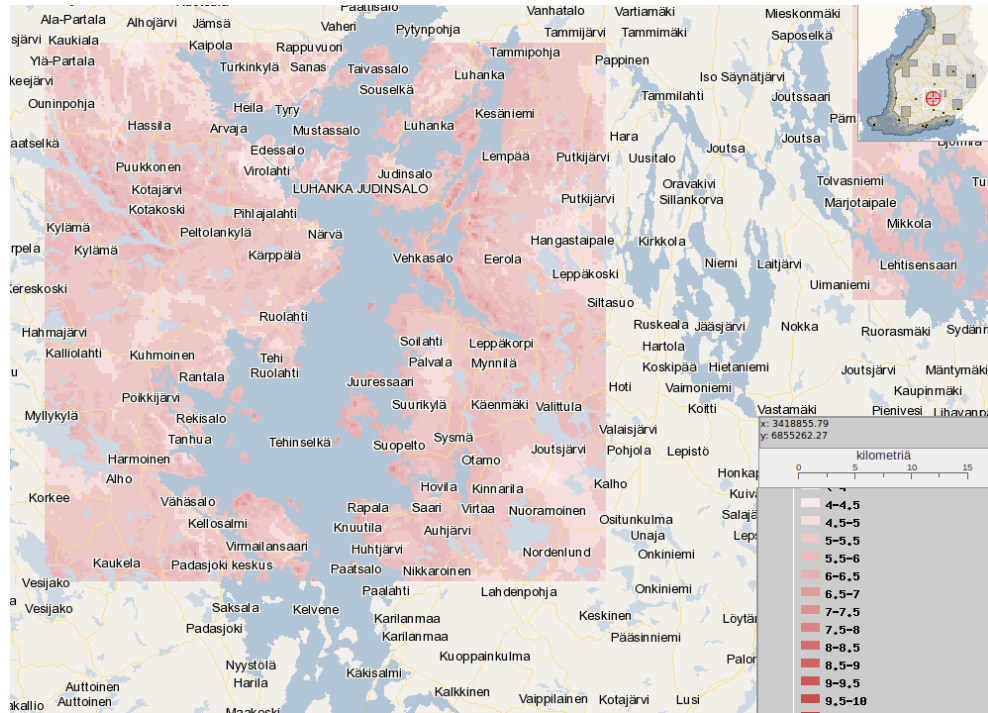
### 3.4 Muita

Pienimuotoiseen energiantuotantoon on tarkasteltujen lisäksi olemassa lukuisia muita vaihtoehtoja. Kiinnostavia vaihtoehtoja voisivat olla tuuligeneraattori, pieni vesivoimala tai lämpösähköinen generaattori (engl. Thermal Electric Generator, TEG).

*Tuuligeneraattorin* tai -voimalan tuottama teho on

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A \eta, \quad (3.3)$$

jossa  $\rho$  on ilman tiheys (erenpinnan tasossa, lämpötilassa 15 °C ja 1 bar ilmanpaineessa se on noin  $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  on voimalan roottorin pyyhkäisemän alueen pinta-ala ja



**Kuva 3.5.** Vuotuinen keskituulennopeus Luhangan alueella 50 m korkeudessa Tuuliatlaksen mukaan [24]

$\eta$  on voimalan hyötysuhde. On osoitettu, että hyötysuhteen suurin mahdollinen arvo on  $\eta = 0,59$  (ns. Betzin laki) [15]. Voimalan tuottama teho kasvaa kolmannessa potenssissa tuulen nopeuden funktiona, kun taas tuulen nopeuteen vaikuttaa maanpinnan muoto sekä paikka ja korkeus, jonne voimala sijoitetaan.

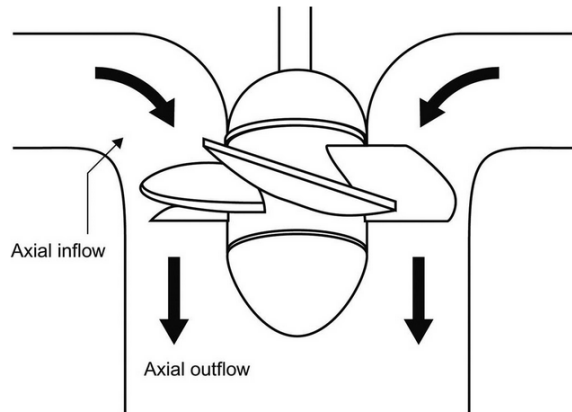
Suomen Tuulivoimayhdistys pitää yllä sivustoa, josta löytyy kattavasti tietoa tuulivoimalan rakentamisesta Suomessa [23]. Suomen Tuuliatlaksesta löytyy tietoa tuulen nopeudesta rajoitetusti eri paikkakunnilla, eri korkeuksilla jne. (ks. kuva 3.5) [24]. Eräänlaisena rajana tuulienergian tuottamiseen on pidetty noin 3 m/s. Tähän näyttäisi päästävän varsin usein myös Suomen sisämaassa. Joka tapauksessa tuulivoima tarvitsee rinnalleen joko toisen energiantuottotavan tai keinon varastoida tuulen tuottama energia.

Pieni *vesivoimalaitos* (engl. hydro power plant) on pitkäikäinen ja yleensä luotettavuudeltaan hyvä. Vesilain (27.5. 2011/587) mukaan voimalaitoksen rakentaminen on aina luvanvarainen toimenpide ja luvan myöntää aluehallintovirasto.

Vesivoimalasta saatava teho on

$$P = \eta \rho g Q h, \quad (3.4)$$

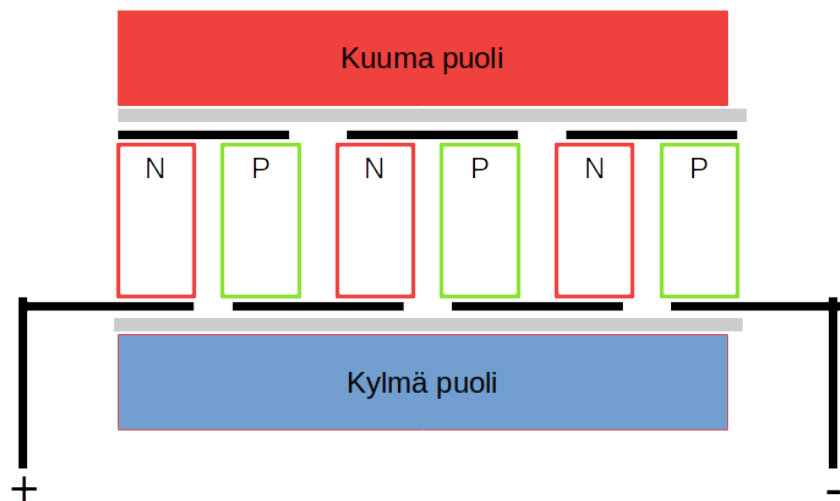
jossa  $\eta$  on voimalan kokonaishyötysuhde,  $\rho$  virtaavan veden tiheys (eli noin 1 000 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  on maan vetovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyyys (eli noin 9,81 m/s<sup>2</sup>),  $Q$  on virtaama (yksikkönä m<sup>3</sup>/s) ja  $h$  on putouskorkeus metreinä. Tulo  $\eta \rho g$  on tavattu yhdistää *hyötysuhdekertoimeksi* ja pienille voimalaitoksille sen voidaan arvioida olevan 0,0072 kg/(m<sup>2</sup>s<sup>2</sup>), joka vastaa hyötysuhdetta  $\eta \approx 0,73$ , joskin tämä voi tarkasteltavana olevassa tapauksessa olla tätä huomattavasti pienempi. [25]



**Kuva 3.6.** Potkuriturbiinin rakenne (kuva lähteestä [26])

Vesivoimalaan kuuluu olennaisimpina osina pato ja turbiini. Padolla luodaan haluttu putouskorkeus eli erotus voimalaan virtaavan veden ja siitä lähtevän veden tason välillä. Tässä tarkastelussa kyseeseen tulevilla ns. mikrovoimaloissa (alle 100 kW; Suomessa luokitus loppuu minivoimaloihin eli tehoon alle 1 MW) edullisin turbiini on potkuriturbiini. Se on olennaisesti kuin veneen potkuri, mutta toimii siis käänteisesti (ks. kuva 3.6). Voidaanpa pienissä voimalaitoksissa käyttää myös vesipumppua käänteisesti kytkettynä, mikä saattaa olla edullisin ratkaisu. [26]

*Lämpösähköinen generaattori* (engl. thermo electric generator, TEG) koostuu lämpösähköisistä materiaaleista (engl. thermo electric material), joissa lämpötilagradientti ("toinen pää kylmässä, toinen kuumassa") saa aikaan sähkövirran. Tyypillisesti generaattorissa liitetään sarjaan ja rinnan n- ja p-tyypin puolijohteita siten, että lämpöä johdetaan parin toiseen päähän ja toista päätä jäähdytetään (ks. kuva 3.7). Generaattorin etuja ovat luotettavuus, äänettömyys ja pieni koko. Se on kuitenkin edelleen varsin tehoton hyötysuhteen ollessa noin 5 %, ja kallis. Hyvä katsaus teknologiaan on [27].



**Kuva 3.7.** Lämpösähköisen generaattorin periaate; mustalla on merkitty johtimet ja harmaalla sähköinen eristemateriaali, jolla on kuitenkin hyvä lämmönjohtokyky (kuva mukailen lähteestä [27])

## 4 Energian varastointi

Tarkasteltava järjestelmä tuottaa aika ajoin energiaa – lämpöä tai sähköä – yli tarpeen ja toisaalta taas lähes varmasti esiintyy tilanteita, joissa hetkellinen energiantuotantokyky ei kata tarvetta. Tällaisia tilanteita ajatellen on järjestelmässä jokin tapa varastoida tuotettua energiaa sekä menetelmä hallitusti purkaa tätä varastoitua energiaa.

Tässä luvussa tarkastellaan energian varastointitapoja niin lämmön kuin sähköenergian osalta. Raja on joskus häilyvä eli lämpönä varastoitu energia voidaan palauttaa sähköinä ja päinvastoin. Hiljattain on uutisoitu tamperelaisen Polar Night Energy Oy:n konseptista varastoida tuuli- tai aurinkovoimalan ylijäämä sähköä lämpönä hiekkaan [28]. Lämpö purettaisiin käyttöveden tai kiinteistön lämmitykseen. Saksassa taas on rakennettu 30 MWh kivivarasto, jonka kivet kuumennetaan tuulivoimalan tuottamalla sähköllä 600 °C lämpötilaan, ja lämpö muutetaan sähköksi höyryturbiinilla [29].

Energian varastointiin liittyy väistämättä häviöitä, jotka koostuvat energian muuttamisesta toiseen muotoon (esimerkiksi sähköenergia kemialliseksi energiaksi akussa) tai esimerkiksi lämpöhäviöistä lämminvesivaraajan seinämien läpi. Vastaavat häviöt esiintyvät myös palautettaessa varastoitua energiaa haluttuun muotoon. Eri varastointitapoja vertaessa onkin syytä kiinnittää huomiota muodostuviin häviöihin.

Mainio katsaus energian varastointiin on [30], johon seuraava tarkastelu paljolti perustuu.

### 4.1 Lämmön massavaraajat

Tavanomainen lämminvesivaraaja on esimerkki *tuntuvan lämmön* (engl. sensible heat) hyödyntämisestä. Lämpöä varastoidaan aineeseen, jonka olotila (kiinteä, neste, kaasu) ei muutu. Lämpötilanmuutokseen  $\Delta T$  liittyvä energiamäärän muutos on

$$Q = \rho_f c_p V \Delta T, \quad (4.1)$$

jossa  $\rho_f$  on aineen tiheys,  $c_p$  sen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa ja  $V$  varaajan tilavuus. Huomattakoon, ettei yhtälö (4.1) sisällä varastoinnin eikä purkamisen häviöitä.

Vesi on tällaisessa varaajassa hyvä, sillä sen ominaislämpökapasiteetti  $c_p = 4182 \text{ J/(kg K)}$ , mutta toisaalta veden käyttökelpoinen lämpötila-alue on vain noin 5...95 °C; kiinteistön lämmitystä ajatellen alaraja on yleensä noin 40 °C. Erilaisilla kivimateriaaleilla käyttökelpoinen lämpötila-alue on huomattavasti suurempi ja niiden suuri tiheys kompensoi al-

haisempaa ominaislämpökapasiteettia. Tällainen varaaja mahdollistaa hyvin johdannossa mainitun höyryntuotannon.

Materiaalin *latentti lämpö* (engl. latent heat) muuttuu faasimuutoksessa (kiinteästä nesteeksi, nesteestä kaasuksi tai päinvastoin) tai kiderakenteen muuttuessa. Tällöin materiaali sitoo tai vapauttaa lämpöä vakiolämpötilassa, sillä Gibbsin vapaa energia (kemiallinen potentiaali) ei muutu eli

$$\begin{aligned}\Delta G &= \Delta H - T\Delta S = 0 \\ \Leftrightarrow \Delta H &= T\Delta S,\end{aligned}\tag{4.2}$$

jossa  $\Delta H$  on entalpiian muutos ja  $\Delta S$  entropian muutos.

Esimerkiksi rauta(II)sulfidille FeS kidemuutoslämpötila on 138 °C ja kidemuutosentropia 4,05 J/(mol K). Sen sulamislämpötila ja -entropia taas ovat 1 190 °C ja 21,51 J/(mol K). Se siis sitoo ja vapauttaa lämpöä huomattavasti enemmän sulaessaan kuin kiderakenteen muuttuessa. Aivan toisenkaltainen aine on litiumsulfaatti Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, jolle nämä lämpötilat ja entropiat ovat vastaavasti 577 °C ja 29,2 J/(mol K) sekä 860 °C ja 7,9 J/(mol K).

Varastointiteknologiassa mielenkiinto näyttää kohdistuneen juuri faasimuutoksen eikä niinkään kiderakenteen muutoksen hyödyntämiseen. Tällainen varastointi mahdollistaa korkean lämpötilan ja suuren varastointitiheyden [31].

Tarkasteltavana olevassa järjestelmässä varastointitarve voisi olla kuitenkin alhaisissa lämpötiloissa. Tällöin *orgaaniset faasimuutosmateriaalit* voisivat soveltua tarkoitukseen. Esimerkiksi parafiiniin (engl. paraffin wax, C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>) sulamispiste on noin 64 °C ja muodostumisentalpia noin 174 kJ/kg. Korkeampaan lämpötilaan voisi soveltua esimerkiksi naftaleeni (engl. naphthalene, C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>), jonka sulamispiste on noin 80 °C ja muodostumisentalpia noin 148 kJ/kg. [30]

Jos käytettävässä laitteistossa tarvittava lämpövirta on  $\dot{Q}_p$ , lämpöä käyttävän laitteiston hyötysuhde on  $\eta$ , tavoiteltu ylin ja alin lämpötila  $T_H$  ja  $T_L$ , ja lämmönsiirtoaineen (engl. heat transfer fluid, HTF) ominaislämpökapasiteetti on  $c_f$ , niin tarvittava lämmönsiirtoaineen massavirta on [31]

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_p}{\eta c_f (T_H - T_L)}.\tag{4.3}$$

Huomattakoon, että tämä ei riipu varastointiteknologiasta.

Jos nyt  $\Delta t$  on ajanjakso, jonka aikaa varaston on kyettävä luovuttamaan lämpötilaltaan välillä  $[T_L, T_H]$  olevaa lämmönsiirtoainetta massavirralla (4.3), niin tuntuvaan lämpöön perustuvan varaston ideaalinen massa ja tilavuus on vastaavasti

$$m = \Delta t \dot{m}; \quad V = \Delta t \dot{m} / \rho.\tag{4.4}$$

Varaston varaava massa voi koostua myös kiinteästä aineesta, jonka huokoset on täytetty lämmönsiirtoaineella ja tämän massan läpi lämmönsiirtoaine virtaa putkissa. Tällöin



varaston vähimmäistilavuudelle  $V_{K, min}$  pätee

$$\{\rho_K c_K(1 - \epsilon) + \rho_f c_f \epsilon\} V_{K, min} \geq \rho_f c_f V, \quad (4.5)$$

jossa  $\rho_K$  on kiinteän aineen tiheys,  $c_K$  sen ominaislämpökapasiteetti ja  $\epsilon$  on lämmönsiirtoaineen osuus varaston massasta, jolloin  $1 - \epsilon$  on kiinteän aineen osuus, ja tilavuus  $V$  on saatu yhtälöstä (4.4). [31]

Faasimuutokseen perustuvassa varastossa faasimuutosmateriaali pakataan esimerkiksi metallikuoren peittämiksi kapsleiksi ja kapsleiden jättämät huokokset täytetään lämmönsiirtoaineella. Lämmönsiirto massaan ja massasta tapahtuu lämmönsiirtoaineella täytettyin putkin. Tällaisen varaston vähimmäistilavuudelle  $V_{F, min}$  pätee

$$\{\rho_F \Delta H_F(1 - \epsilon) + \rho_f c_f (T_H - T_L)\epsilon\} V_{F, min} \geq \rho_f c_f V (T_H - T_L), \quad (4.6)$$

jossa  $\rho_F$  on faasimuutosmateriaalin tiheys,  $\Delta H_F$  faasimuutoslämpö (vrt. yhtälö (4.2)) ja  $\epsilon$  on lämmönsiirtoaineen osuus varaston massasta (ja  $1 - \epsilon$  siis faasimuutosmateriaalin osuus), ja tilavuus  $V$  on saatu yhtälöstä (4.4). Suotavaa on, että faasimuutoslämpötila on lähellä tavoiteltua ylintä lämpötilaa  $T_H$ . [31]

## 4.2 Lämmön kemiallinen varastointi

*Palautuvat kemialliset reaktiot* (engl. reversible chemical reaction) ovat mielenkiintoinen mahdollisuus varastoida lämpöä. Tällaisessa reaktiossa kemialliset yhdisteet muuntuvat tai jakautuvat uusiksi yhdisteiksi ja samalla vapauttavat tai sitovat lämpöä seuraavasti

$$\Delta H_r^0 = \sum \Delta H_f^0(\text{tuotteet}) - \Delta H_f^0(\text{lähtöaineet}), \quad (4.7)$$

jossa  $\Delta H_f^0$  on aineen muodostumisentalpia.

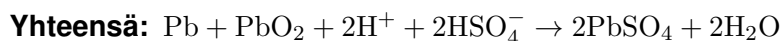
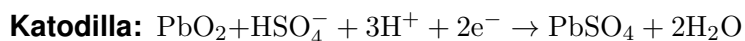
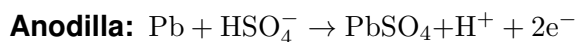
Esimerkki tällaisesta on vedyn ja hapen yhtyminen vedeksi  $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ . Veden muodostumisentalpia on  $-285,8$  kJ/mol, kun taas vedylle ja hapelle se on puhtaina alkuaineina 0. Yhden vesimoolin syntyminen tuottaa siis lämpöä liki 300 kJ. Tämä reaktio on kuitenkin vaikeasti käännettävissä tuottamaan lämpöä tuomalla vedestä vetyä ja happea, sillä reaktio vaatii noin 4 300 K lämpötilan – veden hajottaminen vedyksi ja hapeksi onnistuu toki elektrolyyttisesti. [30]

Käyttökelpoisia reaktioita kohtuullisissa lämpötiloissa saadaan aikaan mm. erilaisilla suolahydraateilla (engl. salt hydrates) ja ammoniumsuoloilla (engl. ammoniate salt). Aihepiiriä käsitellään kattavasti teoksessa [30].

### 4.3 Sähkön varastointi

Tarkasteltavaan järjestelmään soveltuvia sähkön varastointimenetelmiä ei näytä olevan kovin paljon. Lyhyeen huipputehon tarpeeseen soveltuvia varastointimenetelmiä ovat esimerkiksi *vauhtipyörät* (engl. flywheel) ja (*super-*) *kondensaattorit* (engl. (super) capacitor). Niitä on käsitelty mm. [26] ja [30], mutta niillä ei katsota olevan merkitystä tarkasteltavana olevassa järjestelmässä. Suurissa kohteissa sähköä voidaan varastoida esimerkiksi pumppaamalla vettä korkealla olevaan altaaseen tai säiliöön (ns. *pumppuvoimala*, engl. pumped-storage hydropower). Tarpeen mukaan vettä lasketaan altaasta turbiineihin tuottamaan sähköä. Tällä voidaan suurissa kohteissa (useita megawatteja) saada lataukseen kulutetusta energiasta takaisin jopa 80 %, mutta tarkasteltavana olevassa pienessä kohteessa tulos jää vähäisemmäksi, jos ylipäätään voidaan saada aikaan edes kohtuullinen varastointialtaan ja turbiinin korkeusero. Lisäksi tulee ottaa huomioon pienen vesivoimalan muutoinkin alhainen hyötysuhde (ks. luku 3.4 sekä [26, luku 10] ja [30, luku 6.5]). Suuriin kohteisiin soveltuva menettely on myös varastoida *sähköä paineilmana tai nesteytettynä ilmaa* (engl. compressed air energy storage, CAES), jota tarpeen mukaan puretaan paineilmamoottorin (usein turbiini) käyttövoimaksi. Tällaisen varaston voidaan odottaa palauttavan noin 65 % sen täyttämiseen käytetystä energiasta [26, luku 10].

*Akut* (engl. (secondary) battery) varastoivat sähköä kemiallisessa muodossa. Ne perustuvat galvaaniseen pariin eli elektrodeihin, jotka on upotettu elektrolyyttiin. Tavanomainen esimerkki on *lyijyakku* (engl. lead acid battery), jossa lyijyinen anodi ja lyijyoksidinen ( $\text{PbO}_2$ ) katodi ovat rikkihapossa ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Muodostuvat puolireaktiot ovat tällöin

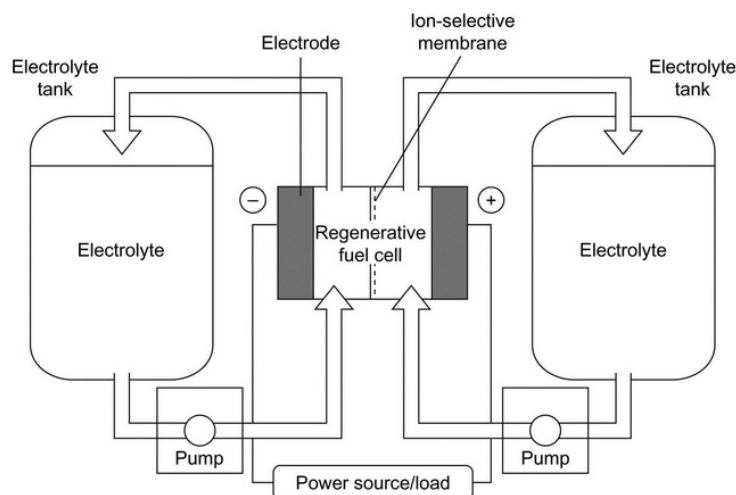


Puolireaktio anodilla tuottaa jännitteen  $-0,35$  V ja puolireaktio katodilla jännitteen  $+1,69$  V eli yhteensä saadaan  $+2,04$  V. [32, luku 11]

Erilaisia akkuteknologioita on lukuisia, joista [33] on antaa sangen hyvän yhteenvedon, johon seuraava tiivistys perustuu.

Edellä kuvattu *lyijyakku* on koeteltua perustekniikkaa. Se on varauskykynsä nähden raskas ja tilaavievä, ja sen varauskyky heikkenee purettaessa sitä toistuvasti ja nopeasti. Sen elinikää voidaan pidentää esimerkiksi seostamalla lyijyiseen anodiin aktiivihiltä.

*Litium-ioniakku* (engl. lithium-ion battery) on tällä hetkellä erittäin yleinen sähköajoneuvojen ja elektronisten laitteiden virtalähde. Negatiivisena anodina on näissä usein grafiitti ja positiivisena katodina esimerkiksi litiumkربولttioksidi ( $\text{LiCoO}_2$ ) tai litiumrautafosfaatti ( $\text{LiFePO}_4$ ). Elektrolyyttinä voidaan käyttää esimerkiksi etyleenikarbonaattia ( $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ ). Litiumioniakun varauskyky suhteessa sen vaatimaan tilaan ja painoon on hyvä etenkin ajoneuvokäyttöä ajatellen. Lisäksi ne säilyttävät varauksensa pitkään – jopa vuosia. Toisaalta ne ovat edelleen varsin kalliita. Litium-ioniakun lämpötila kasvaa huomattavasti, jos



**Kuva 4.1.** Virtausakun toimintaperiaate; kuva lähteestä [26]

sitä ylläpidetään tai puretaan liian nopeasti. Tämän vuoksi näissä akuissa on usein sisäänrakennettuna ohjausjärjestelmä (engl. battery management system, BMS), joka seuraa akun varaus- ja purkaustilannetta.

*Virtausakun* (engl. flow battery) elektrodit ovat inerttejä ja akussa kierrätetään elektrolyyttinä negatiivisella puolella (anolyytti, engl. anolyte) protoneja luovuttavaa ja positiivisella puolella (katolyytti, engl. catholyte) elektroneja vastaanottavaa nestettä (ks. kuva 4.1). Elektrolyytit erottaa protonit läpäisevä, mutta ionit pidättävä membraani. Näin elektronit joutuvat kiertämään johtavaa yhteyttä pitkin anodilta katodille ja syntyy sähkövirta. Anolyyttinä voidaan käyttää esimerkiksi vanadiini(II) ja vanadiini(III) ioniliuosta, jolloin katolyyttinä käytetään vanadiini(IV) ja vanadiini(V) ioniliuosta. Puretun akun anolyytti ja katolyytti ovat vastaavasti puhtaita vanadiini(IV)- ja vanadiini(III)-liuoksia, kun taas täyteen varatussa akussa ne ovat vanadiini(V)- ja vanadiini(II)-liuoksia. Periaatteessa virtausakku tuottaa virtaa niin kauan kuin sille syötetään kelvolliset elektrolyytit. Näin muodoin poltto-kennoa (ks. luku 3.2.2) voidaan pitää virtausakkuna. [26, luku 10]

Virtausakun varaus- ja tehontuottokyky on suuri. Sen kapasiteetti riippuu suoraan elektrolyytin määrästä, ja tätä voidaan suhteellisen yksinkertaisesti kasvattaa. Akku on pitkäikäinen ja turvallinen, mutta sen tuotteen valmistaminen on kuitenkin vielä vaikeuksissa vaativien materiaalien mm. membraanin vuoksi. [26, luku 10]

#### 4.4 Vety varastoinnin välineenä

Koska vetyä ei sellaisenaan esiinny vapaana luonnossa, on sitä esitetty kutsuttavan energian kantajaksi eikä energianlähteeksi [34]. Vedyllä on kuitenkin energiantuotannossa merkittäviä hyviä ominaisuuksia, mm. sen energiasisältö on suuri ja sen palamistuotteena on puhdas vesi. Vedyn käyttämisen suurimmat vaikeudet ovat sen tuottaminen ja varastointi.

Vetyä voidaan tuottaa elektrolyytisesti johtamalla veteen sähkövirta. Ilmiön tehostamiseksi veden pH säädetään teknologiasta riippuen joko happamaksi tai emäksiseksi. Näistä emäksinen vaihtoehto on tavallisempi, sillä näin vältetään korroosio-ongelmia. Kohottamalla lämpötilaa elektrolyysi tehostuisi, mutta tällöin alueella 600 . . . 1 000 °C törmätään materiaaliongelmiin. Hyvä katsaus aihepiiriin on [35].

Vetyä voidaan varastoida paineistettuna kaasuna, nesteenä tai metallihydrideihin sidottuna. Nesteytys edellyttää kaasun jäähdyttämistä, mikä tarkasteltavan kokoluokan järjestelmässä saattaa muodostua tarpeettoman kalliiksi. Metallihydridiin sidotun vedyn vapauttaminen taas edellyttää lämmöntuontia, mikä tulee ottaa huomioon. Tarkasteltavan kokoluokan järjestelmässä vedyn varastointi kaasuna paineessa 30 . . . 700 bar lienee mielekkäin vaihtoehto.

## 5 Järjestelmän mitoittaminen

Edellisissä luvuissa on hahmoteltu, millaisia teknologioita tarkasteltava järjestelmä saattaisi hyödyntää. Tässä luvussa paneudutaan järjestelmän mitoittamiseen: miten järjestelmän tuotanto- ja varastointikyky saadaan täyttämään sille asetetut vaatimukset? Kuten on huomattu, vaihtelee valittavien osajärjestelmien suorituskyky paitsi luotettavuustekijöiden myös mm. luonnonolosuhteiden mukaan, mikä tulee ottaa huomioon.

Järjestelmän mitoittaminen on *optimointitehtävä* ja tyypiltään lähinnä allokointitehtävä (engl. (resource) allocation problem) [36]. Tällaisessa tehtävässä tavoitellaan käytettävissä olevista resursseista jossain mielessä parasta yhdistelmää. Tehtävään tulee kytkeä jokin *objektifunktio* (engl. object function), jota minimoidaan tai maksimoidaan. Objektifunktioiksi on muotoiltu esimerkiksi 14 vaihtoehtoa [36], joista tämän tutkielman tapaukselta ajatellen mm. seuraavat ovat huomionarvoisia:

**O1: Minimoi järjestelmän kokonaiskustannus** (engl. minimize total cost of the system): minimoidaan investointi-, käyttö-, kunnossapito- yms. -kustannukset järjestelmän koko elinkaaren ajalta.

**O2: Minimoi käytettävä maa-ala** (engl. minimize land area).

**O3: Minimoi kunnossapitokustannus** (engl. minimize total maintenance cost).

**O4: Minimoi voimantuoton puutteen todennäköisyys** (engl. minimize loss of power supply probability).

Objektifunktio O1 on hyvin järkeenkäypä ja varsin tyypillinen kaikenlaisten investointien arviointitilanteissa. Objektifunktio O2 on hengeltään mielenkiintoinen ja epäilemättä mielekäs pohdittaessa laaja-alaisia rakennelmia, kuten tuulivoimalat tai aurinkopaneelikentät. Objektifunktio O3 on funktion O1 osatekijä ja korostaa juuri kunnossapitoa. Epäilemättä painoa voidaan vastaavalla tavalla laittaa muihin funktion O1 osatekijöihin. Objektifunktio O4 taas vastaa erityisesti luvussa 2 kirjatun laitekäyttökohteen tarpeisiin.

Objektifunktio O4 saadaan minimoitua liittämällä järjestelmään monipuolisesti erilaisia energiantuotto- ja varastointiosia. Tällöin kuitenkin järjestelmän kokonaiskustannus kasvaa. Jo tämän esimerkin valossa järjestelmän mitoittaminen näyttää muodostuvan *monitavoiteoptimointitehtäväksi* (engl. multi-objective/multi-criterion optimization), jossa optimoidaan samanaikaisesti useampaa objektifunktiota.

Optimointitehtävälle tulee asettaa myös *rajoitteita* (engl. constraints). Tällaisia ovat mm. energiantuottoyksiköiden (sähkö ja lämpö) teho sekä energiavaraston tai akuston kapasiteetti.

*Syötteenä* (engl. input) optimointitehtävälle voivat tässä tapauksessa toimia esimerkiksi

- ilmasto-olosuhteet
- tuuli- ja valaistusolosuhteet
- valittavien energiantuottoyksiköiden (lämpö ja sähkö) ominaisuudet: teho, käytettävyys, luotettavuus, . . .
- tavoiteltu elinkaaren pituus.

Itse optimointitehtävä on esitetty useita eri ratkaisumenetelmiä lieaarista ohjelmoinnista (engl. linear programming, simplex method) geneettisiin algoritmeihin; katsauksia näihin ovat esimerkiksi [36, 37, 38].

Optimointitehtävään liittyy olennaisesti epävarmuuksia eikä järjestelmää yleensä pystytä mallintamaan täydellisesti. Tällöin *simulointi* on merkittävä työkalu. Simulointia varten muotoillaan järjestelmää valitulla tarkkuudella kuvaava malli, johon jäävä epävarmuus sisällytetään mielekkäisiin satunnaismuuttujiin. Kun malli lasketaan yhä uudestaan läpi poimien satunnaiset termit niiden jakaumista, saadaan lopulta kuva valitun objektifunktion käyttäytymisestä epävarmuuksineen ja voidaan löytää mielekäs ratkaisu tehtävälle.

Aihealueen artikkeleissa, kuten [36, 37, 38] mainitaan useita valmiita ohjelmistoja, mutta niiden laskentaperiaatteita ei yleensä kuvata. Usein mainitusta HOMER-ohjelmistosta julkaistu kuvaus [39] antaa kuitenkin vihjeen siitä, millaisia elementtejä mallinnukseen ja simulointiin liittyy:

**Järjestelmän yksiköt** energian tuottamiseksi ja varastoisiksi kirjataan ominaisuuksiltaan ja ilmaistaan, millaisia lukumäärävaihtoehtoja niiden suhteen on. Tässä otetaan huomioon myös yksiköiden luotettavuus ja esimerkiksi akuston purkaustasorajoitukset yms.

**Kuorma** eli energian tarve ilmaistaan tunnin tarkkuudella. Tässä otetaan huomioon niin käyttötilanne (vrt. laite- vs talouskäyttö) kuin mm. vuoden- ja vuorokaudenaikaan liittyvä vaihtelu sekä satunnaisvaihtelu.

**Primäärienergia ja sen vaihtelu** eli tunnin tarkkuudella mm. tuuliolot ja aurinkoisuus vuoden- ja vuorokauden aikaan liittyvine vaihteluineen sekä satunnaisvaihteluineen, (puu-) polttoainevaraston täytös jne.

**Järjestelmän ohjaus** eli kuinka käytettäviä yksiköitä hyödynnetään eri tilanteissa.

Mitoittaminen osoittautuu yllättävän monipuoliseksi ja laajaksi aihealueeksi, jota ei mielenkiintoisuudesta huolimatta nyt pystytä laajemmin käsittelemään. Kenties aihepiiriin pystytään jatkotutkimuksessa palaamaan.

## 6 Yhteenveto

Tässä työssä on tarkasteltu tapoja koota järjestelmä, joka tuottaa omavaraisessa käytössä – siis ilman liityntää valtakunnalliseen sähköverkkoon tms. – käyttökohteen tarvitseman sähkön ja lämmön. Lisäksi on tarkasteltu tällaisen järjestelmän mitoittamista.

Järjestelmän ohjaamiseen ei nyt puututtu. On kuitenkin selvää, että hyvin valitut tuotannon ja varastoinnin yksiköt ilman hyvää ohjausjärjestelmää eivät pysty tavoiteltuun tulokseen. Tämä jää jatkotutkimuksen kohteeksi.

Tarkastellut energianlähteet ovat olleet pääasiassa uusiutuvia. Joihinkin tapauksiin soveltuvaa turvetta ei tietoisesti ole rajattu pois, vaan painopiste on ollut nimenomaan omavaraisessa energiantuotossa. Pois on jätetty mm. biokaasu, jonka käytölle Suomessa on huomattava potentiaali: Suomen biokaasuyhdistys on arvioinut tuotantopotentiaaliksi 10 TWh [40]. Biokaasu ansaitsisi hyvin tulla esille, mutta nyt ei sille enää ollut tilaa.

Järjestelmän mitoittaminen osoittautui laajaksi ja erittäin monipuoliseksi aihealueeksi. Tälle saralle jää vielä paljon tutkittavaa. Kaiken kaikkiaan työ toi kyllä valaistusta aihealueeseen, mutta yksin tältä pohjalta ei kenenkään vielä kannata käydä rakentamaan omaa erillistä energiajärjestelmäänsä.

## Lähdeluettelo

### Tieteelliset lähteet

- [1] Lampinen, A. ja Jokinen, E. *Suomen maatilojen energiantuotantopotentiaalit. Ekologinen perspektiivi*. Bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 84. Jyväskylän yliopisto, 2006.
- [6] Weldekidan, H., Strezov, V. ja Town, G. Review of solar energy for biofuel extraction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88 (2018), 184–192.
- [7] Du, C., Zhao, X., Liu, D., Lin, C., Wilson, K., Luque, R. ja Clark, J. Introduction: an overview of biofuels and production technologies. *Handbook of biofuels production: processes and technologies*. Toim. R. Luque, C. S. K. Lin, K. Wilson ja J. H. Clark. Second edition. Woodhead Publishing, UK, 2016, 3–12.
- [8] Mednikov, A. S. A Review of Technologies for Multistage Wood Biomass Gasification. *Thermal Engineering* 65.8 (2018), 531–546.
- [9] Hiltunen, I. *Pienen kokoluokan kaasutustekniikan kehityspolku. VTT Seminaari: Puuhakkeesta sähköä ja lämpöä – pienen kokoluokan kaasutustekniikan kehitys ja tulevaisuus*. VTT. 2013. URL: [https://www.vtt.fi/Documents/01\\_Pienen\\_kokoluokan\\_kasutustekniika.pdf](https://www.vtt.fi/Documents/01_Pienen_kokoluokan_kasutustekniika.pdf) (viitattu 29.06.2019).
- [10] Parmala, S.-P. *Polttomoottorien varustaminen kotimaisten polttoaineiden käyttöön soveltuvaksi*. Tutkimusraportti n:o 24. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, 1982. URL: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/484415/vtselostus24.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (viitattu 29.06.2019).
- [11] Bates, R. P. ja Dölle, K. Syngas Use in Internal Combustion Engines – A Review. *Advances in Research* 10.1 (2017), 1–8. URL: [http://www.journalrepository.org/media/journals/AIR\\_31/2017/Jun/Dolle1012017AIR32896.pdf](http://www.journalrepository.org/media/journals/AIR_31/2017/Jun/Dolle1012017AIR32896.pdf) (viitattu 29.06.2019).
- [12] Gupta, K., Rehman, A. ja Sarviya, R. Bio-fuels for the gas turbine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (9, 2010), 2946–2955.
- [13] Said, S. A., Aliyu, M., Nemitallah, M. A., Habib, M. A. ja Mansir, I. B. Experimental investigation of the stability of a turbulent diffusion flame in a gas turbine combustor. *Energy* 157 (2018), 904–913.
- [15] Kalogirou, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Second edition. Amsterdam: Academic Press, 2014.
- [16] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. *Photovoltaics report*. 2019. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (viitattu 08.07.2019).



- [17] Čičić, S. ja Tomić, S. Automated design of multi junction solar cells by genetic approach: Reaching the > 50 % efficiency target. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 181 (2018), 30–37.
- [18] Reddy, S. R., Ebadian, M. A. ja Lin, C.-X. A review of PV–T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91 (2015), 861–871.
- [19] Kalogirou, S. A. ja Tripanagnostopoulos, Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management* 47 (18 2006), 3368–3382.
- [20] O’Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W. ja Prinz, F. B. *Fuel Cell Fundamentals*. 3rd edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016.
- [21] Rahbar, K., Mahmoud, S., Al-Dadah, R. K., Moazami, N. ja Mirhadizadeh, S. A. Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. *Energy Conversion and Management* 134 (2017), 135–155.
- [22] Cengel, Y. A., Boles, M. A. ja Kanoglu, M. *Thermodynamics – An engineering approach*. Ninth edition. New York: McGraw-Hill, 2019.
- [25] Kauppa- ja teollisuusministeriö. *Vesivoimatuotannon määrä ja lisäämismahdollisuudet Suomessa*. Loppuraportti. 2005. URL: <https://www.motiva.fi/files/700/vesivoimatuotannon-maara-ja-lisaamismahdollisuudet-suomessa.pdf> (viitattu 21.07.2019).
- [26] Breeze, P. *Power Generation Technologies*. 3rd edition. Oxford: Newnes, 2019.
- [27] Bensaid, S., Brignone, M., Ziggioni, A. ja Specchia, S. High efficiency Thermo-Electric power generator. *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (2, 2012), 1385–1398.
- [30] Huggins, R. *Energy storage*. Switzerland: Springer, Cham, 2016.
- [31] Li, P.-W. ja Chan, C. L. *Thermal energy storage analyses and designs*. London: Academic Press, 2017.
- [32] Zumdahl, S. S. *Chemical principles*. 5th edition. Boston: Houghton Mifflin Company, 2005.
- [33] Zhang, C., Wei, Y.-L., Cao, P.-F. ja Lin, M.-C. Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), 3091–3106.
- [35] Grigoriev, S. A. ja Fateev, V. N. Hydrogen Production by Water Electrolysis. *Hydrogen Production Technologies*. Toim. M. Sankir ja N. Demirci Sankir. Beverly: Scrivener Publishing, 2017, 231–276.
- [36] Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M., Khwaja, A. S. ja Anpalagan, A. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2014).
- [37] Gamarra, C. ja Guerrero, J. M. Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48 (2015), 413–424.

- [38] Safari, S., Ardehali, M. ja Sirizi, M. Particle swarm optimization based fuzzy logic controller for autonomous green power energy system with hydrogen storage. *Energy Conversion and Management* 65 (2013), 41–49.
- [39] Lambert, T., Gilman, P. ja Lilienthal, P. Micropower system modeling with HOMER. *Integration of Alternative Sources of Energy*. Toim. F. A. Farret ja M. G. Simões. New York: John Wiley & Sons, 2006. Luku 15, 379–418. URL: <https://www.homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf> (viitattu 19.09.2019).

## Muut lähteet

- [2] Energiaraitti. *Kuittilan tila – Maatilojen energiaomavaraisuuden edelläkävijä*. URL: <http://www.karelia.fi/energiaraitti/esittelykohteet/kuittilan-tila-maatilojen-energiaomavaraisuuden-edellakavija/> (viitattu 24.08.2019).
- [3] Metsähallitus. *Hetta - Pallas-reitin palvelut*. Lisätietoa kohteesta. URL: <https://www.luontoon.fi/hetta-pallas/palvelut> (viitattu 05.08.2019).
- [4] Geologian tutkimuskeskus. *Turve raaka-aineena*. URL: <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/turve/> (viitattu 17.08.2019).
- [5] Ilmatieteen laitos. *Vuositilastot*. URL: <https://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot> (viitattu 15.06.2019).
- [14] Motiva. *Auringonsäteilyn määrä Suomessa*. URL: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringonsaateilyn\\_maara-suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsaateilyn_maara-suomessa). (Viitattu 08.07.2019).
- [23] Suomen Tuulivoimayhdistys. *Hyvän tuulen paikka*. URL: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi>. (Viitattu 19.07.2019).
- [24] Suomen tuuliatlas. *Tuuliatlas – tuulitiedot Suomen kartalla*. URL: <http://www.tuuliatlas.fi> (viitattu 19.07.2019).
- [28] Aamulehti. *Hiekkaan varastoitua energiaa*. s. A12. 30. heinäkuuta 2019.
- [29] Tekniikka & Talous. *Puhallin kuumentaa miljoona kiloa kiveä 600 asteeseen – toimii tuulienergian välivarastona tuhansille kodeille*. 25. huhtikuuta 2019. URL: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/puhallin-kuumentaa-miljoona-kiloa-kivea-600-asteeseen-toimii-tuulienergian-valivarastona-tuhansille-kodeille/e55267c4-9ccb-372d-b4cc-5b8d39d84e06> (viitattu 26.08.2019).
- [34] Motiva. *Vety*. URL: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/energialahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety) (viitattu 18.08.2019).
- [40] Suomen Biokaasuyhdistys. *Kannanotto: Biokaasuyhdistys kannattaa liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän toimenpideohjelmasta*. URL: <http://www.biokaasuyhdistys.net/biokaasuyhdistys-kannattaa-liikenteen-ilmastopolitiikan-toimien-toimenpideohjelmasta>. (Viitattu 17.08.2019).