



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**AURINKOSÄHKÖKÄYTTÖINEN INDUKTIOTASO RUO-
ANLAITOSSA**
Solar powered induction cooking
Sakari Simpanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Sakari Simpanen
Aurinkosähkökäyttöinen induktiotaso ruoanlaitossa

2019

Kandidaatintyö.

32 s.

Tarkastaja: prof. Jero Ahola

Saharan eteläpuolisessa Afrikassa energia tuotetaan pääasiassa biopolttoaineilla, kuten puulla ja lannalla. Biopolttoaineiden käyttämisen ongelmia ovat muun muassa pienhiukkaspäästöt, terveysongelmat sekä polttoaineen keräämiseen kuluva aika. Valtaosa energiasta käytetään ruoanlaittoon.

Tässä kandidaatintyössä suunniteltiin ja mitoitettiin mahdollisimman luotettavasti ympäri vuoden aurinkosähköllä toimiva induktiotaso ruoanlaittokäyttöön keskimääräiselle Saharan eteläpuolisen Afrikan perheelle. Mitoitusta varten selvitettiin kuinka paljon sähköenergiaa keskimääräinen Saharan eteläpuoleisen Afrikan perhe tarvitsee ruokailutarpeidensa täyttämiseen päivässä käyttäen kirjallisuuslähteitä, sekä tehtiin energiamittauksia kahdella erityyppisellä kuumennustasolla. Itse mitoitukset suoritettiin simuloimalla käyttäen Homer Pro-ohjelmaa.

Kirjallisuuden perusteella keskimääräiseksi päivittäiseksi energiantarpeeksi arvioitiin yksi kilowattitunti. Mittauksien ja simuloitien perusteella ruoanlaittojärjestelmään valittiin kaksi 280 W aurinkopaneelia, kaksi 0,840 kWh akkua, 2 KW vaihtosuuntaaja sekä MPPT-tyyppinen lataussäädin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Sakari Simpanen

Solar powered induction cooking

2019

Bachelor's Thesis.

32 p.

Examiner: professor Jero Ahola

In sub-Saharan Africa, energy is mainly produced by biofuels, such as wood and manure. Use of such biofuels cause fine particle emissions and health hazards. Collection of the fuel also takes a considerably large amount of time. Majority of this energy is consumed on cooking.

In this bachelor's thesis, a solar-powered induction cooking system was rated and designed for the use of an average family in sub-Saharan Africa. Literature research was used to examine the electrical energy need of daily cooking for such family. Energy measurements were also made using two different kind of cooking stoves. The ratings were performed using simulation models with Homer Pro-software.

According to literature, an average daily energy requirement was estimated at one kilowatt hour. Based on measurements and simulations, two 280 W solar panels, two 0,840 kWh batteries, a 2 kW inverter and an MPPT-type charge controller were selected for the cooking system.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto.....	7
1.1 Johdanto.....	7
2. Teoria.....	9
2.1 Aurinkosähkön toimintaperiaate.....	9
2.2 Sähkömagneettinen induktio	12
3. Energia- ja tehomittaukset	16
3.1 Mittausjärjestelyt	16
3.2 Mittaukset	18
3.3 Tulosten analysointia.....	20
4. Järjestelmän kokoonpano ja mitoitus	22
4.1 Järjestelmän osat.....	22
4.2 Päiväkulutus	23
4.3 Simuloinnit	23
5. Johtopäätökset	28
6. Yhteenveto.....	29
Lähteet	30

KÄYTETYT LYHENTEET JA MERKINNÄT

FF	Fill factor
LUT	LUT University
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Standard Test Condition
<i>B</i>	magneettivuon tiheys
<i>c</i>	paksuus
<i>D</i>	sähkövuon tiheys
<i>d</i>	säde
<i>E</i>	sähkökentän voimakkuus
<i>E</i>	energia
<i>E_{smv}</i>	sähkömotorinen voima
<i>e</i>	alkeisvaraus $1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$
<i>f</i>	taajuus
<i>H</i>	magneettikentän voimakkuus
<i>h</i>	Planckin vakio $6,626070 \times 10^{-34} \text{ Js}$
<i>I</i>	virta
<i>J</i>	sähkövirran tiheys
<i>m</i>	massa
<i>N</i>	kierrosten määrä
<i>P</i>	teho
<i>t</i>	aika
<i>U</i>	jännite
<i>W</i>	energia
<i>v</i>	nopeus
<i>δ</i>	tunkeutumissyvyys
<i>μ₀</i>	tyhjiön permeabiliteetti $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
<i>μ_r</i>	suhteellinen permeabiliteetti
<i>σ</i>	sähkönjohtavuus

ϕ magneettivuo

Alaindeksit

enc suljettu silmukka

k kineettinen

max maksimi

oc tyhjäkäynti

sc oikosulku

smv sähkömotorinen voima

1. JOHDANTO

1.1 Johdanto

Saharan eteläpuolisessa Afrikassa energia tuotetaan pääasiassa biopolttoaineilla. Yli 70 % kotitalouksista käyttää pääosin puuta ja lantaa energiatarpeidensa täyttämiseen, köyhällä maaseudulla luvun voidessa nousta jopa 99 %:iin [1][2]. Tyypillisellä, kehittyviin maihin kuuluvalla, maaseudulla energiaa käytetään pääasiassa ruoanlaittoon, lämmitykseen, valaistukseen, ja kodin elektroniikkaan, kuten puhelimen lataukseen, radioon ja televisioon. Puun käyttämisessä pääasiallisena energianlähteenä on monia ongelmia, kuten alueen puuston harventuminen, polttamisessa syntyvien pienhiukkasten aiheuttamat ilmastopäästöt sekä terveysongelmat. [3] Ongelma on myös sukupuolittunut, sillä päävastuu puupolttoaineen keräämisestä on usein naisilla, ja keräämiseen käytetään paljon aikaa, jota voisi käyttää esimerkiksi kouluttautumiseen [1][2][3]. Valtaosa kotitalouksien energiankulutuksesta menee ruoanlaittoon [3]. Ruokaa laitetaan tyypillisesti avonuotion päälle kolmen kiven varaan tuetussa padassa. Puun polttamiseen liittyvien ongelmien lisäksi tällaisen avonuotion hyötysuhde on todella huono, noin 10 % luokkaa [4].

Alueella on saatavilla paljon aurinkoenergiaa ympäri vuoden, ja tämän työn tavoite on suunnitella ja mitoittaa kuvan 1.1 mukainen, aurinkosähköllä toimiva ruoanlaittojärjestelmä vähemmän saastuttavaksi ja energiatehokkaammaksi vaihtoehdoksi puun polttamiselle.



Kuva 1.1 Periaatekuva toteutettavasta ruoanlaittojärjestelmästä

Työssä käsiteltäviä tutkimuskysymyksiä ovat:

- Kuinka paljon sähköenergiaa keskimääräinen Saharan eteläpuoleisen Afrikan perhe tarvitsee ruokailutarpeidensa täyttämiseen päivässä?
- Miten eri ruoanlaittoon käytettävät teknologiat poikkeavat toisistaan hyötysuhteen osalta ja millainen vaikutus kattilan lämpöeristämällä on ruoanvalmistuksessa kuluvaan energiamäärään?
- Kuinka suuren aurinkopaneelitehon, ja kuinka suuren akkukapasiteetin, ruoanlaittojärjestelmä vaatii toimiakseen luotettavasti ympäri vuoden keskimääräisen perheen käytössä kaikkialla Saharan eteläpuolisessa Afrikassa?

Työtä varten haetaan kirjallisuuslähteistä tietoa aurinkovoiman ja sähkömagneettisen induktion toimintaperiaatteista, sekä myös tutkimustuloksia energiankulutuksesta ja ruokailutot-

tumuksista Afrikassa. Kirjallisuuslähteet haetaan pääosin LUT:in tiedekirjaston tietokannoista sekä kansainvälisistä tietejulkaisuista. Sähköenergian kulutusta tutkitaan ja vertaillaan eri lämpötasotyyppien osalta energiamittarilla. Mittaus rajataan veden keittämiseen, ja kahteen eri lämpötasotyyppiin: induktiotasoon, ja valurautatasoon. Aurinkopaneelien ja akkujen toimintaa simuloidaan HOMER Pro-ohjelmalla mittaustuloksien pohjalta.

Työssä perehdytään aluksi aurinkosähkön, sähkömagneettisen induktion sekä akkujen teoreettiseen taustaan, jonka jälkeen suoritetaan energiamittauksia ja pienvoimalasimulointeja. Mittaus- ja simulointituloksien, sekä kirjallisuuslähteiden, pohjalta suunnitellaan ja mitoitetaan aurinkosähköllä toimiva ruoanlaittojärjestelmä siten, että keskimääräinen Saharan eteläpuoleisen Afrikan perhe voi käyttää sitä ympäri vuoden kaikkeen ruoanlaittoonsa.

2. TEORIA

2.1 Aurinkosähkön toimintaperiaate

Valosähköinen ilmiö

Valosähköisessä ilmiössä auringon säteilyenergiasta muodostuu suoraan sähkövirtaa. Valosähköinen ilmiö esiintyy, kun foton absorboituu atomiin ja luovuttaa atomin elektronille energiansa. Fotonilla on energia

$$E = hf, \quad (2.1)$$

jossa $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ Js on Planckin vakio ja f fotonin taajuus. Jos fotonin elektronille luovuttama energia ylittää materiaalikohtaisen irrotustyön vaatiman energian W , elektroni irtoaa atomista kineettisellä energialla

$$E_K = hf - W = \frac{m}{2}v^2, \quad (2.2)$$

jossa m on elektronin massa ja v on elektronin nopeus. Esimerkiksi muodostettaessa diodia kahdesta eri suuntaan varatusta, eristetystä, metallilevystä, saadaan diodin katodin ja anodin välille jännite

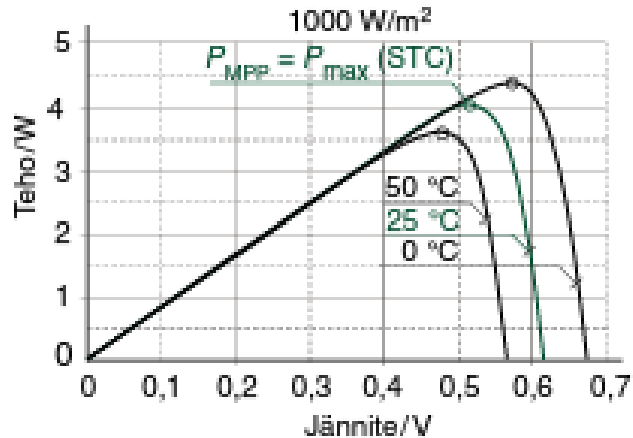
$$U \leq \frac{E_K}{e}, \quad (2.3)$$

jossa $e = 1,602177 \times 10^{-19}$ C on alkeisvaraus. [5, s.87-88]

Aurinkokenno

Aurinkokenno on tavallisimmin piistä valmistettu [6, s.4], p/n-tyyppinen puolijohdediodi. Aurinkokennon n-puoli on tyypillisesti piitä, joka on seostettu fosforilla. Lisätyn fosforin vuoksi n-puolelle syntyy negatiivinen varaus. Kennon p-puoli taas on vastaavasti piitä, johon on seostettu booria, luoden p-puolelle positiivisen varauksen. Valosähköinen ilmiö muodostaa pn-rajapintaan sähkökentän, ja kun kennoa valaistaan, rajapintaan syntyy elektroni-aukopareja. Sähkökenttä estää n-puolelle syntyneitä elektroneja kulkemasta liitoksen yli p-puolelle, joten kennon pn-puolien välille syntyy jännite.[6, s.18-21]

Aurinkokenno tuottaa suurimman mahdollisimman tehon niin sanotussa MPP-pisteessä (Maximum Power Point). MPP-pisteen ja jännitteen suhdetta esitellään kuvassa 2.1.

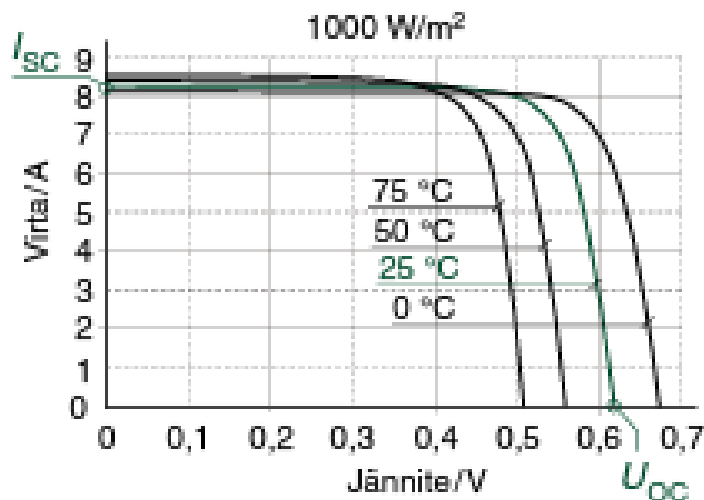


Kuva 2.1 Aurinkokennon tehokäyrä STC-olosuhteissa 1000 W/m² säteilyteholla eri lämpötiloissa.

Suurin mahdollisin teho voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{MAX} = I_{SC}U_{OC}FF, \quad (2.4)$$

jossa I_{SC} on oikosulkuvirta, U_{OC} on tyhjäkäyntijännite ja FF on ns. fill factor. Oikosulkuvirran ja tyhjäkäyntijännitteen välistä suhdetta esitellään kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Oikosulkuvirran ja tyhjäkäyntijännitteen välinen suhde STC-olosuhteissa 1000 W/m säteilyteholla eri lämpötiloissa

Tyhjäkäyntijännite on suurin mahdollinen jännite, joka kennon p- ja n-puolten välille voi syntyä, ja se on piille 0,5V – 0,9V. Oikosulkuvirta on suurin mahdollinen virta, joka kennon läpi voi kulkea, ja se on riippuvainen valon intensiteetistä sekä kennon lämpötilasta. Fill factor on materiaalikohtainen, lämpötilasta riippuva kerroin, joka on piillä noin 0,7 – 0,8.[6, s.87-90]

Aurinkomoduuli

Aurinkokennoja voidaan yhdistää aurinkomoduuleiksi kytkemällä ne sarjaan tai rinnan. Sarjaan kytkeminen nostaa kytkennästä saatavaa jännitettä, ja rinnankytkentä taas nostaa kytkennän virtaa. Yksittäisestä aurinkokennosta saa tyypillisesti vain noin 0,5V jännitteen. Aurinkomoduuleita yhdistämällä voidaan muodostaa käyttövalmiita aurinkopaneeleita. Aurinkokennojen ja -paneelien nimellisarvot annetaan standardiolosuhteissa (Standard Test Condition, STC) tehdyissä mittauksissa.

Standarditestiolosuhteet on määritelty seuraavalla tavalla:

- säteilyteho $1000 \frac{W}{m^2}$
- säteily vastaa 42° horisontin yläpuolelta tulevaa auringonsäteilyn spektriä
- säteily tulee kohtisuorasti kennon pintaan
- kennon lämpötila on $25^\circ C$.

Lisäksi aurinkopaneelien nimellisarvot annetaan kennon normaalitoimintalämpötilassa (Normal Operating Cell Temperature, NOCT). NOCT-lämpötila mitataan paneelista seuraavissa olosuhteissa:

- paneelin kallistuskulma on 45° ja paneelin tausta on avoin tuulelle
- ilman lämpötila on $20^\circ C$ ja tuuli puhaltaa nopeudella $1 \frac{m}{s}$
- paneeliin tulee säteilyteho $800 \frac{W}{m^2}$, jonka spektri vastaa 42° kulmassa tulevaa auringonsäteilyä
- paneelia ei kuormiteta.

Normaalilämpötila on yleensä $42-48^\circ C$. [7, s. 296-299]

Sähköenergian varastointi

Aurinkosähkön epäjatkuvan luonteen vuoksi sähköenergiaa on usein tarpeen varastoida akkuihin. Akut koostuvat anodista, eli negatiivisesta elektrodista, katodista, eli positiivisesta elektrodista, ioneja johtavasta elektrolyytistä sekä anodia ja katodia eristävästä erottimesta. Akun suureita ovat muun muassa sen nimellisjännite, eli keskimääräinen purkausjännite, kapasiteetti, eli täyteen ladatusta akusta saatava ampeerituntimäärä ja energiamäärä. Käytetyimmät akkuteknologiat ovat tällä hetkellä lyijyakut sekä litiumakut.

Lyijyakuissa käytetään anodina lyijylevyä, katodina lyijyoksidilevyä ja elektrolyytinä veden ja rikkihapon liosta. Akkua purkaessa lyijy ja lyijyoksidi reagoivat elektrolyytin kanssa muodostaen lyijysulfaattia, vettä ja sähköenergiaa. Akkua ladatessa ulkoinen sähköenergia muuttaa lyijysulfaatin ja veden takaisin lyijyksi, lyijyoksidiksi ja rikkihapoksi. Lyijyakut ovat tällä hetkellä yleisimmin käytetty akkuteknologia, mutta esimerkiksi Euroopan kemikaalivirasto on vuonna 2018 lisännyt lyijyn sen myrkyllisyyden vuoksi ehdokkaaksi Euroopassa kiellettyjen aineiden listalle [8].

Litiumakuissa käytetään anodeina huokoista grafiittia ja katodeina litiummetallioksidia. Elektrolyytinä käytetään rakenteesta riippuen joko litiumsuolaliuosta (litiumioniakut) tai

kiinteää elektrolyyttiä (litiumpolymeeriakut.) Akkua purettaessa litiumionit siirtyvät anodilta katodille elektrolyytin kautta, ladattaessa katodilta anodille. Litiumakkujen vahvuuksia ovat muun muassa tasainen purkautuminen, korkea energiatehokkuus sekä lyijyakkuihin vaikuttavan muisti-ilmiön puuttuminen. Muisti-ilmiöllä tarkoitetaan ominaisuutta, jossa akku menettää samansuuruisella sähkömäärällä toistuvasti osittaispurettaessa ja ladattaessa kapasiteettiaan. Litiumakkujen heikkouksia ovat lyijyakkua huonompi turvallisuus, huono sietokyky ylilataukselle ja liialle purkamiselle, sekä lyijyakkua korkeampi hinta. [7, s.314-324]

Litiumakkujen houkuttelevuutta lisää sen alati kasvavat ja hintaa alentavat käytettyjen akkujen markkinat. Litiumakkuja käytetään laajasti sähkö- ja hybridi-autoissa, joista akut pitää vaihtaa kun niiden kapasiteetti on laskenut 80%:iin uuteen verrattuna [9]. Tutkimuksissa on osoitettu, että vaikka litiumakut eivät kelpaisi enää ajoneuvokäyttöön, ne sopivat hyvin käytettäväksi esimerkiksi aurinkosähkön energiavarastona. [10][11][12]

2.2 Sähkömagneettinen induktio

Sähkömagneettisen induktion toimintaperiaate

Faradayn induktiolain mukaan johdinsilmukkaan, jota joko liikutellaan paikallaan pysyvässä magneettikentässä, tai joka pysyy paikallaan liikkuvassa magneettikentässä, indusoi-tuu sähkömotorinen voima

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (2.5)$$

jossa ϕ on magneettivuo johdinsilmukan läpi. Jos johdinsilmukassa on useita kierroksia, voidaan ε laskea yhtälöllä

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}, \quad (2.6)$$

missä N on kierrosten määrä.

Faradayn induktiolaki voidaan johtaa differentiaalimuotoon

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.7)$$

missä $\nabla \times \mathbf{E}$ on sähkökentän voimakkuuden roottori ja \mathbf{B} magneettivuon tiheys. [13, s.515-518]

Magneettivuon tiheys voidaan laskea yhtälöllä

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (2.8)$$

missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, μ_r ainekohtainen suhteellinen permeabiliteetti ja \mathbf{H} magneettikentän voimakkuus. [14, s.402] Faradayn lain differentiaalimuoto kertoo sähkökentän ja magneettikentän välisestä riippuvuudesta: muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän. Yhtälön 2.5 mukaisen jännitteen indusoituessa syntyy johtimeen induktiovirta, jonka suunta määräytyy Lenzin lain mukaan. Lenzin laki sanoo, että induktiovirta on sen suuntainen, että sen synnyttämä magneettivuo pyrkii vastustamaan induktion synnyttämää magneettivuon muutosta. [13, s.518] Ampèren lain mukaan suljetussa silmukassa kulkeva virta muodostaa ympärilleen magneettikentän:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{enc}, \quad (2.9)$$

missä I_{enc} on suljetussa silmukassa kulkeva virta.

[13, s. 396]

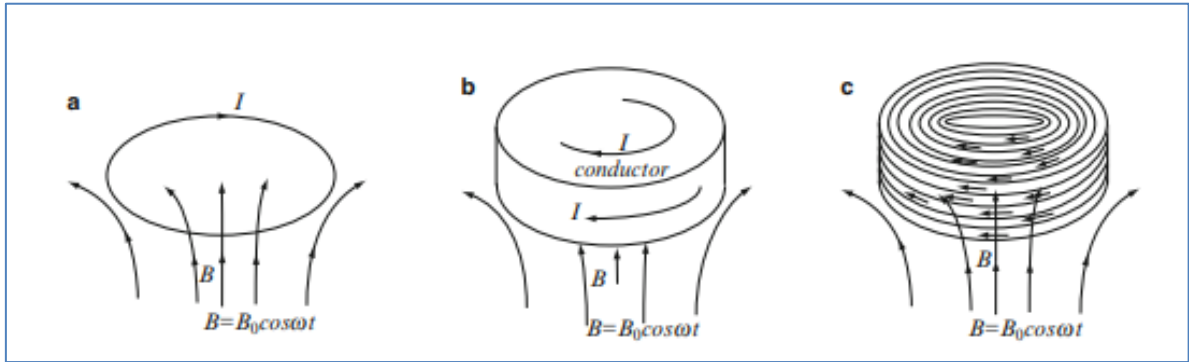
Yleistetyn Ampèren lain differentiaalimuoto on

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.10)$$

missä \mathbf{J} on sähkövirran tiheys ja \mathbf{D} sähkövuon tiheys. Yhtälön 2.10 mukaan sähkövirta ja muuttuva sähkövuo synnyttävät siis magneettikentän. [13, s. 403 & s. 567]

Sähkömagneettinen induktio ruoanlaitossa

Faradayn lain mukaan muuttuva magneettikenttä suljetussa johdinsilmukassa aiheuttaa silmukkaan induktiovirran. Faradayn laki ei kuitenkaan edellytä fyysistä, suljettua johdinsilmukkaa päteäkseen. Jos sylinterimäinen metallikappale asetetaan muuttuvaan magneettikenttään, sen voi käsittää koostuvan lukuisista suljetuista johtimista joihin kaikkiin syntyy sähkömotorisen voiman ϵ aikaansaama induktiovirta. Näitä virtoja kutsutaan pyörrevirroiksi. Kuvassa 2.3 esitellään pyörrevirtojen muodostumista kiekonmallisessa kappaleessa. [13, s.542]



Kuva 2.3 Pyörrevirtojen muodostuminen kiekonmallisessa kappaleessa. Lähde: [12, s.542]

Ruoanlaitossa sähkömagneettista induktiota hyödynnetään pyörrevirtojen avulla. Tyypillisessä ruoanlaittoon tarkoitettuun induktiotasossa on käämi, eristävä lasilevy sekä magneettivuon ohjaimia. Kun käämiin johdetaan korkeataajuuksinen (tyypillisesti 25-50 kHz) virta, käämiin syntyy muuttuva magneetikenttä, joka indusoi tason päälle asetetun, ferromagneettisesta aineesta valmistetun astian pohjaan virran joka lämmittää astiaa. Ferromagneettisissa aineissa syntyy pyörrevirtojen lisäksi hystereesihäviöitä, jotka niin ikään lämmittävät astiaa. Hystereesihäviöitä syntyy kunnes astia saavuttaa lämpötilan, jossa aineen magneettiset ominaisuudet häviävät. Tätä lämpötilaa kutsutaan Curie-pisteeksi, ja se on ainekohtainen. Raudan Curie-piste on 770 °C. [15]

Jos astian pohja on levyn muotoinen, siihen siirtyvä maksimiteho voidaan laskea yhtälöllä

$$P = \frac{(2\pi f)^2 \pi d^4 B^2 \sigma c}{8}, \quad (2.11)$$

missä f on taajuus, d on levyn säde, B on magneettivuon tiheys, σ levyn sähkönjohtavuus ja c levyn paksuus. Yhtälöstä 2.11 huomataan, että muiden suureiden pysyessä vakiona, voidaan tehoa säädellä taajuutta muuttamalla. [13, s. 543] Induktiolämmityksessä indusoitunut sähkövirta on keskittynyt astian ulkopinnalle, ja virran tiheys pienenee sitä enemmän, mitä syvemmälle materiaaliin se tunkeutuu. Aineen tunkeutumissyvyys, on syvyys, jolla virran tiheys aineessa on enää n. 37% pinnalla vaikuttavasta virran tiheydestä. Tunkeutumissyvyys voidaan laskea yhtälöllä

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}, \quad (2.12)$$

missä f on taajuus, μ_0 tyhjiön permeabiliteetti, μ_r ainekohtainen suhteellinen permeabiliteetti ja σ sähkönjohtavuus [13, s.636]. Virran tiheys syvyydellä y astian pinnasta taas voidaan laskea kaavalla

$$I = I_0 e^{-\frac{y}{\delta}}, \quad (2.13)$$

missä I on virran tiheys syvyydellä y , I_0 virran tiheys pinnalla, y etäisyys pinnasta ja δ tunkeutumissyvyys. [15]

Sähkömagneettisen induktion energiatehokkuus

Induktiolla lämmittämisessä on paljon etuja verrattuna perinteiseen sähkölieteen. Näitä ovat muun muassa tarkka lämpötilansäätö, nopeus, sekä korkeampi hyötysuhde. Induktiotason energiatehokkuuteen vaikuttaa muun muassa induoituneen virran taajuus ja tiheys, lämmitettävän astian fyysiset ominaisuudet, kuten muoto ja materiaali, tavoiteltava lämpötila-alue, sekä käämin muotoilu ja sijoittaminen,. Esimerkiksi käämin välimatka lämmitettävään astiaan vaikuttaa vahvasti induoituvan virran tiheyteen, ja energiatehokkuus kasvaa välimatkan lyhentyessä. Astian materiaalin ominaisuuksista energiatehokkuuteen vaikuttaa vahvasti materiaalin sähköinen johtavuus sekä magneettinen permeabiliteetti. Aineen sähköinen resistiivisyys vaikuttaa siihen, kuinka paljon virtaa muuttuu lämmöksi aineen sisällä, ja se nousee lämpötilan noustessa. Magneettinen permeabiliteetti kertoo, kuinka helposti aineen sisälle muodostuu magneettikenttä, ja siihen vaikuttaa niin aineen materiaali ja lämpötila, kuin magneettikentän tiheyskin. [15][16]

3. ENERGIA- JA TEHOMITTAUKSET

Energiamittauksilla on tarkoitus selvittää ruoanvalmistukseen päivittäin kuluva energiamäärä, sekä vertailla induktiolieden ja valurautalieden energiankulutusta. Lisäksi tarkastellaan kattilan eristämisen vaikutusta energiankulutukseen.

3.1 Mittausjärjestelyt

Mittausten tarkoituksena on selvittää, miten paljon keskimääräinen työn kohdealueen perhe tarvitsee sähköenergiaa yhdellä ruoanvalmistuskerralla koko perheelle. Energiantarve vaihtelee perheeseen mukaan, mutta esimerkiksi Ugandassa toteutetun tutkimuksen mukaan keskimääräinen perhe tekee 3,19 kg ruokaa 11 kertaa viikossa [17]. Myös valmistettava ruokalaji vaikuttaa energiankulutukseen, tätä työtä varten ruokalajiksi rajataan maissipuuro, joka on yleinen ruoka Saharan eteläpuolisen Afrikan maaseudulla [18]. Mittaus toteutetaan kuumentamalla 3 kg vettä 22 °C lämpötilasta 90 °C lämpötilaan, ja ylläpitämällä 90 °C lämpötilaa puolen tunnin ajan. Ruoanvalmistusta jäljitellään pelkällä vedellä, koska se antaa hyvin suuntaa maissipuuron kypsentämiseen kuluvaan energiamäärään.



Kuva 3.1 Mittauksissa käytettävä teräskattila

Mittaus toteutetaan kuvan 3.1 mukaisella 5 litran teräskattilalla ja kahdella erilaisella kuumennustasolla, pöytämallisella induktiotasolla (nimellisteho 1500 W), sekä pöytämallisella valurautatasolla (nimellisteho 2000W). Lämpötilaa tarkkaillaan FLUKE-yleismittariin liitettyllä termoparilla ja energiankulutusta CHRIST-energiamittarilla.



Kuva 3.2 Villalla eristetty kattila

Lisäksi molempien kuumennustasojen tapauksessa mittaus toteutetaan myös ympäröimällä kattila 10 cm paksuisella villalla kuvan 3.2 mukaisesti, jotta kattilan eristämisen vaikutusta energiankulutukseen voidaan tutkia.

3.2 Mittaukset

Perinteinen keittotaso, ei eristystä

Kun perinteinen keittotaso asetettiin täydelle teholle, näytti energiamittari tehoa 1600 W. Veden lämpötilaa tarkkailtiin lämpömittarilla ja energiankulutusta energiamittarilla, ja välituloksia merkattiin ylös seuraavanlaisesti:

Taulukko 3.1. Perinteinen keittotaso ilman kattilan eristystä

Aika [min]	Lämpötila [°C]	Energia [kWh]
0	21,6	0
8	36,4	0,16
15	58	0,252
25	84	0,384
30	90	0,413
60	89	0,453

Kun tavoitelämpötila saavutettiin, keittotaso laitettiin kokonaan pois päältä. Minuutilla 55 lämpötila oli tippunut sen verran, että tasoa piti pitää vielä hetken päällä.

Perinteinen keittotaso, kattila eristetty

Mittausjärjestelyt toteutettiin muuten samalla tavalla, kuin edellisessä tapauksessa, mutta kattila eristettiin villakerroksella sivuilta sekä päältä. Mitattiin seuraavat tulokset:

Taulukko 3.2. Perinteinen keittotaso eristetyllä kattilalla

Aika [min]	Lämpötila [°C]	Energia [kWh]
0	22	0
5	33,9	0,133
8	48,9	0,194
15	71,1	0,279
25	90,8	0,38
30	97,6	0,38
40	97,9	0,38
55	94,7	0,38

Kun tavoitelämpötila saavutettiin, keittotaso laitettiin kokonaan pois päältä.

Induktiotaso, ei eristystä

Induktiotaso näytti energiamittarilla 1860 W täydellä teholla. Mitattiin seuraavat tulokset:

Taulukko 3.3. Induktiotaso ilman kattilan eristystä

Aika [min]	Lämpötila [°C]	Energia [kWh]
0	22	0
5	58	0,163
8	77,8	0,24
9	84	0,27
10	90	0,3
15	91,2	0,315
25	90,3	0,337
40	91,3	0,376

Kun tavoitelämpötila saavutettiin, keittotaso laitettiin kokonaan pois päältä. Tämän jälkeen tasoa piti käyttää täydellä teholla päällä noin viiden minuutin välein, ettei lämpötila olisi tippunut liikaa.

Induktiotaso, kattila eristetty

Mittausjärjestelyt toteutettiin muuten samalla tavalla, kuin edellisessä tapauksessa, mutta kattila eristettiin villakerroksella sivuilta sekä päältä. Mitattiin seuraavat tulokset:

Taulukko 3.4. Induktiotaso eristetyllä kattilalla

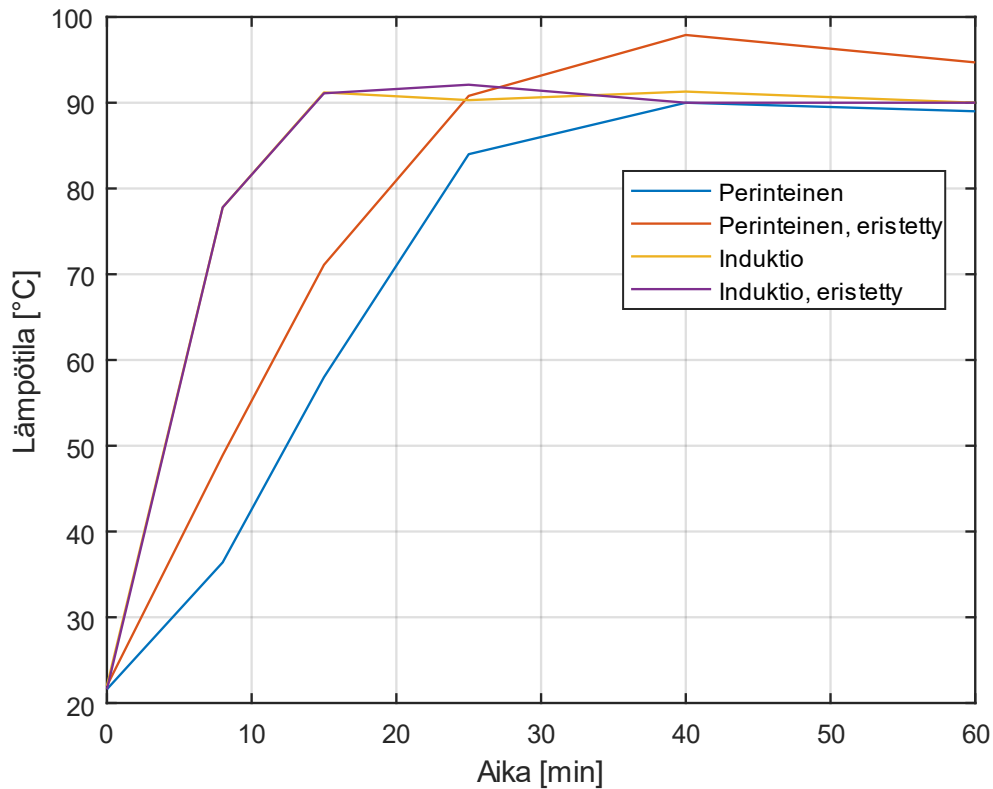
Aika [min]	Lämpötila [°C]	Energia [kWh]
0	21,6	0
5	58	0,16
8	77,8	0,24
9	84	0,27
10	90	0,3
15	91,1	0,306
25	92,1	0,321
40	90	0,327

Kun tavoitelämpötila saavutettiin, keittotaso laitettiin kokonaan pois päältä. Tämän jälkeen tasoa piti käyttää täydellä teholla päällä keskimäärin 10 minuutin välein, ettei lämpötila olisi tippunut liikaa.

3.3 Tulosten analysointia

Ajankulutus

Kuvassa 3.3 on esitelty veden lämpötilaa ajan funktiona.

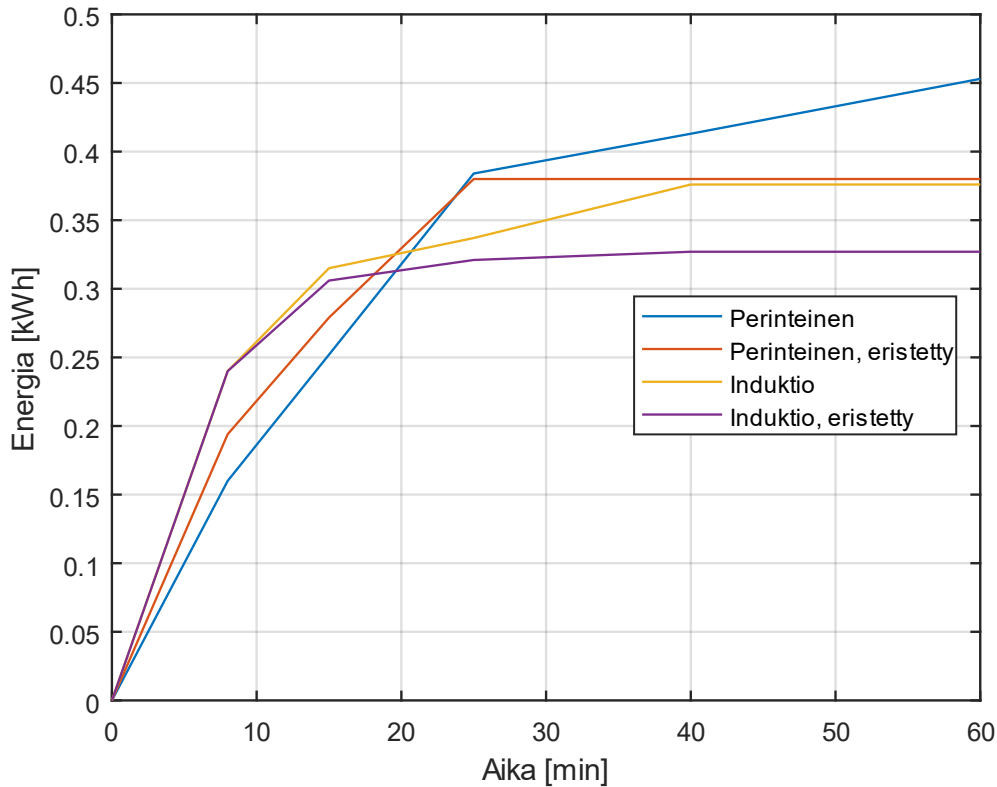


Kuva 3.3 Veden lämpötila ajan funktiona eri mittausjärjestelyillä.

Päällimmäinen huomio, jonka tulosten perusteella tehtiin, oli huomattava aikaero perinteisen keittotason ja induktiotason välillä: perinteisellä tasolla meni veden kuumentamiseen puoli tuntia, kun taas induktiotasolla 10 minuuttia. Osa erosta selittyy tekniikan erilaisuudella, sekä induktiotason korkeammalla nimellisteholla. Tuloksien perusteella tehtyjen laskelmien perusteella kuitenkin ilmeni, että perinteinen keittotaso on täydellä teholla ollessaan kuluttanut keskimäärin vain noin 800 W, eli on syytä epäillä, että keittotaso on jollakin tapaa viallinen, eivätkä tulokset ole tältä osin vertailukelpoisia.

Energiankulutus

Kuvassa 3.4 on esitelty veden lämmittämiseen kulunutta energiaa ajan funktiona.



Kuva 3.4 Kulutettu energia ajan funktiona eri mittausjärjestelyillä.

Ilman eristystä induktiotaso käytti 83 % perinteisen keittotason käyttämästä energiasta. Eristyksen kanssa induktiotaso käytti 86 % perinteisen keittotason käyttämästä energiasta. Osan eroista saattaa selittää myös induktiotason korkeamman tehon tuoma suurempi hyötysuhde.

Eristyksen vaikutus

Kattilan eristäminen paransi molempien keittotasojen hyötysuhdetta. Perinteisellä keittotasolla eristetyn kattilan käyttäminen vähensi energiantarvetta noin 17 % verrattuna eristämättömään kattilaan. Myös lämmitysaika pieneni 5 minuutilla. Induktiotasolla eristäminen pienensi energiankulutusta noin 13 %. Lämmitysaikaan eristämällä ei ollut mainittavaa merkitystä. Huomioitavaa on myös, että perinteisellä keittotasolla ja eristetyllä kattilalla lämpötila kohosi vielä tason sulkemisen jälkeen lähes kahdeksan astetta, eli lämpöä varautui keittotasoon ja kattilaan enemmän, kuin olisi tarvinnut: jos tason olisi sulkenut aikaisemmin, olisi energiaa voinut säästää vielä lisääkin. Tässä tulee myös esiin perinteisen keittotason epätarkempi säädeltävyys induktiotasoon verrattuna.

4. JÄRJESTELMÄN KOKOONPANO JA MITOITUS

Järjestelmän komponenttien mitoittamiseen vaikuttavat pääasiassa tehon- ja energiantarpeen suuruus ja ajankohta vuorokauden sisällä, sekä alueellinen auringosta saatava säteilyteho ja säteilytehon jakautuminen vuorokauden sisällä, sekä kausittainen vaihteilu. Sopiva mitoitus selvitetään aiempien mittaustulosten, kirjallisuuden ja simulointien avulla.

4.1 Järjestelmän osat

Järjestelmän pääkomponentit on esitelty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1 Periaatekuva järjestelmän komponenteista

Akusto

Aurinkosähkön ajoittaisen saatavuuden vuoksi sitä on usein tarve varastoida akkuihin. Akkutekniikan valintaan vaikuttavat vahvasti saatavuus, sekä kustannustaso, joten tässä kandidaatintyössä selvitetään vain vaadittavaa energiakapasiteettia simuloimalla kahta erilaista akkukokoonpanoa. Pitkät lataussyklit lyhentävät akkujen käyttöikää, joten akkujen varaustason tulisi olla mahdollisimman vähän aikaa alle 60 %:ssa. Asetetaan akkujen vaatimustasoksi pysyminen $\frac{3}{4}$ ajasta varaustasolla 60-100 % huonoiten tuottavan kuukauden aikana.

Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelien valintaa ohjaa tehon- ja energiantarve. Yksittäisen aurinkopaneelin nimellisteho on tyypillisesti enimmillään noin 300 wattia, joten tehontarpeen kasvaessa paneeleja tulee kytkeä useampi joko rinnan tai sarjaan. Tätä työtä varten valitaan nimellisteholtaan 280 wattinen aurinkopaneeli, ja selvitetään simuloimalla, kuinka monta paneelia järjestelmä vaatii toimiakseen luotettavasti.

Lataussäädin

Lataussäätimiä käytetään asettamaan aurinkopaneelilta saatava jännite sopivaksi akun latausta varten. Lataussäätimet jakautuvat kahteen pääluokkaan: PWM-säätimiin (Pulse Width Modulation) ja MPPT-säätimiin (Maximum Power Point Tracker). PWM-säätimet muuttavat paneelilta saatavaa jännitettä jännitepulssein leveyttä säätämällä, MPPT-säädin taas etsii paneelin suurimman tehopisteen (MPP, Maximum Power Point), ja syöttää jännitettä sen perusteella syöttäen akkua aina suurimmalla mahdollisella teholla.

Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajaa tarvitaan muuttamaan aurinkopaneeleilta saatava tasavirta induktiotason vaatimaksi vaihtovirraksi. Tätä työtä varten vaihtosuuntaaja valitaan tarvittavan tehomäärän perusteella. Induktiotason nimellisteho on 2000 wattia, ja mitattu maksimiteho 1860 wattia, joten vaihtosuuntaajan tehonkestävyydeksi valitaan 2000 wattia.

Induktiotaso

Induktiotasot ovat tyypillisesti teholuokaltaan 1500 – 2000 W. Tähän työhön on valittu mitauksissa käytetty 2000 W pöytämallinen induktiotaso.

4.2 Päiväkulutus

Ugandassa toteutetun tutkimuksen mukaan keskimääräinen perhe tekee 3,19 kg ruokaa 11 kertaa viikossa, eli keskimäärin 5 kg päivässä [17]. Luvun 3 mittaustulosten perusteella 3 vesikilon kuumentaminen 90 asteeseen, ja lämmön ylläpito 15 minuuttia, vie eristetyllä kattilalla ja induktiotasolla 0,321 kWh energiaa. Kolmesta vesikilosta saadaan neljä kiloa maisipuroa valmistettua 10-20 minuutissa [18]. Näin ollen päivittäinen energiantarve on

$$\frac{0,321 \text{ kWh}}{3 \text{ kg}} \cdot 5 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 0,535 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} . \quad (4.1)$$

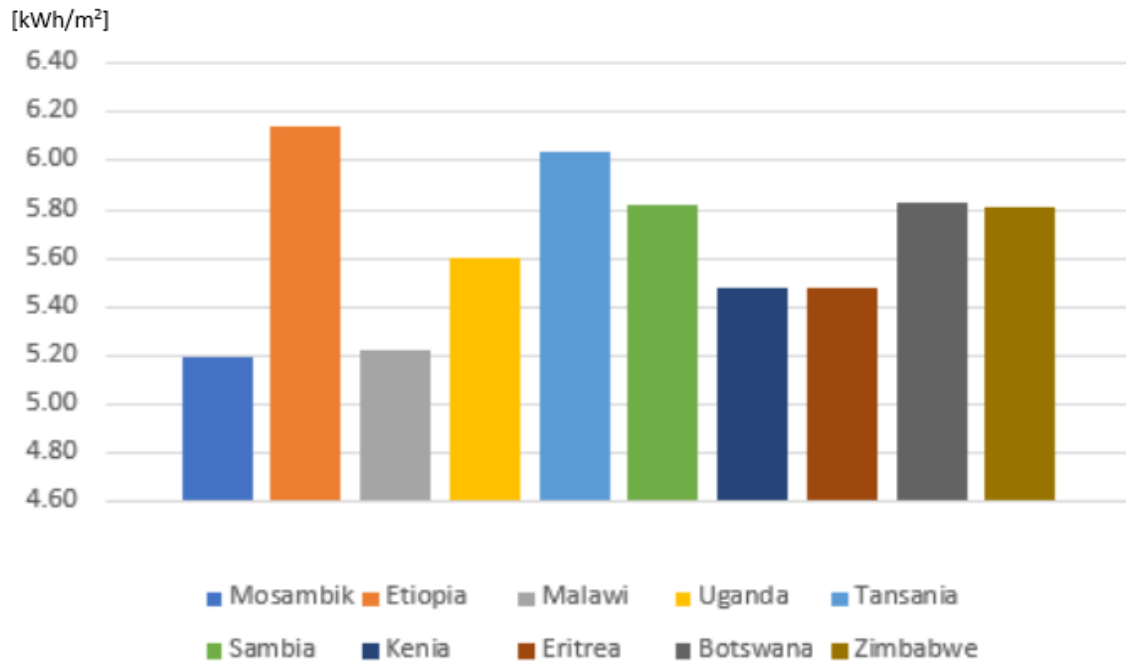
Koska kulutuksen mitoitus perustuu pieneen otantaan, ja keskiarvoihin, annetaan päiväkulutukselle vaihteluvaraa asettamalla se kilowattituntiin päivässä.

4.3 Simuloinnit

Akun ja aurinkopaneelien mitoitus toteutetaan simuloimalla erilaisia kokoonpanoja samalla päiväkulutuksella HOMER Pro-ohjelmalla. Päiväkulutuksessa on oletettu, että ruokaa tehdään kaksi kertaa päivässä, klo 11.30 ja klo 18.30, ja energiaa käytetään päivässä 1 kWh. Simuloinnin tuloksista tarkastellaan akkujen kapasiteetin tasoa eri hetkillä. Kokoonpanojen vertailutasoksi valitaan säteilytehoa heikoimmin tuottava kuukausi, ja simulointituloksien pohjalta valitaan moduuliteholtaan, sekä akkukapasiteetiltaan pienin vaatimukset täyttävä kokoonpano.

Simuloitava alue

Työn aihe käsittää koko Saharan eteläpuolisen Afrikan, mutta alue on laaja, ja auringon tuottama keskimääräinen säteilyteho vaihtelee jonkin verran alueella. Alue rajataan 10:een maa-seutuvaltaiseen Saharan eteläpuolisen Afrikan maahan, joissa merkittävä osa väestöstä elää köyhyysrajan alapuolella [19], ja selvitetään simuloimalla vähiten auringosta säteilytehoa saava maa. Kuvassa 4.3 keskimääräisiä päivittäisiä säteilytehoja valitulta alueelta.



Kuva 4.3 Keskimääräisiä päivittäisiä säteilytehoja valituista Afrikan maista

Tuloksien perusteella valitaan simuloitavaksi maaksi Mosambik. Simuloitavan alueen sijainti kartalla kuvassa 4.4.



Kuva 4.4 Simuloitavan alueen sijainti kartalla

Simuloinnin kokoonpanot

Simulointi tehdään neljällä eri kokoonpanolla:

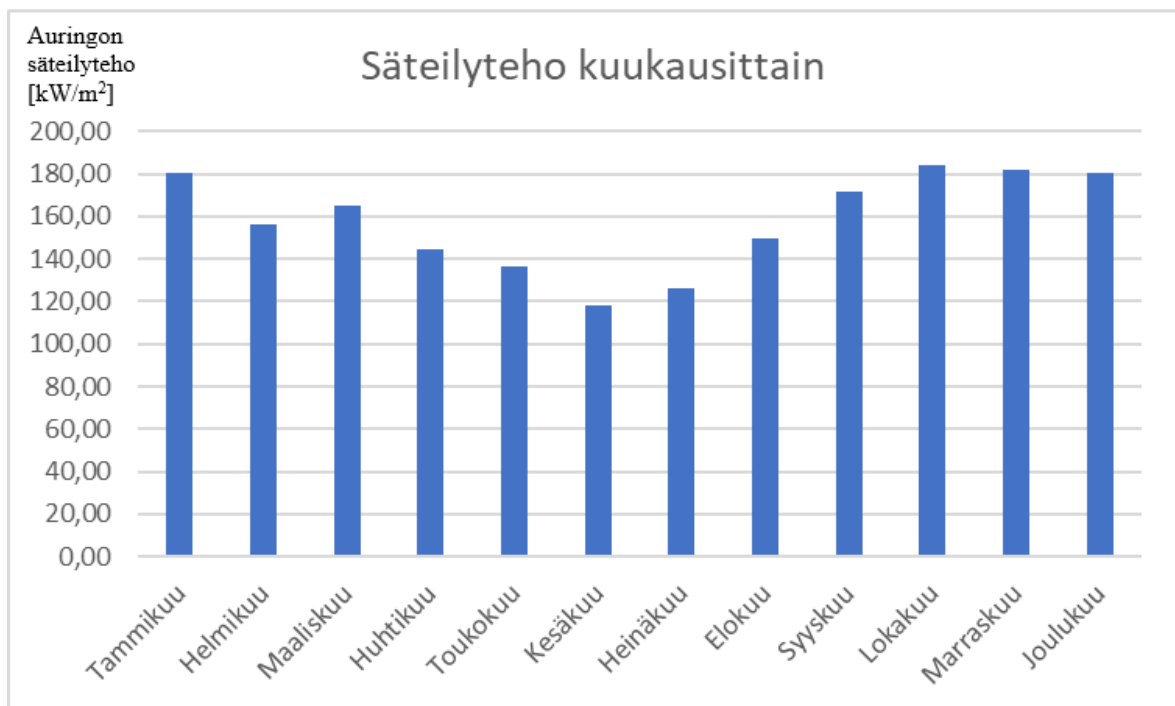
- Kokoonpano 1: Kaksi 0,840 kWh akkua, 280 W paneeli.
- Kokoonpano 2: Kaksi 0,840 kWh akkua, kaksi 280 W paneelia.
- Kokoonpano 3: Kaksi 1128 kWh akkua, 280 W paneeli.
- Kokoonpano 4: Kaksi 1128 kWh akkua, kaksi 280 W paneelia.

Kaikissa kokoonpanoissa on lisäksi käytetty 2 kW vaihtosuuntaajaa, sekä MPPT:tä.

Kokoonpanoista valitaan se, joka pienimmällä paneeliteholla ja akkukapasiteetilla pysyy akun varaustasolla 60 – 100 % vähintään $\frac{3}{4}$ ajasta huonoiten säteilytehoa tuottavan kuukauden aikana.

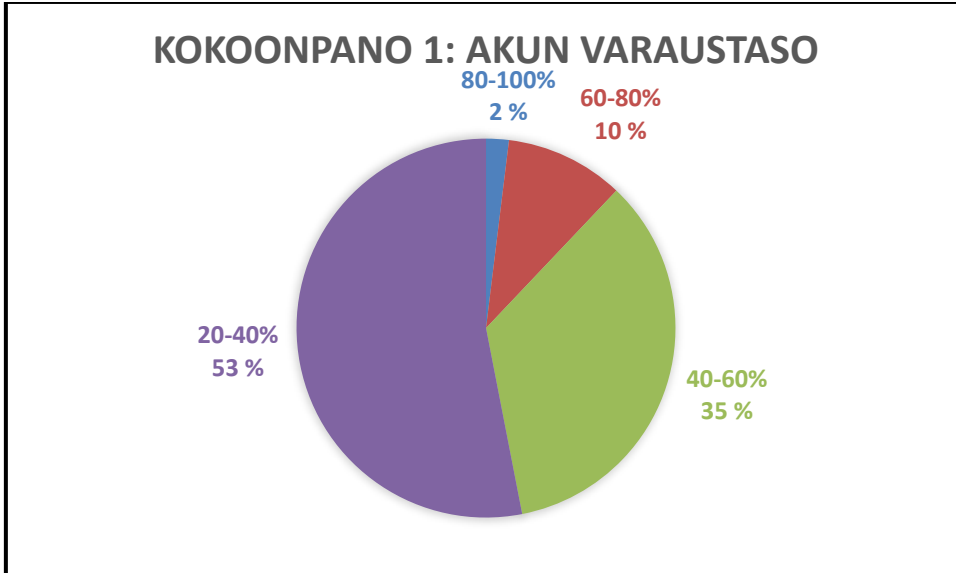
Tulokset

Kuvassa 4.5 esitellään simulointeihin perustuvia tuloksia eri kuukausien säteilytehoista Mosambikissa. Tuloksien perusteella kesäkuu on huonoiten säteilytehoa tuottava kuukausi, joten kesäkuu valitaan kokoonpanojen vertailukuukaudeksi.



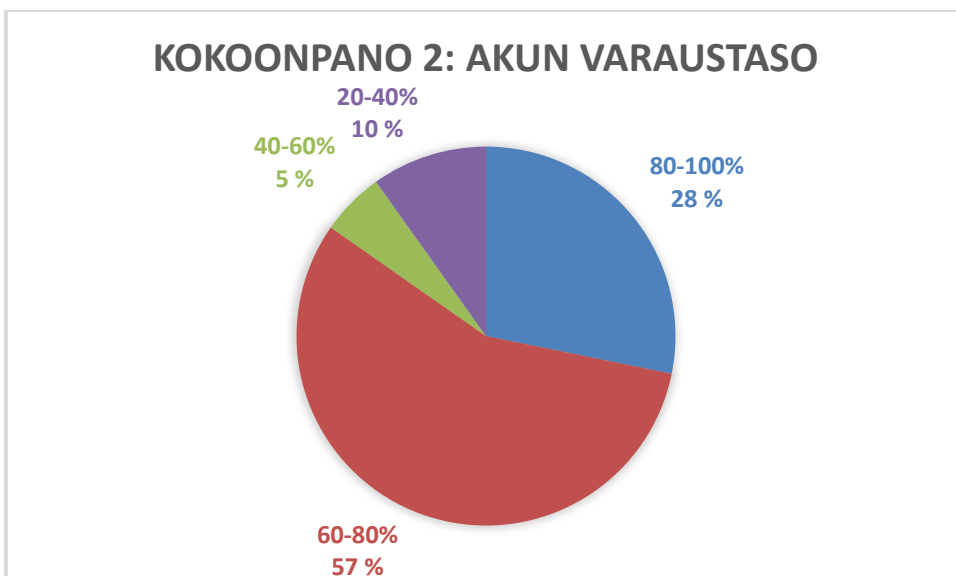
Kuva 4.5 Auringon säteilyteho kuukausittain Mosambikissa.

Kuvasta 4.6 nähdään, että kokoonpanolla 1, kesäkuun aikana, akkujen varaustaso on 53 % ajasta tasolla 20-40 %, 35 % ajasta tasolla 40-60 %, 10 % ajasta tasolla 60-80 %, ja vain 2 % ajasta tasolla 80-100 %. Vastaavat luvut kokoonpanoille 2-4 nähdään kuvista 4.5 - 4.7.

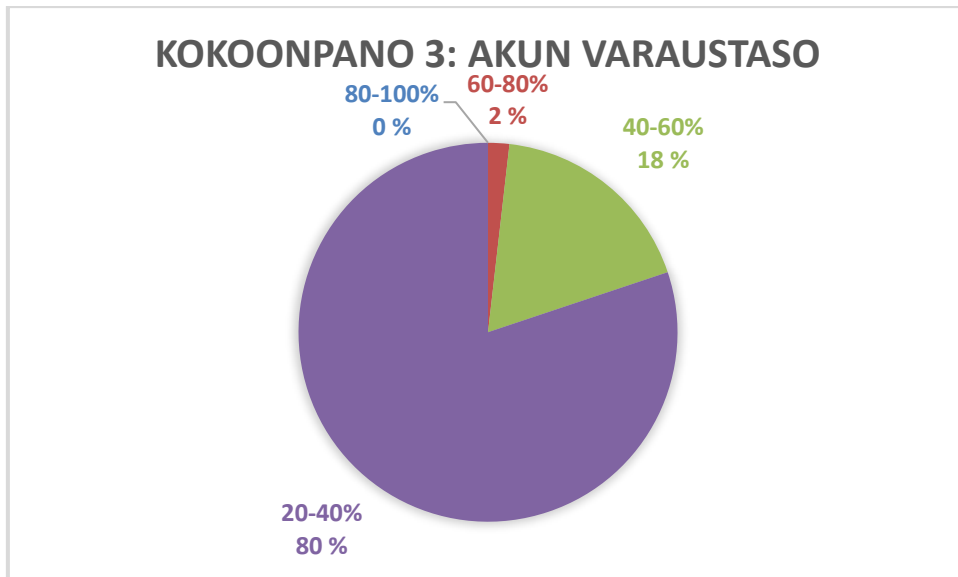


Kuva 4.6 Akun varaustaso kokoonpanossa 1 kesäkuun aikana.

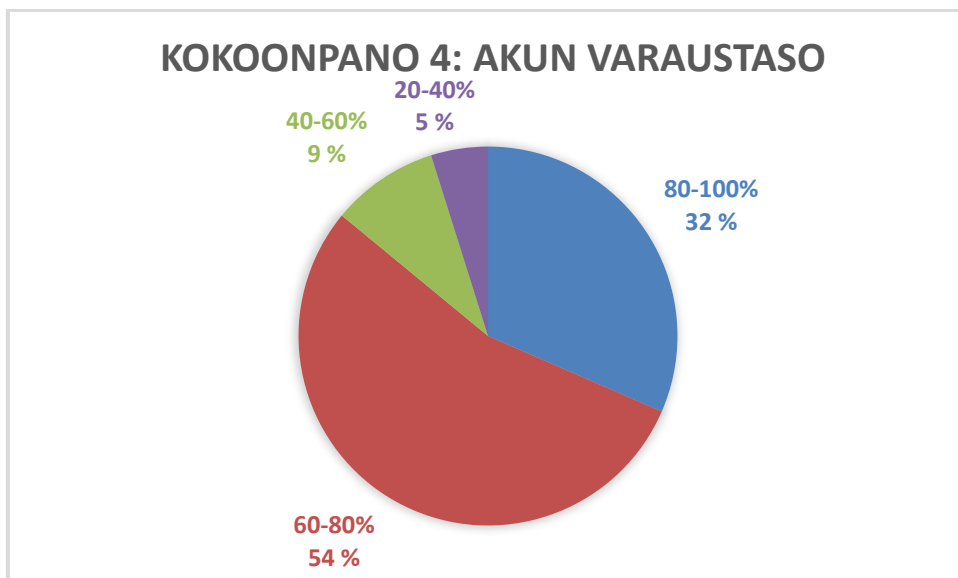
Kuvista 4.7 – 4.9 voidaan havaita, että kokoonpanossa 1 akun varaustaso on 88 % ajasta alle 60 % tason, ja kokoonpanolla 3 vastaava luku on jopa 98 %. Tällä perusteella molemmat kokoonpanot hylätään, ja otetaan kokoonpanot 2 ja 4 jatkotarkasteluun.



Kuva 4.7 Akun varaustaso kokoonpanossa 2 kesäkuun aikana.

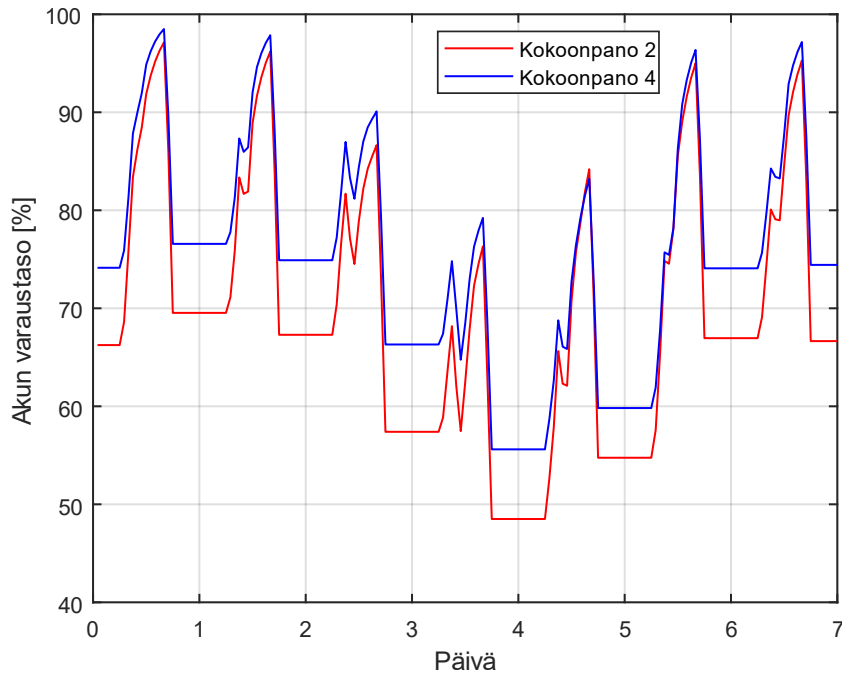


Kuva 4.8 Akun varaustaso kokoonpanossa 3 kesäkuun aikana.



Kuva 4.9 Akun varaustaso kokoonpanossa 4 kesäkuun aikana.

Kuvassa 4.10 on vertailtu kokoonpanojen 2 ja 4 keskimääräistä viikkoa kesäkuussa akun varaustason perusteella.



Kuva 4.10 Keskimääräinen kesäkuun viikko kokoonpanoilla 2 ja 4.

Kokoonpanon 2 varaustaso jää jokaisena päivänä kokoonpanoa 4 alhaisemmaksi, pysyen kuitenkin kuutena päivänä seitsemästä yli 50 %:ssa. Kokoonpanon 4 varaustaso pysyy huonimpana päivänä alueella 55-80 %.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaustulosten ja simulointien perusteella yhden paneelin energiantuotto ei ole riittävä keskimääräisen perheen ruoanlaittotarpeisiin. Kahdella 280 W paneelilla saatiin kuitenkin tyydyttäviä tuloksia molemmissa akkujen kapasiteettiluokissa. Päiväkulutuksen pysyessä tasaisesti yhden kilowattitunnin tasolla, on kahdesta 0,840 kWh akusta koostuva akusto riittävä päivittäiseen käyttöön. Päiväkulutuksen noustessa, tai useamman päivän energiavaraston ollessa tarpeellinen, tulee akkujen kapasiteettia nostaa. Vaihtosuuntaajan valinta perustuu täysin induktiotasolta vaadittavaan tehoon. Induktioitasoa voidaan käyttää myös huomattavasti pienemmillä tehotasoilla, kuin tässä työssä käytetyillä, energiankulutuksen muuttumatta mainittavasti.

Järjestelmän komponenttien mitoituksista tulee kuitenkin ottaa huomioon se, että ne perustuvat vahvasti keskiarvoihin, ja esimerkiksi päivän aikana ruoanlaittoon kuluva energiamäärä voi vaihdella kotitalouksittain paljonkin. Tässä työssä mitoitettu järjestelmä kuvaa riittävää minimitasoa keskimääräisessä perheessä.

6. YHTEENVETO

Työn tavoite oli suunnitella ja mitoittaa puhtaasti aurinkosähköllä toimiva ruoanlaittojärjestelmä Saharan eteläpuolisen Afrikan olosuhteisiin keskimääräiselle perheelle. Työssä tutkittiin aurinkosähkön, sähkömagneettisen induktion sekä akkujen teoreettista taustaa. Energiamittauksia tehtiin erikseen keittämällä vettä induktiotasolla ja valurautatasolla ja induktiotaso todettiin energiatehokkaammaksi. Myös eristyksen vaikutusta energiankulutukseen tutkittiin, ja todettiin sen pienentävän energiankulutusta valurautatasolla 17 % ja induktiotasolla 13% . Mittaustuloksien ja kirjallisuuden pohjalta valittiin keskimääräiseksi päivittäiseksi kulutukseksi 1 kWh simulointeja varten. Järjestelmään valittiin vaihtosuuntaaja induktiotason tehon perusteella, ja simuloimalla määritettiin aurinkopaneelien tehoksi 280 W ja lukumääräksi kaksi. Akustoksi valittiin kaksi 0,840 kWh akkua.

LÄHTEET

- [1] Matsika, R. & Erasmus, B. F. N. & Twine, W. C. Double Jeopardy: The dichotomy of fuelwood use in rural South-Africa. *Energy Policy*, 2013. Vol. 52. S. 716-725. ISSN 0301-4215.
- [2] Tucho, G. & Nonhebel, S. Bio-wastes as an alternative household cooking energy source in Ethiopia. *Energies*, 2015. Vol 8:9. S. 9565-9583. ISSN 1996-1073.
- [3] Adkins, E. & Ooppelstrup, K. & Modi, V. Rural household energy consumption in the millennium villages in Sub-Saharan Africa. *Energy for Sustainable Development*, 2012. Vol. 16:3. S. 249-259. ISSN 0973-0826.
- [4] Tucho, G. T. & Weesie, P. D. M. & Nonhebel, S. Assessment of renewable energy resources potential for large scale and standalone applications in Ethiopia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. Vol. 40. S. 422-431. ISSN 1364-0321.
- [5] Demtröder, W. *Atoms, Molecules and Photons – An Introduction to Atomic-, Molecular-, and Quantum-Physics*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 571 s. ISBN-10 3-540-20631-0.
- [6] Goetzberger, A. & Hoffmann, V.U. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 232 s. ISBN 3-540-23676-7. SARJA

- [7] Ahoranta, J. Sähkötekniikka. 15.-16. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy, 2017. 336 s. ISBN 978-952-63-5109-4.
- [8] Malm, J. Inclusion of substances of very high concern in the Candidate List for eventual inclusion in Annex XIV. European Chemicals Agency, 2018. [Viitattu 19.2.2019]. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/documents/10162/61ac8d81-6ea2-6ad0-ffef-95037c9182ce>
- [9] Tong, S. J. & Same, A. & Kootstra, M. A. & Park, J. W. Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. Applied Energy, 2013. Vol. 104. S. 740-750. ISSN 0306-2619.
- [10] Martinez-Laserna, E. & Gandiaga, I. & Sarasketa-Zabala, E. & Badeda, J. & Stroe, D.-I. & Swierczynski, M. & Goikoetxea, A. Battery Second Life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. Vol. 93. S. 701-718. ISSN 1364-0321.
- [11] Martinez-Laserna, E. & Sarasketa-Zabala, E. & Sarria, I. V. & Stroe, D.-I. & Swierczynski, M. & Warnecke, A. & Timmermans, S. G. & Goutam, S. Technical Viability of Battery Second Life: A Study From the Ageing Perspective. IEEE Transactions On Industry Applications, 2018. Vol. 54:3. S. 2703-2713. ISSN 0093-9994.
- [12] Ahmadi, L. & Young, S. B. & Fowler, M. & Fraser, R. A. & Achachlouei, M. A. A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017. Vol. 22:1. S. 111-124. ISSN 1614-7502.
- [13] Ida, N. Engineering Electromagnetics. 3rd ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 1046 s. ISBN 978-319.07806-9 (eBook).
- [14] Silvonon, K. Elektroniikka ja sähkötekniikka. Gaudeamus Oy, 2018. 504 s. ISBN 978-951-672-443-3(pdf).
- [15] El-Mashad, H. M., Pan, Z. Application of Induction Heating in Food Processing and Cooking. Food Engineering Reviews, 2017. Vol 9:2. S. 82-90. ISSN 1866-7929.
- [16] Lucia, O. & Maussion, P. & Dede, E. & Burdio, J. Induction Heating Technology and It's Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 2014. Vol. 29:1. S. 2509-2520. ISSN 0278-0046.
- [17] Adkins, E. & Tyler, E. & Wang, J. & Siriri, D. & Modi, V. Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. Energy for Sustainable Development, 2010. Vol. 14:3. S. 172-185. ISSN 0973-0826.
- [18] Diaz-Gomez, J. & Ramos, A. J. & Zhu, C. & Martin-Belloso, O. & Soliva-Fortuny, R. Influence of cooking conditions on carotenoid content and stability in porridges prepared from high-carotenoid maize. Plant food for human nutrition, 2017. Vol. 72:2. S. 113-119. ISSN 1573-9104.

[19] Karekezi, S. & Kithyoma, W. Renewable energy strategies for rural Africa: is a PV-led renewable energy strategy the right approach for providing modern energy to the rural poor of sub-Saharan Africa? *Energy Policy*, 2002. Vol. 30:11. S. 1071-1086. ISSN 0301-4215.